

I Programmi didattici 1985 per la scuola elementare sono innovativi in quanto danno un posto eminente all'insegnamento delle scienze, ma nel contempo non forniscono indicazioni su come realizzare un investimento educativo a lungo termine, approfondito e soprattutto integrato. Il discorso vale anche per la Scuola materna e per la Scuola media inferiore.

La collana si propone principalmente di colmare questa lacuna e, insieme, di evitare l'indottrinamento disciplinare, di offrire un'alternativa alla disseminazione di unità didattiche preconfezionate e non coordinate, di contribuire fattivamente alla riconversione dei docenti della scuola di base.

Dal progetto iniziale, alla realizzazione e alle operazioni di verifica, ogni itinerario di lavoro è frutto di una stretta collaborazione tra esperti universitari e docenti delle scuole materne, elementari e medie.

Gli Autori fanno parte di gruppi di ricerca didattica costituiti presso diversi istituti universitari di fisica e tutti hanno partecipato o partecipano, a diverso titolo, a ricerche e a sperimentazioni sotto l'egida del CNR (Progetto T.I.D.: Tecnologia e innovazione didattica).

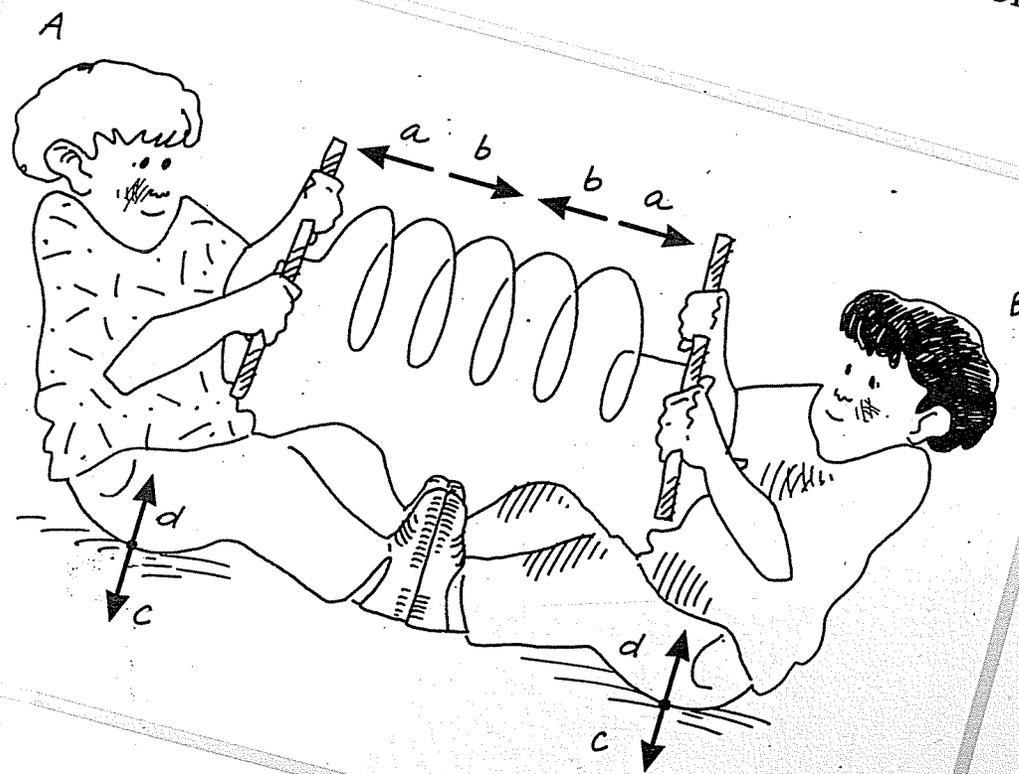
Le linee di lavoro proposte dalle "Guide alla cultura scientifica di base" sono realizzabili nel contesto normale delle classi e con costi contenuti e comunque sempre sopportabili dai Consigli di Circolo e di Istituto.

strumenti
guida per la cultura
scientifica di base

M. Gagliardi, G. Gallina, P. Guidoni, S. Piscitelli

FORZE, DEFORMAZIONI, MOVIMENTO

Un itinerario di raccordo fra Conoscenza Comune
e Conoscenza Scientifica per il secondo ciclo della scuola
elementare e per la scuola media



FORZE, DEFORMAZIONI, MOVIMENTO

EMME EDIZIONI

QL 51014

L. 18.000 (IVA INCLUSA)

Questo volume spravisto del talloncino a fronte è da considerarsi copia di SAGGIO CAMPIONE GRATUITO, fuori commercio. Esente da:
— I.V.A. (D.P.R. 26/10/72 n. 633, art. 2 lett. d);
— bolla di accompagnamento (D.P.R. 6/10/78, art.4, n. 6).

AA.VV.
FORZE, DEFORMAZIONI, MOVIMENTO
Emme Edizioni S.p.A.

EMME EDIZIONI

EMME EDIZIONI

della Petrini Junior S.p.A.
Via Bardonecchia, 63 - Torino

Direttore editoriale: Sergio Bosonetto
Coordinamento scientifico: Paolo Guidoni

Redazione: Monica Martinelli
Fotocomposizione: COMP2
Ufficio Tecnico: Barbara Cunsolo
Stampa: Istituto Grafico, Bertello - Borgo San Dalmazzo (CN)

Progetto grafico di copertina: Anna Maria Talanti

Proprietà letteraria e scientifica riservata
© 1989 EMME EDIZIONI
Petrini Junior S.p.A. - Torino
1ª edizione: settembre 1989

TUTTI I DIRITTI RISERVATI

I diritti di traduzione, di riproduzione e di adattamento totale o parziale e con qualsiasi mezzo (compresi le copie fotostatiche, i film didattici e i microfilm) sono riservati per tutti i Paesi.

Presentazione

L'educazione scientifica di base, cioè la formazione e l'organizzazione delle conoscenze e dei modi di pensare sui fatti di realtà nell'ambito della scuola dell'obbligo, ha assunto nel corso degli ultimi anni un ruolo sempre più centrale nella progettazione e nella pratica educativa. Ci si rende sempre più conto, infatti, di quanto la capacità di mobilitare, di coordinare e sviluppare le dimensioni cognitive necessarie alla comprensione dei fatti naturali di ogni tipo, costituisca da un lato una componente culturale autonoma e insostituibile; da un altro, un potente e continuo stimolo e supporto alla costruzione di conoscenza individuale; e, infine, un urgente obiettivo sociale nel rendere le persone più capaci di gestire operativamente, piuttosto che subire, la complessità e variabilità del mondo reale. Espressioni diverse di questa crescente consapevolezza non sono mancate in Italia: anche se, più volte, la carenza di una cultura scientifica di base nella maggioranza dei cittadini, e quindi degli insegnanti e dei legislatori, ha portato (e porta) a sviluppi e sbocchi ambigui e contraddittori.

I nuovi programmi della scuola elementare, per esempio, hanno posto l'Italia in una posizione che sulla carta è d'avanguardia, anche rispetto a molti paesi europei (basta fare un confronto con i quasi contemporanei programmi francesi): l'educazione "scientifica", cioè l'imparare a pensare e agire sui fatti del mondo, costituisce uno dei cinque poli, fondamentali e culturalmente autonomi, della formazione elementare. D'altra parte, si sente il bisogno di raccordare seriamente i nuovissimi programmi elementari con i pur recenti programmi della scuola media: anch'essi carichi, a loro tempo di potenzialità innovative che ora vediamo generalmente disattese; anch'essi al loro interno mancanti di una "integrazione" (p. es. fra scienze e matematica) invocata solo a parole, e poi nella pratica demandata alla buona volontà di insegnanti che si trovano a dover risolvere problemi sproporzionati alle forze e progettualità individuali. Ma sia nei programmi della scuola elementare che in quelli della media sembra mancare l'indicazione forse più necessaria, emersa con evidenza crescente anche dalle ricerche dell'ultimo decennio: come realizzare un investimento educativo a lungo termine (progettato e programmato su scala di anni), approfondito (privilegiando alcuni argomenti, su cui capire anche "cosa vuol dire capire"), fortemente integrato (non si possono "applicare" competenze linguistiche, o matematiche, ad argomenti di scienze, né viceversa; conoscenze fenomenologiche diverse, conoscenze disciplinari e conoscenze formali possono solo formarsi, e precisarsi, in stretta interazione reciproca).

Di fatto, l'educazione scientifica di base è da tempo caratterizzata da una notevole quantità di sforzi sul piano sia della sperimentazione autonoma (da parte di insegnanti, singoli o a gruppi) sia della ricerca, per lo più appoggiata a piccoli gruppi di universitari. Molti di questi sforzi possono essere accomunati dalla ricchezza dei risultati ottenuti; dalla loro sostanziale episodicità (temporale, spaziale, di argomento); dalla mancanza di efficace comunicazione e scambio (aggiornamenti, incontri e convegni, di ogni tipo, non sono risultati adatti né sufficienti ad innescare processi di sviluppo coerente); da una sistematica ostilità da parte della struttura burocratico-organizzativa (scolastica e universitaria), che a lungo si è rifiutata sia di sostenere adeguatamente tali sforzi (selezionandoli, indirizzandoli, finanziandoli), sia di diffondere le acquisizioni, e utilizzarne le indicazioni.

Contemporaneamente, si è venuta sempre più esplicitando la consapevolezza della difficoltà ed enormità di quel compito di "aggiornamento-riconversione" di buona parte degli insegnanti che sempre più appare come la principale strozzatura a monte di qualunque reale cambiamento.

Questa raccolta di "guide per la cultura scientifica di base" vuole mettere a disposizione degli insegnanti della scuola dell'obbligo alcune proposte di lavoro, sviluppate e sperimentate negli anni passati nell'ambito di vari gruppi di ricerca italiani. Si spera così di sollecitare e appoggiare un processo di rinnovamento che oltrepassi sia l'aggiornamento-indottrinamento disciplinare lontano dalla dinamica operativa e cognitiva che è necessario innescare in classe, sia la pura disseminazione di unità didattiche preconfezionate e reciprocamente non coordinate.

Come è facile verificare anche attraverso una superficiale esplorazione, le guide presentate sono fra loro molto diverse; prima di commentarne le differenze, e il loro significato, è tuttavia opportuno sottolineare alcuni caratteri comuni.

* La costruzione iniziale di ogni proposta di lavoro, la sua sperimentazione in classe, la sua riorganizzazione e presentazione finale è sempre appoggiata ad una stretta collaborazione fra "esperti" universitari di vari settori disciplinari ed insegnanti, gli uni e gli altri impegnati in un lavoro di ricerca sulla comprensione e la didattica di argomenti di scienze. Questo significa che, da un lato, le varie proposte sono state messe a punto attraverso un'interazione pluriennale – spesso difficile, sempre feconda – fra ragazzi, insegnanti e ricercatori; dall'altro, che si è cercato di renderne la presentazione il più possibile autonoma dal contesto particolare in cui esse si sono sviluppate, e quindi più facilmente utilizzabile da altri insegnanti impegnati nel cambiamento didattico.

Tutte le proposte investono un'area di esperienza fenomenologica, conoscenza scientifica, rappresentazione ed espressione abbastanza vasta; tutte cercano di mostrare, al loro interno, tracce e modalità di percorsi possibili, con livelli di specificità e generalità assai diversi. In ogni caso, tuttavia, rimane la necessità che tali percorsi vengano specificamente definiti e concretizzati attraverso il lavoro quotidiano degli insegnanti, diventando così reali percorsi di crescita di conoscenza per ragazzi di condizioni culturali e ambientali differenti. Per questo motivo tutte le proposte sono rivolte agli insegnanti, e ne sollecitano e investono la professionalità di mediatori creativi di trasmissione culturale.

In particolare, tutte le proposte sottolineano (ciascuna in modi diversi, più o meno diretti e impliciti) quattro aspetti dell'insegnamento la cui integrazione sembra indispensabile perché si possa insegnare, e si possa imparare, con significato:

Competenza pedagogica differenziata: è necessario non solo saper "stare" con i ragazzi – o, più banalmente, saperli "tenere" – è necessario imparare a farlo in modi che siano adatti a definire e chiarire cosa si sta facendo, e perché, e come lo si può fare. Non può esistere una pedagogia (né una programmazione, né una valutazione...) indifferenziata: servono modi di gestire l'interazione fra le persone, e fra le persone e le cose, adatti agli obiettivi che di volta in volta ci si propone di conseguire; non si può "fare" la biologia come la fisica,

la fisica come la matematica, le scienze come la grammatica, e così via; non si può gestire allo stesso modo con i ragazzi un argomento da iniziare o un argomento da approfondire.

* Competenza disciplinare differenziata e integrata: è necessario, per costruire nei ragazzi atteggiamenti positivi riguardo alla conoscenza del mondo (alle scienze), che l'insegnante abbia, e soprattutto sia disponibile ad acquisire, una "conoscenza del mondo" riguardo agli argomenti trattati che abbia spessore e significato culturale anche al di là delle immediate utilizzazioni in classe. Questo non implica (soltanto) conoscenza di schemi disciplinari garantiti da un manuale (spesso incapaci di presa su come di fatto "vanno le cose"); né (soltanto) padronanza di schemi di attività garantiti da successo sul piano della motivazione (spesso incapaci di far vedere cosa c'è di generale "dietro" le sequenze di fatti e operazioni); né infine (soltanto) analisi statistica di test oggettivi (al posto di attività, discussioni, interpretazioni). Significa, nello spirito in cui queste guide sono scritte, porsi in posizione di mediazione attiva, sostanzialmente unitaria nei modi e negli scopi per tutta la scuola di base, fra come vanno le cose, come la pensa e la vede il ragazzo, come le ristruttura operativamente e concettualmente la cultura adulta.

* Competenza di programmazione e strutturazione dell'intervento didattico e dell'attività di classe: sulla base di quanto detto nei punti precedenti, i percorsi di crescita di conoscenza attraverso l'interazione (adulto – ragazzo – mondo dei fatti – mondo delle spiegazioni) devono materializzarsi in strutture e sequenze di cose da dire, da far succedere, da vedere... da ricordare. Anche in questo caso, se vengono suggeriti vari modi possibili di organizzare l'iter didattico, resta ineliminabile la responsabilità dell'insegnante nel progettare, sulla base delle condizioni oggettive in cui si trova, cosa e come fare per realizzare il percorso suggerito; nell'aggiustare continuamente il progetto sulla base di quello che, di fatto, in classe succede.

Competenza di "ascolto" – in senso lato – nei confronti dei ragazzi: la ricerca, e l'esperienza, indicano questo aspetto come determinante per l'esito dell'intervento didattico. È infatti indispensabile per l'insegnante sapere quali sono le perplessità, i dubbi, le sicurezze evocate dall'argomento intorno a cui si lavora; sapere cosa i ragazzi pensano e sanno (ciascuno a suo modo) e come essi cambiano (o non cambiano – ciascuno a suo modo) il loro sapere nel corso del tempo. Ed è altrettanto indispensabile per i ragazzi poter constatare (ascoltare... vedere...) che gli altri ragazzi non "sanno" esattamente le stesse cose, e che la discussione e il cambiamento a partire dalle diversità sono possibili, e utili.

(Naturalmente, gli esempi più o meno ampi di cose dette e fatte dai ragazzi riportati nelle proposte non sono da intendersi come modelli da riprodurre, ma come suggerimenti per interpretare e valorizzare quello che normalmente accade in classe.

Tutte le proposte di lavoro si riferiscono, deliberatamente, a tipi di fatti e fenomeni molto comuni nella vita quotidiana di ognuno: tutte concordano nel sottolineare che l'educazione scientifica, responsabile non solo di porre le basi della conoscenza del mondo ma anche di costruirne i significati, non può che partire da una analisi di evidenze dirette. D'altra parte è ovvio che non si può, a scuola, ri-costruire collettivamente e razionalmente la conoscenza su "tutto": perciò le proposte, tutte, possono acquistare nella loro realizzazione un valore emblematico – approdando, sostanzialmente, non solo a sapere meglio certe determinate cose, ma anche a sapere "cosa vuol dire sapere le cose". Se un approccio di questo genere ha successo, deve diventare possibile acquisire molte altre conoscenze in maniera assai più rapida (dalla semplice lettura e discussione di libri, per esempio) ma altrettanto significativa.

Tutte le guide si riferiscono, nell'esemplificazione scelta, a una fascia di età-scolarità larga, ma abbastanza definita (grosso modo scuola materna/primo ciclo elementare; secondo ciclo elementare/inizio di scuola media; scuola media/inizio biennio secondaria). Tuttavia, in quanto rivolte a formare una consapevolezza professionale su problemi di insegnamento che sono largamente indipendenti dall'età di chi apprende, e che comunque

coinvolgono itinerari a lungo termine (da distendere, talvolta, nell'arco di più anni) tutte le proposte si ritengono rivolte ad insegnanti della scuola dell'obbligo, dalla materna alle medie. Come è naturale, ci si aspetta che questo possa provocare alcuni ostacoli, e sollevare alcuni problemi, prevalentemente di tipo disciplinare. La bibliografia citata al termine di ogni volume può forse aiutare a superarne alcuni; resta importante che, a ogni livello della scuola di base, non se ne perda di vista l'essenziale continuità di itinerario cognitivo (DAL PUNTO DI VISTA DEL RAGAZZO): riguardo a quello che si potrà/dovrà imparare "dopo", come a quello che si sarebbe potuto/dovuto imparare "prima".

Restano da dire alcune parole sulle differenze fra le varie proposte presentate in queste guide. Saranno evidenti a chi ne confronterà più di una: dal modo di "tagliare" e strutturare l'argomento, al modo di proporre l'organizzazione didattica, al modo di affrontarne i legami con il pensiero "formale" (linguaggio, matematica, rappresentazione... ecc.) e con quello "concreto"; fino alle diverse interpretazioni - ideologiche, teoriche e pragmatiche - dei modi e degli scopi dello spiegare e del capire, implicite nelle diverse proposte.

Queste differenze corrispondono a un dato di fatto: gli itinerari di lavoro sono stati costruiti e verificati negli anni passati, all'interno di gruppi diversi, in condizioni e con ipotesi di ricerca diverse. Un reciproco confronto e coordinamento è avvenuto all'interno del Progetto T.I.D. del C.N.R. che ha condotto a un insieme più coerente di proposte. Ma, nell'offrire agli insegnanti questo materiale, non reso artificialmente omogeneo in un unico stile secondo un unico schema, pensiamo che indicazioni utili possano venire anche dalla constatazione, ed esemplificazione, che ci sono modi diversi per fare le cose: e che, probabilmente, da ciascuno di essi c'è qualcosa da imparare.

Resterebbe da affrontare il complesso problema della "valutazione": come giudicare la validità delle proposte, della loro gestione da parte dell'insegnante, delle sollecitazioni al lavoro di classe che ne possono derivare, della loro appropriazione e rielaborazione individuale. A questo aspetto gli insegnanti sono giustamente sensibili: e su di esso ricercatori con diversa competenza ed esperienza sono, non a caso, discordi. Sembra tuttavia che si possa trarre dall'insieme di queste proposte una indicazione comune: che la valutazione, in tutti i suoi aspetti, non può che essere strettamente intrecciata alla progettazione e allo sviluppo del lavoro: organizzata, nello scopo, nel modo e nei mezzi, in connessione a quello che giorno per giorno, anno per anno, in classe si cerca di far succedere, e di fatto succede. Se però non può esistere una prassi universale di valutazione, buona per tutti i contenuti e metodi di lavoro didattico, certamente servono criteri per capire l'efficacia di quello che si fa, e si potrebbe fare: ed è possibile, determinando obiettivi complessivi da raggiungere attraverso percorsi a lungo termine, scandire obiettivi parziali di comprensione, di conoscenza, di attivazione di abilità che possono essere realizzati e verificati lungo il percorso: tenendo conto dei fatti come sono, e dei ragazzi come sono.

Forse, è troppo poco come indicazione concreta: ma anche questo, come tutti gli altri, è solo un discorso per cominciare.

Ottobre 1986

Paolo Guidoni

Indice

Presentazione	pag. III
Indice	7
Premessa	9
Introduzione	
1. L'educazione scientifica nella scuola di base	11
2. Come lavorare in classe	13
3. L'argomento della guida	15
4. La sperimentazione in classe	17
5. Come leggere la guida	19
Capitolo 1. Sorgenti di forze	
1.1. Introduzione	21
1.2. Forza ed energia: due modi distinti e correlati di guardare gli stessi fenomeni	21
1.3. Un modello per la descrizione delle interazioni fra sistemi macroscopici in termini di azioni di forze e scambi di energia meccanica	25
1.4. Le variazioni di forma come sorgenti di forze	31
1.5. I campi come sorgenti di forze	34
1.6. Il movimento relativo come sorgente di forze: attrito dinamico e resistenza del mezzo	41
1.7. I motori come sorgenti di forze	45
1.8. Cenni alle variazioni di movimento come sorgenti di forze	50
Capitolo 2. Forze elastiche	
2.1. Introduzione	53
2.2. Attività e conoscenze propedeutiche alla proposta presentata nella guida	56
2.3. Attività introduttive: discussione iniziale e prime esperienze	58
2.4. Confronto fra forze elastiche, forze muscolari, forze peso	61
2.5. La simmetria delle forze elastiche	66
2.6. Il sistema complessivo delle forze agenti	71
2.7. Le leggi cui obbediscono le molle	74
2.8. Collegamenti di molle in serie ed in parallelo	80
2.9. Dal qualitativo al quantitativo: la forma della dipendenza funzionale fra deformazioni e forze	94
2.10. Generalizzazione della relazione deformazioni-forze	96
Capitolo 3. Forze d'attrito	
3.1. Introduzione	101

3.2. Caratteristiche dell'attrito fra corpi solidi	102
3.3. Le cause degli attriti fra solidi	105
3.4. Avvio al lavoro in classe: confronto forze d'attrito-forze muscolari	113
3.5. Confronto tra forze elastiche e forze d'attrito	118
3.6. Proporzionalità tra forza d'attrito e peso	127
3.7. Simmetria di forze - dissimmetria di movimento	130
 <i>Capitolo 4. Le forze d'attrito viscoso: il moto di un corpo nell'aria e nell'acqua</i>	
4.1. Introduzione	135
4.2. Attività iniziali	140
4.3. La proporzionalità	141
4.4. Il problema della velocità: dalle conoscenze dei bambini alla formulazione matematica	143
4.4.1. Relazione spazio/tempo/velocità;	144
4.4.2. Distinzione fra velocità all'istante e velocità media;	145
4.4.3. La misura della velocità media;	145
4.4.4. Dalla velocità media all'andamento della velocità istantanea	146
4.5. Andamento della velocità di un oggetto che cade in un fluido	147
4.6. Introduzione alla dinamica del moto	158
 <i>Capitolo 5. Forze magnetiche</i>	
5.1. Introduzione	163
5.2. Quando fa forza una calamita? Le attività iniziali e il modello "spontaneo" d'interazione magnetica	166
5.3. La costruzione di un nuovo modello	169
 <i>Capitolo 6. Le forze non sono grandezze scalari</i>	
6.1. Introduzione	179
6.2. Attività con i bambini	184
 <i>Conclusioni</i>	
1. Il discorso disciplinare	193
2. La nostra proposta	197
3. La documentazione	198
4. Modi di lavoro in classe	198
 <i>Bibliografia</i>	 201

Premessa

La realizzazione di questo volume è stata resa possibile dai finanziamenti del progetto strategico T. I. D. (Tecnologie e Innovazioni Didattiche) del C. N. R.. Alla attività di ricerca e sperimentazione didattica su cui esso si basa hanno collaborato tutti gli autori all'interno di progetti di ricerca finanziati dal M. P. I. (40% e 60%) e dal C. N. R. (Gruppo Nazionale Didattica della Fisica).

Il volume è stato impostato, discusso ed elaborato in gruppo. A Paolo Guidoni, responsabile dei progetti di ricerca, si deve l'elaborazione dello schema interpretativo della Meccanica, che è alla base di tutto il lavoro svolto, e la revisione del testo. La stesura delle singole parti si deve: per l'Introduzione, il Cap. I e le Conclusioni a Marta Gagliardi per il Cap. IV a Giampiero Gallina per i Cap. II, III, V, VI a Salvatore Piscitelli.

Introduzione

1. L'educazione scientifica nella scuola di base

Un'interpretazione e valutazione della proposta didattica oggetto di questa guida non può prescindere dalla concezione di educazione scientifica che ne è all'origine e rispetto a cui la proposta costituisce un esempio particolare ed emblematico.

Secondo noi svolgere attività di Educazione Scientifica nella scuola dell'obbligo significa guidare gli allievi in una progressiva modificazione dei loro modi di descrivere, interpretare, spiegare i fenomeni del mondo naturale, in modo che possano acquisire una conoscenza sempre più larga ed approfondita man mano che progrediscono nella carriera scolastica.

La conoscenza nasce infatti da un'interazione fra il soggetto conoscente e l'oggetto della sua attività conoscitiva e si traduce nella costruzione di rappresentazioni dell'oggetto stesso che possono essere dei tipi più svariati.

Il fatto che qualcosa abbandonato a se stesso cade può, per esempio, essere rappresentato da una sequenza cinematografica, da una successione di disegni tipo cartone animato, da una frase "qualcosa sta cadendo"; o anche da una tabella di misure di spazi percorsi e tempi impiegati a percorrerli, dall'equazione del moto naturalmente accelerato e via via ..., volendo, fino alla Relatività Generale. Anche un bambino che ancora non sa parlare deve avere una propria rappresentazione della caduta degli oggetti, se è in grado di spostarsi per non essere colpito! Queste rappresentazioni sono tutte diverse fra loro, e diverse da ogni singolo fenomeno di caduta.

Ognuna di esse *schematizza* gli eventi reali, nel senso che tiene conto solo di alcune loro caratteristiche, volta a volta differenti, e le riproduce in una forma diversa da quella originale.

L'essenziale è che, per ogni rappresentazione, ci

sia modo di mettere in corrispondenza alcune delle connessioni che si pongono fra gli aspetti schematizzati con alcune delle connessioni che esistono fra le corrispondenti proprietà degli eventi reali, e che questo garantisca di poter ottenere gli scopi per il raggiungimento dei quali la schematizzazione stessa è stata costruita: dalla padronanza del reale necessario ad un bambino piccolo, fino alla possibilità di costruire aeroplani, satelliti artificiali ...

La corrispondenza fra gli eventi reali e le loro ricostruzioni può dunque situarsi a livelli molto diversi, in particolare se si confrontano le rappresentazioni comuni, che ogni individuo si costruisce per gestire la propria esperienza quotidiana, con quelle che la specie umana si è costruita, all'interno delle varie discipline.

Abbiamo accennato ad una serie di rappresentazioni della caduta di un oggetto con cui tutti abbiamo avuto a che fare ... (teoria della relatività esclusa, ovviamente!): di alcune, quelle pre-verbali, abbiamo perso ogni ricordo, altre le usiamo quotidianamente, altre le abbiamo "solo" studiate a suo tempo, sui libri di scuola; ma quanti ricordano di essersi soffermati a raffrontarne i significati, i rapporti reciproci, i legami con i fatti reali? Di più, chi di questi raffronti ha mai fatto oggetto specifico del proprio studio? Ebbene, secondo noi questo è un obiettivo dell'Educazione Scientifica.

Sin dall'inizio della scolarità ci troviamo di fronte a bambini che si sono già costruiti delle proprie descrizioni del mondo, nel corso delle loro esperienze ed utilizzando le proprie modalità conoscitive. Interpretazioni e modelli di uno stesso fenomeno possono cambiare da bambino a bambino, ma in un numero di modi limitato, per quanto ricco: perché ci sono esperienze che sono le stesse per tutti i bambini, e perché le strategie cognitive di ap-

proccio alla realtà sono anch'esse molto varie, ma finite.¹

A scuola l'allievo deve anzitutto essere messo in grado di esplicitare le conoscenze che si è costruito e di cui spesso neanche lui si è mai reso completamente conto; deve potersi accorgere che ci sono compagni che hanno opinioni diverse; deve poter confrontare con i fatti le diverse rappresentazioni, perché la classe nel suo complesso possa di volta in volta essere impegnata nella ricerca di nuove interpretazioni su cui si possa convenire tutti, che risultino dall'apporto delle abilità e delle conoscenze di ciascuno, e che siano giudicate più rispondenti alla descrizione dei fatti di quanto non lo fossero le idee iniziali dei diversi ragazzi.

Le necessità del confronto con i fatti e dell'aggancio a conoscenze e linguaggio degli allievi obbliga ad un itinerario che segua tappe diverse da quelle caratteristiche della didattica tradizionale. Questa è generalmente orientata alla costruzione del percorso più "economico" e più "semplice" possibile, dove economicità e semplicità vengono giudicate nei confronti dell'organizzazione propria delle singole discipline scientifiche già costruite. Si cerca di individuare una successione lineare di concetti, relazioni, principi ... tali che ognuno dipenda solo dai precedenti e sia necessario per costruire i successivi; e di approntare esperienze "costruite apposta" per illustrarli, verificarli, ricavarli ... a seconda dei casi. Questo conduce spesso al risultato di proporre e discutere in classe situazioni non confrontabili con quelle di cui si ha esperienza quotidianamente e sulle quali si è costruito il proprio bagaglio di conoscenze. Gli atomi e le molecole della Chimica, le cellule della Biologia, i punti materiali della Fisica ... non possono costituire i punti di partenza di un'Educazione Scientifica nel senso che abbiamo illustrato, perché sono troppo lontani dalle evidenze percettive su cui si fonda la conoscenza comune, ed infantile, dei fenomeni naturali. Devono rappresentare invece uno dei punti di arrivo in un percorso tutt'altro che lineare, che nasce "a mezza strada" fra i postulati fondamentali di ogni disciplina e le sue ultime conseguenze e che prosegue in entrambe le direzioni, verso gli uni e le altre.

¹ Un discorso più ampio sull'educazione scientifica di base secondo le linee qui accennate si può trovare in: M. Arcà, P. Guidoni, V. Mazzoli - "Insegnare Scienza", F. Angeli Editore, Milano. Una esemplificazione più puntuale sulle strategie cognitive fondamentali di approccio alla realtà naturale e tecnologica si può trovare nell'articolo: M. Arcà, M. Gagliardi, P. Guidoni, P. Mazzoli "Educazione Scientifica di base come formazione culturale" in "La Fisica nella Scuola", XVI, 1, 1983, pag. 1-13.

Momento per momento si deve aver cura che gli allievi si rendano conto il più possibile delle connessioni fra i propri modi di guardare quello che succede, di intervenire operativamente sui fatti, di descrivere e rappresentare nei modi più vari (a parole e con disegni a tutte le età, con gesti per i più piccoli, con formule e grafici per i più grandi ...) quello che vedono, quello che fanno, quello che pensano. In particolare ciò permetterà loro di distinguere analogie e differenze fra i diversi tipi di rappresentazione e di capire caso per caso quale, o quali, sia il più adatto. Per esempio, potranno capire che il disegno si presta meglio a rappresentare situazioni statiche, in cui è necessario individuare più aspetti contemporaneamente presenti in un complesso (ad es. per confrontare deformazioni di corpi diversi provocate dall'azione dello stesso peso) e che il linguaggio si presta meglio a descrivere una trasformazione nel corso della quale le variabili che caratterizzano il fenomeno considerato cambiano continuamente ("La molla si sta allungando"). Se però si vuol parlare della circolazione del sangue, e degli scambi che avvengono attraverso di esso, sarà bene ricorrere ad entrambi i modi di rappresentazione: al disegno perché evidenzia tutti gli scambi che contemporaneamente si verificano, in ogni istante, in tutte le parti del corpo; al linguaggio perché evidenzia il ciclo continuo del sangue medesimo.

Nel corso dei diversi anni, lavorando via via su aree fenomenologiche diverse, riprendendo a volte a distanza di tempo lo studio degli stessi fenomeni a livelli via via più avanzati, l'allievo si costruirà metodi di indagine e criteri di conoscenza del mondo naturale sempre più raffinati; si renderà conto che la conoscenza avanza attraverso un'incessante costruzione di modelli interpretativi della realtà che non coincidono mai con la realtà stessa; che nuclei inizialmente separati di conoscenze possono via via, allargandosi ed approfondendosi, andare a collegarsi formando reti sempre più complesse; che, viceversa, da un unico nucleo iniziale possono dipartirsi, ad un certo livello di analisi, strade conoscitive completamente separate per cui aspetti che inizialmente appaiono inscindibilmente uniti nei fatti vengono poi studiati separatamente, con metodi diversi, rientrando in discipline diverse. In definitiva, l'allievo potrà rendersi conto contemporaneamente della possibilità umana di conoscere; delle regole cui la costruzione di conoscenza, in particolare scientifica, obbedisce; dei limiti di arbitrarietà che la caratterizzano; del fatto che certe scelte siano

funzionali più agli scopi che nel corso della sua storia l'uomo si prefigge, che a caratteristiche "oggettive" del mondo naturale.

Una concezione di Educazione Scientifica come l'abbiamo illustrata vede, ovviamente, come situazione ottimale in cui realizzarsi quella di una scuola dell'obbligo in cui i vari livelli (dalla scuola dell'infanzia, se possibile, fino al biennio unico delle superiori, se mai ci sarà) siano strettamente collegati, così che passandovi attraverso l'allievo possa effettivamente compiere un unico percorso; e non costituisca tanti "pezzi" separati ed autonomi, in ognuno dei quali si pretende di "studiare un po' di tutto" ricominciando ogni volta daccapo, sia pure ad un livello di maggiore formalizzazione. Riteniamo comunque che anche nella situazione attuale abbia senso un insegnamento del tipo delineato in questa proposta, almeno su qualche area di conoscenza fenomenologica importante e almeno a qualche livello scolastico, in quanto capace di fornire un valore autenticamente culturale, e non meramente specialistico, all'apprendimento nell'area scientifica.

2. Come lavorare in classe

Il modello di Educazione Scientifica esposto richiede che l'attività in classe soddisfi delle precise richieste. Poiché non si vuole che i bambini imparino qualcosa di già confezionato dall'esterno in una forma giudicata opportuna per loro, ma occorre che costruiscano gradualmente nuove conoscenze utilizzando i propri mezzi, va da sé che essi siano i principali protagonisti delle attività di classe. La didattica deve essere quindi fortemente interattiva, centrata sulla discussione e sulle esperienze. La discussione consente di far venire fuori le problematiche, permette l'esplicitazione di quello che si pensa ed il confronto dei diversi modi di vedere e delle diverse interpretazioni, serve a far progredire le capacità di ragionamento e di produzione linguistica, suscita interesse ed attenzione, qualche volta anche accanimento. Può servire ad introdurre un argomento nelle situazioni in cui l'insegnante ritiene opportuno partire da quello che gli allievi pensano piuttosto che da esperienze proposte; può accompagnare l'osservazione e l'esecuzione delle esperienze stesse, indicando in che modo andare avanti; può seguire una fase anche lunga di attività per "tirare le fila" al termine di un lavoro. È in definitiva il principale strumento di crescita collettiva della

classe, rispetto a tutte le dimensioni che abbiamo individuato nel paragrafo precedente.

L'esecuzione di esperienze è altrettanto cruciale. È con i fatti così come succedono che vanno confrontate le diverse opinioni, interpretazioni, ricostruzioni, ed è il confronto con i fatti che consente di cogliere il senso delle schematizzazioni e di affinare i metodi di indagine. Le esperienze in classe devono essere di vario tipo: alcune direttamente collegabili alle esperienze quotidiane, con tutto il loro carico di complessità ed ambiguità, per introdurre alla definizione delle aree fenomenologiche che si vogliono indagare; altre più schematizzate, costruite a partire dalle prime nel momento in cui ci si rende conto che, per approfondire il livello di conoscenza dei fenomeni che si vogliono indagare, è necessario limitare il campo d'indagine, separare tipologie di comportamenti che appaiono ordinariamente sovrapposti creando situazioni in cui essi possono essere separatamente studiati. I ragazzi devono poi avere occasioni per lavorare sia tutti insieme, sia a gruppi limitati, sia individualmente. Non ci sembra il caso di dilungarci sui vantaggi e gli svantaggi di questi tre modi di lavorare, di cui si è già tanto parlato, quanto di insistere, perché essi non siano visti come alternative mutuamente escludentesi, ma come strumenti complementari, che si completano l'un l'altro sia dal punto di vista cognitivo che da quello psicologico e pedagogico.

Il ruolo dell'insegnante in questo quadro è quello di una guida cognitiva che aiuta ogni ragazzo, attraverso la riflessione individuale, la discussione collettiva, il riscontro con l'esperienza, a progredire nella costruzione personale di conoscenza. Egli deve spingere gli alunni a confrontare il proprio modo di pensare e le proprie convinzioni con quelle degli altri, a fare, di fronte ad un "fatto", la propria scelta di opinione e a discuterla con le scelte degli altri. Senza timore, con la consapevolezza che tutte le scelte hanno la stessa dignità, perché in genere fondate su buoni motivi (anche se parziali). Deve aiutare i ragazzi ad esprimersi con un linguaggio semplice, ma sempre più rigoroso, e, quando il linguaggio non è più sufficiente, a passare ad altri codici più potenti, più precisi, ma nello stesso tempo meno versatili, come quello della Matematica, rendendosi conto delle loro potenzialità e dei loro limiti. È poi fondamentale guidare gli alunni e costruire relazioni e confronti fra le varie aree di fenomeni naturali, aiutandoli a scoprire i legami e le analogie, ma anche le differenze; suggerendo come utilizzare le informazioni ricavate ed i modelli co-

struiti nell'analisi di una certa area per indagarne un'altra e come applicare i metodi di indagine e gli strumenti concettuali e formali sviluppati in un settore ad altri campi. In questo modo la conoscenza diventa una costruzione (o ricostruzione) che cresce come un sistema sempre più organizzato.

I bambini dovrebbero poter acquisire anche l'abitudine "educata" a imparare, dalla lettura e dalla riflessione sulle cose, in modo autonomo. È questo un aspetto della creatività che viene spesso ignorato, considerando quest'ultima, riduttivamente, solo come manifestazione di capacità espressiva. L'attività didattica deve pertanto essere condotta in modo da lasciare motivazione, spazio e tempo anche all'analisi individuale delle conoscenze adulte, e deve contenere i necessari elementi di flessibilità per adeguarsi alle esigenze e dei singoli alunni e, di volta in volta, della particolare classe con cui si ha a che fare. Ognuno dovrebbe sentirsi incoraggiato ad apprendere, momento per momento, secondo il suo stile di ragionamento ed attraverso i suoi stessi "errori", dalla raggiunta consapevolezza che i modelli esplicativi che si è costruito risultano insufficienti/inadeguati per spiegare e comprendere un fenomeno o un insieme di fenomeni.

Anche il senso della valutazione cambia. Per quanto riguarda il bambino non si tratta più di giudicare se la risposta, verbale o scritta che sia, sia ogni volta quella "giusta", cioè coincidente con quanto è stato detto dall'insegnante durante la spiegazione, o si trova scritto sul libro. In un libero, ma impegnato, parlare su fatti, situazioni, opinioni ... è molto difficile che esista una "risposta giusta", commisurata non all'interpretazione disciplinare già fatta, ma a quelle che in quel momento sono le possibilità del bambino e le eventuali evidenze della situazione. In genere ci possono essere più risposte, tutte "sensate", cioè coerenti con ciò che si vede, ciò che si fa, ciò che già si sa. Come ce ne possono essere altre più o meno "insensate", perché non coerenti da qualche punto di vista. L'intervento dell'insegnante deve mirare ad aiutare i bambini a distinguere fra questi due tipi di risposte, prima, ed a spingerli a trovare altri modi sensati per andare avanti, poi. Cioè aiutare i bambini a immaginare quali altre esperienze elaborare, di quali altri fatti tenere conto, di quali altre conoscenze già costruite ricordarsi ... per inventare modi di procedere che consentano di confrontare fra loro le varie "risposte sensate". Ogni bambino potrà così essere valutato per quella che è la sua crescita cognitiva durante il percorso scolastico: cioè per come, e quanto, il

suo comportamento operativo, il suo stile di ragionamento, le sue capacità espressive, il suo personale aumento di conoscenze *procedono*. Ad una valutazione di stati di conoscenza, misurata per di più sul solo comportamento verbale, va sostituita una valutazione di processi, che tenga conto di tutte le dimensioni che sono coinvolte nell'attività cognitiva quando essa è applicata alla ricostruzione scientifica del mondo naturale. Dalla valutazione di come procedono i bambini nel loro complesso l'insegnante potrà poi trarre, di riflesso, una valutazione del suo stesso lavoro che lo orienti nel definire volta a volta quali attività proporre.

Abbiamo già detto che il raccordarsi con le possibilità e i percorsi dei bambini richiede flessibilità nell'itinerario didattico: non è possibile preventivare a priori una particolareggiata ed esatta sequenza di lezioni. Si dovrebbe avere ben chiaro cosa si vuole studiare, e dove si vuole arrivare: si dovrebbe avere preventivamente un'idea dei problemi che i bambini possono incontrare, dei tipi di esperienze che potrebbero loro essere proposte, delle grandi linee su cui appare essenziale lavorare, perché si possa costruire un'effettiva comprensione dell'area fenomenologica che si è deciso di studiare. È infatti rispetto agli obiettivi prefissati ed alle aspettative che ci si era costruiti che va giudicato quanto avviene in classe di volta in volta, per poter decidere esattamente cosa fare la volta successiva. E può succedere che si debbano modificare in maniera più o meno sensibile le linee generali del piano di lavoro preventivato, di fronte a comportamenti inaspettati della classe.

Una gestione di classe di questo genere non è semplice, e richiede ad un insegnante un impegno diverso da quello di una gestione tradizionale. L'insegnante si deve infatti costruire varie competenze specifiche, e deve cambiare la visione del proprio ruolo. Può essere per esempio difficile decidere, di fronte alla miriade di cose che i bambini fanno, venire in mente, quali sono importanti e devono costituire oggetto di un successivo lavoro di approfondimento; quali sono importanti in sé, ma marginali rispetto a quello che si sta facendo, per cui possono essere lasciate come problemi aperti da affrontare più in là (od anche eventualmente mai), o divenire oggetto di una digressione estemporanea più o meno approfondita; quali sono abbastanza marginali in sé per poter essere liquidate sedute stante con un minimo di discussione o di risposta adulta ... I bambini spesso si attendono risposte immediate e risolutive ai problemi che pongono, da

parte degli adulti in generale e degli insegnanti in particolare. Ci vuole un lavoro lungo perché arrivino ad accettare che certe risposte devono costruirsi pian piano essi stessi, e che comunque rimarranno sempre dei problemi aperti. Infatti le domande che ci si riesce a fare sono sempre più delle risposte che si riesce a trovare: nella conoscenza dei fatti, ogni nuova risposta porta con sé nuove domande. Ci vuole anche, per una didattica di questo tipo, una preparazione disciplinare più approfondita di quanto di solito non sia quella di un insegnante della scuola elementare ed anche media (dove la laurea copre sempre solo una parte degli argomenti da trattare nell'ambito delle Scienze M. C. F. N.). Soprattutto una preparazione più "critica" di quella usualmente impartita, e presente nei manuali, che permetta di considerare le discipline scientifiche con la flessibilità necessaria per costruire un loro raccordo con il pensiero comune.

Se tutto ciò può essere difficile, non è però impossibile. Si può modificare il proprio modo di porsi davanti alla classe pian piano, lavorando con i ragazzi, all'inizio magari per piccole frazioni del tempo che si passa con loro; poi, man mano che si impara a lavorare nel nuovo modo, per frazioni di tempo sempre più consistenti. Ed anche la preparazione disciplinare può essere approfondita, leggendo sia testi scolastici sia testi critici (se alcuni sono molto specialistici, altri possono essere affrontati anche da chi non ha una preparazione universitaria); soprattutto riflettendo da adulti sulle proprie conoscenze ed esperienze e confrontandole con la descrizione del mondo che le varie discipline offrono. Ci vuole impegno e pazienza: se non passa un po' di tempo non si riescono a vedere i risultati, su se stessi e sui bambini. Se però non ci si lascia scoraggiare dalle difficoltà iniziali si possono ricavare grosse soddisfazioni sia dalla risposta dei bambini che dal continuare, in prima persona, ad imparare sempre cose nuove. E, magari per la prima volta, ci si può rendere conto che anche l'arido mondo della "scienza" che ci si ricorda dagli anni di scuola può trasformarsi in un universo affascinante che chiede di essere esplorato.

3. L'argomento della guida

La guida trae origine da una ricerca centrata sull'argomento "Forze" e realizzata in classi di II ciclo di scuola elementare.²

A partire dalla molteplicità di significati ed usi

che il concetto di "forza" ha nel linguaggio si è arrivati a definire qual è il campo d'indagine relativo ad uno studio delle forze dal punto di vista fisico, esplicitando alcune regole generali cui obbedisce qualunque interazione fra sistemi che possa essere descritta in termini di reciproche azioni di forza. Ciò riferendosi inizialmente ai possibili modi di "fare forza" con il proprio corpo in varie situazioni. Si è poi approfondito lo studio di un particolare tipo di forza: la forza-peso, che ha la caratteristica di dipendere solo dall'oggetto che si considera (stiamo parlando di oggetti in prossimità della superficie terrestre e che subiscono rispetto ad essa spostamenti trascurabili, come avviene per qualunque cosa un ragazzo possa maneggiare, se stesso compreso). Di tutta questa prima fase del lavoro, che riprende attività già oggetto di ricerche precedenti (vedi nota 1), daremo solo alcuni cenni, necessari per comprendere quali sono le conoscenze cui essa permette di giungere, essenziali al fine di proseguire il lavoro, e per dare un'idea del tipo di attività che essa richiede vengano svolte. Per un maggiore approfondimento, che può in particolare essere necessario per chi voglia lavorare in classe sull'argomento "Forze", rimandiamo al volume di questa collana che specificatamente se ne occupa (vedi nota 1). In questa guida invece presenteremo una proposta articolata di lavoro su gruppi di fenomeni di vario tipo (fenomeni elastici, fenomeni di attrito fra solidi, fenomeni magnetici, fenomeni di attrito fra un solido ed un fluido) che è stata elaborata nella seconda parte della sperimentazione effettuata. Si tratta di studiare forze che non sono più, come la forza-peso, costanti, ma la cui intensità varia, fissati i corpi che interagiscono, in funzione di variabili di volta in volta diverse: per esempio con l'entità della deformazione in una molla che viene compressa, allungata, torta ...; con la natura

² La sperimentazione in classe è stata condotta da Salvatore Piscitelli negli A. S. 1983/84 e 1984/85 presso la classe IV elementare sez. A, diventata poi V elementare sez. A, Circolo Didattico di Durazzano (BN). Nella fase riguardante lo studio del moto in un mezzo viscoso (vedi Cap. IV) ha preso parte alla sperimentazione in classe anche Giampiero Gallina, nell'ambito dello svolgimento della propria tesi di laurea in Matematica. Nei primi mesi dell'A. S. 1983/84 sono state svolte attività costruite sulle indicazioni provenienti da ricerche già effettuate altrove, che fanno parte dei temi trattati nel volume di questa stessa collana "Forze e pesi: 10 linee di lavoro per fare scienza a scuola" di P. Mazzoli, M. Arcà, P. Guidoni. A differenza della presente guida, questo testo è specificatamente pensato per classi del I ciclo, in quanto alcune attività possono essere svolte anche da bambini abbastanza piccoli. Non presenta, inoltre, un percorso unico, ma gruppi di attività autonomi fra loro.

e lo stato delle superfici, nonché con l'entità della pressione di schiacciamento reciproco (per così dire), nel caso di attrito fra solidi; con la velocità relativa nel caso di attrito fra un solido e un fluido; con la distanza (e la presenza di altri corpi) nel caso dell'attrazione magnetica ...

Dei fenomeni suddetti i bambini hanno in genere una conoscenza abbastanza ricca ed articolata come nucleo strutturato di modi di vedere, di schemi di descrizione ed interpretazione, di linguaggio per esprimerli. Essi hanno accumulato questa conoscenza nel corso della propria esperienza di vita, guidati dalle forti evocazioni della percezione e del linguaggio comune, caratteristiche di queste aree fenomenologiche. A partire da tutto questo e dallo schema unificante di forza come interazione particolare fra sistemi già parzialmente costruito nelle attività precedenti, si guidano i bambini in una ricostruzione organicamente strutturata e logicamente e linguisticamente coerente delle varie aree di esperienza indagate. Questo avviene individuando, fenomeno per fenomeno, quali sono le variabili che permettono di descriverne gli aspetti esaminati; esplicitando semplici dipendenze funzionali fra di esse; scoprendo le relazioni fra i diversi fenomeni. In questo modo i bambini si formano pian piano la consapevolezza che i blocchi di esperienza oggetto di studio sono inseribili in un'unica struttura di conoscenza. Contemporaneamente essi arrivano ad acquisire un'elevata competenza fenomenologica delle aree di realtà indagate, sempre mantenendosi ad un livello di formalizzazione adeguato alla loro età.

Punto finale della proposta è l'apertura della discussione sul problema fondamentale della Dinamica: se un oggetto si muove a velocità costante, è perché su di esso agisce una forza costante, o perché tutte le forze che agiscono su di esso si fanno equilibrio, così che la forza risultante sia nulla? Punto questo che sembra importante affrontare precocemente con i ragazzi anche nel caso in cui non si pensi, nell'ambito del ciclo scolastico in cui ci si trova, di poterlo trattare abbastanza approfonditamente da arrivare ad esaurirlo. In effetti, per quanto riguarda le relazioni fra forze, movimento, e variazione di movimento che costituiscono l'oggetto dei principi fondamentali della Dinamica, vale il discorso fatto all'inizio su alcuni dei fondamenti delle discipline scientifiche: per quanto in una ricostruzione disciplinare strutturata essi si trovino logicamente a costituire gli elementi di base di tutto l'edificio deduttivo della teoria, pure essi sono spesso troppo lontani dall'evidenza quotidiana dei

fatti per costituire dei punti di partenza efficaci per l'attività didattica. È necessario ricostruirli, come d'altronde è storicamente avvenuto per queste stesse ragioni, attraverso percorsi credibili che ne mostrino la necessità logica e la non-contraddittorietà, nonostante le apparenze, con i fatti. Ciò richiede un lavoro lungo, tanto più complesso quanto più piccoli sono gli allievi, che passa attraverso l'esame di più situazioni sperimentali e richiede una notevole attività di astrazione. Può quindi non esserci il tempo, per chi abbia deciso di affrontare in classe lo studio delle forze, per affrontare anche questi ultimi aspetti, né c'è lo spazio per trattarli a fondo in questa guida. Pur tuttavia riteniamo che problemi di questo tipo vadano almeno sollevati, al semplice livello che qui tratteremo, perché le relazioni delle forze con il movimento sono caratteristiche essenziali, e non accessorie, di queste grandezze. Non trattarne affatto può contribuire a farne costruire un'idea distorta e a creare ostacoli ad una comprensione dei fenomeni reali in cui aspetti statici e dinamici delle forze sono sempre contemporaneamente coinvolti.

L'inquadramento teorico delle fenomenologie esaminate che fa da sfondo alla proposta didattica cui si riferiscono sia la guida di P. Mazzoli, M. Arcà, P. Guidoni (vedi nota 1), che la presente, si discosta abbastanza da quello tradizionale, per tutte le ragioni finora esposte sulla necessità di riorganizzazioni didattiche dei fatti naturali che siano in grado di porsi come mediatori fra la conoscenza comune, con i suoi metodi e contenuti, e le conoscenze specialistiche, anch'esse con i loro metodi e contenuti.³ In Cap. I esponiamo perciò le linee generali del quadro teorico di riferimento prendendo in esame, per ragioni di coerenza e completezza, anche alcuni aspetti che non sono proposti come argomento di lavoro specifico con i bambini nei capitoli successivi. Gli aspetti teorici e le attività pratiche che devono costituire l'oggetto della prima fase del lavoro in classe saranno brevemente accennati all'inizio del Cap. II (2.2). Il resto del Cap. II ed i capitoli immediatamente successivi (III, IV, V) saranno dedicati ognuno allo studio di fenomenologie connesse ad interazioni che mettono in gioco un tipo particolare di forze (elastiche, d'attrito fra solidi, viscosi, magnetiche). Infine in Cap. VI verranno dati suggerimenti per un primo approccio, da parte dei

³ Per una presentazione complessiva della linea di approccio alla costruzione della dinamica su cui questa proposta si basa, cfr.: P. Guidoni, "Introduzione alla Dinamica". In corso di preparazione.

ragazzi, alla natura vettoriale delle forze. Nell'ultima parte verranno tratte le conclusioni dell'intero volume.

La comprensione complessiva della proposta implica che il lettore conosca, o sia comunque in grado di recuperare attraverso la lettura di libri di testo,⁴ alcune delle nozioni di Meccanica che vengono studiate a livello di scuola media superiore.

4. La sperimentazione in classe

L'intento primario con cui è stata scritta questa guida è quello di offrire agli insegnanti proposte articolate e flessibili di lavoro didattico da attuare nelle loro classi. Pensiamo che le attività proposte, da noi sperimentate in classi del secondo ciclo elementare, richiedano da parte degli alunni un livello di maturità tale da rendere difficile un'anticipazione al primo ciclo. Riteniamo invece che esse possano essere proficuamente svolte, con la possibilità di spingersi più avanti sul piano della formalizzazione matematica, anche nella scuola media inferiore, costruendo itinerari didattici che potrebbero vedere momenti di forte integrazione fra lo studio delle Scienze Matematiche e quello delle Scienze Fisiche. Ci teniamo, però, a sottolineare che, secondo noi, in nessun caso l'attività di formalizzazione matematica può sostituire la fase di approccio qualitativo alle fenomenologie esaminate, bensì deve rappresentarne uno sviluppo e un approfondimento, per tutti gli aspetti per i quali ciò è possibile: in dipendenza anche dall'età degli allievi e dal grado di preparazione da loro precedentemente raggiunto. Senza un'adeguata padronanza fenomenologica le varie "leggi" espresse formalmente rischiano di perdere il loro autentico significato fisico (e matematico!) e di diventare mere "formule" da memorizzare.

In effetti nel corso della loro carriera scolastica i ragazzi devono arrivare gradualmente a rendersi conto della dialettica esistente fra linguaggio ed esperienza comuni, da un lato, e linguaggi formalizzati ed esperimenti, dall'altro. Si vive immersi in una realtà quotidiana estremamente complessa, ove in qualunque "fatto" si sovrappongono e si intrecciano tanti aspetti diversi: la gestione cognitiva di questa realtà complessa, a livello di vita quotidiana, è resa possibile grazie anche all'invenzione di un linguaggio "naturale", polivalente perciò poco spe-

cializzato e di conseguenza ambiguo quando non vi sia un continuo riferimento al contesto.⁵

Le nostre esperienze, il nostro linguaggio, le nostre conoscenze, le strategie cognitive che guidano le nostre relazioni con la realtà e con gli altri, formano un insieme complessivo le cui parti sono strettamente correlate nella dinamica del proprio funzionamento e del proprio sviluppo. Il linguaggio, per esempio, dipende da – e influenza – le esperienze, le conoscenze, le strategie cognitive; e lo stesso può dirsi per ogni altro elemento dell'insieme. Se ciò vale per la costruzione individuale del sapere quotidiano, il discorso non è sostanzialmente diverso per la costruzione storica del sapere scientifico. Ai fatti complessi dell'esperienza quotidiana si sostituiscono di volta in volta dei "fatti semplificati" (gli esperimenti) in cui sono resi deliberatamente dominanti solo pochi aspetti (talvolta tale semplificazione intellettuale richiede l'utilizzazione di tecnologie molto sofisticate!). Si costruiscono inoltre linguaggi sempre più formalizzati (che continuano però ad avere le loro radici cognitive nel linguaggio comune), i quali attraverso i loro simboli e le loro regole consentono di costruire rappresentazioni il più possibile "isomorfe" (con la stessa forma) agli aspetti di realtà messi in evidenza negli esperimenti, e alle loro mutue relazioni.

L'invenzione di nuovi tipi di esperimenti (che rispondono a domande del tutto nuove, o formulate in maniera nuova) e di nuovi tipi di formalismo procede parallelamente: tra esperimento e formalizzazione c'è una dialettica simile a quella che esiste fra esperienza comune e linguaggio "naturale".

Per insegnare a scuola è perciò cruciale rendersi conto di questa doppia dialettica, interna alla conoscenza comune e alla conoscenza scientifica; nonché del doppio passaggio sempre necessario dal quotidiano allo scientifico (dall'indagine descrittiva a quella esplicativa) e viceversa (reinvestimento della spiegazione nella descrizione). Altrimenti non si ha formazione culturale, ma sterile indottrinamento. In definitiva la formalizzazione (la matematizzazione) appare come necessaria all'Educazione Scientifica; ma essa acquista senso per l'allievo solo nel momento in cui si rivela strumento necessario per trovare ed esplicitare risposte a domande già individuate sul piano qualitativo, da cui ci si rende conto che il linguaggio comune è inadeguato a rispondere.

⁴ Al termine della guida viene suggerita una bibliografia.

⁵ Cfr. per es. nota 3.

Può aiutare a comprendere il senso di questo discorso un breve cenno storico. Riconsideriamo il fenomeno della caduta degli oggetti con cui avevamo iniziato questo capitolo. Si può dire che da sempre l'uomo ha un'ampia conoscenza comune al riguardo. Un oggetto può essere lanciato o lasciato andare: comunque cade, con traiettorie diverse a seconda dei casi. La maggioranza degli oggetti lasciati andare cade normalmente in verticale; alcuni (una piuma, un foglio di carta ...) ondeggiando nell'aria; altri, pochi, salgono (il palloncino dei bambini, ma anche il fumo, se possiamo considerarlo un oggetto). Un vento forte può modificare le traiettorie anche di oggetti pesanti. Il tempo che un oggetto impiega per cadere da una data altezza può dipendere poi dal suo peso, dalle sue dimensioni, dalla sua forma, dall'orientazione nello spazio con cui viene lasciato cadere ...

C'è una grande varietà di situazioni, che al limite rendono ogni singolo episodio di caduta di un oggetto unico ed irripetibile. Ciò che conta, però, dal punto di vista della conoscenza scientifica, è quanto si può trovare di comune fra eventi diversi.

Già i filosofi greci ragionavano su spazi, tempi, velocità di caduta, alla ricerca di una "descrizione" adeguata del fenomeno; facevano ipotesi sulle diverse cause che costringono i corpi a cadere in determinati modi, alla ricerca di una "spiegazione". Fino al Rinascimento non vengono compiuti sostanzialmente passi avanti. Le speculazioni sono puramente teoriche e ci si serve del linguaggio naturale; la matematizzazione è limitata e il suo confronto con l'esperimento praticamente impossibile; le uniche operazioni su numeri esprimono le misure di grandezze fisiche a cui si sa dare un senso sono somme, sottrazioni e rapporti "omogenei" fra misure di una stessa grandezza fisica: non si concepisce la possibilità di costruire nuove grandezze fisiche per rapporto o prodotto di grandezze fisiche fra loro diverse. Non si hanno di conseguenza strumenti formali che consentano di costruire vere scale di velocità, come invece è possibile fare per spazio e tempo, e, *a fortiori*, non è possibile legare reciprocamente misure di spazi, tempi, velocità, anche se è più che evidente, sul piano qualitativo, che sono queste tre grandezze nel loro complesso e nella loro interdipendenza a caratterizzare ogni singolo evento di caduta. Questo per quanto riguarda la Cinematica, cioè la descrizione del moto. Dal punto di vista della Dinamica, cioè sul versante delle spiegazioni, si discute sul ruolo del peso, della Ter-

ra e dell'aria nel movimento di caduta, sulle possibilità o impossibilità di movimento in assenza di aria, in riferimento a qualità assolute o relative (pesantezza, leggerezza, attrazione, repulsione ...) che si ritiene siano possedute dalla Terra, o dall'aria, o dai materiali di cui sono fatti gli oggetti; ed a meccanismi di interazione più o meno complicati (formazione di vortici per spiegare l'azione propulsiva o frenante dell'aria ...).

Con Galileo la situazione muta radicalmente. Egli vede l'azione dell'aria esclusivamente come causa "perturbatrice" di un moto "semplice" di caduta in assenza di aria. Ipotizza quindi che sia possibile studiare la legge di questo moto, peraltro inesistente, considerando quei fenomeni di caduta nei quali l'azione dell'aria ha effetti di perturbazione che possono essere considerati trascurabili (caduta di oggetti sufficientemente pesanti, che non oppongono al moto una superficie molto estesa, in condizioni di aria tranquilla ...). Altri moti di caduta (tutti quelli reali, in effetti) saranno spiegabili come sovrapposizione di questo moto fondamentale con effetti dovuti all'azione dell'aria. Contemporaneamente, però egli per primo intuisce la possibilità di tradurre sul piano quantitativo la relazione fra spazi, tempi e velocità perché intuisce che il rapporto (o il prodotto) fra grandezze fisiche diverse può avere un significato fisico autonomo, cioè rappresentare una nuova grandezza. La misura del "grado di velocità" (media o istantanea) di un oggetto diventa possibile come rapporto fra numeri che danno le misure degli spazi percorsi e dei tempi impiegati a percorrerli (velocità media) e assumendo nel moto di caduta in assenza di aria una proporzionalità fra velocità istantanea e tempo: le asserzioni teoriche sul moto di caduta (leggi del moto) diventano così controllabili attraverso l'esame sperimentale di situazioni particolari. Nasce la nuova scienza. Ulteriori importanti avanzamenti nello studio del fenomeno di caduta dei gravi si avranno con Newton. Anche in questo caso si progredisce nella conoscenza grazie contemporaneamente a geniali intuizioni sul piano qualitativo (unificazione della spiegazione dei moti celesti dei pianeti e dei moti terrestri di caduta degli oggetti, come dovuti ad una stessa causa, la forza di gravità; misurabilità della forza, vista come causa che genera il moto) e sul piano della formalizzazione matematica (invenzione del calcolo differenziale).

Non è un caso che ci siano voluti secoli per questi cambiamenti, né che essi abbiano contempora-

neamente investito una diversa categorizzazione dei fenomeni oggetto di studio e un potenziamento della formalizzazione matematica: la gestione cognitiva del passaggio dal piano del discorso argomentativo, che vede pari dignità in tutti i fatti che succedono (il moto di una piuma, di un proiettile, di un trapezista ...), ad una rappresentazione formalizzata in linguaggio matematico di fatti più o meno "ideali" (legge di caduta dei gravi in assenza di aria) è tutt'altro che facile e non è un processo "spontaneo". Può essere però il risultato di un processo educativo guidato che ponga questo passaggio tra i suoi obiettivi. Troppo spesso, invece, a scuola o si è ansiosi di arrivare alla formalizzazione e si salta la lunga e formativa fase del raccordo fra conoscenza comune e conoscenza formalizzata, oppure si ritiene che per la giovane età degli allievi la formalizzazione sia un discorso interamente da rimandare, e si resta sostanzialmente ancorati ad un livello di conoscenza comune, ancorché meglio organizzata di quanto potrebbe essere quella che un ragazzo si costruisce spontaneamente. Torneremo più volte in seguito su questi punti, più o meno esplicitamente, perché riteniamo che la padronanza delle relazioni fra qualitativo non formalizzato e quantitativo formalizzato, fra esperienze ed esperimento, fra fatti e rappresentazioni sia uno degli scopi fondamentali dell'insegnamento scientifico nella scuola di base.

5. Come leggere la guida

La proposta che qui presentiamo vuole essere contemporaneamente un esempio emblematico di un modo di lavorare in classe (in accordo con la concezione di educazione scientifica descritta all'inizio), ed il suggerimento di un particolare itinerario che consenta la ricostruzione cognitiva di un ambito fenomenologico definito: le diverse modalità (non tutte, in verità) con cui dei sistemi macroscopici possono interagire gli uni con gli altri attraverso azioni di forza. Per questo si è cercato di evidenziare sia problemi generali di Didattica e Pedagogia delle Scienze, sia problemi generali di costruzione di conoscenza, sia infine problemi specifici relativi all'ambito fenomenologico esaminato. La proposta è illustrata con esemplificazioni di situazioni concrete tratte dalle sperimentazioni effettuate. A questo scopo si è cercato di raggruppare momenti significativi di discussioni, frasi scritte in relazioni individuali degli alunni in riquadri fuori testo accom-

pagnati da brevi note che spiegano le situazioni di classe cui essi si riferiscono. In questo modo abbiamo inteso fornire una documentazione che sostenga e chiarifichi il discorso da un lato, e che possa essere anche letta indipendentemente, dall'altro, per fornire una prima idea, attraverso una raccolta di "flash" opportuni, del tipo di lavoro di classe che si vuole suggerire. Naturalmente il senso di questo modo di lavorare e il perché delle specifiche situazioni via via illustrate vanno trovati nel testo, fuori dai riquadri.

Le attività descritte in questa guida hanno richiesto più di un anno di lavoro, con periodicità circa settimanale: abbiamo esplorato infatti un campo abbastanza vasto allo scopo di indagare il comportamento degli alunni il più estesamente e approfonditamente possibile. Si possono però costruire in classe percorsi di durata più breve, sempre formativi e sensati per gli allievi. Un insegnante può scegliere in funzione degli interessi suoi e dei suoi alunni, e del tempo che intende dedicare a questo genere di attività, che cosa fare, e con che ritmi. Naturalmente non si può però scegliere a caso. Ci si può rendere conto, leggendo il seguito del libro, che i nostri allievi hanno comunque seguito un percorso coerente, sia pure attraverso molte diramazioni. Ciò che veniva via via appreso era rimesso in discussione e riutilizzato nelle esperienze successive, si da rinforzare, chiarire, arricchire continuamente le caratteristiche generali e le specificazioni particolari della nozione di forza. Per costruire dunque percorsi diversi è necessario individuare le propedeuticità intrinseche al discorso che si vuole svolgere e rispettarle; e saper comunque gestire eventuali "inversioni" logiche, che facilmente si presentano in ogni attività concreta.

È evidente che nella guida si intrecciano discorsi di vario tipo, tutti mutuamente legati l'uno all'altro, in una circolarità intrinseca. È altrettanto evidente che, come ogni produzione linguistica, essa debba essere forzosamente sequenziale. In qualche modo, quasi ogni cosa poteva essere scritta o prima o dopo rispetto a quando è stata scritta, ma si è dovuto scegliere un posto in cui scriverla. Il senso complessivo della proposta sta però più nel legame fra le varie parti, e fra i diversi livelli di discorso, che non in uno qualunque di essi: perciò, a nostro avviso, può venire fuori compiutamente solo dopo aver letto (e forse anche riletto) l'intera guida, più che essere costruito linearmente, per "gradini successivi", attraverso una lettura pagina per pagina, capitolo dopo capitolo.

Capitolo 1. Sorgenti di forze

1.1. Introduzione

In questo capitolo intendiamo discutere sul piano qualitativo, alcune proprietà generali di quelle interazioni fra sistemi materiali che vengono schematizzate, all'interno della Fisica, come azioni di *forza* e scambi di *energia*.

Grosso modo l'ambito di cui ci occupiamo corrisponde a quanto viene trattato nei primi capitoli dei testi tradizionali di Meccanica classica (di qualunque livello scolastico). Rimandiamo alla bibliografia per una trattazione sistematica e che segua linee più o meno tradizionali, mentre in questo capitolo intendiamo sottolineare alcuni punti in genere non evidenziati a sufficienza nei libri di testo. In essi infatti gli argomenti trattati vengono generalmente suddivisi, ordinati, esposti, tenendo essenzialmente conto di criteri di economia ed eleganza nei confronti della strutturazione disciplinare complessiva cui si vuole arrivare. Non si considera, cioè, come prioritario un percorso che parta dalle evidenze e complessità dell'esperienza quotidiana su cui ogni individuo costruisce le proprie *conoscenze comuni*, dall'età infantile all'età adulta. Ciò porta, tra l'altro, a trattare spesso in capitoli separati aspetti che sono invece tipicamente collegati fra loro nell'esperienza immediata: essi vengono infatti studiati facendo riferimento a situazioni limite, o solo immaginate o riprodotte al meglio in esperienze di laboratorio, situazioni di cui comunque sfugge il rapporto con le evidenze ordinarie. E ciò ha la conseguenza di produrre un *sapere scolastico* che sembra spesso senza collegamenti con il mondo reale.

Lo schema che presentiamo in questo capitolo vuole invece indicare una riorganizzazione alternativa di alcuni concetti di base della Meccanica che faciliti un effettivo raccordo fra conoscenza comune e conoscenza scientifica.

Presenteremo quindi un quadro di riferimento complessivo entro cui siano collocabili le situazioni affrontate nei capitoli successivi e che fornisca anche elementi utili per meglio chiarire quali scelte si trovino alla base del modo in cui la Fisica schematizza i diversi aspetti di ciò che vediamo continuamente accadere intorno a noi. Non sarà un'esposizione lineare, perché gli argomenti trattati sono per loro natura tutti intrecciati fra loro, e ciò esclude la possibilità di un discorso per gradini successivi in cui ognuno sia condizionato solo dai precedenti.¹ Ritroveremo invece la caratteristica della conoscenza di essere, sin dall'inizio, un inestricabile insieme di processi "circolari".

1.2. Forza ed energia: due modi distinti e correlati di guardare gli stessi fenomeni

Caratteristica peculiare del modo di pensare umano è di stabilire relazioni fra i fatti che accadono, in particolare relazioni di tipo causale. Non ci si accontenta di descrivere quello che avviene, ma si cerca costantemente di spiegarlo, andando a scoprire *perché* avviene. Si leggono così gruppi di fenomeni in termini di *cause* ed *effetti*, e si costruiscono catene causali più o meno lunghe e complesse fra di essi.

Il concetto di forza nasce appunto da questo particolare modo di vedere. Sia a livello di pensiero comune, che di trattazione disciplinare, le forze sono spesso considerate come le cause che determinano un certo numero di fenomeni: deformazioni

¹ Le "linearizzazioni" schematiche dei libri di testo risultano generalmente ambigue e molto spesso non presentano vantaggi per il soggetto che apprende.

di corpi, spostamenti, accelerazioni, attrazioni, repulsioni. I principi della Dinamica stabiliscono in effetti che le forze sono le cause di qualsivoglia cambiamento nel movimento (accelerazione o decelerazione); mentre la Statica le considera cause delle deformazioni che un corpo può subire e delle configurazioni di equilibrio statico di qualsivoglia sistema di interazioni. Nel linguaggio comune d'altra parte il concetto di forza ha una grande quantità di significati, cui corrispondono altrettanti usi metaforici, ma spesso se ne fa anche un uso confrontabile con il significato che esso ha a livello disciplinare. Basta pensare a tutte le situazioni in cui si parla di uomini, animali, macchine con motori ... che *hanno forza*, che *fanno forza*.

In effetti il fare forza per spezzare un biscotto, sollevare qualcosa, svitare il coperchio di un barattolo, rompere il guscio di una noce, modellare la plastilina, correre vicino a riva nell'acqua del mare è oggetto di esperienza percettiva e cognitiva sin dalla più tenera età e costituisce il fondamento di ogni ulteriore elaborazione del concetto di forza a livello individuale.² Per compiere le azioni della vita quotidiana esercitiamo continuamente forze attraverso azioni di spinta, trazione, torsione ... su altri sistemi (fig. 1.1). Il corpo umano è in altre parole una *sorgente di forze*, anzi diviene nel pensiero comune il prototipo di un qualunque sistema sorgente di forza: così i bambini riuniscono in una sola categoria il vento, le bombe, i motori, gli animali ... che possono compiere azioni analoghe a quelle che un uomo compie usando la sua forza.

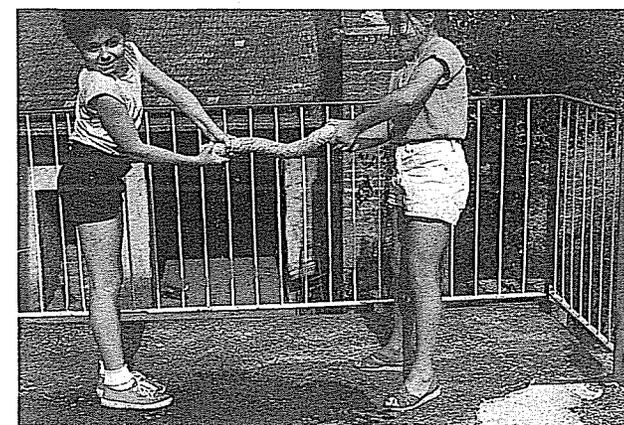
Ogni volta che si *fa forza*, si fa forza contro una *resistenza* e, come dicono i bambini, si può "vincere", "perdere", "essere pari" a seconda di quello che succede. Vince, ad esempio, il signore che riesce a trascinarsi dietro il cane che vorrebbe rincorrere un gatto dalla parte opposta della strada. Perde invece il signore che si fa trascinare dal cane; mentre i due sono pari se restano lì fermi, senza riuscire a muoversi né di qua né di là. Una situazione di questo genere viene di solito spiegata pensando che il signore vince, perde o è pari a seconda che la forza da lui esercitata contro il cane sia maggiore, minore od uguale alla resistenza che il cane gli oppone. Questa è un'interpretazione

² Da ciò nascono molte delle differenze fra il concetto di forza che è stato elaborato nella Fisica e quello usato nell'ambito del pensiero comune, differenze che verranno via via messe in luce nel corso dei capitoli successivi.

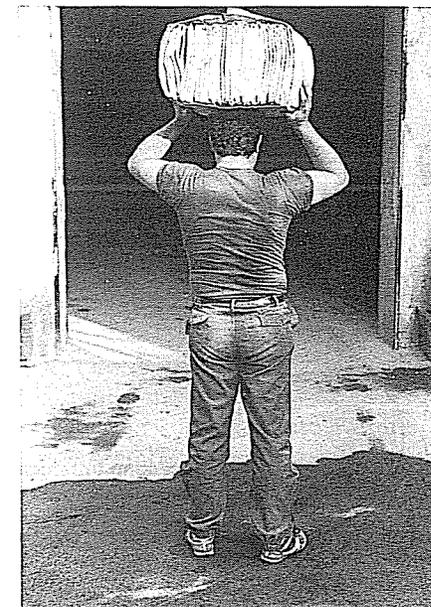
estremamente generalizzata: molti fenomeni vengono comunemente spiegati in modo analogo a quello descritto, in termini di equilibrio e disequilibrio fra forze contrapposte. Nondimeno, è un'interpretazione tipicamente errata dal punto di vista della Fisica.

Ciò che determina il *verso* in cui si svolge un processo non è infatti, generalmente, uno squilibrio di forze. Nel nostro esempio, che sia il padrone a trascinare il cane, o il contrario, o che restino entrambi fermi, le forze esercitate dai due uno sull'altro attraverso il guinzaglio sono istante per istante uguali. Questa simmetria urta contro il senso comune, ed una volta accettata, lascia comunque senza risposta il problema originario: se le forze sono sempre uguali, come mai delle volte vince il signore, delle volte vince il cane, delle volte nessuno dei due? Chi può soddisfare all'esigenza di trovare una *causa* che spieghi la differenza fra le tre situazioni? La risposta disciplinare è che questa differenza la si ritrova considerando non le forze in gioco, ma l'energia. Se è il signore che trascina il cane, è il signore che trasferisce energia al cane (o meglio, allo "strisciare" del cane per terra), e viceversa; se stanno fermi entrambi, non c'è nessun trasferimento di energia (anche se, per fare forza, ciascuno dei due "consuma" energia interna). L'asimmetria o la simmetria caratteristiche delle tre situazioni si ritrovano dunque nell'esistenza o meno, e nel verso, del trasferimento di energia: il pensiero causale è salvo.

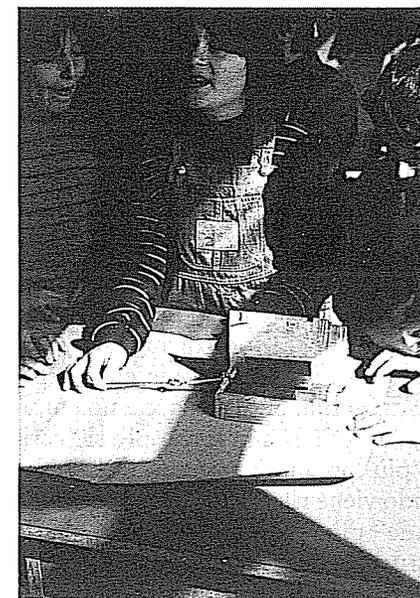
Sembra semplice. Ma in realtà non si può pensare che la risposta disciplinare sia pienamente soddisfacente se non si è in grado di distinguere a sufficienza i due aspetti di forza ed energia, in genere ambiguamente confusi e mescolati nel pensiero comune. Nel linguaggio quotidiano si parla, infatti, indistintamente di persone più o meno "forti" oppure più o meno "energiche", del fatto che per fare qualcosa ci voglia molta o poca forza oppure molta o poca energia. Il fatto di avere come prototipo di *sorgente di forza* il corpo umano non è in nulla di aiuto, anzi ... Il corpo umano infatti è un sistema che per fare forza deve consumare energia. Questa energia viene attinta alle riserve accumulate nel corpo, e continuamente rinnovate attraverso l'alimentazione e la respirazione. "La carne, il pane ... ci danno forza ... ci danno energia ... si trasformano in energia ..." sono frasi di ragazzi che sottolineano ulteriormente la confusione. Noi ci affatichiamo (e questo è un indice del consumo di



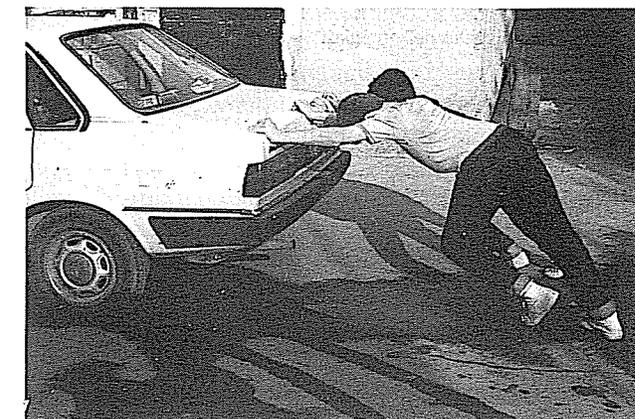
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1.1 - Il corpo umano è una sorgente di forze

Ragazzi ed adulti che esercitano forze di torsione (a), espansione (b), trazione (c), spinta (d)... Contro cosa fanno forza? Che reazioni sentono? Con che parti del corpo fanno forza?

energia) anche semplicemente per reggere, immobile, un oggetto pesante: cioè per esercitare una forza che controbilanci il suo peso. L'impossibilità, per noi, di fare forza senza consumare energia, come ad esempio può fare una molla (fig. 1.2), fa sì che a livello percettivo forza ed energia siano strettamente collegate, e non immediatamente distinguibili.

Nell'ambito della formalizzazione disciplinare della meccanica i concetti di forza ed energia sono invece deducibili l'uno dall'altro mediante opportune operazioni matematiche, che possono essere compiute nei due versi ricavando indifferentemente l'una dall'altra. Ci sono però voluti moltissimi

anni nella costruzione del sapere scientifico per mettere in relazione, individuandoli e differenziandoli, gli aspetti fenomenologici di forza ed energia, da una parte, e le corrispondenti definizioni formali, dall'altra; e per distinguere prima, e correlare poi, le diverse forme di energia (meccanica, elettrica, chimica, ...), per gran parte delle quali la connessione con aspetti di forza risulta molto problematica. Di questo travaglio conoscitivo non resta generalmente traccia nelle esposizioni dei libri di testo, ma ricerche recenti in didattica della fisica mettono bene in luce le reali difficoltà di arrivare ad una interpretazione coerente, corretta e completa dei fenomeni meccanici. Esse mostrano fra l'al-

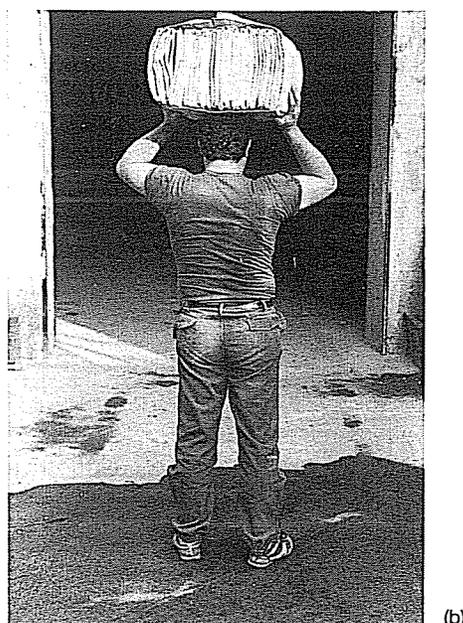
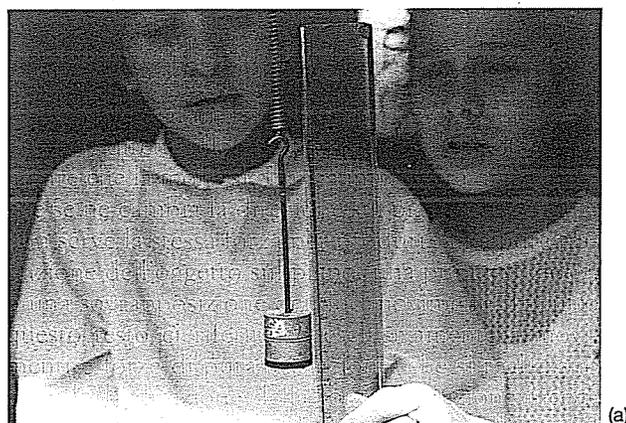


Figura 1.2 - Le sorgenti di forza non sono tutte uguali

Una molla (a) ed un uomo (b) reggono un oggetto a mezz'aria. Per impedire all'oggetto di cadere devono fare una forza uguale al suo peso. L'uomo e la molla esercitano questa forza perché sono deformati (la molla è allungata, i muscoli dell'uomo sono in tensione). L'uomo però "si stanca", la molla no. Perché? Come si può descrivere la situazione dal punto di vista dell'energia? Se l'oggetto viene alzato od abbassato, cosa succede mentre si muove, dal punto di vista della forza e da quello dell'energia?

tro come anche studenti che hanno superato esami di Fisica a livello universitario non siano in grado di utilizzare le conoscenze formali acquisite se posti di fronte a problemi che si discostano da quelli tipici dei libri di testo.³ In un contesto non strettamente formalizzato si ripresentano infatti tutte le ambiguità che caratterizzano il pensiero comune, più o meno mescolate a frammenti di conoscenza disciplinare.

Nel lavoro che proponiamo di fare con i ragazzi il concetto di energia viene solo sfiorato, e ciò lascia aperti molti dei problemi cui abbiamo accennato. È possibile dare volta a volta, come indicheremo nei capitoli successivi, indicazioni locali e parziali, ma solo un lavoro lungo ed articolato consentirebbe di arrivare a risposte realmente esaurienti. In particolare ciò richiederebbe di andare molto più avanti, sul piano della descrizione formale dei fenomeni osservati, di quanto non riteniamo sia possibile fare al livello di età da noi indicato.

Nella sperimentazione i ragazzi sono arrivati ad utilizzare semplici relazioni descrittive del tipo: più spingo e più la molla si accorcia; più è grande la distanza tra il ferro e la calamita, meno grande è la forza con cui si attraggono, ...; e solo in qualche

caso sono arrivati a stabilire relazioni di proporzionalità diretta o inversa, in corrispondenza dell'esecuzione di semplici operazioni di misura. A livello di relazione d'ordine, però, forza ed energia sono spesso indistinguibili. Se si schiaccia una molla più la si comprime più essa fa forza, più si "carica" di energia e più lontano è in grado di lanciare una pallina quando viene rilasciata ... Poiché a "più forza" corrisponde "più energia" e, come abbiamo visto, sul piano percettivo forza ed energia sono difficilmente distinguibili, è facile pensare, ad esempio, che la molla "si carica di forza", e che la pallina arriva più lontano perché viene spinta dalla "maggiore forza" di cui la molla si è caricata ... La differenza è invece ben definita sul piano formale: una molla schiacciata, per esempio, può sostenere un peso esercitando una forza ad esso eguale e opposta; la forza che la molla "fa", uguale al peso che sostiene, dipende (in certe condizioni) dal suo accorciamento $F = Kx$; se invece essa viene utilizzata per lanciare una pallina, quanto lontana arriverà la pallina dipende (nelle stesse condizioni) dalla quantità di energia di cui la molla è "carica", energia legata alla seconda potenza del suo accorciamento ($E = 1/2 Kx^2$) ...

Nel seguito del capitolo cercheremo di esporre un modello qualitativo che interpreti diverse fenomenologie comuni in termini delle interazioni che coinvolgono reciproche azioni di forza e scambi di

energia fra più sistemi. Si tratta di un modello generale che fa da sfondo a tutte le proposte di attività da svolgere con i ragazzi, e che comunque è in grado di interpretare un numero di aspetti di realtà maggiore di quelli che si proporrà di affrontare esplicitamente in classe. Esso ha la caratteristica di essere immediatamente confrontabile con i fenomeni così come quotidianamente ci si presentano, in modo da poter costruire un valido collegamento fra la realtà nota dell'esperienza quotidiana e la schematizzazione formalizzata che ne dà la Fisica. Riteniamo che la comprensione delle linee generali di questo modello sia necessaria all'insegnante per darsi conto del senso delle attività da noi specificamente proposte e per gestire, di conseguenza, con sicurezza il lavoro di classe degli allievi. La presentazione necessariamente compatta che ne verrà fatta nel resto del presente capitolo sarà poi esplicitata, nel corso del libro, dalla puntuale e più estesa riconsiderazione dei diversi aspetti, man mano che essi verranno coinvolti nella presentazione delle attività che fanno parte delle proposte didattiche. Chiediamo perciò ai lettori di avere pazienza e non soffermarsi eccessivamente, ad una prima lettura, su punti particolari di questo capitolo che dovessero risultare oscuri: è probabile che una seconda lettura, dopo aver esaminato tutte le proposte della guida, sia sufficiente per chiarirli.

1.3. Un modello per la descrizione delle interpretazioni fra sistemi macroscopici in termini di azioni di forze e scambi di energia meccanica

Riferendoci, come esempio tipico, ad una molla che viene deformata, intendiamo illustrare gli aspetti generali del modello proposto, per poi ritrovarli caso per caso nei paragrafi successivi in cui tratteremo diversi tipi di interazione fra sistemi:

– per ogni sistema (in particolare per una molla) si può parlare di una *configurazione naturale* corrispondente allo stato in cui si trova in assenza di interazione con altri sistemi. Un'interazione che deforma il sistema provoca, mentre avviene la *deformazione*, una reazione: il sistema che si sta deformando diviene una *sorgente di forze*, che agisce a sua volta sui sistemi deformanti. Così una molla ha una forma, in particolare una sua lunghezza ben definita, in assenza di azioni perturbatrici (il suo

stato indeformato corrisponde appunto ad avere quella forma); ma può essere allungata, compressa, torta (quindi deformata) dall'azione, ad esempio, di una persona che la tenga fra le mani. Chi tira o comprime la molla sente che sulle mani si esercitano delle forze che tendono, rispettivamente, ad avvicinarle o ad allontanarle: la molla è diventata una sorgente di forza che reagisce su di lui.

– Un sistema-sorgente esercita azioni di forza sull'esterno in almeno due "posti" o zone di interazione; se i posti sono localizzati in due soli "punti", le due forze esercitate sono uguali e contrarie (fig. 1.3). La molla che viene tesa, compressa, o torta, in effetti tende rispettivamente a tirare, spingere, o torcere entrambe le mani, e con la stessa intensità: esercita forze simmetriche da entrambe le estremità. Ciò è vero se non c'è accelerazione apprezzabile, cioè se, durante la deformazione, la molla e la mano sono ferme o si muovono di moto approssimativamente uniforme. (§ 1.8. e 2.5.). Sui testi di fisica questo aspetto è raramente messo in evidenza: non si considerano sempre i sistemi complessivi che interagiscono, ma si studiano spesso solo le interazioni locali fra parti di sistemi. Nel nostro esempio, ciò corrisponde a considerare solo un'estremità della molla e la mano che l'afferra, per confrontare le forze che esse si scambiano: si può così stabilire che esse sono istante per istante uguali ed opposte (III principio della Dinamica).

– Per deformare un sistema allontanandolo dal suo stato indeformato, è necessario fornirgli energia. C'è un flusso di energia dal sistema deformante al sistema deformato durante tutta la deformazione. La quantità totale di energia che è necessario trasferire ("spendere" dal punto di vista del sistema deformante) dipende sempre dall'entità della deformazione totale. In alcuni casi il sistema deformato è tale che risulta necessario spendere energia anche per mantenerne la deformazione, in altri no. In particolare, si deve trasferire energia per deformare una molla, ma non per mantenerla deformata. Infatti è possibile, ad esempio, comprimerla od allungarla mediante l'azione di un peso che si abbassa: durante la deformazione parte dell'energia gravitazionale del peso è trasferita alla molla. L'accorciamento o l'allungamento ottenuto può essere mantenuto indefinitamente a peso fermo: non c'è più alcun trasferimento di energia dal peso alla molla mentre la deformazione è mantenuta invariata (fig. 1.4). È completamente diverso il caso delle forze di attrito, ad esempio. Per mantenere un oggetto in movimento uniforme nell'aria, nell'acqua

³ (Vedi "La fisica nella Scuola" anno XIX, n. 2, 1986, numero Speciale dedicato a "Ricerche sulle rappresentazioni mentali in Fisica").

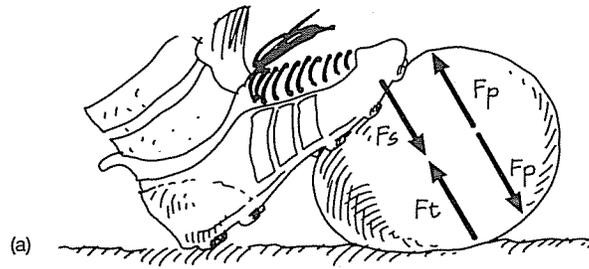
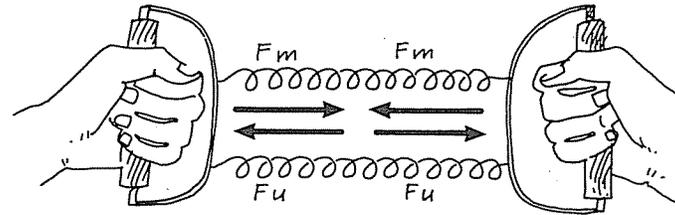
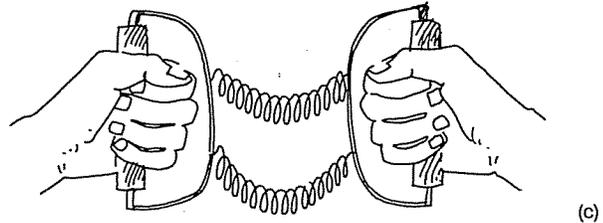
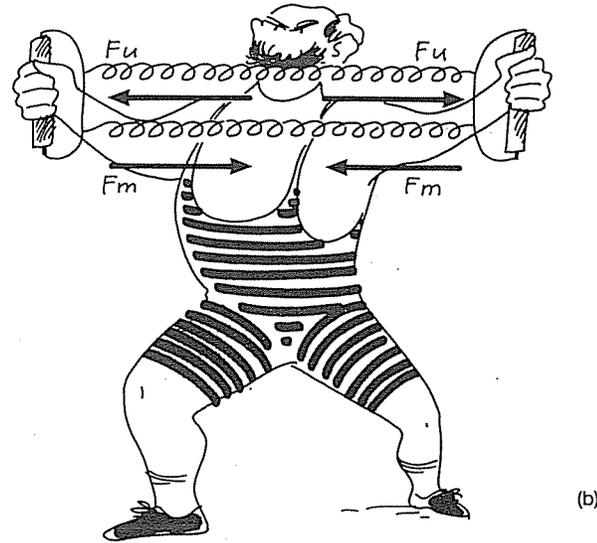


Figura 1.3 - Le forze agiscono sempre in coppia

- F_m = Azioni di forza esercitate dalla scarpa sul pallone.
- F_p = Azioni di forza esercitate dal pallone sulla scarpa o sul terreno.
- F_t = Azioni di forza esercitate dal terreno sul pallone.
- F_u = Forze esercitate dall'uomo sulle molle.
- F_m = Forze esercitate dalle molle sulle mani.

(a) La scarpa schiaccia la palla contro il pavimento e questo la spinge verso l'alto. La palla, a sua volta, fa due forze di espansione spingendo contro la scarpa e contro il pavimento; (b), (c) molle tese da forze muscolari esercitano ai loro estremi forze di compressione; (d) una molla schiacciata contro la parete fa forze di espansione contro la mano e contro la parete. Mentre il pallone e le molle vengono deformati, i sistemi deformanti trasferiscono loro energia che può essere recuperata quando l'azione deformante cessa e il pallone e le molle tornano alla loro forma naturale. Non sempre però è così: cosa succede se viene deformata una palla di plastilina?



... è necessario un continuo trasferimento di energia. Consideriamo un'automobile. Perché possa muoversi ad una determinata velocità è necessario che continuamente l'energia (chimica) del combustibile venga trasferita (parzialmente) al motore e quindi all'auto come energia cinetica, per compensare la contemporanea continua trasformazione dell'energia cinetica in calore a causa degli attriti, primo fra tutti quello dell'aria. L'automobile, l'aria, il pavimento stradale costituiscono un sistema materiale il cui stato *indeformato* consisterebbe nella quiete relativa delle varie parti una rispetto all'altra. Il movimento dell'automobile ad una data velocità rispetto ad aria e strada costituisce uno stato deformato ben determinato, per mantenere il quale è, appunto, necessario realizzare, attraverso una catena di forze (del motore, dell'attrito, ...) un continuo trasferimento d'energia (proveniente da un *sistema antagonista*: il combustibile che brucia).

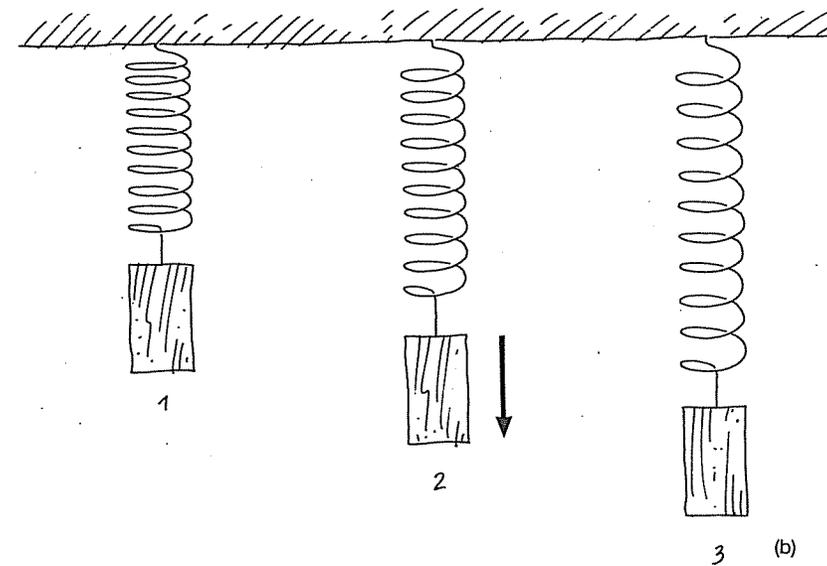
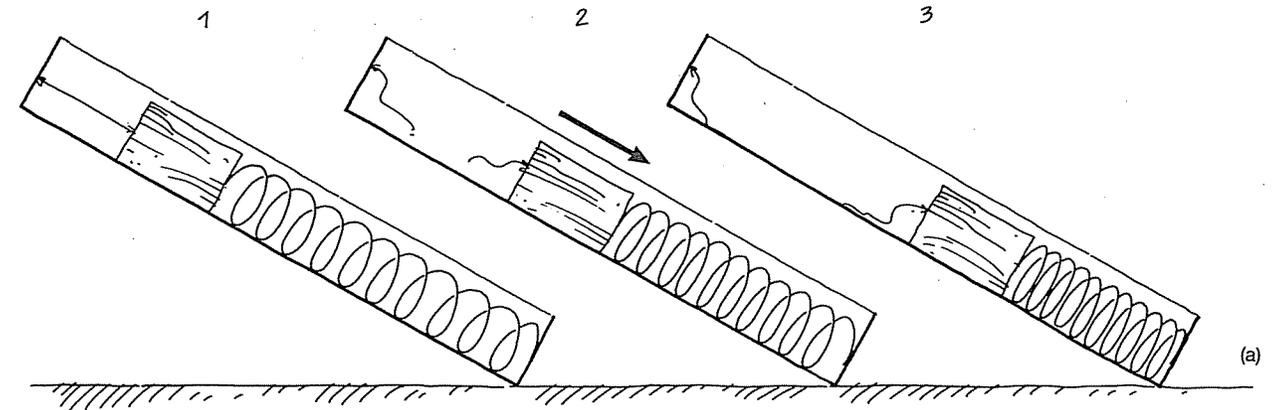
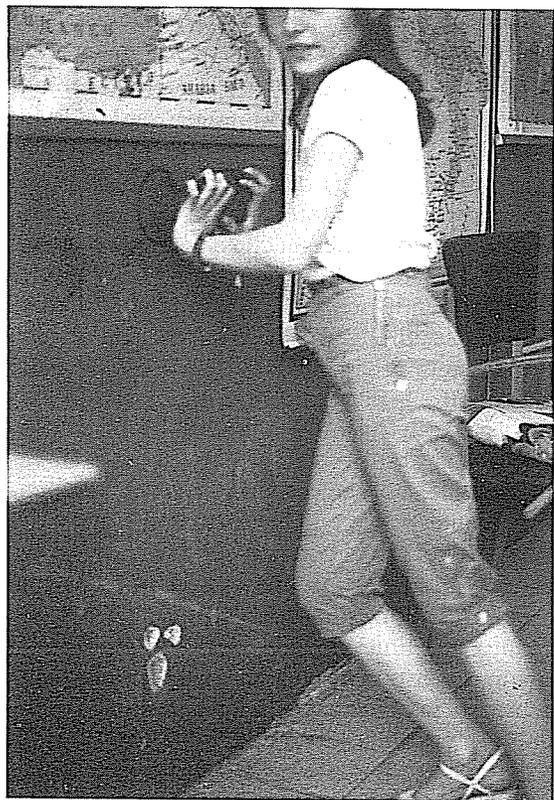


Figura 1.4 - L'interazione peso-molla

(a) Un oggetto schiaccia una molla. (b) Un oggetto fa allungare la molla. Sia in (a) che in (b) una molla viene deformata dal peso di un oggetto. Si passa dalle situazioni iniziali (1), molle nella loro forma naturale alle situazioni finali (3), oggetto in equilibrio sotto l'azione di due forze uguali ed opposte attraverso una successione di situazioni di tipo (2), il peso si sta muovendo e la molla si sta deformando. In entrambi i casi (a) e (b), durante tutta la deformazione il blocco si avvicina alla superficie terrestre e la sua energia potenziale gravitazionale diminuisce. Contemporaneamente la molla si deforma sempre di più ed aumenta l'energia potenziale elastica da essa accumulata. Nella situazione di equilibrio (3) (che a seconda dei casi può essere raggiunta immediatamente o dopo una fase più o meno lunga di oscillazioni) la deformazione si mantiene costante senza più trasferimenti di energia.

– Un sistema deformato può tornare o meno al suo stato indeformato iniziale, una volta cessata l'interazione con il sistema deformante. Una molla deformata torna alla sua lunghezza naturale sia se viene lasciata improvvisamente dalle mani che la stavano tirando o schiacciando, sia se viene da esse "accompagnata" mentre vi ritorna: cambiano solo le modalità con cui ciò avviene. Invece un pezzo di creta schiacciato o modellato conserva la sua nuova forma dopo essere stato lasciato. In realtà per la creta non si può parlare di uno stato indeformato, come per la molla: praticamente ogni configurazione è "indifferentemente" di equilibrio.²

– Perché un sistema torni al suo stato indeformato, quando cessa l'interazione con il sistema deformante,

è necessario che l'energia immagazzinata durante l'azione di deformazione⁵ venga o trasferita ad altri sistemi (fra cui generalmente l'ambiente) o conservata nel sistema stesso, ma ad altri livelli, sotto altra forma. Una molla che è stata compressa, allungata, torta ... una volta tornata al suo stato indeformato non possiede più energia di deformazione elastica (*energia potenziale elastica*). Dall'istante in cui viene rilasciata inizia infatti a liberare l'energia che aveva immagazzinato: dipende dal modo del rilascio la "fine" che fa questa energia. Consideriamo

⁵ Stiamo parlando dell'energia che è stato necessario fornire al sistema per deformarlo, non di quella che eventualmente è stata necessaria per mantenerlo nello stato deformato. Un oggetto in movimento, per es., quando si ferma restituisce l'energia che è stato necessario fornirgli per portarlo dalla quiete fino alla velocità che ha raggiunto, ma non l'energia che è stata eventualmente necessaria per mantenerlo in moto per un certo tempo vincendo gli attriti.

² Per maggiori dettagli vedi Cap. II.

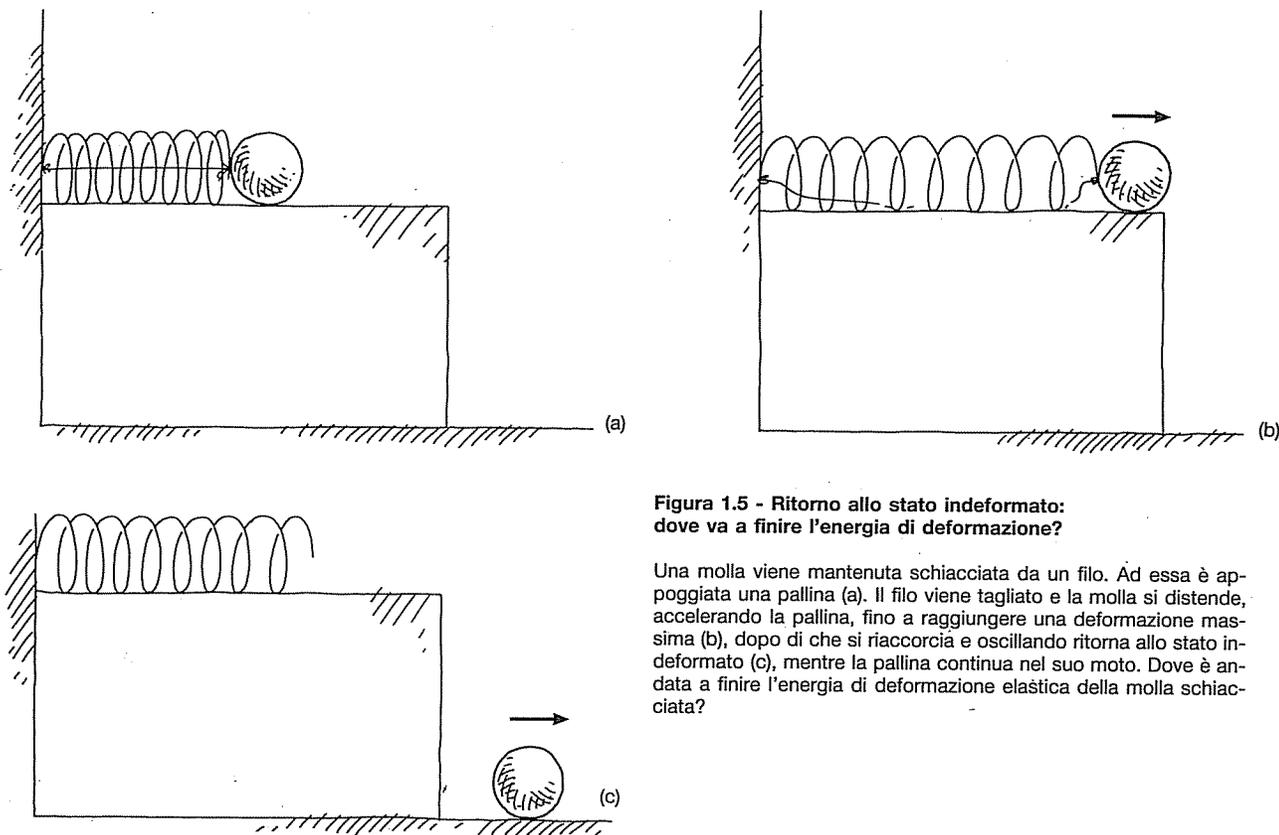


Figura 1.5 - Ritorno allo stato indeformato: dove va a finire l'energia di deformazione?

Una molla viene mantenuta schiacciata da un filo. Ad essa è appoggiata una pallina (a). Il filo viene tagliato e la molla si distende, accelerando la pallina, fino a raggiungere una deformazione massima (b), dopo di che si riaccorcia e oscillando ritorna allo stato indeformato (c), mentre la pallina continua nel suo moto. Dove è andata a finire l'energia di deformazione elastica della molla schiacciata?

ad esempio una molla che, tenuta compressa da un filo, è agganciata al muro e con l'altro estremo poggia contro una pallina. Il tutto è appoggiato su un tavolo (fig. 1.5). Se il filo viene tagliato, la molla si distende spingendo la pallina: nel caso più generale la molla arriva a distendersi anche oltre la lunghezza corrispondente allo stato indeformato, poi si riaccorcia e dopo un certo numero di oscillazioni sempre più piccole si ferma nello stato indeformato. La pallina, che è rimasta attaccata alla molla durante tutta la prima fase di espansione, continua ad andare avanti mentre la molla si riaccorcia. Cosa è successo dell'energia che la molla aveva immagazzinato? Essa è stata in parte trasferita alla pallina come energia di movimento (*energia cinetica* della pallina, in questo caso composta da due termini: energia cinetica di rotazione ed energia cinetica di traslazione); in parte trasferita direttamente al sistema pallina-tavolo, in relazione all'entità delle forze d'attrito fra le due parti (§ 1.5.); in parte trasferita all'ambiente (aria circostante, tavolo) in relazione all'entità delle forze d'attrito di questo con la molla; in parte, infine, in relazione agli attriti interni della molla stessa, è rimasta al suo interno come

energia termica, dopo la fase transitoria di oscillazioni smorzate cui corrispondono conversioni parziali di energia potenziale elastica in energia cinetica della molla e viceversa. La ripartizione dell'iniziale energia elastica immagazzinata nella molla fra tutte queste varie forme dipende da molti fattori, tra cui il rapporto fra massa della molla e massa della pallina e l'entità delle varie forze di attrito in gioco.

– L'insieme dei sistemi che interagiscono costituisce sempre una catena chiusa ed ognuno di essi si *deforma* – a suo modo – nel corso dell'interazione. Se tiriamo (o comprimiamo) la molla tra le nostre due mani i sistemi interagenti sono due: il nostro corpo e la molla. Essi formano una catena chiusa in quanto ognuno di essi è a contatto dell'altro e “scarica” esclusivamente su di esso le proprie azioni di forza.⁶ Entrambi contemporaneamente sono defor-

⁶ Parliamo di “azioni di forza” e non semplicemente di “forze” perché non sempre l'interazione è schematizzabile attraverso l'azione di forze concentrate in qualche punto. Per esempio un palloncino gonfio d'aria e immerso in una vasca d'acqua subisce una variazione di volume determinata da forze agenti uniformemente su tutta la superficie dall'esterno verso l'interno.

mati dal sistema antagonista e lo deformano: sono rispettivamente, l'uno per l'altro, sistemi-sorgente di forza e oggetto su cui agire. Le mani esercitano forze sulle estremità della molla, e la molla le esercita sulle mani; la molla “vede” il corpo umano come sorgente delle forze che si stanno esercitando su di essa e come oggetto delle proprie azioni di forza, e viceversa. Non c'è un sistema che si comporta solo come sorgente di forze o soltanto come oggetto che subisce azioni di forza. Se tiriamo per un estremo una molla attaccata per l'altro estremo ad una parete, i sistemi interagenti aumentano; oltre al nostro corpo ed alla molla sono in gioco la parete ed il pavimento. Ognuno dei quattro sistemi è in contatto con altri due ed esercita forze su di essi attraverso le zone di contatto. La molla infatti tira sia la nostra mano che la parete ed è tirata da entrambe; noi tiriamo la molla e spingiamo contemporaneamente con i piedi contro il pavimento (verso la parete),⁷ mentre siamo tirati dalla molla e spinti dal pavimento; il pavimento spinge contro i nostri piedi e contro la parete, e viene compresso fra i due; la parete tira la molla e spinge il pavimento ed è spinta da quest'ultimo e tirata dalla prima. Di nuovo il sistema complessivo formato dai quattro sottosistemi considerati è *chiuso*: ogni elemento è sorgente di forza che agisce sugli altri elementi contigui ed è oggetto di sollecitazione da parte loro.

– Le azioni di forza che i sistemi interagenti si scambiano a due a due sono sempre uguali e contrarie. Da ciò deriva appunto quanto abbiamo già commentato nel paragrafo precedente: non è possibile, conoscendo solo la configurazione delle forze in gioco, ricavarne informazioni sul verso in cui, volta per volta, avvengono le deformazioni dei sistemi interagenti. Se non ci sono cambiamenti di movimento (accelerazioni o decelerazioni) non c'è squilibrio di forze: c'è invece sempre, come già abbiamo detto, un trasferimento di energia durante la deformazione, ed è il verso di tale trasferimento che determina se la deformazione aumenta o diminuisce.

Nel §1.4. analizzeremo più in particolare, da

⁷ L'accoppiamento corpo-pavimento è consentito dall'attrito, come quello fra mani e molla e fra molla e parete (attrito del gancio infisso nel muro).

L'azione reciproca fra corpo e pavimento è a sua volta resa possibile dalla forza-peso, che pure esiste, e rientra in un'altra “catena” di interazioni reciproche. Per rendere più intuitive le azioni di forza corpo-pavimento dovute al fatto che stiamo allungando la molla basta pensare ad una molla molto “dura” da allungare e ad un pavimento molto scivoloso: tirando la molla finiremmo per terra.

questo punto di vista, una molla allungata di una certa quantità in tre situazioni diverse: 1) mentre sta ulteriormente allungando; 2) mentre sta tornando alla sua lunghezza iniziale; 3) mentre è trattenuata ferma alla lunghezza raggiunta (fig. 1.6).

Mentre avviene il trasferimento di energia le forze che vengono esercitate dai vari sistemi che formano la catena possono aumentare, diminuire, o rimanere della stessa intensità, secondo i casi. Se, per esempio, tiriamo una molla, le trasferiamo energia e dobbiamo esercitare una forza sempre crescente man mano che la molla si allunga; se solleviamo un oggetto pesante gli trasferiamo energia, ma esercitiamo una forza costante durante tutto il sollevamento; se allontaniamo una calamita da un'altra o da un pezzo di ferro, trasferiamo ancora energia al sistema complessivo da loro formato, ma la forza che dobbiamo esercitare diventa sempre più piccola mano a mano che li allontaniamo.⁸

Così delineate le caratteristiche generali del modello, ci sono ancora due punti che ci preme sottolineare, pur senza entrare nel dettaglio:

– Lo stato indeformato di un sistema è sempre determinato dall'esistenza di forze interne al sistema, cioè di forze che si esercitano fra le sue parti, fino al livello atomico. Queste forze, per garantire una situazione di equilibrio (quello che corrisponde appunto allo stato indeformato), devono essere almeno di due tipi diversi, tendenti cioè a generare comportamenti opposti: lo stato indeformato corrisponde alle situazioni in cui esse si controbilanciano esattamente in assenza di azioni esterne. Il verificarsi di interazioni con altri sistemi determina invece uno squilibrio di queste forze interne, ed il risultato consiste nella comparsa delle forze macroscopiche di *reazione* del sistema deformato nei confronti dei sistemi deformanti. Così nelle parti di una molla, a livello microscopico, esistono sia forze attrattive sia forze repulsive che si fanno equilibrio quando la molla ha la sua configurazione naturale. Quando la molla viene allungata, le forze attrattive prendono il sopravvento sulle forze repulsive (che diminuiscono di intensità all'aumentare della distanza fra le parti), generando le forze (macroscopiche) di richiamo della molla, che tendono a ripristi-

⁸ C'è da notare che dal punto di vista percettivo-motorio le tre situazioni non sono equivalenti; il controllo che sappiamo esercitare quando trasferiamo energia a forza crescente è decisamente maggiore di quello che sappiamo esercitare quando trasferiamo energia a forza decrescente. (Sappiamo allungare una molla senza strappi, ma non allontanare una calamita ed un pezzo di ferro senza “strappi”).

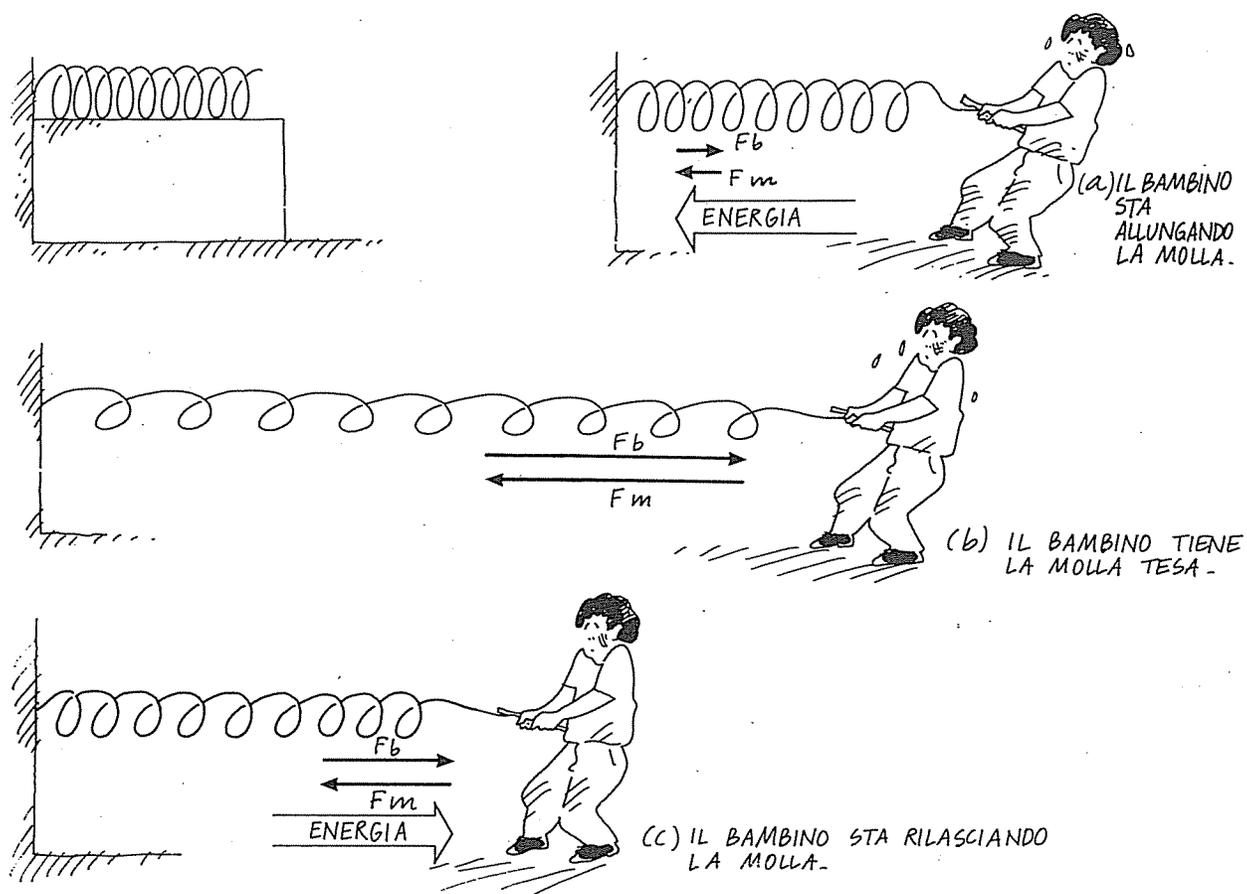


Figura 1.6 - L'interazione molla-bambino dal punto di vista delle forze e dell'energia

(a), (b), (c) sono tutti stati di equilibrio istantaneo: in ognuno di essi tanta forza (F_m) fa la molla sul bambino quanta forza (F_b) fa il bambino sulla molla (naturalmente lo stesso vale per l'interazione tra molla e muro), anche se l'intensità delle forze varia con l'entità dell'allungamento. Dal punto di vista dell'equilibrio delle forze non c'è alcuna differenza fra il caso statico (b) e i due casi (a), (c), né fra questi due c'è alcuna asimmetria legata al verso in cui avviene la deformazione. Dal punto di vista dell'energia, invece, le tre situazioni sono completamente diverse: in (a) il bambino sta trasferendo energia alla molla; in (b) non c'è trasferimento di energia; in (c) è la molla che, ritornando alla sua forma naturale, trasferisce energia al bambino.

nare lo stato indeformato opponendosi alla sollecitazione esterna. Il contrario accade quando la molla viene compressa, perché aumenta l'intensità delle forze repulsive interne.

– Una differenza importante che distingue la presentazione del modello che abbiamo esposto nei confronti delle trattazioni disciplinari tradizionali è il non esserci (volutamente) posti inizialmente nella schematizzazione di punto materiale, poi di corpo rigido, considerando, come si fa generalmente, singoli corpi materiali soggetti alle azioni di singole forze della cui origine ci si disinteressa, e dando una definizione di forza come la *causa* delle variazioni di velocità (o di forma) di un corpo. Non abbiamo voluto porci, cioè, sin dall'inizio in situazioni particolari e già formalizzate, in quanto così facen-

do si allontana la possibilità di affrontare un gran numero di fatti quotidiani e si rende difficilmente accessibile il legame con il concreto anche per le situazioni in cui è adatto, per molti aspetti, questo tipo di schematizzazione. L'approccio che qui suggeriamo è più generale: esso permette dall'inizio una schematizzazione del comportamento di un oggetto materiale qualsiasi anche complesso (si pensi al corpo umano, a qualunque motore ...) sottoposto a trasformazioni meccaniche (deformazioni in senso stretto e movimenti) e pertanto si presenta come uno schema interpretativo potente ad un primo livello di riorganizzazione della esperienza quotidiana. Nondimeno affrontare le cose in questo modo richiede necessariamente uno sforzo a chi, come molti insegnanti, è stato abituato a mi-

surarsi direttamente con formulazioni scolastiche della Fisica.

La formalizzazione disciplinare resta, ovviamente, un punto d'arrivo a cui gli studenti possono essere guidati nell'arco della loro carriera scolastica; ma riteniamo che strade del tipo di quella da noi indicata consentano di arrivarvi (ovviamente su tempi più lunghi, ma più precoci, di quelli sottintesi dalle trattazioni liceali) in maniera veramente significativa per la maggioranza dei ragazzi.

Andiamo ora ad osservare alcune classi di sistemi che, una volta deformati, possono diventare sorgenti di forze (a livello macroscopico) e le caratteristiche che li differenziano uno dall'altro.

1.4. Le variazioni di forma come sorgenti di forze

Se vogliamo deformare un qualunque oggetto dobbiamo esercitare forza e trasferirgli energia durante tutto il processo di deformazione. Ciò avviene sia che torciamo una molla, sia che modelliamo della creta, sia che schiacciamo fra le mani un palloncino gonfio di gas, sia che spezziamo un bastone ... Istante per istante il sistema che stiamo deformando esercita contro di noi forze uguali e contrarie a quelle che stiamo facendo ed istante per istante c'è un flusso di energia da noi verso questo sistema. La forma che esso ha in assenza di azioni esterne (lo stato indeformato) è garantita dall'equilibrio delle forze interne all'oggetto stesso. La nostra azione deformante provoca una rottura di questo equilibrio, da cui derivano appunto le azioni di forza (reazioni) esercitate dal sistema sull'esterno. Ci sono però vari aspetti per cui le variazioni di forma di sistemi diversi si differenziano profondamente una dall'altra.

Cominciamo, riprendendo il paragrafo precedente, a considerare il caso di una molla, anche perché è quello più diffusamente trattato nei libri di testo. Una molla deformata da una forza esterna esercitata da un sistema qualunque – un uomo, un peso ... – diventa un *sistema-sorgente di forze*: i cambiamenti di forma e di dimensioni rendono la molla capace di esercitare azioni di forza sul sistema antagonista. Più il sistema antagonista fa forza contro la molla, più essa si deforma e più fa forza. L'intensità delle forze di reazione della molla che si manifestano durante l'interazione dipende dall'entità delle deformazioni e, tramite queste, dalle sollecitazioni esterne cui è sottoposta. È una relazione

d'ordine diretto che correla le forze esterne esercitate su una molla alle deformazioni e queste ultime alle forze di richiamo che tendono a riportare la molla nella sua posizione di riposo, o *forma naturale*.

Consideriamo più in dettaglio un'interazione molla-bambino (fig. 1.6). L'estremo di una molla è agganciato al muro e l'altro estremo viene tirato lentamente dal bambino fino ad ottenere il massimo allungamento compatibile con le sue forze (fase 1). La molla viene tenuta così tesa per qualche istante (fase 2) e poi rilasciata lentamente (fase 3) finché torna alla sua posizione di riposo.

Durante tutta la fase (1) il bambino deve fare una forza sempre più grande, ma in ogni istante tanta forza fa il bambino quanta ne fa la molla: c'è equilibrio. La stessa condizione di equilibrio istante per istante vale sia nella fase (2), in cui il bambino tiene ferma la molla allungata al massimo e fa quindi una forza costante, sia nella fase (3), in cui il bambino sta facendo tornare la molla alla sua posizione di riposo e quindi fa una forza sempre più piccola. Le tre situazioni indicate in figura 1.6 si riferiscono a tre istanti diversi relativi rispettivamente alle tre fasi dell'esperienza. Sia in (a) che in (b) che in (c) la forza esercitata dal bambino sulla molla (F_b) è uguale e di verso opposto alla forza esercitata dalla molla sul bambino (F_m), però le intensità delle forze variano nelle tre posizioni indicate: esse sono massime nella posizione (b), in cui la molla è più allungata, minime nella posizione (a), in cui è meno allungata, intermedie nella posizione (c). L'intensità delle forze corrisponde solo al fatto che la molla, in un certo istante, sia più o meno allungata; ma il fatto che comunque la forza istantanea con cui la molla tira il bambino è sempre uguale alla forza con cui il bambino tira la molla non ci permette di distinguere da nessuna configurazione istantanea se la molla si sta allungando, si sta accorciando, oppure è tenuta ferma.

Qualcosa però cambia nelle tre situazioni: mentre la molla cambia forma c'è un trasferimento di energia fra molla e bambino, a differenza di quanto avviene quando la molla sta ferma. Nella fase (1) il bambino sta tendendo la molla, sta "vincendo", e le trasferisce energia. La molla più si deforma più fa forza e più è carica di energia (*energia potenziale elastica*). Nella fase (2) il bambino tiene la molla tesa, non vince e non perde: fa la forza necessaria a equilibrare la forza di richiamo della molla, ma non trasferisce energia. Nella fase (3) sta rilasciando la molla, "perde". In questa fase è il sistema-molla

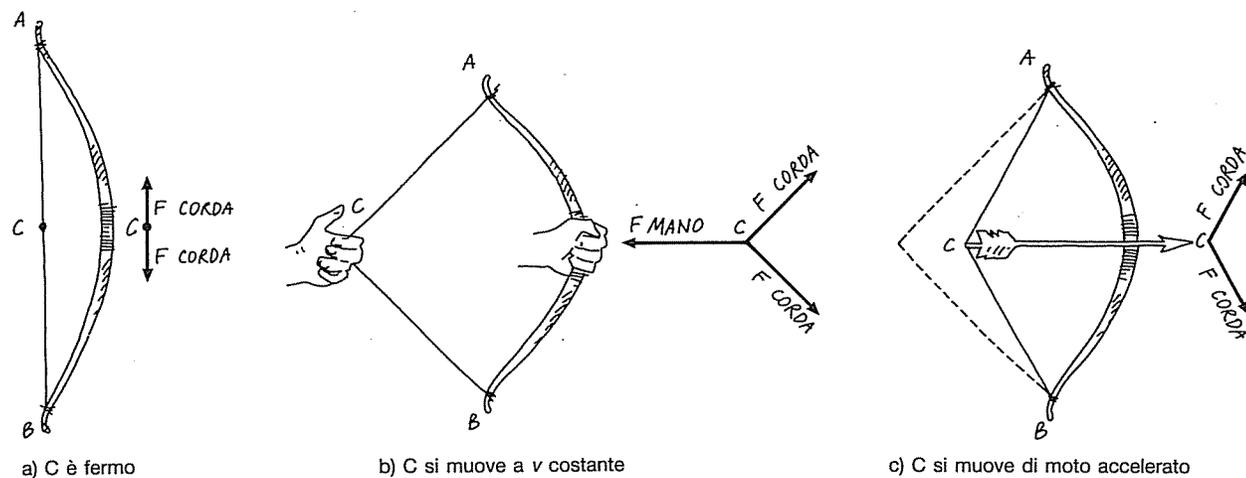


Figura 1.7 - Forze, energia, movimento nel tiro con l'arco

Accanto ad ogni situazione è rappresentato il sistema di forze agenti sul punto medio C della corda.

- (a) L'arco è a riposo: il punto C, al centro della corda, è fermo sotto l'azione delle due forze uguali ed opposte esercitate dai due segmenti di corda, CA e CB. Non ci sono interazioni con sistemi esterni.
- (b) Un bambino sta tenendo l'arco lentamente, a velocità costante. Sul punto C agiscono le forze esercitate dai due segmenti di corda e dalla mano. Esse aumentano durante la messa in tensione dell'arco, ma costituiscono, ad ogni istante, un sistema a risultante nullo. Un discorso analogo vale per il punto dell'arco tenuto con l'altra mano. Il bambino trasferisce all'arco energia che si accumula in esso sotto forma di energia potenziale elastica.
- (c) Il bambino ha lasciato la corda: questa torna alla sua posizione iniziale trasferendo alla freccia, sotto forma di energia cinetica, l'energia potenziale elastica accumulata nella fase di deformazione dell'arco. Il punto C è soggetto all'azione delle due forze fatte dai due segmenti di corda, ora non più equilibrate dalla forza della mano, e la cui intensità diminuisce mano a mano che l'arco si rilascia. Il punto C (e la freccia) si muove di moto accelerato con accelerazione via via decrescente.

che trasferisce energia al bambino; il suo braccio si sposta verso l'estremo della molla vincolato al muro. La molla cede l'energia accumulata nella fase di *carica*, si *scarica*: e man mano che si *scarica* fa una forza via via minore (questa come abbiamo detto, è una caratteristica della molla). Quando la molla è ritornata alla sua forma naturale ha energia potenziale elastica nulla e non interagisce più col bambino. Dal punto di vista della energia il carattere *elastico* della molla sta a significare il fatto che, una volta caricata da un sistema esterno, è possibile il *recupero* (quasi totale) dell'energia non appena, immediatamente o in tempi successivi, le si consenta di tornare alla posizione di riposo.⁹ L'analisi svolta, dunque, che tiene conto anche dello scambio di energia tra i due sistemi, ci permette di distinguere i tre casi che risultano equivalenti se consideriamo solo lo scambio simultaneo di forze.

Tutte le deformazioni che seguono le regole individuate per la molla sono deformazioni elastiche.

⁹ Il recupero è connesso ad un accoppiamento efficace con un altro sistema: altrimenti l'energia viene dissipata in attriti, più o meno rapidamente.

Anche quando un bambino tende un arco per scoccare una freccia, ad esempio, si ha una deformazione elastica: in questo caso c'è equilibrio istantaneo tra le diverse forze agenti sulla freccia (cioè la risultante delle due forze dovute alla corda tesa e la forza esercitata dalla mano che tira la corda), sia che il bambino tenga la mano ferma, sia che stia tendendo o rilasciando lentamente l'arco¹⁰ (fig. 1.7). È il bambino che decide il verso della deformazione. Durante la messa in tensione dell'arco il bambino "vince" e trasferisce energia all'arco che si deforma e si carica. Più si carica e più fa forza. L'energia accumulata dall'arco viene infine "liberata" e trasferita al movimento della freccia, al momento dell'abbandono della corda da parte del bambino.¹¹ È in-

¹⁰ Anche qui c'è "recupero" dell'energia di carica dell'arco solo se c'è un buon accoppiamento con la freccia: se la freccia non c'è, o viene tenuta male, quando il bambino lascia la corda l'energia elastica che si era accumulata si "disperde" nell'ambiente e per attrito interno dell'arco.

¹¹ Notare che, in ogni istante, la mano con cui il bambino tiene l'arco esercita una forza uguale e opposta a quella esercitata dalla mano che tende la corda (del resto, come nel caso della molla). Questo è vero anche mentre la corda, rilasciata, fa forza "in avanti" sulla freccia (analogamente al rinculo di un cannoncino a molla).

vece abbastanza diverso quello che succede quando un bambino si diverte a modellare una palla di creta. Anche in questo caso deve fare forza contro le forze interne che si manifestano nel corso della deformazione. A differenza però di quanto avviene nel caso di deformazioni elastiche, le forze di reazione della creta non dipendono istante per istante dalla deformazione totale che si è raggiunta in quell'istante rispetto alla forma di partenza. Esse dipendono solo dalle variazioni istantanee di forma, cioè da *come la forma sta cambiando* nel momento stesso in cui si esercita forza sulla creta. Come abbiamo già detto, per la creta sono praticamente stabili tutte le forme, anche in assenza di azioni esterne. Cioè per ogni forma si può raggiungere un equilibrio delle forze interne, a differenza di quanto avviene per le molle, per le quali le forze interne possono essere in equilibrio solo per una forma corrispondente allo stato indeformato. Una volta però che la creta ha una forma determinata, perché questa cambi è necessario rompere l'equilibrio instaurato e costruirne uno nuovo. Durante una deformazione la creta passa attraverso tante forme, ognuna corrispondente ad una nuova configurazione di equilibrio delle forze interne: ed è la rapidità di passaggio fra queste forme che determina, istante per istante, la forza di reazione esercitata sull'esterno. La rapidità della variazione è così determinata dall'entità delle forze esterne.¹² A differenza di quanto avviene con la molla, basta attendere un tempo sufficiente perché anche con forze relativamente piccole si possano avere deformazioni relativamente grandi. La deformazione totale dipende cioè sia dall'intensità della sollecitazione esterna che dal tempo per cui essa ha agito: una forza esterna (non sufficientemente piccola) non può essere in equilibrio con nessuna forma della creta; se c'è forza esterna c'è necessariamente un cambiamento continuo di forma. Invece per far cambiare continuamente la forma di una molla ci vuole una variazione continua di forza: se la forza esterna è costante, è anche costante la deformazione.

La creta è un oggetto *plastico*: mentre si deforma fa forza, ma non si *carica* dell'energia che le viene trasferita e che non possiamo in nessun modo recuperare: si dice che c'è *dissipazione* di energia. Questo vuol dire che l'energia trasferita alla creta è continuamente convertita, nel corso delle deformazio-

¹² Sostanzialmente, l'"attrito interno" alla creta determina un comportamento simile a quello determinato dall'"attrito esterno" nel movimento (vedi più avanti § 1.6.).

ni, in una forma non più direttamente (né integralmente) riutilizzabile come energia meccanica. In particolare, si ha trasformazione dell'energia meccanica trasferita con la manipolazione in energia termica: durante l'azione di modellamento la creta si scalda, anche se non è agevole accorgersene. (Però quando si deforma rapidamente un pezzo di filo di ferro non elastico, piegandolo avanti e indietro nello stesso punto, è facile "scottarsi" le dita!).

La creta e la molla, così diverse, sono utilizzate proprio per le proprietà associate al loro cambiare forma: sono scelte apposta per ottenere scopi precisi grazie al loro diverso modo di "cambiare forma" quando sono sottoposte ad opportune sollecitazioni. Ci sono però altri oggetti, e materiali, fatti apposta per non cambiare di forma, anche con sollecitazioni abbastanza grandi. Un muro, un bicchiere, un tavolo ... e restano tali e quali (apprezzabilmente) o si rompono. La molla è un corpo elastico, una palla di creta è un corpo plastico, gli oggetti che abbiamo elencato sono corpi rigidi.¹³ Essi non si deformano apprezzabilmente, né si caricano apprezzabilmente di energia quando vengono sottoposti ad azioni di forze esterne. Naturalmente, le forze di reazione che i corpi rigidi oppongono alle sollecitazioni esterne sono sempre uguali e contrarie ad esse, come avviene sia per i corpi elastici che per quelli plastici.

Il comportamento di un generico sistema materiale deformato da forze esterne è generalmente *una sovrapposizione* dei tre tipi di comportamento fin qui esaminati (elastico, plastico, rigido). Le forze di reazione che insorgono in esso possono essere *simultaneamente* in parte di tipo elastico, in parte come quelle della creta, in parte come quelle di un corpo rigido. L'energia trasferita durante il processo di deformazione segue anch'essa un destino che è determinato dalla combinazione e intreccio di questi tre tipi fondamentali di comportamento.¹⁴

Un tipo ancora diverso di sistema che diviene sorgente di forza variando la sua forma è il corpo umano (e, beninteso, animale o anche vegetale).

¹³ "Elastico", "Plastico", "Rigido" sono in realtà schematizzazioni che identificano comportamenti ideali non verificati da nessun oggetto reale. Un corpo elastico, plastico, rigido, ideale dovrebbe avere l'uno o l'altro dei comportamenti di cui finora abbiamo parlato per qualunque entità delle forze esterne: in realtà qualunque molla per forze troppo piccole non si deforma affatto, per forze troppo grandi si deforma permanentemente o si rompe, ... Considerazioni analoghe valgono per "rigido" e "plastico".

Abbiamo già detto che esso può esercitare forze torcendo, spingendo, tirando, schiacciando. Si può deformare una molla o un altro corpo materiale; mettere in movimento di traslazione e/o di rotazione un oggetto qualsiasi; sollevare un oggetto pesante e allontanare o avvicinare due calamite; vincere le forze di attrito applicando agli oggetti spinte o trazioni adeguate, ecc... Sono tutte azioni che si effettuano grazie a *cambiamenti di forma* del corpo, schematizzabili come sovrapposizioni di contrazioni, dilatazioni, torsioni (scheda 1.1).

Esse richiedono sempre un antagonista contro cui poter esercitare forza: qualche volta l'antagonista è un sistema esterno (la molla fra le mani; l'insieme del pavimento e della scrivania che sto spostando su di esso ...); qualche volta è il peso del proprio corpo (quando ci alziamo e ci abbassiamo, ma anche quando stiamo diritti in piedi); qualche volta sono due diverse parti del corpo che giocano ognuna contro l'altra la parte di antagonista (un esercizio per i muscoli pettorali e dorsali consiste nel tenere le due mani una con l'altra, a braccia piegate, e nel fare forza premendole il più possibile una contro l'altra, o viceversa allontanandole il più possibile una dall'altra).

Qualsiasi tipo di deformazione che consente al corpo umano di esercitare una forza, comporta un consumo di energia. Più forza fa e più energia consuma: ci si stanca molto prima se si sorregge (senza muoversi) un oggetto molto pesante che non se si ha in mano un oggetto leggero.

Questa energia "consumata" internamente per portarsi e mantenersi in uno stato di "fare forza" non va però confusa con l'energia che viene scambiata fra sistemi nel caso della reciproca deformazione. Oltre a *consumare energia* per fare forza, un uomo può, infatti, *cedere energia* ad un sistema antagonista, o riceverne da esso: abbiamo già visto, ad esempio, che nell'interazione uomo-molla (o uomo-arco) l'uomo cede energia alla molla nella fase di

¹⁴ Le deformazioni e le forze di reazione ad esse associate, che insorgono in un sistema materiale, non sono necessariamente dovute all'azione di uno o più sistemi antagonisti che esercitano azioni di forza localizzate alle superfici di contatto con il sistema considerato. Può avvenire che l'avvento di fattori di altro tipo porti alla rottura dell'equilibrio delle forze interne di un sistema con sua conseguente deformazione ed, eventualmente, ad azioni di forza su altri sistemi a contatto. Si pensi all'acqua che solidifica per l'abbassamento della temperatura dell'ambiente: è in grado di spaccare la bottiglia incautamente dimenticata nel freezer e di frantumare poco a poco le rocce in alta montagna. Una corda bagnata si accorcia (e può sollevare un peso ad essa attaccato!), il legno bagnato asciugandosi si deforma, i corpi riscaldati si dilatano ...

tensione, mentre può riceverne¹⁵ nella fase di rilassamento.

Troveremo comportamenti analoghi nel § 1.7. quando parleremo dei motori come sorgente di forza. I sistemi come l'uomo, i motori, gli animali, che funzionano solo grazie ad un continuo consumo di energia, sono radicalmente diversi dai sistemi del tipo delle molle (o delle calamite) e le differenze sono ben presenti anche al pensiero comune, che vede gli uni come sistemi *attivi*, gli altri come sistemi *passivi*. Queste differenze dipendono sostanzialmente dal fatto che i sistemi attivi hanno in se stessi modalità di controllo del consumo di energia e della forza esercitata: vale a dire che possono decidere autonomamente, di fronte ad un sistema antagonista, se cercare di vincere, perdere o mantenersi pari; quindi possono (entro certi limiti) determinare il verso del trasferimento di energia.

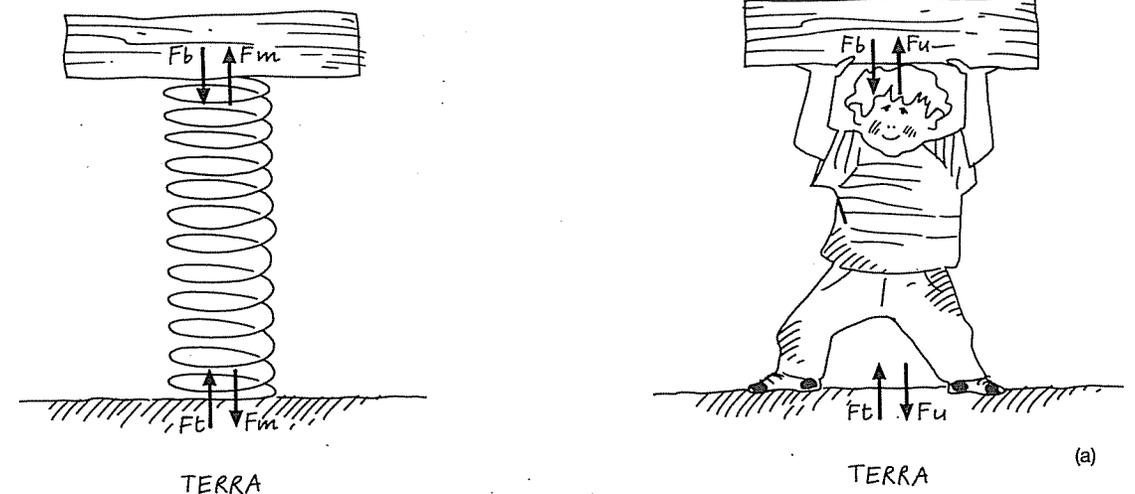
1.5. I campi come sorgenti di forze

Scopo di questo paragrafo è mostrare come il modello deformazione - forza - scambio di energia sia utilizzabile anche per spiegare le interazioni di tipo gravitazionale (in particolare in vicinanza della superficie terrestre) e magnetico. Accenneremo brevemente anche al caso delle interazioni elettriche.

a) Partiamo dalle interazioni gravitazionali. Tutti sappiamo che ci si stanca di più a camminare in salita che non in piano, o in discesa. E la stanchezza aumenta se si devono trasportare oggetti, tanto più quanto più sono pesanti, e tanto più quanto più in alto li si trasporta. Poiché le forze che si devono esercitare, vuoi per sostenere noi stessi e gli oggetti trasportati, vuoi per muoverci, sono le stesse in piano ed in salita, alla maggiore stanchezza deve corrispondere un trasferimento di energia dal nostro corpo verso qualche altro sistema: e ciò accade semplicemente perché abbiamo spostato verso l'alto qualcosa (compresi noi stessi). In effetti ogni volta che vogliamo allontanare un oggetto di una certa massa dalla superficie terrestre dobbiamo fare forza *contro* il peso dell'oggetto, e spendere un'energia legata sia all'intensità della forza che facciamo (e quindi al peso dell'oggetto), sia all'altezza a cui lo trasportiamo. Dove va a finire l'energia spesa? È

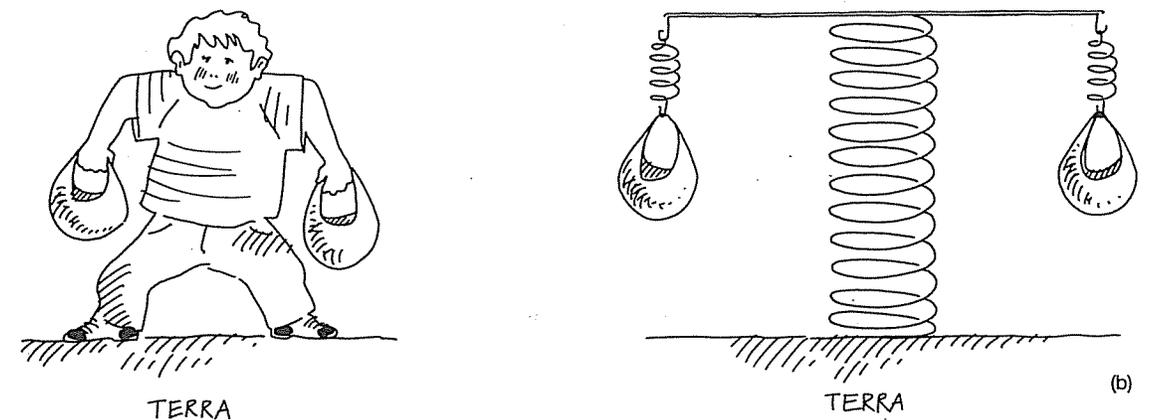
¹⁵ L'energia che il corpo così "riceve" dall'esterno deve a sua volta essere "consumata" (cioè trasformata) all'interno del corpo stesso: è una situazione in qualche modo analoga a quella in cui, in un'automobile, si "frena" con il motore.

Scheda 1.1 - Il corpo umano è una sorgente di forze versatile e consuma energia per fare forza



F_b Forza esercitata dal blocco sulla molla.
 F_m Forze esercitate dalla molla rispettivamente sul blocco e sulla Terra.
 F_t Forza esercitata dalla Terra sulla molla.

F_b Forze esercitate dal blocco sull'uomo.
 F_u Forze esercitate dall'uomo rispettivamente sul blocco e sulla Terra.
 F_t Forze esercitate sull'uomo dalla Terra.



N.B. Non si sono rappresentate le interazioni uomo-Terra e molla-Terra dovute alla loro interazione gravitazionale, cioè i pesi dell'uomo e della molla e le reazioni ad essi.

a) Un blocco di massa M è mantenuto sospeso a mezz'aria da un uomo e da una molla schiacciata. Per reggere il blocco sia l'uomo che la molla "sentendosi" schiacciati fra il blocco e la Terra, che si attraggono reciprocamente con una forza uguale al peso del blocco, esercitano alle due estremità forze simmetriche, anch'esse uguali al peso del blocco. Entrambi esercitano forze di tipo espansivo. L'uomo per fare forza deve però consumare continuamente energia, attinta dalle riserve alimentari e dalla respirazione, e si "stanca" tanto più quanto più pesa il blocco e quanto maggiore è il tempo per cui lo sorregge; la molla deformata fa invece forza ad energia costante, cioè non consuma energia e non si "stanca".

b) In questo caso occorre una schematizzazione più complicata: il corpo dell'uomo che sorregge i due sacchi corrisponde ad un sistema complesso formato da almeno tre molle: due corrispondenti alle braccia sottoposte a sforzi di dilatazione, che quindi esercitano forze di compressione; una corrispondente al tronco ed alle gambe, che invece sono sottoposti a forze di compressione e pertanto esercitano forze di espansione. Anche in questa situazione la persona, a differenza delle molle, consuma energia per esercitare le forze necessarie ad equilibrare il peso dei due sacchi e di conseguenza si stanca.



(c)

c) Il bambino per tenere bloccato il macchinino e far girare la manovella consuma energia sia per esercitare le forze necessarie sia per compensare le perdite di energia di movimento dovute all'attrito; se ci fossero delle molle immobili non riuscirebbe a far girare la manovella.



(d)

d) L'omino spingendo contro l'albero con le mani e contro il terreno con i piedi esercita forze di espansione, consuma energia e si stanca. Come in (a) ed in (b) potrebbe essere sostituito da una molla opportunamente disposta, che eserciterebbe la stessa forza senza consumo di energia.

lecito pensare che venga immagazzinata in qualche sistema? O viene dissipata? Sollevare un peso è come allungare una molla o è come deformare la creta? E cosa si può considerare come stato indeformato e di quale sistema? Rispetto a quale tipo di deformazione? Cerchiamo di rispondere a queste domande.

Se non esiste qualcosa che lo impedisca, qualunque oggetto sta appoggiato alla superficie terrestre. Può restare sollevato da terra solo se è appoggiato od appeso a un qualche sostegno materiale frappo-

sto fra il suolo e se stesso. Anche gli uccelli e gli aerei riescono a tenersi in volo perché con il loro movimento creano degli spostamenti d'aria che li sostengono: senza aria, non potrebbero volare. Possiamo allora, per la forza peso, considerare come sistema globale il sistema formato dalla Terra e dall'oggetto che si considera e come stato indeformato la situazione in cui l'oggetto è poggiato sulla superficie terrestre.

Il peso dell'oggetto, cioè la forza di attrazione che la Terra esercita su di esso, diventa allora dal

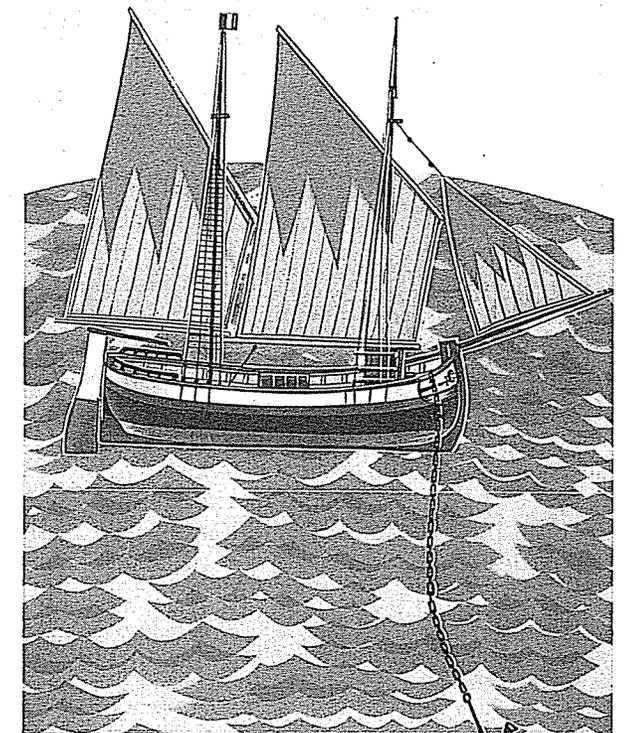
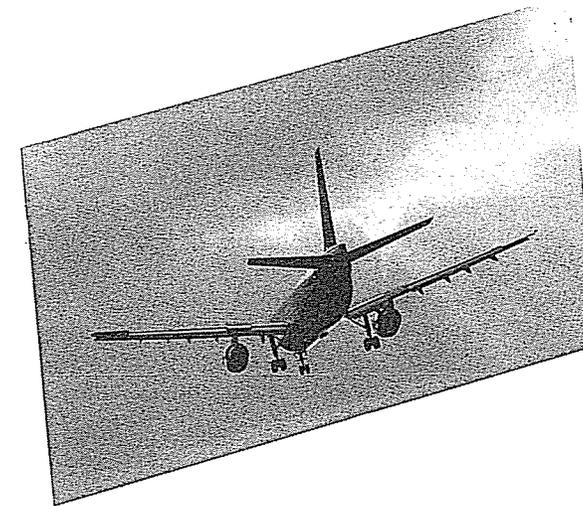
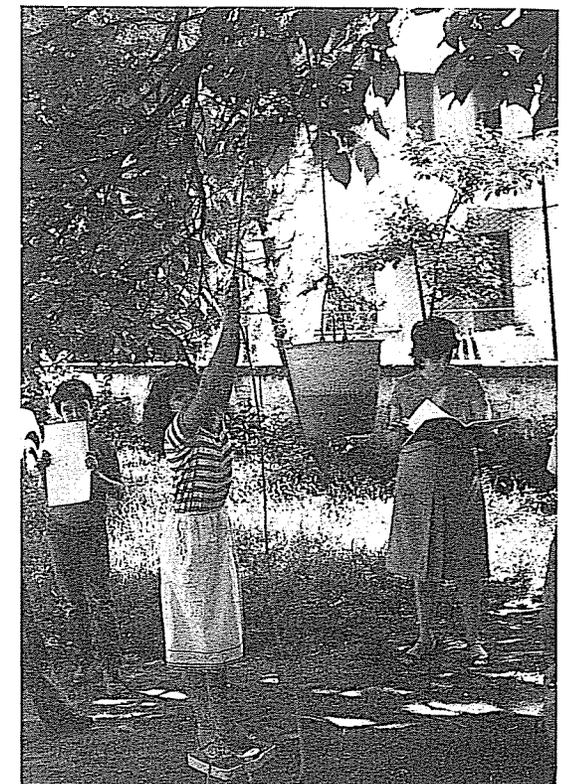
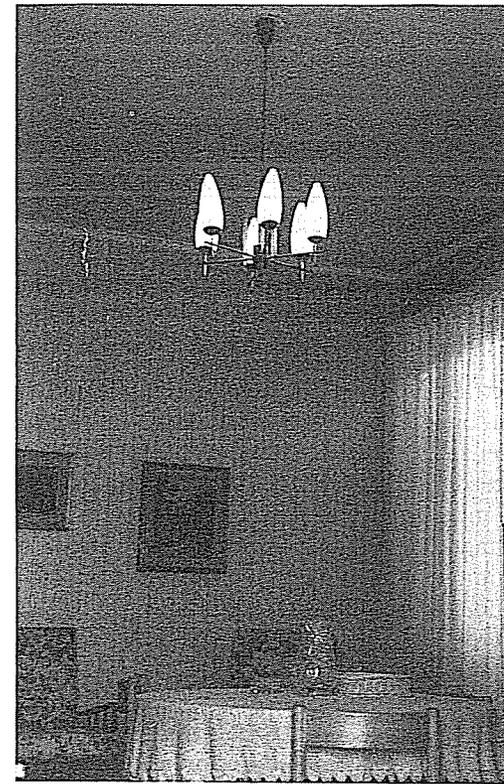


Figura 1.8 - Deformazioni in un sistema gravitazionale

L'aereo, il secchio, la nave, il lampadario, i quadri, la brocca... non sono a contatto con la superficie terrestre. I sistemi gravitazionali formati da ognuno di questi oggetti e dalla Terra sono deformati. Chi impedisce che si trovino nel loro stato indeformato, ossia con ognuno degli oggetti a contatto con la Terra, e in che modo può impedirlo? Si devono scoprire i "sistemi antagonisti" e le azioni di forza che essi esercitano.

punto di vista della nostra descrizione una forza interna al sistema Terra-oggetto: così come la forza ad essa uguale e contraria con cui l'oggetto attrae la Terra. Sono anche forze interne le forze che "tengono insieme" la Terra e quelle che "tengono insieme" l'oggetto, impedendo loro di compenetrarsi mutuamente¹⁶ quando vengono a contatto: cioè le forze responsabili, rispettivamente, della forma rigida della Terra e dell'oggetto. Quando l'oggetto è poggiato sulla superficie terrestre tutte queste forze costituiscono un sistema in equilibrio.

Deformare il sistema gravitazionale significa dunque allontanare fra loro la Terra e l'oggetto: sollevare qualcosa può essere visto come analogo a deformare un oggetto. Tra l'altro, anche in questo caso i sistemi interagenti costituiscono nel loro complesso una catena chiusa nel senso spiegato nel § 1.2.: per verificarlo consideriamo la fig. 1.8. In ognuna delle situazioni illustrate c'è almeno un oggetto tenuto lontano dalla superficie terrestre: il tavolo, il lampadario, la nave, l'aereo, il pacco ... In ognuna delle situazioni c'è un sistema materiale più o meno complesso che sorregge l'oggetto: la casa dalle fondamenta al pavimento, la casa dalle fondamenta al soffitto, il mare, l'aria, l'uomo. L'insieme di ognuno degli oggetti sollevati e della Terra costituisce un sistema gravitazionale deformato; il sistema materiale interposto costituisce il sistema "antagonista" che rende possibile il mantenersi della deformazione. Esso è a sua volta deformato dal sistema Terra-oggetto: il tavolo e la Terra schiacciano fra di loro la casa, dalle fondamenta al pavimento; alla parte di nave immersa nell'acqua corrisponde un ugual volume di acqua che è stato sollevato, quindi allontanato dal fondo marino; l'uomo è schiacciato fra Terra e pacco; il filo del lampadario è tirato dal soffitto, solidale alla Terra, e dal lampadario. Il sistema Terra/oggetto esplica forze sul sistema antagonista nei due punti (nelle due zone) di contatto con l'oggetto e con la Terra, e viceversa. Le due forze che ognuno dei sistemi esercita sull'altro sono fra loro uguali e contrarie e sono anche, in ogni zona di contatto, ciascuna uguale e contraria a quella che il secondo sistema esercita sul primo. La catena è chiusa, per quanto il fatto che non ci sia contatto fra la Terra e l'oggetto (attenzione! Nella nostra descrizione sono le due parti di uno stesso

¹⁶ Nei libri si parla del centro della Terra come posizione di energia minima, quindi di equilibrio in assenza di forze esterne al sistema Terra-oggetto, in quanto si considera il solo campo gravitazionale, il che è lecito finché appunto Terra ed oggetto sono separati.

sistema) renda la cosa meno intuitiva. Dove il contatto manca, la chiusura è garantita dalla esistenza di un *campo* di forze (appunto, nel nostro caso, il *campo* di gravità).

Proviamo ad andare avanti con il paragone. Osserviamo che:

a) per mantenere lo stato deformato, cioè l'oggetto sollevato da Terra, è necessario continuare a fare forza (su di esso e sulla Terra), ma non è necessario trasferire energia al sistema, proprio come abbiamo visto per la molla;

b) se smettiamo di fare forza, per esempio abbandonando l'oggetto dopo averlo sollevato, esso cade ed in assenza di ostacoli finisce di nuovo sulla superficie terrestre: il sistema Terra-oggetto ritorna allo stato indeformato di partenza, come una molla (eventualmente con qualche rimbalzo). Anche la Terra si muove verso l'oggetto mentre questo cade ma, poiché la sua massa è enormemente più grande di quella dell'oggetto, l'accelerazione con cui si muove e di conseguenza la sua velocità, è enormemente più piccola. Praticamente la Terra sta ferma, ed è l'oggetto che vi si precipita sopra (vedi anche il § 1.6. e § 1.8. per il legame fra forza, accelerazione, velocità);

c) mentre l'oggetto cade, il sistema gravitazionale formato da esso e dalla Terra si "scarica" dell'energia accumulata nella fase di reciproco allontanamento: essa viene trasferita sotto forma di energia di movimento ai due costituenti del sistema. È necessario osservare che l'oggetto acquista una velocità via via maggiore; mentre per la Terra vale un discorso analogo, la velocità che essa acquista è talmente piccola che l'energia cinetica associata è del tutto trascurabile, nonostante l'enormità della sua massa. L'oggetto "carico" di energia cinetica può poi trasferire questa energia ad un altro sistema, ad esempio schiacciando una molla, o della creta.

I comportamenti a), b) e c) sono analoghi a quelli di una molla, e diversi da quelli della creta. L'energia che ogni sistema Terra-oggetto possiede in virtù della sua configurazione spaziale è chiamata energia potenziale gravitazionale del sistema.¹⁷ La variazione della distanza relativa della Terra e dell'oggetto che si verifica quando, applicando una

¹⁷ L'energia potenziale gravitazionale immagazzinata corrisponde al lavoro compiuto contro la forza di gravitazione, che in prossimità della superficie terrestre è dato dal prodotto del peso dell'oggetto spostato per la variazione di quota, indipendentemente dalla forma del percorso seguito.

forza e cedendo dell'energia, allontaniamo un oggetto qualsiasi dalla Terra, determina un cambiamento della configurazione e un aumento dell'energia potenziale del sistema a spese dell'energia del sistema deformante.

Se il sistema Terra-oggetto torna alla configurazione iniziale perde l'energia potenziale gravitazionale che aveva acquistato; però, rispetto alla molla, è diversa la relazione tra entità della forza ed entità della deformazione. In una molla, maggiore è la deformazione, maggiore è la forza; nel caso della gravità maggiore è la deformazione, ossia la distanza di separazione degli oggetti formanti il sistema, minore è la forza di reciproca attrazione.

Consideriamo il sistema formato dalla Terra e da una navicella spaziale. Quando la navicella è sulla superficie terrestre, o in prossimità di essa (a distanze molto piccole rispetto al raggio terrestre), la forza che è necessario fare per allontanarla ancora di più può essere considerata costante (è la forza a cui ci riferiamo usualmente parlando di "peso della navicella"). Quando però il veicolo spaziale si trova in una regione la cui distanza dalla superficie della Terra è molte volte il raggio della Terra, la forza di attrazione reciproca è sensibilmente inferiore al *peso* (attrazione sulla superficie della Terra). La forza di attrazione gravitazionale diminuisce cioè all'aumentare della distanza dell'oggetto dalla superficie della Terra, ma varia di poco per piccole variazioni di essa, tanto che il peso degli oggetti appare costante all'esperienza quotidiana. In generale, più il sistema gravitazionale si deforma, quindi si carica di energia a spese del sistema deformante, meno intense sono le azioni di forza che esercita contro un altro sistema con cui interagisce; anche se per piccole variazioni di deformazione si può considerare costante l'intensità della forza (ma non la "carica" di energia!).

Anche per le interazioni gravitazionali si può ricorrere alla metafora di "vincere", "perdere", "essere pari". Vediamo alcuni esempi.

Consideriamo noi stessi quando da una posizione eretta ci abbassiamo lentamente e viceversa quando ci alziamo. In entrambi i casi noi siamo un sistema che sta cambiando forma, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, e siamo contemporaneamente parte di un altro sistema, il sistema gravitazionale costituito appunto dal nostro corpo e dalla Terra. Durante il nostro movimento i due sistemi interagiscono, deformandosi entrambi. C'è un flusso di energia dall'uno e dall'altro. Quando ci abbassiamo il nostro corpo "perde" contro il siste-

ma gravitazionale, che gli trasferisce energia: infatti l'energia potenziale gravitazionale diminuisce. Invece quando ci si alza è il nostro corpo che "vince" contro il sistema potenziale gravitazionale. Se stiamo in una determinata posizione senza alzarci né abbassarci non c'è flusso di energia in nessuno dei due versi: il corpo ed il sistema Terra-corpo sono "pari". Quando ci si alza e ci si abbassa, i nostri muscoli devono esercitare una forza pari al peso della parte del corpo che viene spostata; quando si sta ritto devono esercitare la forza necessaria a mantenere questa configurazione (una persona molto stanca non riesce a mantenersi ritto). In tutti e tre i casi ricaviamo l'energia necessaria ad esercitare queste forze dalle riserve biochimiche del corpo e dalla respirazione.

Abbiamo già visto che un uomo che sale le scale cede energia al sistema complessivo formato da se stesso e dalla Terra, mentre un uomo che scende le scale acquista energia dallo stesso sistema. Nel primo caso "vince" contro il campo gravitazionale perché sta allontanando se stesso dalla superficie terrestre e l'energia gravitazionale corrispondente aumenta; nel secondo caso "perde", perché si sta avvicinando alla superficie terrestre e l'energia gravitazionale diminuisce. Se cammina in piano, non c'è alcuno scambio di energia con il sistema complessivo corpo-Terra. In tutti e tre i casi, però, consuma energia anche semplicemente per esercitare le forze necessarie a tenerlo diritto e a camminare. (Potrebbe scendere senza consumare energia, anzi acquistando energia cinetica, se si lasciasse cadere come un oggetto inanimato! Invece scendendo le scale in maniera controllata il corpo è costretto a dissipare al suo interno e per attrito esterno l'energia gravitazionale che gli viene trasferita).

Anche per il trasporto ad alta quota delle grandi masse d'acqua che costituiscono laghi e fiumi di montagna è stato necessario "vincere" contro il sistema gravitazionale formato dalla Terra e dalla stessa acqua, nel suo luogo iniziale di evaporazione (per esempio la superficie del mare). Ciò è avvenuto (e continuamente avviene) grazie ad un ininterrotto flusso di energia solare. La parte di questa energia connessa al sollevamento dell'acqua (inizialmente sotto forma di vapore) e fino a quote molto più alte, resta immagazzinata come energia potenziale gravitazionale nel sistema costituito dalla Terra e dai bacini di raccolta. È proprio la trasformazione di questa energia potenziale gravitazionale in altra forma quella che consente il funzionamento delle centrali idroelettriche: l'acqua che

cade dalla quota a cui è situato il bacino di raccolta "perde" contro il campo gravitazionale e si avvicina alla superficie della Terra; l'energia potenziale gravitazionale del sistema diminuisce; c'è una trasformazione continua di energia potenziale gravitazionale in energia cinetica dell'acqua che cade, la cui velocità aumenta sempre di più (come per un qualunque oggetto lasciato cadere). Quando, al termine della caduta, l'acqua va ad urtare contro le pale di una turbina, imprimendole un movimento di rotazione, abbiamo un nuovo trasferimento di energia, con altre *deformazioni* e altre forze ... (§ 1.7.).

Considerazioni analoghe si possono fare nelle situazioni in cui l'oggetto che si considera può allontanarsi a distanze molto grandi dalla Terra, a parte il tener conto del fatto che in questo caso le forze gravitazionali non si possono più considerare costanti perché diminuiscono sensibilmente con l'aumentare della distanza reciproca.

b) Per le forze di origine magnetica ed elettrica si possono svolgere considerazioni in parte simili a quelle relative al campo gravitazionale, ma con un'importante differenza: mentre le forze gravitazionali sono sempre attrattive, le forze elettriche e quelle magnetiche possono essere sia attrattive che repulsive. Iniziamo a considerare le interazioni magnetiche. Tutti abbiamo giocato con calamite ed oggetti di ferro od acciaio, e sappiamo che è necessario esercitare azioni di forza per portare a contatto, o separare, secondo i casi, due magneti oppure un magnete ed un oggetto di materiale ferromagnetico. Consideriamo in particolare la situazione in cui il polo Sud di un magnete è a contatto con il polo Nord di un altro magnete (lo stesso discorso vale nel caso di una calamita ed un oggetto di ferro, acciaio ... messi a contatto). Se vogliamo allontanare i due magneti uno dall'altro, dobbiamo esercitare forza su entrambi (per esempio tirandoli in direzione opposte con le due mani). La situazione è simile a quelle già viste per il campo gravitazionale: per sollevare un oggetto, cioè per allontanarlo dalla superficie terrestre, dobbiamo far forza contro di esso (generalmente attraverso le mani) e contro la Terra (generalmente attraverso i piedi). I due magneti, come la Terra e l'oggetto, formano nel loro complesso un sistema che, deformato, diviene sorgente di forze. L'attrazione magnetica gioca il ruolo di forza interna al sistema di due magneti. Lo stato indeformato corrisponde alla posizione in cui sono a contatto il polo Sud di uno con il polo Nord dell'altro, mentre il loro allontanamento corrisponde ad una deformazione progressiva che può essere ot-

tenuta solo esercitando azioni di forza e trasferendo energia al sistema. Per tenere invece il sistema in uno stato deformato definito (con le due parti ad una distanza fissa una dall'altra) è necessario continuare ad esercitare su di esso una forza costante, tanto più piccola quanto più il sistema è deformato (cioè quanto più le due parti sono lontane), ma non si deve trasferirgli energia. Se l'azione deformante cessa, il sistema torna allo stato indeformato, a meno che non intervengano altre azioni antagoniste ad impedirlo. Tutto va come nel caso del campo gravitazionale per variazioni di distanza sufficientemente grandi.

C'è però una difficoltà caratteristica delle interazioni magnetiche con cui si ha ordinariamente a che fare: esse sono in genere trascurabili rispetto ad altre forze comunque presenti, a meno che le distanze fra le due parti del sistema siano molto piccole. Se per esempio si vogliono raccogliere degli spilli con una calamita da sarta, è necessario portarla praticamente quasi a contatto, altrimenti il peso degli spilli supera la forza d'attrazione magnetica e gli spilli restano sul pavimento. Due calamite appoggiate su un tavolo ad una distanza non piccolissima generalmente non si muovono una verso l'altra, perché le rispettive forze d'attrito contro le superfici d'appoggio (§ 1.6.) possono essere più grandi della forza di interazione magnetica. Può anche succedere che se c'è una grossa sproporzione fra le masse dei due oggetti la forza di attrazione magnetica, identica per entrambe le masse, sia minore del peso (o dell'attrito contro la superficie d'appoggio) dell'oggetto a massa maggiore e maggiore del peso (o dell'attrito contro la superficie d'appoggio) dell'altro oggetto. Così che anche per piccolissime distanze, si vedrà solo l'oggetto più leggero muoversi verso quello più pesante e mai il contrario (basta pensare alla calamita e ad uno spillo, o viceversa alla calamita e ad un armadio metallico). Questo stato di cose pone delle difficoltà percettive per la comprensione delle forze, come vedremo nel Cap. V, perché porta intuitivamente a supporre che le azioni di reciproca attrazione siano diverse per i due corpi. D'altra parte è interessante notare che il comportamento di un sistema magnetico formato da due corpi con massa abbastanza diversa è un buon paragone per comprendere perché si vedono sempre gli oggetti cadere verso Terra e mai la Terra cadere verso gli oggetti. Infatti anche nel caso del campo gravitazionale ad una simmetria di forze corrisponde, per l'enorme sproporzione fra le masse, una dissimmetria di movimento, come abbiamo

già rilevato. Questa volta, però, ciò avviene solo per effetto dell'inerzia (§ 1.8.), in quanto è assente l'attrito.

Cosa cambia se al posto di due magneti con poli diversi affacciati, ne consideriamo due che rivolgono uno verso l'altro i poli uguali?

Ora la forza che essi esercitano uno sull'altro è di tipo repulsivo, ancora tanto più grande quanto più sono vicini: se il campo è abbastanza forte, può essere difficile riuscire a portare i due poli a contatto, tenendo ognuno dei due magneti in una mano. Questa volta lo stato che il sistema tende a raggiungere, se non viene mantenuta la distanza relativa dei due magneti, è quello in cui essi si trovano a distanza infinita: è perciò necessario caricare di energia il sistema, esercitando forze crescenti, per avvicinarli. Sembra una situazione del tutto analoga a quella delle molle: più il sistema viene deformato, *compressso*, più si carica di energia e più aumenta la forza che esso esercita verso l'esterno.

Sembrerebbe, in definitiva, che si possa parlare, a proposito di magneti, di due stati "indeformati": a contatto, con i poli eteronimi affacciati e, a distanza infinita, con affacciati i poli omonimi. In realtà i due stati non sono equivalenti: tutte le posizioni con i poli omonimi affacciati sono in effetti instabili, basta una piccolissima spinta perché i magneti si portino ruotando nelle situazioni di poli eteronimi affacciati (si può per esempio tentare di far galleggiare sull'acqua due zattere che sorreggono due calamite a poli omonimi affacciati, in una situazione in cui non ci siano altre forze abbastanza intense da impedire la rotazione). Si può dunque pensare a un solo stato propriamente *indeformato*, quello con i poli eteronimi a contatto: stato che può essere deformato in due modi diversi, allontanando i magneti fra loro e/o ruotandoli uno rispetto all'altro.

c) Terminiamo con un accenno al campo elettrico (o meglio, elettrostatico), che ci consentirà di sottolineare come possa essere talvolta ingannevole fidarsi delle analogie. In effetti, si sarebbe tentati di dire che il caso delle cariche elettriche corrisponde a quello delle calamite: sappiamo dalla scuola secondaria che due corpi aventi cariche elettriche dello stesso segno si respingono (come due magneti con i poli omonimi affacciati); mentre due corpi con cariche elettriche di segno opposto si attraggono (come due calamite con affacciati i poli eteronimi). Guardiamo però le cose un po' più da vicino. Consideriamo due oggetti elettrizzati con cariche di segno opposto. Essi si attraggono reciprocamente e se non ci sono sistemi antagonisti che lo impedisco-

no arrivano a contatto uno dell'altro. A questo punto, però, in un tempo più o meno lungo (che può tendere ad essere anche infinito), le cariche di ognuno dei due corpi migrano verso l'altro e iniziano a neutralizzare le cariche di segno opposto che vi si trovano. Se le cariche iniziali dei due corpi erano della stessa entità, i due corpi alla fine sono entrambi scarichi e fra essi non si esercitano più forze attrattive. Possono quindi essere separati senza che sia più necessario vincere alcuna forza di reciproca attrazione elettrostatica. Le forze di attrazione sono "scomparse": i due oggetti non costituiscono più un sistema sorgente di forze, nel senso inteso finora. Se invece, ad esempio, le cariche positive su uno dei due corpi erano più delle cariche negative sull'altro, alla fine dell'interazione entrambi i corpi potranno essere carichi positivamente. Di conseguenza si respingeranno e, se non esistono al solito sistemi antagonisti che lo impediscano, tenderanno ad allontanarsi definitivamente uno dall'altro. Quando i due corpi saranno a distanza infinita la forza reciproca di repulsione sarà diventata nulla ed essi saranno in pratica del tutto indipendenti uno dall'altro, finché qualche altra forza non tenderà a riavvicinarli. È un caso abbastanza diverso da quello delle forze gravitazionali e magnetiche, che invece determinano come *stato indeformato* (cui il sistema tende in assenza di forze esterne esercitate da sistemi antagonisti) quello in cui i due corpi che formano il sistema sono a reciproco contatto e si attraggono con la massima forza possibile. Ed è un caso anche diverso rispetto a quello dei corpi plastici (come la creta) che invece ammettono una infinità di *stati indeformati*.

Un'analisi più approfondita su analogie e differenze fra questi diversi tipi di sistemi, in particolare per quanto riguarda i campi gravitazionali magnetici ed elettrostatici, richiederebbe d'altra parte di spostarsi a livello microscopico, cioè di struttura della materia, e di considerare quindi più in generale le interazioni elettromagnetiche responsabili della struttura stessa, il che esula dalle possibilità e dagli scopi di questo libro.

1.6. Il movimento relativo come sorgente di forze: attrito dinamico e resistenza del mezzo

Tra le forze più note a livello di esperienza quotidiana, ma contemporaneamente meno comprese, ci sono tutti gli attriti: attriti fra corpi solidi (per

strisciamento o per rotolamento), attriti fra corpi solidi e fluidi, attriti interni ai solidi oppure ai fluidi stessi.

Gli attriti si manifestano ogni qualvolta due corpi solidi a contatto sono "schiacciati" uno contro l'altro (anche per effetto del peso) e sollecitati a muoversi uno rispetto all'altro in una direzione diversa da quella di schiacciamento reciproco; oppure quando un corpo solido immerso (totalmente o parzialmente) in un fluido si muove rispetto ad esso; o, infine, quando parti di un fluido si muovono rispetto ad altre.¹⁸

Andiamo a considerare due tipiche situazioni di queste genere.

Per spostare sul pavimento un blocco a velocità costante dobbiamo tirarlo o spingerlo (fig. 1.9). Tirandolo con un dinamometro (o con un elastico ...) possiamo misurare la forza che dobbiamo fare mentre il blocco si muove (cfr. Cap. III). E se con un po' di pazienza proviamo a trascinare lo stesso blocco a velocità abbastanza uniformi e diverse fra loro, possiamo constatare che per mantenere tali movimenti dobbiamo fare ogni volta una forza che è sempre pressoché la stessa, indipendentemente dalla velocità di trascinamento (come è reso evidente dall'indicazione del dinamometro, o dall'allungamento dell'elastico). Analogamente per mantenere in moto una barchetta (una zattera di polistirolo ...) sull'acqua occorre applicare una forza.

Per esempio possiamo collegare il galleggiante servendoci di una carrucola, ad un blocchetto di peso P che cade (fig. 1.9): se con un po' di pazienza cambiamo il peso del blocchetto e ogni volta osserviamo il movimento, vediamo che sempre, dopo una fase iniziale di aumento graduale della velocità, blocchetto e barchetta arrivano a muoversi a velocità costante, tanto maggiore quanto maggiore è il peso P .¹⁹

Consideriamo il moto del blocco rispetto al pavimento e quello della barchetta rispetto all'acqua.

¹⁸ In questo paragrafo tratteremo solo delle prime due situazioni, molto più facilmente evidenziabili, ed useremo per brevità solo la parola attrito, anche se l'attrito fra solidi e fluidi va più correttamente indicato con il termine di "resistenza viscosa".

¹⁹ L'esperienza può essere resa quantitativa e si può constatare che velocità limite e peso P sono fra loro proporzionali. Ovviamente P non deve essere né troppo piccolo (cioè tale che anche il peso del filo di collegamento alla barchetta non sia più trascurabile), né troppo grande (altrimenti la fase iniziale di moto accelerato dura troppo a lungo). Per una discussione più approfondita del fenomeno ci si può riferire al Cap. IV, in cui viene esaminato il moto di caduta in acqua di palline di vario peso e dimensione che pone problemi analoghi.

In entrambi i casi siamo in presenza di una forza esterna evidentemente costante, che agisce sull'oggetto in moto: dopo una fase iniziale non si osservano più cambiamenti di velocità (accelerazioni) e il moto si mantiene uniforme. Ora, se un oggetto resta fermo sotto l'azione di una forza esercitata su di esso dall'esterno, siamo abituati a pensare - già a livello intuitivo - ad una situazione di equilibrio (l'equilibrio statico): tutta la nostra esperienza ci porta cioè ad interpretare situazioni di questo tipo assumendo che sul corpo fermo agiscono anche altre forze (almeno un'altra) che nel loro complesso danno luogo ad una sollecitazione uguale ed opposta a quella considerata (un oggetto appeso ad una molla, o ad un filo ... sta fermo perché la forza diretta verso il basso del suo peso è equilibrata da una forza diretta verso l'alto dovuta alla deformazione della molla, o del filo; quando due persone che fanno il tiro alla fune stanno ferme si assume che le forze da esse esercitate siano uguali ... e così via). Questa interpretazione è ulteriormente confermata dal fatto che per mantenere una situazione di equilibrio statico al variare di una delle forze, le altre devono variare nello stesso modo. (Se il peso aumenta, la molla si allunga di più e così fa più forza; un adulto può essere equilibrato nel tiro alla fune da più bambini; e così via). Mentre un oggetto è trascinato a velocità uniforme sul pavimento, o sull'acqua, abbiamo visto che ad esso è applicata una forza costante. Se poi si vuole ottenere sempre la stessa velocità al variare delle condizioni, tale forza costante deve essere opportunamente variata: per trascinare un oggetto più pesante (quindi più schiacciato sul pavimento dal suo stesso peso), o per trascinare sempre lo stesso oggetto su un pavimento più ruvido, è necessario fare più forza dall'esterno; perché la barchetta vada alla stessa velocità in un liquido più viscoso, serve più forza; e così via.

Anche queste situazioni, in cui c'è movimento ma la velocità resta costante, possono essere interpretate come situazioni di equilibrio (l'equilibrio stazionario) fra forze diverse: le forze motrici che *causano* il movimento del blocchetto o della barca, e le forze d'attrito che vi si *oppongono*. Variazioni correlate di questi due tipi di forze controllano volta a volta le diverse situazioni particolari che si creano. Come per un peso maggiore la molla automaticamente si allunga, facendo più forza, finché la forza di deformazione equilibra il peso, così per un peso maggiore la velocità della barchetta cresce finché la forza di resistenza dell'acqua non equilibra il peso ... E così via. In altre parole, ci sono forze

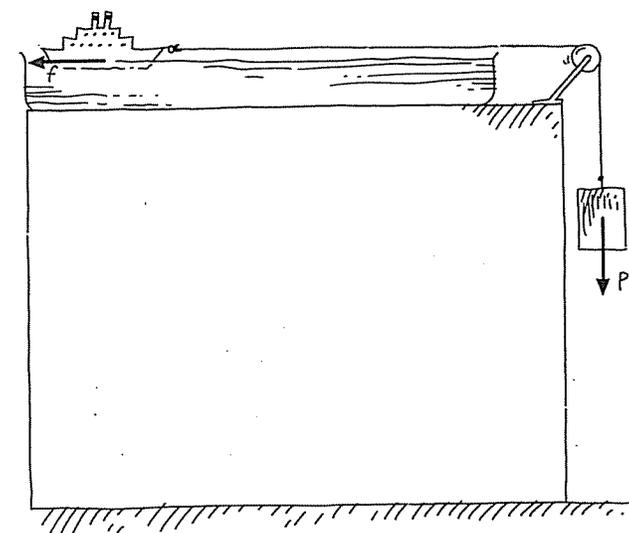
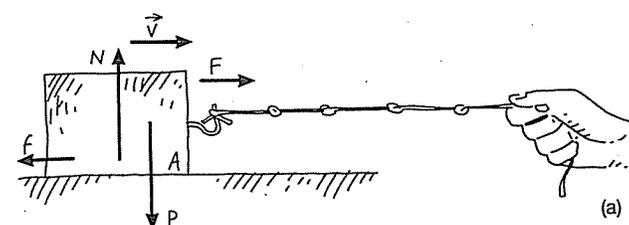


Figura 1.9 - Il movimento relativo di due o più oggetti a contatto come sorgenti di forze

- a) F forza esercitata dalla manovella sul blocco.
 f forza d'attrito, uguale e contraria ad F , esercitata dal pavimento sul blocco.
 P ; N peso del blocco e reazione del pavimento.
- b) P forza esercitata dal blocchetto sulla barca, eguale al peso del blocchetto.
 f forza d'attrito esercitata dall'acqua sulla barca, eguale e contraria a P .

Tirando con una forza sufficiente e senza strappi possiamo far spostare sul pavimento un blocco a velocità costante (a); scegliendo un peso opportuno possiamo far muovere a velocità costante una barchetta nell'acqua (b). Se le velocità sono costanti, gli oggetti devono essere sottoposti ad un sistema di forze che si fanno reciprocamente equilibrio. Quali forze si oppongono rispettivamente alla forza esercitata dalla mano in (a) ed alla forza peso del blocchetto in (b)? Quale ne è l'origine? Il movimento relativo di due oggetti a contatto o il movimento relativo di un oggetto in un mezzo materiale, come l'aria, l'acqua ... costituisce una nuova sorgente di forze: le forze di attrito.

genericamente d'attrito) che sono direttamente determinate dal movimento: e il movimento "si mantiene" uniforme in una situazione in cui a queste forze "fanno equilibrio" altre forze applicate dall'esterno. (Così con l'acceleratore fermo in una certa posizione un'automobile va, in piano, a velocità costante; con l'acceleratore più premuto, e sempre fermo, va a velocità maggiore).

Vediamo ora come si può interpretare una situazione di attrito nell'ambito del nostro modello. Il sistema complessivo che, deformato, diventa sorgente di forze nei riguardi del sistema antagonista che lo deforma, è ora formato dai due corpi a contatto, o dal corpo e dal fluido in cui è immerso. Lo stato complessivo *indeformato* consiste nella quiete relativa delle due parti che lo compongono: se non c'è movimento, non si hanno azioni di forza reciproche; il sistema complessivo è invece *deformato* quando c'è moto relativo. Tralasciando, come già detto, la fase di necessaria accelerazione iniziale, consideriamo ora solo situazioni di moto uniforme di una delle due parti del sistema rispetto all'altra:²⁰ le forze di attrito giocano allora il ruolo di forze interne di richiamo, che tendono a riportare il sistema totale allo stato indeformato, cioè alla quiete re-

lativa tra le due parti. Per mantenere la deformazione (cioè la velocità uniforme) è necessario continuare ad esercitare forza sul sistema, al solito in almeno due posti: si può facilmente vederlo se consideriamo la situazione illustrata in fig. 1.10.

A e B sono i due corpi che formano il nostro sistema. Se vogliamo tenerli in moto uno rispetto all'altro è necessario spingerli con forze uguali in direzioni opposte.

Se si spinge solo A o solo B, si muovono insieme, come un unico corpo (purché sia trascurabile l'attrito fra B e il pavimento attraverso le ruote: altrimenti nasce un altro sistema che a sua volta scambia forze). Il sistema complessivo "antagonista" che permette il moto relativo delle due parti A e B è formato dall'insieme del riferimento rigido e dei due ometti ad esso solidali (al solito si ha una catena chiusa di sistemi, che scambia azioni di forza con il sistema A-B appunto in due zone di contatto: se A e B vengono mantenuti in moto uniforme uno rispetto all'altro, i due ometti sentono ognuno una forza che è proprio uguale all'attrito esistente fra A

²⁰ Ci vuole forza costante per muovere la barchetta rispetto all'acqua ferma, come per tenere ferma la barchetta nell'acqua che scorre ... e così via.

e B. Non ci soffermeremo a dimostrare che anche nel caso di attrito contro un fluido o di attrito di rotolamento il sistema antagonista al sistema formato dalle due parti in moto relativo deve sempre scambiare con esso forza in almeno due posti.

Generalmente uno dei due oggetti in moto relativo è la Terra, o l'aria, o il mare ... cioè il *sistema di riferimento* stesso rispetto a cui si studia il moto dell'oggetto che costituisce il centro di interesse. Ci si viene a trovare, cioè, in una situazione analoga al caso delle forze gravitazionali quando si studia il moto di caduta di un oggetto rispetto alla Terra che in realtà fa parte, insieme all'oggetto stesso, del

Figura 1.10 - La catena delle forze quando c'è moto relativo

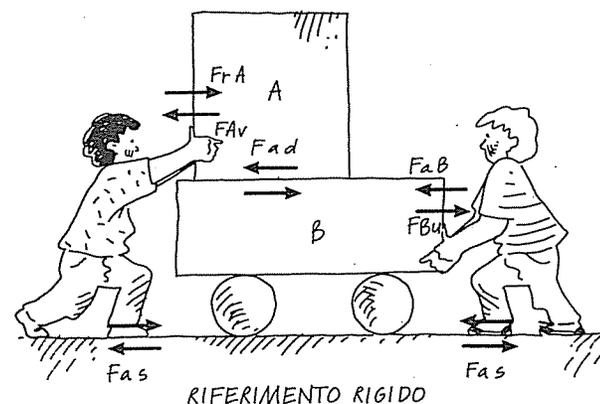
- F_{UA} forze di spinta esercitate dall'omino sul blocco A.
- F_{UB} forze di spinta esercitate dall'omino sul blocco B.
- F_{AU} forza esercitata dal blocco A sull'omino, come reazione alla spinta F_{UA} .
- F_{Ad} forze di attrito dinamico esercitate rispettivamente da A su B e da B su A.
- F_{As} forze di attrito statico fra ognuno dei due omini ed il pavimento, esercitate rispettivamente da ogni omino sul pavimento e dal pavimento su ogni omino.

I due omini spingono rispettivamente A e B in versi opposti, così che A e B scorrono uno sull'altro. Supponiamo del tutto trascurabile l'attrito di rotolamento fra B e il pavimento, che si esercita attraverso le ruote, rispetto all'attrito radente fra A e B.

Supponiamo anche che i due omini restino fermi nelle loro posizioni. La figura rappresenta la catena chiusa di forze di cui fanno parte le forze di attrito fra A e B. Naturalmente esiste un altro sistema di forze, non rappresentato nel disegno, dovuto alle forze peso ed alle relative reazioni del pavimento.

sistema gravitazionale complessivo che viene deformato. Se nella situazione della fig. 1.10 pensiamo che al posto dell'omino che spinge B ci sia un sistema che tiene B bloccato rispetto al riferimento rigido (pavimento ...) ci troviamo appunto nella situazione citata.

Questa volta il sistema complessivo che viene deformato è formato da A e dal riferimento rigido (di cui B è divenuto una parte) ed il sistema antagonista è l'uomo che spinge A, il quale esercita forza (e risente forza) in due parti: nelle mani con cui spinge A e nei piedi con cui spinge contro il riferimento.



Se abbiamo un'automobile che si sta muovendo sulla superficie terrestre, i sistemi antagonisti sono da una parte quelli caratterizzati da moto relativo (automobile e Terra, e automobile e aria); dall'altra, quello formato dal motore (§ 1.7.), che esercita le forze necessarie a mantenere il moto relativo, controbilanciando le forze d'attrito. (Notare che il motore agisce sostanzialmente fra il corpo dell'automobile e l'ambiente esterno attraverso opportuni meccanismi; ci può essere un motore che agisce fra auto e terreno, attraverso le ruote; o un motore che agisce fra auto e aria, attraverso un'elica ... e così via). Le relazioni fra l'entità della deformazione (cioè la velocità relativa delle due parti del sistema) e l'entità delle forze che possono mantenerla costante variano molto a seconda dei casi (attrito di strisciamento, attrito di rotolamento, attrito contro un fluido): rimandiamo ai capitoli specifici (Cap. III e Cap. IV) per un approfondimento di alcuni di questi aspetti.

Guardiamo ora cosa avviene dal punto di vista

dell'energia. Per mantenere il moto relativo occorre, oltre che esercitare forza costante, anche trasferire continuamente energia al sistema complessivo responsabile dell'interazione: il motore di un'automobile consuma continuamente combustibile per mantenere l'auto in moto, "vincendo" le forze d'attrito (e consuma di più se si va a velocità maggiore, a cui corrisponde forza maggiore). Questa energia non può in alcun modo essere recuperata quando la deformazione cessa (quando il moto cessa): come l'energia che viene spesa per modellare la creta.²¹ I sistemi di attrito non si caricano cioè di energia, più fanno forza più dissipano energia a spese dei sistemi con cui interagiscono: vengono

²¹ Attenzione: stiamo parlando dell'energia necessaria a mantenere un moto uniforme! Quando il motore si spegne, c'è dell'energia che può essere recuperata: quella spesa per accelerare l'auto da ferma fino alla velocità di regime. È l'energia che è stata accumulata nel movimento sotto forma di energia cinetica, e che impedisce l'arresto immediato dell'auto a spegnimento del motore.

infatti detti "dissipativi" e "dissipative" vengono dette le forze che essi esercitano. L'energia loro trasferita istante per istante si trasforma in energia termica e le due parti in movimento relativo si riscaldano in vario modo.

Non abbiamo fin qui accennato ad un altro tipo di attrito: l'attrito statico. Consideriamo di nuovo la fig. 1.10: perché le due parti A e B originariamente in quiete si mettano in moto relativo l'una rispetto all'altra, è necessario che i due omini esercitino una forza superiore ad un certo valore minimo (dipendente dalle caratteristiche del sistema A-B): altrimenti nulla si muove. Evidentemente anche in questo caso il sistema A-B è una sorgente di forze: esercita, infatti, contro l'esterno (finché non c'è movimento), forze uguali e contrarie a quelle a cui è sottoposto. Si tratta di forze aventi la stessa origine di quelle che contrastano il moto relativo fra A e B, e che ora impediscono il distacco fra i due corpi; ma che sono in grado di "equilibrare" solo forze esterne inferiori ad una forza data massima. Lasciando al Cap. III ulteriori approfondimenti su questo tipo di forze, qui facciamo notare che ci si trova di fronte ad un sistema composto che si comporta in modo analogo ai "corpi rigidi" nei riguardi delle deformazioni: è cioè in grado di fare forza su un sistema antagonista senza deformarsi in maniera visibile e senza che sia necessario un trasferimento di energia. In effetti se sostituiamo le due persone della fig. 1.10 con due molle attaccate alle pareti del riferimento e compresse in modo da non superare la forza massima d'attrito statico, tutto resta com'è, senza alcun flusso d'energia fra i due sistemi.

1.7. I motori come sorgenti di forze

Delle sorgenti di forze molto particolari sono i motori. Si chiama motore un qualunque sistema che trasforma in energia di movimento altre forme di energia: caratteristica di ogni motore è quella di essere costituito da almeno due parti (variamente accoppiate all'esterno) che, grazie ad una continua trasformazione di energia proveniente da un altro sistema, si tengono in moto relativo una rispetto all'altra. In questa definizione generale rientrano sistemi fra i più disparati:

– quando c'è vento la superficie terrestre e l'atmosfera sono i due elementi-base di un motore naturale; così l'acqua di un fiume e la terraferma. Nel primo caso viene trasformata in energia cinetica dell'aria energia di provenienza solare, che arrivando sul-

la Terra genera situazioni di squilibrio di temperatura, densità, pressione nell'atmosfera; nel secondo viene trasformata in energia cinetica l'energia potenziale gravitazionale dell'acqua originariamente ad un livello superiore a quello del mare (di nuovo, in ultima analisi, energia di origine solare);

– l'uomo e gli animali sono motori in quanto, consumando l'energia chimica fornita dagli alimenti e dall'ossigeno dell'aria, possono muovere parti del loro corpo l'una rispetto all'altra, in una grande varietà di modi;

– sono, ovviamente, motori tutte le macchine artificiali costruite dall'uomo per trasformare in movimento relativo di due parti altre forme di energia:

- il motore a vapore ed i motori a scoppio, in cui il movimento del pistone rispetto al cilindro avviene in definitiva grazie al consumo dell'energia chimica del combustibile;
- i motori elettrici, in cui il motore si muove all'interno dello statore grazie al trasferimento di energia dal campo elettromagnetico che si crea fra le due parti;
- i motori a razzo, in cui le due parti in moto relativo sono il razzo stesso ed il gas combusto, spinti in versi opposti con una energia di movimento che deriva ancora dall'energia chimica del combustibile;
- i motori a molle dei giocattoli, in cui la molla si srotola espandendosi rispetto al suo sostegno e trasferisce al movimento l'energia potenziale elastica accumulata durante la carica;
- gli archi e le balestre ...

Fra tutti questi sistemi esistono ovviamente profonde differenze da molti punti di vista, che rendono arduo fare qualunque classificazione seguendo un criterio univoco. Così si parla di motori ciclici e non ciclici, invertibili e non invertibili, regolabili e non regolabili, e così via ... prendendo in considerazione una pluralità di aspetti su cui qui non ci soffermiamo. D'altra parte quando i motori funzionano trasformando continuamente energia, non si può parlare per loro di uno stato "indeformato" nel senso definito all'inizio del capitolo. Un motore che funziona con continuità è cioè in uno stato continuamente "deformato", naturalmente od artificialmente mantenuto dal flusso d'energia che il motore stesso assorbe e trasferisce istante per istante.

I motori vengono di solito utilizzati accoppiandoli ad un sistema esterno e ciò può essere fatto in molti modi. L'esito dell'accoppiamento (cioè il fine per il quale il motore è utilizzato) può essere

duplice: trasferire a parti del sistema esterno il moto relativo creato fra le parti del motore, facendo forza su questo sistema e trasferendogli energia (energia di movimento, o energia dissipata per attrito); oppure semplicemente fare forza senza trasferire movimento e quindi in definitiva senza trasferire energia (se non, eventualmente, in una fase iniziale di deformazione). In questo caso l'energia di movimento del motore viene totalmente dissipata, cioè totalmente trasformata istante per istante in energia termica, per assicurare il funzionamento (stato di fare forza) del motore stesso. Così una ruspa può essere utilizzata per spingere un oggetto che ingombra una strada. Inizialmente l'oggetto viene accelerato dalla ruspa, che lo mette in movimento facendogli acquistare una velocità sempre più elevata. In questa fase la ruspa cede energia cinetica all'oggetto; contemporaneamente un'altra quota (crescente) di energia va a compensare le perdite di energia cinetica dovute agli attriti che insorgono sin dall'inizio del moto. Alla forza esercitata dalla ruspa sull'oggetto fanno equilibrio la forza d'inerzia (§ 1.8.), dovuta all'aumento continuo di velocità dell'oggetto stesso, e le forze d'attrito. Ad un certo punto si raggiunge una velocità massima ed il movimento di oggetto e ruspa diventa uniforme. In questa fase l'energia ceduta dalla ruspa compensa esattamente le perdite di energia cinetica dell'oggetto dovute agli attriti (contro l'aria e contro il pavimento stradale), che complessivamente danno origine ad una forza uguale e contraria a quella esercitata dalla ruspa sull'oggetto. Alternativamente, può accadere che la ruspa non riesca a spostare l'oggetto: in un primo tempo lo deformerà cedendogli energia, finché la deformazione non cederà costante; da questo momento in poi la forza esercitata dalla ruspa sarà controbilanciata dalle forze di reazione dell'oggetto dovute alla deformazione stessa e l'energia di movimento del motore verrà totalmente dissipata.

Consideriamo altre situazioni.

Un uomo che spinge il carretto su una strada deve continuamente fare forza sul sistema carretto-strada, e trasferirgli energia (come abbiamo visto nel paragrafo precedente), per poter mantenere il movimento contro le forze di attrito. Si stanca perché deve consumare energia, sia per fare forza sia per trasferire energia. Se invece il carretto viene tenuto fermo in salita, l'uomo deve fare forza contro il sistema carretto-Terra (per controbilanciare l'attrazione gravitazionale tra i due), ma non gli trasferisce alcuna energia: in questo caso si stanca perché

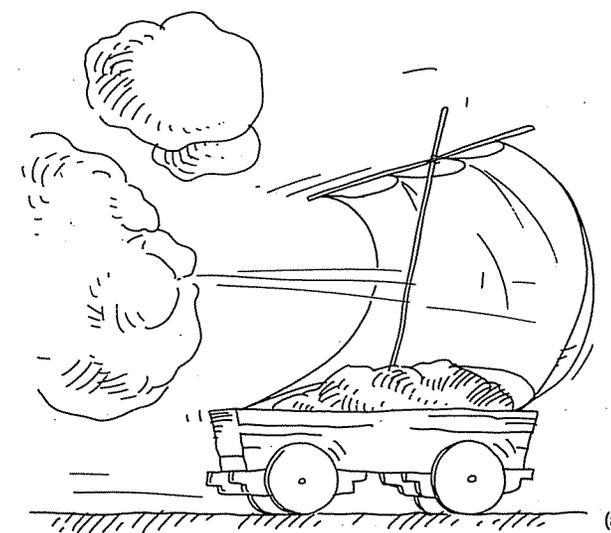
deve consumare l'energia che gli è necessaria per fare forza, ma solo quella. Anche il motore di un'autovettura, per tenerla ferma in salita (facendo slittare la frizione) brucia carburante, ma non trasferisce energia ad alcun sistema meccanico antagonista (campo gravitazionale, o forze d'attrito con la strada e con l'aria).

L'acqua in movimento può mettere in rotazione una turbina, esercitando forza su di essa (in questo caso la superficie terrestre fa contemporaneamente parte del motore, in quanto l'acqua si muove rispetto ad essa, e dell'utilizzatore, perché ad essa è solidale l'asse della turbina) e trasferendole energia; ma può anche, semplicemente, tenere tesa una molla collegata alle palette di una ruota (fig. 1.11) ed in questo caso esercita azioni di forza sulle palette e quindi sulla molla, ma non trasferisce energia meccanica eccetto quella, iniziale, per tendere la molla. L'energia di movimento (energia cinetica) dell'acqua viene cioè dissipata: l'attrito contro le palette ferme consente di esercitare la forza necessaria a tenere deformata la molla, ma frena il movimento dell'acqua, la cui velocità diminuisce a valle delle palette; in effetti l'acqua e la ruota si riscaldano.

Tutti questi esempi sottolineano, appunto, che i motori sono sistemi che possono divenire sorgenti di forze (se accoppiati a sistemi antagonisti) per i quali lo stato di "fare forza" implica strutturalmente un flusso di energia (entrante, trasformata internamente, uscente): flusso che deve mantenersi, indipendentemente dal fatto che, oltre a fare forza, il motore trasferisce anche energia al sistema antagonista. L'energia entrante può avere origini diverse (energia potenziale gravitazionale; energia potenziale elastica ...): essa viene in parte trasformata in energia di movimento relativo alle parti del motore (mai integralmente), quindi "esce" dal motore o sotto forma di energia dissipata (riscaldamento del motore, dell'ambiente e del sistema antagonista), o sotto forma di energia chimica associata a nuove sostanze (per esempio gas di scarico, ceneri ...), o, in parte più o meno consistente, come energia trasferita al sistema antagonista. E tutto ciò avviene continuamente, istante per istante, (ciclo per ciclo, se si tratta di motori ciclici: a scoppio, a vapore ...).

Ogni motore è in definitiva caratterizzato, in quanto motore, dal suo *rendimento*: cioè dal rapporto fra la quantità di energia meccanica che esso è in grado di trasferire istante per istante ai sistemi cui è accoppiato (flusso di energia utile uscente) ed il flusso di energia che proviene dall'esterno, con-

sentendogli di funzionare. Quest'ultimo è sempre maggiore (talvolta molto maggiore) del flusso utile trasferito; mentre per uno stesso motore il rendimento può variare a seconda delle condizioni in cui esso viene usato. (Per esempio nel caso in cui il motore sia utilizzato solo come sorgente di forza, e non come trasmettitore di energia, il "rendimento" diventa nullo: tutta l'energia assorbita dal motore per il suo funzionamento si trasforma in energia termica o chimica). Esiste, comunque, per ogni motore, un rendimento massimo che definisce qual è la massima frazione di energia che il motore può trasferire all'esterno come energia meccanica, istante per istante. (Per esempio il rendimento di un motore a benzina è circa del 30%, di un motore diesel circa 40%, di una turbina a vapore circa 30%).



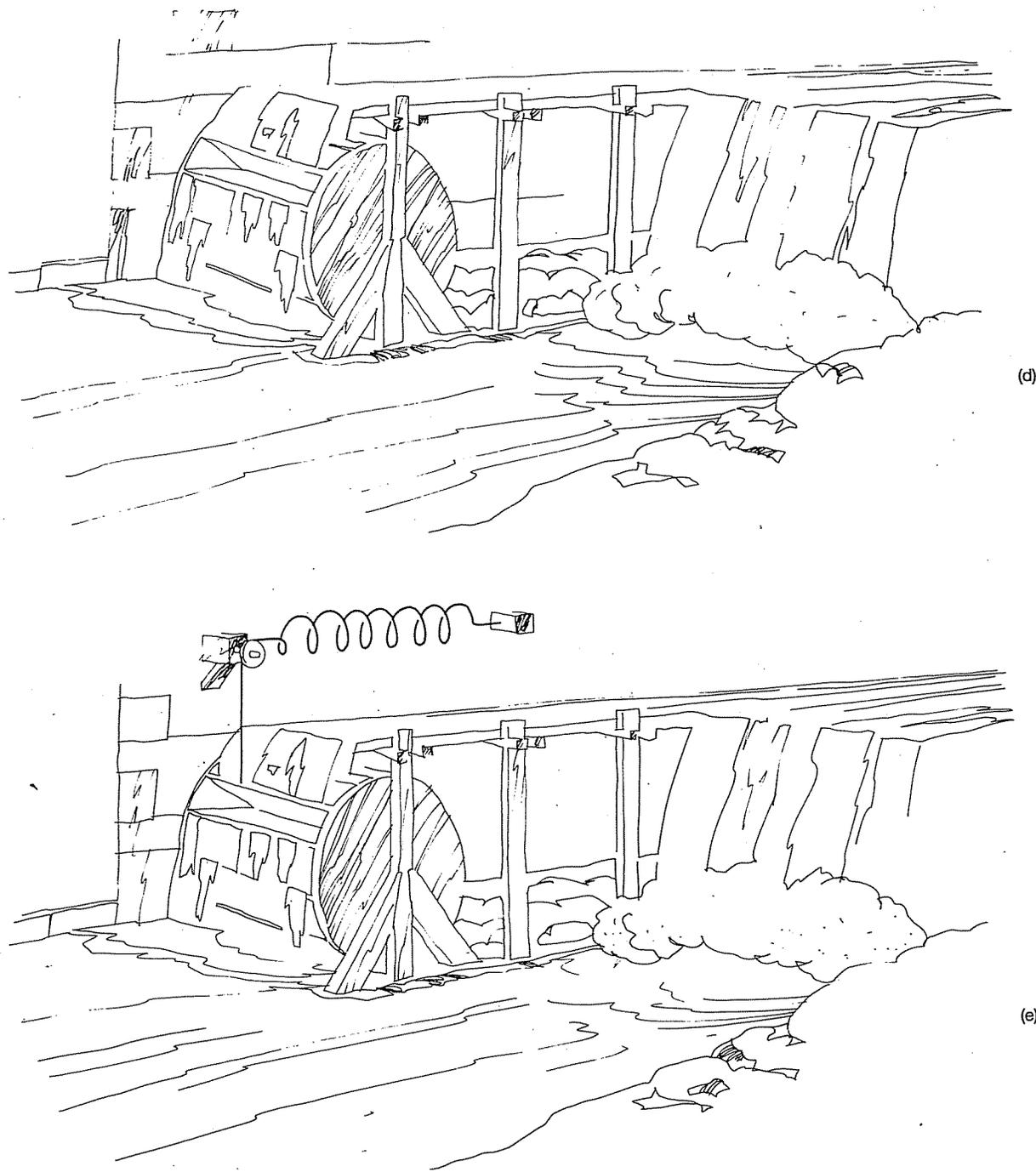


Figura 1.11 - Il vento e la corrente di un fiume sono sorgenti di forze.

(a), (b), (c) La forza del vento può far muovere un carro o far girare delle pale che azionano un generatore per produrre energia elettrica o un mulino.

(d) L'acqua corrente di un fiume urtando sulle pale di una ruota la fa girare mettendo in movimento il meccanismo di macina all'interno del mulino. L'acqua trasferisce energia alla ruota finché vi esercita una forza, cioè finché la velocità di rotazione della ruota è minore della velocità dell'acqua. Quali sono i sistemi interagenti?

(e) L'acqua, urtando sulla ruota, tende una molla. Quando termina il trasferimento di energia dall'acqua alla molla? Cosa fa l'acqua per mantenere la molla tesa?

Dal flusso di energia trasferibile all'utilizzatore dipende poi di volta in volta la relazione fra la forza che il motore può scambiare con l'esterno e la velocità del sistema con cui tale forza è scambiata. Le due grandezze sono in contrapposizione fra loro: una gru che assorbe una determinata quantità di energia per unità di tempo e che ha un certo rendimento, solleverà più velocemente un carico più leggero e meno velocemente un carico più pesante. Infatti, per sollevare un carico (a velocità costante) deve comunque esercitare una forza pari al suo peso; in un tempo dato, deve trasferirgli l'energia corrispondente all'aumento di energia potenziale connesso all'innalzamento del carico in quello stesso tempo.²²

Se oltre al rendimento anche la potenza (cioè il flusso di energia assorbito) della gru è fissata, è fissato il flusso di energia che essa può trasferire, quindi l'altezza a cui può innalzare il carico in un dato intervallo di tempo, altezza che è inversamente proporzionale al peso. La velocità (circa uniforme) sarà quella che consente di trasportare il carico a questa altezza nel tempo fissato. Se invece la gru deve semplicemente tenere il carico alzato ad una certa altezza servendosi del motore, deve solo fare forza, non trasferire energia. Quindi ha necessità di assorbire essa stessa una quantità minore di energia, solo quella che le consente di esercitare una forza uguale al peso del carico; pertanto funziona assorbendo minore potenza.²³ Un trattore che sta sradicando un albero consuma, istante per istante, più o meno carburante a seconda di quanto saldamente l'albero è radicato al terreno; e così via.

In un mulino a vento o in un veliero la spinta del vento contro le pale, o le vele, è tanto più forte quanto maggiore è la velocità del vento rispetto a quella delle pale o delle vele: se le vele avessero la stessa velocità del vento, non si potrebbero esercitare reciprocamente alcuna forza. Consideriamo due imbarcazioni a vela diverse sospinte dallo stesso vento: quando filano sull'acqua ciascuna a velocità costante significa che il sistema che ognuna di

essa costituisce con la superficie del mare riceve esattamente, istante per istante, l'energia necessaria per mantenere il moto relativo fra le due parti, vincendo le forze di attrito che vi si oppongono (§ 1.6.). Se le imbarcazioni sono diverse, generalmente richiedono un flusso diverso di energia per mantenere la stessa deformazione, cioè la stessa velocità rispetto al mare. La velocità che ognuna di esse potrà raggiungere dipende dalla bontà dell'accoppiamento fra il motore (il vento, che è lo stesso, e che quindi corrisponde ad un flusso di energia uguale per unità di superficie) e le barche (forma, estensione, orientabilità ... delle vele, ad esempio); ed anche dall'accoppiamento fra le barche e il mare, che determina la forza d'attrito da vincere (e che dipende da forma, dimensioni, tipo di superficie ... dell'imbarcazione). Il primo fattore infatti è determinante nel fissare la forza esercitata dal vento su ognuna delle imbarcazioni, il secondo nel determinare la forza che occorre applicare per vincere l'attrito. Ogni barca raggiungerà così la velocità in cui sono reciprocamente in equilibrio la *spinta* del vento (derivante dall'attrito con l'aria) e le forze di attrito con l'acqua: a quella velocità, trascurando altri effetti dissipativi, la potenza del vento utilizzata dalla barca corrisponderà al lavoro per unità di tempo fatto contro le forze di attrito fra barca ed acqua.

È importante rendersi conto che nel caso dei motori valgono le regole stabilite per le sorgenti di forza,²⁴ in particolare che il motore deve sempre fare forza in almeno due posti e che, insieme agli utilizzatori, deve essere inserito in una catena chiusa, dal punto di vista delle forze. Lo illustreremo per qualche situazione, lasciando a chi legge di verificarlo nelle altre. Consideriamo un motorino elettrico da giocattolo: possiamo provare a tenere fermo tra le dita di una mano l'asse (o una ruota ad esso collegata) e tra le dita dell'altra il corpo del motore: mettendolo in funzione ci accorgiamo subito che esercita forza da entrambe le parti, tendendo a torcere le nostre mani in versi opposti. Così non possiamo farlo funzionare, perché non possiamo torcere le mani che per un angolo piccolo: non è una catena chiusa di questo tipo che può andare bene. È necessario che le due parti del motore siano accoppiate a due oggetti fisicamente separati,

²² Ricordiamo che in prossimità della superficie terrestre l'aumento di energia potenziale del sistema formato dalla Terra e da un oggetto sollevato ad un'altezza h è data da mgh , ove m è la massa del corpo, g l'accelerazione di gravità: essa è quindi uguale al peso P moltiplicato per il dislivello a cui lo si solleva.

²³ Ovviamente, non conviene mantenere a lungo un peso fermo servendosi del motore: basta un freno, che esercita la forza necessaria attraverso una deformazione, quindi senza consumo di energia.

²⁴ Anche i trasferimenti di energia da un sistema all'altro costituiscono ovviamente catene continue: la degradazione dell'energia, insieme alla sua conservazione, impone però che tali catene siano sempre aperte. Questi aspetti, fenomenologicamente importanti, sono però fuori della discussione affrontata in questo libro.

che facciano però parte di un unico sistema antagonista, cioè collegato nelle sue parti da forze interne che gli garantiscono di poter essere, nei riguardi del motore stesso, una continua sorgente di forze. L'accoppiamento fra le due parti del motore e le due parti dell'utilizzatore può avvenire per attrito statico o dinamico, o perché (cosa che avviene nei motori "naturali") una parte del motore è anche parte dell'utilizzatore. Nel mulino ad acqua, per esempio, le due parti del motore (acqua e Terra) sono rispettivamente collegate alla macina (attraverso tutto il sistema che le trasmette il movimento a partire dalle ruote immerse nell'acqua) ed alla parte fissa sotto di essa. La catena di forze si chiude attraverso l'attrito dinamico fra la macina e la parte sottostante, attraverso il materiale che viene macinato.

1.8. Cenni alle variazioni di movimento come sorgenti di forze

Finora abbiamo considerato situazioni di *equilibrio statico* (oggetti fermi) e di *equilibrio stazionario* (oggetti in moto uniforme). D'altra parte, esiste una terza categoria di esperienze che occorre tenere presente: è ben noto, a tutti, che "fare forza" serve non solo a mantenere una situazione statica o stazionaria, ma anche a cambiarla. In particolare, "serve" forza per cambiare una situazione di movimento: per far muovere qualcosa che è fermo, o per arrestare qualcosa che si muove: per far andare più in fretta o più piano; per far curvare ... Basta inoltre un'analisi qualitativa di questi cambiamenti di movimento per accorgersi che per ognuna di queste situazioni "serve" tanta più forza quanto maggiore è la massa (il peso) del corpo in questione e tanta più forza quanto più rapidamente si vuole ottenere il cambiamento di velocità (in termini tecnici, quanto maggiore è l'accelerazione).

Un'analisi sistematica di questo tipo di situazioni, cui si accennerà appena all'interno di questa proposta, conduce ad enunciare il "II principio della Dinamica". Newton, che per primo lo enunciò, ne diede una formulazione che può ancora essere intesa come descrizione di una situazione di equilibrio (equilibrio dinamico) fra due tipi di forze: la *forza impressa* al corpo dall'esterno e la *forza di inerzia* con cui il corpo stesso "si oppone" al suo cambiamento di velocità.²⁵ Si può vedere che la forza d'inerzia è tanto maggiore quanto maggiore è la massa del corpo, e quanto maggiore l'accelerazione (cambiamento di velocità per unità di tempo): in

formula algebrica, $f = ma$, ove f è la *forza impressa* che si deve esercitare sull'oggetto di massa m perché esso si muova con accelerazione a ; il prodotto ma rappresenta la *forza d'inerzia*. Abbiamo già accennato a vari casi di equilibrio dinamico: quando un oggetto viene lasciato cadere, alla forza peso con cui la Terra l'attrae fa equilibrio l'inerzia mg , ove g è l'accelerazione con cui cade, eguale per tutti i corpi; quando l'arciere lascia la corda dell'arco, alla forza di tipo elastico che essa esercita sulla freccia fa equilibrio la forza d'inerzia della freccia $m \cdot a$, ove a è l'accelerazione (via via decrescente) con cui essa si muove fino al momento del distacco dalla corda. Anche se due calamite (di massa m_1 ed m_2) si muovono l'una verso l'altra su un piano orizzontale, alla forza che si esercita su una di esse, (per esempio quella di massa m_1) per effetto della presenza dell'altra, fa equilibrio la forza d'inerzia $m_1 a_1$ ove a_1 è l'accelerazione (crescente) con cui la calamita di massa m_1 si muove finché non avviene l'urto e le due calamite restano unite. (Il discorso può essere ripetuto per l'altra e poiché le forze magnetiche con cui interagiscono sono fra loro uguali e contrarie in ogni istante vale l'uguaglianza: $m_1 a_1 = m_2 a_2$).²⁶

Come già detto non tratteremo sistematicamente nel seguito questo tipo di equilibrio, perché le difficoltà sia cognitive che operazionali caratteristiche di questa problematica la rendono realmente accessibile solo ad un livello (immediatamente)

²⁵ Dai "Principi" di Newton:

"Definizione III": La forza insita ("vis insita") della materia è la sua disposizione a resistere, per cui ciascun corpo, per quanto sta in esso, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Questa forza è sempre proporzionale al corpo*, né differisce in alcunché dall'inerzia della massa ... A causa dell'inerzia della materia, accade che ogni corpo è rimosso con difficoltà dal suo stato di quiete o di moto, per cui la forza insita può essere chiamata col nome molto espressivo di forza di inerzia. Il corpo in verità esercita questa forza solo nel caso del mutamento del suo stato per effetto di una forza impressa dall'esterno ... (da "Principi Matematici della Filosofia Naturale" a cura di A. Pala; Unione Tipografica Editrice - Fi, 1965, pag. 1965, pagg. 93-95).

* corpo = massa del corpo

"Definizione IV": Una forza impressa è un'azione esercitata sul corpo al fine di mutare il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Questa forza consiste nell'azione in quanto tale e, cessata l'azione, non permane nel corpo. Infatti un corpo persevera in ciascuno stato per la sola forza d'inerzia. (I. C. S., pag. 95).

²⁶ Ciò è vero se sono trascurabili le forze d'attrito, altrimenti anch'esse entrano nel computo delle forze. La forza d'inerzia di un corpo che si sta muovendo di moto accelerato "equilibra" la risultante di tutte le altre forze agenti su di esso, comprese quelle d'attrito (vedi più avanti nel capitolo).

successivo a quello che costituisce l'obiettivo della presente proposta didattica. In effetti è intuitivamente difficile sia arrivare ad una corretta concettualizzazione e misura di "accelerazione", sia vedere una situazione di cambiamento di velocità come descrivibile attraverso una uguaglianza piuttosto che attraverso un "vincere" della forza ... D'altronde è molto importante tenere presente che:

1) ogni volta che un cambiamento delle forze in gioco causa la rottura di un equilibrio statico o dinamico si ha una fase, eventualmente transitoria, di equilibrio dinamico, cioè di moto accelerato (Cap. II, § 2.5. per alcuni esempi). Ciò si verifica praticamente in tutte le attività che proponiamo di svolgere con i bambini, nei capitoli successivi. I bambini notano queste fasi e si deve essere preparati a discuterle con loro almeno qualitativamente, se si vuole arrivare ad un accantonamento del problema, per fissare l'attenzione sugli altri aspetti dell'interazione.

2) Durante ogni fase di aumento della velocità si ha un aumento dell'energia cinetica del corpo che si muove e una perdita corrispondente durante ogni fase di rallentamento. Al solito questi aumenti e queste perdite corrispondono a trasferimenti di energia o fra sistemi diversi (uno dei quali comprende il corpo stesso od è da lui costituito) o fra livelli diversi di un unico sistema (di cui fa ovviamente parte il corpo in movimento accelerato).

3) In alcune situazioni di movimento con variazioni di velocità in cui ci imatteremo nel seguito di questa guida (movimento di oggetti sul pavimento o su altre superfici) si ha a che fare con due forze distinte, entrambe connesse al movimento ed entrambe proporzionali alla massa (al peso) dell'oggetto che si muove: la forza di attrito dinamico e la

forza di inerzia. Ambedue queste forze concorrono a resistere alla *forza impressa*, facendole equilibrio (in termini algebrici $f = ma + K mg$, ove f è la forza impressa, ma la forza d'inerzia, $K mg$ la forza d'attrito dinamico proporzionale alla forza peso che, come abbiamo visto precedentemente, è uguale alla forza d'inerzia mg caratteristica del moto di caduta libera).

In definitiva ci teniamo a sottolineare che il fatto di non potere, e non volere, affrontare con i bambini uno studio approfondito e formalizzato dell'inerzia non esime l'adulto dal dover padroneggiare con sufficiente sicurezza i termini qualitativi del problema. Sia perché non sarebbe possibile organizzare attività per i bambini in cui non esistano fasi di movimento accelerato; sia perché, anche se fosse possibile farlo, non sarebbe cognitivamente opportuno. È infatti necessario, nel momento in cui si costruiscono gradualmente modelli scientifici parziali di interpretazione dei fatti naturali, rendersi conto dei loro limiti, cioè proprio dell'esistenza di fenomenologie in cui essi non sono applicabili. Così deve diventare chiaro ai bambini che le situazioni su cui inizialmente ci si sofferma, per trovare le appropriate descrizioni di quanto accade in termini di equilibrio di forze, sono solo situazioni statiche o stazionarie: ma che ne esistono anche altre, più complesse, che di proposito vengono lasciate da parte nel corso del lavoro qui presentato. Da parte nostra cercheremo di sottolineare, nel resto della guida, i casi di questo tipo che si presenteranno, e di darne una breve descrizione/interpretazione ad uso di chi legge. Il resto potrà essere fatto personalmente dall'insegnante, eventualmente con la guida di un testo di scuola secondaria, ma soprattutto con uno sforzo di accurata ed estesa riflessione sull'esperienza quotidiana di tutti.

Capitolo 2. Forze elastiche

2.1. Introduzione

Nella scuola media, inferiore e superiore, l'indagine sui fenomeni elastici si esaurisce, quasi sempre, con lo studio della relazione di proporzionalità tra gli allungamenti che subisce una molla di acciaio e le intensità delle forze ad essa applicate. Riteniamo che nell'affrontare con i ragazzi di qualunque livello scolastico il tema delle deformazioni elastiche dei corpi sia importante e possibile svolgere un lavoro molto più esteso ed approfondito, che consenta di comprendere i fenomeni dell'elasticità come una sottoclasse dei più generali fenomeni di deformazione.

Si ha deformazione in un oggetto ogni qualvolta esso viene sollecitato dall'azione di forze esterne. Abbiamo già detto che la configurazione propria, "naturale" per così dire, che un oggetto ha in assenza di forze esterne è il risultato dell'equilibrio fra le forze ad esso interne, ossia le forze che ogni parte del corpo esercita sulle parti vicine (Cap. I, § 1.3.). La deformazione nasce dall'interazione fra forze interne e forze esterne e corrisponde a nuove situazioni di equilibrio, in cui il corpo assume nuove forme e dimensioni (fig. 2.1).

A rigore questo discorso va bene solo per un corpo solido: altrimenti non esiste una forma naturale ben definita, rispetto a cui considerare le deformazioni. Uno straccio da cucina può assumere diverse forme; un liquido si adatta alla forma del recipiente che lo contiene, o si sparge tutto su una superficie orizzontale, o costituisce un filo od un velo più o meno continuo se viene versato. Infatti, esiste sempre la forza peso, che concorre a determinare nei non-solidi (fermi o in movimento) la configurazione che essi assumono momento per momento.

Evidentemente la struttura cognitiva di base che gioca un ruolo fondamentale nello studio delle deformazioni, in particolare di quelle elastiche, è

l'idea intuitiva e molto generale di "forma". Sulla base di essa il bambino organizza sin dall'inizio la propria conoscenza e percepisce le diversità degli oggetti del mondo in cui vive: l'idea di forma è strettamente associata al riconoscimento di un oggetto definito. Il bambino, sin da molto piccolo, impara infatti a riconoscere, cioè identificare un oggetto come unico e ben determinato qualunque distanza lo veda (entro ampi limiti) ed in qualunque modo esso sia orientato nello spazio, organizzando e correlando tra loro le diverse percezioni visive e tattili che ne riceve nelle diverse condizioni. La "forma" dell'oggetto è l'organizzazione globale di queste percezioni in una immagine mentale complessiva, che consente di prevedere e dominare le diverse immagini percettive (sempre parziali: in un singolo atto visivo non si vede mai un oggetto completamente ... Questa immagine mentale tollera anche deformazioni oggettive, cioè permette ancora l'identificazione, anche se l'oggetto viene più o meno deformato fisicamente, entro ampi limiti. Una molla, ad es., viene percepita e riconosciuta come tale da qualunque punto la si guardi (da vicino e da lontano, dall'alto o dal basso, da destra o da sinistra) e indipendentemente dal suo stato (deformata o indeformata che sia). Lo stesso accade per molti altri oggetti o sistemi, anche sottoposti a deformazioni molto marcate.

Lo studio delle deformazioni indotte nei corpi dall'azione di forze esterne, quindi dei cambiamenti di dimensione ed in genere di forma, richiede però una gestione cognitiva che superi il piano puramente percettivo, verso l'acquisizione di nozioni geometriche che consentano il confronto operativo di forme e dimensioni degli oggetti prima, durante e dopo le deformazioni. Nei casi più semplici, in cui cambiano apprezzabilmente le dimensioni ma non la forma, o viceversa (un palloncino che viene

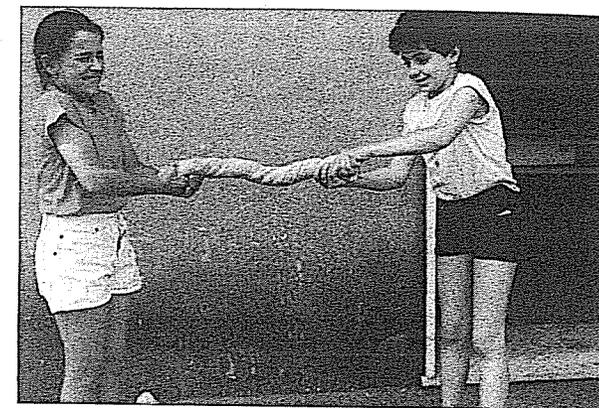
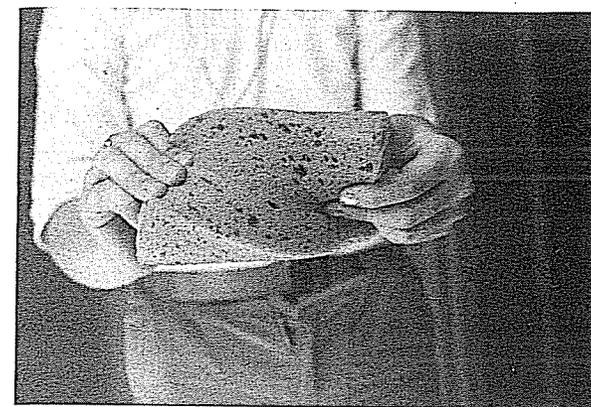
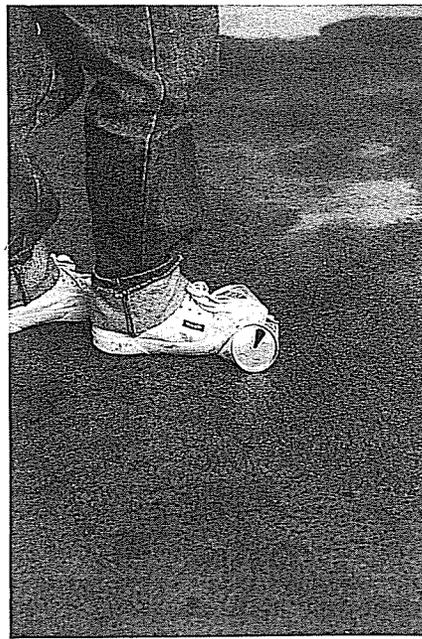
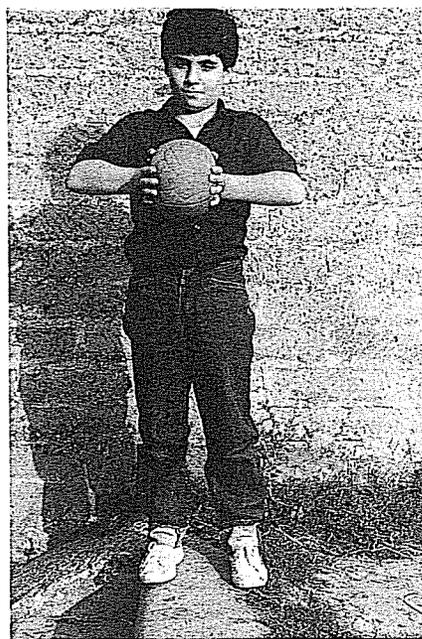
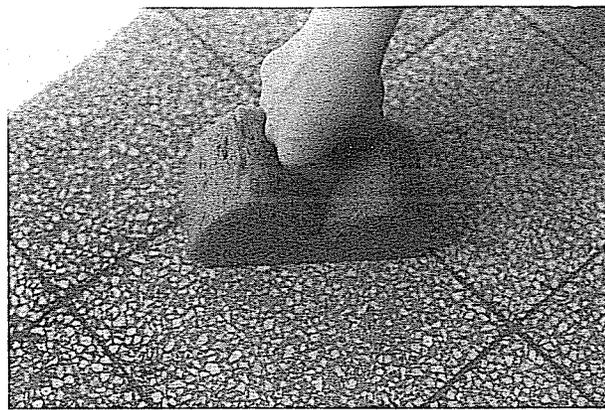
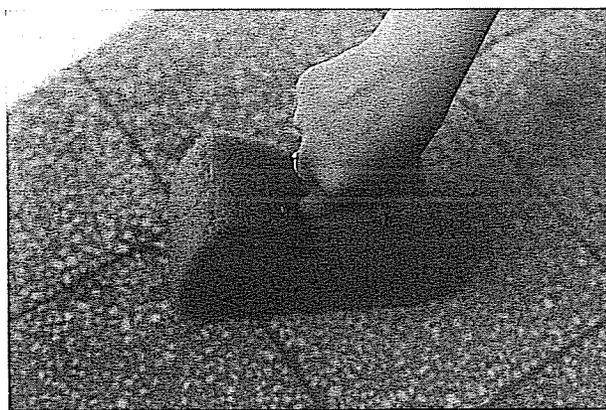


Figura 2.1 - Deformazioni di oggetti

La deformazione nasce dall'interazione fra forze interne e forze esterne e corrisponde a nuove situazioni di equilibrio in cui l'oggetto deformato assume forme e dimensioni diverse da quelle che aveva. Oggetti diversi, costituiti da materiali diversi, hanno proprietà diverse e possono essere deformati in modi diversi.

gonfiato o sgonfiato restando sempre approssimativamente sferico; una molla che viene accorciata o allungata; una corda che viene torta ...) si può arrivare a ricostruire delle relazioni soddisfacenti tra forza-deformazione già sul piano qualitativo, senza la necessità di eseguire misure. Ciò può risultare praticamente impossibile nei casi più complessi in cui variano sia la forma che le dimensioni (una spugna che viene schiacciata con un dito). Caso per caso è comunque necessario individuare le variabili significative in gioco ed esplicitare le relazioni tra di esse (e si tratta di decidere anche cosa non si guarda). Se per esempio si ha a che fare con molle compresse od allungate si dovrà tenere conto dei tipi di molle usate, delle loro lunghezze "naturali", dell'entità degli allungamenti o accorciamenti, nonché dei valori delle forze di trazione o compressione, e stabilire relazioni corrette che leghino esplicitamente fra loro questi diversi fattori. Ciò può essere fatto a più livelli: partendo da un semplice riconoscimento di relazioni d'ordine (più tiro una stessa molla e più si allunga; più una molla, diversa dalla prima, è "dura", minori saranno gli allungamenti, a parità di forze applicate; più una molla è lunga, a parità di "durezza" e meno forza ci vuole per allungarla della stessa quantità ...) si può, infatti, arrivare a dare formulazioni matematiche sempre più complesse e generali delle diverse relazioni, passando via via attraverso l'algebra elementare, il calcolo vettoriale, il calcolo differenziale, fino a stabilire le equazioni fra tensori che si studiano in corsi universitari avanzati. Con i bambini della scuola elementare si arriva inizialmente ad individuare le *variabili*

significative, a rendersi conto della complessità dei loro reciproci intrecci, a ricostruire le relazioni d'ordine che legano tali variabili fra loro e a distinguere, per alcune di queste relazioni, i casi in cui esse si traducono sul piano quantitativo in relazioni di proporzionalità dai casi in cui ciò non si verifica. Naturalmente quest'ultimo passaggio richiede che il bambino esegua misure, innanzitutto di lunghezza, e quindi che abbia acquisito la nozione di lunghezza come grandezza fisica e le procedure necessarie per la misurazione. Così il lavoro sulle forze si intreccia con lo studio della geometria, in accordo con il fatto che le operazioni di misura costituiscono un punto cruciale di contatto fra lo studio della Matematica e quello delle Scienze.

Come dicevamo all'inizio, le deformazioni elastiche di una molla o di una spugna sono emblematiche rispetto ad una parte delle possibili deformazioni dei corpi. Oggetti come le molle, le spugne, un materasso di gomma-piuma ritornano di norma alla loro forma naturale quando le forze che li avevano deformati scompaiono: deformazioni di questo tipo sono appunto dette *deformazioni elastiche*. Su altri corpi le forze deformanti possono produrre deformazioni permanenti. Un blocco di creta modellato conserva la sua nuova forma, un barattolo di latta schiacciato con un piede anche: queste deformazioni sono dette *deformazioni anelastiche*. In molti casi gli oggetti esibiscono un comportamento misto: cessando l'azione delle forze deformanti, l'oggetto riacquista una forma intermedia fra quella iniziale e quella deformata, tanto più vicina all'una o all'altra quanto più prevale sull'altro uno dei due

comportamenti: il comportamento elastico o il comportamento anelastico. Se, ad esempio, si tengono piegati (non troppo!) fili di stagno, di rame, di ferro e di acciaio dello stesso diametro e poi si rilasciano, si osserva che il filo di stagno rimane piegato quasi completamente, prevalendo il comportamento anelastico, mentre quello di acciaio riacquista la configurazione rettilinea originaria, essendo dominante il comportamento elastico; invece i fili di rame e di ferro manifestano un comportamento intermedio (fig. 2.2). Anche una molla quando viene tesa oltre un certo limite da forze di trazione non ritorna più alla sua lunghezza originaria, o addirittura si spezza ... Caso per caso quello che avviene dipende da vari fattori: tipo e intensità delle sollecitazioni; caratteristiche (materiale, forma, dimensioni ...) del corpo su cui esse agiscono, che possono dipendere anche dalle condizioni ambientali di temperatura, umidità, pressione, tempo per cui agiscono.

Ci sono in particolare corpi per i quali le deformazioni si mantengono di entità trascurabile anche per sollecitazioni di intensità crescente, fino praticamente al limite di rottura: abbiamo visto nel Cap. I, § 1.4. che il loro comportamento è schematizzato dalla idealizzazione di *corpo rigido*, cioè di corpo indeformabile per *qualsunque* entità e tipo di sollecitazione esterna. È una schematizzazione corrispondente a una larga parte della nostra esperienza quotidiana, che torna molto utile nello studio dei fenomeni meccanici più svariati.¹

Si intende, nei paragrafi successivi, indicare linee di lavoro che consentano di portare i ragazzi:

a) alla consapevolezza delle schematizzazioni di cui abbiamo sin qui parlato (comportamento elastico,

¹ Vengono di norma considerati rigidi la superficie orizzontale di un tavolo o del pavimento, il gancio, il supporto cui è stato fissato, nonché il filo che sostiene a mezz'aria un corpo pesante, l'asse di una ruota ... Il piano di appoggio, il gancio, il filo, l'asse della ruota vengono chiamati anche "vincoli" in quanto impediscono alcuni movimenti del corpo ad essi connesso, esercitando forze di reazione che equilibrano le forze esterne che tenderebbero a produrre questi movimenti. L'asse di una ruota, per esempio, sviluppa una reazione che neutralizza l'azione di ogni forza che tenda a produrre qualunque movimento della ruota diverso dalla rotazione, la reazione della superficie del tavolo equilibra la forza peso degli oggetti che vi sono appoggiati impedendone la caduta ... D'altra parte suppone che i vincoli siano rigidi significa ammettere che essi possano equilibrare forze esterne grandi quanto si vuole, senza deformarsi. Queste condizioni sono ovviamente del tutto schematiche, perché la reazione del vincolo reale è sempre accompagnata da una deformazione che si mantiene di entità trascurabile solo se le forze agenti non superano determinati limiti. Al di là di questi limiti le deformazioni diventano non trascurabili o si arriva alla rottura.

comportamento anelastico, comportamento rigido), della loro efficacia interpretativa e predittiva, dei loro limiti;

b) ad individuare vari tipi di deformazioni elastiche e di determinare, su un piano semiquantitativo, le "leggi" che regolano alcune di esse (allungamenti ed accorciamenti di molle ed elastici di vario tipo).

Abbiamo già detto (Introduzione § 3.) che non si tratta di attività proponibili come attività iniziali di un itinerario sull'argomento "Forze", perché già abbastanza specifiche. Per costruire interpretazioni corrette dei fenomeni di deformazione, individuandoli tra l'altro sin dall'inizio come modi particolari di "fare forza" da parte di un sistema materiale, è infatti necessario essersi già resi conto di alcune proprietà generali delle interazioni di forza fra sistemi. A tal fine si possono svolgere con i ragazzi quelle attività propedeutiche cui abbiamo accennato appunto nell'Introduzione § 3. Di esse daremo un breve cenno nel prossimo paragrafo, rimandando per un ulteriore approfondimento al volume di questa stessa collana che se ne occupa specificatamente.² Dal § 2.3. in poi riprenderemo invece ad occuparci delle proposte di lavoro riguardanti lo studio delle deformazioni.

2.2. Attività e conoscenze propedeutiche alla proposta presentata nella guida

Di qualunque argomento ci si voglia interessare a scuola, è necessario nella fase iniziale di attività in classe dare modo agli allievi di rendersi conto di quali sono i tipi di fenomeni che si intende studiare, anche se, si vuole lavorare sulle forze. È quindi necessaria una prima fase introduttiva che serva a specificare in che senso si andrà ad affrontare questo argomento, tanto maggiore quanto più i bambini sono piccoli, data l'enorme quantità di usi e significati, in senso proprio e in senso figurato, del concetto di forza. Scopo di questa fase è far loro distinguere l'ambito dell'uso proprio di questo concetto dall'ambito del suo uso figurato ed individuare il corpo umano come strumento di partenza adatto per lo studio delle forze. Si possono svolgere diverse attività. Inizialmente si può suscitare una discussione di classe con domande generiche. "Cosa vuol

² P. Mazzoli, M. Arcà, P. Guidoni - "Forze e Pesi" - Emme Edizioni, Torino.

dire fare forza?", "Quando è che uno è forte?" "Quanti modi di fare forza conoscete?" ...; oppure fare scrivere delle frasi in cui si usano le parole "forza" e "fare forza" e poi farne un elenco collettivo e discuterlo in classe; o ancora presentare delle situazioni in cui si deve fare qualcosa per cui è necessario "avere forza" e "fare forza" e discuterne ... In seguito si può porre l'accento sul come è possibile che qualcosa "faccia forza" e studiare inizialmente situazioni in cui si fa forza con il proprio corpo (gli uni contro gli altri: braccio di ferro, chi riesce a mettere il compagno spalle al muro ...; ognuno contro qualche oggetto: sollevando pesi, schiacciando, piegando, strappando cose ... tirando o spingendo oggetti pesanti ...). In queste attività va

posta attenzione a quello che sente il proprio corpo nelle sue varie parti ed alle posizioni in cui volta a volta ci si mette per fare forza. Ci si può così rendere conto che il nostro corpo per fare forza deve deformarsi: espandersi, contrarsi, torcersi ... e sempre fra due cose (il pavimento e la scrivania che sto spingendo o tirando; le due estremità tenute con le due mani dell'oggetto che sto piegando; il pavimento e l'oggetto che sto sollevando ...). Si può poi passare dalla considerazione del proprio corpo a quella del sistema complessivo di oggetti coinvolto nel proprio "fare forza", chiedendosi quali sono gli oggetti che ogni volta ci permettono o ci richiedono di fare forza e che cosa succede loro durante l'interazione.

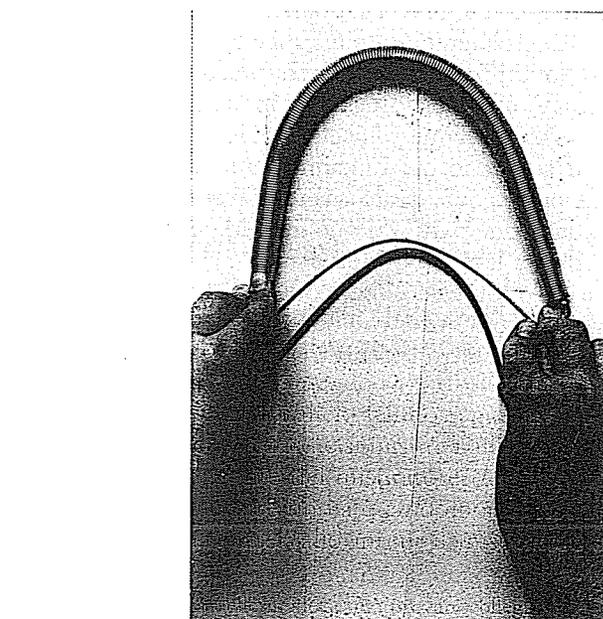
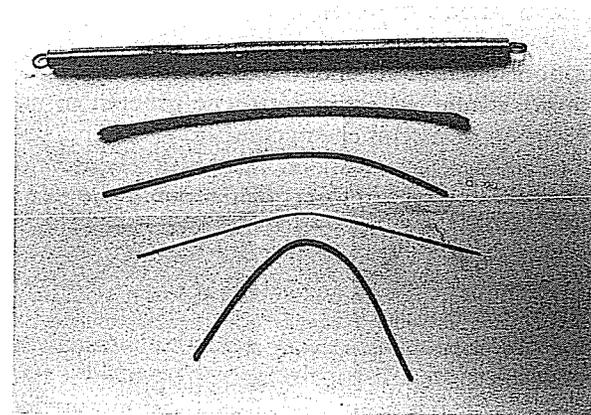
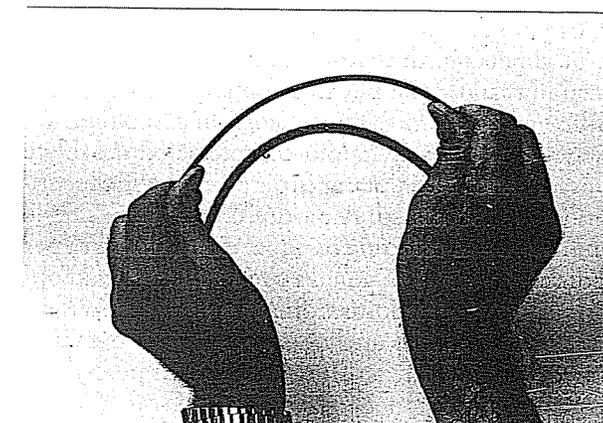
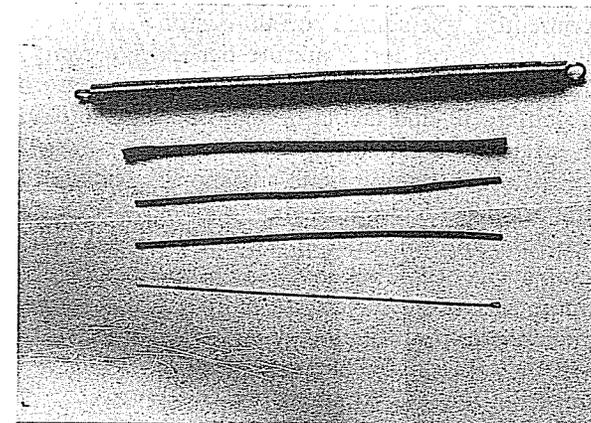


Figura 2.2 - Sovrapposizione di comportamenti diversi

Ciascun materiale si comporta in genere in parte in maniera elastica, in parte in maniera plastica. Il prevalere dell'uno o dell'altro comportamento dipende da più fatti, fra cui la lavorazione del materiale, il tipo e l'intensità della sollecitazione deformatrice, il tipo di materiale.

Tre fili ed una molla di metalli diversi vengono tenuti piegati nello stesso modo e poi lasciati: la molla torna completamente alla sua forma iniziale, il filo di ferro resta completamente deformato, gli altri due esibiscono un comportamento intermedio.

A questo riguardo si possono fare giocare i bambini al tiro alla fune, alla spinta alla panca, (due bambini, o due squadre, spingono l'uno contro l'altro dai lati opposti un banco, una cattedra, un tavolo ...); oppure si può giocare a spingere o a tirare, prendendolo per le spalle e per i piedi, un compagno sdraiato, che può decidere di resistere o meno a queste sollecitazioni, per poi discutere analogie e differenze fra quello che succede a lui, alla fune, alla panca. In questo modo si arriva a rendersi conto che gli oggetti (i sistemi) coinvolti in un "fare-forza" sono sempre almeno due; che ognuno di essi fa forza contro quelli contigui; che nel loro insieme tutti gli oggetti coinvolti formano una catena chiusa (da qualunque di essi si parta, seguendo mano a mano gli altri per contiguità di fare forza, si ritorna all'oggetto di partenza); che ogni oggetto che fa forza la fa almeno in due posti (come si era visto per il corpo umano); che per fare forza un oggetto deve essere "pieno di forza" (in analogia al corpo umano).

Una serie di attività più complesse ed articolate è invece necessaria per approfondire le caratteristiche delle forze peso. A partire dalla constatazione che anche il peso è una forza (si deve fare forza per sollevare gli oggetti; con un oggetto pesante od opportunamente disposto si possono ottenere effetti dello stesso tipo di quelli ottenuti con la forza muscolare), si può iniziare a discutere se il peso di un oggetto dipende o meno dalla posizione dell'oggetto stesso, giocando a sollevare oggetti vari direttamente, con le braccia abbassate, alzate, orizzontali, o indirettamente, tramite funi e carrucole. Si possono poi utilizzare bilance pesa-persone per andare a vedere che peso segnano in situazioni diverse. Quello che, a questo livello, è necessario che i bambini scoprano del funzionamento della bilancia è che per segnare qualcosa essa deve essere schiacciata dalle due parti. (Si può metterla in verticale e tenerla fra le mani di due bambini che spingono, attraverso di essa, uno contro l'altro). In questo modo si evidenzia che oltre all'oggetto pesante c'è sempre un altro sistema di cui si deve tenere conto quando si ha a che fare con la forza peso, sistema che ad un primo livello può essere generalmente individuato sul pavimento. È importante rendersene conto per potersi spiegare un'apparente contraddizione con le regole di forza già scoperte: questa volta, infatti, l'insieme dei corpi che interagiscono non costituisce una catena materialmente chiusa; non c'è contiguità fra il peso che posso sorreggere sulla mia testa ed il pavimento. Però la catena delle forze è comunque chiusa, se si considerano l'oggetto ed

il pavimento (in realtà la Terra intera) come due parti di uno stesso sistema che si attraggono reciprocamente, cioè se oltre a considerare la "forza peso" con cui la Terra attrae il corpo si considera la uguale forza con cui il corpo attrae la Terra (e la bilancia è schiacciata fra queste forze uguali ed opposte). Questo aspetto della situazione può non essere affrontato immediatamente con i bambini ma deve esserlo nell'ambito di un lavoro complessivo sulle forze. L'uso delle bilance pesa-persone consente poi di scoprire molte cose sulle forze-peso, grazie al passaggio dal piano qualitativo a quello quantitativo: per esempio come i pesi si possono sommare, distribuire, dividere ... a seconda delle catene di sistemi coinvolti nelle reciproche interazioni. Se sto con un piede su una bilancia e uno sul pavimento ...; se spingo con un bastone su una bilancia stando per terra; oppure per terra, o contro il soffitto, stando sulla bilancia ...; se mi metto a camminare su una tavola di legno appoggiata con gli estremi su due bilance ...

È solo con bambini che si siano già resi conto degli aspetti che qui abbiamo accennato,³ (escluso eventualmente lo studio approfondito delle forze-peso), svolgendo le relative attività, che si può continuare a lavorare secondo le linee esposte nel seguito di questo libro.

2.3. Attività introduttive: discussione iniziale e prime esperienze

Supponiamo dunque che i ragazzi abbiano già individuato alcune delle caratteristiche generali di un complesso di sistemi che in condizioni statiche, ossia in assenza di movimenti relativi, interagiscono fra loro scambiandosi forze: ogni sistema può essere visto come una sorgente di forze e fa forza almeno in due posti diversi; l'insieme di tutti i sistemi interagenti costituisce una catena chiusa.

In che modo si può introdurre, a questo punto, lo studio dei sistemi deformati come sorgenti di forze? Seguendo un metodo che ritroveremo via via lungo tutta la guida, noi suggeriamo di partire con una discussione di classe, sollecitata da domande opportune.

Il ruolo dell'insegnante, in questa fase, è quello

³ Cfr. per esempio, quanto proposto nel testo citato in nota 2, in cui l'impostazione del lavoro è analogo a quella qui scelta.

di convogliare e sostenere discussioni su binari costruttivi, evitando interventi conclusivi e permettendo ad ogni bambino di esporre le proprie idee. I bambini devono poter discutere liberamente, cioè devono essere convinti di poter dire ciò che pensano senza timore di sbagliare. Dovrebbe essere gradualmente demolita la credenza diffusa che un'opinione, in particolare se espressa dal più bravo o dall'insegnante, possa rappresentare la "verità": ogni bambino dovrebbe acquisire la consapevolezza che le sue opinioni e spiegazioni non possono essere a priori più o meno "vere", più o meno "giuste" di quelle degli altri.

La discussione iniziale ha innanzitutto lo scopo di motivare alla partecipazione i bambini, svegliando interesse ed attenzione attraverso la messa in gioco dell'esperienza di tutti e di indurli ad un atteggiamento di ulteriore ricerca ed esplorazione suscitando in loro curiosità, emozione ed attesa. Favorisce inoltre l'apprendimento di un uso appropriato del linguaggio e l'acquisizione di capacità espressive ad esso complementari, mentre mette in luce gli stili di ragionamento dei vari bambini e le loro conoscenze riguardo al tema affrontato.

Basta porre domande del tipo "Una molla, un elastico,⁴ una spugna ... fanno forza?" "Quando?" "Si può fare forza contro un elastico, una spugna, una molla?" ... perché i bambini esprimano le proprie conoscenze ed esplicitino i propri modi di vivere.

Bisogna attendersi che, come di solito accade, nel corso della discussione riaffiorino opinioni già espresse e contrabattute nel corso del lavoro precedente (§ 2.2.), come ad esempio la negazione del fatto che una molla possa fare forza, perché solo gli uomini e gli animali, al più i motori, possono farlo.

La scheda 2.1 in cui è riportata una parte della discussione in classe, illustra quello che può accadere. Si tratta, è bene ricordarlo, di bambini che hanno lavorato a spingere e tirare le panche, le funi, le molle, i compagni e sono già arrivati a concludere che qualunque corpo resiste a chi cerca di schiacciarlo, comprimerlo, allungarlo ... riempien-

⁴ Useremo indifferentemente nel seguito i termini "molla" ed "elastico" per indicare qualsiasi oggetto, con una dimensione prevalente rispetto alle altre, che può essere tirato e/o schiacciato lungo il suo asse e che ha la caratteristica di riacquistare la forma originaria al cessare dell'azione deformante.

dosi di forza! Questo comportamento contraddittorio non ci deve però stupire perché capire davvero richiede sempre un lungo lavoro di rielaborazione di quanto si pensa di sapere già, un ritornare continuamente su aspetti già affrontati per cogliere sempre più la generalità delle conclusioni raggiunte, estendendole via via anche a casi che differiscono sempre più da quelli precedentemente trattati. L'idea diffusa che solo i viventi possano "fare forza" è certamente legata alle percezioni soggettive, appunto, di "fare forza" quando si spinge, si tira, si torce ...; ma anche al dare molta importanza alla volontarietà che caratterizza queste azioni e che manca agli esseri inanimati. Chi invece mette nel novero delle sorgenti di forze anche i motori (insieme al vento, alla bomba, ai vulcani ...), escludendo oggetti come le molle, continua implicitamente a distinguere in categorie separate le forze attive dalle forze di resistenza e a considerare forze solo le prime. Un altro aspetto che può, implicitamente, essere preso in considerazione è la differenza fra i sistemi che per fare forza devono consumare continuamente energia (il corpo umano ed animale, i motori) e i sistemi che possono fare forza senza consumare energia (come appunto una molla tesa o compressa, o il peso).

D'altronde è lecito attendersi che vi siano in classe ragazzi che invece, riferendosi alle proprie esperienze o a considerazioni scaturite da tutte le attività precedenti, affermino fin dall'inizio che una molla fa forza quando è deformata (allungata, compressa, attorcigliata ... ci sono le fionde e gli aeroplani con l'elica mossa da un elastico attorcigliato!). È importante che questi modi di pensare (ed anche tanti altri eventuali) vengano fuori e siano messi a confronto fra loro, così da innescare un dibattito che costituisce un punto di partenza su cui costruire le attività successive.

La discussione fra i ragazzi richiede infatti, perché sia possibile raggiungere delle conclusioni su cui tutti concordino, di passare a verificare concretamente cosa succede.

Si possono allora portare in classi oggetti diversi (vari tipi di molle: molle di acciaio, elastici per pacchetti, elastici per indumenti, elastici da portabagagli, strisce di camere d'aria di pneumatici ...; altri oggetti elastici: palloncini di gomma gonfiabili, spugne di vario tipo, palline e palloni ...; oggetti indeformabili di legno, di pietra, di vetro, di metallo ...; oggetti plastici: pezzi di creta, di pasta per modellare, fili di

stagno ...) che possano essere sottoposti ad azioni deformanti esercitate dai ragazzi stessi (confronto forze muscolari - forze di deformazione) o all'azione di oggetti pesanti (confronto forze peso - forze di deformazione). Inizialmente i ragazzi possono limitarsi semplicemente a "fare forza" contro questi oggetti (e contro qualunque altra cosa venga loro in mente) tirandoli, schiacciandoli, torcendoli, appoggiandovi sopra dei pesi ... per osservare e descrivere cosa succede.

Questa serie di giochi in situazioni concrete, oltre a sviluppare le abilità manipolative come parte integrante dello sviluppo intellettuale, convoglia l'interesse e l'attenzione dei bambini sugli aspetti più specifici che entrano in gioco quando si fa forza per deformare una molla, una spugna, la creta ...; e li stimola a riflettere, costringendoli a confrontare ciò che in base alla loro esperienza di vita quotidiana ed ai loro modi di ragionare pensano che succeda con le informazioni nuove che provengono da esperienze progettate, controllate e discusse. In questa fase del lavoro si devono sollecitare i bambini a descrivere verbalmente, per iscritto, attraverso disegni, le esperienze fatte. Queste attività descrittive aiutano infatti a costruire i concetti e ad appropriarsi del significato delle parole; mentre l'uso di codici di rappresentazione e comunicazione diversi facilita la comprensione delle differenze fra i fatti che accadono e le loro descrizioni schematizzate. Così per esempio le parole ed il disegno, essendo codici diversi, fanno risaltare aspetti parzialmente diversi delle situazioni che rappresentano ed i ragazzi se ne rendono gradualmente conto. Contemporaneamente da quello che ogni bambino dice, scrive, disegna, l'insegnante può comprendere se egli guarda o vede prevalentemente un aspetto od un altro di quello che succede; se ha individuato, tra tutti gli altri possibili, gli aspetti che sono essenziali per ricostruire e riorganizzare uno schema rappresentativo/interpretativo delle fenomenologie oggetto di studio.

I bambini possono lavorare con gli oggetti distribuiti singolarmente, o a coppie, o a piccoli gruppi, purché tutti abbiano modo di eseguire i diversi tipi di esperienze possibili, purché vi siano momenti di presentazione, confronto, discussione collettiva di ciò che ognuno ha fatto, ha osservato, ha pensato. È infatti soprattutto il confronto fra quanto notano bambini diversi in situazioni uguali e fra quanto accade in situazioni diverse che conduce alla scoperta

ed alla correlazione di caratteristiche tipiche dei fenomeni indagati, permettendo la costruzione graduale di una conoscenza della classe sempre più ricca ed articolata.

In questa prima fase di manipolazione gli oggetti ed i materiali vengono facilmente classificati dai ragazzi in gruppi diversi: ve ne sono così alcuni visti come indeformabili (per il momento ha senso considerare solo deformazioni sensibili), altri che si deformano ma riacquistano la forma iniziale quando cessa l'azione delle sollecitazioni esterne che li hanno deformati, altri ancora che dopo l'interazione restano più o meno deformati.

Un bambino si è espresso così: "Se spingiamo verso l'alto un peso attaccato ad una molla, o riduciamo lentamente la forza che facciamo per accorciarla od allungarla, vediamo che ritorna come prima. La stessa cosa succede con una spugna. Quando spingiamo contro la creta, la creta si schiaccia. Non ritorna come era prima quando non facciamo più forza".⁵

Le molle, le spugne diventano dunque prototipi per la classe degli oggetti *elastici*, la creta per la classe degli oggetti *anelastici*. La deformazione delle molle e delle spugne è un fenomeno *reversibile*, quello della creta è un fenomeno *irreversibile*. Elastico, anelastico, reversibile, irreversibile sono aggettivi con cui si schematizzano a livello disciplinare i diversi comportamenti degli oggetti. Non è detto che questi termini debbano essere utilizzati dai bambini: l'importante è che essi comprendano le differenze fra gli oggetti e le differenze fra i fatti che determinano la necessità stessa di inventare questi termini nel linguaggio scientifico. In questo caso il

⁵ È da notare la cura con cui l'autore della frase specifica le condizioni dell'esperienza: si deve diminuire lentamente la forza che ha provocato la deformazione. Perché? Il bambino vuole probabilmente escludere i casi in cui la brusca variazione della sollecitazione dà luogo a situazioni intermedie di non-equilibrio: se una molla tesa o compressa è lasciata bruscamente libera si può muovere in modo strano, in particolare si può mettere ad oscillare. Le oscillazioni durano più o meno a lungo secondo i casi, ma la situazione finale che viene raggiunta è comunque il ritorno della molla alla sua forma naturale. Il fatto che ciò non avvenga immediatamente disturba però il bambino nella sua comprensione dell'equilibrio: il fattore tempo, il verificarsi preliminare di un evento diverso ed evidente (le oscillazioni) sono per lui cose che non possono essere trascurate. Per lui si può dire che "la molla ritorna come prima" e niente altro, solo se niente altro succede. Questo è un esempio particolare di una difficoltà molto generale: spesso è duro per i bambini tenersi rigidamente ancorati a schematizzazioni che escludono aspetti per loro particolarmente salienti solo perché non sono significativi dal particolare punto di vista da cui si sta considerando il fenomeno.

Scheda 2.1 - Una molla può fare forza?

I bambini discutono:

"La molla non fa forza perché non è un essere vivente, un oggetto e non può fare forza".

"La molla non fa forza perché non può alzare una sedia".

"La molla non fa forza contro di noi, noi facciamo forza quando la tiriamo".

"Quando tiro una molla devo fare forza perché se non faccio forza la molla non si allunga".

"La molla fa forza perché è pesante".

"La molla fa forza perché se l'allunghiamo e poi la lasciamo ritorna sola al proprio posto cioè come prima".

"Gli animali e l'uomo fanno forza perché dai cibi che mangiamo ricavano la forza... Il latte, la carne, il pane ci danno forza".

...

linguaggio comune consente d'altra parte di esprimersi con chiarezza e senza errori, a un livello di consapevolezza adeguato all'età degli allievi ed alle evidenze proprie delle situazioni esaminate. L'uso di una terminologia tecnica in casi del genere non è avvertito come una necessità e non corrisponde, di per sé, all'acquisizione di nuova conoscenza, come può avvenire in altre occasioni. Tuttavia il fatto che questi termini siano impiegati, dall'insegnante ed eventualmente da alcuni compagni, dopo che il loro significato è stato costruito gradualmente ed in modo operativo, aiuta tutti i bambini a comprendere come le parole che si usano servono a descrivere precise proprietà e comportamenti dei fatti che succedono, determinati da relazioni fra aspetti diversi.

Al termine di queste prime attività di manipolazione la classe dovrebbe in definitiva essersi appropriata degli schemi di comportamento elastico, anelastico e rigido degli oggetti sottoposti ad azioni di deformazione. È importante che i ragazzi possano anche verificare che uno stesso oggetto può comportarsi in uno od in un altro di questi modi (o con una sovrapposizione parziale degli stessi) a seconda del tipo e dell'entità delle azioni deformanti. Si devono dunque scegliere gli oggetti opportunamente e lasciare sufficiente libertà di azione ai ragazzi per garantirsi, ad esempio, che qualche molla sarà "tirata troppo" e resterà permanentemente deformata; che qualche elastico si spezzerà; che, per quanta forza si faccia, non si riuscirà ad allungarne qualche altro (per es. un elastico per indumenti, che ha una trama mista di fili di caucciù e fili di cotone) oltre un certo limite ... Capire che il tipo di comportamento nei confronti di azioni deformanti non è una proprietà assoluta degli oggetti che si cerca di deformare, ma che esso dipende anche dalle caratteristiche dell'interazione fra gli oggetti ed il

sistema deformante, non è infatti immediato, né banale. Si deve porre particolare cura a che i ragazzi possano rendersene conto, senza però attendersi un'acquisizione definitiva ed in tempi brevi di questa consapevolezza.

Nei paragrafi immediatamente successivi 2.4., 2.5., 2.6., 2.7., sottolineeremo alcuni dei primi aspetti della deformazione elastica su cui lavorare con i ragazzi.

Non c'è un'unica successione logica adatta per comprenderli e non si può stabilire una propedeutica definita fra le attività di classe ad essi relative: si tratta infatti di aspetti che divengono tutti evidenti sin dalle prime manipolazioni di molle ed elastici. La suddivisione in paragrafi corrisponde solo all'esigenza di distinguere bene l'uno dall'altro i problemi. È infatti importante sapersi rendere conto di quanti e quali sono i punti di vista fra loro intrinsecamente diversi e non gerarchizzabili da cui uno stesso fenomeno deve essere considerato, se si vuole averne una comprensione il più possibile completa.

2.4. Confronto fra forze elastiche, forze muscolari, forze peso

Dai giochi iniziali in cui si cerca di deformare in tutti i modi possibili gli oggetti più diversi si può passare pian piano a concentrare l'attenzione sulle deformazioni elastiche in una sola dimensione (allungamenti ed accorciamenti di molle, fig. 2.3). Lo scopo è quello di studiare i modi particolari in cui oggetti con proprietà elastiche possono "fare forza". Molle ed elastici si prestano ad esperienze contemporaneamente abbastanza semplici perché i bambini possano seguire manipolazioni controllabili ricavandone leggi corrette, anche se qualitative, ed abbastanza complesse perché essi possano ren-

dersi conto che all'interno del comportamento elastico possono essere individuate sottoclassi diverse (per esempio deformazioni lineari e deformazioni non lineari, vedi § 2.9.).

È importante che gli alunni possano sia utilizzare la stessa molla per tutta una serie di esperienze diverse sia confrontare quello che avviene a molle diverse nelle stesse condizioni. Essi vanno però incoraggiati ad osservare, confrontare, descrivere e discutere, sollecitati da domande opportune e situazioni differenti. Per esempio:

- ogni bambino allunga o comprime una molla fra le mani;
- una molla viene deformata da due bambini (o da gruppi, anche non equinumerosi, di bambini) che ne tengono ognuno un'estremità;
- un estremo di una molla è agganciato ad un sostegno e l'altro è tirato da uno o più bambini;
- un estremo di una molla è tenuto da un bambino, o agganciato ad un sostegno, e all'altro è agganciato un peso, che può essere variato (si può usare un sacchetto di plastica entro cui mettere oggetti diversi, o un secchio che può essere riempito man mano di acqua, ...);

ATTIVITÀ

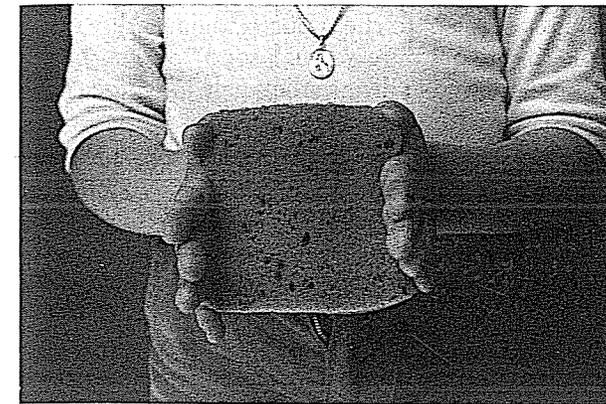
I giochi di confronto fra forze elastiche e forze muscolari, e le discussioni che ne derivano, permettono ai bambini di rendersi sempre meglio conto che una molla deformata è un sistema - sorgente di forza, un "facitore di forze", per certi aspetti simile ad un bambino o ad un uomo. Una molla fa forza alle due estremità contro i sistemi antagonisti *per opporsi* alla deformazione, e quanto più è deformata tanto più fa forza: un bambino che tira o comprime una molla fra le mani "sente", infatti, che la forza che egli stesso decide di applicare varia in maniera correlata alla deformazione della molla, che contemporaneamente egli è in grado di "vedere". La sensazione dello sforzo muscolare - misura soggettiva della intensità della forza fatta - permette cioè di individuare qualitativamente la correlazione corretta fra le grandezze in gioco: intensità della forza e ampiezza della deformazione. I due canali percettivi, quello visivo e quello di sforzo muscolare, forniscono infatti informazioni concordi. Se ne deduce che a forze applicate crescenti corrispondono allungamenti (accorciamenti) crescenti, *qualunque* sia la molla (purché i valori delle sollecitazioni esterne siano inferiori ad un valore limite, caratteristico del tipo di molla, in corrispondenza del quale

la molla non si comporta più in maniera elastica e infine si spezza). Il bambino è cioè indotto dalla sua interazione con la molla ad esprimere la dipendenza tra i valori delle variabili (forza applicata e deformazione corrispondente) attraverso una relazione d'ordine: "Più forza ... più deformazione, meno forza ... meno deformazione". La relazione d'ordine conserva, ovviamente, il suo potere interpretativo anche quando due o più bambini tendono insieme la molla: anche in questo caso si vede che la molla si allunga di più rispetto a quando viene tirata da un bambino solo,⁶ e si conclude che le forze che i vari bambini fanno "si sommano" (il termine "somma" è qui usato in modo puramente qualitativo!). Questa esperienza, in realtà, non è che un modo per esplicitare e controllare la plausibilità di un assunto che si ritiene "naturale": il principio di sovrapposizione delle forze. (Il fatto di stabilire che le *cause* si addizionano quando si vede che si addizionano *gli effetti* è d'altronde un modo del tutto generale di interpretare categorie ampie di fenomeni).

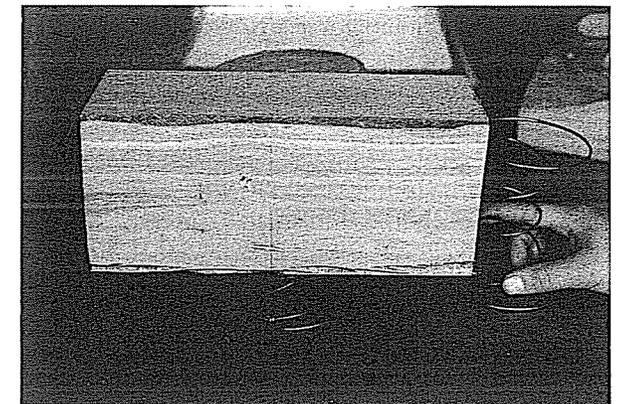
Quando si passa a situazioni in cui sono in gioco anche reazioni di vincoli (molle agganciate a sostegni) e/o forze peso (molle deformate da oggetti che vi sono appesi od appoggiati) i bambini sono in grado di trasferire quasi immediatamente ad esse le conclusioni già raggiunte nei casi in cui le deformazioni erano dovute solo a forze muscolari. Basandosi sul fatto che tutte le forze considerate hanno lo stesso tipo di effetto, indipendentemente dalla loro origine,⁷ essi possono infatti riconoscere: a) che sostegni o pesi vincolati all'una o all'altra estremità di

⁶ Naturalmente è necessario che ognuno dei due bambini eserciti la stessa forza che esercitava quando era solo a tirare la molla, e che entrambi tirino nella stessa direzione. Per garantirsi che ciò avvenga, si può chiedere ai bambini di tirare sempre "con tutte le loro forze" (e non per troppo tempo, altrimenti si stancano) nella direzione della molla (che naturalmente va scelta opportunamente "dura", per esempio un elastico di portabagagli). Altrimenti possono sorgere complicazioni connesse con la natura vettoriale delle forze (Cap. VI).

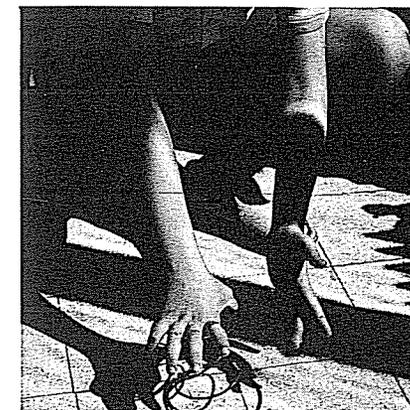
⁷ Una delle strategie fondamentali per l'organizzazione e la interpretazione dei fatti naturali è, a livello di pensiero comune così come di pensiero scientifico, l'assumere come omogenee ed equivalenti cause che producano lo stesso effetto, quali che siano i fenomeni esaminati. Sin dall'inizio il bambino parla della "forza del vento", della "forza della bomba", della "forza del motore", perché vede che la loro azione produce sugli oggetti effetti dello stesso tipo di quelli prodotti dalla forza muscolare (anche se a questo livello non distingue aspetti di forza da aspetti di energia). Anche in ambito più specificatamente disciplinare la stessa strategia cognitiva si trova alla base stessa della definizione di forza.



(a)



(c)



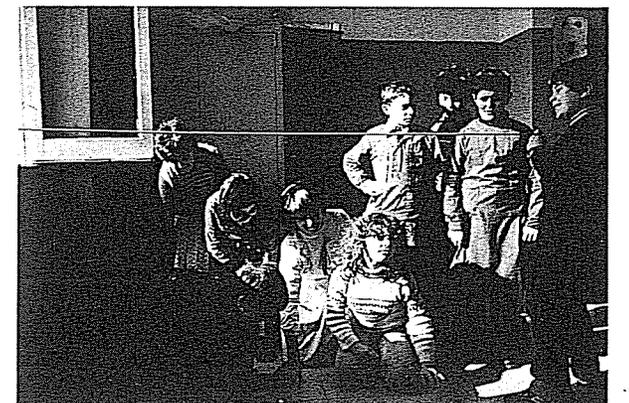
(b)



(d)



(f)



(e)

Figura 2.3 - I bambini studiano un tipo particolare di deformazioni: allungamenti ed accorciamenti elastici

Ci sono oggetti elastici di vario tipo: (a) la spugna; (b) e (c) la molla per materassi; (d) il pezzo di camera d'aria; (e) l'elastico per auto; (f) la molla di acciaio. In (e) un bambino misura l'allungamento contando le mattonelle; in (f) due bambini misurano l'allungamento con una riga.

una molla esercitano forze di deformazione su di essa; *b*) che vale ancora la relazione d'ordine "più forza più deformazione" (e viceversa); *c*) che vale ancora il principio di sovrapposizione, sia tra forze dello stesso tipo che tra forze di tipo diverso. La scheda 2.2 illustra i modi in cui i bambini possono esprimere le considerazioni cui arrivano.

Accanto a queste caratteristiche del tutto generali, riscontrabili per il comportamento di ognuna delle molle con cui si ha a che fare quale che sia il modo in cui le si comprime o le si allunga, appare subito chiaro ai bambini che fra una molla ed un'altra ci sono differenze anche notevoli. Ciò che li colpisce immediatamente è il fatto che molle diverse (per lunghezza, materiale, forma, spessore, ...) si deformano più o meno facilmente. I ragazzi tendono a confrontare l'allungamento (o accorciamento) assoluto delle varie molle (determinato cioè rispetto alla loro lunghezza a riposo) con l'entità delle forze esercitate per ottenerlo e ciò li conduce a distinguere molle "dure", che richiedono molta forza per essere deformate, da molle "morbide", che ne richiedono poca.⁸ "Le molle sono dure o morbide"; "Le molle dure non si allungano facilmente quando le tiriamo o quando attacchiamo un peso"; "Le molle morbide si allungano facilmente, quando vengono tirate da un peso o da un bambino" ... sono alcune delle frasi tipiche con cui questa distinzione viene espressa.⁹

In realtà è più significativo considerare l'allungamento (o accorciamento) relativo¹⁰ di una molla che non quello assoluto, anche se quest'ultimo è quello dominante sul piano percettivo. Infatti, l'allungamento relativo di una molla, a differenza di quello assoluto, non dipende dalla lunghezza della molla a riposo.

Vedremo più avanti (§ 2.7.) come i bambini pos-

⁸ Dividendo le molle in "dure" e "morbide" invece di parlare di molle "più" o "meno" dure o morbide, i ragazzi usano un criterio di classificazione che evidenzia una confusione fra proprietà continue in base a cui si possono fare seriazioni (la durezza delle molle è una proprietà di questo genere), e caratteristiche discrete in base a cui si possono fare classificazioni. Questo è un problema molto generale generato dal linguaggio stesso nel momento in cui si usano due aggettivi contrapposti, come appunto morbido/duro, trasparente/opaco, grande/piccolo, lungo/corto, caldo/freddo, per riferirsi a proprietà continue degli oggetti. Questi aggettivi inducono a pensare che gli oggetti stessi possano essere divisi in due classi disgiunte e non ordinati con continuità rispetto ad ognuna di queste proprietà. Mentre per alcune proprietà, come l'età, la lunghezza ecc... la confusione viene più facilmente superata nel corso della maturazione individuale, per altre essa può permanere anche durante tutta l'età adulta, se non ci sono stati specifici interventi chiarificatori.

sano rendersi conto che si può, a ragione, dire quali molle sono "più dure" e quali sono "più morbide" solo tirando molle diverse di uguale lunghezza a riposo con la stessa forza (per esempio tutta quella che un certo bambino riesce a fare!) e confrontandone, in queste condizioni, gli allungamenti. Un passaggio necessario è quello di far loro tagliare una sola molla (elastici o strisce di camere d'aria, per esempio) in più parti, perché si accorgano che queste, a parità di sforzo, si allungano in assoluto molto meno della molla iniziale, notevolmente più lunga: esperienze di questo tipo possono essere fatte sin dall'inizio delle attività, così da attirare l'attenzione dei bambini sul fatto che l'allungamento dipende anche dalla lunghezza a riposo. Questo è un punto particolarmente problematico: più e più volte ci si deve attendere che i ragazzi tornino a meravigliarsi del fatto che un elastico da allungare od uno stecco da piegare "più diventa corto, più diventa duro".

D'altra parte è proprio su questi grossi nodi concettuali che è più importante l'intervento educativo, socializzato ed a lungo termine. In effetti alla ricchezza operativa dell'esperienza e delle percezioni comuni sull'argomento *deformazioni* fa riscontro una sostanziale ambiguità linguistica e concettuale, che spesso costituisce un grosso ostacolo alla comprensione (facile da rintracciare ancora a livello universitario). E di questa

⁹ Nel linguaggio comune l'aggettivo "duro" viene attribuito indifferentemente a persone o a cose, con una pluralità di significati, per indicare in genere che ad una grande causa corrisponde un piccolo effetto. Un legno e un metallo si dice che sono duri quando si intaccano con difficoltà; una persona si dice che è dura di orecchi se sente poco o finge di non capire; una persona dura è quella che non si lascia schiacciare dalle fatiche e dalle sofferenze fisiche e morali opponendo grande resistenza; il pane vecchio è più duro del pane fresco perché si deve fare più forza per masticarlo; ecc. In tutti questi casi l'aggettivo "duro" si riferisce a proprietà che si potrebbero definire intensive piuttosto che estensive: la durezza del legno e del metallo non dipende dall'estensione dell'incisione; non si è più o meno sordi a seconda della lunghezza del discorso; un pezzo piccolo di pane affermo non è meno duro di un pezzo grande dello stesso pane ecc.

¹⁰ Si intende per allungamento assoluto la differenza fra la lunghezza della molla deformata e la sua lunghezza "naturale": $\Delta l = l - l_0$ (l'allungamento può essere positivo o negativo, secondo che la molla è tirata o compressa). Si intende per allungamento relativo il rapporto fra l'allungamento assoluto e la lunghezza a riposo della molla: $\delta l = \Delta l / l_0$. L'allungamento relativo è un numero puro che può essere positivo o negativo e in genere è minore di uno (eccetto che per elastici molto deformabili). Spesso viene perciò dato in forma percentuale.

confusione potenziale, o quasi inevitabile, è importante tenere conto in ogni percorso didattico. Così è comune sentir dire che un certo elastico è abbastanza "morbido" da allungare (nel senso che, per una data lunghezza, occorre abbastanza poca forza per deformarlo in maniera apprezzabile); ma che se se ne taglia una piccola parte, questa diventa molto più dura (nel senso che se si vuole ottenere una deformazione apprezzabile, in sostanza paragonabile a quella precedente, occorre fare

molta più forza). Questa conclusione è ovviamente corretta se si confrontano le durezze assolute dei due elastici, quello lungo e quello corto; ma il modo di guardare stesso rende ambiguo, in questo caso come in molti altri, quello che si dice quando si confrontano tra di loro elastici di tipo diverso, o quando si prende alla lettera il diventa supponendo che qualcosa sia cambiato nella struttura interna del materiale di cui è fatto l'elastico.

Scheda 2.2 Caratteristiche delle deformazioni elastiche: le prime scoperte

I bambini eseguono esperienze allungando, schiacciando... molle, spugne, elastici, direttamente o attraverso degli oggetti pesanti, e discutono su ciò che "vedono" e ciò che "sentono" in varie situazioni.

"La molla fa forza tirando le mani".

"Quando spingiamo la molla contro il pavimento vediamo che la molla si accorcia. La molla fa forza contro la mano che fa male e contro il pavimento perché vuole vincere e tornare come era prima".

"Le molle, le spugne per fare forza devono spingere o tirare in due posti".

"Quando tiriamo le molle con le mani più si allungano e più fanno forza perché vogliono vincere e tornare come erano prima e la mano ci fa male".

"Se tiriamo di più dobbiamo fare più forza perché la molla se è più allungata fa più forza e vediamo che diventa più sottile".

"Quando spingiamo o appoggiamo un sasso sulla spugna, la spugna si abbassa e spinge contro la mano e contro il pavimento".

"Quando accorciamo la molla con la mano e stiamo 60 minuti, noi ci stanchiamo, invece la molla non si stanca perché è un oggetto di metallo".

"Noi se non mangiamo, i muscoli non hanno la forza di fare qualunque cosa, non possiamo fare forza. La molla può vincere sempre".

"Quando spingiamo una molla facciamo forza dall'alto in basso, invece la molla fa forza dal basso in alto".

"Due bambini insieme allungano la molla come un uomo solo, perché la forza che fa uno si aggiunge alla forza che fa l'altro ... quando tiriamo in due, la molla si allunga molto di più.

Succede la stessa cosa anche quando la molla viene tirata da un peso e da un bambino".

"Se appendiamo solo il secchio la molla si allunga molto poco ... a mano a mano che mettiamo più sabbia nel secchio la molla si allunga sempre di più perché il secchio diventa sempre più pesante... quando il secchio è pieno di sabbia è molto pesante e la molla è molto allungata". (Il secchio è sospeso ad una molla agganciata al soffitto).

La definizione operativa della "durezza", necessaria sia per potere capire esattamente a che cosa questo termine si riferisce sia per instaurare un corretto procedimento di misura, include quindi due aspetti:

a) decidere se si vuole considerare la durezza assoluta (di una data molla) o la durezza specifica (di un dato tipo di molla);

b) esplicitare la forma della relazione ("formula", al di là della semplice relazione d'ordine) che lega fra loro lunghezza, allungamento (assoluto o relativo), sollecitazione e durezza e che, in questo senso caratterizza il tipo di molla.

Se si utilizzano molle in condizioni di deformazioni proporzionali alla forza applicata (cioè in "regime lineare", corrispondente a deformazioni "piccole" e "non troppo rapide" di materiali "molto elastici" e "reversibili" ...), si può dire che:

– per la durezza assoluta, vale la definizione

$$D = F / \Delta l$$

– per la durezza relativa, vale la definizione

$$d = F / (\Delta l / l_0)$$

(Δl è l'allungamento assoluto, l_0 la lunghezza in riposo della molla).

Naturalmente, a partire da una data molla è possibile ricavare D per deformazione diretta e quindi

d: in questo modo si può generalizzare il comportamento osservato a tutte le molle dello stesso tipo.

La nozione qualitativa di durezza assoluta come parametro che caratterizza la relazione d'ordine fra le grandezze disomogenee forza e allungamento è, da un lato, abbastanza intuitiva (analoga, per esempio, alla velocità nella relazione d'ordine fra spazio percorso e tempo impiegato, o al peso specifico nella relazione d'ordine fra peso e volume di un corpo). D'altro lato (proprio come velocità e peso specifico ...) presenta spesso notevoli difficoltà dal punto di vista formale, in quanto coinvolge l'operazione di rapporto: che implica sostanzialmente strategie di pensiero proporzionale, e controllo della frazione (operazioni e significati).

D'altra parte, anche la nozione qualitativa di durezza relativa (riferita al tipo di oggetto invece che a un oggetto specifico) è abbastanza intuitiva, in corrispondenza alle molte esperienze sulle fenomenologie più comuni; ma la sua esplicitazione formale aggiunge, alle difficoltà già accennate per la durezza assoluta, la necessità di lavorare con una forma adimensionale di allungamento (l'allungamento relativo, appunto).

2.5. La simmetria delle forze elastiche

Una questione particolarmente importante, che può emergere spontaneamente nel corso delle attività precedentemente proposte oppure può essere posta all'attenzione dei ragazzi dall'insegnante stesso, è quali siano le relazioni: a) fra le due forze che una molla deformata esercita alle due estremità; b) fra le sollecitazioni esterne agenti sulla molla e le forze di reazione della molla.

Si può chiedere, di fronte a due bambini che tengono ferma alle due estremità una molla allungata, che forza fa la molla all'estremo sinistro ed all'estremo destro, che forza fa il bambino a sinistra e che forza fa quello a destra. Le stesse domande possono essere poste in situazione dinamica invece che statica, cioè mentre i bambini stanno più o meno lentamente allungando la molla (sia che si stia muovendo uno solo sia che si stiano muovendo entrambi simmetricamente).

Vediamo in primo luogo come si può discutere il caso statico.

Alcuni bambini affermeranno che le forze fatte

dalla molla e dai due bambini che la tengono sono uguali fra loro, altri sosterranno che devono essere, ad ogni estremo, uguali la forza fatta dal bambino e la reazione della molla in quell'estremo, ma che il bambino di destra potrebbe tirare più di quello di sinistra, o viceversa. Questa opinione di disuguaglianza o dissimmetria viene generalmente mantenuta, o rinforzata, nel caso che la deformazione delle molle non sia dovuta a forze muscolari, per esempio nel caso che una molla sia compressa da un peso contro il pavimento o nel caso che un bambino tiri un elastico fissato al muro. Non dovrebbero invece esserci bambini che pensano ad una disuguaglianza fra la forza che deforma la molla e la reazione della molla stessa, se tutto il lavoro svolto all'inizio dello studio delle forze (§ 2.2.) è stato opportunamente assimilato. D'altra parte i tempi di assimilazione e convincimento possono essere lunghi e se qualcuno esprime un'opinione del genere essa può essere immediatamente ridiscussa ed eventualmente confutata dalla reazione dei compagni. In effetti il fatto stesso che ci si trovi in una situazione statica contrasta intuitivamente con un'ipotesi di disuguaglianza fra la forza del bambino che tira l'estremo della molla verso di sé e quello della molla che per reazione tira il bambino nella direzione opposta.¹¹ Per risolvere invece il contrasto di opinioni fra chi postula la possibilità di un'asimmetria fra le forze di reazione della molla ai due estremi e chi invece afferma che devono essere rigorosamente uguali, si devono guidare i bambini a puntare l'attenzione sulle sensazioni di sforzo muscolare che essi sentono quando tendono o comprimono una molla (ma anche una spugna o la creta con le mani o con una mano ed un piede): in modo che si rendano conto che non è possibile "fare" forze diverse contro le due estremità della molla, mentre è ben possibile che parti (o posizioni) diverse del corpo portino a valutare come diverse forze oggettivamente uguali. In effetti, se si schiaccia o si tira la stessa molla in modo quantitativamente uguale con la mano o con i piedi, le forze che si

¹¹ Un altro ragionamento generalmente convincente su questo punto lo si può fare confrontando due situazioni: nella prima due molle identiche sono agganciate fra loro e tese fra due sostegni fissi. Nella seconda una delle due molle ed il sostegno cui è agganciata sono sostituiti dal bambino, che tira la molla restante finché il suo allungamento è lo stesso che nella prima situazione. In quest'ultima la totale simmetria del sistema indica che le due molle devono esercitare forze uguali ognuna sull'altra. Nella seconda situazione poiché il bambino non fa che sostituire una delle due molle, la forza da lui esercitata deve ancora essere uguale a quella esercitata dall'altra molla.

fanno sembrano diverse; se si solleva lo stesso peso con la mano destra o con la mano sinistra, sembra talvolta che si faccia più forza con la sinistra; se le braccia che tendono le molle non sono poste simmetricamente, il braccio in posizione più scomoda fa più fatica, e così via. (A valutazione diversa di forze uguali è associata in particolare l'asimmetria sempre presente tra destra e sinistra del corpo, fra arti superiori e inferiori). In scheda 2.3. sono riportate varie frasi tratte dalle discussioni in classe su questo punto: dalle prime risposte alle domande di partenza, fino alle conclusioni raggiunte dopo avere svolto le attività. È da notare come i bambini, spontaneamente, sia prima che dopo l'esperienza, ricorrono a situazioni immaginate (C, D, E,) da loro considerate come analoghe a quelle (A, B) presentate dall'insegnante o effettivamente realizzate, per rafforzare i propri argomenti, mostrando, questa volta, una notevole coerenza.

Particolarmente complesso è il ragionamento con cui uno di loro controbatte le affermazioni di Carmela: immaginando di sostituire una mano al pavimento (situazione C), egli individua la forza peso del libro come sollecitazione esterna che comprime la molla; afferma che la molla deve fare la stessa forza ai due estremi; aggiunge anche il peso della molla; alle forze agenti sul pavimento. (Cosa succede "davvero"? Se avessimo messo il libro sotto e la molla sopra, cosa sarebbe cambiato per le tre parti del sistema?). È importante incoraggiare e stimolare, sistematicamente, questo ragionare "come se": la conoscenza scientifica della realtà non si identifica tanto in leggi da applicare, quanto nel saper individuare modi di succedere che possano essere riconosciuti come analoghi ad altri.

Le cose si complicano se passiamo al caso dinamico. Mentre la molla si allunga o si accorcia, come sono le varie forze? È ancora vero che i due bambini fanno, istante per istante, la stessa forza, e che le forze ai due estremi delle molle sono identiche a quelle fatte da ciascuno dei bambini? Riprendiamo alcune considerazioni già svolte nel Cap. I, paragrafi 1.2., 1.4., 1.8., sul modo in cui la Fisica schematizza la situazione, prima di occuparci di quello che dicono i bambini.

Per maggior semplicità consideriamo un bambino che sta allungando una molla attaccata ad un muro. Tutto quello che diremo resta valido in qualsiasi altra situazione.

Abbiamo una trasformazione che porta da uno stato iniziale (molla non deformata: il bambino non sta ancora tirando) ad uno stato finale (molla defor-

mata: il bambino esercita una forza costante e la molla non si allunga ulteriormente) attraverso un cambiamento continuo e lento (la molla che si allunga sempre di più) che possiamo immaginare a velocità uniforme. In questo caso i principi della Meccanica, confermati da tutte le esperienze possibili, ci dicono che mentre si tira ad ogni istante non c'è squilibrio di forze: la forza esercitata dal bambino cresce regolarmente e così fa la reazione della molla, mantenendosi costantemente eguale alla sollecitazione esterna. D'altra parte questa è una conclusione che può risultare fortemente antintuitiva: lo spostamento dell'estremo della molla che si allunga introduce infatti un'asimmetria percettiva nella situazione di fare forza che è comunemente attribuita ad uno squilibrio fra la forza applicata all'estremo della molla che si sta muovendo e la forza esercitata dalla molla a quell'estremo, squilibrio considerato causa della variazione di lunghezza. Anche l'esperienza quotidiana sembra sorreggere questa intuizione errata. Praticamente in qualunque situazione una persona (ma anche una macchina) voglia mantenere un movimento deve esercitare continuamente una forza, "contro" una resistenza d'attrito più o meno grande che si oppone al moto: come abbiamo visto nel Cap. I, in queste situazioni di deformazione si tende a pensare che la forza "attiva" debba essere almeno un po' più grande della forza "resistente", mentre in realtà il I ed il II principio della Dinamica stabiliscono che non c'è necessità di uno squilibrio nel bilancio totale delle forze per mantenere un movimento, ma se mai solo per cambiarlo (cioè per far cambiare la velocità, in grandezza e/o in direzione). Infatti per mantenere un oggetto in movimento dobbiamo normalmente esercitare una forza perché esistono forze di attrito che continuamente si oppongono al movimento e tendono a frenarlo: quando la forza da noi esercitata è uguale e opposta alle forze d'attrito, la forza totale agente sull'oggetto è nulla, ed esso si muove con velocità uniforme (cfr. anche Cap. IV). Analogamente, mentre la molla si allunga (o si accorcia) a velocità circa uniforme, la forza esercitata dal bambino e la reazione elastica sono praticamente uguali.

Le cose cambiano se invece la molla viene allungata a velocità variabile. In questo caso si ha un'accelerazione (cambiamento di velocità per unità di tempo) proporzionale allo squilibrio di forze. Ciò sicuramente accade, anche nella situazione che stiamo considerando, all'inizio ed alla fine del movimento (e quindi, normalmente, per un tempo/spa-

zio molto breve rispetto al totale dell'allungamento): finché cioè la molla, inizialmente ferma, non ha raggiunto la velocità con cui poi continua ad allungarsi; mentre da questa velocità passa a velocità zero, quando il bambino non aumenta più la forza con cui tira. All'inizio la forza esercitata dal bambino sulla molla è di poco superiore alla forza che il muro esercita sulla molla. Alla fine, invece, è il muro che esercita sulla molla una forza di poco superiore a quella esercitata dal bambino. La differenza fra le forze esercitate ai due estremi della molla equilibra in entrambi i casi la forza d'inerzia della molla (§ 1.8.).

Ci si può rendere conto facilmente degli stessi fatti sollevando un peso attraverso una molla o un elastico ed osservando cosa succede. È facile constatare che la molla si mantiene sempre lunga uguale mentre il peso viene sollevato a velocità uniforme (anche abbastanza grande), o tenuto fermo ad un'altezza qualunque. Invece cambia di lunghezza (mettendosi poi ad oscillare) all'inizio ed alla fine del movimento, o se si cambia bruscamente la velocità di sollevamento. Anche il movimento di un ascensore ci fornisce una situazione quotidiana in cui ci si può rendere conto del fatto che, dal punto di vista delle forze agenti, i casi in cui non c'è movimento non si possono distinguere da quelli in cui c'è movimento a velocità uniforme; contrariamente a quanto accade se vi sono accelerazioni. Infatti se all'interno dell'ascensore saliamo su di una bilancia pesa-persone possiamo vedere che essa segna la stessa forza (il nostro peso) sia che l'ascensore stia fermo sia che sia in moto uniforme fra un piano ed un altro; mentre segna una forza diversa dal peso quando l'ascensore parte o si ferma, in salita e in discesa.¹²

Abbiamo anche già notato nel Cap. I che un altro aspetto che può indurre a pensare che chi tira

¹² Quando l'ascensore si muove a velocità costante, eccettuati due brevi intervalli di tempo all'inizio ed alla fine di ogni corsa. Se sale, il suo moto all'inizio è accelerato verso l'alto perché da fermo deve raggiungere la velocità costante di salita. Alla fine il suo moto è accelerato verso il basso (quindi decelerato) perché dalla velocità raggiunta nella fase di accelerazione iniziale deve ritornare a fermarsi. Se l'ascensore scende il suo moto è di nuovo inizialmente accelerato (verso il basso), poi a velocità costante (grazie ad una forza frenante che fa equilibrio alla forza peso), infine decelerato (accelerato cioè verso l'alto, grazie ad una forza frenante maggiore della forza peso). In tutti gli intervalli di tempo in cui la velocità dell'ascensore sta variando, la bilancia, oltre al peso, "sente" l'accelerazione e segna una forza maggiore o minore del peso a seconda che l'accelerazione sia verso l'alto o verso il basso. Le forze antagoniste sono in questo caso le forze-peso di ascensore e passeggeri e la tensione del cavo dell'ascensore.

o allunga la molla faccia una forza maggiore della reazione della molla stessa è il fatto che sia lui a decidere di esercitare una data forza, o una forza sempre maggiore. Si ha l'idea di "vincere" contro la molla finché si riesce ad aumentare la propria forza, perché si ottiene quello che si voleva, cioè farla allungare ancora; si ha l'idea di "essere pari" arrivati al limite in cui non si riesce a fare più forza, quindi non si riesce a deformare la molla ulteriormente. Anche questo modo di vedere induce chiunque a pensare di essere "più forti" della molla fino a quando non si raggiunge l'equilibrio finale.

In realtà, come abbiamo sottolineato in Cap. II, nelle situazioni concrete di "fare forza" deformando altri sistemi si "vince" finché si riesce a trasferire energia, oltre a fare sempre abbastanza forza per mantenere l'equilibrio; si è pari quando si fa abbastanza forza, ma non si riesce più a trasferire energia, o quando si potrebbe ancora trasferire energia, ma non si può fare "più forza di così". Nel caso della molla la situazione è particolarmente complicata da decifrare per il fatto che, man mano che le si trasferisce energia, la molla si deforma sempre più, facendo anche sempre più forza. Il sistema-bambino che vuole allungare la molla, che ha deciso il verso della trasformazione, è fatto in modo da poter regolare automaticamente istante per istante la forza da esercitare sulla resistenza che incontra l'energia trasferita su quella assorbita. Questo è un tipico comportamento fisiologico, così abituale da diventare inavvertito. Ci si può rendere conto della presenza di tale regolazione nelle situazioni inaspettate: di solito, dovendo sollevare un recipiente ci si regola infatti automaticamente e preventivamente sul peso che ci si attende e di solito lo si alza, di conseguenza, in maniera regolata: ma se si pensa che un fiasco vuoto sia pieno, si fa una forza sproporzionata e mano e fiasco subiscono un'accelerazione che nasce dallo squilibrio di forze e dall'eccessivo trasferimento di energia. Così può capitare o di restare con la mano "attaccata" ad un blocchetto di piombo che si credeva fosse di legno, senza riuscire a sollevarlo, o di ritrovarsi con la mano vuota per aria perché si è stretto l'oggetto con una forza troppo piccola per il suo peso.

Naturalmente non è pensabile che i bambini possano arrivare a rendersi immediatamente conto, nel corso delle esperienze che stanno facendo, di tutti gli aspetti di cui abbiamo sin qui parlato. D'altra parte è importante che, nel corso del lavoro e delle discussioni, essi trovino continuamente nell'insegnante un indirizzo ed un orientamento ade-

Scheda 2.3 - Le forze che una molla deformata esercita ai suoi estremi sono uguali o diverse?

A) La domanda viene posta ai bambini chiedendo chi dei due omini disegnati alla lavagna (vedi fig. a) fa più forza.

Ecco dei brani tratti dalla discussione in classe:

"La molla tira a sinistra e a destra con la stessa forza che fanno le due bambine per allungarla".

"Se il bambino di destra fa molta forza, la molla tira di più verso il bambino di destra che verso quello di sinistra".

"Io posso sempre prendere una molla e tirarla di più con la mano destra e di meno con la mano sinistra. Poi se prendo una molla e la schiaccio contro il pavimento la molla spinge il pavimento con più forza e la mano con meno forza". (Carmela)

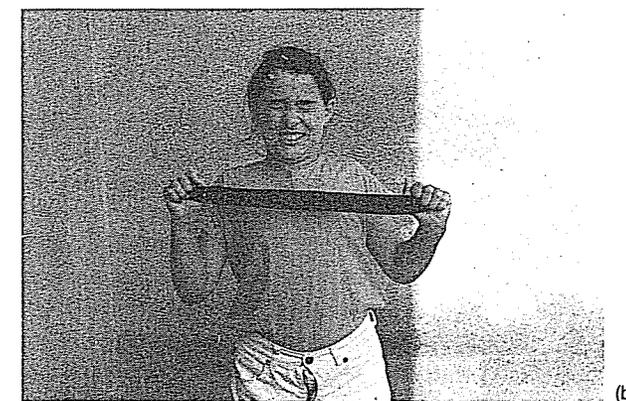
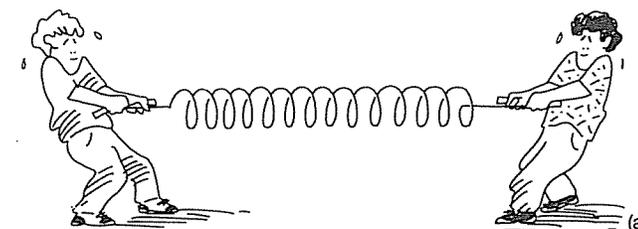
"No, non è possibile tirare di più con la mano destra e di meno con la mano sinistra, perciò ai due lati la molla fa la stessa forza che è uguale a quella con cui la tiriamo e questo è vero anche quando spingiamo la molla contro il pavimento. Se prendo un libro e lo metto sulla molla e sostengo la molla con la mano, il libro col peso spinge la molla e la molla dovrebbe spingere la mano con una forza maggiore del peso, se è come dice Carmela. La mano deve sostenere il peso del libro e il peso della molla. La molla fa sempre una forza uguale ai due lati quando la tiriamo e quando la spingiamo contro il muro ed il pavimento".

B) Dopo la discussione i bambini provano a tirare un elastico fra le mani, per vedere se è possibile esercitare forze diverse alle due estremità (vedi foto b).

Che in realtà una molla deformata faccia forze uguali ai due lati si "sente" con le mani e si "vede" guardando le persone che fanno forza. Ecco due frasi che sintetizzano conclusioni (e generalizzazioni) dei bambini dopo l'esperienza:

"Facciamo la stessa forza con le due mani, perciò la molla tira uguale ai due lati. Abbiamo visto che quando riduciamo la forza con la mano destra subito sentiamo che anche la mano sinistra fa forza minore e viceversa".

"Questa regola è vera anche quando tiriamo una molla legata al muro e quando la schiacciamo contro il muro o contro il pavimento. La molla tira il muro con una forza uguale a quella con cui tira la mano e fa tanta forza contro il pavimento quanto fa forza contro la mano che spinge".



guato: sia per l'attenzione ai fatti, che per i primi abbozzi di interpretazione.

Alcuni bambini fanno così ragionamenti del tipo "la molla tira o spinge uguale ai due lati; però le forze che fa la molla sono minori delle forze che facciamo con le mani per comprimerla o per allungarla"; "le forze sono uguali solo quando si smette di tirare o di schiacciare".¹³ Altri bambini invece arrivano ad affermare che "se noi diciamo che la molla più si allunga e più fa forza, la molla fa una forza uguale a quella che facciamo per tenderla o comprimerla, sempre e non solo quando smettiamo di tirare o di schiacciare".¹³

Modi di vedere del primo tipo nascono dai ragionamenti intuitivi di cui già abbiamo parlato, che si rifanno a convinzioni ed esperienze molto generali e non tengono conto di ciò che i bambini stessi hanno capito fino a questo momento in altri contesti sulle forze in generale e su quelle elastiche in particolare. Invece i ragionamenti che si basano sulla relazione d'ordine fra forza e allungamento partono dai risultati del lavoro precedente: l'uguaglianza delle due forze antagoniste viene dedotta da una regola a sua volta ricavata induttivamente, grazie alle esperienze svolte; regola che viene riconosciuta valida istante per istante e per ogni valore delle forze agenti e dei corrispondenti allungamenti. Si arriva così a concludere che la forza attiva esercitata dal bambino che tira o comprime e quella resistente della molla che "vuole" tornare alla sua forma naturale crescono simultaneamente e con continuità, mantenendosi costantemente eguali.

Ora, noi sappiamo che questa conclusione è giusta solo se il movimento avviene a velocità uniforme: mentre c'è asimmetria nelle forze se c'è variazione di movimento, cioè accelerazione. L'insegnante può dire agli allievi che c'è effettivamente uguaglianza solo se la molla è allungata uniformemente e lentamente, senza variazioni brusche; quest'argomento può essere reso plausibile inserendo fra la mano del bambino e la molla un "misuratore di forza" (vedi più avanti § 2.8.), per esempio un'altra molla, così da poter constatare che nel momento in cui la molla acquista una determinata lunghezza il misuratore "legge" sempre lo stesso valore (se è una molla, si deforma sempre della stessa quantità): sia che si resti fermi, sia che si stia allungando ulteriormente la molla in maniera regolare. Ci si

¹³ Qui "smettere di tirare o di schiacciare" significa fermarsi ad un certo allungamento o accorciamento della molla, senza cercare di farne variare ulteriormente la deformazione.

può inoltre riferire ad esempi sul tipo di quello del fiasco vuoto e pieno per portare l'attenzione sul fatto che la forza esercitata dal corpo umano, a differenza di quella esercitata dalla molla non è regolata automaticamente. Non si può pensare, però, che ciò sia sufficiente per una comprensione approfondita del fenomeno, che non può essere raggiunta con delle semplici spiegazioni qualitative. Questa situazione d'altra parte mostra bene la necessità della costruzione di tappe intermedie fra la conoscenza frammentaria e contestuale dei ragazzi e le schematizzazioni generalizzanti della Fisica: quello che comunque può essere di volta in volta raggiunto, nella comprensione dei fenomeni studiati, è un livello di ricostruzione e di correlazione dei fatti adatto alle capacità formali dei bambini ed in accordo con il loro bagaglio di esperienze ed interpretazioni (comprese, ovviamente, quelle sviluppate proprio a scuola). Che poi la ricostruzione complessiva operata dalla Fisica, esprimibile attraverso il I, il II e il III principio della Dinamica, sia al di fuori di quanto può essere raggiunto dai ragazzi con il lavoro di cui stiamo parlando, non gli toglie affatto significato; esso, infatti, garantisce una padronanza fenomenologica dei fenomeni indagati adeguata alle possibilità intellettive dei bambini che va ben al di là di quella normalmente presente a livello di conoscenza comune, ed è di per sé efficace nell'interpretare coerentemente vaste aree di esperienza.

2.6. Il sistema complessivo delle forze agenti

Un ulteriore passo avanti nell'opera di ricostruzione e di formalizzazione del fare forza su sistemi elastici può essere compiuto ponendo il problema di come rappresentare con un disegno l'interazione di fare forza quando due o più sistemi interagiscono: per esempio quando due bambini tendono una molla. Rispetto al linguaggio, verbale o scritto, il disegno presenta il vantaggio di visualizzare i sistemi che interagiscono e le loro posizioni reciproche e di utilizzare simboli idonei ad evidenziare alcune caratteristiche dell'interazione (per es. le parti dei si-

stemi su cui agiscono le forze, la direzione delle forze, ...), di rendere infine più semplice ed immediata la comunicazione, consentendo una visione d'insieme che esula dalle possibilità della sola descrizione linguistica, di per sé sequenziale. Una successione di schizzi (cfr. scheda 2.4 come esempio) può rappresentare una possibile graduale ricostruzione grafica delle varie forze presenti nell'interazione, a partire da quelle che hanno un'evidenza percettiva più immediata: le forze fatte dalla molla e dai bambini e la forza peso dei bambini stessi. (Di solito, restano inizialmente meno avvertiti gli effetti sul pavimento, che appaiono secondari rispetto agli altri "fare forza" coinvolti).

Scheda 2.4 - La "catena" chiusa delle forze

I bambini hanno giocato a tirare le molle (vedi foto). Si discute in classe il sistema complessivo delle forze in gioco, ricostruendolo a tappe con dei disegni alla lavagna.

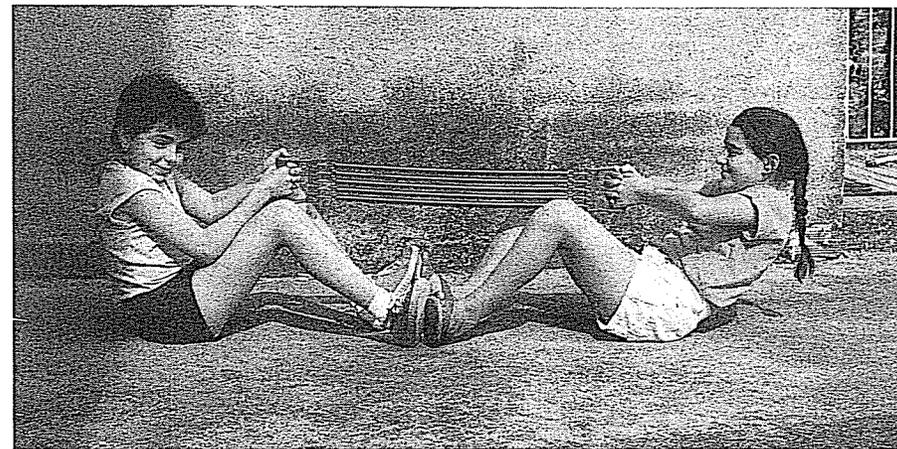
Inizialmente si rappresenta la stessa situazione del gioco (vedi fig. 1) e la ricostruzione del sistema di forze agenti è parziale:

"L'omino A tira verso sinistra e l'omino B tira verso destra. I due omini fanno forza con il loro peso contro il pavimento. Il peso spinge dall'alto verso il basso ed il pavimento resiste spingendo dal basso verso l'alto contro gli omini. Il pavimento per fare forza si deforma come la molla, solo che la deformazione non si vede. Le forze che si scambiano molla e bambini sono uguali e così quelle che si scambiano bambini e pavimento per effetto del peso".

Successivamente si prende in considerazione una situazione diversa (vedi fig. 2) e piano piano si ricostruisce l'intero sistema di forze agenti:

"... (si ricostruiscono le stesse forze già individuate nella situazione precedente, poi si continua)... Inoltre i due omini spingono con i piedi ed il pavimento fa forza per non farsi "accorciare" (*). Se il pavimento fosse liscio, i due omini non potrebbero spingere contro di esso e scivolerebbero senza poter allungare la molla". (Se al posto del pavimento ci fosse un tappeto, l'azione di "accorciamento" dovuta alla spinta dei piedi sarebbe ben visibile!).

(*) Più avanti (Cap. III) si vedrà che si tratta di forze di attrito statico.



In fig. (3), relativa ad una situazione ancora diversa, i bambini mostrano immediatamente di aver compreso che se si sostituisce un omino, o tutti e due gli omini, con il muro, la situazione, dal punto di vista del sistema complessivo delle forze interagenti, non cambia.

N.B. Naturalmente le frecce che compaiono negli schizzi venivano disegnate alla lavagna mano a mano che si nominavano le forze corrispondenti.

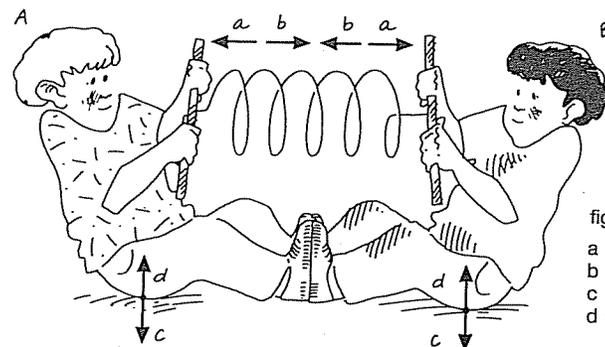


fig. 1
a = forze esercitate dagli omini sulla molla.
b = forze esercitate dalle molle sugli omini.
c = peso dell'omino.
d = reazione del pavimento al peso dell'omino.

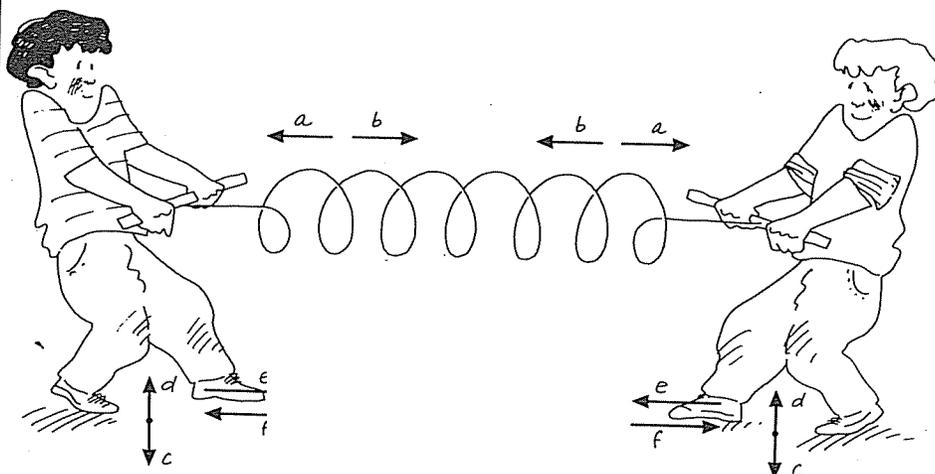


fig. 2
a, b, c, d come in fig. 1.
e = forze esercitate dai piedi sul pavimento (per attrito).
f = forze esercitate dal pavimento sui piedi (per attrito).

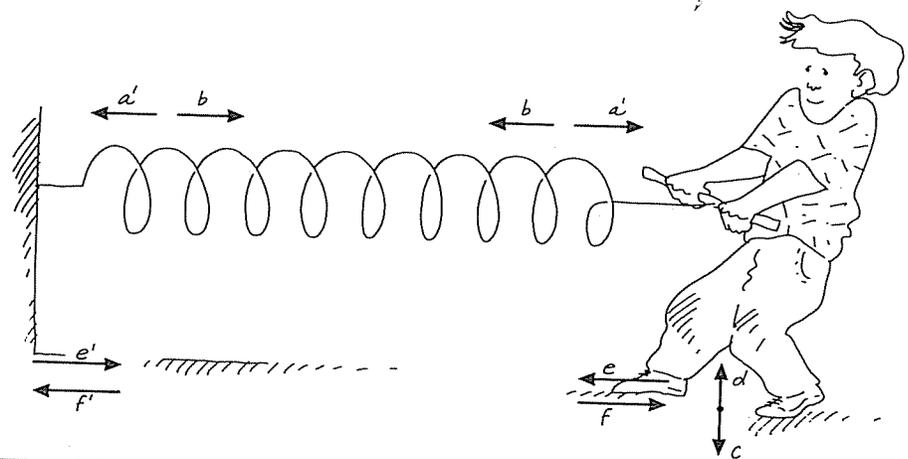


fig. 3
a, b, c, d, e, f come in fig. 1 e 2.
a') forza esercitata dal muro sulla molla.
e') forza esercitata dal muro sul pavimento (di spinta).
f') forza esercitata dal pavimento sul muro (di spinta).
(a' = a; e' = e; f' = f)

Schizzi di questo tipo potrebbero essere direttamente disegnati dai bambini e discussi in classe, o proposti ai bambini per essere da loro completati con indicazioni schematiche sulle forze.

Il fatto che una freccia possa rappresentare la forza che un sistema esercita su un altro e che ci possa essere corrispondenza tra la lunghezza della freccia e l'intensità della forza, sono idee abbastanza diffuse ed intuitive: però spesso anche confuse e contraddittorie, che hanno bisogno di esplicitazione e chiarificazione. Una rappresentazione anche solo qualitativamente corretta dell'insieme delle forze fatte da tutti i sistemi non è però banale: i bambini possono arrivarvi gradualmente ragionando per analogie fra contesti diversi, ed utilizzando come riferimento lo schema deformazione-forza costruito attraverso il confronto tra forze elastiche e forze muscolari, fondato più di altri su evidenze percettive. Così possono arrivare a stabilire che:

– il pavimento esercita una forza uguale e contraria al peso del bambino (“... se io spingo contro di te, tu mi resisti e per resisterti devi fare forza contro di me; allo stesso modo il pavimento per sostenere il tuo peso deve fare forza per non farsi schiacciare”).¹⁴ Di conseguenza si possono disegnare, in corrispondenza del contatto bambino-pavimento, due frecce verticali per ognuno dei bambini: una diretta verso il basso che rappresenta il peso del bambino, l'altra diretta verso l'alto, che rappresenta la reazione del pavimento;

– si deve “segnare un'altra freccia che rappresenta la forza che facciamo spingendo il pavimento con i piedi” (perché “se il pavimento fosse molto liscio non si potrebbe tendere la molla perché si scivola”). E si può disegnare, per ogni bambino, una forza orizzontale localizzata al contatto con il pavimento, con la freccia rivolta verso l'altro bambino; le due forze così individuate tendono a “comprimere” il pavimento fra i piedi dei due bambini;

– di conseguenza “il pavimento che non vuole farsi accorciare resiste e fa forza contro i piedi dei bambini e si devono mettere ancora due frecce”. Si possono disegnare così altre due frecce, al contatto bambini-pavimento, dirette da ogni bambino in verso opposto all'altro bambino, per rappresentare l'azione del pavimento.

¹⁴ Qui e nel resto del paragrafo le frasi fra virgolette sono tratte dalla discussione che si è svolta nella classe sperimentale, mentre i bambini venivano alla lavagna a proporre ognuno i propri schizzi della situazione.

La schematizzazione discussa, che analizza separatamente le forze agenti lungo la direzione verticale e lungo la direzione orizzontale, benché ancora grossolana è qualitativamente soddisfacente ed è alla portata dei bambini a questo punto delle attività. Una rappresentazione più coerente diventerebbe possibile utilizzando un vero e proprio formalismo vettoriale per le forze (cfr. Cap. VI)¹⁵, tenendo conto più esplicitamente delle caratteristiche delle forze di attrito (cfr. Cap. III).¹⁶

Sul sistema di forze così visualizzato si possono condurre i bambini a fare considerazioni di validità generale. Si possono individuare i sistemi sorgenti di forze: la molla tesa; i bambini che tirano la molla e spingono contro il pavimento; il peso, cioè la forza gravitazionale che la Terra esercita sui bambini; il pavimento che non vuole essere sfondato, né tirato, né compresso; le superfici di contatto fra piedi e pavimento che si oppongono allo scivolamento (vedi Cap. III per una discussione sulle forze di attrito). Bambini, pavimento, molla, superfici a contatto possono essere riconosciuti come sistemi deformati che in quanto tali diventano sorgenti di forza; sistemi che esercitano ognuno, istante per istante, forze uguali ed opposte alle forze subite (la molla fa una forza di contrazione, perché è tesa, il pavimento una forza di espansione, perché è compresso, ...). Ancora, ci si può rendere conto che tutti questi sistemi, per fare forza, devono spingere o tirare almeno in due punti (la molla contro i due bambini; ogni bambino contro la molla ed il pavi-

¹⁵ Alcune grandezze (variabili) fisiche (come la temperatura, la massa, il volume...) sono individuate completamente attraverso un numero ed un'unità di misura (un blocco di ferro di volume 1 dm³, alla temperatura di 20 °C, ha una massa di 7,8 kg...) queste grandezze vengono dette *grandezze scalari*.

Altre grandezze fisiche (come la velocità, l'accelerazione, gli spostamenti, le forze...) sono completamente individuate solo quando se ne indica, oltre all'intensità (data ancora da un numero e da una unità di misura) anche la direzione ed il verso (rispetto ad un sistema di riferimento individuato). Le grandezze di questo secondo tipo vengono dette *grandezze vettoriali*. (La traiettoria di un proiettile, ad esempio, è determinata non solo dalla intensità, ma anche dalla direzione e dal verso della sua velocità iniziale: 100 m/s verso l'alto, 100 m/s in orizzontale o con un alzo di 45° non sono certo la stessa cosa! Notare che il sistema di riferimento naturale per considerare il moto è in questo caso a sua volta definito dalla direzione verticale della forza di gravità).

¹⁶ È bene tenere presente, comunque, che decomposizione e composizione vettoriale delle forze (anche in casi molto semplici) implicano padronanza di un “principio di sovrapposizione” di per sé assai complesso da padroneggiare, a parte le sue formulazioni (numerica, algebrica, vettoriale ecc.).

mento; il pavimento contro i due bambini che lo comprimono fra loro e contro i due sistemi bambino-Terra che lo schiacciano).

Le forze complessive che ne derivano, in condizioni di equilibrio statico o lentamente variabile, sono istante per istante a due a due uguali fra loro e di verso opposto, come si può arguire generalizzando la regola di simmetria stabilita per le molle. E se partendo da una delle superfici di contatto attraverso cui le forze si esercitano (contatto piedi/pavimento o mani/molla) si prosegue lungo il sistema complessivo, in senso orario od antiorario, ci si rende anche conto che il cammino delle forze è chiuso, quindi che l'interazione fra più sistemi costituisce sempre una catena chiusa di forze equilibrate (in generale, vettorialmente).

In conclusione, vale la pena di richiamare l'attenzione dei bambini sul fatto che quando due o più sistemi intervengono in giochi di forze il parlare di una sola forza che agisce su un corpo materiale (per es. a proposito della sollecitazione applicata ad uno dei due estremi di una molla) è una schematizzazione molto parziale di quanto avviene. Sono infatti in gioco sempre azioni reciproche e mutue interazioni che intervengono tra i vari sistemi sempre in modo simmetrico per gli scambi di forze (l'azione è uguale alla reazione) se non si è in presenza di accelerazione. (Se si considerano invece aspetti di energia, si possono avere situazioni di simmetria o asimmetria, secondo i casi, come abbiamo visto in Cap. I).

2.7. Le leggi cui obbediscono le molle

Nei due paragrafi precedenti abbiamo visto come ritrovare, nel caso delle deformazioni elastiche di una molla, alcune proprietà del tutto generali di qualunque interazione di forza fra sistemi. Occupiamoci ora invece delle caratteristiche del "fare forza" che sono specifiche di una molla. Vediamo cioè come si possono condurre i ragazzi a studiare più in dettaglio le variabili¹⁷ che entrano in gioco quando uno o più sistemi-sorgente interagiscono con una molla per arrivare a scoprire, ad un primo livello qualitativo, il tipo di dipendenza funzionale fra di esse. Questo richiede che i ragazzi acquisiscano modi corretti di operare, in particolare che arrivino a rendersi conto che le correlazioni fra le grandezze in gioco vanno studiate separatamente per ogni coppia delle variabili individuate (per esempio forza di reazione elastica delle molle e deformatio-

ne delle molle) e che per fare questo è necessario far variare il valore di una delle due e vedere di quanto varia l'altra, operando in modo che tutte le altre restino costanti. Si deve cioè operare per separazione di variabili.¹⁸ Un tale modo di procedere non è spontaneo: generalmente i ragazzi tendono a provocare, in una data situazione e rispetto ad una determinata variabile, la più grande variazione possibile dei valori che essa può assumere; e per farlo cercano di far variare contemporaneamente quante più variabili riescono ad individuare.

Torniamo alle leggi delle molle. Abbiamo già detto (§ 2.4.) che uno dei punti più delicati da chiarire è la diversa significatività della deformazione relativa di una molla rispetto a quella assoluta. Partiamo da questo problema.

Al solito si costruisce una motivazione all'esecuzione di esperienze suscitando una discussione. Si può chiedere ai bambini quanta forza, secondo loro, devono fare due persone che vogliono allungare o comprimere della stessa quantità due molle dello stesso tipo (identiche di struttura), ma di lunghezza diversa.

Le previsioni possono essere le più varie, con le motivazioni più diverse (scheda 2.5), ed evidenziano i differenti modi di vedere la stessa situazione da parte dei bambini. Ci possono essere bambini che, immaginando l'azione, soffermano la loro attenzio-

¹⁷ Cioè di grandezze fisiche operativamente individuate e definite che intervengono a caratterizzare il fenomeno esaminato, e che possono variare nel tempo e/o situazione per situazione. I ragazzi individuano man mano molte variabili, che possono avere in generale caratterizzazione scalare o vettoriale (cfr. nota 15). Alcune, come le forze esercitate nelle molle, le deformazioni totali o percentuali, le lunghezze iniziali... divengono oggetto di uno studio quantitativo che consente di stabilire, nei casi più semplici, relazioni matematiche che vincolano i valori delle rispettive misure, nelle varie situazioni esaminate. Altre, come quelle che individuano numericamente il materiale di cui sono fatte le molle, o le loro caratteristiche geometriche... vengono individuate come "fattori pertinenti" su un piano qualitativo, che permette di stabilire solo relazioni d'ordine fra i loro valori.

¹⁸ Questa regola è generalmente valida ogni volta che, come in questo caso, si ha a che fare con relazioni fra variabili tali che, sceltane una come *variabile dipendente*, si possano fissare a piacere, e ognuno indipendentemente dagli altri, i valori di tutte le altre senza condizionare in questo modo la forma complessiva della relazione. Il procedimento per separazione di variabili non è invece applicabile nei casi di interdipendenza più complessa fra le variabili stesse.

Scheda 2.5 - Relazioni fra lunghezza a riposo di una molla e deformazione

Si chiede ai bambini che forze pensano che esercitino due persone che stanno allungando od accorciando della stessa quantità totale due molle dello stesso tipo, ma di lunghezza a riposo diversa. Ecco alcune delle loro previsioni.

Per l'allungamento:

"I due omini devono fare la stessa forza. Per la molla più lunga si impiega più tempo".

"L'omino che tira la molla più corta deve fare una forza maggiore".

"L'omino che tira la molla più lunga deve fare una forza maggiore perché il peso è maggiore".

Per l'accorciamento:

"Il bambino che spinge la molla più lunga impiega più forza di quello che spinge la molla più corta perché la molla più lunga è più distante dal pavimento e ci vuole più tempo".

"L'omino che deve accorciare la molla più corta deve fare più forza".

"I due omini devono fare la stessa forza, però l'omino che deve accorciare la molla più piccola riesce a farlo in meno tempo" (Notare la falsa compensazione).

Successivamente i bambini allungano della stessa quantità (misurata in "numero di mattonelle" del pavimento) due elastici da portabagagli di lunghezza diversa e confrontano le forze che devono esercitare nei due casi. Ecco le loro conclusioni dopo aver eseguito l'esperienza:

"Quando abbiamo allungato di quattro mattonelle una molla uguale alle prime due ma molto più corta, abbiamo fatto una forza molto grande". "Quando abbiamo allungato la molla più lunga di quattro mattonelle abbiamo fatto meno forza di quando abbiamo allungato la molla corta di quattro mattonelle".

ne su aspetti che non sono direttamente significativi dal punto di vista della relazione intercorrente fra sollecitazione esterna e deformazione del sistema.¹⁹ Altri possono spiegare in maniera contraddittoria l'interazione con una molla da accorciare e quella con una molla da allungare, senza porsi problemi di coerenza: il modello della relazione d'ordine fra forze e deformazione già costruito non è detto che sia sufficiente perché tutti i ragazzi vedano la necessità di stabilire un'analogia fra compressione e tensione.

Al solito per risolvere il problema si passa alle esperienze. Si possono far allungare, ad ogni bambino, prima un elastico da portabagagli corto e poi uno dello stesso tipo lungo, con la consegna di allungare entrambi della stessa

¹⁹ Nella classe sperimentale alcuni bambini danno importanza al peso delle molle ed al tempo necessario per deformarle (vedi scheda 2.5). Il tempo ed il peso, in realtà, hanno un'influenza percettiva sul bambino: l'energia spesa dal bambino durante l'interazione viene in parte trasferita alla molla (tanto più quanto maggiore è la deformazione), in parte utilizzata per fare forza; quest'ultima è tanto maggiore quanto più grande è l'intervallo di tempo durante il quale si fa forza. Il bambino allora si stanca di più e può interpretare la sua sensazione come indice del fatto che ha esercitato una forza maggiore. Inoltre, se una molla è più lunga è anche più pesante, e il bambino deve anche fare più forza per bilanciarne il peso in più e si stanca un po' di più.

quantità. Le molle devono essere agganciate a qualche sostegno (per esempio la maniglia di una porta) e il loro allungamento può essere controllato segnando sul pavimento le posizioni corrispondenti a quelle delle estremità tirate dai bambini, prima e dopo l'allungamento (fig. 2.4). È bene che la molla corta venga allungata abbastanza perché i bambini risentano visibilmente lo sforzo fatto, così che possano notare la differenza con la situazione in cui la lunghezza iniziale della molla è maggiore e lo sforzo per allungarla della stessa quantità palesemente minore.

Deve, infatti, essere la sensazione della differenza fra gli sforzi muscolari fatti nelle due situazioni a guidare i bambini alla conclusione che, a parità di allungamento (e per lo stesso tipo di molle), la forza che occorre fare è tanto minore quanto maggiore è la lunghezza a riposo della molla (vedi la conclusione dei ragazzi in scheda 2.5). La lunghezza a riposo, pertanto, è una variabile essenziale quando si interagisce con una molla. È importante richiamare l'attenzione dei bambini sull'apparente contraddizione delle due relazioni che si sono stabilite: "più lunga, più forza" e "più corta, più forza", sottolineando la differenza fra le due situazioni in cui sono state ricavate (deformazioni diverse di una

stessa molla; stessa deformazione di molle dello stesso tipo, ma con lunghezze a riposo diverse) in relazione alla differenza fra i problemi che ci si era posti (qual è la relazione generale fra forze deformanti e deformazione di una molla? Qual è la relazione fra la forza necessaria a provocare una deformazione data e la lunghezza a riposo di una molla?).

Si può poi passare a considerare il problema complementare a quello appena affrontato, cioè quali sono gli effetti di una stessa forza applicata a molle uguali in tutto, ad eccezione della lunghezza. Si pone il problema e si avvia la discussione.

Non dovrebbero mancare bambini che, in base alle esperienze precedenti ed alle relazioni già stabilite, prevedono correttamente che la molla più lunga si deformerà di più e quella più corta si deformerà di meno.

Quand'anche tutti fossero d'accordo su questa previsione, è comunque il caso di passare ad esperienze di verifica, facendo cogliere ai bambini il loro significato di controllo delle leggi già stabilito. È anche opportuno utilizzare tipi diversi di molle: elastici per indumenti di vario tipo e larghezza, molle da portabagagli, molle di acciaio, elastici da pacchi, camere d'aria ritagliate, ecc. Ovviamente, per ogni tipo di molla se ne devono avere almeno due di lunghezza diversa.

ATTIVITÀ

ATTIVITÀ

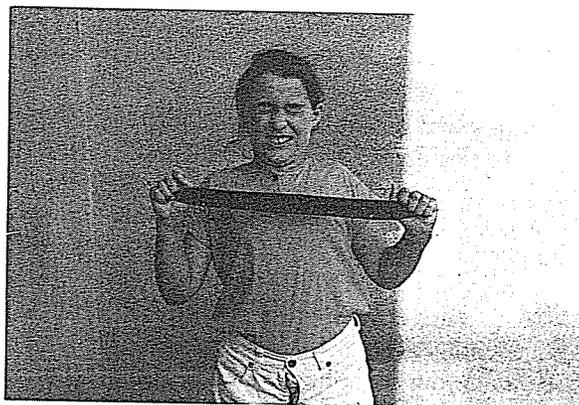


Figura 2.4 - Forze di entità diversa producono allungamenti uguali

Per ottenere allungamenti uguali in elastici dello stesso tipo, ma diversi per lunghezza, bisogna fare forze diverse: si deve fare più forza con l'elastico più corto.

Si pone subito il problema di come esercitare esattamente la stessa forza sulle molle di ogni coppia. Ogni bambino può provare a tirare, o spingere, con "tutta la propria forza". Un bambino (o un uomo) non può però continuare a fare una forza costante nel tempo, "perché si stanca". Per poter eseguire le varie esperienze nasce da parte dei bambini stessi l'esigenza di garantirsi un modo di fare forza che sia controllabile sia nell'intensità ("tutta la propria forza" è diversa da persona a persona) che nel tempo. Si può discutere su come fare e far venire ai ragazzi l'idea di utilizzare come sorgente di forza controllabile e stabile la forza peso di un oggetto. Si possono allora eseguire esperienze nelle quali si confrontano forze elastiche e forze peso (fig. 2.5) per studiare le correlazioni fra l'intensità di queste ultime, le lunghezze a riposo delle molle ed i loro allungamenti o accorciamenti. I ragazzi possono utilizzare via via pesi diversi per allungare (e se possibile comprimere) le molle di ogni coppia, e devono trovare il modo di confrontare ogni volta le deformazioni provocate dallo stesso peso nelle due molle.

È importante rendersi conto che queste attività non richiedono inizialmente l'esecuzione di vere e proprie misure. Infatti, i pesi possono essere ordinati dal più piccolo al più grande confrontando gli allungamenti che provocano nella stessa molla e per gli allungamenti delle molle di ogni coppia ciò che importa è stabilire se sono uguali o diversi, in questo caso qual è il maggiore: e questo si può fare, ad esempio, anche servendosi di una cordicella.

Naturalmente bisogna stare attenti ad operare nelle "zone di elasticità" delle molle (cioè né con pesi così piccoli da non provocare deformazioni apprezzabili, né con pesi così grandi da provocare deformazioni permanenti).

Eseguendo le esperienze è immediato verificare che a parità di forza deformante l'allungamento o compressione che una molla di un certo tipo subisce è maggiore se la sua lunghezza a riposo è maggiore. Si può però anche verificare qualche cosa di più ed anche per questo è importante eseguire queste esperienze. In effetti due pezzi di elastico uguali in tutto, eccettuata la lunghezza, subiscono, a parità di forza deformante, lo stesso allungamento percentuale: cioè ogni centimetro (ogni tratto uguale) di ognuno dei due elastici subisce lo stesso allungamento, a qualsiasi dei due pezzi appartenga. È questo che dà significatività all'allungamento relativo piuttosto che a quello assoluto ed è pertanto opportuno che i ragazzi arrivino a rendersene conto. Non è cosa semplice, poiché il dato percettivo predominante è l'allungamento totale, come abbiamo sottolineato già più volte.

Bisogna porre il problema esplicitamente ai ragazzi, spostando la loro attenzione da quello che avviene a tutta la molla nel suo complesso a ciò che avviene in ogni "pezzetto" di molla e chiedendo di fare previsioni su quanto avviene a pezzetti della stessa lunghezza nelle due molle di ogni coppia. Le previsioni possono poi venire controllate segnando in maniera opportuna

ATTIVITÀ

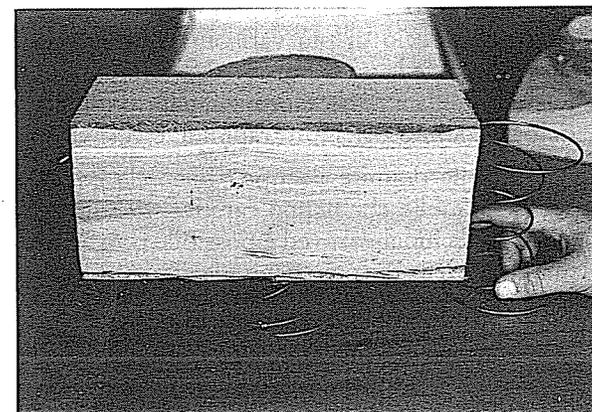


Figura 2.5 - Il peso è una forza ...

Il peso del blocco e la spinta della mano producono lo stesso effetto sulla molla: la molla si accorcia.

na sugli elastici di ogni coppia gli estremi di tratti di egual lunghezza. In qualunque modo questo si faccia (segnando un solo tratto per molla, o suddividendole entrambe per intero in tratti uguali, o segnando su di esse tratti uguali sparsi qua e là ...) si potrà constatare che con lo stesso peso tutti i tratti uguali sulle due molle di ogni coppia si deformano nello stesso modo (fig. 2.6).

ATTIVITÀ

Saranno generalmente diversi gli allungamenti o accorciamenti di tratti di eguale lunghezza su molle di tipo diverso, a parità di forza deformante. Quali sono i fattori che influenzano questa diversità? L'operare con molti tipi di molle serve a chiarire questo punto. Si può vedere che il comportamento elastico di una molla è influenzato, oltre che dalla sua lunghezza a riposo, anche dal materiale di cui è fatta, dalla lavorazione cui essa è sottoposta e dalle altre caratteristiche geometriche (larghezza e spessore, superficie e forma della sezione trasversale). In particolare dalle camere d'aria dei pneumatici si possono tagliare strisce di larghezza diversa e verificare che a parità di lunghezza (e di spessore!) quelle più larghe si allungano di meno, a parità di peso applicato o di lunghezza iniziale. Con gli elastici da pacchi si può vedere che quelli più spessi (a sezione maggiore) si deformano meno di quelli più sottili (a sezione minore), a parità di lunghezza iniziale e di forza deformante. Anche le molle a spirale si allungano o si schiacciano di più o di meno a seconda del materiale del raggio delle spire, delle forme, della sezione del filo.



Di fronte a queste constatazioni si può finalmente affrontare il problema della durezza di un tipo di molla. Si può chiedere ai ragazzi quando si può dire, in definitiva, che un tipo di molla è più duro di un altro e se si possono ordinare i diversi tipi di molle che si hanno a disposizione dalla più morbida alla più dura o viceversa.

Senza troppa difficoltà i bambini dovrebbero trovarsi consenzienti sul fatto che una molla si può definire più dura di un'altra quando, a parità di lunghezza a riposo e di forza agente, si deforma di meno. Di conseguenza i ragazzi dovrebbero essere in grado, da soli, di individuare il modo corretto di operare per poter seriare, in ordine di durezza crescente o decre-

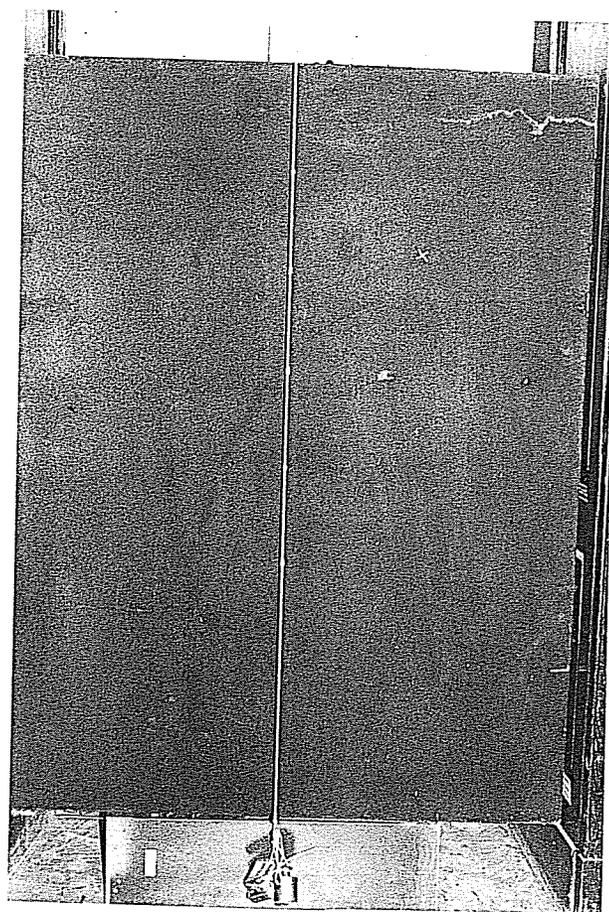


Figura 2.6 - Tratti uguali dello stesso elastico sottoposto a deformazione si deformano della stessa quantità

La fotografia mostra che ogni tratto dell'elastico ha subito la stessa deformazione. Ciò consente di definire, in corrispondenza di una sollecitazione unitaria, un *allungamento percentuale* che dipende solo dal tipo di elastico utilizzato e non dalla sua lunghezza a riposo.

scente, diversi tipi di molle: prendere molle della stessa lunghezza a riposo, applicare ad esse pesi uguali e confrontare i rispettivi allungamenti.²⁰

La scheda 2.6 costituisce un esempio indicativo del livello di consapevolezza che un bambino può raggiungere in questo tipo di lavoro: sono state correttamente individuate e messe in relazione le variabili in gioco (intensità della forza, lunghezza a riposo della molla, "durezza", cioè rigidità, della molla, allungamento o accorciamento) ed è stato correttamente descritto quale deve essere il modo di operare.

In definitiva, attraverso tutte queste attività i ragazzi possono costruirsi una schematizzazione corretta del comportamento di una molla: prendendo via via consapevolezza (anche parziale) dei suoi vari aspetti, che qui per comodità ricapitoliamo:

- 1) per una data molla, le variabili ed i parametri di cui tener conto per una corretta descrizione fenomenologica del suo comportamento elastico, quando è sottoposta a trazione o compressione, sono: la lunghezza a riposo; l'intensità della sollecitazione esterna; l'allungamento, o accorciamento; la rigidità o "durezza" assoluta (operativamente definita dall'allungamento sotto sollecitazione unitaria).
- 2) per costituire correlazioni esplicite fra queste variabili o parametri, dalle più immediate relazioni d'ordine alle più complesse relazioni funzionali, è necessario fare esperienze in cui, in condizioni diverse, si confrontano sollecitazioni ("cause"), deformazioni ("effetti") e caratteristiche (o "parametri"). Le relazioni così ottenute caratterizzano il comportamento della molla, normalmente entro i limiti in cui esso è "elastico": limiti definiti a loro volta dall'intreccio di più variabili, da condizioni ambientali come la temperatura, dal numero di volte in cui la molla è stata deformata, dalla durata delle deformazioni o dalla loro rapidità, e così via.
- 3) è possibile definire il "tipo" di molla come la classe delle molle che hanno caratteristiche identiche eccetto la lunghezza: ed è possibile porsi il problema di descrivere come risponde alle sollecitazioni esterne un dato "tipo" di molla.

²⁰ A stretto rigore, non è necessario che sia uguale la lunghezza totale a riposo: basta contrassegnare sulle molle da seriare dei tratti della stessa lunghezza a riposo e operare su di essi il confronto degli allungamenti. Quando è difficile ridurre molle di vario tipo alla stessa lunghezza questo diviene il modo più conveniente di lavorare.

Scheda 2.6 - Programmazione di un'esperienza

Un ragazzo descrive come si possono confrontare fra loro due molle di tipo diverso, per decidere quale delle due è *più dura*.

"Prendiamo una molla di un certo materiale e la agganciamo al sostegno, poi attacchiamo un peso e vediamo di quanto si allunga, poi prendiamo un'altra molla diversa, ma con la stessa lunghezza ed attacchiamo lo stesso peso, perché la forza deve essere uguale e vediamo di quanto si allunga. La molla che si allunga di più è *più morbida* e quell'altra che si allunga di meno è *più dura*. Le due molle devono avere la stessa lunghezza, perché se non sono della stessa lunghezza una si allungherebbe di più e l'altra di meno. Quella più lunga si allungherebbe di più quando si fa la stessa forza".

N.B. Come si vede dal confronto con il § 2.4, i ragazzi sono passati da una strategia di classificazione (duro, morbido) ad una strategia di ordinamento (meno duro, più duro, ancora più duro).

4) si può constatare che tutte le molle dello stesso tipo si deformano percentualmente della stessa quantità, con la stessa sollecitazione; indipendentemente sia dalle deformazioni assolute sia dalla linearità o meno del loro comportamento (cfr. § 2.9.).

5) perciò è possibile confrontare diversi tipi di molla scegliendo esemplari di uguale lunghezza a riposo e sottoponendoli alla stessa sollecitazione. In questo modo si giunge a ordinare operativamente i tipi di molla secondo la variabile "rigidità specifica" (definita come allungamento percentuale sotto sollecitazione unitaria).

C'è un aspetto caratteristico del modo in cui la Fisica organizza le descrizioni/spiegazioni dei fenomeni naturali, cui vale a questo punto la pena di accennare. Individuare un fenomeno fisico significa anzitutto individuare i diversi sistemi materiali in cui esso può verificarsi. Di ogni fenomeno si possono poi guardare, per così dire, due aspetti diversi e complementari: ci si può interessare essenzialmente di quali sono le variabili caratteristiche del fenomeno in generale (cioè quelle che corrispondono alle *cause* ed agli *effetti*), per cercare di trovare quali relazioni esistono fra di esse; oppure ci si può interessare di individuare quali sono le grandezze caratteristiche dei singoli sistemi materiali in cui il fenomeno si verifica, le quali determinano, in corrispondenza dell'entità delle *cause*, l'entità degli *effetti*, per cercare di esplicitare il modo in cui intervengono nel fenomeno. Le grandezze del primo tipo si chiamano *variabili*, quelle del secondo *parametri*.²¹

Nel lavoro sulle molle descritto fino a questo momento sono presenti entrambi i punti di vista,

anche se si è arrivati a stabilire solo relazioni qualitative e non quantitative. Infatti nel nostro caso i bambini vengono innanzitutto portati ad individuare l'elasticità come fenomeno generale, ed al suo interno l'elasticità di una molla come caso particolare. Di quest'ultimo fenomeno individuano le variabili caratteristiche: la forza esterna (la causa) e l'allungamento (o accorciamento) (l'effetto), correlate fra loro da una semplice relazione d'ordine diretto, che può essere stabilita per ogni molla facendo variare la causa e osservando i cambiamenti corrispondenti dell'effetto. D'altra parte essi mettono anche a confronto il comportamento di molle diverse, per identificare le caratteristiche che determinano, per ogni molla, l'entità della deformazione corrispondente ad un valore dato della forza agente. Il primo parametro significativo che viene individuato è la lunghezza a riposo della molla, che si

²¹ Per esempio: il passaggio di corrente elettrica è un fenomeno che si verifica ogni qualvolta si connette ad un generatore di differenza di potenziale (per esempio ai poli di una pila) un materiale conduttore (per esempio un filo metallico), come si può stabilire in diversi modi. Le variabili sono in questo caso l'intensità di corrente I e la differenza di potenziale V ; la relazione che le lega è una relazione di proporzionalità diretta, in formula $V : I = R$ (prima legge di Ohm), ove R è un valore che si mantiene costante (in prima approssimazione) per ogni tipo di filo, ma che varia da filo a filo. R è dunque un "parametro", perché dipende solo dal sistema materiale considerato, e determina appunto il valore dell'effetto (cioè dell'intensità di corrente) in corrispondenza al valore della causa (differenza di potenziale applicata). Solo che, a questo livello, non si sa quali siano le caratteristiche del filo che determinano R , né come intervengono. Mettersi dal secondo dei due punti di vista menzionati significa appunto cercare di dare risposta a questi interrogativi. Si trova così la II legge di Ohm, $R = \sigma s/l$, che esplicita i parametri caratteristici: σ (caratteristica del materiale), s (sezione del filo), l (lunghezza del filo), nonché il modo in cui essi intervengono nel definire l'intensità della corrente, data la differenza di potenziale.

scopre essere legata da una relazione d'ordine diretta alla deformazione provocata da una forza agente fissata. Di più, si arriva a sostituire, come variabile più significativa per la descrizione generale del fenomeno, la deformazione relativa alla deformazione assoluta: una data forza agente provoca, in una molla di un tipo determinato, un allungamento (o accorciamento) fissato per ogni tratto di una certa lunghezza, qualunque sia la lunghezza totale a riposo della molla. Quanto agli altri parametri che concorrono a determinare, questa volta, l'allungamento relativo di una molla (materiale e sua lavorazione, sezione, spessore ...), più è ricco (e strutturato) l'insieme degli elastici-molle a disposizione, più ne possono essere individuati e discussi. È importante richiamare l'attenzione dei bambini sui due diversi tipi di *status* che questi parametri possono avere: alcuni corrispondono a "proprietà variabili con continuità" nelle molle (spessori, larghezze ...); altri a "proprietà discontinue" (materiali, tipi di lavorazione ...). Per i primi si possono costruire relazioni d'ordine diretto o inverso rispetto alle deformazioni, come per la lunghezza totale a riposo; per i secondi si possono operare classificazioni e poi ordinare, rispetto alla deformazione provocata da una stessa forza agente, le classi ottenute (per esempio un filo di caucciù, a parità di tutte le altre caratteristiche, si deforma più di un filo di acciaio. Comunque l'effetto complessivo sul comportamento delle molle dovuto all'insieme di tutti questi parametri può essere compendiato in un unico parametro (corrispondente nell'esempio del riquadro ad R): la "durezza" (o "rigidità"), che risulta per i bambini operativamente definita, seppure a livello semplicemente qualitativo.

2.8. Collegamenti di molle in serie ed in parallelo

Una volta che i ragazzi hanno costruito lo schema per descrivere ed interpretare il comportamento di una molla singola, riteniamo di grande importanza cognitiva sollecitarli ad approfondire l'indagine guidandoli nella costruzione di un modello interpretativo delle modalità di interazione con l'esterno di un sistema formato da due o più molle, collegate fra loro in modo opportuno. I due collegamenti fondamentali sono il collegamento *in serie* e quello *in parallelo* ma, ovviamente, si possono realizzare collegamenti misti qualsivoglia: serie in parallelo, a triangolo, a rete ... (fig. 2.7).

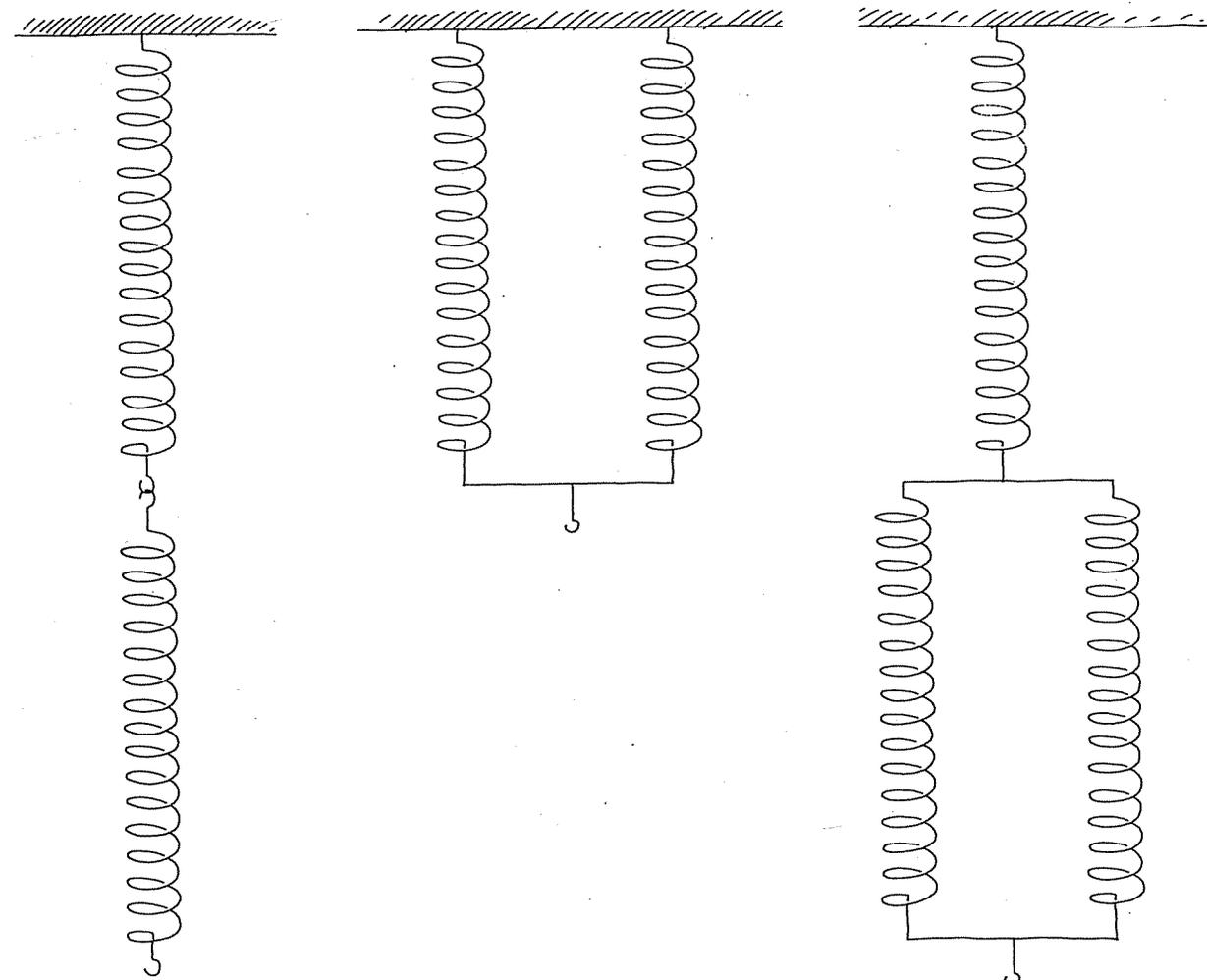
ATTIVITÀ

L'argomento può essere introdotto in classe chiedendo ai ragazzi di prevedere cosa succede quando si allungano due molle "attaccate una dietro l'altra" (in serie) oppure "messe una a fianco all'altra" (in parallelo). È opportuno far contemporaneamente vedere la situazione reale e uno schizzo disegnato alla lavagna. Al solito le domande devono essere abbastanza generiche per non fissare, a priori, l'attenzione dei ragazzi sull'una o l'altra variabile e permettere loro di esprimersi il più liberamente possibile su come vedono le situazioni presentate, così che l'insegnante possa verificare come essi spontaneamente correlano le variabili in gioco, e quali.

In generale le previsioni relative al collegamento in parallelo sono esatte, mentre quelle sul collegamento in serie sono in maggioranza sbagliate. Infatti il pensiero comune, infantile ed adulto, frequentemente interpreta le due situazioni ricorrendo allo stesso schema: la forza esterna applicata al sistema complessivo si distribuisce tra le varie molle componenti. (Per il collegamento in serie si usano anche altre espressioni, sostanzialmente con uno schema mentale sottostante identico: per esempio si dice che la forza si disperde lungo la catena di molle). Si prevede dunque che in entrambi i casi le singole molle si allungheranno di meno di quanto non si allungherebbero se ognuna di esse dovesse da sola, reagire all'azione delle sollecitazioni agenti sul sistema di cui fa parte. Questo modo di vedere risulta come già detto corretto per il collegamento in parallelo, ma errato per quello in serie.

Le attività che vengono proposte in questo paragrafo dovrebbero condurre i ragazzi innanzitutto alla esplicitazione dei loro schemi spontanei e successivamente ad un loro doppio confronto: *a)* con gli schemi generali già costruiti sulle interazioni di forza fra sistemi qualunque, in particolare sul comportamento delle molle; *b)* con i fatti sperimentali. Questo è tipico del procedere scientifico: una volta costruito un modello a partire dal comportamento di alcuni sistemi in determinate situazioni, si cerca di verificarne validità e limiti applicandolo in condizioni diverse da quelle di partenza. Si deduce cioè dal modello quale dovrebbe essere il comportamento di nuovi sistemi in nuove situazioni e si controlla se le previsioni corrispondono a quanto in effetti succede.

È però più facile che i ragazzi tendano a fare previsioni basandosi sulle loro idee intuitive che



a) collegamento in serie.

b) collegamento in parallelo.

c) collegamento serie-parallelo.

Figura 2.7 - Collegamenti di molle

Cosa succede quando viene attaccato uno stesso peso in a), in b) ed in c)? Cosa succede se le molle sono uguali o diverse?

N.B. In a) ed in c) bisogna tener conto anche dell'effetto dei pesi delle molle sottostanti, a meno che questi non siano "trascurabili" nei confronti dei pesi aggiunti.

non facendo riferimenti coerenti al modello che si sono già costruiti nel corso di tutte le attività precedenti: è noto che cambiare idee e rinunciare a schemi che si sono sedimentati nella mente nel corso degli anni non è facile. Non è, in generale, vero che una semplice esperienza è sufficiente a far "vedere" una discrepanza, a far prendere coscienza di un'incoerenza nelle proprie idee. Ciò che risulta evidente per una persona che sa già cosa guardare, molto spesso non lo è per un'altra, ragazzo o adulto che sia. Un'esperienza (l'attività sperimentale in generale) risulta d'altra parte significativa solo se lo scopo che con essa si vuole raggiungere è chiaro: e la

chiarezza non può che provenire dall'analisi e dalle riflessioni critiche che permettono di verificare la coerenza degli schemi con cui si interpretano fatti nuovi con i principi generali che sono stati costruiti, la cui validità è stata dimostrata, o si vuole dimostrare. Lo scopo dell'educazione scientifica non sta soltanto nel far scoprire nuovi fatti, ma anche nella scoperta di nuovi modi di vedere e di pensare su fatti già noti. È importante perciò ridiscutere e rielaborare in questo nuovo contesto gli schemi del fare forza e le regole delle forze già stabiliti e stimolare i ragazzi a confrontare gli schemi descrittivi da loro utilizzati nelle previsioni, nonché le conse-

guenze che da essi derivano, con i principi generali delle forze ed in particolare con la regola della simmetria.

Consideriamo dapprima il caso del collegamento in serie. Dopo che i ragazzi hanno fatto le loro previsioni, si deve dunque sollecitarli a discuterle utilizzando quanto già sanno sul comportamento delle molle. È opportuno servirsi di disegni alla lavagna. Quali che siano le situazioni immaginate (la catena di molle è tirata da due bambini; la catena di molle è attaccata ad un sostegno e tirata da un bambino; la catena di molle è agganciata ad un sostegno e all'altro estremo vi è attaccato un peso ...) se si considera l'intera catena come un sistema unico, si sa che esso deve esercitare ai due estremi forze uguali fra loro ed uguali alle forze esterne che si esercitano su di esso (le forze esercitate dai due bambini, o dal bambino e dal sostegno, o dal sostegno e dal peso ...). Passando poi a considerare la prima molla della catena, contigua da un lato al sistema esterno e dall'altro alla seconda molla della catena, si sa che, come qualunque molla deformata, essa deve esercitare e risentire ai due estremi forze uguali. Poiché ad un estremo la forza che si esercita su di essa è la forza esercitata dal sistema esterno, ne consegue che anche all'altro estremo essa deve risentire una forza eguale, cioè che la seconda molla deve esercitare anch'essa una forza eguale a quella esercitata dal sistema esterno. Lo stesso tipo di ragionamento può essere fatto via via per tutte le molle della catena, così che in definitiva si può stabilire, in base ai principi già noti, che la forza applicata alla catena di molle in serie si deve trasmettere inalterata dalla prima all'ultima molla e, quindi, non si suddivide e non si perde. Ne consegue che ogni molla deve subire un allungamento uguale a quello che si osserva quando è tirata da sola da quella stessa forza. Questa conclusione è generalmente in netto contrasto con le idee e le previsioni della maggioranza dei ragazzi e può generare e incredulità in molti di essi.

Viene sentita pertanto come necessaria una verifica sperimentale. Occorre dunque applicare prima ad una serie di molle, poi separatamente a ciascuna di esse, le stesse forze, e confrontare gli allungamenti che ogni molla subisce quando è inserita nella catena con quelli che subisce quando è da sola. Bisogna essere certi di applicare sempre la stessa forza e quindi non si può utilizzare la forza muscolare, non controllabile. Al solito, si può invece utilizzare

la forza-peso di un oggetto (che deve essere ovviamente scelto tenendo conto del tipo di molla con cui si lavora) e le esperienze vanno dunque fatte "attaccando lo stesso peso" alle molle singole ed alla serie.

Realizzando ad esempio le esperienze di scheda 2.7 si osserva che le molle subiscono in tutte e tre le situazioni considerate gli stessi allungamenti: risulta così confermato l'assunto inferito dai principi per via deduttiva, e vengono smentiti gli schemi più intuitivi su cui si basavano le previsioni dei ragazzi. D'altronde si può far notare che già altre esperienze davano informazioni concordi con quanto si è verificato. Se infatti la catena è fatta di molle tutte uguali fra loro, essa è praticamente identificabile con un'unica molla, dello stesso tipo e di lunghezza a riposo eguale alla somma delle lunghezze a riposo delle singole molle. Ognuna di esse può dunque essere vista come un tratto della molla complessiva, e già si era verificato (§ 2.7.) che tratti della stessa lunghezza di un'unica molla si allungano tutti della stessa entità per una data forza agente e che questo allungamento non dipende dalla lunghezza a riposo totale della molla, ma solo dalla lunghezza a riposo dei singoli tratti.

Ad una serie di molle si possono via via applicare pesi crescenti e si verifica che, ovviamente, la relazione d'ordine diretto forza-deformazione, la cui validità era stata stabilita per una molla singola, risulta valida anche nel caso di più molle in serie (vedi scheda 2.7 ultima frase dei bambini). Concludendo, attraverso le attività descritte i ragazzi giungono a stabilire i seguenti punti:

- la forza applicata ad una serie di molle si propaga inalterata lungo tutte le molle;
- una molla inserita in un sistema formato da molle in serie e sollecitato da forze agenti esterne, subisce una deformazione identica a quella che si riscontra se le forze esterne agiscono su di essa soltanto;
- la relazione d'ordine diretto tra entità delle forze agenti ed entità delle deformazioni è ancora valida;
- l'allungamento totale della serie di molle è uguale alla somma degli allungamenti parziali e quindi maggiore di quello di ogni singola molla;
- in particolare, se le molle sono uguali ed in numero di 2, 3, ..., n , l'allungamento totale è 2, 3, ..., n volte maggiore di quello che ognuna di esse subirebbe da sola.

Scheda 2.7 - La forza si trasmette inalterata attraverso le molle

Se l'azione di un peso P provoca un allungamento l_1 in una molla M_1 (a) ed un allungamento l_2 in una molla M_2 (b), applicando questo stesso peso alle due molle collegate in serie, i loro allungamenti non cambiano (c). La forza P si trasmette inalterata lungo la catena di molle.

N.B. Se le molle sono disposte in verticale, anziché in orizzontale, nella situazione (c) all'azione del peso P sulla molla M_1 , si aggiunge anche quella esercitata dal peso di M_2 . Di conseguenza, a meno che quest'ultimo non sia del tutto trascurabile rispetto a P , l'allungamento l_1 risulta un po' più grande che non nella situazione (a).

In (d) un momento dell'esperienza realizzata in classe: i bambini stanno usando come molle degli elastici da portabagagli e inizialmente tirano essi stessi le molle, agganciate alla maniglia della porta. Uno di loro valuta l'allungamento corrispondente a "tutta la forza" che il compagno riesce a fare, contando di quante mattonelle si è spostato l'estremo del sistema composto dalle due molle. Successivamente i bambini procedono in maniera più sistematica. Costruiscono vari sistemi con serie di molle diverse, e ogni volta attaccano lo stesso peso al sistema e poi singolarmente ad ognuna delle molle che lo compongono. Ecco alcune delle loro osservazioni conclusive:

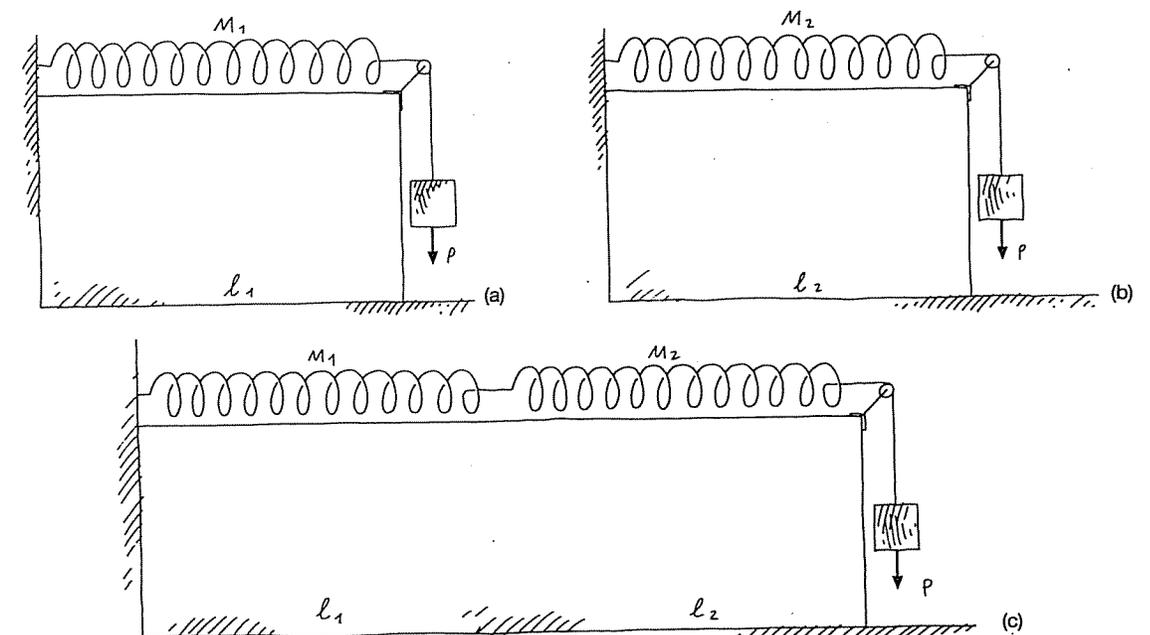
"Abbiamo attaccato il peso alle molle in serie e abbiamo visto che la molla di acciaio più dura si allunga lo stesso come si è allungata quando era da sola con lo stesso peso. Anche la molla morbida (cioè poco rigida) si è allungata lo stesso come si è allungata quando era da sola con lo stesso peso. L'allungamento di tutte e due le molle è uguale alla somma dei due allungamenti".

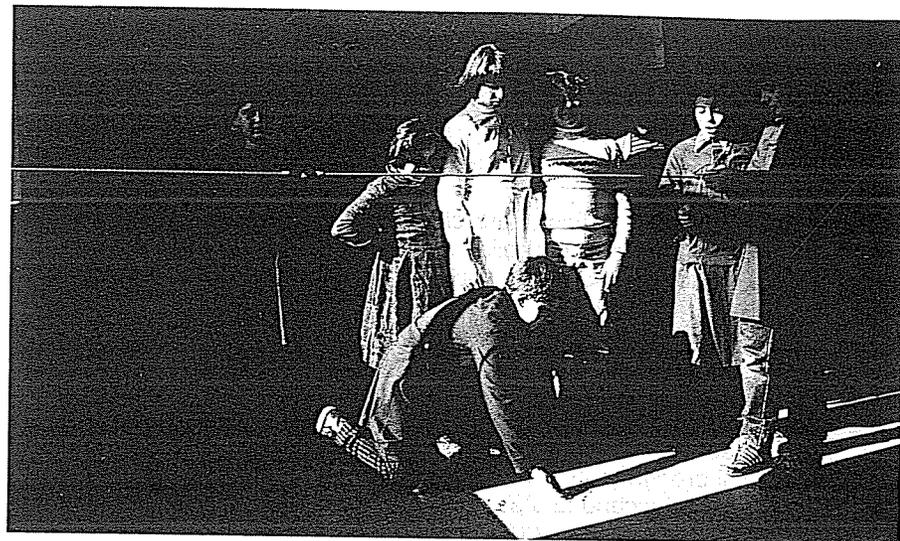
"Quando mettiamo il peso la molla di acciaio rigida si allunga poco, l'elastico giallo si allunga molto perché è morbido, il filo si allunga pochissimo. Non vediamo che si allunga, ma si allunga. Tutti si allungano come quando sono da soli ed attacchiamo lo stesso peso". (*)

"Le esperienze che abbiamo fatto ci hanno fatto capire che quando tiriamo due o molte molle messe in serie la forza che facciamo passa tutta quanta dalla prima all'ultima molla... ognuna si allunga come quando era sola e veniva tirata dalla stessa forza".

"Se facciamo più forza tutte e due le molle si allungano di più. Succede la stessa cosa di una molla sola".

(*) Questa frase è importante perché fa vedere come il bambino estrapoli al filo la cui lunghezza è apparentemente rimasta invariata, le leggi delle deformazioni. In questo caso la serie era formata da un filo di ferro, una molla d'acciaio rigida ed un elastico giallo.





C'è un altro aspetto sul quale ci si può soffermare: dato che una serie di molle si comporta, nel suo complesso, come un'unica molla (punti a, b, d), si può parlare di una "durezza" (o rigidità) di tutta la catena di molle nel suo complesso? Evidentemente sì, ma è difficile, se non impossibile, poter stabilire con dei ragazzi piccoli qual è la relazione fra questa durezza e la durezza delle singole molle.²² Tranne che in un caso particolare, ovviamente: se le molle sono tutte uguali (o meglio, tutte dello stesso tipo, anche se con lunghezze a riposo diverse) esse hanno tutte la stessa durezza specifica e questa è anche la durezza specifica dell'intera catena, dato che questa può essere vista come un'unica molla dello stesso tipo, con lunghezza a riposo maggiore. Se questo non è il caso, i ragazzi potranno invece arrivare a capire che la serie di molle ha in generale una "durezza" diversa dalla durezza delle singole molle che la costituiscono, ma da loro determinata, ed intermedia fra quella della molla più dura e quella della molla meno dura.

Le conclusioni su quanto avviene ad una serie di molle possono essere generalizzate ad una serie di oggetti qualunque, anche non elastici (pani di creta, spugne, palloni, sassi, scatole di vario tipo ...) disposti in una fila orizzontale²³ schiacciata ai due estremi (scheda 2.8). Si può constatare che qualunque siano le posizioni in cui vengono interposti nella serie i corpi a comportamento elastico, se si schiaccia in modo che uno qualunque di essi venga sempre deformato nello stesso modo (il che garantisce che su di esso si sta esercitando sempre la stessa

forza), anche le deformazioni degli altri restano sempre le stesse. Ciò significa che anche in queste situazioni non ci sono "depositi" di forze lungo la catena, che la forza si trasmette completamente da un oggetto all'altro e che ogni oggetto subisce una deformazione identica a quella che subirebbe se fosse sollecitato da solo.²⁴

ATTIVITÀ

²² Matematicamente la rigidità K dell'intera catena di molle è una combinazione lineare della rigidità $K_1 \dots K_n$ delle singole molle, esprimibile con la seguente relazione: $1/K = 1/K_1 + 1/K_2 + \dots + 1/K_n$. Consideriamo infatti due sole molle in serie. L'allungamento totale Δl è uguale alla somma degli allungamenti $\Delta l_1, \Delta l_2$ delle singole molle: $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$. La forza F applicata per ottenere l'allungamento Δl della catena è uguale a quella che occorre fare per allungare di Δl_1 e Δl_2 le singole molle. In formule $F = K \Delta l, F = K_1 \Delta l_1$ ed $F = K_2 \Delta l_2$, da cui si ha: $\Delta l = F/K, \Delta l_1 = F/K_1, \Delta l_2 = F/K_2$. Ricordando che $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ possiamo in definitiva scrivere $F/K = F/K_1 + F/K_2$, ossia $1/K = 1/K_1 + 1/K_2$ (valida, in realtà, per molle a comportamento lineare).

²³ Abbiamo parlato di una catena orizzontale (per esempio di oggetti appoggiati su un tavolo) per non avere, fra le forze di deformazione, le forze peso. Se infatti si forma con i vari oggetti non una fila orizzontale, ma una pila verticale, ogni oggetto risentirà del peso di tutti quelli ad esso soprastanti, che lo schiacciano fra loro stessi e la Terra. Di conseguenza più un oggetto si troverà in basso nella pila e maggiore sarà la forza che complessivamente agisce su di esso, anche se un'eventuale forza di schiacciamento esercitata direttamente dallo sperimentatore sulla pila si trasmetterà inalterata per tutta la serie di oggetti.

²⁴ Ciò è vero solo se sono trascurabili le altre interazioni con sistemi esterni, in particolare le forze di attrito scheda 2.8. Questo può essere ottenuto se gli oggetti invece che essere appoggiati ad una superficie orizzontale sono appesi tramite dei fili in modo da formare una fila (vedi scheda 2.8), oppure appoggiati su carrelli scorrevoli (per esempio pattini a rotelle).

Scheda 2.8 - E attraverso una catena di oggetti qualsiasi?

Se invece di una serie di molle si ha una serie di oggetti qualsiasi, sottoposta per esempio ad un'azione di compressione, è ancora vero che la forza sollecitatrice si trasmette inalterata lungo tutti gli elementi della catena. Bisogna però che la catena si possa considerare un sistema "isolato", cioè che siano trascurabili le sue interazioni con altri sistemi. Guardiamo per esempio la catena con cui stanno lavorando i ragazzi nelle foto: gli oggetti sono "schiacciati" fra la mano del bambino che spinge e il sasso in fondo alla catena, che si comporta come se fosse una parete fissa, grazie al forte attrito con il tavolo dovuto al suo peso (vedi Cap. III). Oltre alle forze di compressione agiscono sugli oggetti della catena le forze peso, le reazioni del tavolo ad esse, e le forze di attrito fra ogni oggetto ed il tavolo. Forze peso e reazioni si compensano esattamente e per di più agiscono in direzione perpendicolare alle forze di compressione, per cui non hanno effetti che ci riguardino. Le forze di attrito, invece, possono alterare la trasmissione delle forze di compressione lungo la catena, se non sono trascurabili. Supponiamo infatti per un momento che al posto della seconda spugna ci sia un altro sasso come quello in fondo alla catena: finché la forza con cui il bambino spinge si mantiene inferiore alla forza di attrito statico (vedi Cap. III) fra sasso e tavolo, si schiaccia solo la prima spugna, mentre il pallone resta inalterato. L'attrito sembra essere un "pozzo" per le forze: la forza esterna si ripartisce fra esso e gli oggetti che formano la catena. Per eliminare l'attrito si possono "appendere" gli oggetti a dei fili, così che siano ognuno contiguo al successivo; oppure metterli su "carrelli".



Si può richiedere ai ragazzi una controprova, per così dire, di quanto si è arrivati a stabilire, chiedendo loro quanta forza deve essere esercitata rispettivamente: a) se si vuole allungare di una certa quantità una catena di due molle uguali; e b) se invece si vuole allungare della stessa quantità una delle molle da sola.

Il modello già costruito dovrebbe aiutarli a dare la risposta corretta: quando le due molle sono collegate in serie si deve fare meno forza, perché costituiscono complessivamente una molla della stessa

durezza di ciascuna delle due molle singole e di lunghezza a riposo maggiore. Non è però detto che tutti arrivino a queste conclusioni: al solito ci possono essere risposte intuitive immediate basate su correlazioni non corrette (scheda 2.9). Anche in questo caso si possono far discutere ai ragazzi le diverse previsioni, sollecitandoli a servirsi degli schemi già acquisiti, per poi passare alle esperienze. Se si scelgono due molle abbastanza dure ci si può limitare a tirarle manualmente finché si allungano della quantità fissata, una volta attaccate insieme una dietro l'altra, una seconda volta da sole. Si po-

trà constatare percettivamente che quando sono collegate in serie si deve fare meno forza. Naturalmente le conclusioni raggiunte possono essere facilmente estese ad una catena formata da un qualunque numero di molle, anche diverse fra loro: si può facilmente verificare che per far allungare l'intera catena di un certo tratto si dovrà esercitare meno forza che per far allungare dello stesso tratto una qualunque parte della catena (formata da una o più molle).

Per finire vogliamo sottolineare due punti che ci sembrano importanti per capire le difficoltà cognitive dei ragazzi. In primo luogo le due situazioni (molla singola, collegamento in serie) non sono equivalenti: porre il problema di due o più molle in serie significa porre un problema concettualmente diverso da quello di una molla sola. Si tratta di capire come si comporta una parte di un sistema (la molla singola) conoscendo la forza che il sistema stesso esercita nella sua totalità. E per capire questo, come abbiamo visto, ci si può riferire alle regole delle interazioni tra sistemi sorgenti. In secondo luogo per un inquadramento completo del fenomeno sarebbe necessario considerare un'altra variabile non percettivamente evidente: l'energia.

Abbiamo detto, (Cap. I), che una molla deformata si "carica" di energia, e la quantità di energia dipende dalla entità della deformazione. Quando si deformano due o più molle in serie, si caricano tutte di energia: l'energia totale trasferita al sistema è perciò la somma delle energie trasferite alle singole molle. Mentre quindi la forza esercitata si trasmette inalterata da una molla all'altra e non si suddivide fra le singole molle, contrariamente alle previsioni più immediate, l'energia totale trasferita si suddivide tra di esse. E quindi un criterio generale è fondato, quello di non-equivalenza fra il comportamento di una molla singola e quello di tante molle in serie: che però è inappropriatamente tradotto nel giudizio intuitivo per cui "la forza esercitata si suddivide fra tutte le molle". In questo caso non è la forza la variabile adatta a esplicitare questa non-equivalenza, bensì l'energia: è vero infatti che, se le molle sono più di una, l'energia trasferita con la deformazione si suddivide fra tutte le molle che risultano tutte cariche. Alla fine questo aspetto non può in realtà essere completamente approfondito dai bambini all'interno delle attività suggerite in questa nostra proposta. Al più ne può eventualmente accennare l'insegnante, per esempio facendo notare che lo stesso peso applicato ad una serie di molle si abbassa di più che non se è applicato ad una molla

sola, e che a questo spostamento maggiore del peso è legato un trasferimento maggiore di energia a parità di forza, (energia potenziale gravitazionale che si trasforma in energia potenziale elastica): da tante molle cariche si può riottenere più lavoro che non da una.

Passiamo ora a considerare il caso del collegamento di molle in parallelo. Abbiamo già detto che lo schema intuitivo generalmente porta i ragazzi a fare in questo caso previsioni che risultano esatte. Infatti se si ammette che la forza esterna applicata ad un sistema formato da più molle si distribuisce fra le molle componenti, se ne deduce che ogni singola molla deve essere tirata ai suoi estremi da una forza minore di quella applicata a tutto il sistema. Ci si attende quindi che la deformazione indotta in ogni molla debba essere minore di quella che si produrrebbe in essa se fosse sollecitata da sola dalla stessa forza che è applicata a tutto il sistema. D'altronde esistono esperienze quotidiane tra le più diffuse che sono in accordo con questi ragionamenti: tutti sanno che se un oggetto pesante viene trasportato da due persone "il peso si suddivide", cioè ognuno deve fare uno sforzo minore che se fosse da solo.

Abbiamo già detto che l'argomento può essere introdotto in classe mediante domande di previsione sul comportamento di due molle uguali in parallelo: come per il caso delle molle in serie è opportuno che l'insegnante solleciti i ragazzi a dar ragione delle loro previsioni utilizzando il modello generale costruito per le azioni di forza tra sistemi.

Questa volta basta quanto si è ricavato dallo studio del collegamento in serie per dare una spiegazione immediata, in accordo con le previsioni: poiché la forza applicata ad un sistema si trasmette inalterata attraverso di esso, ai due capi del sistema formato dalle due molle si deve risentire una forza eguale alla forza totale esercitata dall'esterno, quale che sia il modo in cui viene esercitata (attraverso, rispettivamente, un peso ed un sostegno; o due bambini che tirano dalle due estremità...). Pertanto la somma delle forze che sollecitano singolarmente le due molle deve essere uguale alla forza totale esterna applicata.²⁵

²⁵ L'adozione della configurazione in parallelo è d'altronde naturale ogni qualvolta si voglia ottenere una forza totale maggiore delle singole forze a disposizione: se, ad esempio, si deve spingere in due o tre persone un'automobile il cui motore non parte, ci si mette a spingere "uno di fianco all'altro".

Scheda 2.9 - Ancora sul comportamento di un sistema di molle collegate in serie

In uno schizzo alla lavagna sono state rappresentate due molle, M_1 ed M_2 , collegate in serie (vedi figura). Si chiede ai bambini se secondo loro la forza necessaria a far allungare tutto l'insieme di una certa quantità deve essere uguale, maggiore o minore della forza necessaria a far allungare di quella stessa quantità una sola delle due molle.

Ecco alcune risposte dei bambini:

"Bisogna fare molta forza perché le molle sono due".

"Se le molle sono uguali dobbiamo fare forza doppia".

"La molla M_2 si allunga prima della molla M_1 , e l'allungamento è maggiore [di quello, n.d.A.] della molla M_1 ".

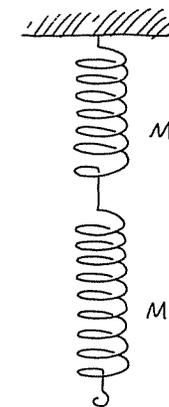
"Quando mettiamo insieme due molle così [in serie n.d.A.] e allunghiamo di quattro mattonelle, la forza è uguale a quella di una sola molla [cioè a quella che si deve fare per allungare di quattro mattonelle una sola delle molle, n.d.A.]. Perché una molla si allunga di due mattonelle e l'altra si allunga di due mattonelle, quindi allungandosi di quattro si compie la stessa forza. Anche se ne mettiamo ancora di più [di molle, n.d.A.] la forza è sempre la stessa".

Le prime due frasi evidenziano l'errore più diffuso, cioè la previsione che tanto più grande è il numero di molle, tanta più forza ci vuole per ottenere un certo allungamento. Nella terza frase si immagina che avvenga sia una propagazione in tempo finito della forza, a partire dall'estremità che viene tirata, sia probabilmente un progressivo "indebolimento" della forza trasmessa: la molla M_2 si allunga *prima e di più*. In realtà a meno di non avere serie molto molto lunghe il tempo di propagazione è inavvertibile, così che la trasmissione della forza sollecitatrice a tutta la serie può essere considerata istantanea a tutti gli effetti pratici. Infine la quarta frase evidenzia un collegamento diretto forza sollecitatrice-deformazione: una certa forza provoca una deformazione totale definita, quale che sia il numero di molle che formano la serie, quindi la lunghezza complessiva del sistema. Gli "errori" sono tutti in contrasto con le proprietà già scoperte per il comportamento di un'unica molla.

Alle previsioni, ed alla loro discussione, segue l'esperienza. Questa volta è più che sufficiente lavorare con la forza muscolare, perché la differenza fra le due situazioni (le molle collegate in serie, ogni molla da sola) è percettivamente evidente. I bambini usano due lunghi elastici da portabagagli e cercano di ottenere nei due casi l'allungamento di "quattro mattonelle" da cui si era partiti come esempio. Ecco due frasi che sintetizzano bene le loro conclusioni:

"Abbiamo prima allungato le due molle da sole di quattro mattonelle e abbiamo fatto una certa forza. La forza che abbiamo fatto quando abbiamo allungato le due molle in serie di quattro mattonelle è minore perché mettendone due ogni molla si allunga di meno e la forza diminuisce".

"Se mettiamo molte molle in serie e vogliamo allungarle di quattro mattonelle la forza che dobbiamo fare è piccolissima perché ogni molla si allunga molto poco e la forza diminuisce".



Evidentemente alla fase di previsione e discussione deve seguire una fase di controllo sperimentale in cui si applica lo stesso peso una volta ad un parallelo di due molle identiche, un'altra volta ad una sola delle due, e si confrontano gli allungamenti che le molle subiscono nei due casi (fig. 2.8). Conviene ripetere la prova per più coppie di molle di tipo diverso e per più valori del peso.

ATTIVITÀ

Si ha così la conferma delle aspettative, coerentemente con lo schema interpretativo adottato: la forza-peso P applicata a due molle in parallelo provoca in ognuna delle due deformazioni minori di

quelle che produce quando agisce su di esse separatamente e questo qualunque sia il tipo di molle utilizzato ed il valore del peso P (beninteso purché questo sia interno all'intervallo per cui si ha un comportamento elastico delle molle).²⁶

C'è da attendersi che i ragazzi nelle loro previsioni non si limitino solo a giudizi qualitativi, ma

²⁶ Quasi sempre ci si trova davanti a una "sovradeterminazione formale" dell'esperienza: se le due molle in parallelo sono uguali, si tende a dire che "si devono allungare della metà". Questa previsione, analoga a quella che un peso doppio "deve" allungare del doppio la stessa molla, è basata su una presunzione di "linearità" di cui discuteremo più avanti.

diano valutazioni quantitative sull'entità degli allungamenti delle molle singole rispetto a quelli delle molle in parallelo. È probabile che la maggior parte di essi si attenda che due, tre molle identiche in parallelo si allungino o accorcino esattamente della metà, di un terzo, di quanto fanno singolarmente con la stessa sollecitazione esterna: alcuni giudizi di questo tipo, ottenuti nella classe sperimentale, sono riportati in scheda 2.10. (Anche per il collegamento in serie può verificarsi la stessa cosa: vedi per esempio la seconda frase in scheda 2.9). Il comportamento previsto non corrisponde generalmente a quello che succede: si verifica, infatti, solo

se le molle usate hanno un comportamento lineare (come ad esempio le molle elicoidali di acciaio). È importante che i bambini possano sperimentare anche con molle che non hanno questo tipo di comportamento (per esempio gli elastici da portabagagli), perché così si ha modo di affrontare un aspetto molto importante dell'educazione scientifica, aspetto che approfondiremo nel prossimo paragrafo.

Ci sono invece altre previsioni quantitative che possono essere sollecitate da domande opportune e confortate dalla verifica sperimentale. Si può chiedere ai bambini che forza si deve

ATTIVITÀ

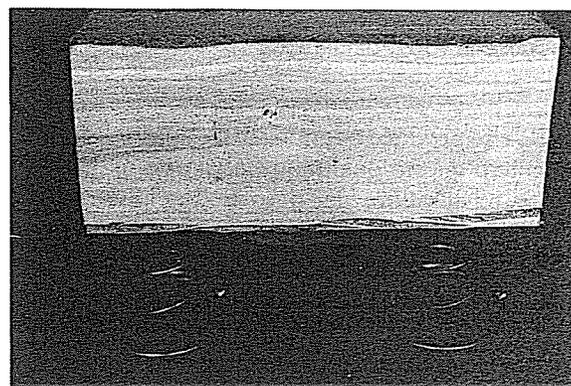
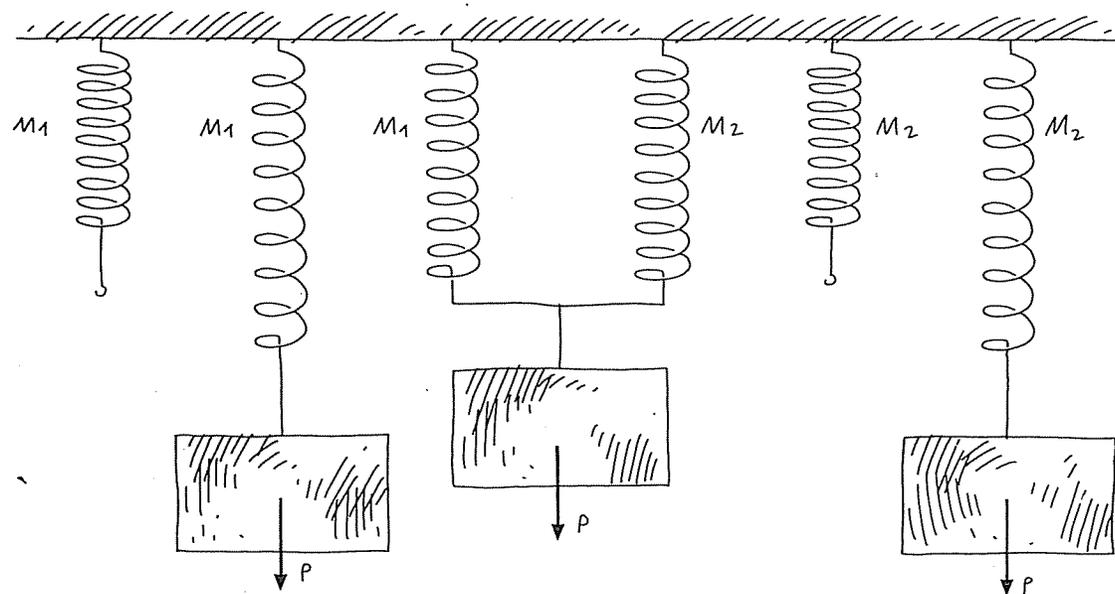


Figura 2.8 - Le forze si distribuiscono fra le varie parti collegate in parallelo di un sistema complesso

La forza peso del blocco provoca nelle due molle, M_1 ed M_2 , collegate in parallelo, deformazioni di entità minori di quelle che produce quando agisce su M_1 ed M_2 separatamente. Quando sono collegate in parallelo le molle sono deformate rispettivamente dalle forze F_1 ed F_2 , tali che $F_1 + F_2 = P$.

Nelle foto, due situazioni di collegamento in parallelo su cui hanno lavorato i bambini.

ATTIVITÀ

applicare ad una molla da sola, perché si allunghi tanto quanto si allunga se è collegata in parallelo con altre molle, una, due o tre, identiche ad essa.²⁷

La maggioranza dei bambini si attenderà che la deformazione prodotta nella molla singola disposta in parallelo con altre sia uguale a quella che si ottiene se su di essa da sola agisce la metà, la terza parte della forza totale applicata; in particolare la metà, la terza parte ecc. del peso, se è la forza-peso di un oggetto a tendere le molle singole ed il sistema in parallelo (scheda 2.10). Infatti, se la forza totale applicata ad un sistema di molle in parallelo si suddivide fra di esse e se le molle sono tutte uguali ed in numero di n , pure ragioni di simmetria portano a prevedere che la forza che ognuna di esse risente è uguale alla forza totale agente sul sistema divisa per n .

Anche questa previsione può essere facilmente verificata, pur di avere la possibilità di utilizzare pesi che siano multipli successivi del peso più piccolo: è bene avere tanti oggetti identici, così da poterli usare o singolarmente per far allungare una sola molla, o simultaneamente in numero di due, tre, quattro o più per far allungare sistemi formati da due, tre, quattro ... molle in parallelo. Se si esegue l'esperienza si constata che effettivamente gli allungamenti delle molle in queste condizioni restano costanti²⁸ (fig. 2.9).

ATTIVITÀ

A questo punto i bambini sono in grado di costruire dei "misuratori di forza", in unità arbitrarie

²⁷ Notare che la differenza fra questa situazione e quella precedentemente discussa talvolta è poco compresa.

²⁸ In realtà affermare che metà oggetto pesa la metà di un oggetto intero e che, perciò, due oggetti uguali riuniti hanno peso doppio, vuol dire assumere che la forza gravitazionale che attrae due oggetti uguali sia doppia di quella che attrae uno solo di essi, ossia che il campo gravitazionale sia additivo. I ragazzi danno invece a questo assunto, inconsapevolmente ed intuitivamente un valore di verità assoluta. In effetti la sensazione dello sforzo muscolare che sentiamo soppesando due oggetti uguali singolarmente e poi insieme ci dà un conforto al riguardo. Non è però una prova convincente, perché la sensazione di sforzo non è quantificabile. Una prova quantitativa ci è invece data dall'uso di una bilancia a braccia uguali. In effetti, appoggiandovi (od appoggiandovi) ad un estremo due oggetti di uguale volume di un dato materiale ed all'altro estremo un unico oggetto dello stesso materiale e di volume doppio, si ha equilibrio. Pure ragioni di simmetria e la constatazione del fatto che si ha equilibrio anche quando ai due estremi sono posti oggetti identici, consentono di affermare che "i pesi si addizionano".

ma con calibrazione assoluta. Poiché le forze in parallelo si addizionano e poiché ad allungamenti uguali di molle identiche corrispondono forze uguali, se una molla singola deformata di una certa quantità fa una certa forza, due o tre molle ad essa identiche, collegate in parallelo e deformate come le molle singole, fanno una forza doppia o tripla.

Per costruire un misuratore di forze si può dunque operare in questo modo. Si prende un gruppo di molle identiche²⁹ e si definisce come unità di forza la forza che allunga una di esse di una quantità standard, per es. 5 cm. Si sceglie poi un'altra molla che dovrà costituire il misuratore di forza e si procede così (fig. 2.10):

- si collegano in serie il misuratore ed una delle molle del gruppo e si tendono finché quest'ultima è arrivata all'allungamento standard. Si misura l'allungamento corrispondente del misuratore l_1 . Poiché le molle sono in serie, su ognuna di esse si esercita la stessa forza; poiché la molla del gruppo è allungata della quantità standard, questa forza è proprio la forza unitaria. Pertanto l'allungamento l_1 del misuratore corrisponde a una forza unitaria;

- si pone poi il misuratore in serie con un parallelo di due delle molle del gruppo, si tende il sistema finché le molle in parallelo sono allungate della quantità standard e si misura l'allungamento del misuratore l_2 . Per le proprietà del collegamento in serie la forza che si esercita sul misuratore è uguale a quella che si esercita complessivamente sul parallelo delle due molle del gruppo, che a sua volta per le proprietà del collegamento in parallelo è eguale alla somma delle forze che si esercitano sulle molle che lo compongono e dunque, in questo caso, a due unità di forza;

- si sostituisce il parallelo di due molle dapprima con uno di tre, poi di quattro, cinque ... molle, ogni volta si tende tutto il sistema, finché le molle in parallelo hanno raggiunto l'allungamento standard e si misura l'allungamento corrispondente del misuratore ($l_3, l_4, l_5 \dots$). Si può continuare fino a quando non si rischia di uscire dall'intervallo in cui il misuratore si

ATTIVITÀ

²⁹ L'uguaglianza delle molle si può provare collegandole in serie (orizzontalmente, scheda 2.7) e tirandole con forze diverse. Se le molle in serie sono uguali subiscono deformazioni fra loro uguali, qualunque sia la forza con cui vengono tirate.

Scheda 2.10 - "Cosa succede se con una stessa forza tiriamo due molle separatamente, poi tutte e due insieme collegate in parallelo?"

Ecco le previsioni dei ragazzi:

"Quando ci sono due molle una a fianco all'altra [in parallelo, n.d.A.] e si tirano con la stessa forza che facciamo tirando una sola, ogni molla si allunga di meno, perché una parte [della forza, n.d.A.] va ad una molla e un'altra all'altra molla. Se attacchiamo un peso proprio in mezzo, ad ogni molla va metà del peso".

"Se mettiamo due molle uguali insieme in parallelo e le tiriamo con la stessa forza che facciamo tirando una sola o attacchiamo lo stesso peso sotto, ogni molla si allunga della metà di quanto viene tirata da sola... Ogni molla si allunga come quando attacchiamo metà del peso ad una sola".

"Secondo me se allunghiamo due molle uguali in parallelo di una mattonella la forza aumenta il doppio di una sola molla allungata di una mattonella". (Il ragazzo, da solo, passa ad esaminare la situazione complementare: che forza ci vuole per far allungare il parallelo quanto una molla da sola?).

"Se mettiamo tre molle uguali in parallelo la forza che fanno le tre molle è tre volte più grande di quando allunghiamo di una mattonella una sola".

"Se attacchiamo ad ogni molla metà oggetto, la molla si allunga come quando attacchiamo a due molle uguali l'oggetto intero".

Ed ecco ora le conclusioni dei ragazzi, dopo che sono state realizzate esperienze con le molle in parallelo deformate dai ragazzi stessi o da pesi opportuni.

"Abbiamo visto che quando tiriamo due molle in parallelo con la stessa forza che facciamo per tirarne una sola ogni molla si allunga di meno e perciò viene tirata da una forza minore... avevamo ragione... questo succede quando uno di noi tira le molle da sole ed in parallelo con la stessa forza e quando attacchiamo lo stesso peso [alle molle singole e al sistema parallelo, n.d.A.]".

"Abbiamo preso due molle per auto con la stessa lunghezza; prima abbiamo attaccato a una e poi all'altra il secchio con la sabbia dentro e abbiamo visto di quanto si sono allungate con uno spago, poi le abbiamo messe in parallelo e abbiamo attaccato il secchio e abbiamo visto che si sono allungate di meno, ma non la metà come credevamo. La stessa cosa è successa con due molle di camera d'aria e con le molle gialle (elastici per alimenti), solo quando abbiamo messo le molle di acciaio in parallelo e abbiamo attaccato lo stesso peso, abbiamo notato che l'allungamento era metà".

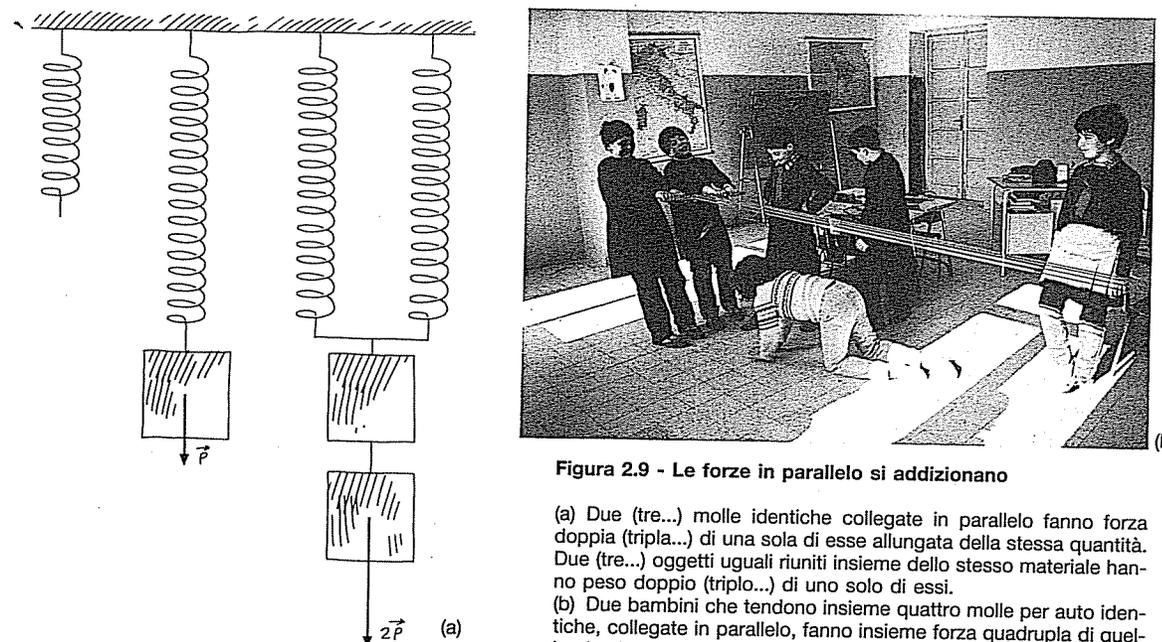


Figura 2.9 - Le forze in parallelo si addizionano

- (a) Due (tre...) molle identiche collegate in parallelo fanno forza doppia (tripla...) di una sola di esse allungata della stessa quantità. Due (tre...) oggetti uguali riuniti insieme dello stesso materiale hanno peso doppio (triplo...) di uno solo di essi.
- (b) Due bambini che tendono insieme quattro molle per auto identiche, collegate in parallelo, fanno insieme forza quadrupla di quella che farebbero per tendere della stessa quantità una sola delle molle.

comporta in maniera elastica. Ad ogni allungamento l_i del misuratore corrisponderà una forza i volte maggiore della forza unitaria, che sarà riportata in una opportuna tabella.

L'insieme della molla-misuratore e della tabella in cui sono segnati i suoi allungamenti, in corrispondenza della forza unitaria e dei suoi multipli, costituisce il nostro strumento di misura delle forze. Basterà infatti applicare alla molla-misuratore una forza sconosciuta (per esempio appendervi un oggetto di cui si vuole conoscere il peso nelle nostre unità di forza) e vedere di quanto si allunga: se l'allungamento coincide con uno dei valori della tabella (per esempio il quarto) la forza sarà un multiplo esatto della forza unitaria (nell'esempio, sarà eguale a quattro volte la forza unitaria). Se invece è intermedio fra due valori della tabella si potrà solo dire che il valore della forza è compreso fra i due valori corrispondenti ai valori dell'allungamento che, nella tabella, sono rispettivamente immediatamente minore e immediatamente maggiore di quello ottenuto.

ATTIVITÀ

Se si fa l'esperienza in classe, i ragazzi tenderanno ad apprezzare anche frazioni della forza unitaria: per esempio a dire che se l'allungamento del misuratore sottoposto ad una forza sconosciuta è esattamente a metà fra quelli corrispondenti a due multipli successivi della forza unitaria, allora anche la forza da misurare è a metà fra questi due multipli. Di nuovo, questo è vero solo in casi particolari, e cioè se il nostro misuratore è una molla lineare, e questo ci riporta al problema che tratteremo nel prossimo paragrafo.³⁰

Ci sono ancora due punti da affrontare, per quanto riguarda il collegamento di molle in parallelo: cosa si può dire della "durezza" complessiva del sistema che esse costituiscono e cosa si può dire dell'energia che questo sistema è in grado di immagazzinare come energia di deformazione elastica.

Riguardo al primo punto si possono far svolgere ai ragazzi alcune attività. Essi possono

³⁰ L'esigenza di "inventare sottomultipli" dell'unità di forza può essere assecondata con due tipi di operazioni convergenti: a) scegliere molle-campione più "morbide"; b) assumere che per "piccole" differenze di forza, la suddivisione lineare degli intervalli singoli sia ragionevole. Notare che la "morbidezza" della molla unità è vincolata in pratica alla massima forza che si intende misurare.

confrontare diversi sistemi costituiti ognuno da uno stesso numero di molle collegate in parallelo e tali che le molle di tutti i sistemi siano lunghe uguali, le molle di ogni sistema siano tra loro identiche, ma le molle di sistemi diversi abbiano "durezze" diverse. Per confrontare questi sistemi basta collegarli in serie e sottoporli a qualche sollecitazione esterna (fig. 2.11).

ATTIVITÀ

I ragazzi possono così constatare che l'allungamento delle molle più rigide è sempre minore dell'allungamento delle molle meno rigide, come c'era da attendersi. Un'altra esperienza consiste nel mettere in parallelo molle della stessa lunghezza a riposo e di durezza diversa e nel sollecitarle con una forza esterna: poiché subiranno lo stesso allungamento (fig. 2.11), sarà evidente da quanto già si sa sulla durezza delle molle che la forza totale agente si distribuisce fra le molle in ragione diretta della loro rigidità: agisce più forza sulle molle più rigide e meno forza su quelle meno rigide. Il fatto già noto che una molla sottoposta da sola ad una data forza si allunga di più di quando fa parte di un sistema in parallelo sollecitato dalla stessa forza, indica infine che un sistema di molle in parallelo ha complessivamente una durezza maggiore di quella di ognuna delle molle che lo compongono, durezza evidentemente dipendente da tutte le "durezze" delle molle singole.³¹

Per quanto riguarda l'energia osserviamo, come per il collegamento in serie, che l'energia totale trasferita dal sistema esterno al parallelo di molle si distribuisce fra le diverse molle che lo compongono, dato che ognuna di esse viene deformata. Si può fare un confronto fra la situazione in cui le stesse molle sono messe in serie e quella in cui sono messe in parallelo. Si può operare a parità di forza esterna applicata al sistema (per esempio applicando ai due sistemi lo stesso peso) e si ottiene che il sistema in serie immagazzina nel complesso più energia che non il sistema in parallelo (il peso si abbassa di più nel primo caso che non nel secondo, vedi fig. 2.12). Si può anche operare a parità di energia (per esempio facendo in modo che siano uguali i prodotti fra l'allungamento complessivo di ognuno dei sistemi e

³¹ La durezza K del sistema di molle in parallelo è correlata con le durezze K_1, K_2, \dots, K_n delle singole molle dalla relazione $K_1 + K_2 + \dots + K_n = K$, che si ricava dalle relazioni $F_{tot.} = F_1 + F_2 + \dots = F_n, F_1 = K_1 \Delta l, F_2 = K_2 \Delta l, \dots, F_n = K_n \Delta l$, ponendo $F_{tot.} = K \Delta l$. Al solito queste relazioni sono valide solo per molle lineari.

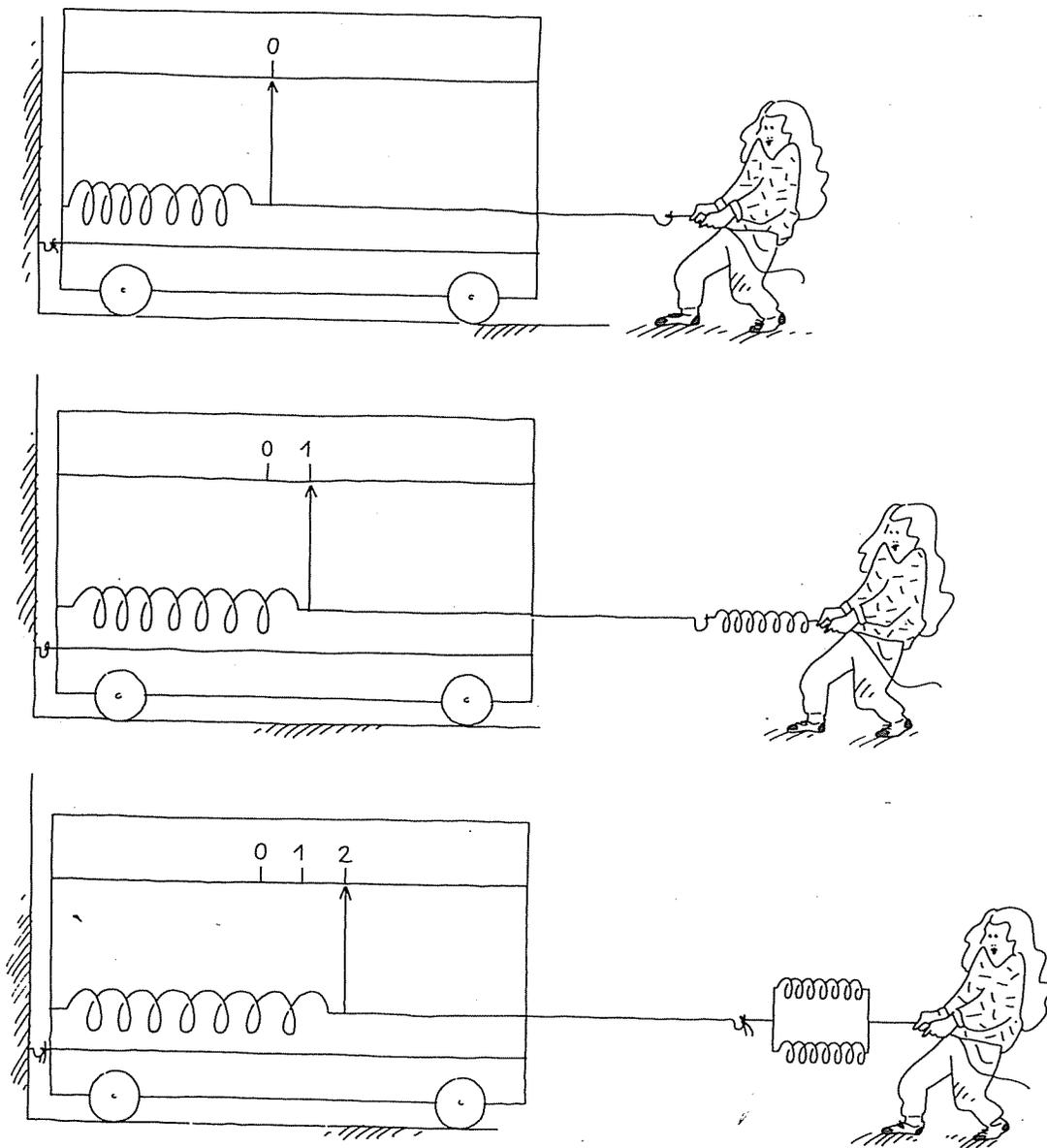


Figura 2.10 - Costruzione di un dinamometro

La molla sul carrellino costituisce il dinamometro. Si deve tararla incidendo sulla scala le tacche corrispondenti agli allungamenti subiti dalla molla quando è soggetta ad una forza unitaria ed ai suoi multipli. Scelta come forza unitaria quella che provoca un allungamento standard in una molla campione, basta collegare in serie il dinamometro successivamente con 1, 2, 3... molle campione collegate fra loro in parallelo e ogni volta tirare finché queste ultime sono tutte allungate della quantità standard.

Ad ogni nuova posizione raggiunta dall'indice collegato all'estremo della molla corrisponderà una nuova tacca da incidere sulla scala.

il peso che lo provoca, vedi fig. 2.12), e si trova, ovviamente, che il peso da applicare al sistema parallelo deve essere maggiore. È lo stesso che confrontare due molle di durezza diversa: quella più dura immagazzina, a parità di forza deformante, meno energia di quella meno dura. Di nuovo, non ci si può aspettare di poter approfondire con i ragazzi

questi aspetti, ma è importante che essi siano chiari per l'insegnante: il fatto che il rapporto fra le forze che un sistema è in grado di esercitare e l'energia che è in grado di immagazzinare (o trasferire) dipenda dalle caratteristiche del sistema stesso (Cap. I, § 1.7.) è un fatto fondamentale in tutte le applicazioni tecnologiche. Un semplice esempio ci

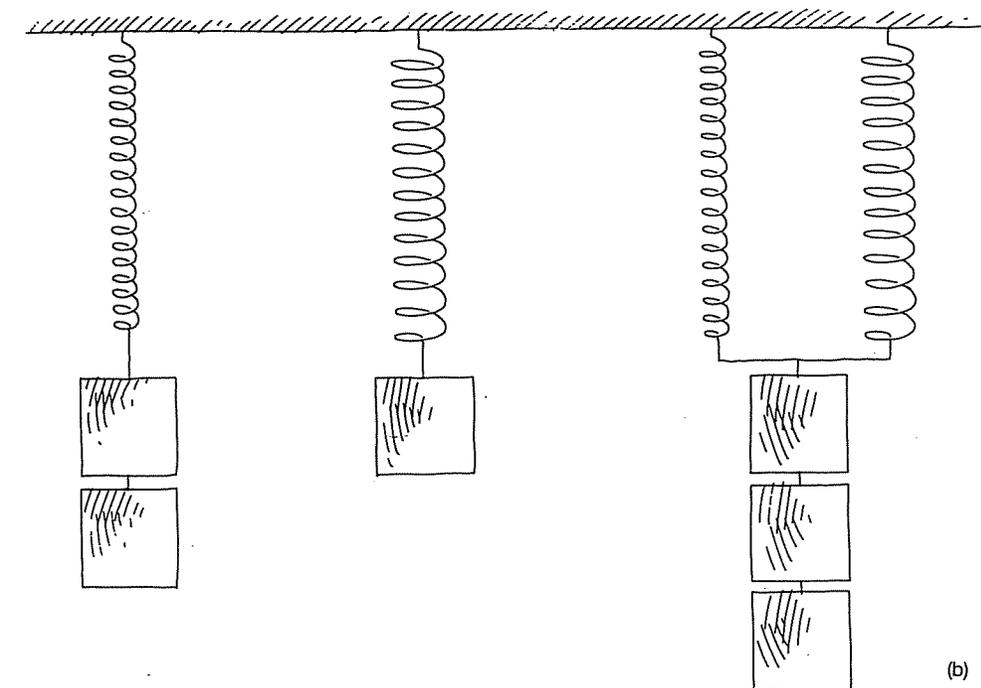
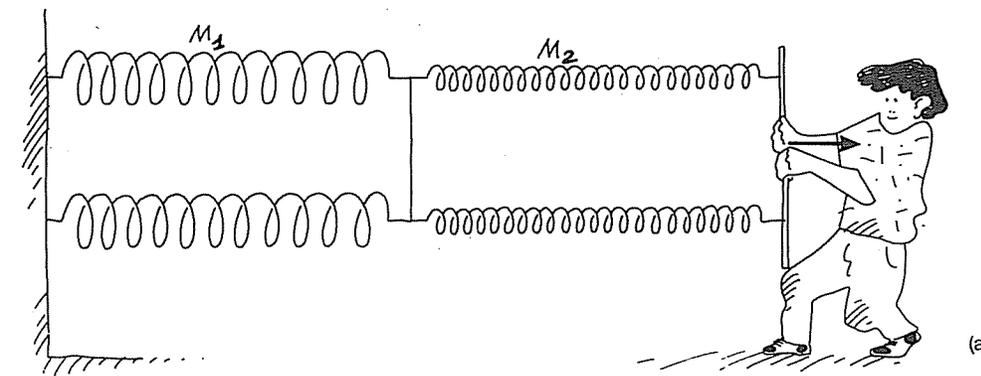


Figura 2.11 - "Durezza" di un sistema di molle in parallelo

Le molle M_1 e le molle M_2 hanno la stessa lunghezza a riposo e durezza diversa: le molle M_1 hanno durezza minore delle molle M_2 .

(a) Collegando in serie i due sistemi formati rispettivamente dalle due molle M_1 e dalle due molle M_2 collegate in parallelo, ed esercitando una forza di trazione sul sistema complessivo, si vede che le molle M_1 si allungano più delle molle M_2 . La durezza di un sistema di molle in parallelo è tanto maggiore quanto lo è la durezza delle singole molle che lo compongono.

(b) Se vogliamo allungare le molle M_1 e M_2 della stessa quantità Δl , dobbiamo applicare ad M_2 una sollecitazione esterna maggiore che non ad M_1 . Si verifica che collegando M_1 ed M_2 in parallelo il sistema complessivo si allunga anch'esso di Δl se gli viene applicata una sollecitazione eguale alla somma delle sollecitazioni che devono essere applicate ad M_1 ed M_2 singolarmente. Si osserva che in un parallelo la forza totale esterna si ripartisce fra le molle che lo compongono in ragione diretta della loro durezza.

è dato dalla molla di un'automobilina-giocattolo: essa sarà relativamente tanto meno "dura" quanto più quello che interessa è che il movimento duri a lungo (quindi che ci sia energia sufficiente per compensare a lungo le perdite per attrito) e non piuttosto che si raggiunga immediatamente una velo-

cià elevata (quindi che ci sia una forza di intensità sufficiente a provocare una forte accelerazione iniziale).

Tornando ai ragazzi, le conclusioni cui possono giungere attraverso le attività con i sistemi di molle in parallelo sono che:

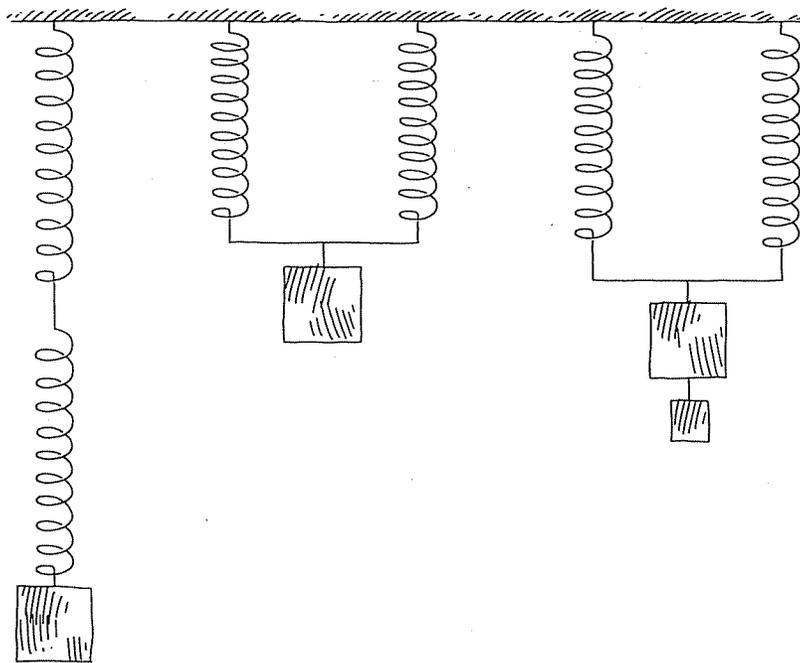


Figura 2.12 - L'energia nel sistema in serie e nel sistema in parallelo

Applicando lo stesso peso alle stesse due molle, collegate una volta in serie (a) ed un'altra in parallelo (b), si osserva che l'allungamento delle molle è maggiore se il collegamento è in serie. Il sistema in serie immagazzina più energia, a parità di forza, del sistema in parallelo. Viceversa, se si vuole ottenere lo stesso immagazzinamento di energia, cioè lo stesso allungamento delle molle, si deve applicare al parallelo (c) un peso maggiore che non alla serie (a). Più una molla è dura, meno energia immagazzina a parità di forza.

- a) la forza esterna si distribuisce tra le varie molle, in accordo con le previsioni;
- b) la somma delle forze che sollecitano le varie molle è uguale alla forza totale applicata al sistema complessivo, in accordo con il principio verificabile che la forza totale si trasmette inalterata lungo l'intero sistema di molle;
- c) la forza esterna si distribuisce fra le molle in relazione alla loro rigidità: più la molla è rigida, più è grande la parte di forza che si propaga attraverso di essa e viceversa;
- d) due, tre ... molle identiche in parallelo fanno una forza doppia, tripla ... della molla singola, per deformazioni uguali;
- e) la relazione d'ordine tra forza e deformazione stabilita per la molla singola e per le molle in serie è valida anche per le molle in parallelo.

A questo punto è possibile anche far discutere i ragazzi su sistemi complessi formati da composizioni miste di molle in serie e molle in parallelo effettivamente realizzate, o semplicemente illustrate, nell'intento di ricostruire il modo in cui si distribuisce e si trasmette all'interno di questi sistemi la forza agente esterna (vedi alcuni esempi in fig. 2.13). In particolare, si possono preparare schede di controllo con esercizi di questo genere.³² Generalmente è importante costruire le schede in modo che i ragazzi siano lasciati il più possibile liberi nella scelta del

modo di rispondere e che siano incoraggiati a dare risposte anche lunghe e complesse, se lo ritengono necessario. Questo permette infatti di potersi rendere conto dei meccanismi cognitivi e delle conoscenze che li guidano a costruire le risposte, giuste o sbagliate che esse siano, e quindi permette di stabilire qual è il tipo di intervento didattico più adatto da far seguire, sia a livelli di singoli alunni che a livello di classe.

2.9. Dal qualitativo al quantitativo: la forma della dipendenza funzionale fra deformazioni e forze

Tutti i problemi affrontati finora si possono risolvere limitandosi a descrivere il comportamento elastico con semplici relazioni d'ordine e ciò richiede al più di eseguire delle operazioni di confronto fra lunghezze e forze sufficienti a stabilire giudizi del tipo "più", "meno", "uguale".

Abbiamo visto che i bambini stessi tendono però a stabilire relazioni quantitative, identificando

³² Com'è ovvio, questo può essere fatto in qualunque tappa del percorso didattico, qualunque sia il tema affrontato. Si possono in particolare approntare sistematicamente schede di "previsione", prima di eseguire le esperienze, e basarsi sui loro risultati sia per aprire le discussioni in classe sia per valutare il livello di comprensione raggiunto complessivamente.

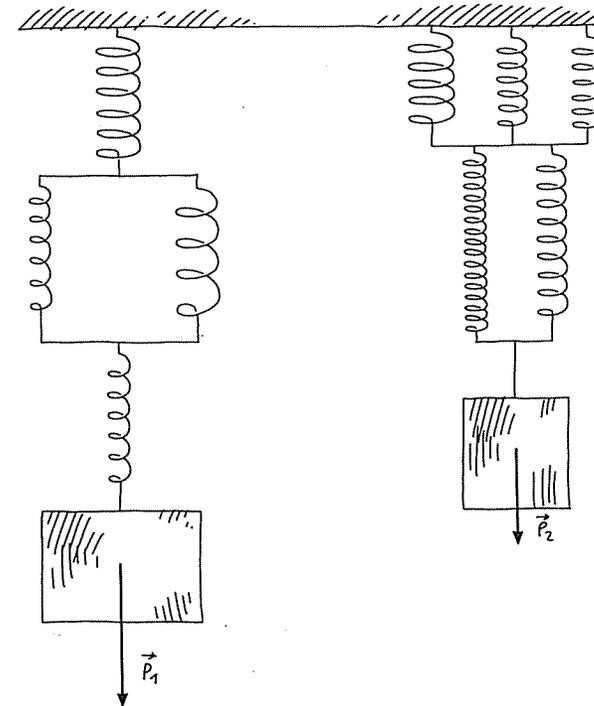


Figura 2.13 - Come si distribuiscono i pesi P₁ e P₂ fra le varie molle?

spesso una semplice relazione d'ordine diretto con una relazione di proporzionalità (vedi in particolare la terza frase della scheda 2.10: per il bambino è la stessa cosa dire che "ogni molla si allunga della metà di quanto viene tirata da sola" o che "ogni molla si allunga come quando attacchiamo metà del peso ad una sola"). Questo passaggio dal piano qualitativo a quello quantitativo costituisce in realtà un vero e proprio salto logico, che nella maggior parte dei casi resta del tutto implicito, e corrisponde ad un atteggiamento comune non solo fra i bambini, ma anche fra adulti che non hanno un'adeguata base di cultura scientifica. Lo si può ritrovare, infatti, in qualunque situazione si abbia a che fare con variabili legate da relazioni d'ordine e noi lo rileveremo più e più volte nel corso della guida.³³ La maggior potenza del linguaggio scientifico rispetto a quello comune deriva d'altronde anche dalla possibilità di discriminare matematicamente forme diverse di relazione funzionale (con una precisione impossibile sul piano puramente qualitativo), poiché a relazioni funzionali diverse corrispondono importanti differenze nelle caratteristiche dei fenomeni naturali che vengono descritti.

³³ Per la discussione di un altro esempio di questo stesso problema, cfr. il § 4.3. del cap. IV.

È quindi molto importante che i bambini possano rendersi conto al più presto della non-corrispondenza automatica fra una relazione d'ordine qualitativa e una relazione di proporzionalità diretta: e bisogna fornire loro per tempo l'occasione di constatare concretamente che ci sono sia situazioni in cui questa corrispondenza è verificata, sia situazioni in cui non lo è. Poiché d'altra parte sopporre questa corrispondenza è a una tendenza fortemente radicata, sarà necessario che i bambini si scontrino più e più volte con situazioni di entrambi i tipi in relazione allo studio di fenomeni diversi.

È quindi più che opportuno che, nel momento stesso in cui i ragazzi sono in grado di confrontare direttamente forze diverse e di procurarsi forze che abbiano intensità doppia, tripla, ... rispetto a una data forza iniziale, essi procedano alla verifica delle loro previsioni di proporzionalità fra allungamento e forza, utilizzando molle di diverso tipo. Basterà ripetere per ogni molla le operazioni già definite per la costruzione del misuratore di forza, oppure allungarla utilizzando pesi via via multipli del più piccolo disponibile. È importante che ci siano più molle diverse con comportamento lineare e più molle con comportamenti non lineari. Per ogni molla si può compilare alla lavagna una tabella a doppia forza-allungamento, che i ragazzi possono ripetere ognuno sul proprio quaderno.³⁴

ATTIVITÀ

Al solito, le esperienze vanno eseguite da loro, non dall'insegnante, e possono essere individuali,

³⁴ Non ci soffermiamo in questa sede sui numerosi problemi che si pongono quando si deve passare da operazioni di puro confronto qualitativo ad operazioni di misura. Alcuni possono essere risolti autonomamente dai ragazzi: per esempio il rendersi conto di come si può operare per essere certi che le forze applicate siano ogni volta esattamente il doppio, il triplo, ecc... della forza iniziale. Per altri occorre probabilmente l'intervento dell'insegnante e si deve disporre di un'attrezzatura adeguata per quanto semplice. Generalmente, appena posto il problema della necessità di "misurare" gli allungamenti i ragazzi dichiarano esplicitamente che bisogna usare il metro e sembra che per loro non ci siano problemi. Misurare, però, non è un'operazione semplice, i problemi vengono fuori immediatamente appena si tratta di farlo davvero. È essenziale aver chiaro cosa si vuole misurare e quali sono le operazioni da compiere: il metro diventa uno strumento di misura solo a condizione che si sappia usarlo. È opportuno, perciò, affrontare con i ragazzi, con la cura che merita, il problema della misura in generale, ed in particolare delle misure di lunghezza; così facendo vengono resi, tra l'altro, percettivamente evidenti i legami dei concetti con l'esperienza e viene evidenziato l'aspetto di operatività della conoscenza fisica.

di gruppo, di classe: purché alla fine tutti i ragazzi abbiano a disposizione i dati corrispondenti ai vari tipi di molle.

Costruite le tabelle, queste vanno discusse. Si possono così (dopo opportuna discussione, spesso per nulla ovvia) dividere le molle in due gruppi: quello in cui allungamenti e forze sono proporzionali e quello in cui non lo sono. Se si sono scelte le forze in modo tale da partire con valori abbastanza bassi e da avere abbastanza multipli, i ragazzi possono accorgersi che in realtà anche le molle lineari hanno questo comportamento solo per un intervallo compreso fra un valore minimo ed un valore massimo della forza agente. Per forze di valore inferiore al minimo la molla o non si allunga affatto, o ha un allungamento minore di quello che ci si attenderebbe; per valori superiori al massimo subisce allungamenti diversi di solito inferiori a quelli che corrispondono all'intervallo di comportamento lineare. In effetti, se la molla è di tipo elicoidale, spesso la proporzionalità è esattamente verificata solo se per posizione a riposo si considera quella corrispondente al valore minimo della forza cui abbiamo accennato: cioè quella in cui alla molla è appeso un oggetto fisso, opportunamente scelto (eventualmente il contenitore stesso in cui aggiungere man mano i pesi crescenti).³⁵

Si può andare oltre una pura discussione delle tabelle, guidando i ragazzi a costruire dei grafici dei valori degli allungamenti in funzione delle forze applicate.³⁶ È così possibile far loro collegare al comportamento lineare di una molla la forma rettilinea del grafico ed a quello non lineare la forma curvilinea. Si può anche discutere sull'inclinazione della retta (e su quella, tratto per tratto, delle curve) che si ottiene e scoprire la sua correlazione con la rigidità (o durezza) delle molle (purché si operi a parità di lunghezza a riposo delle molle, dal punto di vista fisico; ed a parità di lunghezza dei segmenti

³⁵ In questi casi la forza del peso del contenitore o di un oggetto scelto opportunamente serve per "compensare" la forza di "compressione" delle spire dovuta alla torsione del filo.

³⁶ Come la misura, anche la rappresentazione grafica pone non pochi problemi, su cui non ci soffermeremo. Vogliamo solo sottolineare che se i ragazzi hanno già avuto modo di studiare cosa è ed a cosa serve, queste esperienze servono loro come applicazione in situazioni concrete e con dati reali rilevati da loro stessi; e ciò può essere molto utile per approfondire il senso fisico di questa operazione. Se invece non si sono mai imbattuti nella costruzione di rappresentazioni grafiche, questa può essere l'occasione da cui partire per studiare l'argomento.

rappresentanti sugli assi l'unità di forza e di quelli rappresentanti l'unità di allungamento, dal punto di vista matematico).³⁷

In scheda 2.11 sono riportati esempi delle situazioni studiate nella classe sperimentale e delle relazioni, dei grafici, delle conclusioni dei ragazzi.

Ritorniamo sul problema della non corrispondenza, in generale, fra relazioni d'ordine e relazioni di proporzionalità (diretta o inversa) in Cap. IV, § 4.2.

2.10. Generalizzazione della relazione deformazioni-forze

È bene, al termine del lavoro sulle forze elastiche, riprendere il discorso più generale del rapporto fra forze e deformazioni. Si possono richiamare le esperienze iniziali sulle deformazioni di corpi qualsiasi, elastici e non (§ 2.3.), e chiedere ai ragazzi cosa succede quando si esercita forza contro un corpo molto "duro": il muro, il pavimento, un sasso, un bicchiere, ...

Gli obiettivi che ci si propone nel momento in cui si innesca la discussione su questo problema sono, al solito, duplici: verificare la capacità dei ragazzi di utilizzare gli schemi già costruiti per interpretare situazioni nuove e, nel contempo, far loro consolidare e generalizzare le conoscenze acquisite. In effetti, si vuole che i ragazzi estendano ai corpi rigidi lo schema forze-deformazione: possiamo

³⁷ Se il grafico è una retta, la sua inclinazione è costante ed è data dal coefficiente angolare (rapporto fra il valore corrispondente alla differenza fra le ordinate di due punti qualsiasi della retta e quello corrispondente alla differenza fra le ascisse di questi stessi due punti). Se in ascisse si riportano gli allungamenti ed in ordinate le forze, questo rapporto dà il valore della costante elastica della molla ($K = F/\Delta l$). Se il grafico è una curva, non c'è più una "costante" elastica univocamente definita, ma la durezza della molla varia con il suo allungamento: punto per punto il suo valore può essere calcolato dal coefficiente angolare della retta tangente al grafico in quel punto. La discussione dei grafici si presta inoltre ad approfondire il problema dell'interpolazione: risulta evidente che solo se si usa come misuratore di forza una molla nella sua zona di linearità si potranno apprezzare valori delle forze che provochino allungamenti non coincidenti con quelli di taratura del misuratore. In questo caso, infatti, si potranno apprezzare frazioni di forza più piccole dell'intervallo fra i valori di taratura in quanto esse corrispondono alle identiche frazioni di lunghezza rispetto all'intervallo fra i valori di taratura degli allungamenti. Una molla elicoidale di acciaio opportunamente tarata è infatti uno degli strumenti più diffusi per misurare le forze (fig. 2.14).

Scheda 2.11 - Studio quantitativo della relazione forza-deformazione

Si vuole verificare l'ipotesi dei bambini che in una molla forza sollecitatrice e deformazione sono proporzionali. Si discute in classe per definire che tipo di esperienza si potrebbe fare al riguardo. Al termine della discussione, i ragazzi stendono ognuno una relazione con la proposta di esperienza da attuare. Ecco una delle relazioni:

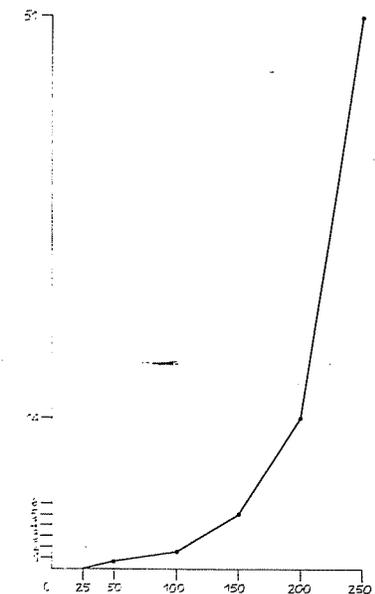
"Vogliamo vedere se è vero che quando il peso attaccato alla molla diventa due, tre, quattro volte più grande anche gli allungamenti diventano due, tre, quattro volte più grandi.

Per fare l'esperienza dobbiamo prendere una molla di acciaio e altre molle di tipo diverso. Dobbiamo misurare con la riga la lunghezza della molla senza attaccare il peso. Poi attacchiamo il peso di 50 g alla molla e misuriamo la lunghezza della molla con la riga. Per stabilire l'allungamento della molla sottraiamo alla lunghezza della molla con il peso quella senza peso. Poi attacchiamo un peso doppio di 100 g alla molla e misuriamo la lunghezza della molla con il peso di 100 g. Per ottenere l'allungamento della molla sottraiamo la lunghezza della molla senza il peso alla lunghezza della molla con il peso. Per sapere di quanto la molla si allunga quando mettiamo il peso di 150 g, 200 g ... dobbiamo fare le stesse operazioni".

L'esperienza viene dunque eseguita con due tipi diversi di molle: un elastico per indumenti (circa 2 m di elastico largo circa 5 mm) e una molla di acciaio. Ogni volta i ragazzi compilano una tabella dei pesi e degli allungamenti, costruiscono il relativo grafico e descrivono le loro osservazioni. In (a) e (b) sono riportate le relazioni corrispondenti alle due esperienze:

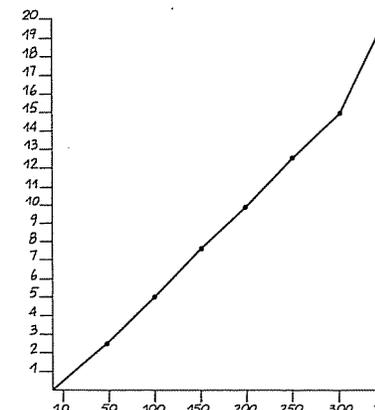
Pesi (g)	All. (cm)
25	0,0
50	0,8
100	1,5
150	5,0
200	14,0
250	50,5

(a) Elastico da indumenti



Pesi (g)	All. (cm)
10	0
50	2,5
100	5
150	7,5
200	10
250	12,5
300	15
350	20

(b) Molla d'acciaio



Mettendo un peso uguale a 25 g attaccato all'elastico non subisce un allungamento. Noi consideriamo la lunghezza normale dell'elastico quando sotto l'elastico è attaccato il peso di 25 g.

Quando il peso attaccato alla molla diventa due volte, tre volte, quattro volte, cinque volte, sei volte più grande di 50 g, gli allungamenti dell'elastico non sono due volte, tre volte, quattro volte, cinque volte, sei volte più grandi. Il grafico non è una linea retta e per questo elastico non è vero che quando la forza diventa due volte, tre volte ecc. più grande, anche l'allungamento diventa due volte, tre volte più grande.

Prendiamo una molla ci mettiamo un peso di 10 g e vediamo che la molla si allunga di poco e diciamo che è la forma normale. Abbiamo attaccato un peso di 50 g ed abbiamo misurato di quanto la molla si è allungata. L'allungamento era di 2,5 cm. Abbiamo attaccato poi un peso di 100 g e l'allungamento era 5 cm, poi un peso di 150 g e l'allungamento era di 7,5 cm. Con un peso di 200 g l'allungamento era di 10 cm e così via fino ad arrivare ad un peso di 300 g e l'allungamento era di 15 cm. Poi abbiamo attaccato alla molla un peso di 350 g e l'allungamento è stato di 20 cm.

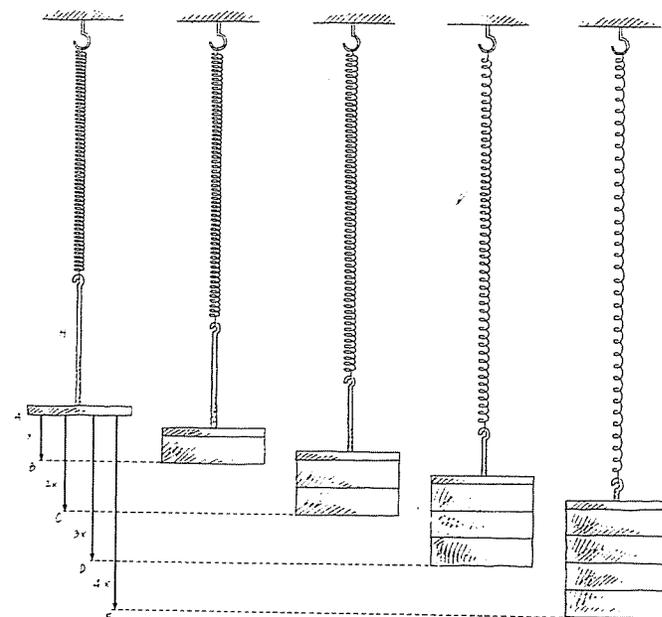
Abbiamo scritto la tabella ed abbiamo disegnato il grafico. Guardando il grafico si nota che viene una linea retta fino a quando il peso attaccato alla molla è di 300 g. Fino ad un peso di 300 g, che è sei volte più grande del peso di 50 g, gli allungamenti della molla sono proporzionali ai pesi, cioè raddoppiano i pesi e raddoppiano pure gli allungamenti, triplicano i pesi e diventano tre volte più grandi gli allungamenti e questo succede fino al peso di 300 g. Con il peso di 350 g, che è sette volte più grande del primo peso di 50 g, l'allungamento non è sette volte più grande di 2,5 cm.

Al termine delle esperienze, si traggono le conclusioni generali rispetto al problema di partenza. Ecco le nel modo in cui le esprimono gli alunni:

– Quando attacchiamo alla molla un peso doppio, triplo e fino a sei volte più grande, anche l'allungamento della molla di acciaio è doppio, triplo e sei volte più grande, questo vuol dire che i pesi sono proporzionali agli allungamenti. Invece, quando abbiamo un peso due, tre, sei volte più grande, gli allungamenti dell'elastico non sono due, tre, sei volte più grandi. Il grafico dei pesi e degli allungamenti che abbiamo misurato è una linea retta per la molla d'acciaio e non è una linea retta per l'elastico giallo e la molla di camera d'aria.

Il disegno sottostante riproduce la situazione sperimentale con la molla di acciaio nell'intervallo in cui il suo comportamento è lineare.

Se si considera come lunghezza di riposo della molla quella relativa al livello A, che viene raggiunto quando ad essa è sospeso il portapesi H, l'allungamento x è proporzionale alla forza deformante.



esercitare forze contro di essi, perché a loro volta esercitano forza contro di noi; possono esercitare forza contro di noi perché si deformano, anche se impercettibilmente. Inoltre, si vuole che i ragazzi arrivino alla consapevolezza che anche le deformazioni dei corpi rigidi possono essere di tipo diverso a seconda del materiale di cui sono costituiti: da un comportamento prevalentemente elastico ad un comportamento prevalentemente plastico, attraverso tutte le possibili combinazioni. Può darsi che per raggiungere questi obiettivi sia sufficiente la sola discussione. Se ciò non avviene, si possono eseguire esperienze per mettere in evidenza comportamenti plastici ed elastici di materiali via via più rigidi. Per esempio si possono appendere (e lasciare appesi per qualche giorno) pesi uguali a fili di materiali diversi: corde, fili di nylon, fili di ferro, fili elastici, asticcioline di legno ... Per ogni campione si devono

eseguire quattro misure di lunghezza: a riposo; dopo avere attaccato il peso; prima di toglierlo; subito dopo averlo tolto. Un comportamento totalmente elastico dovrebbe essere caratterizzato da un allungamento che si manifesta all'inizio della sollecitazione, non varia nel tempo e scompare totalmente al cessare della sollecitazione stessa; un comportamento totalmente plastico dovrebbe essere caratterizzato da un allungamento che continua ad aumentare durante tutto il periodo di sollecitazione e non diminuisce quando essa viene a cessare.

Le misure di lunghezza effettuate consentono di ordinare fra questi due estremi i materiali utilizzati. Un'esperienza analoga si può realizzare utilizzando la flessione di barre di materiale diverso (ferro, alluminio, legno di varie specie di alberi ...).

In scheda 2.12 riportiamo la documentazione di questa fase del lavoro nella classe sperimentale.

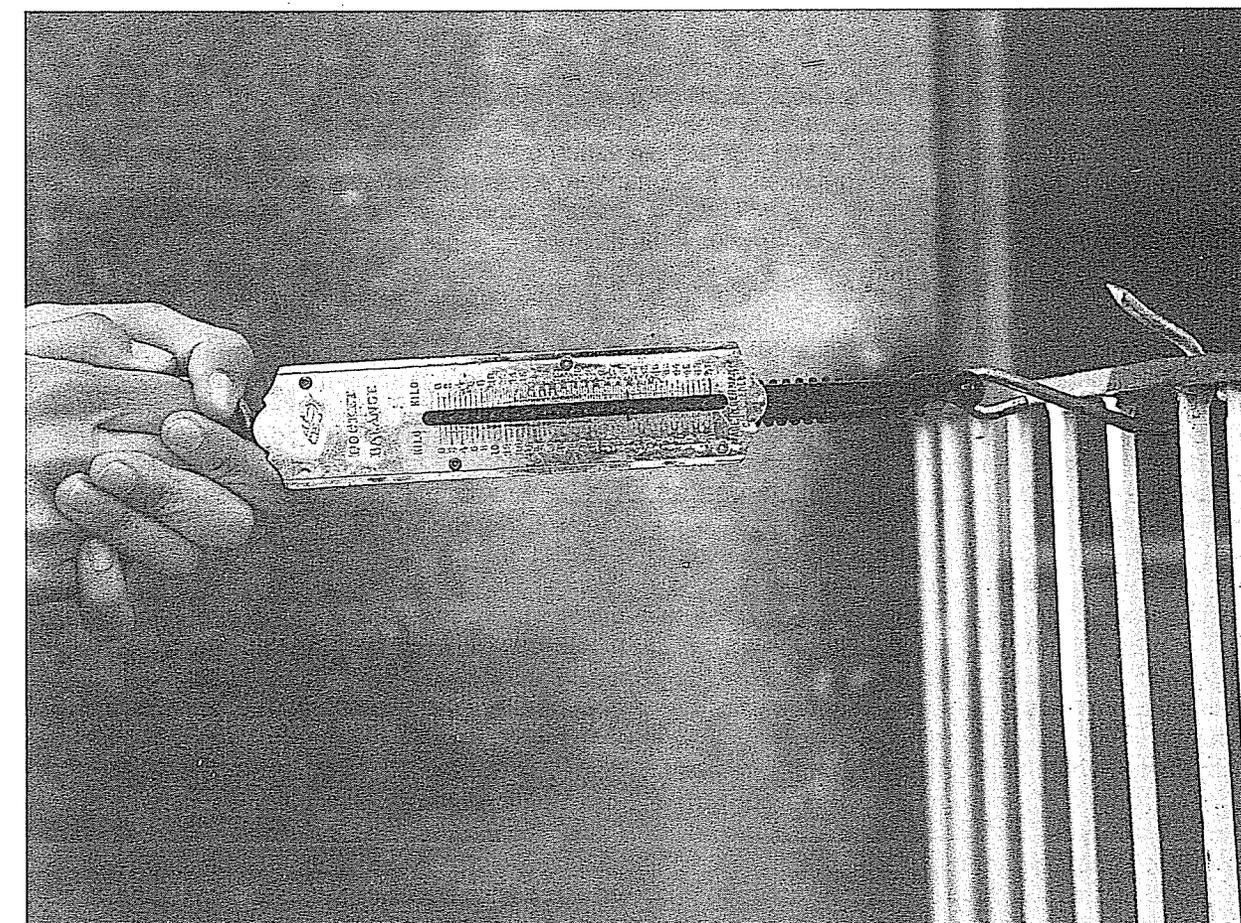


Figura 2.14 - Usando una molla di acciaio possiamo misurare quanta forza siamo in grado di esercitare

Una molla ad elica di acciaio, lineare, propriamente tarata, ci permette di misurare l'intensità di una forza.

Scheda 2.12 - Generalizzazione della relazione forza-deformazione

Dopo il lungo lavoro sulle forze elastiche, ci si pone l'obiettivo di generalizzare la relazione deformazione/forza.

"Il muro, la corda, il pavimento, un oggetto duro, quando vengono schiacciati o tirati, fanno forza? In che modo?" Ecco la discussione dei ragazzi:

"Secondo me quando spingiamo contro il muro o tiriamo la molla attaccata al muro, il muro non fa forza perché rimane fermo, invece la molla fa forza perché si allunga e vuole tornare com'era prima".

"Io penso che la corda fa forza quando la tiriamo come fa la molla... si allunga un poco e non ci accorgiamo che si allunga, poi quando non tiriamo più ritorna come prima".

"Il muro secondo me fa forza quando tiriamo la molla o la corda attaccati ad esso. Il muro fa forza perché si allunga di pochissimo meno della corda e non lo possiamo vedere l'allungamento... quando non tiriamo più ritorna come era prima".

"Anche il pavimento ed il tavolo fanno forza quando ci mettiamo dei pesi sopra perché resistono e non si sfondano. Quando sono schiacciati dai pesi si accorciano ma non vogliono accorciarsi e fanno forza perché vogliono tornare come erano prima... questo accorciamento è però così piccolo che non lo vediamo".

"Come dice lui (Mimmo) anche quando un camion passa sulla strada la strada fa forza abbassandosi (deformandosi). La strada si abbassa e fa forza per sostenere il peso del camion e poi ritorna come era prima quando il camion è passato. Noi non vediamo l'accorciamento della strada perché è molto piccola e perché le pietre sono dure".

Ricercatore: "Se schiaccio un bastone per terra cosa succede al bastone? il bastone fa forza?".

"Il bastone si accorcia di poco e fa forza perché vuole tornare com'era prima".

I ragazzi sono dunque consapevoli che qualunque corpo si deforma, se sottoposto ad azioni di schiacciamento o di stiramento. Il lungo lavoro sulle forze elastiche li induce, però, ad immaginare la loro deformazione come necessariamente elastica. Per chiarire questo punto si fanno fare diverse esperienze con delle sbarre o delle assi di materiale vario (ferro, legno di abete, di fico, di castagno), fissate per un estremo ad un tavolo mediante dei morsetti e con dei pesi attaccati all'altro estremo. I pesi vengono tolti dopo qualche giorno ed i ragazzi possono constatare che restano deformazioni permanenti, più o meno grandi, a seconda del materiale.

Ecco alcune osservazioni dei ragazzi:

"Abbiamo preso una bacchetta di legno di castagno lunga 50 cm e spessa 1 cm e l'abbiamo fissata per un lato al tavolo con i morsetti. Poi abbiamo preso un grosso sasso e lo abbiamo appeso all'altro lato (della bacchetta). Abbiamo misurato di quanto si è abbassato e l'abbassamento era di 14 cm. Abbiamo lasciato il peso per tre giorni attaccato alla bacchetta e poi lo abbiamo tolto. Quando lo abbiamo tolto la bacchetta è tornata com'era prima senza il peso, la bacchetta non è rimasta curvata".

"Poi abbiamo preso una bacchetta di ferro, abbiamo fatto la stessa esperienza ed abbiamo lasciato la pietra attaccata per tre giorni. Abbiamo notato che la bacchetta di ferro è rimasta curvata".

Capitolo 3. Forze di attrito

3.1. Introduzione

Impariamo molto presto che per spostare un oggetto pesante che striscia su una superficie occorre applicargli una spinta o trazione adeguata. Più l'oggetto è pesante, più la superficie è ruvida, più diventa difficile spostarlo. Le cose vanno molto meglio se l'oggetto può rotolare: non per niente tutti i mezzi di trasporto hanno le ruote!

Andando in bicicletta ad un'andatura relativamente sostenuta sentiamo l'aria che ci spinge sul petto. Aumentando la velocità aumenta la spinta dell'aria. Per conservare il movimento dobbiamo continuamente pedalare. Spostare la mano nell'acqua o in un mucchio di grano richiede forza, e tanta più forza quanto più il movimento è rapido. La spinta che avvertiamo contro la mano è tanto più grande quanto più veloce è il movimento.

Per macinare il caffè, per tritare la carne, per ridurre in farina i cereali (grano, avena, orzo), per schiacciare le olive ed estrarre l'olio ... tutte le volte che, insomma, si usa una macina o uno strumento tipo macina, le mani o il motore devono esercitare forza e trasferire energia per farlo muovere.

In Fisica tutte queste situazioni di esperienza vengono schematizzate introducendo la nozione di forze di attrito, o di resistenze passive, che si manifestano quando c'è movimento relativo di due o più oggetti a contatto, quando un oggetto si muove in un mezzo viscoso, come l'aria, l'acqua ... quando il movimento implica una continua riduzione di qualcosa in pezzi, in frammenti.

In molti casi gli attriti si manifestano nella trasmissione e guida del movimento (attraverso cinghie, cuscinetti, ruote dentate, per esempio) o nel suo mantenimento (la resistenza che l'aria e/o l'acqua offrono ai mezzi di trasporto, per es.): in questi casi essi hanno un ruolo passivo, generando fenomeni indesiderati, o dannosi, perché comunque ostacolano e possono addirittura impedire il movi-

mento relativo fra le parti a contatto. Per vincere gli attriti è necessario fornire continuamente al sistema formato dalle varie parti in movimento relativo delle quantità di energia più o meno grandi che si traducono in usura e modifiche di parti del sistema, e in sviluppo di calore (i pneumatici si consumano e si scaldano!), con la conseguente impossibilità di ogni recupero dell'energia impiegata.¹ Ciò provoca una diminuzione del rendimento delle macchine ed è per questo che un grande impegno è stato e viene tuttora profuso per ridurre l'entità degli attriti in applicazioni tecnologiche di ogni tipo: un'importante e fondamentale branca di ricerca ingegneristica è appunto dedicata allo studio ed al miglioramento di questo genere di problemi.

Per contro, le forze di attrito sono necessarie. Il camminare su una superficie ghiacciata o su un pavimento molto liscio risulta piuttosto complicato. Si scivola. Quando si percorre in auto una strada bagnata o coperta da chiazze di ghiaccio occorre procedere lentamente ed evitare, il più possibile, di frenare o accelerare bruscamente; può risultare problematico curvare. Sul fango, formatosi in seguito ad un temporale, i pneumatici "slittano" ed il movimento diventa un'impresa disperata. D'altra parte è noto che a volte, la situazione può essere risolta aumentando il peso del mezzo. "Si scivola", "si slitta" sono termini che usiamo per indicare che le forze di attrito sono molto deboli. Senza attrito non potremmo neanche camminare: le forze di attrito che si manifestano fra il terreno e le suole delle scarpe sono infatti necessarie per spostarsi. Sono le forze di attrito che rendono solidali i coperchi ai rispettivi barattoli, un bullone alla madrevite, una vite al legno, i due pezzi della caffettiera fra loro.

¹ Vedi Cap. I, Sorgenti di forze, § 1.6.

Svitare il coperchio da un barattolo con le mani bagnate è piuttosto difficile se non impossibile: le mani non hanno presa, scivolano, perché le forze di attrito fra di esse e ognuna delle due parti del sistema antagonista, il coperchio ed il barattolo, sono molto deboli in confronto alle forze di attrito che “tengono insieme” barattolo e coperchio. Afferrando i due pezzi con un panno, come tutti facciamo in questi casi, si riesce a separarli: il panno interposto consente, infatti, di esercitare forze d'attrito di intensità sufficiente fra le mani e ognuno dei due pezzi che devono essere reciprocamente svitati.

Ci sono quindi moltissime situazioni in cui le forze di attrito sono indispensabili per i giochi di forza fra due o più sistemi, ed esse svolgono un ruolo importante in molte applicazioni tecnologiche. Basta pensare ai freni ed alle frizioni dei veicoli; ai muri a secco, costruiti sin dagli albori della civiltà, la cui stabilità è garantita dalle forze di attrito fra i blocchi che li compongono, oltre che dalla forza di gravità; alle solesse di gomma o di para opportunamente lavorate che, a differenza di quelle di cuoio, permettono di passeggiare anche su terreni erbosi, o fangosi, o in pendenza, come quelli di montagna; ai cingoli di cui sono muniti trattori e ruspe che consentono, grazie all'attrito molto elevato che sono in grado di raggiungere col terreno, di esercitare all'occorrenza spinte e trazioni enormi (sia pure a prezzo di consumi molto elevati di carburante).²

In definitiva, possiamo dire di essere immersi in un mondo in cui quotidianamente si può constatare dovunque la presenza continua di attriti che se per un verso in molti casi sono essenziali per la trasmissione di azioni di forza, per l'altro rappresentano un danno dal punto di vista dell'energia, in quanto l'assorbono e la dissipano senza possibilità di recupero. Anche se nei contesti fisici concreti le forze di attrito sono sempre presenti, pure attraverso accorgimenti opportuni (dalla lubrificazione, alle rotaie a cuscini d'aria ...) se ne può ridurre l'entità, costruendo situazioni artificiali in cui la loro incidenza sul moto può essere in prima approssimazione trascurata. A scuola generalmente si utilizzano situazioni di questo tipo per elaborare e verificare alcune idealizzazioni che consentono di immaginare un mondo senza attriti e di costruire così alcuni degli schemi di pensiero fondamentali su cui si basa l'interpretazione che la Fisica dà del mondo. È dunque vero che può esistere una “Fisica senza gli

² Vedi Cap. I, Sorgenti di forze, § 1.7.

attriti” (quella che appare in molti libri di testo; per i più svariati livelli di età, in cui all'attrito si dedicano al più poche righe): ma è, appunto, una “Fisica da libro”, parziale e schematica, non uno strumento per capire il mondo di tutti i giorni. Se è quest'ultimo invece che viene considerato insieme il punto di partenza e quello di arrivo per una ricostruzione cognitiva della realtà significativa per la scuola di base, allora allo studio delle forze di attrito vanno dedicati un tempo ed un impegno proporzionati al ruolo che esse effettivamente svolgono.

In questo capitolo e nel Cap. IV presentiamo una serie di indicazioni operative sulle attività che possono essere svolte al termine della scuola elementare o all'inizio di scuola media, con l'obiettivo di costruire modelli interpretativi adeguati di quattro tipi diversi di forze di attrito, o dissipative: l'attrito radente statico, l'attrito di scorrimento (o dinamico), l'attrito di rotolamento e la resistenza viscosa. La trattazione dei primi tre tipi di attrito, inerenti alle forze che insorgono fra corpi solidi a contatto ed in moto relativo, sarà l'oggetto di questo capitolo. Lo studio della resistenza che i fluidi oppongono al moto dei corpi in essi immersi verrà affrontato in Cap. IV.

3.2. Caratteristiche dell'attrito fra corpi solidi

In questo paragrafo ci proponiamo di discutere a livello adulto la forza d'attrito statico, la forza di attrito radente e la forza di attrito volvente, esplicitando le variabili da cui esse dipendono e le loro relazioni, e dando una spiegazione qualitativa dell'origine di queste forze.

Iniziamo a considerare le situazioni in cui vi è strisciamento.

Supponiamo di voler spostare un blocco a forma di parallelepipedo appoggiato su un pavimento orizzontale. Possiamo tirare il blocco servendoci di una molla che, con il suo allungamento, ci dà immediatamente informazioni sull'entità della forza che stiamo esercitando. Dobbiamo garantirci di tirare nella direzione giusta, cioè orizzontalmente.³ Aumentiamo gradualmente, a partire da zero, la

³ Se per esempio, tiriamo anche verso l'alto, una parte della forza è fatta contro il peso dell'oggetto, non contro l'attrito (Cfr. § 3.3).

forza con cui tiriamo: vediamo la molla allungarsi sempre più mentre il blocco resta fermo, finché, raggiunto un certo valore della forza con cui tiriamo, il corpo comincia a muoversi verso di noi, con una brusca accelerazione. Ci accorgiamo poi che, se vogliamo continuare a far muovere il blocco a velocità costante, dobbiamo continuare a tirarlo con una forza meno intensa di quella che avevamo raggiunto all'attimo del distacco: corrispondentemente, vediamo che anche l'allungamento della molla è diminuito rispetto a quello che aveva nel momento precedente il movimento. Consideriamo ora il blocco e le forze che agiscono su di esso in varie situazioni: quando non è tirato (fig. 3.1 a); quando lo stiamo tirando, ma non si muove ancora (fig. 3.1 b, c); all'attimo del distacco (fig. 3.1 d); mentre lo stiamo facendo muovere a velocità costante (fig. 3.1 e). Quando non è tirato, il blocco è soggetto alla forza peso ed alla reazione del pavimento. Si tratta di due forze di uguale intensità, che agiscono entrambe in direzione verticale ma in versi opposti, così da bilanciarsi esattamente. Anche nelle situazioni b) e c) il blocco continua ad essere fermo: nulla è cambiato per quanto riguarda la forza peso e la reazione del pavimento. Adesso però il blocco è soggetto ad una forza orizzontale esercitata dalla molla e, poiché non si muove, questa forza “deve” essere equilibrata da un'altra, eguale ed opposta: la forza appunto di attrito statico.

L'allungamento della molla, minore in b) che in c), ci indica che la forza d'attrito statico così ipotizzata in base al principio di equilibrio è minore nella prima situazione che nella seconda. Generalizzando a tutte le situazioni, da quando non stiamo ancora tirando fino al momento in cui, aumentando gradualmente la forza che esercitiamo,⁴ il blocco inizia a muoversi, possiamo concludere che l'intensità della forza di attrito statico presente in ogni istante fra due corpi dipende dalla intensità della forza esterna applicata ad essi.⁵ Se la forza esterna è nulla, anche la forza di attrito statico è nulla: altrimenti è uguale alla forza esterna, per tutti i valori che essa può assumere, fra zero ed un valore massimo, raggiunto il quale la forza di attrito statico cede bruscamente e c'è il distacco fra i due corpi.

Consideriamo ora la situazione d), corrispondente all'inizio del moto del blocco. Non appena la forza esercitata da noi sul blocco attraverso le molle supera il massimo valore che l'attrito fra blocco e pavimento può raggiungere, la somma delle due forze non è più nulla e il blocco inizia a muoversi accelerando. Sentiamo che, ovviamente la nostra

mano deve muoversi per continuare a fare forza; ma, al tempo stesso, deve fare meno forza (sembra, complessivamente, che il sistema ceda di colpo); se vogliamo continuare a far muovere il blocco a velocità costante (situazione e), ci accorgiamo che dobbiamo esercitare una forza inferiore a quella che avevamo raggiunto al momento del distacco. La molla infatti è meno allungata che nella situazione d).

Mentre il blocco si muove, lentamente e senza sbalzi, deve evidentemente esserci una forza che equilibra esattamente quella esercitata dalla molla sul blocco (il moto è uniforme, quindi la somma delle forze agenti deve essere nulla): si tratta della forza di attrito di scorrimento, o attrito dinamico: generalmente inferiore al massimo valore che può essere raggiunto dalla forza di attrito statico, per qualunque coppia di oggetti. Si può anche constatare che l'allungamento delle molle non cambia in maniera apprezzabile se si cambia la velocità a cui trasciniamo il blocco, purché questa non sia troppo alta (generalmente, purché sia compresa fra 1 cm/s ed 1 m/s circa): entro questi limiti, pertanto, le forze di attrito di scorrimento sono praticamente costanti durante il movimento.⁶

Le caratteristiche dell'attrito statico e dell'attrito dinamico di cui abbiamo finora parlato sono ben evidenti dal punto di vista percettivo e facilmente riscontrabili a livello di esperienza quotidiana. Sappiamo bene che un oggetto non si sposta, spingen-

⁴ La molla è soggetta, ai due estremi, a forze orizzontali, non nulle, più intense in c) che non in b) l'allungamento in c) è maggiore): la forza con cui noi stiamo tirando e la forza d'attrito statico. Poiché una molla tira ugualmente ai due estremi, siamo sicuri che la forza che noi esercitiamo è uguale alla forza d'attrito che insorge fra le superfici di contatto del blocco e del pavimento che noi supponiamo esattamente “trasmessa” fino alla molla attraverso la rigidità del blocco.

⁵ Ricordiamo che il sistema delle forze agenti è sempre chiuso. Alla forza di attrito che il pavimento esercita sul blocco, ne corrisponde una uguale e contraria che il blocco esercita sul pavimento. Lo stesso avviene fra i nostri piedi ed il pavimento, altrimenti non potremmo tirare le molle. Il sistema complessivo coinvolge in una catena di scambi di forze il blocco, la molla, noi, il pavimento. La chiusura delle forze, nei casi di attrito, è stata discussa in generale nel Cap. I, § 1.6.

⁶ In effetti quando un oggetto si muove, su di esso si esercita anche una forza di attrito che aumenta con la velocità del corpo ed è dovuta alla resistenza del fluido circostante (nella maggior parte dei casi l'aria), come vedremo nel prossimo capitolo. Per bassa velocità, però, essa è generalmente del tutto trascurabile rispetto alla forza di attrito radente, il che autorizza i discorsi fatti finora.

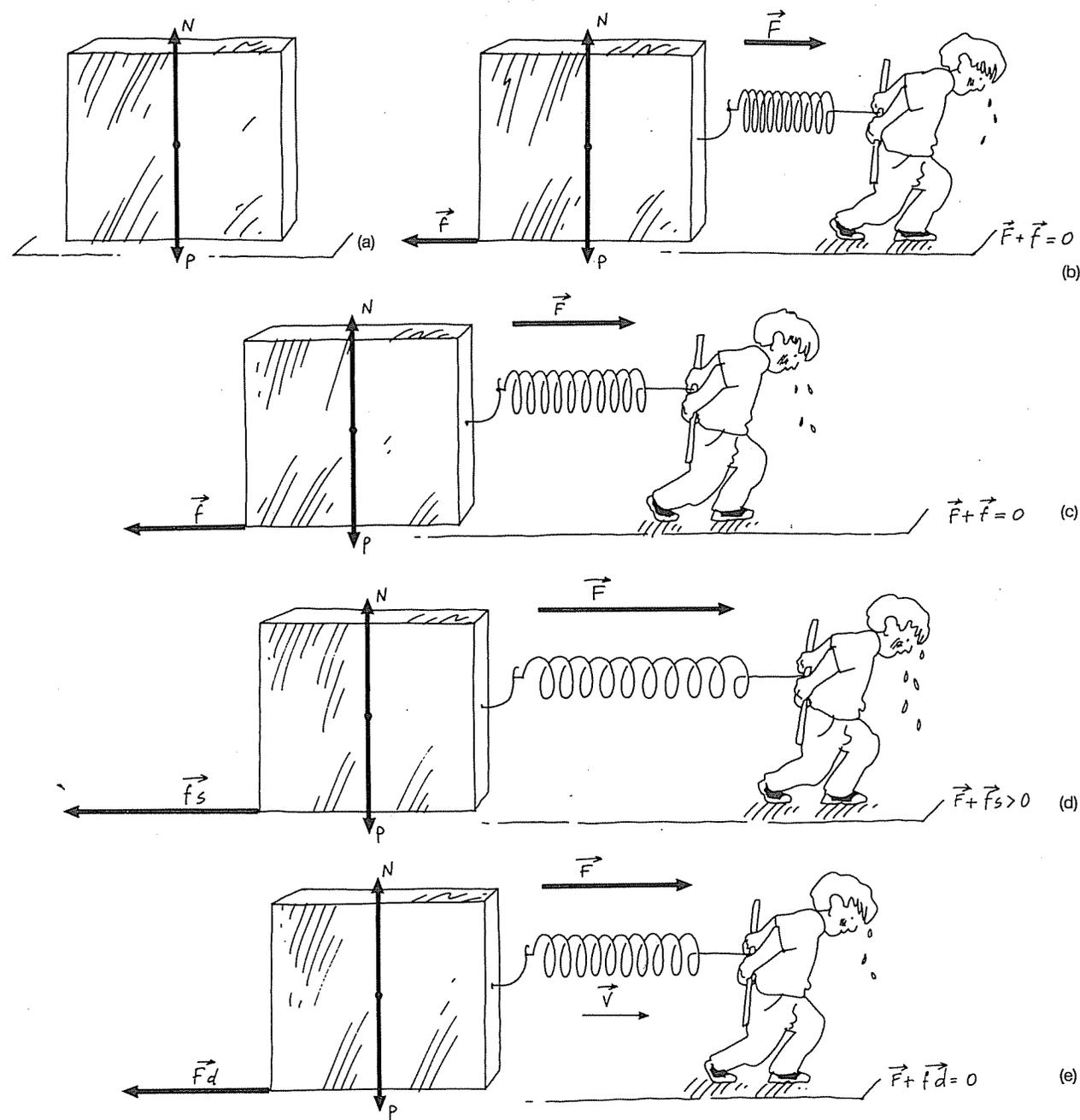


Figura 3.1 - Forze d'attrito fra solidi

- (a) Un blocco è appoggiato al pavimento. Su di esso agiscono la forza peso P e la reazione del pavimento N . P ed N sono due forze uguali e direttamente opposte.
- (b) Tramite una molla si inizia a tirare il blocco orizzontalmente. La molla si allunga, ma il blocco non si sposta. A P ed N si sono aggiunte due forze orizzontali, la forza di trazione F e la forza di attrito statico f , ad essa uguale e contraria, localizzata sulla superficie di contatto fra blocco e pavimento.
- (c) Si continua ad aumentare F . Il blocco resta fermo. Anche f sta aumentando in modo da eguagliare istante per istante F .
- (d) Ad un certo allungamento della molla, quindi ad un certo valore di F , il blocco inizia a muoversi. In corrispondenza all'attimo del distacco, f ha raggiunto il suo massimo valore possibile, f_s .
- (e) Se il blocco viene fatto muovere a velocità costante e non troppo elevata, la molla resta allungata di una quantità fissa, cui corrisponde una forza di trazione F che si oppone ad una forza d'attrito dinamico f_d ad essa uguale e contraria. Le due forze sono leggermente inferiori a f_s .

dolo o trascinandolo, finché non esercitiamo su di esso "abbastanza" forza. E se dobbiamo spostare un baule o un armadio, ci accorgiamo che dobbiamo fare più forza per iniziare a farli muovere che non per mantenerli in movimento. (Se l'attrito dinamico non fosse inferiore all'attrito statico, il mondo andrebbe in modo diverso: sia dal punto di vista dell'esperienza quotidiana, sia da quello dei consumi di energia connessi al movimento).

3.3. Le cause degli attriti fra solidi

Qual è il motivo per cui si manifestano le forze di attrito statico e dinamico finora considerate? Per rispondere a questa domanda, consideriamo due superfici solide asciutte molto lisce e schiacciate l'una contro l'altra: come lo sono per esempio quelle di un blocco e di un pavimento di marmo levigato schiacciati uno contro l'altro dalla doppia azione del peso del blocco e della reazione del pavimento. Tra le porzioni di queste superfici a diretto contatto si manifestano delle forze di attrazione esercitate dalle molecole rispettive. Queste forze (di natura elettrostatica) che tendono a tenere unite le due superfici vengono chiamate forze di adesione. Esse sono tanto più intense quanto più le superfici sono lisce e vicine fra loro, come si può vedere anche sovrapponendo due lastre di vetro e sottoponendole a compressione per eliminare l'aria tra di esse. Nel caso limite che le superfici siano perfettamente lisce, piane e non alterate, le forze di adesione raggiungono il loro valore massimo e sono le uniche responsabili dell'elevato attrito esistente fra le due superfici.

Due lastre sottili di vetro (come i vetri da microscopio) o di plexiglas, nuove e ben pulite, si attaccano l'una all'altra con una forza tale che due di esse sovrapposte possono essere sollevate insieme tenendo con le dita solo quella superiore (fig. 3.2). In questa situazione le forze di adesione fra le due lastre sono più forti della forza-peso di una di esse.

In generale sulle superfici sono però presenti delle piccole irregolarità (solchi, creste, rigature, granulosità ...) determinate dal processo di lavorazione o dall'usura. Man mano che esse aumentano, cioè mano a mano che aumenta la *ruvidezza* delle superfici a contatto, l'aderenza si riduce: diminuiscono infatti le porzioni delle due superfici che sono abbastanza vicine tra loro perché si possano manifestare le forze di attrazione intermolecolare,⁷

e diminuisce, di conseguenza, la resistenza allo spostamento relativo delle due superfici dovuta a questo tipo di forze. Per contro, all'aumentare della rugosità insorge un altro fenomeno: tra le sporgenze e le cavità delle due superfici si creano come dei piccoli incastri locali, che sono anch'essi sorgenti di forze che si oppongono allo spostamento relativo delle superfici. Esso diviene infatti possibile soltanto attraverso la rottura di queste asperità, o il sollevamento di uno dei due corpi (contro le forze che li tengono schiacciati fra loro così che le sporgenze presenti sulla superficie dell'altro possano venire scavalcate). L'azione di queste forze si sovrappone dunque a quella delle forze di adesione e con l'aumento della rugosità superficiale la loro intensità cresce mentre l'intensità delle forze di adesione diminuisce.

L'attrito fra le due superfici è in ogni situazione determinato dalla sovrapposizione di questi due effetti. A partire dal caso ideale di superfici perfettamente lisce, ove non esiste che l'azione delle forze di adesione, che raggiunge il valore più alto possibile in relazione alla forza di schiacciamento presente, si osserva quindi che, aumentando gradualmente e lentamente la rugosità, dapprima l'attrito diminuisce un po' (le insorgenti forze dovute alle asperità superficiali non compensano la diminuzione delle forze di adesione) fino a raggiungere un minimo; poi di nuovo aumenta gradualmente (l'aumento delle forze dovute alle scabrosità superficiali è superiore alla diminuzione di quelle dovute alla adesione); infine, l'effetto della rugosità diventa dominante, quello della adesione diventa trascurabile. Per far strisciare l'una sull'altra due superfici molto scabre occorre applicare forze molto intense, capaci di vincere le forze che impediscono la rottura delle asperità superficiali (forze di coesione fra le molecole dello stesso corpo).

L'attrito è così chiaramente responsabile dell'usura delle superfici che strisciano: le suole delle scarpe si consumano, (vengono cioè erose un pezzetto per volta) si staccano e si rompono i grani della carta vetrata e le parti di superficie che con essa si vuole levigare, si consuma il battistrada dei pneumatici (ma anche la pavimentazione stradale) ... Il caso limite della rugosità si verifica quando non

⁷ Le forze di adesione sono forze a corto raggio: la loro intensità tende molto rapidamente a zero con l'aumentare della distanza fra le molecole delle due superfici, come è ovvio ogni volta che si rompe un solido omogeneo: per esempio una ceramica, un vetro.

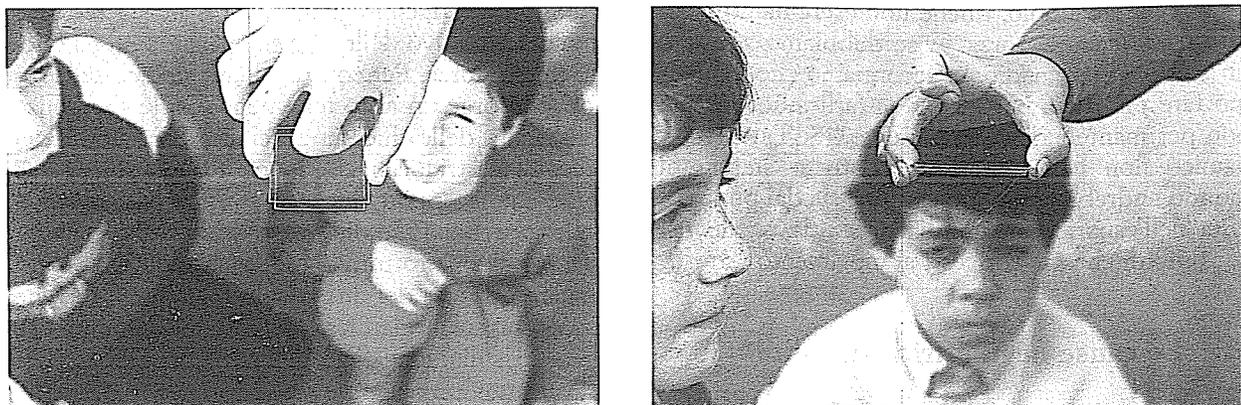


Figura 3.2 - Un limite superiore per le forze d'attrito: le forze di adesione

Due lastre di vetro ben pulite e sovrapposte aderiscono l'una all'altra. Le forze di adesione sono più intense del peso della lastrina che sta sotto. Per far strisciare le due lastre l'una sull'altra occorre esercitare una forza tanto più grande quanto maggiore è l'estensione della superficie di contatto.

c'è più scorrimento fra superfici, ma tra queste sono interposti grani da rompere e tritare per proseguire il movimento. È il caso dei chicchi di grano che la mola del mulino deve rompere per avanzare, ad esempio. In questo caso l'adesione è praticamente nulla e gli attriti sono dovuti solamente alle forze che si manifestano durante la rottura dei chicchi. Nella maggioranza delle situazioni quotidiane, tuttavia, i due aspetti sono sovrapposti, predominando l'uno o l'altro a seconda dei casi.

È del tutto intuitivo e si capisce facilmente, che le forze di attrito statico e radente aumentano con l'aumentare dello schiacciamento reciproco delle superfici. Esso provoca infatti sia un aumento dei piccoli incastri fra le asperità superficiali, sia una diminuzione della distanza media fra gli elementi delle due superfici direttamente affacciati, il che si traduce in un incremento delle zone in cui si possono risentire le forze di adesione e in un aumento delle loro intensità nelle zone in cui già agivano.

D'altronde tutti sappiamo che più un corpo pesa, più è grande la forza che dobbiamo applicare per spostarlo su una superficie orizzontale: è una relazione d'ordine che stabiliamo fin dall'infanzia su basi puramente percettive (per riuscire a svitare un coperchio "duro", bisogna "stringere"). A volte per facilitare lo strisciamento di un oggetto molto pesante (un tavolo, un armadio ...) lo solleviamo un po', diminuendo così lo schiacciamento contro le superfici di appoggio e di conseguenza la forza d'attrito.

Generalmente, le forze responsabili dello schiacciamento reciproco delle superfici sono il peso di

uno dei due oggetti e la reazione che ad esso oppone l'altro oggetto. Ci sono però anche situazioni in cui lo schiacciamento è dovuto, parzialmente o totalmente, a forze diverse dal peso. Ciò si verifica, ad esempio, quando si esercitano spinte di schiacciamento per stirare un indumento, piattare una tavola o levigare una superficie; o quando un muratore spiana la malta su una parete verticale con il frettazzo. Anche l'attrito di un tappo di sughero contro il collo della bottiglia non ha nulla a che fare con il peso dei due oggetti.

Consideriamo ora situazioni in cui la forza di schiacciamento è la forza peso e l'effetto dominante quello della scabrosità (come nella maggioranza delle situazioni quotidiane) ed interessiamoci di definire con più precisione il legame fra la forza-peso e la forza d'attrito, mantenendo costante l'estensione ed il tipo delle superfici a contatto. Il tipo di dipendenza funzionale fra forza di attrito e peso può essere allora stabilito tirando con delle molle due, tre, quattro ... blocchi identici sovrapposti (fig. 3.3). Per evitare che con l'aumento dell'attrito si rischi di arrivare a situazioni in cui la molla non reagisce più in maniera elastica e per rendere più immediati i confronti di forze nelle varie situazioni indipendentemente dalle caratteristiche delle molle (linearità o meno del loro comportamento elastico), conviene ogni volta utilizzare, per tirare, tante molle identiche in parallelo quanti sono i blocchi sovrapposti. Si vede così che al momento del distacco gli allungamenti restano sempre circa uguali (fig. 3.3): ciò mostra che raddoppiando, triplicando, quadruplicando ... il peso (e la reazione

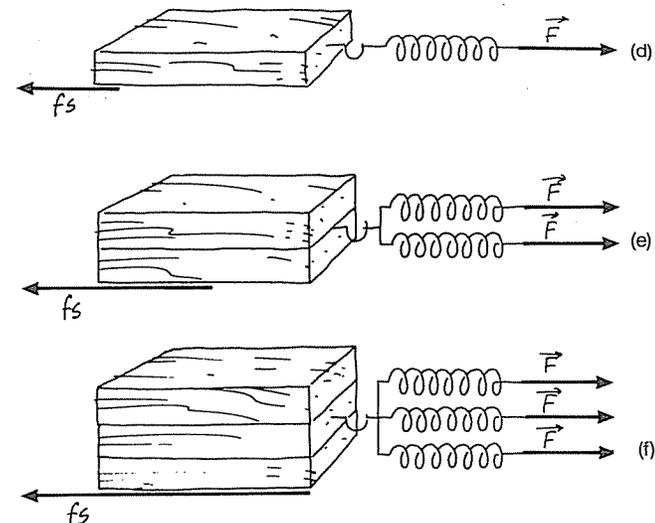
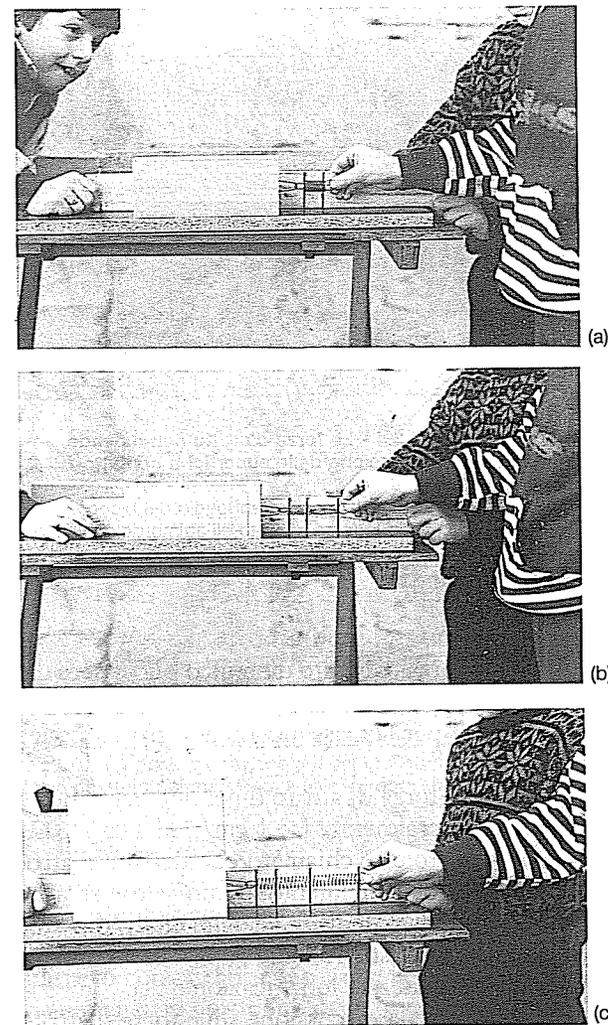


Figura 3.3 - La forza d'attrito è proporzionale al peso

Raddoppiando, triplicando... il peso di un oggetto, raddoppia, triplica... la forza di attrito.

(a) Il bambino tiene la molla sollevata senza tirarla. Sul blocco non agisce nessuna forza orizzontale e la molla si trova nella posizione di riposo.

(b), (c) Tirando due blocchi identici e sovrapposti per mezzo di una molla lineare parallelamente al piano d'appoggio, si osserva all'attimo del distacco che l'allungamento della molla risulta circa il doppio di quello che si osserva tirando un blocco solo (ovviamente c'è una certa imprecisione nella determinazione dell'"attimo del distacco" e dell'allungamento corrispondente delle molle).

È più facile rendersi percettivamente conto della proporzionalità fra forze d'attrito e forze peso se si dispone di tante molle identiche. Basta tirare uno, due, tre... blocchi uguali e sovrapposti rispettivamente con una, due, tre... di queste molle collegate in parallelo (d, e, f). Si vede abbastanza bene che al momento del distacco la lunghezza delle molle è sempre la stessa.

del pavimento), raddoppia, triplica, quadruplica, con un'approssimazione abbastanza buona, la massima forza di attrito statico; c'è dunque proporzionalità fra il peso e il valore dell'attrito al momento del distacco.

Si potrebbe pensare che il valore massimo della forza di attrito statico dipenda dall'estensione della superficie di appoggio fra blocco e pavimento, a parità di peso. Per verificarlo, basta appoggiare lo stesso blocco su facce aventi estensione diversa (beninteso, tutte le facce devono essere dello stesso materiale, ed ugualmente ruvide) e tirarlo ogni volta con la solita molla (fig. 3.4). Così facendo, si può vedere che la molla subisce sempre praticamente lo stesso allungamento al momento del distacco: l'attrito totale non dipende, quindi, dall'estensione della superficie di contatto, a parità di peso e di qualità delle superfici. Questo risultato approssi-

mato ma utile, tutt'altro che intuitivo, può essere spiegato considerando che alla variazione dell'area di contatto corrisponde, a parità di peso totale, una variazione nel senso opposto della pressione responsabile dello schiacciamento. Infatti, se da un lato quando l'area di contatto aumenta c'è un maggior numero di porzioni di superfici affacciate tra cui possono esercitarsi forze di adesione, nonché un maggior numero di sporgenze e cavità tra cui si possono realizzare incastri microscopici, dall'altro lato essendo lo schiacciamento reciproco di minore entità, le forze di adesione sono meno intense ed è minore il numero di incastri fra le asperità superficiali per unità di superficie. (E viceversa se l'area di contatto diminuisce).

Da quanto detto fin qui, deriva che la massima forza d'attrito statico fra un oggetto ed una superficie orizzontale si può esprimere, in funzione del

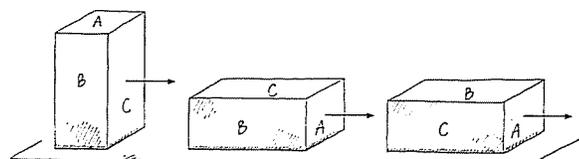
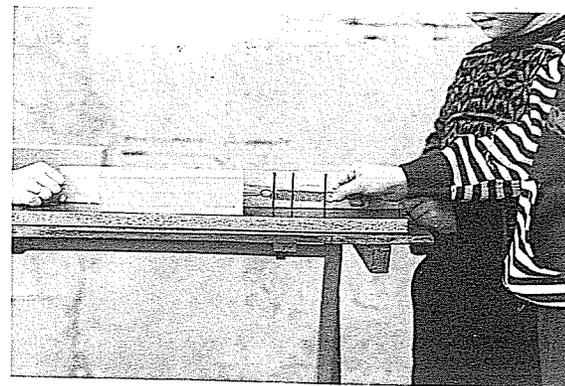
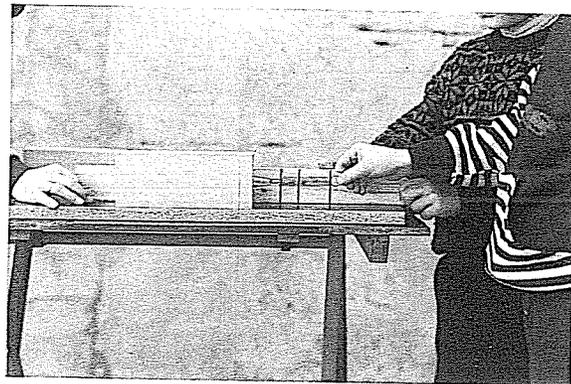


Figura 3.4 - La forza d'attrito non dipende dall'estensione delle superfici a contatto

Cambiando la faccia d'appoggio del blocco, non varia la forza d'attrito all'attimo del distacco.

peso dell'oggetto, con una relazione di proporzionalità del tipo:

$f_s = u_s P$ (f_s = forza massima d'attrito statico; P = peso dell'oggetto).

La costante di proporzionalità u_s è il *coefficiente di attrito statico*, i cui valori dipendono dai materiali di cui sono fatti il blocco e la superficie di appoggio e dal loro grado di ruvidezza. I valori di u_s risultano tanto più elevati quanto più le superfici a contatto sono ruvide, come abbiamo visto, mantenendosi però in genere inferiori all'unità. La massima forza di attrito statico cresce quindi con il peso, ma restando di solito inferiore ad esso.⁸

Se torniamo a considerare quello che avviene da quando iniziamo a tirare un oggetto aumentando gradualmente la forza di trazione, abbiamo per la forza di attrito un andamento del tipo mostrato in fig. 3.5. La forza di attrito f cresce gradualmente, mantenendosi costantemente eguale alla forza F di trazione, finché entrambe non raggiungono il valore della massima forza d'attrito statico $f_s = u_s P$. Fino all'istante in cui ciò avviene, c'è equilibrio fra le due forze ed il corpo non si sposta. Non appena F supera il valore f_s , la forza di attrito diminuisce, non c'è più equilibrio ed il corpo accelera con una accelerazione proporzionale alla differenza fra forza di trazione e forza di attrito (cfr. Cap. I, § 1.8.). Se si continua ad aumentare la forza di trazione, l'intensità della forza d'attrito dinamico non cambia apprezzabilmente, finché il corpo, che ovviamente continua a muoversi con accelerazione crescente, non raggiunge velocità troppo alte.⁹

Anche la forza di attrito dinamico può essere descritta da una relazione approssimata del tipo di quella trovata per la massima forza di attrito statico e cioè:

$f_d = u_d P$ (f_d = forza di attrito dinamico per velocità comprese, generalmente, fra 1 cm/s ed 1 m/s).

Il coefficiente u_d è chiamato *coefficiente d'attrito dinamico* o di scorrimento, ha un valore sempre inferiore a u_s , e, nei limiti di velocità citati, dipende solo dalle caratteristiche delle superfici a contatto (materiale, levigatezza, lubrificazione, ...).

Per terminare la discussione sulle forze d'attrito statico e radente, ci resta da vedere cosa cambia se il piano di appoggio non è orizzontale e se le superfici a contatto non sono asciutte.

Consideriamo, dunque, un blocco appoggiato su un piano inclinato (fig. 3.6). Il blocco può restare fermo o scivolare lungo il piano: le due possibilità dipendono dall'ampiezza dell'angolo di inclinazione e dal grado di ruvidezza delle superfici a contatto, mentre sono indipendenti dal peso del blocco. Se le superfici sono abbastanza lisce (ma non troppo!), lo scivolamento si verifica anche per angoli piccoli.

⁸ Nel caso che siano le forze di adesione a dare il contributo prevalente dell'attrito, abbiamo invece visto che esse possono anche raggiungere valori superiori al peso degli oggetti.

⁹ Ricordiamo che, fra l'altro, al crescere della velocità diventano sempre più intense le resistenze di tipo viscoso, fino a diventare dominanti: vedi Nota 6.

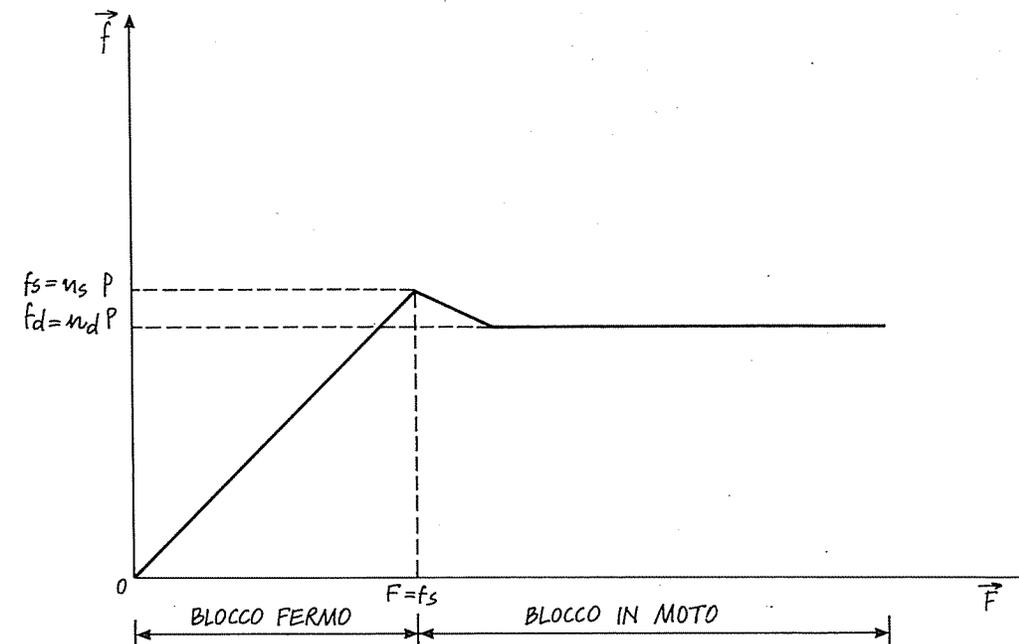


Figura 3.5 - Relazione fra forza d'attrito e forza di trazione

Il comportamento di un blocco sottoposto a forze di trazione (vedi fig. 3.1) è rappresentabile, dal punto di vista della relazione fra forze d'attrito (f) e forze di trazione (F), dal grafico su riportato. Finché F si mantiene inferiore ad $f_s = u_s P$ (massima forza di attrito statico), la forza di attrito f si mantiene uguale ed opposta ad essa (ed il blocco resta fermo). Non appena F raggiunge e supera il valore f_s , il blocco inizia a muoversi e la forza d'attrito cala ad un valore $f_d = u_d P$ minore di f_s , valore che si mantiene sensibilmente costante finché la velocità del blocco si mantiene sufficientemente bassa (in genere minore di 1 m/sec).

Cosa è cambiato rispetto alla situazione in cui il piano era orizzontale? Consideriamo un momento quest'ultima situazione, analizzando il sistema complessivo con cui abbiamo a che fare. Esso è formato da almeno tre corpi: il blocco, il pavimento, la Terra. Il blocco e la Terra, che si attirano per gravità, schiacciano fra di loro il pavimento, provocandone la deformazione. Il pavimento esercita quindi su blocco e Terra delle forze di reazione che equilibrano esattamente le azioni deformanti (Cap. I, § 1.4. e § 1.5.). Tutto ciò è descrivibile, per quanto riguarda il solo blocco, come l'azione su di esso di due forze direttamente opposte: la forza peso (cioè l'attrazione gravitazionale su di esso esercitata dalla Terra) e la reazione del pavimento (dovuta alla sua deformazione). Tutto il peso del blocco è efficace, serve solo per deformare il pavimento: peso e reazione alla deformazione sono pertanto due forze con la stessa direzione, la stessa intensità, ma verso opposto. Se invece il piano d'appoggio è inclinato, non si osserva più che tutta la forza peso del blocco serve solo a deformare la superficie d'appoggio. In parte, in effetti, la forza peso *schiaccia* il piano inclinato, in parte invece esercita un'azione di trazione verso il basso del blocco stesso lungo la direzione

del piano inclinato. Più il piano è inclinato, più è piccola la parte della forza-peso che serve a schiacciare il piano, rispetto a quella che serve a tirare il blocco.

Al limite in cui il piano d'appoggio diventa verticale non c'è più schiacciamento e tutta la forza-peso tira verso il basso il blocco, che cade senza attrito. Quale che sia l'inclinazione del piano, la parte di forza-peso che esercita l'azione di deformazione è sempre esattamente equilibrata dalla reazione del piano alla deformazione stessa. La parte che tira il blocco verso il basso e tende a farlo scivolare lungo la superficie del piano è invece contrastata dalle forze d'attrito che, come sappiamo, dipendono dalle caratteristiche delle due superfici e dalla forza di schiacciamento reciproco. Se la parte di forza peso che esercita l'azione di trazione ha intensità inferiore alla massima forza d'attrito statico, il blocco resta fermo; in caso contrario il blocco inizia a muoversi e scivola con moto accelerato verso il basso.¹⁰

¹⁰ Nel caso particolare che forza d'attrito e forza di trazione siano uguali, il blocco si mette in moto non appena si esercita su di esso una spinta anche minima, e scende lungo il piano inclinato con velocità uniforme e più o meno elevata a seconda della spinta ricevuta.



Figura 3.6 - Perché un blocco appoggiato su un piano inclinato qualche volta resta fermo e qualche volta scivola?

N.B. Per la discussione in classe vedi scheda 6.1.

All'aumentare dell'angolo di inclinazione del piano si sommano due effetti che collaborano al raggiungimento di questa condizione: aumenta la parte di peso che esercita l'azione di trazione sul blocco e contemporaneamente diminuisce la forza di attrito massima, perché diminuisce la parte di peso che esercita l'azione di schiacciamento del blocco contro il piano. Un aumento o una diminuzione di peso del blocco non ha invece nessun effetto sull'equilibrio perché provoca contemporaneamente un aumento o una diminuzione, della stessa entità percentuale, sia della forza di schiacciamento, quindi dell'attrito, che della forza di trazione. Una variazione del materiale o della ruvidezza delle superfici si traduce al contrario nella variazione del solo coefficiente d'attrito, senza influenzare la forza di trazione. Se il coefficiente d'attrito aumenta, aumenta la forza di attrito; ciò consente di raggiungere inclinazioni maggiori del piano senza che il corpo scivoli, rispetto a quanto avviene per coefficienti d'attrito più piccoli. Diamo in nota¹¹ la trattazione quantitativa degli aspetti qui discussi.

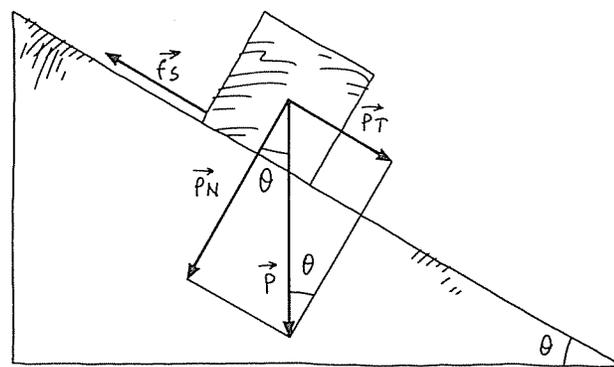
Cosa avviene se le superfici dei due corpi in moto relativo non sono asciutte? Molti liquidi hanno la proprietà di aderire molto bene a quasi tutti i materiali, insinuandosi anche fra le piccole rugosità superficiali. Si viene così a determinare una situa-

¹¹ Diamo per il lettore che ha un minimo di dimestichezza con i vettori e con la trigonometria l'espressione delle due componenti (Cap. VI) delle forze peso P , responsabili rispettivamente dell'azione di schiacciamento (P) e dell'azione di trazione (P_T), in funzione di P e dell'angolo che il piano inclinato forma con il piano orizzontale: $P_N = P \cos \theta$; $P_T = P \sin \theta$ essendo $\vec{P} = P_N + P_T$.

Si nota, quindi, che il corpo resta fermo sul piano inclinato finché è verificata la condizione:

$P_T < f_s$ che, utilizzando le relazioni precedenti diventa: $P \sin \theta < \mu_s P \cos \theta$ da cui ancora si ha $\tan \theta < \mu_s$.

Questa relazione corrisponde sul piano quantitativo alla affermazione che il fatto che il blocco scivoli o no dipende dall'angolo di inclinazione del piano (θ) e dalle caratteristiche della superficie (μ_s), ma non dal peso dell'oggetto.



zione in cui a scorrere l'una sull'altra non sono più le superfici dei due solidi, ma prevalentemente due superfici liquide formate dal "velo liquido" che aderisce ad esse strettamente. Sappiamo che gli strati di un liquido scorrono uno sull'altro con relativa facilità, perché, contrariamente a quanto avviene per i solidi, le forze attrattive che si esercitano tra le diverse molecole di un liquido (forze di coesione) sono abbastanza piccole. Pertanto nella generalità dei casi se le superfici sono bagnate, si passa (almeno parzialmente), da un meccanismo di attrito fra solidi, governato da alte forze di adesione ed incastrici microscopici, ad un meccanismo di attrito fra strati diversi di uno stesso liquido, governato da piccole forze di coesione interna, col che lo scivolamento reciproco delle superfici può venire agevolato anche di molto. Non per niente esiste tutto un ramo industriale che si occupa della produzione di prodotti lubrificanti, per i quali appunto si cerca di costruire miscele che rendano massime le forze di adesione fra lubrificante e materiali di cui sono costituite le superfici, e minime le forze di coesione nel liquido stesso. In un certo senso, all'estremo opposto c'è l'industria dei collanti, che mira ad ottenere prodotti in cui siano massime sia le forze di adesione del collante alle superfici, sia quelle di coesione interna del collante, così da impedire ogni separazione (e non solo il moto relativo).

Per terminare il paragrafo ci restano da considerare le forze d'attrito nel caso di attrito volvente. Viene chiamato *attrito volvente* l'attrito di due corpi in condizioni di rotolamento relativo (sfera su un piano, cilindro su un piano, ruota su un piano, cuscinetti a sfera in un meccanismo, ...).

Consideriamo le ruote di una bicicletta in movimento: esse rotolano sulla strada, l'attrito di strisciamento è praticamente assente (in ogni momento la superficie di appoggio fra ruota e strada è ferma), ma per mantenere costante la velocità è necessario continuare a spingere sui pedali, anche quando la velocità è abbastanza bassa, perché sia del tutto trascurabile la resistenza che l'aria circostante oppone al moto. Quando un corpo rotola, le porzioni delle superfici a contatto subiscono deformazioni più o meno grandi, a seconda della intensità della forza che schiaccia i due corpi uno contro l'altro e della durezza delle superfici. Questo effetto è particolarmente evidente, ad esempio, quando una ruota pesante rotola su una superficie relativamente morbida (un camion che percorre una strada di terra battuta).

Le deformazioni della superficie sono generalmente anelastiche (come quelle che subisce la creta quando viene manipolata), quindi assorbono energia a spese del corpo che rotola e non ne restituiscono. Inoltre esse danno luogo alla formazione di un piccolo "scalino" che viene continuamente "macinato", con un ulteriore dispendio di energia da parte del corpo che avanza. Anche le strade di basalto si consumano e dopo un tempo sufficientemente lungo appaiono i solchi (fig. 3.7).

Un corpo che rotola su un materasso di gommapiuma non deve invece "macinare" scalini. Le deformazioni del materasso sono quasi elastiche quindi c'è restituzione di buona parte dell'energia di pura deformazione. Essa rappresenta però solo una parte dell'energia ceduta dal corpo che rotola, in quanto all'effetto di deformazione si accoppiano vibrazioni del materasso, che si smorzano per attrito interno con sviluppo di calore. L'attrito volvente risulta comunque molto piccolo se i corpi a contatto sono entrambi duri ed elastici, il che avviene per esempio nel caso dell'attrito che si manifesta tra le rotaie di un treno ed i binari. Le leghe di ferro con cui sono costruite le ruote ed i binari sono infatti dure ed elastiche, le loro deformazioni sono piccolissime, c'è pochissimo "macinatio", ed in totale un basso dispendio di energia per vincere l'attrito volvente. (In questo caso la forma di attrito di gran lunga prevalente è la resistenza opposta dall'aria al moto del treno). Si può schematizzare la situazione pensando che la deformazione della rotaia nella zona di appoggio della ruota provochi delle azioni di spinta sulle ruote contigue, e che queste siano



Figura 3.7 - L'attrito consuma le superfici

Le forze di attrito che insorgono tra due corpi in moto relativo sono responsabili dell'usura delle loro superfici. Anche i materiali molto duri, come il basalto, si consumano: i solchi scavati dalle ruote dei carri in transito sono ben visibili su questa antica strada romana, quantunque le forze d'attrito di rotolamento siano molto più piccole delle forze d'attrito di strisciamento.

leggermente più intense anteriormente alla ruota (agendo quindi nel verso opposto a quello del moto) che non posteriormente (concordi al moto), (scheda 3.1). La piccola differenza esistente fra queste forze dà luogo ad una forza risultante non solo in verticale (uguale al peso), ma anche in verso opposto al moto: appunto l'attrito volvente. Perché la ruota possa avanzare a velocità costante è ne-

cessario che la forza di attrito volvente sia equilibrata da una forza uguale e contraria che tiri l'asse della ruota: è quello che succede se il veicolo è tirato a rimorchio, oppure se sull'asse agisce un motore.

Naturalmente anche la ruota si deforma (in figura questa deformazione non è riportata); questa deformazione, non perfettamente elastica, a sua volta

contribuisce, che a loro volta contribuiscono alla "forza netta" all'indietro caratteristica dell'attrito volvente. La forza resistente e la perdita di energia che subisce un corpo che rotola risultano molto inferiori a quelle provocate dall'attrito radente, a parità di schiacciamento reciproco dei corpi a contatto. La resistenza e la dissipazione di energia per attrito volvente sono invece tanto maggiori quanto più grandi risultano le deformazioni anelastiche nella zona di contatto. Ad esempio il consumo di carburante, a parità di distanza percorsa, in relazione al trasferimento di energia da un'auto al terreno, è decisamente maggiore se i pneumatici avanzano sulla sabbia che non se avanzano sull'asfalto. D'altra parte nel rotolamento l'attrito dipende in maniera complicata dalla forza di schiacciamento e dalla velocità relativa e non c'è più semplice proporzionalità fra esso ed il peso.

Naturalmente anche nei casi di attrito volvente il sistema complessivo delle forze agenti è "chiuso". Se pensiamo ad una persona che spinge una carriola lungo la strada, notiamo che la strada, la persona, la carriola, la ruota, di nuovo la strada, costituiscono una successione di sistemi tali che ognuno di essi scambia azioni di forza con i sistemi attigui grazie all'azione combinata di attriti, forze di schiacciamento e forze di reazione vincolare; ed a queste azioni di forza corrispondono deformazioni di tutti i corpi interagenti.

3.4. Avvio al lavoro in classe: confronto forze d'attrito-forze muscolari

Andiamo dunque a vedere che tipi di attività di classe possono consentirci di costruire una linea di lavoro sulle forze d'attrito fra solidi.

L'argomento può essere introdotto ponendo una serie di quesiti che contemplino un'ampia varietà di situazioni di esperienza comune, quindi di fenomenologie (più o meno complesse dal punto di vista adulto e disciplinare). Si possono fare domande del tipo: "Perché ci vuole forza per spostare un armadio, per spingere un'automobile il cui motore non parte, per svitare una macchinetta di caffè, per pedalare in bicicletta? ... Chi è che fa forza contro di noi in tutti questi casi? ... Come mai fa forza? ... In che modo fa forza? ..."

In questo modo, come al solito, si fa subito riferimento ad esperienze ben note ai ragazzi, fornendo

una base di discussione immediatamente ricca e stimolante. Inoltre si inizia a dare un primo segnale del fatto che i fenomeni di cui si vuole parlare, anche se appaiono così disparati e diversi, presentano tuttavia degli aspetti comuni che consentiranno di interpretarli sostanzialmente con un unico schema. Le risposte iniziali e la discussione che ne nasce devono servire ad individuare ipotesi di soluzione e ad esplicitare problemi al riguardo, così da incentivare il passaggio ad attività pratiche di controllo.

Generalmente le risposte più elementari consistono nell'individuazione di qualche oggetto come sistema antagonista: si fa forza perché l'armadio, l'automobile, la macchinetta del caffè ... a loro volta fanno forza, "resistono" alle azioni esercitate su di essi. Possono aversi anche risposte più complesse, che fanno riferimento ad altri oggetti (il pavimento, la strada che si oppongono allo strisciamento, le due parti della macchinetta che non si vogliono avvitare o svitare ...) o cercano di individuare variabili più precise, in particolare il peso degli oggetti che devono essere spostati, come "causa" della resistenza che ci viene opposta. (In scheda 3.2 sono riportati alcuni interventi di allievi nella prima discussione in classe).¹²

È opportuno riprendere, nel corso della discussione, gli schemi del fare forza e le regole delle forze e stimolare i ragazzi a ridiscuterli ed a rielaborarli nuovamente; quali sono i vari sistemi coinvolti caso per caso nel fare forza? Formano ancora una catena chiusa? ... È comunque difficile che i ragazzi possano arrivare molto avanti nell'analisi senza fare esperienza. In questo caso quindi non conviene tanto spingerli immediatamente a discussioni più approfondite, quanto a confrontarsi con i fatti. Non appena la discussione che è stata innescata si smorza, o eventualmente tende ad impoverirsi in scontri più o meno individuali

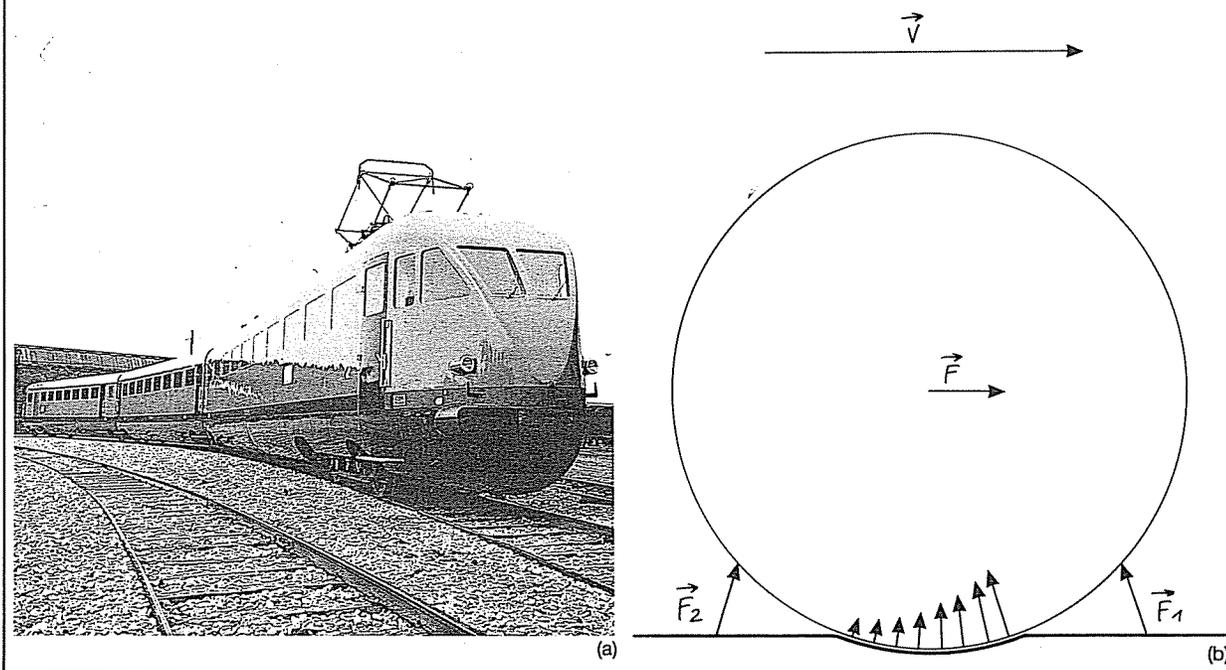
¹² Non c'è da stupirsi dell'apparente povertà delle risposte dei ragazzi, confrontandole con la ricchezza delle acquisizioni raggiunte nel corso delle attività svolte in precedenza: come abbiamo già detto è difficile applicare schemi, regole e modelli, costruiti ed acquisiti indagando su un determinato campo di fenomeni, ad altre aree fenomenologiche. Se si vuole educare alla conoscenza del mondo, e non fare nozionismo, diventa necessario ritornare pazientemente sui problemi, senza attendersi che averli affrontati e risolti in qualche situazione particolare sia sufficiente perché vengano definitivamente superati e cognitivamente gestiti nella loro generalità.

Scheda 3.1 - L'attrito di rotolamento

Per mantenere in movimento un treno a velocità costante (a) è necessaria l'azione di una forza e bisogna spendere energia, anche nel caso in cui procede a velocità bassissima, così da poter trascurare l'attrito con l'aria. Le zone di contatto tra rotaia e ruote si deformano e si consumano e ciò comporta un consumo di energia. In (b) viene data una rappresentazione schematica dell'azione delle forze d'attrito. V è la velocità della ruota in transito.

Sotto di essa, la rotaia deformata per schiacciamento reagisce esercitando sulla ruota reazioni punto per punto pensabili come perpendicolari alla superficie deformata. L'intensità di queste reazioni non è simmetrica: esse sono un po' più intense anteriormente alla ruota, dove è in atto una deformazione sia plastica sia elastica, che non posteriormente, ove la deformazione plastica ha già avuto luogo e quindi non contribuisce più alle forze di reazione. In definitiva l'insieme di queste forze ha come forza risultante una forza diretta in verso opposto al moto: la forza di attrito volvente. Un discorso analogo può essere ripetuto per le deformazioni della ruota. In definitiva, si conclude che la ruota può avanzare solo se al suo asse è applicata una forza di trazione F uguale ed opposta al risultante delle forze di deformazione.

N.B. L'estensione della zona di contatto è volutamente esagerata rispetto a quella reale.



spesso basati sulla volontà di imporsi, è il caso di passare all'esperienza, o raccogliendo eventuali sollecitazioni di allievi, o proponendone in prima persona.

Basta far confrontare i ragazzi con alcuni dei fatti che sono stati da loro menzionati: si fanno rotolare e strisciare oggetti diversi per materiale, forma, peso,¹³ si fanno avvitare e svitare caffettiere e barattoli, si fanno usare macinini manuali per il caffè, la carne, la verdura ... (fig. 3.8). Cosa si può notare nelle varie situazioni?

Le sensazioni di sforzo muscolare, avvertite mentre si tirano o si spingono oggetti per farli strisciare o rotolare, permettono a tutti di giungere alla consapevolezza della correlazione fra la forza che occorre esercitare per metterli in moto o per mantenerveli, ed il peso degli oggetti. (Abbiamo già detto che probabilmente questa relazione sarà già stata esplicitata da qualche ragazzo nella discussione preliminare). In effetti se si stimolano i ragazzi a descrivere ed a rappresentare quello che accade, tutti individuano facilmente questa dipendenza: è facile spostare un banco od una sedia facendoli strisciare sul pavimento; più difficile, nel senso che occorre fare una forza maggiore, far strisciare la cattedra; può essere impossibile spostare un armadio pieno di libri anche se a spingerlo sono molti bambini contemporaneamente ... È immediato riconoscere che ciò avviene per la differenza dei pesi.

¹³ Armadi, banchi, sedie, biciclette, scatole piene e vuote, la macchinetta del caffè, il macinino ... perfino blocchi di costruzione e tronchi d'albero, se si ha la fortuna di averne a disposizione.

Sovrapponendo due, tre ... banchi il peso totale diventa due, tre ... volte più grande e la forza che occorre fare per farli strisciare aumenta. Lo stesso effetto si ha disponendo i banchi in fila ... In definitiva tutta una serie di esperienze possono evidenziare che più un oggetto (o un insieme di oggetti), pesa, più diventa grande la forza che occorre fare per farlo strisciare.

Può anche succedere, come è avvenuto nella sperimentazione che abbiamo condotto, che una parte dei ragazzi arrivi ad escludere che sia soltanto il peso la forza contro cui bisogna misurarsi quando si vuole trascinare un oggetto su una superficie, anche se tutti riconoscono che il peso "c'entra". Si possono seguire almeno due strade per arrivare a questa conclusione. Si può provare sia a sollevare che a trascinare uno stesso oggetto e ci si accorge (tanto più quanto più è pesante) che ci vuole più forza per sollevarlo che non per trascinarlo. Al limite non si riesce affatto ad alzarlo, mentre si riesce a trascinarlo. Si può anche fare un tipo di ragionamento più teorico: alcuni bambini, infatti, escludono che il peso sia la forza contro cui si deve spingere, in base al fatto che comunque esso è sempre bilanciato dalla reazione del piano di appoggio. Non è comunque un problema facilmente risolvibile attraverso la sola discussione: come vedremo più avanti si possono eseguire delle esperienze quantitative, perché tutti i ragazzi possono convincersi di come effettivamente stanno le cose.

Giocando con una bicicletta i ragazzi possono confrontare quello che succede se fanno muovere a mano i pedali per far girare le ruote con la bicicletta capovolta, oppure pedalando normalmente su superfici diverse (asfalto, terra battuta, cemento, pavimento ...); possono spingere la bicicletta da sola,

Scheda 3.2 - Le forze d'attrito: discussione introduttiva

Ricercatore: "Se vogliamo far muovere una macchina che non parte, andare in bicicletta, far strisciare un armadio sul pavimento, avvitare o svitare una macchinetta per caffè... contro chi facciamo forza? Chi fa forza contro di noi?"

I ragazzi discutono.

"Quando spingiamo l'armadio o una macchina, l'armadio e la macchina fanno forza contro di noi... Fanno forza il pavimento e le strade perché resistono, fanno resistenza".

"Quando spingiamo dobbiamo fare forza contro il peso perché se l'oggetto è più pesante dobbiamo fare più forza".

"Nessuno fa forza perché l'armadio non può fare forza e dall'altra parte non c'è un'altra persona".

"Quando andiamo in bicicletta fanno forza i pedali contro i piedi..."

"Quando svitiamo o avviamo una macchinetta [da caffè, n.d.A.] dobbiamo fare forza... fa forza la macchinetta".

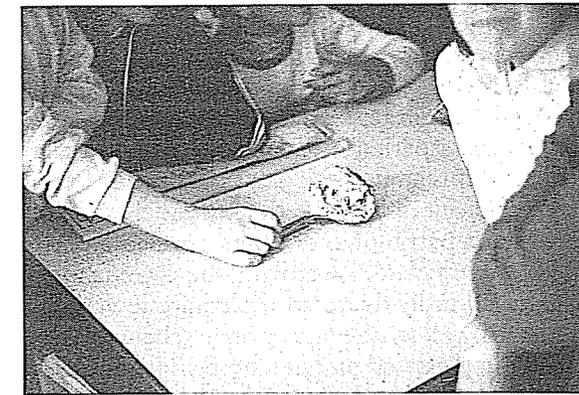
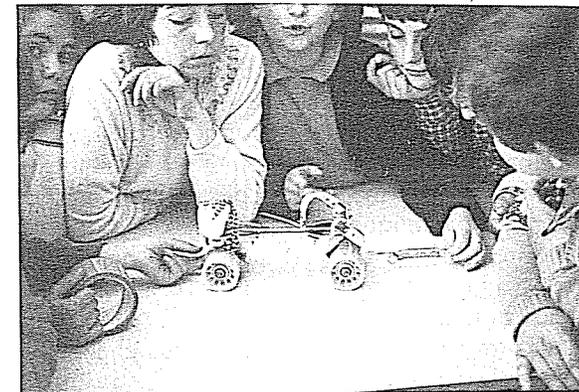
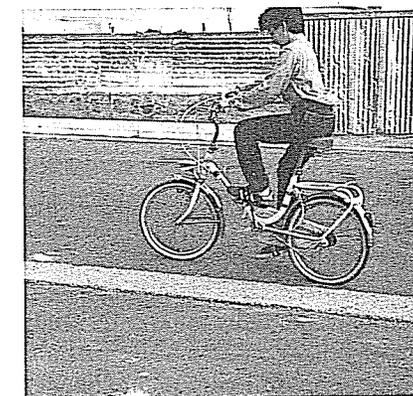


Figura 3.8 - Perché in tutte queste situazioni dobbiamo fare forza? Che cosa fa forza contro di noi?

oppure con uno di loro seduto sopra; senza usare i freni, frenando poco, o stringendo i freni con tutta la forza ... Si può così constatare, generalizzando, che anche nel caso del rotolamento un aumento del peso richiede un aumento della forza necessaria per

far muovere un oggetto. In più, si vede che la forza esercitata dipende dal tipo di superficie su cui l'oggetto rotola; che il movimento è tanto più difficile quanto più i tacchetti dei freni schiacciano i cerchioni delle ruote; che ci vuole molta meno forza

per far rotolare qualcosa che non per farla strisciare. Giocando con i macinini a mano ci si rende conto che la forza da esercitare per sminuzzare caffè, orzo, carne, verdure, pezzetti di frutta ... è sempre massima appena si inizia a girare la manovella, diminuisce man mano che i pezzetti diventano più piccoli e comunque è diversa a seconda di quanto "è duro" il materiale da frantumare. Analogamente per avvitare un coperchio su un barattolo, o i due pezzi di una caffettiera fra di loro si "sente" che si deve fare sempre più forza man mano che si avvita, e viceversa per svitare. Si può arrivare a comprendere, per analogia a quanto visto negli altri casi, che ciò accade perché le due parti si incastrano e si schiacciano sempre di più una contro l'altra.

In scheda 3.3 sono riportati alcuni brani delle discussioni dei ragazzi durante e dopo l'esecuzione delle varie esperienze. È evidente, rispetto alla discussione preliminare, il salto di qualità compiuto nelle capacità di analisi e di lettura dei fatti, da cui emerge un patrimonio di conoscenze ed esperienze ricco ed articolato. Le attività libere guidano così i ragazzi ad individuare ed esplicitare le variabili in gioco ed a costruire una prima schematizzazione della complessa ed ampia fenomenologia che si sta indagando.

In tutte le situazioni esaminate si possono far individuare ai bambini, caso per caso, le catene chiuse dei corpi materiali interagenti, cui corrispondono le catene chiuse delle forze che mutuamente essi si scambiano.

Se ne può discutere e si può chiedere che facciano dei disegni che evidenzino gli scambi di forze; per chi ha più difficoltà (nonostante tutti i lavori precedenti!) si può ricorrere, al solito, ad esperienze specifiche che mettano in luce il ruolo dei diversi componenti della catena di sistemi materiali. Per tutti i casi in cui i bambini fanno rotolare o strisciare oggetti ed in cui devono riconoscere che:

- 1) l'oggetto fa forza contro di loro e contro il pavimento;
- 2) loro fanno forza contro l'oggetto e contro il pavimento;
- 3) quest'ultimo infine fa forza contro l'oggetto e contro di loro; l'interazione che può presentare più difficoltà ad essere riconosciuta è quella bambino-pavimento. Ad evidenziarla basta però far mettere il bambino su un tappeto scivoloso o su un paio di pattini quando deve spingere o tirare oggetti che presentino un attrito abbastanza alto: il bambino non riesce più a spostarli.

Con un barattolo od una caffettiera da avvitare e svitare quella che deve essere riconosciuta è la totale simmetria delle forze che si esercitano fra i due pezzi che si incastrano. In effetti nel linguaggio comune si parla di "avvitare" e "svitare" coperchi, per "chiudere" ed "aprire" barattoli. In questo caso dovrebbe bastare però un minimo di attenzione percettiva per rendersi conto che si fa forza con entrambe le mani; comunque basta passare un po' di acqua, o ancora meglio di olio, una volta sulla mano che tiene il coperchio, poi su quella che tiene il barattolo ed infine magari su tutte e due, per accorgersi chiaramente di quello che succede: diventa infatti evidente la catena chiusa formata dal coperchio che fa forza contro la mano e contro il barattolo, dal barattolo che fa forza contro il coperchio e contro l'altra mano, dal bambino che attraverso le mani fa forza contro il barattolo e contro il coperchio. Quando lavorano con macinini vari, i bambini dovrebbero riconoscere facilmente che loro stessi fanno forza tramite le due mani, contro la manovella e contro la scatola (analoghi a coperchio e barattolo!), che la manovella fa forza contro una mano e contro i chicchi, i chicchi contro la manovella e contro la scatola; la scatola infine contro i chicchi e contro l'altra mano. (Può essere istruttivo far constatare ai ragazzi che si può macinare anche tenendo ferma la manovella e girando la scatola, ma è molto più scomodo e faticoso!). La catena è molto evidente: qualunque contatto venga eliminato, non si può fare più niente.

Le cose sono più complesse nel caso della bicicletta, come abbiamo visto nel paragrafo precedente. Certamente troppo perché i bambini ricostruiscono tutto da soli, tanto più che non è facile escogitare esperienze semplici per evidenziare le modalità attraverso cui i vari sistemi coinvolti scambiano forze l'uno con l'altro. Si può al più tentare qualche spiegazione per chi volesse affrontare spontaneamente il problema, soprattutto per evitare che i bambini possano darsi spiegazioni errate o fuorvianti. È evidente che l'uomo fa forza con i due piedi contro la bicicletta, la bicicletta fa forza contro l'uomo attraverso i pedali e contro il terreno attraverso le due ruote, il terreno fa forza contro la bicicletta attraverso le due ruote. (In effetti la seconda ruota non è essenziale al movimento: gli acrobati al circo, o addirittura degli animali ammaestrati, sanno andare avanti su una ruota sola fornita di pedali!).

Scheda 3.3 - Prime esperienze sull'attrito: la discussione mette a fuoco i problemi di spiegazione/interpretazione dei fatti

I ragazzi eseguono le prime esperienze sull'attrito (vedi fig. 3.8) e discutono caso per caso, quello che succede. Riportiamo brani di discussione relativi a più situazioni:

Qual è il ruolo del peso quando si spinge o si tira un oggetto sul pavimento?

"Quando spingiamo l'armadio più facciamo forza più aumenta la forza che fa l'armadio appoggiato sul pavimento... l'armadio non si muove perché è molto pesante, fa molta forza e non riusciamo a spostarlo".

"Un bambino o un uomo da solo non riesce a far muovere un'automobile ferma perché è molto pesante e bisogna fare una forza molto grande... solo il motore riesce a farla".

"... No... non è il peso che fa forza perché il peso e la resistenza del pavimento sono uguali ... l'armadio fa forza appoggiandosi sul pavimento".

"Quando un oggetto è appoggiato su una superficie solida il peso-forza si divide in due parti ... la prima per sostenersi sulla superficie e l'altra per non farsi trascinare".

"L'avversario che spinge contro di noi è il peso perché se tiro la cattedra riesco a farla strisciare, ma non riesco a sollevarla perché è molto pesante".

"Il peso è uguale alla forza che fa il pavimento per sostenerlo... e sono pari... L'avversario non può essere il peso".

"Il corpo più è pesante più la forza che dobbiamo fare aumenta".

"... L'avversario non è il peso, ma dipende dal peso ... più un oggetto è pesante più forza dobbiamo fare per spingerlo...".

Non è solo il peso che conta.

"Dobbiamo fare più forza per fare strisciare il blocco di tufo nel cortile di terra... sul pavimento dobbiamo fare meno forza".

Cosa si scopre giocando con una bicicletta?

"Bisogna fare poca forza per far muovere la bicicletta, però se si mette un sacco pieno di patate o si tirano i freni e i tacchetti schiacciano dai due lati i cerchioni delle ruote, allora bisogna fare molta forza".

"Tirando moltissimo i freni le ruote non possono più rotolare e strisciano, diventano calde, si consumano e lasciano le strisce per terra".

"Anche quando un'automobile frena bruscamente o frena all'improvviso le ruote si sgommano e lasciano le tracce sulla strada".

"Quando le ruote della bicicletta non possono rotolare dobbiamo fare più forza per farla strisciare e la forza aumenta quando uno di noi si mette sopra".

Giocando con un macinino da caffè.

"Quando i chicchi di caffè sono interi dobbiamo fare più forza per far girare la manovella".

"Se al posto dei chicchi di caffè mettiamo sassolini non riusciamo a far girare la manovella, perché per rompere i sassolini ci vuole molta forza e noi non ci riusciamo".

"Se mettiamo i chicchi d'uva dobbiamo fare meno forza perché si rompono facilmente".

E con una caffettiera.

"Quando avviti i due pezzi di una caffettiera all'inizio facciamo poca forza poi man mano che l'avvitiamo dobbiamo fare con le mani una forza sempre più grande..., perché i due pezzi si sono incastrati".

"Più si avvita più bisogna fare forza con le due mani per avvitare ancora..., perché i due pezzi si incastrano e si schiacciano di più".

"È come quando i due tacchetti spingono ai due lati il cerchione della bicicletta. Quando si svita prima dobbiamo fare molta forza e poi la forza diventa sempre più piccola, perché i due pezzi sono meno incastrati".

Però è importante accorgersi che anche con le mani si fa forza sul manubrio (pensare alla salita!) e soprattutto che sarebbe impossibile andare in bicicletta nel modo in cui siamo abituati se il peso non schiacciava complessivamente il nostro corpo contro la bicicletta e la bicicletta contro il terreno.

3.5. Confronto tra forze elastiche e forze d'attrito

In questo paragrafo proponiamo alcune esperienze (altre potranno essere pensate dal lettore o dai ragazzi, in risposta a problemi particolari emersi dall'immaginazione o dal lavoro concreto che si va svolgendo), in cui si fa forza contro l'attrito per interposizione di una molla o di un elastico. Scopi delle attività sono:

- 1) precisare meglio, sempre sul piano qualitativo delle relazioni d'ordine, quali sono le variabili in gioco e quali i loro legami reciproci;
- 2) applicare le conoscenze acquisite nello studio delle forze elastiche, in particolare la nozione di simmetria ed equilibrio del fare forza, in un contesto nuovo;
- 3) rendersi conto che la sorgente della resistenza opposta da un oggetto al suo trascinarsi o rotolamento è localizzata nella zona di contatto fra esso ed il pavimento, ed è intuitivamente assimilabile ad una resistenza alla rottura o allo scavalcamento di granelli di materiali più o meno duri;
- 4) proseguire nella costruzione della consapevolezza che chiamiamo *forza* qualunque azione, di qualunque sistema materiale, che possa essere bilanciata da un'azione analoga di un qualunque altro sistema materiale, a partire dall'azione muscolare su cui si basa lo stesso concetto intuitivo di forza.

Queste attività richiedono tra l'altro, di riprendere e ridiscutere criteri di interpretazione costruiti in precedenza in relazione ad altri fenomeni. E ogni volta che vecchi schemi sono utilizzati per costruire interpretazioni e spiegazioni coerenti di nuovi fenomeni, essi non solo si precisano e si consolidano, ma acquistano per i ragazzi un significato più generale, divenendo organizzatori cognitivi sempre più flessibili delle nostre conoscenze sul mondo naturale ed artificiale. È il caso, in questo momento, degli schemi di simmetria e di causa.

È infatti importante per la comprensione di ognuna delle esperienze che andremo a proporre,

che i ragazzi siano per esempio sicuri che una molla "fa forza uguale ai due lati", cioè che le forze elastiche esercitate sui sistemi esterni da una molla deformata sono ugualmente intense ai suoi due estremi. È necessario che questa regola sia chiaramente esplicitata in corrispondenza di ogni esperienza: e questo può, appunto, portare a ridiscussioni successive. È altrettanto importante e necessario che i ragazzi sappiano analizzare e rappresentare i sistemi che fanno forza quando si ha a che fare con un oggetto appoggiato su una qualunque superficie rigida. Supponiamo che ci sia un dizionario appoggiato su un banco: bisogna che i ragazzi sappiano (e lo sappiano dire, e disegnare), che il banco è "schiacciato" fra la Terra e il dizionario, i quali si attraggono reciprocamente; che questo schiacciamento provoca delle deformazioni e quindi delle reazioni, nel banco schiacciato; che la doppia *forza di schiacciamento* è il *peso* del dizionario; che la reazione del banco sul dizionario è ad esso uguale e contraria (fig. 3.9). Dal punto di vista di un approfondimento del discorso sull'attrito bisogna in particolare che si riesca a vedere che se si considera l'interazione fra oggetto appoggiato e corpo a cui si appoggia (il tavolo, il pavimento, la strada ...); il peso dell'oggetto e la reazione dell'appoggio sono uguali e opposte (perché, con una frase di bambino, "il pavimento non si sfonda ed il corpo non si muove verso l'alto").

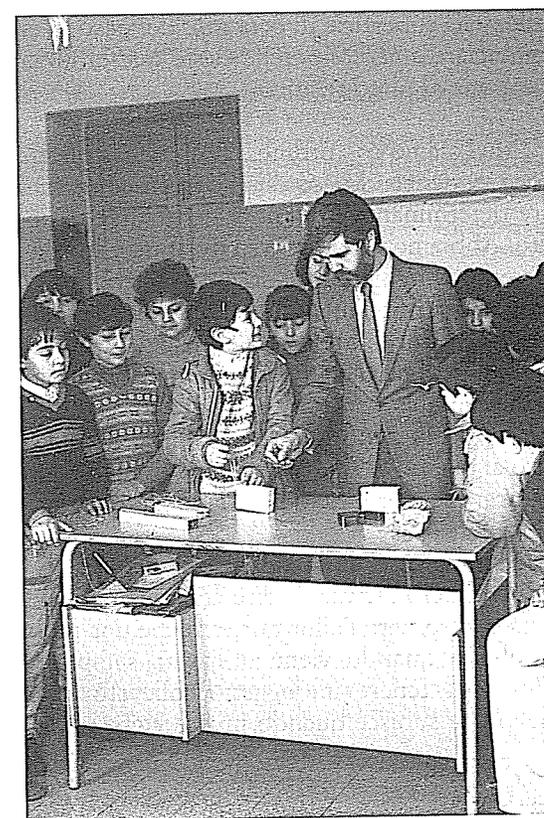
ATTIVITÀ

Ritorniamo alle attività di classe. I ragazzi hanno dunque avuto modo di constatare che quanto avviene in diverse situazioni di trascinarsi o rotolamento di oggetti su una superficie orizzontale dipende da vari fattori, tra cui il peso degli oggetti stessi. Si può chiedere loro, a questo punto, di prevedere cosa succede se nelle varie situazioni esaminate gli oggetti vengono tirati tramite una molla; si può poi passare ad eseguire le corrispondenti esperienze, che possono essere prima svolte in gruppi e poi discusse collettivamente.

A differenza delle esperienze del paragrafo precedente, non è opportuno in questo caso usare oggetti qualunque. Bisogna infatti che molla ed oggetti siano reciprocamente adatti, cioè che la forza d'attrito al distacco non sia superiore al limite di elasticità della molla, per non rovinarla, e neanche troppo piccola rispetto alla sua rigidità, altrimenti gli allungamenti sono troppo piccoli per consentire di compiere osservazioni abbastanza accurate. È quindi utile che l'insegnante prepari in anticipo il

materiale da utilizzare, anche se è sempre importante che ai ragazzi siano presentate necessità di scelta, che impongano una migliore comprensione dei fatti. Convieni poi usare oggetti che possono essere spostati su una superficie offrendo sia attrito radente che attrito volvente, e che possano essere variamente appesantiti. Vanno benissimo a questi scopi carrelli, pattini a rotelle, le cui ruote possono o essere lasciate libere e ben lubrificate, o bloccate; nonché barattoli da trascinare e far rotolare. Quanto alle molle è essenziale averne diverse con rigidità crescente, oppure uguali e da collegare in parallelo, così da poter realizzare esperienze usando oggetti che abbiano pesi crescenti con la sicurezza che il limite di elasticità non venga mai superato.

Nel momento in cui i ragazzi iniziano a cercare di spostare gli oggetti tirandoli con molle non solo possono verificare, in accordo alle precedenti esperienze, che l'allungamento della molla, e quindi la forza d'attrito, dipende dai fattori già individuati (natura delle superfici: rotolamento o strisciamento: peso degli oggetti), ma possono osservare anche altri aspetti del fenomeno:



1) l'allungamento al momento del distacco cambia a seconda della direzione in cui l'oggetto viene tirato; esso è minimo se viene tirato orizzontalmente;

2) la molla inizia ad allungarsi sempre più senza che l'oggetto si sposti, finché, nel momento in cui c'è il distacco, improvvisamente l'allungamento raggiunto subisce una diminuzione più o meno sensibile e, se l'oggetto è trascinato a velocità moderata e senza strappi, non cambia più durante il trascinarsi, anche a velocità diverse.

Il primo tipo di osservazione richiede sia un'interpretazione di ciò che avviene, sia una decisione sul modo di comportarsi nello svolgimento delle esperienze. Perché gli allungamenti sono diversi se si tira la molla con inclinazioni diverse? Si può far discutere i ragazzi, facendo fare l'esperienza a tutti; dovrebbero arrivare a scoprire, da soli o con l'aiuto dell'insegnante, che quando una molla è orizzontale (fig. 3.10 a) si fa forza solo per spostare l'oggetto, mentre quando è inclinata si fa anche forza per sollevarlo (fig. 3.10 b), oppure per "schiacciarlo" con-

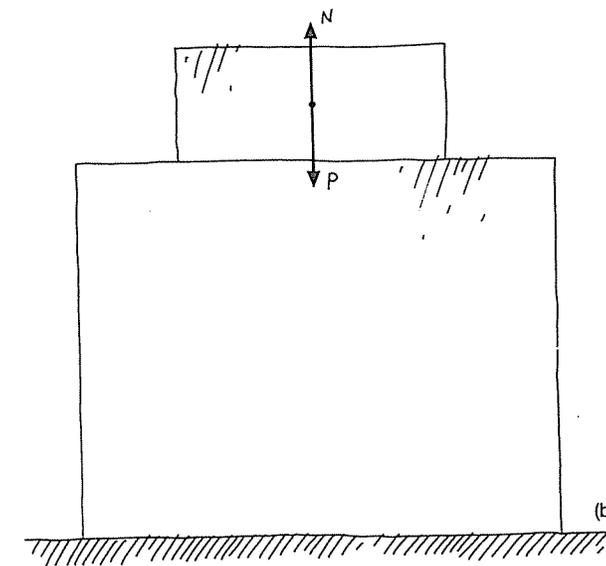


Figura 3.9 - Le forze lungo la direzione verticale si compensano esattamente

(a) La cattedra viene "schiacciata" tra gli oggetti ed il pavimento da due forze uguali alla somma dei pesi degli oggetti. La cattedra resiste facendo contro gli oggetti e contro il pavimento due forze uguali al peso totale.

(b) Rappresentazione delle forze agenti su un oggetto appoggiato sulla cattedra.

tro la superficie d'appoggio (fig. 3.10 c).¹⁴ Stabilito ciò, si può decidere che ogni volta le esperienze dovranno essere eseguite tirando in direzione orizzontale, così da garantirsi che la forza esercitata è interamente diretta allo spostamento dell'oggetto. È da notare che la molla si allunga in maniera diversa anche se ne cambia la direzione sul piano orizzontale: non serve la stessa forza per produrre una pura traslazione dell'oggetto sul piano, una pura rotazione, o una sovrapposizione dei due movimenti. In tutto questo testo ci riferiremo esclusivamente a movimenti e forze di pura traslazione, che si realizzano quando la direzione della forza di trazione incontra la verticale passante dal baricentro dell'oggetto (fig. 3.10). Anche se la trattazione dei movimenti delle forze e delle conseguenti rotazioni resta fuori dalla discussione esplicita, è tuttavia importante essere pronti a raccogliere le (quasi) inevitabili osservazioni dei bambini al proposito. "Ci vuole molto meno forza per farlo girare che per farlo spostare": è vero.

Il secondo tipo di osservazione pone in evidenza la necessità di distinguere due fasi diverse: la fase in cui l'oggetto tirando non si sposta e quella in cui viene effettivamente trascinato: la prima caratterizzata dalla possibilità, da parte dell'attrito, di esercitare una forza variabile da zero ad un massimo, raggiunto il quale si ha distacco; la seconda caratterizzata dall'esercizio, da parte dell'attrito, di una forza definita, minore di quella esercitata al distacco (sempre che l'oggetto sia spostato lentamente ed a velocità uniforme, altrimenti la forza varia anche in proporzione al cambiamento di velocità). La decisione operativamente migliore è ancora quella di cominciare a studiare gli allungamenti delle molle al momento del distacco in quanto essi hanno, caso per caso, un valore ben definito e sono identificabili e riproducibili con una certa accuratezza.¹⁵

Definito dunque il modo di operare, i ragazzi devono analizzare in classe ognuna delle esperienze

¹⁴ Si confronti il Cap. VI sull'aspetto vettoriale delle forze, in particolare da scheda 6.1 dove viene riportata la discussione degli allievi.

¹⁵ Si deve aver cura di aumentare molto lentamente le forze con cui si tira, in modo da poter controllare momento per momento l'allungamento della molla attraverso l'allineamento dall'estremo che si tiene in mano con un riferimento fisso, per esempio costituito da un metro per falegname o sarto ... che in questo caso può essere appoggiato sulla stessa superficie su cui è appoggiato l'oggetto. (Cfr. fig. 3.10: i traguardi segnati corrispondono agli allungamenti delle molle all'atto del distacco dell'oggetto in varie situazioni).

effettuate in termini di forze scambiate dai vari sistemi coinvolti (compresi i loro stessi corpi). Ricordandosi della simmetria delle forze applicate ai due estremi della molla, essi possono individuare quest'ultima come "misuratore" dell'entità delle forze da cui è deformata: la forza muscolare da un lato e la forza di attrito che si oppone allo spostamento di un oggetto dall'altro, fra loro uguali ed opposte.

Possono essere così oggettivamente confrontate anche situazioni difficilmente (o per nulla) confrontabili attraverso le percezioni dirette di sforzo muscolare. È possibile confrontare quello che ha fatto un ragazzo con quello che ha fatto un altro, si possono evidenziare piccole differenze nelle forze esercitate non avvertibili percettivamente; si eliminano le illusioni percettive legate al particolare modo di fare forza volta a volta utilizzato ...¹⁶ È in definitiva possibile sia verificare le acquisizioni già raggiunte nel corso delle esperienze precedenti, sia raggiungerne di nuove su problemi rimasti aperti.

Procedendo come nel caso delle forze elastiche, per separazione di variabili, si possono, infatti, eseguire esperienze sistematiche per studiare l'influenza del tipo di attrito (radente o volvente), del tipo di superfici a contatto (più o meno ruvide), dell'estensione della superficie di contatto, del peso. E si può cominciare a capire perché esiste questa forza che si oppone al moto relativo.

Procediamo con ordine. L'esperienza quotidiana evidenzia il peso degli oggetti come fattore determinante dell'entità delle forze di attrito. Abbiamo visto che tra i bambini c'è generalmente chi ritiene che sia proprio il peso la forza che si oppone al moto, anche se è possibile che alcuni alunni sin dall'inizio delle attività ed altri eventualmente in seguito, lo escludano. Si può dunque decidere di iniziare a studiare proprio l'effetto del peso, chiedendo anzitutto ai ragazzi se si possa trovare un modo per verificare se è proprio il peso la forza resistente che si cerca.

Da soli o con l'aiuto dell'insegnante, i ragazzi dovrebbero arrivare a dire che per stabilirlo basta confrontare l'allungamento che una molla subisce quando viene utilizzata semplicemente per tenere un oggetto sollevato, con quello che subisce quando invece viene utiliz-

¹⁶ Vedi Cap. I.

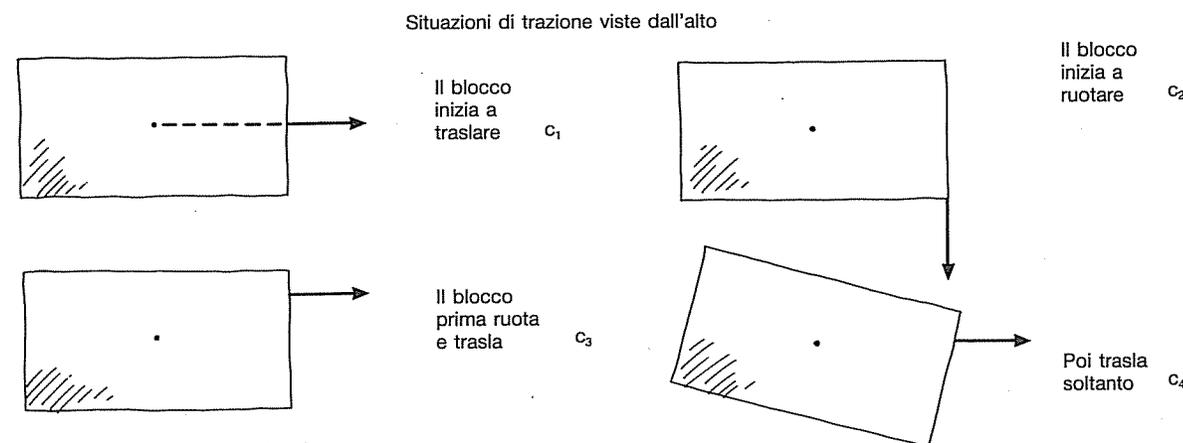
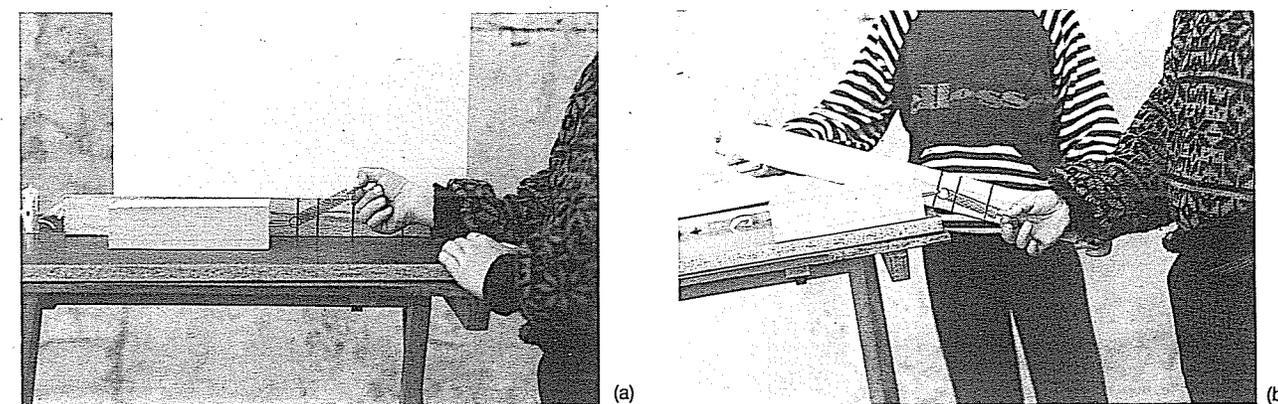


Figura 3.10 - Misura delle forze d'attrito

(a) Il blocco viene tirato con una molla diretta orizzontalmente al piano di appoggio. La forza elastica della molla, misurata dal suo allungamento, è uguale alla forza di attrito.

(b), (c) Il blocco tirato con la molla diretta verso l'alto (b) e verso il basso (c). Nei due casi l'allungamento della molla risulta maggiore che nel caso (a). In (b) si fa forza sia contro la forza di attrito sia contro il peso del blocco. La forza di attrito è minore che in (a) perché l'oggetto è parzialmente "tirato verso l'alto", ma la diminuzione dell'attrito resta inferiore alla parte di forza impiegata per "tirare verso l'alto" l'oggetto. In (c) si fa forza sia per schiacciare il blocco contro il tavolo, sia per farlo muovere. A causa dello "schiacciamento" la forza di attrito è maggiore che in (a). La forza complessivamente esercitata dalla molla è dunque, a parità di inclinazione rispetto all'orizzontale, maggiore che in (b). (d) Le situazioni (a), (b), (c) sono tutte del tipo 1 (moto di pura traslazione).

zata per tirarlo, fino al distacco¹⁷ (fig. 3.11). Naturalmente l'esperienza va ripetuta in varie condizioni: i ragazzi possono così constatare che sia che il corpo rotoli o strisci (per il pattino sia che le ruote siano libere sia che siano bloccate), sia che sia trascinato su superfici molto ruvide che su superfici molto lisce, sia che sia appesantito o no ... L'allungamento della molla è comunque maggiore quando è usata

ATTIVITÀ

¹⁷ Naturalmente, bisogna che la molla sia in grado di reggere il peso dell'oggetto senza deformarsi in maniera anelastica. Ciò può significare che la forza di distacco può essere, se si tratta di attrito volvente, così piccola da non provocare allungamenti sensibili in quella stessa molla. In questo caso, per evidenziare che comunque esiste una forza d'attrito, si deve ricorrere ad una molla più sensibile, anche se non utilizzabile per sollevare l'oggetto.

per tenerlo sollevato che non quando è usata per trascinarlo.

Ciò conferma, o porta ad ammettere, che la forza peso e la resistenza allo spostamento sono due forze diverse. Può venire il dubbio che sia comunque una parte del peso che esercita l'azione di resistenza, mentre l'altra parte continua a schiacciare la superficie d'appoggio. Anche questo può essere verificato, attrezzandosi di una bilancia pesa-persona e di una tavola di legno od altro materiale.

Si pone la tavola sulla bilancia e l'oggetto da tirare, per esempio il pattino con le ruote ben lubrificate, sulla tavola, e si fa leggere il peso complessivo, della tavola e del pattino. (cfr. fig. 3.12). Si fa poi muovere il pattino tirandolo

ATTIVITÀ

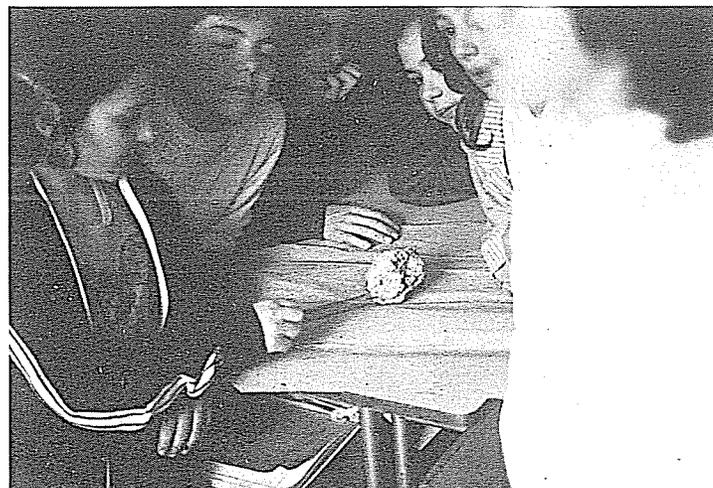


Figura 3.11 - La forza d'attrito è sempre minore del peso

Utilizzando una molla si può vedere facilmente che la forza di attrito su qualunque superficie è minore del peso.

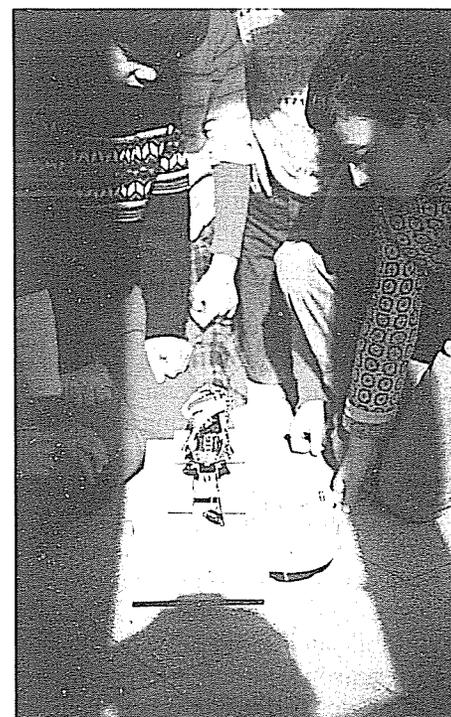
orizzontalmente con una molla e si può constatare che la bilancia continua sempre a segnare lo stesso peso. Succede la stessa cosa se si bloccano le ruote del pattino con nastro adesivo. Solo che in questo caso bisogna tirare con una forza decisamente maggiore per farlo muovere e la molla lo evidenzia allungandosi molto di più.

Il peso totale di tavola e pattino (e ovviamente la reazione della molla interna alla bilancia, ad esso uguale e contraria) resta costante a pattino sia fermo che in movimento. Le forze orizzontali (piccole o grandi non importa) con cui rispettivamente la molla tira il pattino ed il pattino tira la molla non influenzano le forze agenti lungo la verticale, in equilibrio fra loro: perciò le forze agenti lungo la direzione orizzontale e le forze agenti lungo la dire-

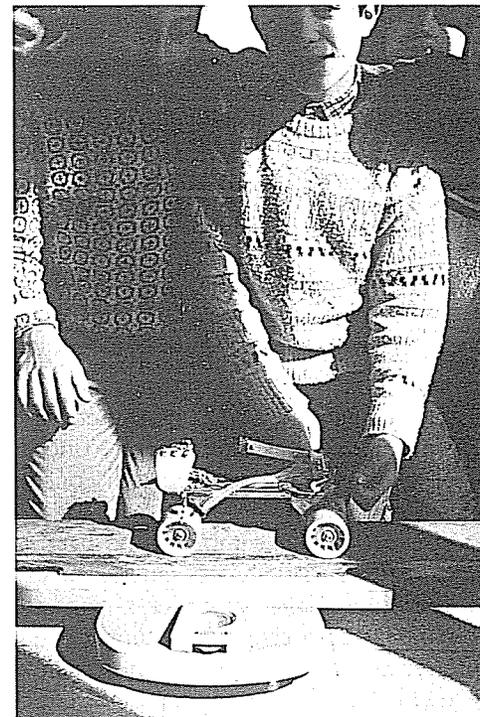
zione verticale operano in maniera indipendente. Ciò vale qualunque sia il valore del peso; si può caricare il pattino a ruote libere o bloccate in modo da ottenere pesi crescenti: si osserva sempre che il peso segnato dalla bilancia è lo stesso quando il pattino è fermo e quando è in moto.

In definitiva appare chiaro che in tutte le situazioni in cui si cerca di spostare un oggetto su una qualsivoglia superficie, la forza resistente non è il peso, ma dipende dal peso, aumentando se esso aumenta e viceversa.

Per indagare invece la dipendenza della forza resistente dalla scabrosità delle superfici a contatto, si può fissare sulla tavola della carta vetrata a grani via via più grossi e tirare sempre con la stessa molla il pattino su di essa appoggiato. Sia che le ruote siano libere sia che siano



(a)



(b)

Figura 3.12 - L'attrito non è una parte della forza peso

La bilancia segna sempre lo stesso peso, sia che il pattino sia libero e in quiete (a), o che venga tirato (senza farlo muovere o facendolo muovere) (b). L'allungamento della molla invece cambia: pur dipendendo dal peso ed essendo ad esso inferiore, la forza d'attrito non è una parte di esso, ma una forza aggiuntiva.

bloccate, man mano che aumenta la granulosità della carta vetrata, la molla (che dovrà essere più dura nel caso di attrito radente e meno dura nel caso di attrito volvente), per poter spostare il pattino deve allungarsi sempre di più. Facendo percorrere ogni volta lo stesso tratto al pattino, si constata anche che aumenta man mano la quantità di granelli asportati durante il movimento. (Si può evidenziarlo versandoli su un foglio di carta).

ATTIVITÀ

Questa osservazione fornisce anche un modello intuitivo di spiegazione della forza d'attrito, applicabile in generale. Diventa infatti possibile interpretare la dipendenza della forza d'attrito dalla scabrosità delle superficie a contatto, immaginando che lo sfregamento reciproco provochi l'abrasione di quantità crescenti di materiale su di esso.

Arrivati a questo punto i ragazzi possono comprendere perché inizialmente si sono mescolate attività a prima vista così diverse come macinare materiali e spostare oggetti sul pavimento.

Resta da affrontare un ultimo problema che può venir fuori dalle discussioni oppure essere

posto direttamente dall'insegnante: la forza di attrito fra un oggetto e una determinata superficie, dipende o non dipende dall'estensione della superficie di contatto? In genere ci si attende intuitivamente che ci sia dipendenza. Si possono far fare ai ragazzi delle previsioni motivate, e successivamente passare alle esperienze. Queste saranno del tutto analoghe a quelle appena descritte, eseguite inizialmente con blocchetti di legno o di ferro aventi facce con aree diverse ed in seguito con corpi di forma qualsiasi. Cambiando volta a volta le facce di appoggio si vede che l'allungamento della molla resta praticamente costante per lo stesso oggetto e si giunge alla conclusione che la forza di attrito è indipendente dall'estensione dell'area di contatto. (Cfr. fig. 3.4). C'è da attendersi che questa constatazione lasci molti dei ragazzi interdetti ed incapaci di trovare da soli una spiegazione accettabile.

ATTIVITÀ

È l'insegnante che può condurli ad un modello più completo, facendoli riflettere all'azione combinata della pressione e dell'estensione della superficie di contatto. Si può far notare che se invece di

tirare un oggetto semplicemente appoggiato, per esempio sulla carta vetrata, lo si fa strisciare mentre qualcuno lo schiaccia forzatamente contro di essa, aumentano la resistenza da vincere e la quantità di grani asportati. Il numero di incastri reciproci fra le due superfici non dipende dunque solo dall'estensione delle zone a contatto, ma anche da quanto esse sono premute una contro l'altra, punto per punto. A parità di peso, più le superfici a contatto sono estese, minore è la forza di schiacciamento reciproco in ogni piccola porzione di esse, minore è quindi, per ogni piccola porzione, il numero di incastri da spezzare quando il corpo è trascinato. I due effetti si compensano, in pratica, quasi esattamente (finché non si arrivi ad incastri macroscopici) e di conseguenza la resistenza di un oggetto al trascinamento su una superficie data non cambia molto cambiando la faccia su cui è appoggiato, anche se cambia molto l'estensione delle superfici a contatto. Si possono trovare molti esempi che aiutino a chiarire la differenza fra peso e pressione (camminare sulla neve con gli sci o senza; camminare d'estate sull'asfalto con i tacchi a spillo o con suole normali; finire con le mani su un chiodo dalla parte della punta o da quella della testa, ...), ed anche eseguire delle esperienze in classe. Per esempio, se si appoggia su un foglio di carta tenuto teso a mezz'aria un oggetto piatto e pesante (una scatola, piena, un coltello di acciaio, uno scarpone da sci ...), il foglio può reggere quando l'oggetto è appoggiato di piatto e sfondarsi quando è appoggiato sulla faccia più piccola, di punta, o di spigolo (fig. 3.13 a). Il peso dell'oggetto è sempre lo stesso, ma l'azione di schiacciamento si esercita su superfici di estensione diversa, così che ogni piccola porzione di superficie deve, da sola, contribuire a controbilanciare, nei diversi casi, una parte maggiore o minore del peso complessivo. Se questa parte di peso è troppo elevata per la corrispondente porzione della superficie di appoggio sul foglio, questa si sfonda. Qualcosa di analogo succede se si appende un oggetto pesante a tanti fili non molto resistenti oppure ad uno solo di essi: se sono tanti i fili riescono a sorreggerlo, mentre se è un filo solo esso si spezza (fig. 3.13 b). Anche questa volta l'azione di equilibrare il peso dell'oggetto si distribuisce in maniera diversa fra i vari fili a seconda di quanti sono; il fatto che essi reggano o no alla tensione cui sono sottoposti dipende dalle forze che ognuno di essi deve sostenere.

Dalla considerazione di questi casi-limite, nei quali viene superato il limite di rigidità degli oggetti che fungono da antagonisti alla forza del peso del corpo su di essi appoggiato (od appeso), ci si può immaginare il meccanismo di azione-reazione locale che consente normalmente quell'equilibrio complessivo che viene schematizzato con l'azione di due forze concentrate: il peso complessivo dell'oggetto e la reazione complessiva dell'appoggio o del sostegno. È questo un punto molto delicato ed importante, proprio perché mette in evidenza i limiti delle schematizzazioni fatte finora e che ignora il fatto che le azioni reciproche fra sistemi a contatto sono localizzate e diffuse su tutta la zona a contatto e si esercitano quindi in realtà come equilibri o squilibri fra pressioni. La non dipendenza della forza d'attrito dall'estensione della superficie di contatto consente ai ragazzi di constatare in maniera significativa che ogni schematizzazione ha i suoi limiti: infatti, dalla necessità di comprendere un fatto a tutta prima inspiegabile all'interno del modello che si sono costruiti, essi sono portati a scoprire un nuovo modello in grado di dar conto non solo di quel fatto particolare, ma anche di tutta un'altra serie di situazioni estremamente generali ed a prima vista del tutto eterogenee rispetto ai problemi d'attrito. D'altra parte, una conferma sperimentale a questa interpretazione si può ottenere confrontando (come già accennato in precedenza) le forze necessarie a trascinare una "pila" o una "fila" di blocchi identici (per esempio di legno): la sostanziale invarianza della forza di attrito rispetto alla configurazione (fig. 3.13) può essere anche divertente stimolo iniziale per queste attività.

In definitiva, la serie di attività proposte in questo paragrafo conduce i ragazzi ad una prima sistematizzazione e modellizzazione dei fenomeni di attrito fra solidi, che tiene conto di un gran numero di aspetti:

- si distingue l'attrito statico dall'attrito dinamico ed in particolare si individua nel primo una forza variabile da zero fino ad un massimo (l'attrito di distacco), mentre il secondo è riconosciuto come una forza costante, nei limiti delle esperienze fatte;
- si distingue l'attrito radente dall'attrito volvente, riconoscendo che a parità di tutte le altre condizioni l'attrito volvente è sempre minore;
- si riconosce la dipendenza (spesso, in prima intuizione, la proporzionalità) della intensità della forza di attrito al distacco dal peso dell'oggetto, e contemporaneamente l'esistenza di due equilibri

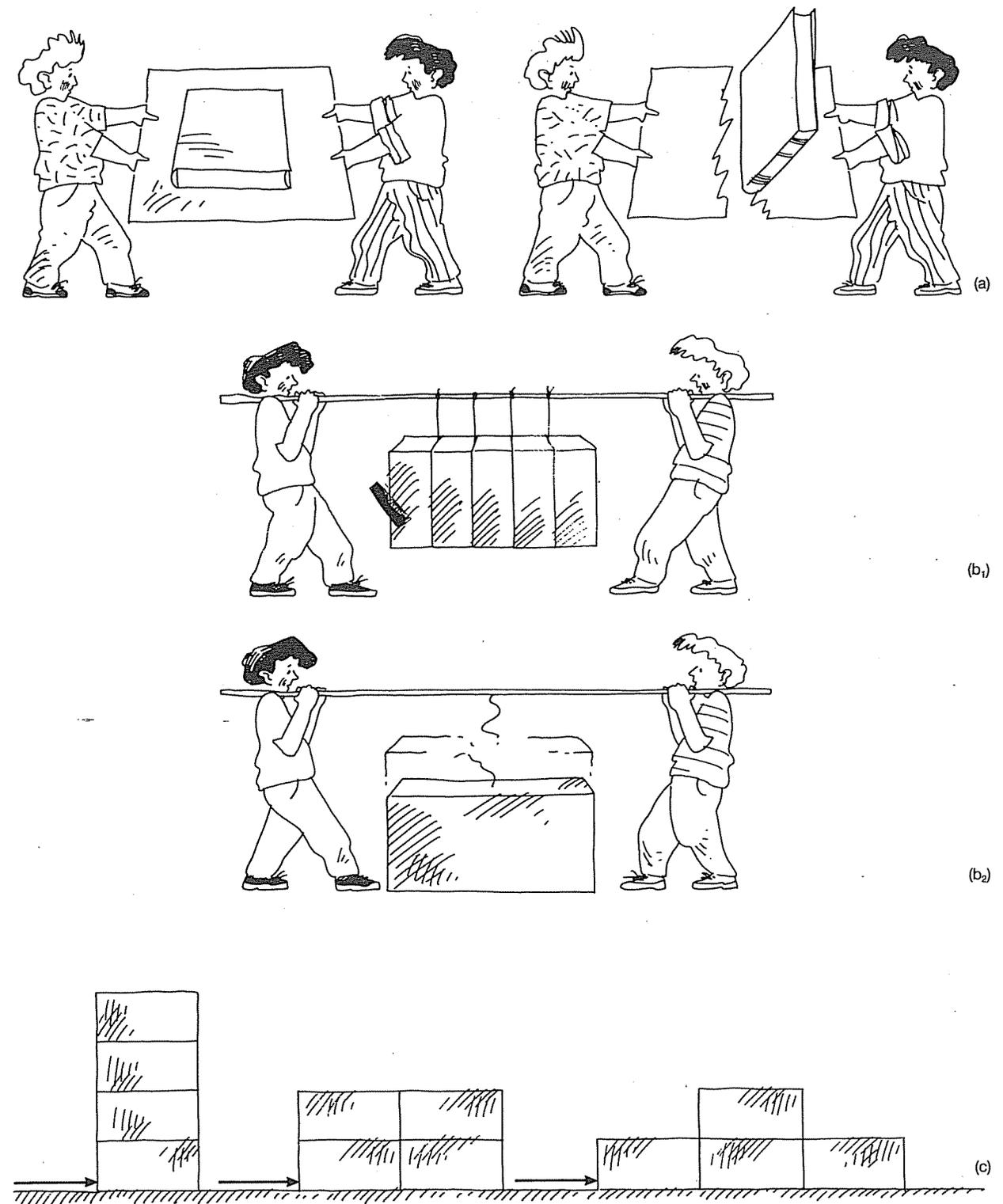


Figura 3.13 - Perché la carta si straccia ed il filo si spezza?

separati fra forze: peso e reazione vincolare della superficie d'appoggio; forza di trazione (o di spinta) e forza d'attrito;

– si riconosce la dipendenza della forza d'attrito dal tipo di superfici a contatto (natura dei materiali e rugosità superficiali) e la non dipendenza dalla loro estensione;

– si interpretano l'esistenza ed alcune delle caratteristiche delle forze d'attrito come dovute alla rottura degli "incastri" fra le due superfici e si correla l'entità di queste rotture oltre che all'estensione

delle superfici a contatto, anche all'intensità della pressione che si esercita su ogni elemento di superficie. Si unificano così nella stessa fenomenologia gli spostamenti relativi di corpi solidi a contatto e la triturazione di materiali attraverso macine di vario tipo.

In scheda 3.4 sono riportati brani delle discussioni in classe su questi vari aspetti, che illustrano ragionamenti e conclusioni dei ragazzi in relazione alle diverse esperienze effettuate in questa fase di attività.

Scheda 3.4 - Ragionando sulle forze d'attrito per confronto con le forze elastiche

Michele tira per mezzo di una molla un sasso appoggiato sul pavimento: i ragazzi discutono i sistemi di forze coinvolti:

"... Fanno forza il sasso con il peso, la molla che tira il sasso, la mano di Michele che tira ed il pavimento che resiste [allo spostamento del sasso, la forza di attrito è attribuita ad un'azione frenante del pavimento n.d.A.] e sostiene il peso".

"La forza dell'oggetto appoggiato [un altro dei modi in cui i ragazzi chiamano la forza di attrito, attribuendola questa volta ad un'azione dell'oggetto, che viene esplicitata in quanto "appoggiato" sul pavimento n.d.A.]... non c'è quando Michele non lo tira più... Se il sasso non viene tirato c'è il peso-forza e la forza che fa il pavimento per sostenere la pietra e sono pari".

Sul pavimento è appoggiata la bilancia pesa-persone che regge una tavola di legno su cui è posato un pattino che può essere tirato per mezzo di una molla:

"Quando mettiamo il pattino ed una tavola sulla bilancia la molla della bilancia fa forza uguale contro il peso ed il pavimento. Il pavimento fa forza per sostenere la bilancia, la tavola e il pattino... le forze sono pari".

"Se tiriamo il pattino con una molla ci vuole una piccolissima forza per far muovere il pattino. La forza-peso del pattino e la resistenza del pavimento sono sempre pari (il pattino ha le ruote libere e ben lubrificate)".

"La forza che tira contro Vincenzo quando le ruote [del pattino n.d.A.] sono bloccate ed il pattino appoggiato sulla tavola... però non è il peso, perché il peso fa forza contro la bilancia e la bilancia contro il peso e sono sempre pari. La bilancia segna il peso che segnava quando il pattino non veniva tirato".

Si accende la discussione sulla relazione fra la forza d'attrito ed il peso. Un bambino propone:

"Per verificare quello che ha detto Antonio [cioè che questa forza non è il peso n.d.A.], dobbiamo prendere un sasso, un blocco di ferro, tirarlo con una molla sul pavimento, sulla formica, sulla strada e vedere gli allungamenti della molla, poi dobbiamo appenderlo alla stessa molla e vedere di quanto si allunga".

Si fa l'esperienza: in tutte le situazioni la molla si allunga di più quando tiene l'oggetto sollevato che non quando lo tira.

"Perciò il peso del sasso non è l'avversario, ma il sasso fa forza appoggiandosi sulle superfici".

Il peso c'entra o non c'entra? Si appesantisce il pattino e si continua a tirarlo sulla tavola appoggiata sulla bilancia:

"... Se aumentiamo il peso, la forza che aumenta pure è la forza del pattino appoggiato sulla tavola e la molla si allunga di più, ma non è il peso ma dipende dal peso".

Oltre al peso, altre variabili influenzano l'intensità della forza d'attrito. Per esempio, la scabrosità delle superfici. Si propone di verificarlo con superfici di scabrosità diversa.

Un bambino sente l'esigenza di specificare in che modo si deve agire per operare un confronto corretto: "Bisogna avere un oggetto pesante: un sasso, un blocchetto di ferro... e tirarlo con la stessa molla sulla formica, sul pavimento, sulla carta vetrata, sul cemento, perché se non teniamo il peso uguale (costante) non siamo sicuri che la forza che fa l'oggetto appoggiandosi aumenta perché, la superficie è più ruvida... può essere che aumenti perché è aumentato il peso".

Si fa l'esperienza usando superfici ricoperte di carta vetrata a grani sempre più grossi e se ne traggono le conclusioni, riprendendo anche gli aspetti già considerati in precedenza:

"La forza del pattino appoggiato sulla carta vetrata aumenta perché la superficie è più ruvida".

"La resistenza aumenta perché aumentano i denti o le barriere (gli incastri fra le due superfici) che bloccano l'oggetto".

"La resistenza dell'oggetto aumenta quando aumenta il peso e la superficie dove si trova l'oggetto è più ruvida".

"Ciò vuol dire che la resistenza di un oggetto appoggiato su una superficie dipende dal peso e dal materiale dove si trova".

"La resistenza non dipende da chi tira o spinge cioè o tira un asino o una persona la resistenza è uguale. Aumenta quando il peso è maggiore ed il materiale è ruvido".

"La forza dell'oggetto appoggiato non c'è quando Michele non lo tira più. Se il sasso non viene tirato c'è il peso-forza e la forza che fa il pavimento per sostenere la pietra e sono pari".

Anche l'estensione della superficie di contatto sembra debba essere una variabile che concorre a determinare l'intensità della forza di attrito e si fa la prova concludendo che:

"Abbiamo notato che se cambia la faccia con cui il blocco è appoggiato... o è alzato o coricato, la resistenza non cambia".

Frammisti a tutti quelli precedenti vi sono anche i problemi di linguaggio. Come chiamare la forza che si sta studiando, per non confonderla con altre e per usare un nome che sia significativo nei riguardi delle sue caratteristiche? Se sin dall'inizio avessimo imposto noi il nome di "forza di attrito", avremmo tagliato la possibilità di una discussione come quella che segue, ove il problema centrale è la corrispondenza necessaria e sempre complessa, fra i fatti che accadono e il linguaggio adatto a descriverli.

"La resistenza del barattolo aumenta quando lo appoggiamo su un materiale più ruvido e quando è più pesante... Abbiamo constatato che quando abbiamo appoggiato il sasso più piccolo sul banco faceva minor resistenza del sasso più grande. Quando tiriamo il sasso più grande la molla si allunga di più, la resistenza dipende dal peso e dalla superficie dove è appoggiato... la resistenza è quella forza contro la quale una persona, un motore, un animale deve tirare un oggetto appoggiato su qualche materiale "liscio o ruvido".

"... No, la resistenza è la capacità, la forza, che fa il banco, il pavimento, la strada per sostenere gli oggetti che pesano, il pavimento per resistere il mio peso fa resistenza. La forza che fa il blocco di tufo, il sasso, la sedia, l'armadio quando li tiriamo per farli strisciare non è la resistenza è la forza che fanno appoggiandosi... si dovrebbe vedere chi intende chiamare resistenza la forza che fa un oggetto quando lo tiriamo o lo spingiamo su un materiale e chi la forza che fa il pavimento per sostenere il peso".

3.6. Proporzionalità tra forza d'attrito e peso

Le esperienze e le attività che abbiamo descritto nei paragrafi precedenti permettono una ricostruzione a livello qualitativo di un vasto e complesso campo di fenomeni (a prima vista molto diversi tra loro) ed una schematizzazione interpretativa sulla forza di attrito. La dipendenza di questa forza dalla forza peso che "schiaccia" i corpi a contatto reciproco è stata espressa con una relazione d'ordine: più è grande il peso dell'oggetto, più è grande la forza di attrito (a parità di rugosità della superficie: viceversa più ruvide sono le superfici a contatto, più è grande la forza di attrito, a parità di peso dell'oggetto).

ATTIVITÀ

Riteniamo necessario e possibile andare oltre il piano qualitativo per giungere a stabilire una relazione formalmente più restrittiva, ma anche più efficace, che pone il livello di analisi su un piano quantitativo: la proporzionalità tra la forza di attrito ed il peso (o, più in generale la forza che schiaccia fra loro le superfici a contatto). A tale scopo si può porre ai ragazzi il problema di come varia la forza di attrito al raddoppiare, triplicare, ... del peso dell'oggetto da trascinare.

È molto probabile che, come al solito, la prima ipotesi formulata dai ragazzi sia che la forza di attrito a sua volta raddoppia, triplica, ... È importante, a questo punto, chiedere loro cosa si può fare

per verificare questa previsione. I ragazzi dovrebbero essere in grado di suggerire da soli che si possono eseguire esperienze in cui un oggetto (il pattino, un blocco ...) viene via via appesantito (e pesato sulla bilancia) in modo da ottenere pesi complessivi che siano multipli di quello iniziale e poi ogni volta tirato con una molla fino al distacco oppure a velocità costante. Si può così misurare l'allungamento che la molla subisce e controllare se la forza d'attrito aumenta nello stesso modo del peso. I ragazzi dovrebbero anche suggerire che l'esperienza sia ripetuta con superfici d'appoggio diverse, per controllare che l'andamento verificato corrisponda ad una legge generale di proporzionalità indipendente dai valori numerici e dalle caratteristiche delle superfici. Prima di far passare i ragazzi alle esperienze, oppure all'inizio delle stesse, quando si deve tirare il pattino appesantito, è opportuno discutere con loro un aspetto che difficilmente avranno preso in considerazione da soli. Se si vuole usare sempre la stessa molla per tirare oggetti di peso diverso e risalire dal confronto degli allungamenti al confronto delle forze di attrito, si pongono almeno due problemi, di ordine diverso:

1) il rapporto tra gli allungamenti e le forze è semplice solo nel caso che la molla sia lineare (o comunque all'interno del campo di linearità della molla), perché solo in questo caso a forze doppie, triple ... di una forza iniziale data corrispondono allungamenti doppi, tripli ... di quello iniziale;

2) all'aumentare del peso dell'oggetto da spostare si rischia di superare il limite di elasticità della molla. Entrambi i problemi possono essere aggirati, come abbiamo visto in Cap. II, § 2.5. utilizzando 1, 2, 3 ... molle identiche collegate in parallelo man mano che dal peso iniziale si passa ad un peso doppio, triplo ...

In questo modo si può controllare se l'ipotesi fatta è giusta semplicemente verificando se ogni volta tutte le molle si allungano sempre della stessa quantità. Se i ragazzi hanno acquisito dimestichezza con il dinamometro si può usarne uno per far tirare il pattino o i blocchi nei vari casi, facendo leggere i valori della forza direttamente su di esso.

Le esperienze confermano con buona approssimazione le previsioni. La scheda 3.5 mostra le tabelle ottenute nella nostra sperimentazione.

Tutta questa fase del lavoro non presenta, in ef-

Scheda 3.5 - Tabelle Pesì/Forze d'attrito relative a superfici con ruvidezze diverse: pavimento, legno, formica

P (g)	F (g)				
500	180	(a) Pavimento			
1000	360				
1500	550				
2000	730				
P (g)	F (g)	(b) Legno			
500	350				
1000	750				
1500	1050				
2000	1450				
P (g)	F (g)	F _d (g)	l _s (cm)	l _d (cm)	(c) Formica
500	140	125	6	5	
1000	300	250	12,5	10	
1500	450	380	19	16	
2000	600	510	25	22	

Le tabelle sono state ottenute tirando attraverso un dinamometro successivamente uno, due, tre, quattro blocchetti uguali di ferro di 500 g sovrapposti. In tabella (c) sono riportati anche i valori della forza di attrito dinamico e degli allungamenti l_s e l_d di una molla lineare interposta fra l'oggetto trascinato e il dinamometro, al momento del distacco e durante il movimento a velocità costante.

fetti, particolari difficoltà o problemi che non siano già stati affrontati in tutto il lavoro precedente sulle forze. È una delle situazioni in cui i ragazzi possono essere quasi completamente autonomi, utilizzando metodologie di lavoro e conoscenze già costruite ed acquisite. È, di conseguenza, un momento importante per una riflessione ed esplicitazione di tutto quello che già sanno, che li porti ad una padronanza cognitiva più approfondita e consapevole. È quindi il caso di seguire con cura particolare attività e discussioni, stando attenti a non avere fretta di chiudere per una mal riposta preoccupazione di perdere inutilmente tempo. La scheda 3.6, in cui riportiamo brani delle discussioni di classe, dovrebbe dare un'idea delle problematiche che i ragazzi sono in grado di far emergere, delle loro capacità di analisi dei fatti, del livello di padronanza raggiunto nella preparazione di attività da svolgere secondo criteri ben precisi, delle difficoltà che sem-

pre sussistono quando si vogliono raccordare i fatti che succedono con un linguaggio adatto a descriverli ed interpretarli (la comprensione in effetti passa anche attraverso la costruzione dei significati che si attribuiscono alle parole che si usano).

Stabilita la proporzionalità fra forza d'attrito e forza peso, è importante discutere situazioni diverse da quelle sperimentate (oggetto trascinato su un piano orizzontale), perché si comprenda che la legge più generale riguarda la dipendenza fra forza d'attrito e forza complessiva che schiaccia i due corpi in moto relativo l'uno contro l'altro. Si possono ridiscutere situazioni già viste nelle attività iniziali e situazioni note comunemente, anche se non sperimentate in classe, chiedendosi se il peso c'entra o non c'entra con la forza che nei vari casi si oppone al movimento. È importante che, di nuovo, i ragazzi focalizzino l'attenzione sul fatto che esiste una resistenza non al moto in assoluto, ma al moto

Scheda 3.6 - Cosa succede quando il peso dell'oggetto da spostare diventa doppio, triplo, quadruplo...?

I ragazzi discutono, e propongono... Qualcuno ha detto che la forza necessaria a tirarlo "aumenta", qualcun altro che "dipende" dal peso, qualcuno che "è in proporzione"; a questo punto si accende la discussione sul significato delle varie parole usate per decidere quali sono le più adatte a esprimere le ipotesi che si hanno in mente e che dovranno essere verificate.

'Dipende' dovrebbe essere il verbo giusto, infatti la forza di attrito aumenta e si abbassa con il peso dell'oggetto quando la superficie di contatto è uguale, mentre il verbo 'aumentare' può significare che la forza di attrito aumenta solo se aumenta il peso e non si abbassa col peso.

"La forza d'attrito è in proporzione al peso vuol dire che aumenta il peso e aumenta la forza d'attrito...".
 "Quando dico aumenta significa che se la forza di attrito è 10 può aumentare di 2, 4, 6 e diventa 12, 14, 16... mentre se dico raddoppia la forza è venti. Secondo me quando il peso raddoppia, cioè diventa due volte più grande, anche la forza di attrito diventa due volte più grande (Rocco)".

(È da notare in questo discorso non solo lo sforzo di distinguere due tipi di dipendenza funzionale entrambi rappresentabili con una relazione d'ordine, ma diversi sul piano quantitativo, ma anche lo sforzo di trovare un linguaggio specifico che marchi questa distinzione. Quando l'esperienza esige per essere compresa di distinguere ciò che in precedenza era indistinguibile si cerca sempre di marcare cognitivamente la nuova "conquista" con un linguaggio non ambiguo).

"Il problema che abbiamo adesso è quello di verificare le cose che ha detto Rocco, che se raddoppia il peso, raddoppia anche la forza di attrito... Per vederlo bisogna fare un esperimento, dobbiamo prendere un oggetto, pesarlo con una bilancia e poi appoggiarlo su una superficie solida, attaccare la molla e tirarlo e vedere la forza di attrito attraverso l'allungamento della molla. Dopo dobbiamo prendere un altro oggetto di peso doppio e appoggiarlo sulla stessa superficie di prima e dobbiamo tirarlo con la stessa molla e vedere se l'allungamento della molla è raddoppiato rispetto a quello di prima. Poi dobbiamo prendere un oggetto che ha un peso tre volte più grande...".

Conclusioni dei ragazzi dopo che hanno realizzato le esperienze.

"Abbiamo visto che quando il peso-forza dell'oggetto raddoppia, triplica, la forza di attrito pure raddoppia e triplica e Rocco aveva ragione".

"La forza d'attrito è in proporzione al peso significa che quando il peso diventa due, tre volte più grande anche la forza di attrito diventa due, tre volte più grande".

"Questo succede quando tiriamo l'oggetto sulla tavola di legno, sulla formica e sul pavimento... succede per qualsiasi superficie".

relativo di due oggetti solidi che devono restare uno a contatto dell'altro. Il modello esplicativo che è stato trovato (l'attrito è causato dall'abrasione delle superfici che scorrono una sull'altra) richiede solo che i due corpi siano schiacciati l'uno contro l'altro, quale che sia l'origine di questa forza di schiacciamento (per esempio, in una bicicletta che viene frenata, l'espansione delle molle dei freni a cui si oppone la deformazione del cerchione stretto fra i tacchetti; in una bottiglia di vino la deformazione del tappo di sughero che è schiacciato dal collo della bottiglia: la forza con cui bisogna strofinare il pavimento con il cencio, per pulire bene, o il legno con la cartavetro per lisciarlo ...). Anche se, cosa di cui i ragazzi possono ben rendersi conto, in molte situazioni ci possono essere difficoltà operative insormontabili per verificare in classe la dipendenza fra forza che schiaccia e attrito ("Come facciamo a misurare la forza che fanno i tacchetti contro i cerchioni della bicicletta ... non possiamo sapere se è doppia, tripla ..."), le esperienze svolte con il peso e l'esperienza comune evidenziano una relazione d'ordine diretto fra forza di schiacciamento e forza d'attrito. Che sia proprio una proporzionalità diretta non è però evidente: ciò che avviene è in realtà determinato, come si è visto, dall'andamento della pressione punto per punto nella zona di contatto. Solo in certe situazioni (tra cui quelle sperimentate in classe comunque con superfici piane e rigide) la schematizzazione che descrive ciò che accade come contrapposizione fra due forze concentrate (la forza che schiaccia e la forza d'attrito) è sufficiente. Già per il tappo di sughero nel collo di bottiglia è difficile immaginare una forza d'attrito ed una forza che schiaccia, anche se certamente è tanto più difficile mettere o togliere un tappo quanto più il tappo è largo, e "duro", quindi quanto più deve essere deformato e quanto più forte sarà lo schiacciamento contro il vetro.

3.7. Simmetria di forze - dissimmetria di movimento

Abbiamo ripetutamente accennato al grosso problema della non-corrispondenza fra idee del pensiero comune e descrizioni scientifiche, per quanto riguarda le relazioni fra le forze agenti su un oggetto ed il suo movimento. L'esperienza quotidiana insegna che generalmente è necessario esercitare forze sia per far cambiare la velocità di un oggetto (metterlo in moto, fermarlo, accelerarlo, fre-

narlo ...) sia per farlo muovere a velocità costante. D'altra parte il moto viene, per così dire, considerato una proprietà assoluta del corpo (riferendolo inconsapevolmente sempre allo stesso riferimento implicito: la zona della Terra in cui si svolge); inoltre quanto avviene è considerato determinato solo dall'interazione fra l'oggetto e chi (uomo, animale, motore ...) intenzionalmente lo mette in moto, o lo tiene in moto, o lo fa fermare, ... Sfugge al pensiero comune la complessità dei sistemi reali: ci sono sempre in più (almeno) interazioni tipo attrito e resistenza viscosa fra l'oggetto in movimento e l'ambiente in cui il moto si svolge, nonché interazioni gravitazionali (anche se in molti casi parzialmente o totalmente compensate da reazioni vincolari).

Si può creare un'occasione importante di discussione e superamento (sia pure parziale) di questi pregiudizi intuitivi attraverso l'utilizzazione di quanto si è già appreso, sulle proprietà generali degli scambi di forza e su quelle particolari di forze elastiche e forze d'attrito, facendo svolgere esperienze in cui due oggetti che interagiscono l'uno con l'altro si muovano in modo diverso (con velocità ed accelerazioni diverse). Tra l'altro, così facendo si costruisce un primo modello descrittivo delle interazioni fra due sistemi in moto relativo che potrà poi essere reimpiegato in altre situazioni (per esempio) nel corso dello studio sulle forze magnetiche, (Cap. V).

ATTIVITÀ

Basta per questo realizzare diverse situazioni in cui due oggetti sono collegati da una molla tesa o compressa ed appoggiati sul pavimento, o su altra superficie orizzontale. La molla può essere tenuta compressa dal classico spago che ad un certo istante viene tagliato, oppure può essere tenuta tesa mantenendo saldamente i due oggetti ad essi collegati fermi ad una distanza opportuna, per poi lasciarli andare contemporaneamente (fig. 3.14).

Nel momento in cui viene eliminato il vincolo esterno che garantiva la deformazione della molla, ciascuno dei due oggetti (chiamiamoli A e B) resta sollecitato dalla forza elastica esercitata dalla molla e dalla forza d'attrito statico. Mentre la forza elastica è la stessa per i due oggetti (per la simmetria delle forze esercitate da un'unica molla), le forze d'attrito possono essere diverse, in dipendenza dal peso di ciascun oggetto e dalla natura della sua superficie di appoggio (fig. 3.15). Possono dunque verificarsi vari casi:

a) entrambe le forze massime d'attrito statico (F_A e F_B) sono minori della forza elastica F : i due oggetti restano fermi;

b) F_A ed F_B sono entrambi minori di F : i due oggetti si muovono entrambi. Durante il moto, F diminuisce continuamente (la molla sta tornando alla sua posizione di riposo), mentre l'attrito (ora dinamico) dei due oggetti sul pavimento resta praticamente costante. Può succedere che un oggetto od entrambi si fermino prima che la molla sia tornata alla posizione di riposo e comunque gli istanti finali di arresto di A e B possono essere uguali o diversi;

c) solo una delle due massime forze d'attrito statico (per esempio F_A) è minore di F : A si muove, mentre B resta fermo.

È importante cercare di far lavorare i ragazzi sul maggior numero possibile di situazioni, utilizzando eventualmente alcune come situazioni di costruzione e discussione di un modello di spiegazione il più generale possibile, ed altre come situazioni di verifica. Ovviamente si può intervenire, per ottenere i vari casi, su tutte le variabili coinvolte: peso degli oggetti, natura delle superfici a contatto, durezza e deformazione delle molle. Il percorso didattico va definito in classe, a partire da situazioni e/o



domande iniziali, in funzione del comportamento degli alunni. È importante cercare di sollecitarli soprattutto a fare previsioni ed a immaginare e poi costruire essi stessi situazioni nuove ("Come si potrebbe fare per vedere se è vero quello che ha detto Enrico?"; "Secondo voi sarebbe possibile fare in modo che si muovessero tutti e due gli oggetti?" ...), dato che i ragazzi dovrebbero padroneggiare già molte delle conoscenze necessarie a gestire il tipo di fenomenologia proposto.

Ci si può attendere, in definitiva, che gli allievi arrivino: 1) a riconoscere il sistema complessivo dei corpi interagenti e delle forze che si scambiano; 2) a stabilire che per ognuno dei due oggetti quanto succede è determinato solo dalle azioni di forza esercitate su di esso; 3) a eliminare ogni effetto delle forze peso e della relativa reazione del pavimento sull'eventuale moto; 4) a distinguere che i già citati casi a), b), c) si verificano rispettivamente se F_A e F_B sono entrambe minori di F , entrambe maggiori di F , oppure una minore ed una maggiore di F .

(In scheda 3.7 sono riportate alcune spiegazioni di allievi).

C'è però un aspetto che in quanto tale non costituisce oggetto specifico di questa proposta didattica, ma che interviene in modo essenziale per com-



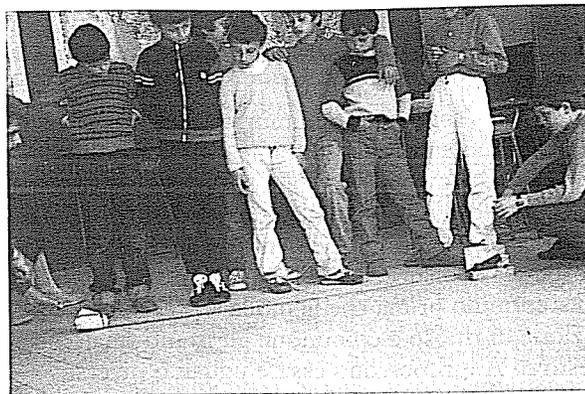


Figura 3.14 - Contro chi fa forza la molla? Come si può far aumentare la forza che fa la molla? Quando succede che uno o entrambi gli oggetti si muovono?

Scheda 3.7 - Descrizione e spiegazione delle esperienze di fig. 3.14 da parte dei ragazzi

“Abbiamo legato ai due lati di una molla due pattini, abbiamo teso la molla e poi abbiamo lasciato i pattini. La molla tira contro i pattini con una forza uguale ed i pattini vanno verso il centro, perché la forza che fa la molla ai due lati vince le forze di attrito dei due pattini”.

“Se mettiamo al posto del pattino un sasso la molla fa forza uguale ai due lati però osserviamo che il pattino si muove perché la forza della molla vince la forza di attrito del pattino che è poca, mentre la pietra rimane al suo posto, perché c'è molta forza di attrito e la forza della molla perde”.

“Abbiamo legato ai due lati della molla un sasso leggero ed un tufo molto grande e pesante ed abbiamo allungato molto la molla per avere molta forza, poi l'abbiamo lasciata. La molla tira uguale ai due lati però il tufo non si muove perché fa molta forza di attrito e non perde contro la forza della molla... invece il sasso più leggero si muove e va a sbattere contro il tufo, perché ha poca forza di attrito e perde contro la forza della molla. Per poter spostare anche il tufo dobbiamo allungare ancora di più la molla, così la forza della molla aumenta e vince la forza di attrito del tufo”.

“Abbiamo attaccato la molla al muro ed al tufo e l'abbiamo allungata. La forza della molla è uguale ai due lati, però il tufo si sposta ed il muro no. Questo succede perché la forza della molla vince contro la forza di attrito del tufo ed il tufo si muove e si avvicina al muro. La forza della molla non può vincere la forza del muro, perché il muro è fisso”.

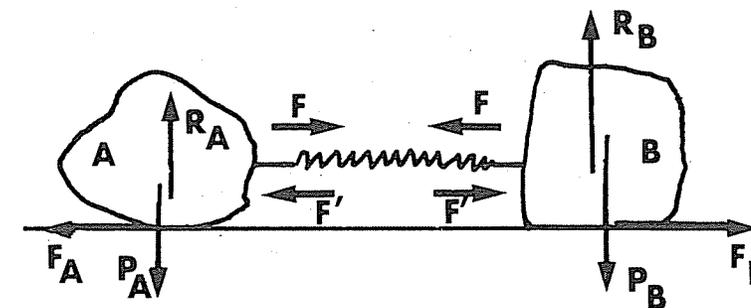


Figura 3.15 - Equilibrio fra forze elastiche, forze d'attrito e movimento

- F forze elastiche esercitate dalla molla su A e su B. Sappiamo (Cap. II § 2.5) che sono fra loro uguali e contrarie.
- F' forze di reazione esercitate da A e B sulla molla. Ognuna è uguale e contraria alla forza F corrispondente.
- F_A, F_B forze massime di attrito esercitate dal piano di appoggio su A e B. Fra loro indipendenti, dipendono rispettivamente da P_A e dalla natura delle superfici di A e del sostegno; da P_B e dalla natura delle superfici di B e del sostegno.
- P_A, P_B forze peso di A e B.
- R_A, R_B reazione del piano d'appoggio alle forze P_A e P_B . Sappiamo che R_A è uguale ed opposta a P_A e R_B è uguale ed opposta a P_B .

prendere ciò che si verifica nel caso che gli oggetti si muovano: la loro inerzia (proporzionale alla loro massa, cioè al loro peso). Essa può determinare, a parità di forze agenti (incluso l'attrito), movimenti diversi, dato che maggiore è la massa dell'oggetto su cui agisce una data forza, minore è l'accelerazione prodotta (Cap. I, § 1.8.). Al solito è un punto molto delicato.

È infatti abbastanza complesso per i ragazzi riuscire a vedere, (per esempio), nella disimmertia del moto di A e B (che si verifica praticamente sempre nel caso 2, a meno che i due oggetti non siano identici), un effetto combinato delle relazioni non solo tra le forze elastiche e d'attrito agenti su A e B, ma anche fra le forze d'inerzia.¹⁸ Non si può dunque affrontare in classe in maniera esaustiva uno studio della dissimertia fra il movimento di A e quello di B. Se comunque sono i ragazzi stessi a introdurre l'argomento, proponendo eventualmente delle spiegazioni, è il caso di intervenire per evitare un'implicita legittimazione e rafforzamento di idee errate. È, infatti, possibile che gli allievi siano portati ad addebitare la dissimertia del moto solo a differenza fra le forze F_A ed F_B od anche che qualcuno la attribuisca solo al fatto (corretto ma generico) che uno dei due oggetti è più pesante dell'altro. Secondo quanto si ritiene più opportuno si può dire banalmente che le cose sono più complesse, troppo per poterle spiegare, in quanto oggetti di massa più grande si muovono con maggiore difficoltà anche in assenza di attrito; oppure si può dire

che a determinare come si muove un corpo su cui agisce una forza totale non nulla è non solo il valore di questa forza (nel nostro caso la differenza fra F ed F_A , o fra F ed F_B), ma anche il valore del peso del corpo,¹⁹ per cui se due oggetti di peso diverso sono sollecitati da forze uguali, quello più pesante “resiste di più” al cambiamento di movimento e quindi la sua velocità varia più lentamente rispetto al caso di un corpo meno pesante.²⁰

¹⁹ In realtà la massa; ma cercare di far comprendere a fondo la distinzione fra massa e peso (fra loro proporzionali) è al di fuori delle possibilità del discorso didattico che stiamo facendo.

²⁰ Per cercare di rendere più comprensibile un'affermazione di questo genere, si può eventualmente cercare di illustrarla con un'esperienza. Per esempio, si possono prendere due oggetti di massa (peso, per i ragazzi) molto diversa, mettere quello più pesante su un carrello (pattino) e l'altro direttamente sul pavimento e variare opportunamente masse e/o superfici di appoggio, finché i due oggetti non presentano lo stesso attrito (per verificarlo basta usarli con la stessa molla e constatare che gli allungamenti al distacco sono uguali). Se a questo punto i due oggetti sono collegati da una molla tesa o compressa, durante il moto su di essi agiscono forze uguali, perché sono uguali sia la forza elastica che la forza d'attrito e si vede che effettivamente la velocità dell'oggetto di peso inferiore aumenta molto più rapidamente della velocità dell'oggetto di peso superiore.

¹⁸ Cfr. guida “Inerzia e moto”, in questa stessa collana.

Scheda 3.7 - Molle ideali e molle reali

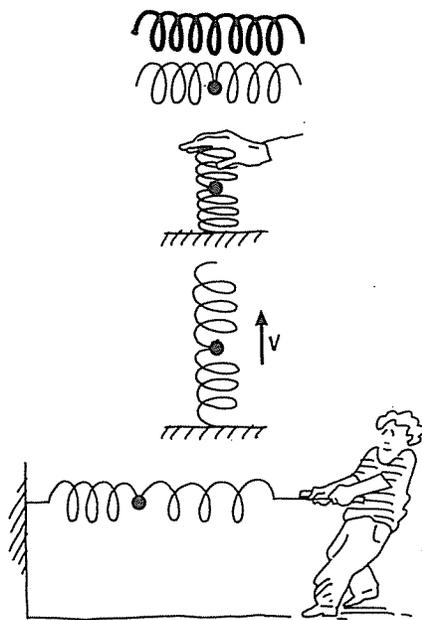
È sempre necessario schematizzare per capire: ma occorre anche non confondere schematizzazione e realtà, per non giungere a situazioni apparentemente paradossali. Ogni schematizzazione, infatti, "vale" entro certi limiti, e in certi contesti.

Per esempio i libri di testo (di scuola secondaria, e di università) parlano sempre di "molle ideali". Ideali – cioè schematizzate – in molti sensi: fra gli altri, quello di considerare "trascurabile" la massa (il peso) della molla stessa. In molti casi (negli esempi dei libri) questa approssimazione è valida: previsioni e osservazioni vanno abbastanza bene d'accordo. In altri casi (in molti contesti di vita quotidiana) la stessa approssimazione è "cattiva": le previsioni a cui conduce vanno infatti contro l'evidenza immediata. Tutti (anche i bambini) sanno che una molla (per es. da materasso) schiacciata sul tavolo e abbandonata bruscamente "salta su": ma una molla senza massa, una "molla da libro", non può saltare.

Se la molla è "pesante" si va nei guai con il sistema di descrizione formale dei fatti: la matematica attraverso cui si rappresenta il suo comportamento diventa infatti molto complicata. Però si può ugualmente cercare di capire qualitativamente (ma anche quantitativamente) quello che succede: attraverso un passo successivo nel processo di schematizzazione.

Proviamo per esempio a pensare che la "pesantezza" della molla sia "concentrata" al centro della molla stessa: lo schema di molla diventa allora quello di fig. a, che comprende due mezze-molle senza massa, e una massa *puntiforme* al centro. Ora se si schiaccia sul tavolo un oggetto del genere (fig. b), e poi lo si abbandona, la mezza-molla inferiore si distende, accelerando verso l'alto la massa *m*: quando la molla è completamente distesa, la massa *m* si trova dunque ad essere lanciata verso l'alto con una certa velocità (fig. c), e così trascina (fino a una certa altezza) tutta la molla (che in questo modo effettivamente "salta"). Naturalmente dal punto di vista di chi schiaccia la molla da sopra le due mezze-molle si comportano come se costituissero una molla intera.

Qualcosa di analogo accade se la molla "pesante" viene accelerata con un brusco strattone (fig. d): in questo caso (come già notato a pag. 68) la forza esercitata dal bambino non è uguale e opposta a quella esercitata dal muro.



Capitolo 4. Le forze di attrito viscoso: il moto di un corpo nell'aria e nell'acqua

4.1. Introduzione

Abbiamo già accennato in Cap. III al tipo di forza di cui ci occuperemo in questo capitolo: l'attrito fra un oggetto ed un fluido (in particolare l'aria o l'acqua), in moto uno rispetto all'altro. Come per l'attrito fra solidi, anche in questo caso si è in presenza di un sistema composto da due parti (il fluido e l'oggetto) e lo stato indeformato corrisponde alla loro quiete relativa. Un fiume ed una barca alla deriva costituiscono, ad esempio, un sistema indeformato, così come uno stagno tranquillo e le ninfee che vi galleggiano; mentre il fiume ed una boa ancorata al suo fondale costituiscono un sistema deformato, come lo stagno ed un pesce che sta nuotando. Come sempre, alle azioni di forza che il fluido esercita sull'oggetto corrispondono azioni di forza che l'oggetto esercita sul fluido: sono esperienze comuni le scie ed i vortici provocati da un corpo che si muove nell'acqua; è ben noto che in una vallata ventosa si può trovare un po' di riparo in un bosco dove gli alberi frenano il vento ...

Lo studio di questo tipo di forze implica, a differenza delle altre di cui si parla in questa guida, uno studio diretto del movimento, e, più in particolare, un primo approccio qualitativo al problema della relazione esistente fra forza e movimento, e fra forza e variazione di movimento. Ad esso si è già accennato in Cap. I § 1.8., presentando il II principio della Dinamica nella forma datagli da Newton, cioè come relazione d'equilibrio fra la "forza d'inerzia" (esercitata da un sistema e dalla sua accelerazione), e la "forza impressa" F esercitata su di esso dal sistema antagonista (o dai sistemi antagonisti): in formula $F = ma$. Il segno di uguaglianza sta ad indicare la simmetria della relazione: non solo le forze possono essere causa di variazione di movimento (un calcio tirato ad un pallone inizialmente fermo lo mette in moto), ma anche le variazioni di movimento possono essere sorgenti di forze (quan-

do il pallone viene arrestato può rompere il vetro; quando un'automobile accelera, frena, fa una curva ... i passeggeri vengono spinti indietro, in avanti, lateralmente ...). Proprio l'importanza del legame forze-movimento ci ha spinto ad inserire nella guida il presente capitolo, in quanto il moto in un fluido costituisce una situazione particolarmente adatta per cominciare ad individuare il problema, discuterlo in un caso semplice, cominciare a progettare soluzioni. È questo il livello cui si può giungere con le attività indicate in questo capitolo: in questa sede non si arriverà cioè ad una proposta didattica mirante alla ricostruzione esplicita dei principi fondamentali della Dinamica, dato che ciò richiederebbe un percorso molto lungo ed esula dagli scopi di questa guida. Si affronteranno invece con i bambini diversi aspetti del fenomeno di caduta di oggetti in aria ed in acqua, a cominciare dal riconoscimento delle variabili fondamentali per la descrizione del movimento stesso (spazio, tempo, velocità) e dalla esplicitazione delle relazioni che le legano. Si arriverà fino ad una descrizione/interpretazione complessiva del fenomeno esaminato, che cerchi di collegare le forze che intervengono nel movimento (forze costanti, come il peso del corpo e la spinta idrostatica, e forze che variano durante il moto, come la forza di attrito del fluido) alla "forma" del movimento (che da una fase iniziale di accelerazione passa ad un regime finale di velocità-limite costante).

Al solito, prima di addentrarsi nelle proposte di lavoro con i bambini diamo alcuni cenni teorici sul moto nei mezzi viscosi.¹

¹ Per una descrizione più dettagliata vedi ad es. Fleury-Mathieu "Fisica Generale e Sperimentale" vol. I "Meccanica Fisica" cap. 22-23.

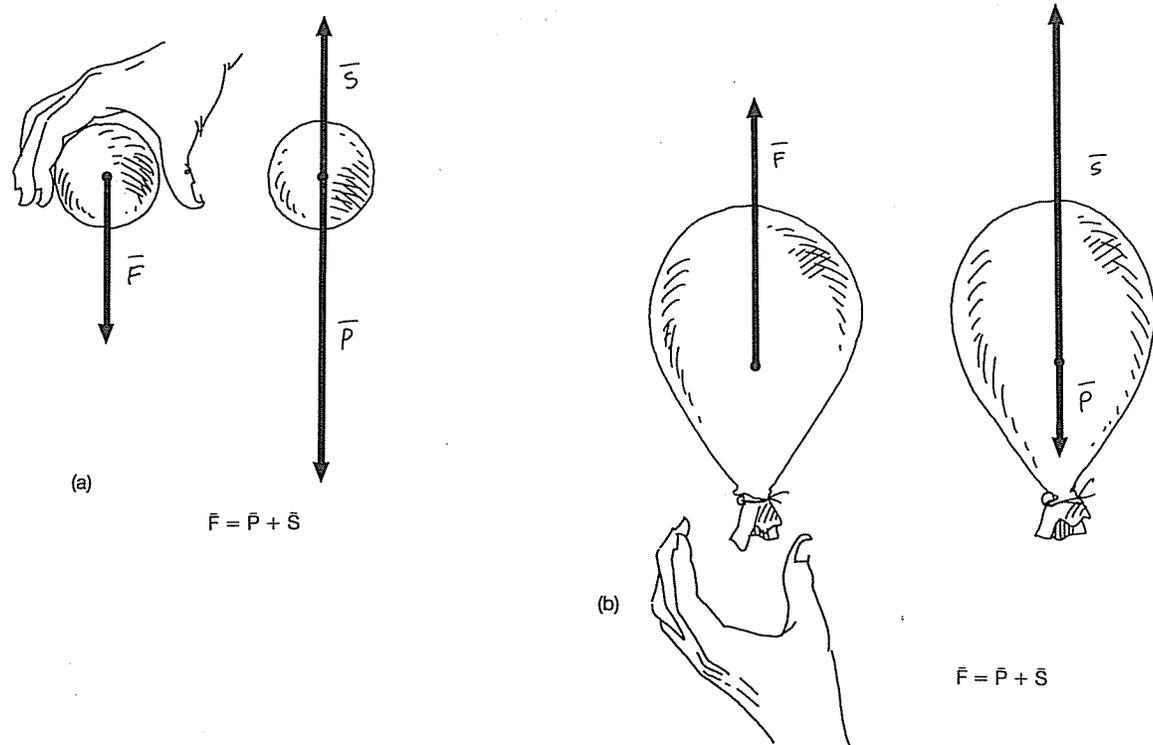


Figura 4.1 - Movimento in un fluido: la forza che fa salire o scendere un corpo

Se si lascia andare un sasso (a), questo cade.

Se si lascia andare un palloncino gonfio di elio (b), questo vola.

Perché?

Sul sasso agisce oltre alla forza peso p esercitata dalla Terra, anche la spinta di Archimede S esercitata dall'aria circostante. Quest'ultima forza è inferiore al peso p , ne risulta di conseguenza una forza complessiva F , che possiamo chiamare forza attiva, diretta verso il basso.

Sul palloncino agisce sia la forza peso P esercitata dalla Terra, sia la spinta di Archimede S esercitata dall'aria circostante. Tale forza in questo caso è superiore al peso P . Ne risulta quindi una forza attiva F , diretta verso l'alto.

Se consideriamo un oggetto che si muove immerso in un fluido (aria, acqua), le forze che agiscono su di esso sono: il suo peso, la spinta idrostatica (spinta di Archimede), la forza d'attrito esercitata dal fluido (resistenza del mezzo). La prima è una forza costante diretta sempre verso il basso; la seconda è anch'essa una forza costante diretta però verso l'alto, determinata dal volume del corpo e dalla densità del liquido. Nell'insieme, queste due forze danno luogo ad una forza risultante complessiva che chiameremo *forza attiva*, anch'essa costante, ma che potrà essere diretta verso il basso o verso l'alto a seconda che il peso sia maggiore o minore della spinta idrostatica, che avrà come valore la differenza tra i valori delle due forze (fig. 4.1 a, b). L'ultima forza agente sull'oggetto è la forza di attri-

to del fluido, che ha la stessa direzione della velocità con cui si muove l'oggetto, ma verso opposto ad essa. Il suo valore non è costante, ma dipende da quello della velocità: è zero quando la velocità è nulla e cresce al crescere di essa. Ad esempio quando si tiene una mano fuori del finestrino di un'auto in movimento, ci si accorge che l'aria esercita una forza: più piccola se l'automobile va piano, ma che diventa sempre più grande quando la velocità aumenta. La forma della relazione che lega tra loro le due variabili, forza d'attrito (F_a) e velocità del corpo (v), si può esprimere come somma di diversi termini in cui la velocità appare con potenze crescenti: $F_a = k_1v + k_2v^2 + k_3v^3 + \dots$ dove k_1, k_2, k_3, \dots sono i parametri (Cap. II, § 2.7.) che definiscono per ogni velocità qual è il corrispondente contributo

alla forza di attrito. Il valore di k_1, k_2, k_3, \dots è determinato dalle caratteristiche del sistema considerato²: la viscosità del fluido, l'area della sezione dell'oggetto perpendicolare al moto (fig. 4.2), la forma del corpo.

Si chiama in generale *viscosità* di un fluido la sua resistenza allo scorrimento (fra parti del fluido, o fra il fluido e un oggetto): il catrame e il dentifricio sono più viscosi dell'acqua, che è più viscosa dell'aria ... Più un fluido è viscoso, maggiore è, a parità di tutte le altre condizioni, la resistenza che oppone al moto di un oggetto: se invece di muovere la mano nell'aria la muoviamo nell'acqua, basta una velocità molto piccola per accorgersi della presenza della forza di attrito. È inoltre facile accorgersi che questa forza, sia nell'aria che nell'acqua, dipende anche da come teniamo la mano rispetto al moto: longitudinalmente o trasversalmente (di piatto o di taglio), aperta o chiusa ...

D'altronde a tutti è noto quanto sia oggetto di studio e progettazione industriale il profilo dei mezzi di trasporto terrestri, aerei e marittimi: si cerca la forma che può garantire il minimo attrito a parità di velocità, perché essa consente un risparmio sul consumo di carburante (più è grande la forza d'attrito che deve essere controbilanciata dal motore, maggiore deve essere, a parità di velocità, la potenza del motore, Cap. I, § 1.6. e § 1.7.).

Torniamo all'analisi del moto di un corpo in un fluido: tra tutte le forze agenti su di esso, quella che determina in modo caratteristico il tipo di moto è proprio la forza di attrito, in dipendenza dal fatto che essa non è costante, ma cambia durante il moto in funzione della velocità.

Analizziamo, a titolo di esempio, quello che accade quando un sasso tenuto sott'acqua viene lasciato cadere. Nell'istante in cui viene lasciato, la resistenza del mezzo è nulla, in quanto l'oggetto è fermo: le uniche forze agenti su di esso sono la forza peso e la spinta idrostatica. Il peso del sasso è maggiore della spinta idrostatica, per cui su di esso agisce una *forza attiva* diretta verso il basso.³ Essa provoca un aumento progressivo di velocità e di conseguenza compare immediatamente la forza di attrito del mezzo, che a sua volta aumenta all'aumentare della velocità. Dato che la forza attiva è costante, la differenza tra di essa e la resistenza del mezzo, che è continuamente crescente, diventa sempre più piccola. Ciò non di meno essa corrisponde sempre ad una forza totale diretta verso il basso, che quindi continua a spingere il corpo nel

verso del moto: conseguenza di questa situazione è che la velocità dell'oggetto continua a crescere (c'è un'accelerazione nel verso del moto), ma cresce sempre meno (la forza che spinge in avanti, quindi l'accelerazione, diminuisce continuamente). Questo accade fino al momento in cui la forza di resistenza diventa uguale alla forza attiva: in tale istante la forza risultante diventa nulla, quindi non ci può più essere accelerazione, cioè aumento di velocità: pertanto il corpo continua a muoversi conservando, lungo tutto il percorso successivo, la velocità cui era arrivato nell'istante in cui si è raggiunto l'equilibrio tra le forze. La velocità caratteristica di questa situazione di equilibrio (equilibrio stazionario; Cap. I, § 1.8.) è detta velocità limite o di regime (scheda 4.1 a).

Nella situazione che abbiamo analizzato la velocità iniziale era nulla; cosa succede se invece la velocità iniziale è maggiore di quella limite (cosa che per esempio si verifica per un proiettile sparato in aria da un'arma, o per un sasso che cade nell'acqua dall'alto). In questo caso sin dall'istante iniziale le forze agenti sull'oggetto sono sia *la forza attiva* (risultante della forza peso e della spinta idrostatica) che la resistenza del mezzo. Questa volta però la forza di attrito è maggiore della forza attiva, per cui la forza totale agente sull'oggetto è diretta all'indietro rispetto alla velocità. Ad essa corrisponde dunque un'accelerazione opposta al moto, per cui negli istanti successivi la velocità dell'oggetto diminuisce progressivamente e ciò provoca a sua volta una diminuzione continua della resistenza del mezzo stessa. Come nel caso precedente ne consegue che la differenza tra la forza attiva (sempre costante) e la resistenza del mezzo (ora decrescente) continua a diminuire, finché la resistenza del mezzo non diventa uguale alla forza attiva (e quindi la forza totale agente sul corpo diventa nulla). Questo andamento della forza fa sì che, a partire dall'istante

² In generale i valori di k_1, k_2, k_3 tanto sono piccoli che il termine corrispondente contribuisce normalmente in maniera trascurabile. Nel caso più semplice, per piccole velocità e per dimensioni del corpo trascurabili rispetto a quelle delle regioni di fluido in cui si muove, la relazione precedente si riduce a $F_a = -kv$, dove k non varia molto al variare della velocità.

³ Esistono ovviamente anche situazioni in cui la *forza attiva* è rivolta verso l'alto (per esempio nel caso di un materiale che va a galla nell'acqua, o di un palloncino che sale in aria), oppure è nulla. Non ci soffermiamo a discuterne, perché nel lavoro con i bambini considereremo solo il caso della caduta di corpi in aria ed in acqua.

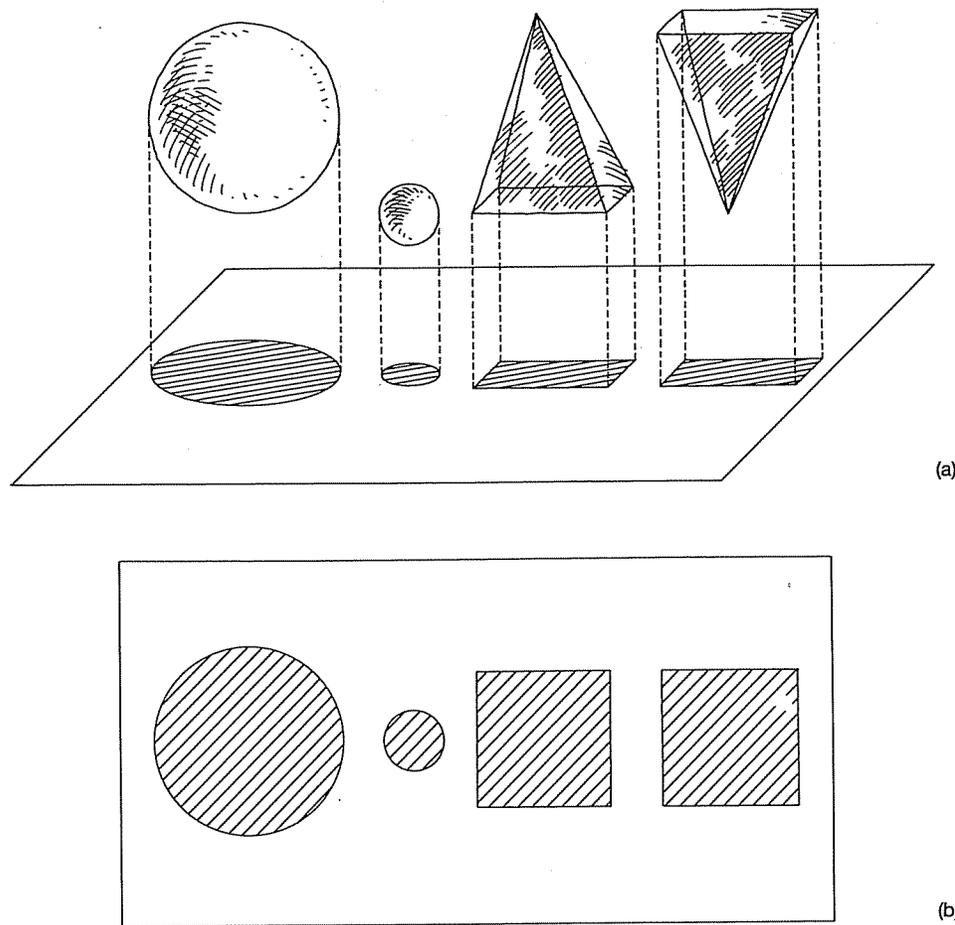


Figura 4.2 - La resistenza del fluido dipende dalla geometria del sistema

Quando un oggetto cade, la resistenza esercitata su di esso dal fluido circostante (aria, acqua...) dipende dall'estensione della massima sezione dell'oggetto perpendicolare alla direzione del movimento (aree tratteggiate in figura) e dalla forma della parte di superficie dell'oggetto direttamente opposta al moto. Nel caso (a), ad esempio, le due sfere oppongono al moto superfici che hanno la stessa forma, ma la resistenza che si esercita sulla sfera più grande è maggiore, perché è maggiore l'estensione della massima sezione perpendicolare al moto. Inversamente, nel caso (b) le due sezioni sono uguali, mentre è diversa la forma delle superfici direttamente opposte al moto, ed è di conseguenza diversa la resistenza esercitata dall'aria: maggiore per la superficie piatta e minore per quella appuntita.

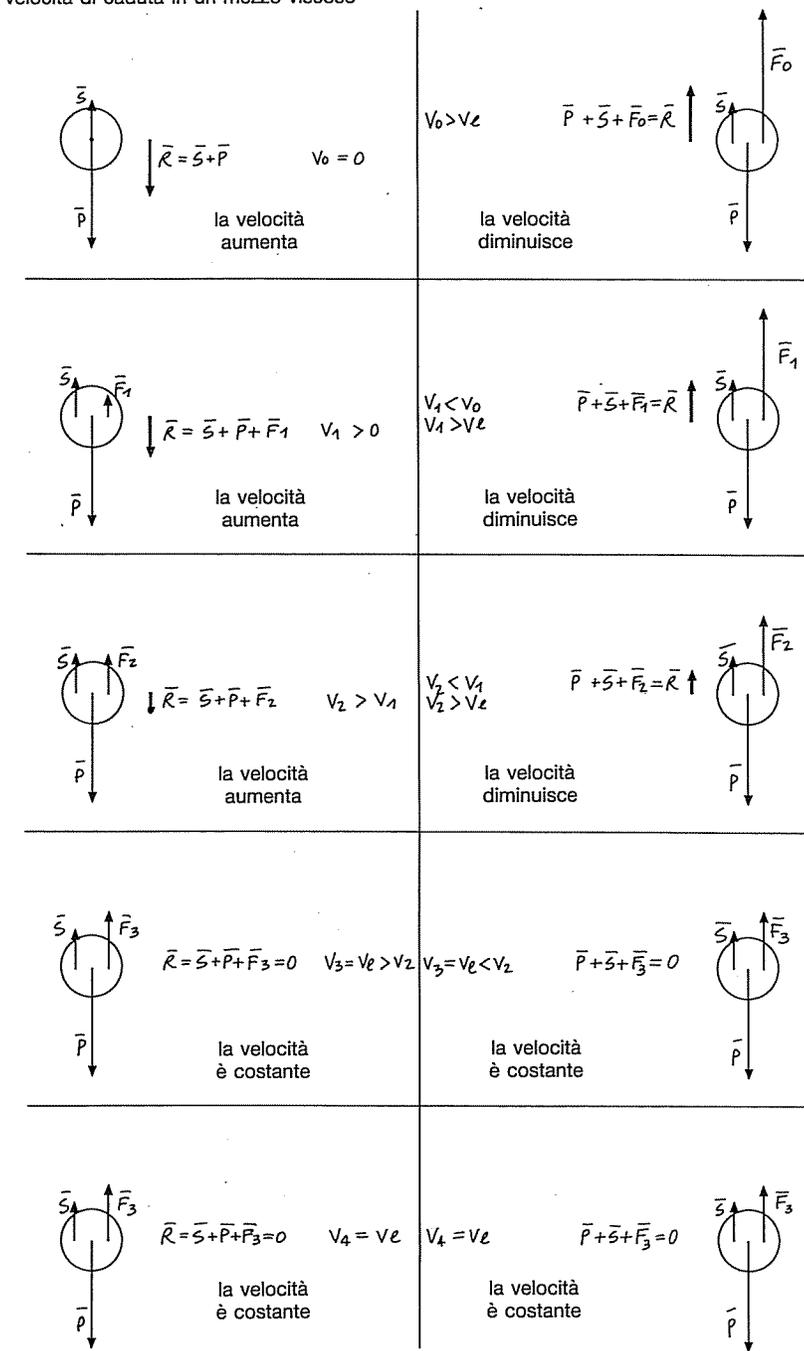
Scheda 4.1 - L'andamento della velocità di caduta in un mezzo viscoso

Quando un oggetto viene lasciato cadere in un fluido con velocità iniziale nulla (vedi a), nell'istante iniziale t_0 su di esso agiscono solo due forze: la forza peso P e la spinta idrostatica S (la cui risultante abbiamo chiamato forza attiva, vedi fig. 4.1). Se la forza attiva è diretta verso il basso, l'oggetto inizia a cadere mentre la velocità aumenta progressivamente e compare di conseguenza la forza di attrito del mezzo F che aumenta anch'essa all'aumentare della velocità, fino a diventare uguale alla forza attiva (istante t_3 in fig. a). Da tale istante in poi la risultante delle forze agenti sull'oggetto è nulla, e quindi non ci può più essere accelerazione ed il corpo continua a cadere conservando lungo tutto il percorso successivo la velocità v_l raggiunta nell'istante t_3 , detta *velocità limite* o di *regime*.

Consideriamo ora una situazione in cui la velocità iniziale dell'oggetto è maggiore della velocità limite (si pensi ad un proiettile sparato in aria da un'arma, o ad un paracadutista che apre il paracadute quando è quasi arrivato a terra). Sin dall'istante iniziale t_0 agisce sull'oggetto oltre alla forza attiva (che sappiamo sempre rivolta verso il basso), anche la forza di attrito del mezzo, rivolta verso l'alto. Tale forza è maggiore della forza attiva, per cui la risultante delle forze agenti sull'oggetto è diversa da zero

ed è diretta nel verso opposto alla velocità. Ad essa corrisponde dunque un'accelerazione opposta al moto, per cui la velocità dell'oggetto diminuisce progressivamente. Ciò provoca una diminuzione della resistenza del mezzo fino all'istante t_3 in cui essa diventa uguale (ed opposta) alla forza attiva (e quindi la forza totale agente sul corpo diventa nulla). Da questo istante in poi il corpo si comporta come nel caso precedente conservando lungo tutto il percorso successivo la velocità limite che ha raggiunto.

L'andamento della velocità di caduta in un mezzo viscoso



$\vec{F}_0, \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ forze di attrito del mezzo rispettivamente agli istanti t_0, t_1, t_2 e dall'istante t_3 in poi \vec{P} = forza peso esercitata dalla Terra sul corpo. \vec{S} = spinta idrostatica, o spinta d'Archimede, esercitata dal mezzo sul corpo. \vec{R} = risultante delle forze agenti sul corpo.

iniziale, la velocità dell'oggetto continua a diminuire, ma diminuisce sempre più lentamente, fino al momento in cui la forza risultante è di nuovo nulla: da questo istante in poi il corpo continua a muoversi di moto uniforme, con la velocità che ha raggiunto. Poiché la forza attiva è la stessa del caso precedente, deve esserlo anche la resistenza del mezzo all'equilibrio, quindi la velocità limite è la stessa di prima (scheda 4.1 b).

La resistenza del mezzo funziona dunque come un sistema di controllo del moto, provocando sempre la stessa situazione finale, indipendentemente dalle condizioni iniziali, purché si lasci trascorrere un tempo (e quindi uno spazio) sufficiente: e appena, per qualche causa, la velocità tende a diminuire rispetto alla velocità limite, prevale di nuovo la forza attiva ed il corpo è accelerato; appena viceversa per qualche altra causa la velocità tende ad aumentare, prevale la forza resistente, ed il corpo è frenato. Siamo di fronte ad un tipico sistema fornito di un autocontrollo a retroazione: c'è uno stato stabile (il moto uniforme a velocità limite) grazie ad un meccanismo (il gioco velocità-resistenza del mezzo) che tende a far ritornare il sistema a questo stato ogni qual volta esso se ne allontana.

Nei paragrafi successivi analizzeremo le attività da proporre ai bambini seguendo il seguente schema:

4.2.) Caduta in aria di oggetti vari: pezzi di gesso, fogli di carta, vassoi di polistirolo ... Discussione sulle forze in gioco, individuazione di variabili significative e di relazioni fra di esse.

4.3.) Previsioni, misure, compilazione di tabelle, in relazione a tempi e spazi di caduta di uno o più vassoi di polistirolo in condizioni diverse e relative discussioni interpretative. Scoperta della non linearità delle relazioni fra tempo di caduta e peso degli oggetti, fra tempo di caduta e superficie degli oggetti.

4.4.) Il problema della definizione e della misura della velocità: come far emergere le difficoltà dei ragazzi e superarle.

4.5.) Esperienza di caduta di sfere in cilindri pieni d'acqua: uso di foto stroboscopiche* per verificare, attraverso misure sistematiche e precise, le ipotesi dei ragazzi sull'andamento della velocità; conclusioni sulla "forma del moto".

4.6.) Introduzione al problema fondamentale della Dinamica.

* vedi nota 7 e fig. 4.4.

4.2. Attività iniziali

Le prime esperienze servono ad introdurre nel modo più generale possibile la fenomenologia che sarà oggetto di studio: la caduta dei corpi nei suoi aspetti cinematici (andamento della velocità durante la caduta) e dinamici (forze che agiscono e che determinano l'andamento della velocità). A questo scopo basta lasciar cadere, da altezze diverse, oggetti vari. L'insegnante può iniziare a farne cadere qualcuno (pezzi di gesso, penne, fogli di carta ...), e poi invitare gli allievi a fare lo stesso con altri oggetti. L'importante è che i bambini abbiano subito modo di osservare comportamenti visibilmente diversi: oggetti che cadono in tempi diversi, oggetti che vanno giù dritti, oggetti che "ondeggiano" nell'aria ... Sono particolarmente indicati allo scopo i fogli di carta, che cadono in modo diverso se sono accartocciati, oppure stesi e lasciati cadere "di piatto" o ancora "di taglio". È possibile che siano i ragazzi stessi a pensare a diverse prove, altrimenti esse possono essere suggerite dall'insegnante. Ci si può procurare qualche vassoietto di polistirolo, di quelli comunemente usati nei supermercati come contenitori di generi alimentari. Queste vaschette hanno la caratteristica di cadere (in posizione orizzontale) con un moto contemporaneamente più lento e più regolare rispetto alla maggior parte degli oggetti comuni. Ciò li rende particolarmente adatti a costituire sia uno stimolante motivo di sorpresa all'inizio, sia un utile strumento di lavoro nel seguito. Sono proprio i diversi modi in cui cadono gli oggetti che attirano l'attenzione dei bambini, motivandoli a ricercare perché le cose cadono, ma soprattutto perché cadono in tante maniere diverse. D'altra parte le differenze evidenziate nei modi di cadere si prestano bene a introdurre e sostenere la motivazione per lo studio iniziale degli aspetti cinematici della caduta.

Sulla base dei commenti spontanei dei bambini e di una serie di domande generiche del tipo "Perché cade?" - "Come mai le vaschette cadono così piano?" - "Cadono sempre allo stesso modo?" ... si può far nascere e sviluppare la discussione, che porta alla formulazione di varie ipotesi da parte dei bambini (scheda 4.2). In questa prima fase c'è naturalmente da attendersi una scarsa improprietà di linguaggio ed una notevole confusione di concetti (vedi l'uso delle parole "velocità", "rallentare" ... in scheda 4.2 per esempio), che costituiranno terreno su cui continuare a lavorare nel seguito. Ciò che è essenziale per il momento è che i bambini inizino

Scheda 4.2 - Perché gli oggetti cadono in modi così diversi?

I ragazzi hanno osservato la caduta di pezzi di gesso, fogli di carta stesi o accartocciati, vassoi di polistirolo... e discutono sulle cause dei vari moti di caduta:

"La forza che tira giù gli oggetti è il peso ed è l'aria che ne impedisce il movimento verso il basso, però l'aria non lo impedisce completamente, gli fa solo rallentare la velocità".

"Quando un oggetto cade avviene che se ha un grosso peso, l'oggetto cade in pochi secondi, perché l'aria non riesce a rallentarlo. Se l'oggetto ha lo stesso peso, però una superficie minore cade ancora prima. Invece se un oggetto ha meno peso cade in più secondi, perché l'aria riesce a rallentare un po' la sua velocità".

"L'aria non ha molto spazio per spingere e rallentare la sua velocità, perché la superficie è poca".

ad individuare alcune delle variabili e dei parametri in gioco e che cerchino di costruire un vocabolario comune con cui indicare variabili, parametri e relazioni.

Fra tutti i fatti che influenzano il moto nell'aria e le loro reciproche interrelazioni, c'è da attendersi che inizialmente i bambini, seguendo uno schema generale di *causa ed effetto*, identifichino il peso come il fattore "attivo" che causa la caduta del corpo e l'azione dell'aria come un fattore "resistente" che ne causa il rallentamento. Inoltre possono arrivare a scoprire, attraverso esempi particolarmente evidenti, che il tipo di caduta di un oggetto dipende dalla superficie opposta al moto, a parità di peso e di percorso, e possono spiegarlo in maniera intuitiva. Basta prendere, ad esempio, due fogli di carta uguali, accartocciarne uno, e lasciarli cadere insieme: si ottengono in tal modo due oggetti che hanno lo stesso peso, ma superficie esposta al moto diversa e di conseguenza anche il tempo di caduta sarà diverso. Nella classe sperimentale i bambini avevano formulato due tipi di spiegazione: "Quello accartocciato cade per primo, perché le forze si concentrano, ed è come se aumentassero il peso" - "Hanno lo stesso peso, solo che uno ha la superficie maggiore e un'area più grande che lo prende e quindi l'aria lo spinge di più". Il primo bambino non si rendeva conto che il minor tempo di caduta del foglio di carta accartocciato dipendeva dalla minore superficie opposta al moto e ne attribuiva l'effetto ad un ipotetico aumento di peso del foglio: ipotesi di questo tipo sono molto comuni, anche fra ragazzi più grandi. Il secondo bambino corregge il compagno e la sua spiegazione viene accettata da tutti. Ancora, i bambini possiedono in generale sia una intuizione dell'esistenza di forme che rendono più facile il movimento (a punta, lisce ...), sia esperienze o conoscenze in merito (le automobili da

corsa hanno una forma particolare ...), ma risulta loro particolarmente difficile separare le variabili forma e superficie, per cui si può tentare una distinzione in merito, ma senza pretendere di spingersi troppo a fondo.⁴

A conclusione di questa prima parte di itinerario i bambini riescono dunque a stabilire alcune *relazioni d'ordine* che legano le variabili precedentemente individuate: maggiore è il peso di un oggetto e minore è il tempo che impiega a cadere (a parità di spazio percorso e di superficie): maggiore è la superficie opposta al moto e maggiore è il tempo di caduta (a parità di spazio percorso e di peso).

Eventualmente i bambini si possono rendere conto dell'esistenza di variabili per le quali non è possibile costruire relazioni d'ordine: ad esempio, non ha senso parlare di "più o meno forma" di un oggetto (ma si può parlare di forma che "fa" più o meno "resistenza" a parità di superficie).

A questo punto si può operare un primo passaggio dal piano qualitativo del discorso al piano quantitativo.

4.3. La proporzionalità

Come già accaduto in precedenza, anche questa volta i bambini troveranno esempi di relazioni d'ordine cui non corrispondono relazioni di proporzio-

⁴ In una classe di Scuola Secondaria Superiore (I anno ITIS) nel corso delle discussioni si è giunti invece a stabilire esplicitamente che, a parità di peso e di superficie esposta al moto, entra in gioco la forma dell'oggetto; secondo una ragazza di questa classe "Se prendiamo due oggetti dello stesso peso e con la stessa superficie esposta all'attrito, ma con forma diversa, quello più appuntito taglia meglio l'aria e quindi incontra meno resistenza".

nalità: il peso di un oggetto ed il tempo che l'oggetto impiega a cadere da una determinata altezza, la superficie esposta al moto ed il tempo di caduta dell'oggetto stesso, costituiscono infatti esempi di questo genere.

Allo scopo di avviare una discussione sulla forma più specifica di tali relazioni, si possono formulare domande del tipo: "Se un vassoio di polistirolo lasciato cadere impiega 10 secondi per raggiungere il pavimento, quanti secondi potranno impiegare due vassoi sovrapposti?" - "Se invece tagliamo un vassoio a metà e sovrapponiamo le due parti, quanto tempo impiegherà a cadere?" - "Cosa cambia nelle varie situazioni?" - "Cosa rimane immutato?". C'è da attendersi che la maggioranza dei bambini preveda in entrambi i casi che il tempo si dimezza, o perché il peso raddoppia, mentre la superficie rimane la stessa, o perché la superficie si dimezza, mentre il peso resta uguale. I bambini prevedono dunque erroneamente che tra il peso di un oggetto ed il tempo di caduta ci sia una relazione di proporzionalità inversa, e tra la superficie opposta al moto ed il tempo di caduta ce ne sia una di proporzionalità diretta. In realtà, raddoppiando il peso di un oggetto, per esempio sovrapponendo due vassoi in modo che l'area investita resti costante, il tempo che il doppio vassoio impiega a cadere diminuisce, ma non diventa la metà; o ancora, dimezzando la superficie opposta al moto (per esempio dividendo un vassoio a metà e incollando le due parti una sull'altra così che il peso non vari), il tempo di caduta diminuisce, ma non si dimezza.

Come d'abitudine, alle previsioni dei bambini si fa seguire la verifica sperimentale, lasciando cadere da un'altezza sufficiente le varie combinazioni di vaschette. Nasce il problema della misura del tempo di caduta di oggetti e saranno i bambini stessi probabilmente a proporre l'uso dell'orologio. Si tenga presente che, nonostante ciò, è possibile che alcuni di essi non sappiano misurare un intervallo di tempo servendosi di un comune orologio da polso, soprattutto se questo non è mai stato utilizzato in precedenza e soprattutto per intervalli di tempo così piccoli; in tal caso conviene dedicare allo scopo un'adeguata quantità di lavoro (tenendo ben presenti i diversi problemi posti dai diversi tipi di orologi in commercio, digitali (a cifre) o analogici (a lancette); ovviamente un cronometro è lo strumento più adatto).

Come per le lunghezze, anche quando si effettuano misure di tempo esistono problemi riguardo la riproducibilità delle misure stesse. Infatti crono-

metrando più volte la caduta dello stesso oggetto, dalla stessa altezza, generalmente si ottengono misure diverse (durante le nostre misure può accadere, ad esempio, di far scattare il cronometro alcune volte un po' prima e altre volte un po' dopo l'istante della partenza o dell'arrivo del vassoio sul pavimento; ciò altera, in più o in meno, il valore del tempo cronometrato). Più il tempo di caduta è lungo, minore è il "peso" relativo dell'errore commesso nel misurarlo. Bisogna dunque ottenere tempi di caduta di almeno qualche secondo per evitare che gli errori di misura influenzino in modo determinante le osservazioni e le conclusioni che si possono trarre: nell'esperienza da noi svolte i vassoi erano lasciati cadere nella tromba delle scale della scuola da un'altezza di circa tre metri. Bisogna che i bambini si rendano conto di questo problema e capiscano le differenze fra i valori delle misure ripetute che non corrispondono tanto a differenze reali nei tempi di caduta (beninteso se si usa sempre lo stesso vassoio, lo si fa cadere sempre ben orizzontale, lo si lascia sempre dalla stessa altezza e non si opera in presenza di vento o di correnti d'aria ...!), quanto ad errori effettuati nell'operazione di misura. Da questo punto di vista misurare un tempo è più delicato che misurare la lunghezza di un oggetto, perché in questo caso è più ovvio che la lunghezza non cambia da una misura all'altra. Comunque, una volta accertata la non riproducibilità delle misure, resta il problema di cosa farsene di tante misure diverse. Esistono varie procedure per ottenere da una serie di misure ripetute un valore più attendibile di quello di ognuna di esse: il modo più semplice è di calcolarne la media aritmetica. Basta cioè cronometrare un certo numero di volte i tempi di caduta dello stesso vassoio dalla stessa altezza, sommare tutti i risultati delle misure effettuate e dividere la somma per il numero di misurazione eseguite; nel caso si esegua tale procedura, è necessario che i ragazzi ne comprendano, almeno qualitativamente, il significato, evitando di ridurre il tutto a un semplice procedimento di calcolo da eseguire meccanicamente. Si farà notare in particolare che l'applicazione di tale metodo presuppone che: a) gli errori che si commettono ogni volta possono essere indifferentemente per eccesso o per difetto rispetto al tempo vero di caduta; b) ripetendo più volte la misura ci si può attendere che gli errori si compensino almeno in parte. Eseguite le misure e calcolati i valori medi, con i dati raccolti si può compilare sulla lavagna una tabella che ogni bambino può riportare sul proprio quaderno. La tabella

Figura 4.3 - C'è proporzionalità fra tempo di caduta e peso di un oggetto?

La tabella riporta misure effettuate a scuola sui tempi (t) di caduta al suolo di uno o più (N) vassoi di polistirolo porta-alimenti fra loro sovrapposti e lasciati cadere sempre dalla stessa altezza.

N	t
1	2,5
2	2,1
3	1,8
4	1,5

(fig. 4.3 per la relazione pesi-tempi di caduta) va discussa, in modo che risulti evidente, sulla base dei dati, il fatto che non esiste una legge di proporzionalità inversa tra il peso di un oggetto ed il tempo di caduta, ovvero una legge di proporzionalità diretta tra quest'ultimo e la superficie dell'oggetto. Può essere interessante, dopo aver effettuato la misura del tempo impiegato a cadere da un singolo vassoio, far compilare ai bambini una tabella di previsione dei tempi di caduta nelle situazioni che si vogliono successivamente esaminare; poi eseguire le esperienze ed infine confrontare le tabelle delle previsioni con quelle delle misure effettive.

Nella esperienza da noi condotta alcuni bambini, nonostante avessero di fronte questi dati, sono rimasti ancorati all'idea di proporzionalità, confermando ancora una volta quanto essa sia radicata in loro. Un pregiudizio così resistente ha evidentemente molte cause: proviamo a individuarne qualcuna. Le relazioni di proporzionalità dominano una parte della loro esperienza quotidiana di attribuzione di numeri a situazioni concrete (basta pensare ai prezzi); l'elaborazione quantitativa tipica della scuola elementare si basa solo sulla proporzionalità (praticamente tutti i problemi di matematica proposti ai bambini alle elementari trattano solo di grandezze proporzionali); soprattutto, la proporzionalità è sin dall'inizio una caratteristica fondamentale delle relazioni che consentono la quantificazione delle variabili, cioè la costruzione di una metrica (per poter misurare è necessario stabilire una relazione lineare fra l'insieme dei numeri razionali e le grandezze considerate).

4.4. Il problema della velocità: dalle conoscenze dei bambini alla formulazione matematica

Abbiamo già sottolineato (§ 4.1.) la necessità, per studiare l'attrito viscoso, di ricostruire l'andamento della velocità di un corpo durante il moto. Introdurre il concetto formale di velocità è però tutt'altro che semplice, se si vuole che i ragazzi riescano a collegarlo alle loro idee intuitive sulla velocità stessa.

È facile rendersi conto che nel linguaggio comune all'unico vocabolo "velocità" corrispondono almeno due modi diversi di "guardare" i fatti che succedono. Il primo, basato sulla *percezione istantanea*, consiste nel "guardare" la velocità di un oggetto momento per momento: esso permette di operare confronti ed emettere giudizi su di un piano qualitativo di relazioni d'ordine (si pensi a quando si vedono passare automobili sulle strade: è percettivamente che ci si rende conto, ad esempio, che l'auto rossa, che sta passando, è più veloce della bianca, che è appena passata).

L'altro punto di vista consiste nell'operare confronti e formulare giudizi sulla velocità media, e viene costruito facendo uso soprattutto della *memoria* per confrontare "tempi complessivi" con "spazi complessivi". Si pensi, per esempio, ad un viaggio fatto in treno o in auto: nel tempo rimarrà un ricordo di un viaggio complessivamente lento, veloce, velocissimo, anche senza riferimenti a velocità istantanee. In questo caso si può tanto rimanere su di un piano qualitativo, quanto dare valuta-

zioni quantitative ("Sono andato a una media di 120 km/h: ho impiegato un'ora e mezzo per andare da Napoli a Roma").

La percezione e la memoria rappresentano quindi due canali di elaborazione dell'informazione di carattere biologico che stanno alla base della costruzione del concetto di velocità sul piano qualitativo, anche se non sono di per sé sufficienti a superare questo livello. La padronanza del concetto qualitativo di velocità non è però scontata: nei bambini e in molti adulti non c'è sempre consapevolezza della differenza fra i possibili modi di guardare alla velocità. Si parla, infatti, di "velocità" intendendosi abbastanza bene in relazione al contesto, ma riferendosi alcune volte alla velocità media, altre volte alla velocità istantanea, senza rendersene bene conto.

È necessario invece che sia chiara questa distinzione, per poter passare al piano quantitativo della descrizione del movimento; ciò significa affrontare con i bambini esperienze e discussioni su moti non uniformi, in situazioni in cui la distinzione sia più facilmente evidenziabile. (Nel moto uniforme, velocità all'istante e velocità media hanno lo stesso valore). Focalizzare l'attenzione sulla velocità all'istante non pone grossi problemi: i bambini sanno che la velocità di un oggetto può cambiare continuamente, ed anche che può essere misurata. Per esempio fa parte dell'esperienza quotidiana l'esistenza del tachimetro, che in qualunque mezzo di trasporto fornisce il valore della velocità istante per istante. I bambini non comprendono il senso fisico-matematico del numero indicato dalla lancetta, cioè non hanno idea che esso ha le dimensioni di uno spazio diviso un tempo, ma sanno benissimo che maggiore è il numero, maggiore è la velocità, e viceversa. È invece più complicato focalizzare l'attenzione sulla velocità media: per la velocità, come per qualunque altra grandezza, esiste infatti un'intuizione di valore medio nel caso in cui si abbia a che fare con piccole variazioni, mentre se si hanno grosse variazioni può essere del tutto anti-intuitivo pensare a un valore medio, che necessariamente corrisponde ad una esperienza immaginaria (come avrebbe dovuto muoversi se avesse voluto andare sempre alla stessa velocità, e arrivare nello stesso tempo...). "La velocità media è una velocità che cambia di poco, se cambia di molto non si chiama più velocità media", "La velocità si sposta sempre intorno alla velocità media, ma di poco", sono i pareri espressi da due bambini nel corso di una discussione sulla velocità media.

Non ha in generale senso definire a priori una ben precisa sequenza di attività per il percorso di ricostruzione del concetto di velocità. A seconda delle esperienze fatte dai bambini si deve decidere volta per volta il momento adatto per affrontare o approfondire un determinato aspetto, su cui eventualmente tornare più volte: il momento cioè in cui i bambini hanno individuato un problema, e sorge la necessità di risolverlo. Nel seguito del paragrafo ci limiteremo dunque a dare indicazioni su come affrontare in classe singoli modi di pensare sulla velocità senza indicare un percorso definito. Sono indicazioni di base, che hanno lo scopo di fornire suggerimenti adatti per riuscire a dare ai bambini un'idea di velocità (e di misura della velocità) che sia sufficiente per analizzare l'andamento del moto nel caso specifico che ci interessa. Un lavoro centrato sulla costruzione della nozione di velocità in tutti i suoi vari aspetti, in connessione con l'esperienza quotidiana ed orientato alla ricostruzione formale, richiederebbe un percorso didattico molto più ampio ed approfondito, analogo al discorso che in questa guida si sta facendo sulla nozione di forza.

4.4.1. Relazione spazio/tempo/velocità

La ricerca della relazione fra spazio, tempo e velocità rappresenta l'aspetto fondamentale del concetto di velocità. Per avviare con i bambini una discussione su questo punto ci si può servire della tabella numero vassoi/tempi (o di misure dei tempi di caduta di palline in un cilindro pieno d'acqua, vedi § 4.5.), e porre domande del tipo:

"Alcune vaschette (palline) hanno impiegato più tempo a cadere, altre meno tempo. Come mai?" – "Si può stabilire qual è la più veloce?" – "Le abbiamo fatte cadere tutte dalla stessa altezza: se le lasciamo cadere da altezze diverse, si può stabilire lo stesso qual è la più veloce?" ... Si possono anche far correre i bambini uno alla volta, prima su un percorso fissato, poi per un intervallo di tempo definito ..., e chiedere come si può stabilire chi è stato il più veloce nelle varie situazioni esaminate.

Lo scopo di queste domande è far capire che per decidere quale tra due oggetti è il più veloce, bisogna guardare sia lo spazio percorso che il tempo impiegato a percorrerlo. I bambini dovrebbero riuscire a decidere abbastanza facilmente che, sempre a parità di percorso, l'oggetto più veloce è quello che ha impiegato meno tempo, mentre a parità di tempo il più veloce è quello che ha percorso più

spazio. Inoltre dovrebbero rendersi conto che nel caso in cui ci si trova a dover confrontare la velocità di due oggetti che percorrono spazi diversi in tempi diversi, non è più possibile risolvere il problema da un punto di vista di pura relazione d'ordine (a parte il caso rafforzativo in cui uno dei due oggetti percorre più spazio dell'altro impiegando meno tempo, risultando evidentemente il più veloce) e che in questa situazione è necessario passare ad un'analisi quantitativa, cioè trovare un modo per assegnare alla velocità di ciascun oggetto un valore numerico.

4.4.2. Distinzione fra velocità all'istante e velocità media

Si possono far osservare ai bambini cadute di oggetti vari in aria (§ 4.2.) o di palline in acqua (§ 4.5.) e chiedere loro cosa succede alla velocità dei vari oggetti man mano che cadono. In questo modo si fissa la loro attenzione sulla velocità momento per momento e si definisce il problema da studiare.

Un trucco che può aiutare i bambini ad esprimere i loro pareri più facilmente può essere quello di immaginare che sull'oggetto che cade sia inserito un tachimetro (bastano due parole di spiegazione in cui si faccia riferimento alle automobili, perché comprendano bene cos'è un tachimetro), poi chiedere che cosa segnerebbe questo strumento dal momento in cui l'oggetto è lasciato cadere in poi. C'è da aspettarsi che i bambini avanzino ipotesi diverse: la velocità di caduta è immediatamente diversa da zero e resta costante; la velocità di caduta aumenta continuamente; la velocità di caduta prima aumenta, ma poi diminuisce avvicinandosi al termine del percorso; la velocità di caduta prima aumenta e poi resta costante ...

Si può poi chiedere ai ragazzi se secondo loro è possibile, muovendosi in modi molto diversi, percorrere uno spazio definito impiegando sempre lo stesso tempo, e realizzare esperienze che mostrino che ciò è effettivamente possibile. Per esempio si possono chiamare in disparte tre o quattro ragazzi e dar loro la consegna di partire contemporaneamente, fare percorsi identici ed allineati, arrivare contemporaneamente, camminando però in modo diverso (uno può muoversi con un passo il più possibile regolare; uno può iniziare a correre "a singhiozzo" ...). È opportuno che i ragazzi-attori si esercitino un po' ad eseguire le consegne e quando sono diventati sufficientemente bravi nell'esecuzione potranno esibirsi davanti al resto della classe.

I compagni devono descrivere quello che hanno visto: l'andamento di ognuno dei concorrenti e il fatto che tutti hanno percorso lo stesso spazio nello stesso tempo (spazio e tempo possono anche essere misurati). A questo punto si può introdurre il concetto di velocità media: anche se tutti i bambini hanno compiuto il percorso in modi diversi, si può dire che avevano tutti la stessa velocità media, perché hanno impiegato lo stesso tempo a percorrere lo stesso spazio. Si può anche fare appello a conoscenze ed esperienze comuni, dai viaggi familiari in automobile alle gare di corsa (automobilistiche, motociclistiche, ...). Si può soprattutto far notare che questa *velocità media* coincide con la *velocità vera* con cui ha camminato il bambino che andava a passo regolare, quindi a velocità costante: come abbiamo già detto, la velocità media di un oggetto in un qualunque movimento è in generale la velocità a cui avrebbe dovuto muoversi se avesse dovuto compiere lo stesso percorso nello stesso tempo, ma muovendosi a velocità uniforme⁵; evidentemente, essa dipende solo da quanto spazio si percorre complessivamente e da quanto tempo ci si impiega.

4.4.3. La misura della velocità media

I bambini per esprimere i loro giudizi su quale è stato il più veloce degli oggetti fatti cadere nell'aria

⁵ Il concetto di velocità media si complica ulteriormente nel caso in cui durante il percorso si verificano delle soste. Infatti, spesso è profondamente radicata nei bambini la convinzione che "valore zero" corrisponda a "non esistenza". Per calcolare la velocità media, cioè, bisognerebbe secondo loro tener conto solo degli intervalli di tempo in cui effettivamente la velocità è diversa da zero, e non del tempo totale di percorrenza.

Ad esempio, se bisogna calcolare la velocità media di un treno che compie un dato percorso, fermandosi di volta in volta alle varie stazioni, nel conteggio del tempo totale impiegato dal treno, e quindi nel calcolo della velocità media complessiva, devono essere considerati anche i tempi che il treno trascorre fermo in stazione, caratterizzati da un valore di velocità nullo. Per molti bambini, invece, tali intervalli di tempo, in cui $v = 0$, non dovrebbero essere presi in considerazione, in quanto in tali intervalli di tempo la velocità non esiste. D'altra parte bisogna rendersi conto che anche il valore di velocità calcolato in questo modo ha un significato: esso rappresenta, infatti, la velocità media tenuta dal treno per tutto il tempo in cui effettivamente si è mosso. Ci si rende conto cioè che esistono (almeno) due distinti significati di velocità media: il primo rappresenta la velocità equivalente di un veicolo che avesse compiuto lo stesso percorso del treno nello stesso tempo totale ad una velocità costante; il secondo (corrispondente alla cosiddetta *velocità di crociera*) rappresenta la velocità (maggiore) di un veicolo che ha compiuto lo stesso percorso a velocità uniforme, muovendosi però solo per un tempo complessivamente uguale al tempo che il treno ha trascorso in movimento.

(oppure delle palline fatte cadere nell'acqua), si basano su misure dei tempi totali di caduta. Anche se si fanno delle corse a tempo fisso o a percorso fisso, ugualmente i bambini decidono chi è il più veloce, e magari fanno una graduatoria di tutta la classe, basandosi o sul percorso totale o sul tempo totale. In tutte queste situazioni i giudizi espressi riguardano dunque la velocità media. Una volta chiarito con i ragazzi questo aspetto nei termini qualitativi che abbiamo sopra descritto, si possono utilizzare queste stesse situazioni per introdurre la misura della velocità media.

Si può dire direttamente che per "misurarla" bisogna misurare la lunghezza del percorso (s), il tempo di percorrenza (t), e fare il rapporto tra i numeri così ottenuti: $v = s/t$. D'altra parte è necessario che i bambini non solo imparino a calcolare il valore della velocità media, ma che comprendano anche il significato concettuale dell'operazione fatta: in particolare, sarà fondamentale verificare che essa è perfettamente coerente con le loro conoscenze ed intuizioni. Si potrà far vedere che con questa definizione sono rispettate le relazioni fra velocità e spazio percorso o fra velocità e tempo di percorrenza, già individuate rispettivamente nelle due situazioni a tempo costante o a percorso costante; ed è soprattutto rispettata quella proporzionalità che di solito è intuitivamente evidente (raddoppiando il tempo impiegato da un oggetto e lasciando invariato lo spazio, la velocità si dimezza, ...).

Bisognerà infine costruire un senso per le unità di misura, discutere cioè l'importanza di associare al numero i km/h o i m/s o i cm/min ... Si deve in sostanza far capire che, come per ogni altra grandezza fisica, il numero da solo non fornisce alcuna informazione sul valore della variabile che si considera, ma deve essere sempre messo in relazione all'unità di misura; e che essa, nel caso della velocità, dipende dalle unità di misura di altre due grandezze (spazio e tempo).⁶

⁶ Anche nei problemi di aritmetica elementare (per esempio quelli in cui si devono calcolare la spesa per l'acquisto di merci varie ...) spesso si ha a che fare con variabili che in realtà dipendono da due grandezze, il cui valore è correttamente esprimibile in unità date dal rapporto fra le unità di queste due grandezze (ad esempio £/kg; £/m; ... se si sta parlando di frutta o di tagli di stoffa ...). Questo può essere insegnato ai bambini, eliminando così molte ambiguità delle cosiddette "indicazioni" nei calcoli, e si può far notare l'analogia fra queste situazioni ed il caso delle velocità.

4.4.4. Dalla velocità media all'andamento della velocità istantanea

Con l'introduzione della relazione $v = s/t$ si passa dalla situazione fisica (movimento) al numero che ne rappresenta un aspetto particolare e schematizzato. Tale passaggio richiede l'esecuzione di un calcolo: mediante una operazione si associa ad una coppia di numeri che rappresentano lo spazio percorso ed il tempo impiegato a percorrerlo, un terzo numero, che rappresenta la nuova grandezza fisica: la *velocità media*.

Abbiamo visto d'altra parte che i bambini avanzano in genere ipotesi diverse sull'andamento della velocità in un moto di caduta (in aria od in acqua che sia): per confermare o falsificare ognuna di esse non ci è però di alcun aiuto il calcolo della velocità media, che ovviamente non ci dà alcuna informazione sui valori della velocità istante per istante. Si può porre allora il problema di come si potrebbe fare per vedere, con qualche misura, quale delle ipotesi avanzate è quella giusta (o, nel caso ne sia stata avanzata una sola, come si può verificarla). Può darsi che qualcuno arrivi da solo a dire che si potrebbe dividere l'intero percorso in due o più parti uguali e vedere se esse vengono percorse in tempi uguali (allora la velocità è sempre la stessa), o diversi (allora la velocità cambia: aumenta se i tempi diminuiscono e viceversa). Se nessuno ci pensa, può essere l'insegnante a suggerire la via, chiedendo ai bambini cosa ci si deve aspettare, nelle varie ipotesi, se si divide il percorso in parti uguali e si cronometrano i tempi parziali. Si può anche chiedere che relazione esiste tra le velocità medie nei vari intervalli e le velocità segnate da un eventuale tachimetro, cioè la velocità nei vari istanti. Da soli o con l'aiuto dell'insegnante i bambini dovrebbero arrivare a capire che tanto più piccoli e numerosi sono i tratti in cui si può dividere il percorso, tanto più i singoli valori delle velocità medie in ogni intervallino si avvicineranno alla successione dei numeri segnati dal tachimetro all'interno dello stesso tratto di percorso. L'andamento della velocità di un oggetto può dunque essere studiato calcolando i valori delle velocità medie in tratti successivi del percorso che siano i più brevi possibili. A tale scopo basta fissare alcuni punti di riferimento lungo il percorso, misurare le distanze tra di essi e misurare il tempo che l'oggetto impiega a percorrere ogni tratto. A seconda delle situazioni, l'esecuzione delle misure può risultare più o meno agevole e richiedere metodi differenti.

I casi in cui abbiamo lavorato con i bambini (corse di bambini, caduta di oggetti in aria, caduta di oggetti in acqua) presentano problemi diversi.

Per verificare l'andamento della velocità nelle corse si possono disporre, in corrispondenza di ognuno dei punti di riferimento lungo il percorso, dei bambini muniti di cronometro. Al via, mentre il concorrente parte, questi bambini fanno partire i cronometri e ognuno ferma il suo nel momento in cui il compagno gli passa davanti. In questo modo si misurano degli intervalli di tempo che corrispondono ognuno ad uno spazio percorso compreso fra il punto di partenza e ciascuno dei punti di riferimento lungo il tragitto. Questi spazi possono essere misurati e si possono così calcolare le velocità medie corrispondenti a ciascuno di essi (scheda 4.3). Poiché non si tratta di intervalli di spazio successivi, le velocità medie così calcolate danno informazioni abbastanza difficili da interpretare sull'andamento effettivo delle velocità istantanee; ma comunque sufficienti a decidere se durante il percorso la velocità si mantiene approssimativamente costante, oppure continua ad aumentare o a diminuire. È però possibile utilizzare gli stessi dati per ottenere, attraverso un rapporto fra differenze di spazi e di tempi, le velocità medie nei singoli tratti successivi in cui i punti di riferimento dividono il percorso (scheda 4.3). In questo modo si ottiene una successione di valori delle velocità medie che corrisponde effettivamente all'andamento delle velocità, tanto meglio quanto più brevi sono i tratti in cui è stato suddiviso il percorso. Concretamente non è però possibile ridurre le lunghezze dei singoli tratti oltre un certo limite, in quanto per tempi di percorrenza inferiori a qualche secondo (come abbiamo già detto nel § 4.5.), gli errori commessi nelle misure dei tempi renderebbero privi di significato i dati.

Per la caduta in aria è impossibile prendere misure utilizzando il metodo già visto, tranne che per oggetti molto leggeri e con superficie abbastanza estesa (come i vassoietti). Infatti i tempi di caduta da altezze non eccessive sono ordinariamente così piccoli da impedire la suddivisione del percorso. Gli unici oggetti per cui è possibile effettuare misure sono oggetti che raggiungono la velocità limite in un tempo così breve che la fase di accelerazione non può essere messa in evidenza. In questi casi, se si effettuano le misure si ottengono valori di velocità media tutti uguali (nei limiti degli errori), e l'unica cosa che se ne può dedurre è che la velocità di caduta è costante (come appare anche percettivamente evidente).

La situazione per noi più significativa è quella della caduta nell'acqua, in quanto è in questa situazione che riusciremo a ricavare la forma del movimento in presenza di attrito viscoso. Utilizzando recipienti cilindrici di altezza compresa fra 1 e 2 metri riempiti d'acqua e palline di vari pesi e dimensioni (§ 4.5.), è possibile dividere il percorso in 2-4 tratti uguali e misurare i relativi tempi di percorrenza. Le palline più leggere e di diametro maggiore si comportano come i vassoietti nell'aria: la velocità limite è piccola, e ciò consente di suddividere il percorso in un buon numero di tratti; d'altra parte questa velocità è raggiunta così presto che non è possibile evidenziare la fase di accelerazione iniziale. Palline più pesanti o di diametro inferiore raggiungono velocità limite maggiori, per cui diminuisce il numero di tratti in cui si può dividere il percorso senza che le misure di tempo perdano di significato. La fase di accelerazione iniziale diventa abbastanza lunga da poter essere messa in evidenza (si ottengono valori crescenti di velocità media), ma difficilmente il numero di misure effettuate consente di mettere in evidenza la fase finale di velocità limite uniforme. Questo metodo di misura non è quindi sufficiente a ricavare l'andamento generale della velocità di caduta in un mezzo viscoso. È necessario ricorrere a metodi più raffinati che permettono di effettuare un maggior numero di misure su intervalli più brevi. Questo può essere ottenuto ricorrendo a delle foto stroboscopiche (§ 4.5.).

Nella scheda 4.4 si riportano le tappe salienti di come è stato affrontato da noi il problema della velocità.

4.5. Andamento della velocità di un oggetto che cade in un fluido

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente, per osservare l'andamento della velocità di un oggetto in un fluido è opportuno passare a considerare cadute in acqua anziché in aria. A tale scopo può essere proposta una semplice esperienza servendosi di un tubo (morbido) di plastica trasparente (alto circa due metri, con diametro di 4-5 cm). Tale tubo opportunamente sigillato ad un estremo (si può usare ad esempio un tappo di sughero) e mantenuto verticale da un supporto rigido (ad esempio di legno) sarà riempito d'acqua. Si potrà allora lasciar cadere all'interno del tubo vari oggetti: monete, biglie di vetro, sfere di acciaio, sassolini, palline di plastilina ... In questo modo i bambini possono

Scheda 4.3 - L'andamento della velocità attraverso misure di velocità medie

Un oggetto parte dal punto P_0 ed arriva in P_4 . Nelle posizioni P_1, P_2, P_3, P_4 ci sono quattro cronometri. Tutti i cronometri vengono fatti partire *contemporaneamente* nell'istante in cui l'oggetto parte da P_0 . Ognuno di essi viene fermato quando l'oggetto gli passa davanti; t_1 è dunque il tempo che l'oggetto ha impiegato a percorrere il tratto P_0P_1 , t_2 è il tempo che ha impiegato a percorrere il tratto P_0P_2 ... Chiamiamo l_1, l_2, l_3, l_4 rispettivamente le lunghezze dei tratti $P_0P_1, P_0P_2, P_0P_3, P_0P_4$.

Conoscendo t_1, t_2, t_3, t_4 ed l_1, l_2, l_3, l_4 possiamo sia calcolare le velocità medie nei tratti $P_0P_1, P_0P_2, P_0P_3, P_0P_4$ (inclusi ognuno nel successivo), sia le velocità medie nei tratti fra loro successivi $P_0P_1, P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4$.

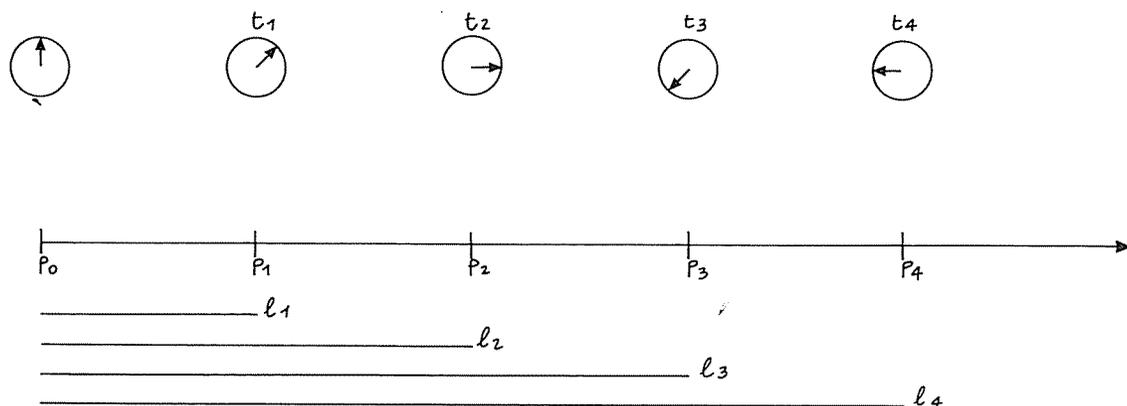
Nel primo caso basta effettuare il rapporto tra gli spazi percorsi ed i rispettivi tempi impiegati a percorrerli. Quindi l_1/t_1 corrisponde alla velocità media nel tratto P_0P_1 , l_2/t_2 corrisponde alla velocità media nel tratto P_0P_2 ...

Per calcolare la velocità medie nei tratti $P_0P_1, P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4$, bisogna innanzitutto calcolare le lunghezze di tali tratti come differenze: $P_0P_1 = l_1, P_1P_2 = l_2 - l_1, P_2P_3 = l_3 - l_2, P_3P_4 = l_4 - l_3$, e analogamente per i tempi impiegati a percorrerli:

$$dt_1 = t_1, dt_2 = t_2 - t_1, dt_3 = t_3 - t_2, dt_4 = t_4 - t_3.$$

Infine si deve fare il rapporto tra gli spazi percorsi ed i relativi tempi di percorrenza. Quindi l_1/t_1 corrisponde alla velocità media nel tratto P_0P_1 , $(l_2 - l_1)/(t_2 - t_1)$ corrisponde alla velocità media nel tratto P_1P_2 ...

Le velocità medie calcolate nel primo caso danno informazioni abbastanza difficili da interpretare sull'andamento effettivo della velocità, proprio perché si tratta di intervalli inclusi uno nell'altro. Più significative sono le velocità medie calcolate nei tratti $P_0P_1, P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4$ in quanto corrispondono a tratti successivi e approssimano tanto più l'andamento della velocità punto per punto (istante per istante), quanto più piccoli sono i tratti in cui è suddiviso il percorso.



Scheda 4.4 - Il problema della velocità

Nel corso dello studio sulla caduta dei corpi in aria ed in acqua abbiamo affrontato in più occasioni diversi tipi di problemi che emergono di volta in volta relativamente alla costruzione del concetto di velocità (dalla definizione alla misura). Riportiamo di seguito le tappe salienti di questo percorso.

Significati che i bambini attribuiscono a parole come "velocità", "rallentare" ...

Sin dalle prime osservazioni e descrizioni di oggetti lasciati cadere in aria, i bambini utilizzano questi termini. Alla richiesta di spiegarne il significato, rispondono in un modo che evidenzia le loro difficoltà: "Rallentare, vuol dire far scendere ad una velocità minore di quando non c'è l'aria".

"Rallentare, è quando si va veloce e poi piano".

"La 'velocità' è il tempo che ci mette".

Relazioni qualitative fra spazio, tempo e velocità

Si fanno cadere alcune vaschette di polistirolo in varie situazioni (più vaschette sovrapposte, così che aumenti il peso a parità di superficie opposta al moto; una vaschetta tagliata in pezzi sovrapposti, così che diminuisca la superficie a parità di peso...).

I ragazzi misurano (sia pure approssimativamente) i tempi di caduta al variare della superficie, o del peso, e compilano una tabella (vedi, per es., fig. 4.3).

Si chiede: "Che cosa significa che alcune vaschette hanno impiegato meno tempo, ed altre più tempo?" (^)

Quasi tutti i bambini affermano che il tempo di caduta dipende dalla velocità: i vassoi che hanno impiegato più tempo sono quelli che cadono più lenti, mentre quelli che hanno impiegato meno tempo sono stati i più veloci. Nella situazione proposta, in cui lo spazio percorso da ciascun oggetto è costante, è pressoché immediato, per i bambini, che un tempo di percorrenza maggiore corrisponde ad una velocità minore e viceversa.

Si propongono allora confronti in situazioni in cui sia lo spazio percorso sia il tempo impiegato a percorrerlo sono diversi; si chiede:

"Se due macchine partono insieme da Napoli per andare a Roma, come si fa a stabilire qual è la più veloce?"

"Quella che ci mette meno tempo".

"E se non partono insieme, come si fa?" "E se non partono dalla stessa città?"

Solo un paio di bambini, che si sono sempre differenziati dal resto della classe nell'intuire la soluzione dei problemi prima degli altri, riescono a dare una risposta:

"Bisogna conoscere i chilometri ed il tempo, così si può stabilire quanti chilometri fanno ogni ora".

Ci vuole una breve discussione, perché anche gli altri riescano a rendersi conto che per "giudicare" una velocità, bisogna "guardare" sia lo spazio che il tempo.

I numeri della velocità

I bambini sanno che la velocità si misura.

Nei loro esempi parlano di automobili che vanno a "80" a "100 km" a "50 all'ora" (molto raramente usano l'espressione corretta "km all'ora"). Per capire fino a che punto essi dominano il significato di questi numeri, e per renderli consapevoli del problema, chiediamo loro se saprebbero calcolare la velocità di due automobili che percorrono l'una 200 km in due ore, e l'altra 350 km sempre in due ore. Alla prima domanda rispondono subito: "100"; per la seconda hanno più difficoltà, ma uno di loro riesce a trovare "175". Gli si chiede di spiegare come ha fatto, e risponde: "Perché 175×2 fa 350". Per calcolare la velocità non hanno idea che si debba effettuare una divisione tra i valori dello spazio percorso e quelli del tempo impiegato a percorrerlo: invece cercano un numero che moltiplicato per il tempo dia lo spazio percorso, e nel far questo impiegano sia pure intuitivamente, e senza controllo formale, una strategia di pensiero proporzionale.

Si dice allora ai bambini qual è l'operazione da eseguire, discutendo con loro il difficile problema del significato reciproco di moltiplicazione e divisione, e si fanno fare poi diversi esercizi in cui si deve

usare la relazione $v = s/t$, con numeri abbastanza semplici perché il controllo intuitivo del risultato serva a stabilizzare il significato dell'operazione.

(^a) In questa situazione di *descrizione* del movimento, si cerca di evitare di discutere sul "perché" i tempi di caduta sono diversi.

L'andamento della velocità di un oggetto che cade

Si vuole indagare su cosa pensano i bambini dell'andamento della velocità di un oggetto, durante la sua caduta. Chiediamo se c'è qualche modo per conoscerlo. Qualcuno parla del tachimetro delle automobili e tutti sono d'accordo che esso segna il valore della velocità dell'auto in ogni momento. Si prova allora a far descrivere a qualcuno cosa succede alla lancetta del tachimetro durante un percorso: in autostrada, in città, in montagna, in curva...

Torniamo a considerare il fenomeno della caduta di oggetti in aria e chiediamo come pensano che si muoverebbe la lancetta di un tachimetro (immaginario) montato sull'oggetto lasciato cadere:

"Quando l'oggetto è fermo, la velocità non c'è e poi l'oggetto non si muove; quando invece comincia a farlo cadere, la lancetta comincia a muoversi: da 1 va a 10 a 20 e quando cade la lancetta si ferma di nuovo a 0".

"L'oggetto quando cade prima incomincia a segnare piano piano, poi a tutta velocità".

"Se da una finestra buttiamo un tachimetro, appena buttato la lancetta si alza, poi quando sta per arrivare a terra la lancetta si abbassa" (^b).

Il problema della velocità media

Fino ad ora si è usata la parola velocità riferendosi alcune volte ad una velocità media (quando, ad esempio, si è introdotta la formula $v = s/t$), altre volte ad una velocità istantanea (nelle discussioni sull'andamento della velocità di un oggetto). Ci rendiamo conto che i bambini non sanno distinguere i due concetti e si interviene per chiarirli. Si comincia a sondare quali sono le loro idee e conoscenze sulla velocità media chiedendo direttamente: "Che cos'è secondo voi la velocità media?". "I valori di velocità che abbiamo calcolati finora sono delle velocità medie?".

Le risposte indicano un'idea intuitiva di media limitata a situazioni di moto quasi uniforme:

"La velocità media è una velocità che cambia di poco, se cambia di molto non si chiama più velocità media".

"La velocità si sposta sempre intorno alla velocità media, ma di poco".

Per cercare di chiarire meglio il concetto si propone un lavoro in cui siano coinvolti direttamente i bambini: nel corridoio della scuola si cronometra il tempo che alcuni di loro impiegano a percorrerlo. Prima di partire ognuno aveva ricevuto un'istruzione: alcuni dovevano camminare, altri dovevano correre mantenendo per quanto possibile costante la velocità, altri dovevano alternare il cammino con la corsa, altri infine dovevano alternare al cammino ed alla corsa anche delle fermate.

Si misura la lunghezza del corridoio (24 m): conoscendo i tempi impiegati dei bambini, si calcolano le loro velocità medie e si compila una tabella:

(^b) Si noti la mancanza di qualunque "causalità meccanica" in questa spiegazione: il tachimetro è "fatto per" segnare la velocità a cui si muove, e comunque la segna.

Bambino n	Tempo s	Velocità m/s	Note
1	30	0,8	Si muove con v. costante
2	14	1,7	Si muove con v. costante
3	11	2,1	Si muove con v. costante
4	9	2,6	Si muove con v. costante
5	6	4	Si muove con v. costante
6	15	1,6	Alterna cammino e corsa
7	14	1,7	Alterna al cammino e alla corsa delle fermate

Durante la discussione scaturita dall'analisi della tabella, quasi tutti continuavano a chiamare velocità medie solo quelle in cui i bambini che percorrevano il corridoio andavano ad un'andatura costante o quasi. Ad esempio chiamavano velocità media quella calcolata per il bambino n. 2, che si muoveva a velocità costante, mentre ritenevano che la velocità, ad essa praticamente uguale, calcolata per il bambino n. 7, che effettuava anche fermate durante il percorso, non si poteva chiamare più velocità media, ma si sarebbe dovuta chiamare in un altro modo. Solo uno di loro aveva un parere diverso: "Se un bambino va più piano o si ferma, il tempo perso lo recupera andando più veloce".

Dalla velocità media all'andamento della velocità

A questo punto pensiamo di porre i bambini davanti ad una situazione concreta, in cui un fenomeno di caduta riproducibile possa essere analizzato con una certa cura. Si porta dunque in classe un tubo di perspex trasparente alto 1 metro e di diametro di 20 centimetri; e due gruppi di sferette: uno a densità costante (acciaio) e raggio variabile, l'altro composto di sfere con raggio costante (palline da ping-pong riempite di materiali diversi) e densità variabile.

Dopo aver riempito il tubo d'acqua si mostrano una per volta le cadute delle diverse palline nel tubo: i bambini notano subito che alcune palline scendono più rapidamente ed altre più lentamente.

Si chiede come si può fare a stabilire qual è la pallina più veloce e quella più lenta.

I bambini dicono che basta calcolare la velocità, dividendo lo spazio per il tempo. Quindi cronometrano i tempi di caduta delle sfere (foto 1), misurano la lunghezza del percorso (l'altezza della colonna d'acqua, foto 2) e calcolano le velocità medie, compilando una tabella:

Pallina n	Vel. intero percorso cm/s	Vel. metà percorso cm/s
1	156	110
2	94	79
3	62	50
4	31	25

A questo punto riproponiamo il problema dell'andamento della velocità delle palline durante la caduta, chiedendo ai bambini cosa ne pensano. Emergono due opinioni:

"La velocità della pallina appena lasciata diventa subito massima e poi non aumenta più".

"La velocità della pallina nel tubo comincia ad aumentare a poco a poco, poi aumenta sempre meno, però aumenta sempre".

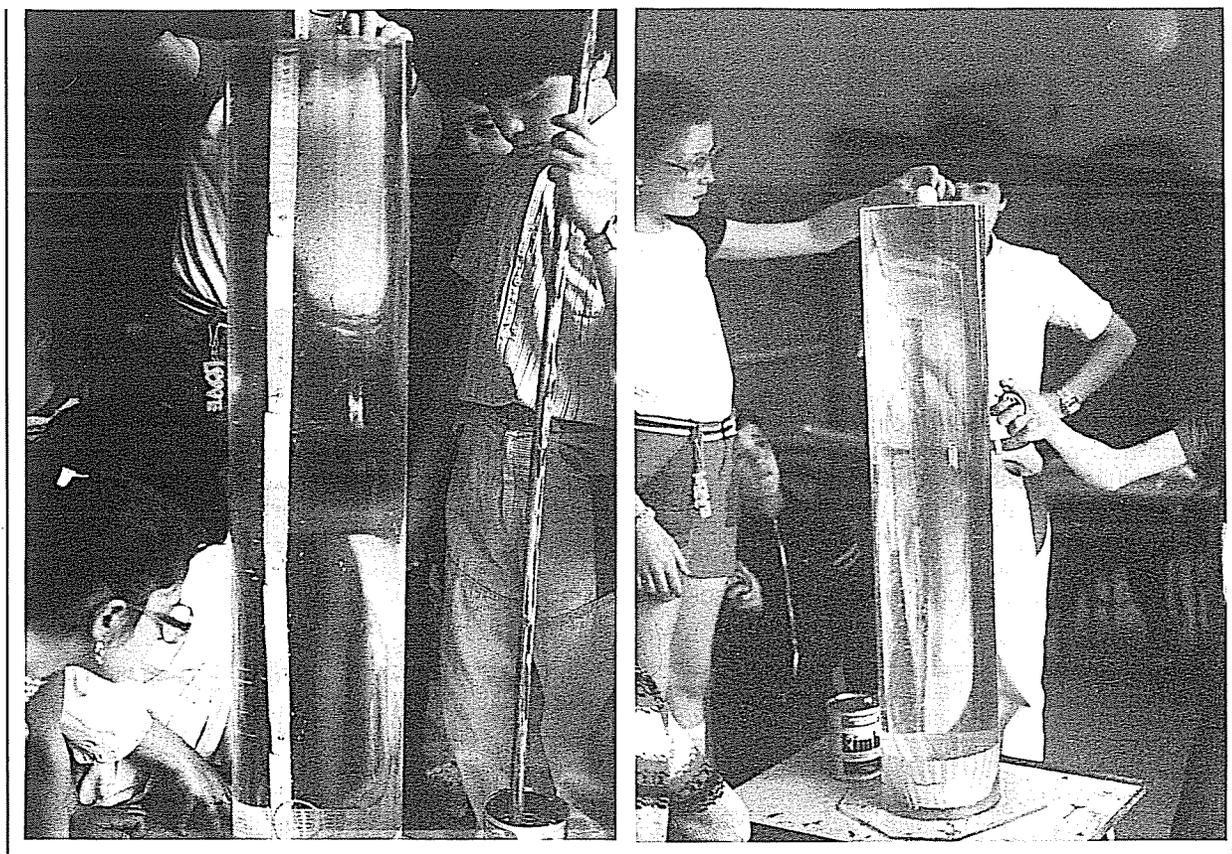
Per verificare se la prima ipotesi è esatta si suggerisce di calcolare le velocità medie delle sfere nella prima metà del percorso per confrontarle con le velocità calcolate in precedenza. Dopo una breve discussione, i bambini sono d'accordo che: se la velocità di caduta è costante, si devono trovare gli stessi valori entrambe le volte; i valori minori nella prima parte del percorso indicano che la velocità aumenta durante la caduta.

Si esegue l'esperienza, utilizzando alcune sfere precedentemente scelte in modo che la fase di accelerazione iniziale fosse evidente (non si utilizzano cioè le sfere più leggere, per le quali il tratto di accelerazione iniziale è talmente breve da non poter essere messo in evidenza a causa degli errori di misura). I valori trovati per la velocità nella prima metà del tubo risultano minori di quelli calcolati nell'esperienza precedente per l'intero percorso (cfr. tabella). Alla luce di questi dati il gruppo di bambini che aveva ipotizzato una velocità di caduta costante si trova disorientato; alcuni aderiscono alla tesi del secondo gruppo, altri dicono:

"La velocità della pallina aumenta fino a metà tubo e poi rimane la stessa.

Un altro bambino, infine, sostiene che per poter stabilire quello che veramente succede - bisognerebbe misurare la velocità di ogni centimetro". E tutti sono d'accordo.

A conclusione di questo breve percorso ci si può rendere conto che i bambini hanno compreso (almeno ad un livello qualitativo) in che modo la definizione "matematica" di velocità che è stata loro insegnata possa essere utilizzata per passare dal calcolo di una velocità media su un percorso complessivo, allo studio dell'andamento della velocità istantanea lungo il percorso.



osservare cadute diverse: alcuni oggetti scendono ondeggiando (ad esempio le monete), alcuni scendono più veloci, altri più piano, ... Si può far descrivere quello che accade, ed eventualmente si può provare un confronto/analogia con le osservazioni sulla caduta degli oggetti in aria. Le descrizioni e le ipotesi formulate in questa fase dai bambini sono basate esclusivamente su considerazioni qualitative e, come abbiamo visto nel § 4.4., non possono essere sufficienti per definire in modo attendibile l'andamento della velocità degli oggetti durante la caduta. A questo scopo è invece necessario disporre di dati numerici che rappresentano gli spazi percorsi da un oggetto in caduta ed i relativi tempi impiegati a percorrerli. La fase successiva sarà quindi rivolta alla realizzazione di un'esperienza che permetta di misurare tali dati. Possano essere utilizzati il tubo descritto sopra e solo quegli oggetti che cadono in maniera "riproducibile", senza cioè evidenti differenze tra cadute successive. D'altra parte anche tra questi oggetti bisogna fare un'ulteriore distinzione: ci sono quelli che evidentemente raggiungono quasi subito una velocità li-

mite, quelli che nell'intero percorso non la raggiungono (avrebbero "bisogno" di uno spazio maggiore), quelli infine in cui risulta evidente una fase iniziale di accelerazione, fino al raggiungimento della velocità costante. Per trovare la forma più generale dell'andamento della velocità di caduta in un mezzo viscoso conviene lavorare più sistematicamente su oggetti di quest'ultimo tipo, che soddisfino quindi a due condizioni:

- 1) mettere in evidenza la fase iniziale di accelerazione (il moto non dovrà quindi essere "troppo lento");
- 2) permettere di effettuare misure intermedie di tempo durante la caduta (non dovrà cioè neanche essere "troppo veloce").

La scelta delle sferette su cui lavorare a fondo può essere fatta sperimentalmente dall'insegnante, prima di presentare l'esperienza in classe. In linea di massima conviene servirsi di palline di acciaio, come quelle dei cuscinetti a sfere, del diametro di circa un centimetro, oppure di biglie di vetro o di palline di plastilina: queste ultime possono essere

costruite su "misura", sia per il diametro, sia per il peso, inserendo all'interno pallini di piombo o chiodini. Basterà a tale scopo cronometrare alcuni tempi intermedi di caduta delle diverse palline, calcolare le velocità medie, ed infine scegliere quelle che verificano le condizioni cercate.

Dopo aver posto ai ragazzi il problema di quale potrebbe essere l'andamento della velocità durante la caduta ed aver discusso i modi per verificare le loro ipotesi in merito, come visto nel paragrafo precedente, si può provare ad eseguire misure dei tempi di caduta parziali (ed eventualmente totali) delle palline prescelte, misurare gli intervalli di spazio percorso ed infine calcolare le velocità medie corrispondenti. Generalmente i pochi dati significativi che si riescono a raccogliere in questo modo (in non più di tre o quattro intervalli per ogni caduta) sono, com'è facile verificare, insufficienti a confermare alcune delle ipotesi avanzate dai bambini: gli stessi dati possono essere, invece, sufficienti a scartarne altre (vedi scheda 4.4). Sorge quindi la necessità di procurarsi, attraverso una esperienza meno grossolana, un numero "sufficiente" di dati spazio-tempo (ed è importante che questa esigenza venga compresa e verificata dai bambini a partire dai limiti del loro lavoro). Una tecnica relativamente semplice, adatta a tale scopo, è basata sulla realizzazione di foto stroboscopiche, del tipo di quelle mostrate in fig. 4.4.⁷

In figura sono presentate foto che rappresentano situazioni diverse. Nelle prime tre (a, b, c) è evidente sia la fase iniziale di accelerazione, sia la fase a velocità costante; nella quarta (d) la velocità limite è subito raggiunta, ed è visibile solo la fase a velocità costante; nell'ultima (e), infine, la velocità limite non si raggiunge e la velocità cresce lungo tutto il percorso.

Come già ricordato in precedenza le situazioni

⁷ Di tale tecnica sarà dato solo un breve cenno, allo scopo di illustrare il metodo da noi usato per ottenere le fotografie. Ci si è serviti di un disco di metallo dotato di una fessura, montato su un motore elettrico a velocità variabile, dotato di contagiri. Si è utilizzata infine una macchina fotografica che avesse la possibilità di tenere l'otturatore aperto (posa B). Per ottenere le fotografie è stato sufficiente lasciar cadere l'oggetto, facendo girare il disco posto davanti all'obiettivo della macchina fotografica (in posa B). In questo modo, ogni volta che la fessura del disco passa davanti all'obiettivo, si ottiene sulla pellicola un'immagine dell'oggetto nella posizione in cui si trova in quel momento. È evidente che maggiore è il numero di giri del disco per ogni minuto, maggiore sarà il numero di immagini dell'oggetto che impressioneranno successivamente il fotogramma (fig. 4.4). Si noti che il tempo tra due qualsiasi posizioni successive della sfera è costante e corrisponde al tempo impiegato dal disco a compiere un giro.

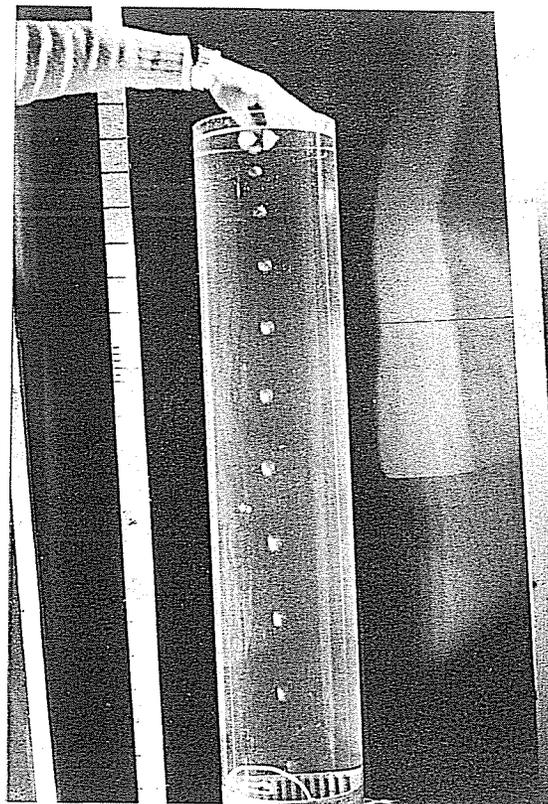
più significative per il nostro scopo sono quelle del primo gruppo, per cui conviene cominciare ad utilizzare queste foto. Esse possono essere fotocopiate e distribuite a tutti i bambini, fornendo così un utile e stimolante strumento di lavoro da discutere ed analizzare.

Inizialmente l'insegnante potrà porre una serie di domande generiche: "Che cosa rappresentano?" - "Come sono state fatte?". Naturalmente, come spesso accade, i primi pareri potranno essere molto diversi: "È una sola pallina, le altre sono state disegnate" - "Sono molte palline". Ci si rende subito conto che, per una corretta interpretazione delle foto da parte di tutti i bambini, è assolutamente necessario che essi si rendano conto di come le fotografie sono state ottenute. A tale scopo ci si potrà servire di un grande disco di cartone, libero di girare intorno ad un asse orizzontale (ad esempio un chiodo): su tale disco potranno essere praticate una o più fessure (fig. 4.5). A questo punto basterà far girare (con la mano) il disco e far osservare ai bambini, guardando con un occhio solo attraverso di esso, movimenti vari: persone che camminano o che corrono, movimenti di automobili, cadute di oggetti ... facendo opportunamente variare (in modo qualitativo) la velocità di rotazione del disco. In tal modo i bambini avranno la percezione visiva del movimento bloccato in istanti ben determinati, in corrispondenza a quando una fessura del disco passa davanti all'occhio: in maniera diversa, a seconda di come si trovano in relazione la velocità del movimento e la velocità del disco. Questa esperienza permetterà ai bambini di spiegarsi la tecnica della foto: per una corretta interpretazione della stessa, è però necessario che l'insegnante dica ai bambini che il tempo intercorrente tra una posizione della sfera e quella immediatamente successiva è *costante* (indicato su ogni foto) in corrispondenza ad una rotazione costante del disco che è servito a scattare le fotografie.⁸

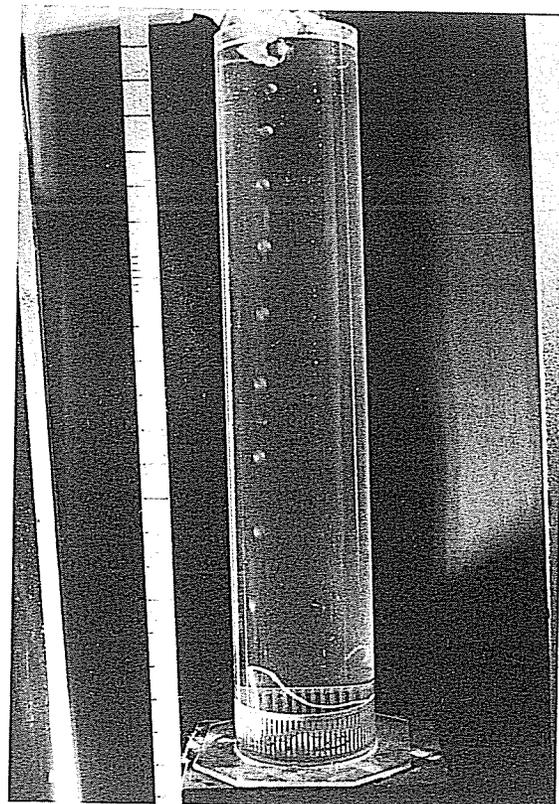
Dopo questa fase di presentazione e di prime discussioni, si passerà all'analisi delle fotografie; in particolare, bisognerà guidare i bambini ad utilizzare le foto a disposizione per individuare l'andamento della velocità delle sfere.

Si può cominciare in un primo momento ad osservare le foto ed a discuterle da un punto di vista qualitativo. Si può ad esempio notare che siccome

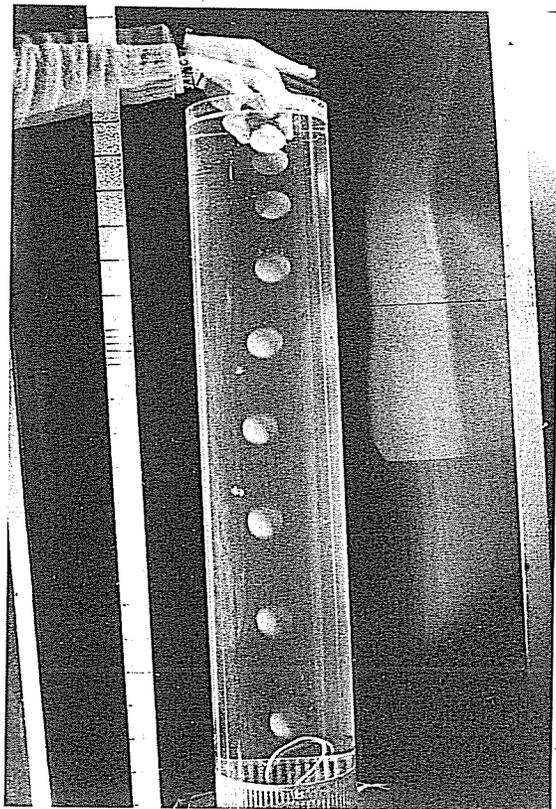
⁸ Può essere facile procurarsi un flash elettronico, che emette lampi di luce a intervalli regolari: in questo caso si possono svolgere le esperienze già descritte e collegarle alle fotografie, in un ambiente almeno parzialmente oscurato.



(a)



(b)

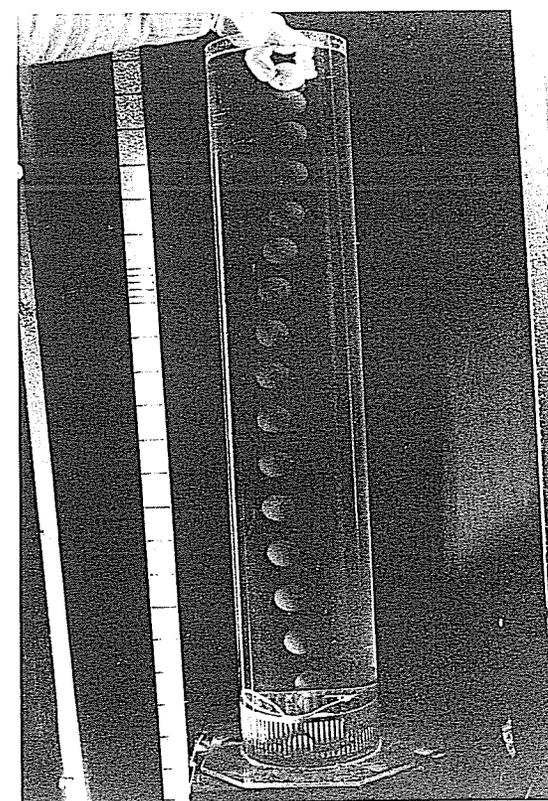


(c)

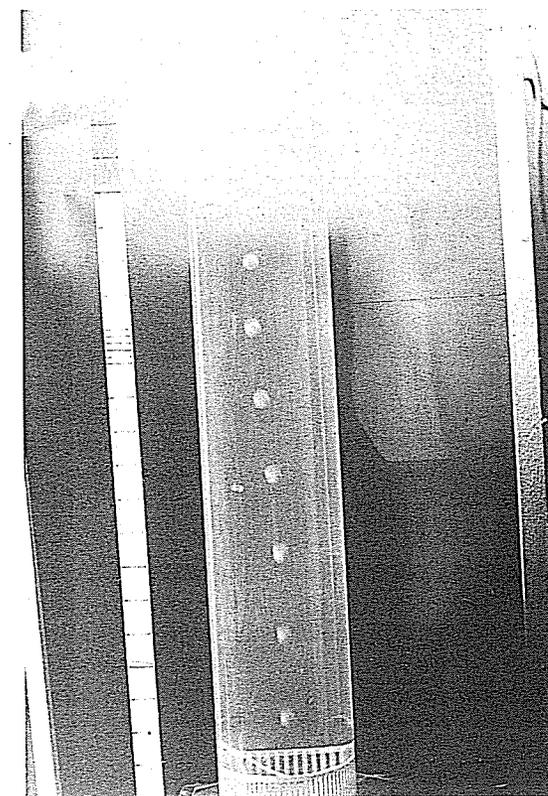
Figura 4.4 - Dalla misura degli spazi percorsi all'andamento della velocità

a) b) c) sono le foto stroboscopiche (vedi nota 7 Cap. IV) della caduta in acqua di tre palline di peso e raggio diverso, effettuate ognuna con una propria frequenza di ripresa ($P_a = 25$ g, $r_a = 9,5$ mm, $d_a = 1/16$ s; $P_b = 40$ g, $r_b = 10,7$ mm, $d_b = 1/16$ s; $P_c = 90$ g, $r_c = 19$ mm, $d_c = 1/16$ s). In ognuna di esse è visibile una fase iniziale in cui le distanze fra le posizioni successive di ogni pallina aumentano, ed una seconda fase in cui si mantengono costanti. Ciò corrisponde ad un moto in cui la velocità aumenta fino a raggiungere un valore massimo (velocità limite) che si mantiene poi costante per tutto il resto del moto. Tale valore può essere calcolato dividendo la lunghezza (costante) degli ultimi tratti percorsi per l'intervallo (costante) di tempo impiegato a percorrerli. Si può risalire dalle distanze misurate sulle foto alle distanze reali, moltiplicando le prime per il fattore di scala dato dal rapporto fra la lunghezza reale del tubo (1 m) e la sua lunghezza misurata sulle foto. Variando peso e dimensioni delle palline, cambia sia il valore della velocità limite che il tempo impiegato a raggiungerla e, di conseguenza, lo spazio percorso con moto accelerato.

In fig. d è rappresentata una situazione in cui la velocità limite è raggiunta quasi immediatamente, il che rende meno apprezzabile la fase di accelerazione iniziale ($P_d = 55$ g, $r_d = 19$ mm, $d_d = 1/16$ s). In fig. e invece l'intero percorso non è sufficiente affinché la pallina raggiunga la velocità limite ($P_e = 95$ g, $r_e = 14,5$ mm, $d_e = 1/16$ s).



(d)



(e)

in ogni foto i tempi tra le posizioni successive delle sfere sono costanti, saranno le distanze tra di esse a determinare l'andamento della velocità. Si può notare, ancora, che sulle foto si possono distinguere chiaramente due parti: una iniziale, in cui gli spazi aumentano costantemente (è questo il tratto di accelerazione, nel quale la velocità delle sfere passa dal valore iniziale nullo ad un valore crescente verso la velocità limite); ed una finale caratterizzata da spazi praticamente e visibilmente uguali (in questo tratto la velocità della sfera si mantiene dunque circa costante, praticamente uguale a quella limite).

L'andamento della velocità in tal modo risulta evidente: "La velocità della pallina aumenta fino ad un certo punto e poi rimane la stessa fino al fondo del tubo".

Questo tipo di analisi permette però solo di individuare l'andamento della velocità di una pallina che cade, ma non fornisce i valori della velocità per cui è necessario passare ad un piano quantitativo. Probabilmente saranno i bambini stessi a proporre di misurare le distanze tra le posizioni della sfera e, conoscendo i tempi impiegati a percorrerle (indicati sulle foto), calcolare mediante la formula imparata in precedenza ($v = s/t$) le velocità medie in tutti gli intervalli di ogni foto. Si pone ovviamente il pro-

blema che per trovare i reali valori di velocità non bisogna utilizzare nella formula ($v = s/t$) gli spazi misurati sulle foto: questi non corrispondono agli effettivi spazi percorsi dalla pallina, ma sono ad essi proporzionali secondo un fattore di scala h relativo alla riduzione delle dimensioni reali sulla fotografia. Tale fattore può essere calcolato una volta per tutte, mediante il rapporto tra l'altezza reale del tubo e quella misurata sulle foto (se i bambini conoscono già le proporzioni, oppure se hanno già affrontato altre volte questo tipo di problema, ad esempio con le cartine geografiche, è facile far calcolare loro il fattore di scala h). A questo punto basterà moltiplicare gli spazi misurati in precedenza per il numero h ed ottenere gli spazi reali percorsi dalle sfere, che consentiranno di ottenere infine le velocità reali.⁹

⁹ Il fattore di scala esprime propriamente di quante volte le dimensioni lineari di una "rappresentazione" (piana o solida) sono più grandi (o più piccole) delle dimensioni lineari di un "originale", geometricamente simile. Nel nostro caso esso rappresenta il rapporto fra le dimensioni reali del tubo (e quindi degli spazi realmente percorsi dalle palline negli intervalli di tempo fra ogni fotogramma ed il successivo), e le dimensioni del tubo e degli spazi percorsi misurabili sulle fotografie.

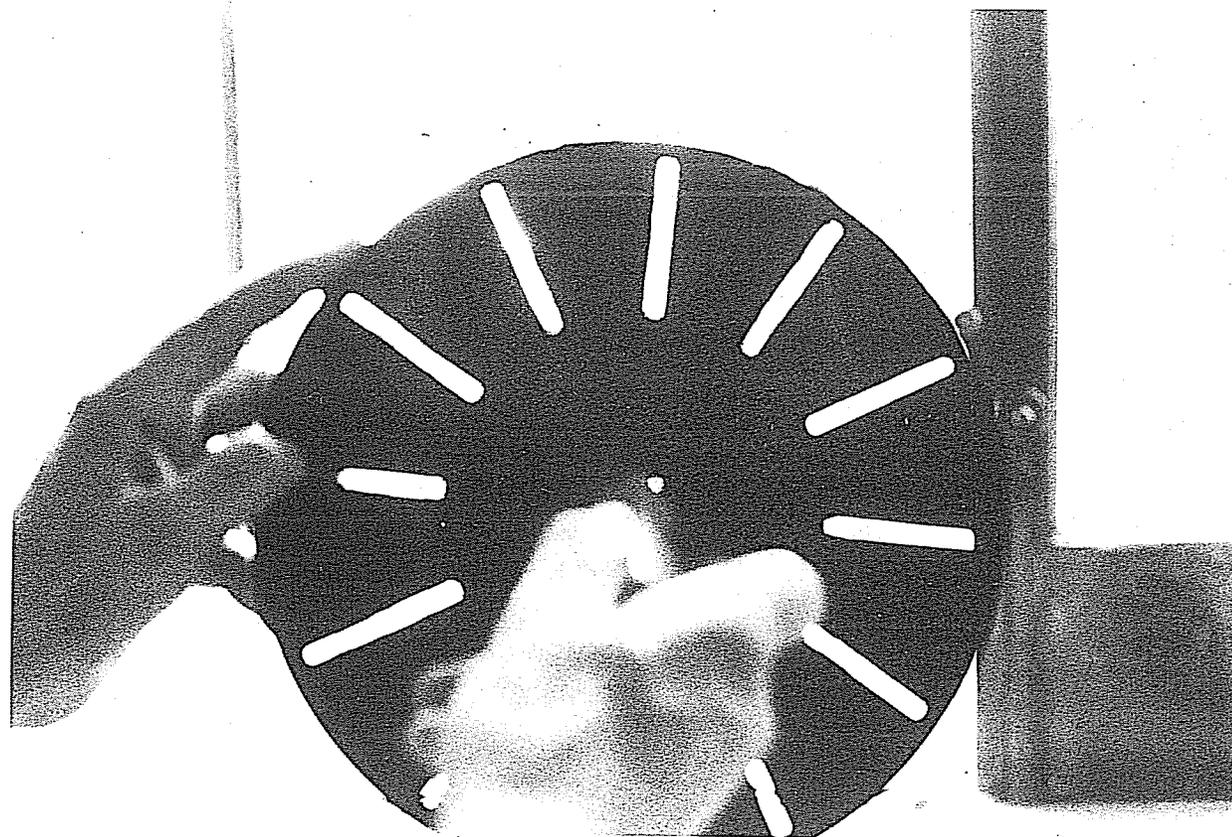


Figura 4.5 - L'osservazione stroboscopica del movimento

Nella foto è rappresentato un disco di metallo con alcune fessure, libero di girare intorno ad una matita. Se si mette in rotazione il disco con una mano e si osservano attraverso di essi movimenti vari (persone che camminano, che corrono, oggetti che cadono...) si ha la sensazione visiva di bloccare il movimento in istanti ben determinati, corrispondenti a quando una fessura passa davanti all'occhio.

Un'altra possibilità (da noi utilizzata) è quella di proiettare i negativi delle foto su una parete con un proiettore di diapositive. Si potrà in questo caso trovare sperimentalmente la distanza tra la parete ed il proiettore tale che l'altezza del tubo proiettato corrisponda a quella reale e così tutte le misure (da prendere direttamente sulla parete) corrisponderanno a valori reali. (Bisogna solo fare attenzione a disporre il proiettore perpendicolarmente alla parete, in modo da evitare immagini distorte).

In ogni caso si porrà il problema di come misurare le distanze tra le posizioni successive della sfera: è possibile che i bambini non si rendano immediatamente conto che bisogna prendere le misure tra punti "corrispondenti" della sfera, per esempio tra tutti i bordi inferiori, o tra tutti i bordi superiori, o tra tutti i centri. In tutti e tre i casi ci saranno, comunque, errori di "individuazione della posizione": in particolare nel terzo caso l'errore sarà pro-

tabilmente maggiore, in quanto per individuare il centro della sfera si deve averne almeno individuato il bordo inferiore e quello superiore. Di conseguenza converrà utilizzare, indifferentemente, uno dei primi due metodi.¹⁰

Una volta calcolati i valori di velocità in tutti gli intervalli disponibili, si può compilare una tabella per ogni pallina e provare ad individuare gli aspetti comuni e gli elementi di diversità del fenomeno di caduta rispetto alle varie sfere utilizzate. In particolare, confrontando tra loro le tabelle relative ad ogni foto si farà notare che: 1) tutte le diverse sfere di questo gruppo cadono raggiungendo una velocità limite, quindi il tipo di moto è lo stesso per tutte le sfere; più in generale, questo significa che fatti

¹⁰ Il criterio più opportuno può dipendere dal modo in cui le palline sono illuminate, e quindi dalla parte più nitida dell'immagine.

Scheda 4.5 - La velocità di palline in caduta nell'acqua

Su alcune fotografie stroboscopiche i bambini hanno misurato le distanze tra le posizioni successive di ogni sfera e calcolato le velocità medie negli intervalli considerati utilizzando l'informazione sull'intervallo temporale (divisioni "difficili!"). Le fotografie rappresentavano sia palline che raggiungevano la velocità limite entro lo spazio totale percorso, sia palline che non la raggiungevano. Per le prime i bambini hanno facilmente (e con soddisfazione) verificato l'andamento complessivo della velocità (fase di accelerazione iniziale e velocità limite finale); per le seconde, dopo alcune considerazioni e discussioni, sono anche giunti a conclusioni soddisfacenti:

"Ci sono due palline, una più leggera e una più pesante. Quella pesante aumenta sempre di velocità nel tubo. Quella più leggera aumenta la velocità fino ad un certo punto e poi la velocità rimane la stessa fino al fondo del tubo".

"Quando non raggiunge la velocità massima, la pallina, dipende dal fatto che il tubo non è abbastanza lungo da far notare il punto in cui la pallina arriva alla massima velocità e non aumenta più la velocità. Allora si dovrebbe aumentare la lunghezza del tubo così da poter vedere la massima velocità che raggiunge la pallina".

diversi nei particolari possono tutti far parte di una stessa fenomenologia con caratteristiche generali comuni; 2) i valori di velocità limite e gli spazi ed i tempi impiegati a raggiungerli sono diversi a seconda della sfera considerata.

Dopo aver esaminato fotografie del tipo delle prime tre, si potrà passare a considerarne altre analoghe alle due foto (d, e). Anche su di esse si può fare un lavoro simile a quello fatto in precedenza, arrivando a compilare le corrispondenti tabelle di velocità. Già ad occhio subito ci si rende conto che la velocità della sfera (d) è praticamente costante, mentre quella della sfera (e) aumenta lungo tutto il percorso; ma nonostante questa apparenza, anche il comportamento di queste due palline è analogo a quello delle prime tre. Per poterlo verificare, bisognerebbe disporre di altre fotografie: per la sfera (d) servirebbe una foto con un numero maggiore di immagini (da realizzare con attrezzature più sofisticate) per mettere in evidenza la breve fase iniziale di accelerazione della sfera; per la sfera (e) basterebbe una foto della stessa pallina in un tubo più lungo per accorgersi che, dopo uno spazio ed un tempo sufficiente, anch'essa raggiunge una velocità limite. È possibile che i bambini stessi arrivino ad intuire alcuni di questi aspetti (scheda 4.5), in caso contrario può essere l'insegnante ad introdurla e a farli discutere.

A conclusione di questa fase si potrebbero estendere le conclusioni raggiunte a cadute di palline in altri liquidi più viscosi dell'acqua (per esempio, glicerina) o meno viscosi (per esempio, alcool), o più in generale in altri fluidi, come l'aria.¹¹ Sulla base delle conoscenze già raggiunte, e attraverso

semplici considerazioni, non dovrebbe essere difficile accorgersi che la "forma" del moto è sempre la

¹¹ Al variare del liquido, cambia non solo la viscosità (che determina la forza resistente) ma anche il suo peso specifico: che, attraverso la "spinta di Archimede", definisce il "peso effettivo" della sferetta nell'acqua.

Anche il galleggiamento può essere affrontato a questo stesso livello: però data la complessità del fenomeno globale, pensiamo che il confronto fra liquidi diversi possa essere ben capito solo nella scuola media.

Nella nostra sperimentazione si era alla fine dell'anno scolastico e ciò che ci interessava era focalizzare il rapporto tra forze e movimento, discutendolo sul piano qualitativo. Considerare o meno la spinta di Archimede era praticamente inessenziale ai nostri fini: il problema da studiare era comunque quello del moto di una pallina su cui agiscono una forza costante, diretta verticalmente verso il basso, ed una forza di attrito, inizialmente nulla e crescente con la velocità. Non abbiamo pertanto sollevato il problema del "peso di un oggetto nell'acqua".

Volendo comunque affrontare in classe questo argomento, all'interno del discorso di forze, si hanno almeno due possibilità: una è quella di cominciare con il lavorare direttamente sul galleggiamento, in maniera analoga a quella proposta per gli altri argomenti via via trattati in questo libro (vedere per esempio, in questa stessa collana: Arcà-Guidoni "Guardare per sistemi, guardare per variabili", Cap. IV), A.A.V.V. "Il galleggiamento nella scuola media" (in corso di preparazione); l'altra, molto più breve, consiste nel far constatare direttamente che un oggetto tenuto sospeso nell'acqua, o in un altro liquido, per mezzo di una molla, la fa allungare meno di quando si trova nell'aria (se galleggia, ovviamente, la molla non si allunga). Si può allora dire che su un oggetto immerso in un fluido agisce, oltre all'attrazione terrestre (il peso dell'oggetto), anche una forza diretta verso l'alto, la cui intensità dipende dal tipo di liquido e dal volume del corpo. Questa forza può essere, a seconda dei casi, maggiore o minore del peso dell'oggetto, che di conseguenza galleggia o affonda. Sui corpi che non galleggiano e sono immersi in un liquido, si esercita quindi una forza "effettiva", diretta verso il basso, uguale alla differenza fra peso dell'oggetto e "spinta di Archimede".

stessa, mentre variano il valore della velocità limite, il tempo e lo spazio necessari a raggiungerlo: quello che succede nell'acqua alla pallina succede pure nell'aria, solo che il punto in cui la velocità è massima e poi rimane uguale è più giù, perché la forza di attrito dell'aria è più piccola di quella dell'acqua.

4.6. Introduzione alla dinamica del moto

A questo punto del lavoro si può tornare a prendere in considerazione gli aspetti dinamici del fenomeno di caduta delle palline nell'acqua. Lo scopo che ci si prefigge è quello di guidare i bambini ad individuare una relazione tra la forza peso "effettiva", l'attrito dell'acqua e la velocità della pallina, facendo loro utilizzare le conoscenze acquisite. Si possono porre inizialmente domande molto generali, del tipo: "Quali sono le forze che agiscono sulla pallina?" - "Cosa succede a queste forze mentre la pallina cade?" - "Si può spiegare il moto delle palline con quello che succede alle forze?" ... Come già nelle discussioni iniziali, i bambini riescono generalmente ad accorgersi della presenza di due forze: una, la forza peso effettiva individuata come la causa del moto, l'altra, la forza di resistenza individuata come la causa del rallentamento del moto rispetto ad un ipotetico andamento in situazione libera da attrito.

La prima forza verrà presumibilmente assunta costante,¹² mentre è facile rendersi conto che la se-

conda è una forza variabile, il cui valore dipende dalla velocità del corpo (a questo proposito, l'insegnante potrà ricordare alcuni degli esempi indicati in § 4.1.).

Un buon sistema per facilitare la discussione può essere quello di riprodurre sulla lavagna (o di proiettare su un foglio di carta) le immagini della sfera presenti su una delle foto stroboscopiche. In questo modo i bambini possono illustrare con dei disegni l'andamento da loro previsto per la forza peso e la forza di attrito dell'acqua (per esempio tante frecce uguali per una forza costante, tante frecce sempre più grandi per una forza che aumenta ...). Questa analisi dovrà essere fatta per diverse posizioni della sfera cercando un criterio generale che permetta di collegare le ipotesi fatte di volta in volta con le variazioni di velocità individuate in precedenza.

Noi conosciamo la risposta giusta: la *forza di resistenza* aumenta costantemente (opponendosi sempre alla *forza attiva*), fino al punto-istante in cui la pallina raggiunge la velocità limite; da tale posizione-tempo in poi, la forza di resistenza rimane costante, assumendo un valore pari alla forza attiva e verso sempre opposto. Tale spiegazione però è in genere anti-intuitiva per quasi tutti i bambini, in quanto fa coesistere un equilibrio di forze (dunque una forza risultante nulla, Cap. VI) con il movimento. (Non si può comunque escludere che qualche bambino riesca a vedere da solo la situazione di equilibrio stazionario, com'è avvenuto nella esperienza da noi condotta: scheda 4.6. Quello che c'è da attendersi in generale è però che i bambini arrivano a convincersi che la forza di resistenza aumenta, fino ad un massimo, in corrispondenza del raggiungimento della velocità limite, per poi mantenersi costante (insieme alla velocità); ma di valore comunque inferiore al *peso effettivo* (ricordiamo che stiamo considerando una situazione in cui non si tiene conto esplicitamente della spinta di Archimede). Questa ipotesi da un lato tenta di salvare il fatto constatato che c'è una fase di accelerazione iniziale (in corrispondenza a una variazione delle forze), seguita da una fase a velocità costante (in cui tutte le forze agenti sono costanti); dall'altro è in accordo con l'intuizione comune che dice che ogni qualvolta qualcosa si muove, deve esserci una forza risultante nella direzione del moto che ha il ruolo di mantenere il movimento.

Più volte abbiamo sottolineato nel corso di questa guida le difficoltà di affrontare e risolvere questo problema. Si potrebbe pensare ad un itinerario

Scheda 4.6 - Il problema fondamentale della Dinamica

Dopo aver individuato l'andamento della velocità delle palline, si discute sulle forze che agiscono su di esse durante il moto. Dalle discussioni emergono sostanzialmente due opinioni:

La prima (minoritaria) in cui si sostiene che la "forza di resistenza" dell'acqua aumenta costantemente al crescere della velocità, fino al raggiungimento del suo valore limite. Da tale istante in poi rimane costante, assumendo un valore pari alla forza peso, ma verso opposto.

"Il peso fino ad un certo punto riesce ad abbattere la forza dell'acqua, ma arrivati a quel punto il peso e la forza dell'acqua sono uguali ed il peso non riesce più a far aumentare la velocità della pallina e la velocità resta uguale finché la pallina tocca il fondo".

"Se si sta a zero e le forze sono uguali, si rimane fermi. Nella pallina la velocità è 20 e l'altra forza è come se fosse 20 e la velocità rimane 20".

L'altra (maggioritaria, con diverse varianti) in cui si sostiene, come prima, che la forza di resistenza aumenta fino al raggiungimento della velocità limite, ma che il valore massimo da essa raggiunto rimane comunque inferiore alla forza peso, apparendo implicitamente necessario che il movimento sia comunque "garantito" da una forza risultante concorde con la velocità.

"Se la forza dell'acqua e il peso sono uguali, non vince nessuno e quindi la pallina si ferma".

didattico orientato a questo scopo: esso richiederebbe l'esecuzione di numerose esperienze in situazioni diverse, quindi un tempo lungo di lavoro in classe che è al di fuori dei fini di questa proposta. Dal punto di vista del nostro discorso sulle forze è sufficiente che sia l'insegnante a condurre i bambini a rendersi conto che un equilibrio di forze può coesistere anche con una velocità costante, oltre che con una velocità nulla: ed eventualmente a generalizzare il fatto che ogni corpo conserva la velocità che ha nell'istante in cui si raggiunge l'equilibrio delle forze che agiscono su di esso. (Se l'equilibrio si verifica in una situazione in cui la velocità del corpo è nulla, allora la sua velocità continuerà ad essere nulla e non ci sarà movimento; se invece l'equilibrio si raggiunge nell'istante in cui la velocità del corpo è diversa da zero, allora il corpo continuerà il suo moto conservando la stessa velocità).

Si possono riesaminare a questo fine le situazioni di forze già studiate precedentemente, per esempio riconsiderare con i ragazzi cosa avviene con una molla sottoposta all'azione della forza-peso di un oggetto. Se una molla è sospesa per un estremo e all'altro estremo viene applicato un peso, lasciandolo tutto ad un tratto, la molla si allungherà e comincerà ad oscillare intorno alla posizione di equilibrio in cui si fermerà definitivamente, dopo un certo numero di oscillazioni via via sempre più piccole. Se invece il peso viene applicato gradualmente (per esempio versando lentamente dell'acqua in un secchiello sospeso alla molla, oppure accompagnando il peso con la mano), la molla si allunga gradualmente e le oscillazioni praticamente scompaio-

no: la posizione di equilibrio finale è comunque la stessa in tutti i casi, determinata dall'equilibrio fra peso e deformazione della molla in assenza di movimento.

Si può allora chiedere ai bambini come mai non succede che il peso si fermi direttamente in tale posizione, sin dalla prima volta che ci passa, senza che la molla si metta ad oscillare. Per cercare una spiegazione si può discutere su come variano, nel caso di una oscillazione completa, sia la forza esercitata sull'oggetto, sia la sua velocità (scheda 4.7). Dovrebbe essere evidente che sull'oggetto agiscono due forze, la forza elastica della molla e la forza peso, e che quest'ultima si mantiene costante (come nella caduta in aria od in acqua). D'altra parte i bambini sanno già che nella posizione di equilibrio statico la forza elastica della molla ed il peso dell'oggetto sono uguali e che la forza elastica aumenta con l'allungamento della molla. È dunque facile rendersi conto che la forza elastica è minore del peso dell'oggetto in tutte le posizioni al di sopra di quella di equilibrio (in scheda 4.7 fra A e B e fra B' e C'), e maggiore di esso in tutte quelle al di sotto di essa (in scheda 4.7 fra B e C e fra A' e B').

Quanto alla velocità, si devono invitare i ragazzi ad osservare attentamente il movimento (è bene scegliere in precedenza molla e peso opportunamente, in modo che le oscillazioni siano abbastanza lunghe e lente da favorire l'osservazione), cercando di rendersi percettivamente conto del suo andamento. Dovrebbero così vedere che sia durante la discesa (in scheda 4.7 da A a C), sia durante la salita (in scheda 4.7 da A' e C'), la velocità prima au-

¹² In realtà, ci sono bambini che pensano che il peso effettivo di un oggetto che cade aumenti o diminuisca man mano che cade, per effetto del movimento stesso. Non esistono esperienze singole in grado di dimostrare che esso si mantiene costante: in effetti è solo la coerenza generale di tutta la costruzione della Meccanica (statica e principi della Dinamica), nonché la sua aderenza ai fatti, che conferma l'indipendenza delle forze, esercitate dai sistemi in un determinato stato deformato, dal movimento dei sistemi stessi.

Altri bambini immaginano che il peso aumenti perché ci si avvicina alla Terra, che esercita la forza di attrazione sull'oggetto (ci può essere anche un confronto/analogia con le forze magnetiche). Ora è vero che la forza gravitazionale aumenta al diminuire della distanza fra gli oggetti e la superficie terrestre, ma sappiamo che in prossimità di essa queste variazioni sono del tutto impercettibili.

In ogni caso se ci sono bambini che pensano ad una variazione del peso durante la caduta di un oggetto, è bene sottolineare che in realtà il peso resta costante; quello che aumenta invece è la velocità del corpo (a ciò si devono, ad esempio, effetti che i bambini talvolta spiegano con un aumento del peso, ma sono invece legati ad un aumento di energia cinetica: una ghianda che cade dall'alto di una quercia fa male anche se è molto leggera, un vaso di fiori può uccidere una persona ...).

menta da zero (nelle posizioni A ed A' rispettivamente) fino ad un massimo (raggiunto a metà percorso: posizioni B e B' rispettivamente), e poi diminuisce di nuovo fino a zero (posizioni C e C'). A questo punto si possono confrontare l'andamento della velocità e quello della forza nei diversi tratti di percorso: è bene che la discussione venga fatta

aiutandosi con dei disegni alla lavagna. Si può vedere che in tutte le posizioni in cui il peso del blocco e la forza elastica della molla non sono uguali, c'è una variazione di velocità: un aumento, se la forza maggiore ha lo stesso verso della velocità (dalla posizione A alla posizione B e da A' a B'), ed una diminuzione, se la forza maggiore ha verso opposto

Scheda 4.7 - Forze e velocità nel moto oscillatorio di una molla

Se si attacca un peso ad una molla, essa si mette ad oscillare, con oscillazioni che man mano diminuiscono di ampiezza, finché la molla si ferma in una posizione di equilibrio diversa dalla posizione indeformata. In fig. (1) è rappresentata la molla nella sua posizione, indeformata e nella posizione d'equilibrio che raggiunge al termine delle oscillazioni.

In fig. (2) sono rappresentate tre posizioni della molla durante una mezza oscillazione verso il basso:

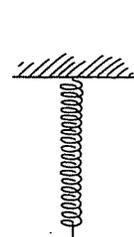
- A) estremo superiore dell'oscillazione;
- B) passaggio per la posizione d'equilibrio;
- C) estremo inferiore dell'oscillazione.

In fig. (3) sono rappresentate tre posizioni della molla durante la successiva mezza oscillazione verso l'alto:

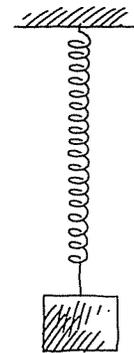
- A') estremo inferiore dell'oscillazione (coincidente con C);
- B') passaggio per la posizione di equilibrio;
- C') estremo superiore dell'oscillazione.

Sull'oggetto appeso alla molla agiscono in ogni istante due forze, la forza elastica della molla F e la forza peso P . La prima aumenta con la deformazione della molla, mentre la seconda si mantiene costante. Indichiamo con R la risultante delle due forze e con v la velocità dell'oggetto e vediamo come variano F , R , e v durante il movimento.

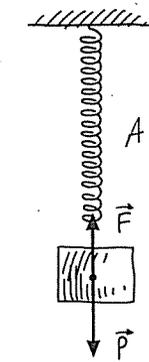
Nella posizione A il blocco sta invertendo la direzione del movimento: la sua velocità v è nulla. La molla è meno allungata che nella posizione di equilibrio, per cui la forza elastica F è inferiore al peso del blocco. La forza risultante R , diretta verso il basso, è equilibrata dalla forza d'inerzia ma del blocco che viene accelerato verso il basso. Man mano che il blocco scende, raggiungendo via via le posizioni comprese fra A e B, F aumenta, R diminuisce, ma è sempre diretta verso il basso; la velocità del blocco aumenta. In B il valore di F raggiunge quello della forza peso P : R diventa uguale a zero, la velocità ha raggiunto il suo valore massimo ed il blocco tende per inerzia a continuare a scendere. Tra B e C però F , che continua ad aumentare, diviene maggiore di P : R è non nulla e diretta verso l'alto, cioè in direzione opposta alla velocità. La forza d'inerzia ma che equilibra R è diretta verso l'alto: la velocità diminuisce, fino a diventare nulla in C. Qui F è massima, R è diretta verso l'alto e inizia la seconda mezza oscillazione verso l'alto), con F che diminuisce progressivamente fra A' (corrisponde a C) e C'. In ogni posizione successivamente raggiunta dal blocco, R ha la stessa direzione e lo stesso verso che aveva in quella posizione durante la prima mezza oscillazione, mentre la velocità ha verso opposto (e valore circa uguale; non abbiamo tenuto conto, in questa descrizione, delle forze d'attrito che, essendo sempre opposte al moto, hanno sempre un effetto di "rallentamento" su di esso).



posizione indeformata della molla libera



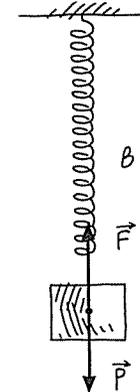
posizione d'equilibrio della molla con un peso agganciato



La molla mentre compie una mezza oscillazione verso il basso

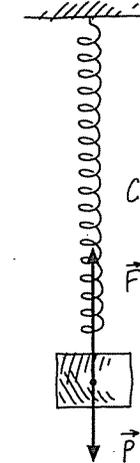
estremo superiore dell'oscillazione

$$\begin{aligned} \bar{v} &= 0 \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} \text{ diversa da zero} \\ &\text{e diretta verso} \\ &\text{il basso} \end{aligned}$$



passaggio per la posizione di equilibrio

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \text{diversa da zero} \\ &\text{diretta verso il basso} \\ &\text{di valore massimo} \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} = 0 \end{aligned}$$

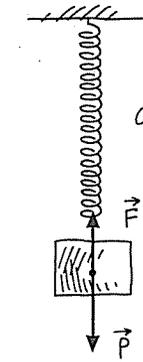


estremo inferiore dell'oscillazione

$$\begin{aligned} \bar{v} &= 0 \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} \text{ diversa da zero} \\ &\text{diretta verso l'alto} \end{aligned}$$

\bar{v} = velocità del blocco

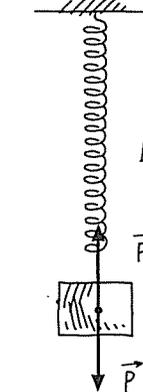
\bar{P} = forza peso esercitata dalla Terra sul blocco



La molla mentre compie la successiva oscillazione verso l'alto (C' ed A coincidono)

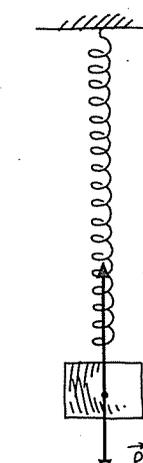
estremo superiore dell'oscillazione

$$\begin{aligned} \bar{v} &= 0 \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} \text{ diversa da zero} \\ &\text{e diretta verso} \\ &\text{il basso} \end{aligned}$$



passaggio per la posizione di equilibrio

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \text{diversa da zero} \\ &\text{diretta verso l'alto} \\ &\text{di valore massimo} \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} = 0 \end{aligned}$$



estremo inferiore dell'oscillazione

$$\begin{aligned} \bar{v} &= 0 \\ \bar{R} &= \bar{F} + \bar{P} \text{ diversa da zero} \\ &\text{diretta verso l'alto} \end{aligned}$$

\bar{F} = forza elastica di richiamo esercitata dalla molla sul blocco

alla velocità (da B a C e da B' a C'). La velocità è zero nell'istante in cui la forza totale sulla pallina è massima, mentre è massima nell'istante in cui la forza totale è zero: constatazione nettamente contraria all'intuizione comune, per cui una velocità nulla significa assenza di forze ed una velocità diversa da zero implica una forza risultante diversa da zero.

Si può allora riferire la discussione sull'oscillazione del blocco appeso alla molla al moto della pallina nell'acqua. Nel passaggio della molla dalla posizione A alla posizione B (scheda 4.7), i due moti sono simili: in entrambi i casi la forza peso rimane costante e la forza antagonista aumenta (nella molla aumenta la forza di richiamo, perché aumen-

ta l'allungamento, nella caduta aumenta la forza di resistenza del fluido, perché aumenta la velocità), e la velocità cresce costantemente fino a raggiungere il valore massimo (posizione B di scheda 4.7). Nel caso della molla poi, nel passaggio dalla posizione B alla posizione C, la forza di richiamo elastica continua a crescere (in quanto aumenta l'allungamento) e la velocità del blocco diminuisce, perché la forza risultante cresce in una direzione opposta alla velocità.

Cosa si può dire della resistenza viscosa a partire dal punto e dal momento in cui le palline hanno raggiunto la velocità limite? L'unica spiegazione coerente con i fatti, che abbia un carattere ge-

nerale, viene ad essere che anche per le palline si verifica un'eguaglianza di forze nel momento in cui si raggiunge la velocità massima. Infatti, se il peso delle palline fosse maggiore della resistenza viscosa, la velocità dovrebbe ancora continuare ad aumentare, come succede nella molla prima di raggiungere la posizione di equilibrio; se il peso fosse minore della resistenza viscosa, la velocità dovrebbe diminuire, come succede per la molla una volta superata la posizione di equilibrio. La velocità non cambia più perché da questo istante in poi la forza di attrito viscoso si mantiene costante e la pallina continua a cadere alla massima velocità raggiunta.

Capitolo 5. Forze magnetiche

5.1. Introduzione

Le forze studiate finora (forze elastiche, forze d'attrito, resistenze viscosi ...) sono *forze di contatto*: nascono dal contatto meccanico fra oggetti diversi o fra parti di uno stesso oggetto. Questa tipologia di forze ci permette di descrivere la maggior parte delle interazioni fra sistemi che fanno parte della nostra esperienza quotidiana. (fig. 5.1, a, b, c). Anche in sistemi meccanici complessi il contatto diretto risulta essenziale per esercitare o trasmettere l'azione di una forza: a questo scopo sono state inventate cinghie, pulegge, ruote dentate, ... attraverso cui le forze si propagano senza interruzioni, da ogni parte del sistema complessivo a quella immediatamente successiva. Questi fatti inducono spesso a pensare che l'interazione fra sistemi attraverso forze possa esplicarsi solo mediamente attraverso il contatto, grazie ad una catena ininterrotta di agenti materiali. Ci sono però in natura sistemi formati da due o più corpi che interagiscono fra loro senza che ci sia necessariamente contatto: in questi sistemi si manifestano azioni di forza che si propagano da ogni corpo agli altri senza l'intermediazione di un mezzo materiale.

Esempi di questo tipo di forze sono le forze peso e le forze elettromagnetiche: in questi casi si parla di *azioni a distanza* (fig. 5.1, e). Ne abbiamo già discusso in Cap. I § 1.5.: in questo capitolo intendiamo presentare alcune attività da svolgere in classe sulle forze magnetiche. Quanto ad attività che riguardino le forze peso, vi abbiamo brevemente accennato in Cap. II, § 2.2., rimandando per ulteriori approfondimenti al volume di questa collana che più diffusamente se ne occupa (P. Mazzoli, M. Arcà, P. Guidoni: "Forze e pesi").

Le interazioni magnetiche sono di gran lunga più complesse di quelle finora studiate, anche sul piano puramente qualitativo. Per meglio precisare

significato e limiti del modello che noi proponiamo di far costruire ai ragazzi, è opportuno richiamare brevemente alcune proprietà sia della interazione magnetica che di quella gravitazionale.

Se un corpo viene lasciato libero a mezz'aria, cade. Per tenerlo in quiete relativa rispetto alla Terra occorre esercitare su di esso una forza diretta verticalmente e verso l'alto. L'equilibrio statico che così si instaura indica che deve esserci un'altra forza che agisce sull'oggetto, uguale ed opposta alla forza esercitata dalla mano, anche se non c'è nessun altro contatto: è la forza gravitazionale, diretta verticalmente e verso il basso. Se poggiamo il corpo su una bilancia, è quest'ultima che esercita su di esso la forza che lo tiene in equilibrio, cioè fermo rispetto alla Terra.¹ In questa condizione la forza esercitata dalla bilancia sull'oggetto è uguale ed opposta alla forza gravitazionale che agisce su di esso (peso del corpo), per cui la misura della forza esercitata dalla bilancia ci dà la misura della grandezza della forza peso. Se il corpo cade il suo peso è invece equilibrato dalle forze di inerzia connesse al movimento (Cap. I, § 1.8.) e dalla resistenza dell'aria (Cap. IV). Il peso è dunque una forza a distanza che si manifesta fra qualunque oggetto e la Terra. Finché ci si limita a condurre esperienze in spazi piccoli in vicinanza della superficie terrestre (come in tutte le esperienze che possono essere svolte a scuola), il peso di un oggetto appare avere un valore ben determinato, indipendentemente dalla posizione in cui viene misurato. In realtà l'intensità di una forza a distanza dipende in modo complesso dalle caratteristiche fisiche delle parti che formano il sistema

¹ Ricordiamo che la bilancia, a seconda del tipo, è sempre schiacciata o tirata ai suoi due estremi da forze simmetriche.

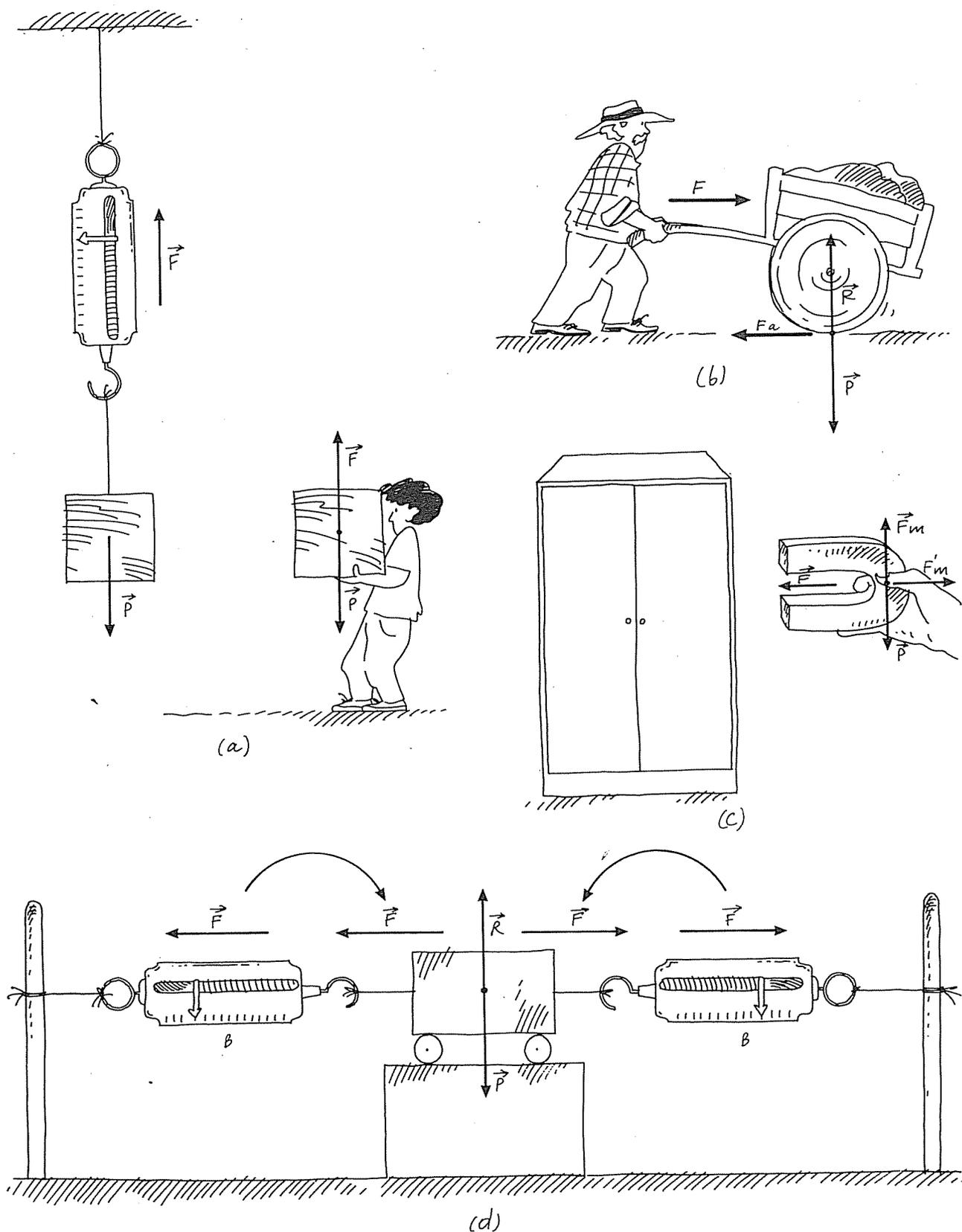


Figura 5.1 - Forze a contatto e forze a distanza

(a) Oggetto in equilibrio statico sotto l'azione di una forza verticale F di contatto (esercitata rispettivamente dalla bilancia e dall'omino) e della forza a distanza P , ad essa uguale e contraria, esercitata dalla Terra (peso del corpo).
 (b) Carrello in equilibrio stazionario. Per mantenere il movimento a velocità costante l'omino deve spingere il carrello con una forza F uguale ed opposta alla forza di attrito F_a che tenderebbe a frenarlo. F ed F_a sono forze di contatto. Anche in questo caso agiscono due forze verticali: il peso, che è una forza a distanza, e la reazione del pavimento stradale, che è una forza a contatto.
 (c), (e) Sulla calamita, in equilibrio statico, si esercitano quattro forze: le due forze a distanza P (dovuta all'attrazione terrestre) ed F (attrazione magnetica da parte dell'armadio metallico), e le due forze a contatto F_m ed F'_m che sono le due componenti in cui si può pensare di scomporre la forza complessiva esercitata dalla mano, vedi Cap. VI).
 (d) Carrello in equilibrio statico. Esso è soggetto a due forze orizzontali di contatto uguali ed opposte, misurate da due dinamometri; a due forze verticali, una a distanza (attrazione terrestre), l'altra a contatto (reazione vincolante del tavolo).

considerato e dalla loro distanza.² Gli oggetti sono attratti verso la Terra (ed attraggono a loro volta la Terra) con una forza che è diretta verso il centro della Terra (rispetto all'oggetto); proporzionale alla massa della Terra (e quindi per qualunque oggetto cambia se si va sulla Luna, su Marte, Saturno o altro pianeta ...); proporzionale alla massa del corpo (e quindi comunque cambia proporzionalmente al volume, per un dato materiale); inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i centri della Terra e dell'oggetto (e quindi diminuisce gradualmente allontanando l'oggetto dalla Terra, senza mai annullarsi).³ La forza gravitazionale che agisce tra un corpo qualsiasi e la Terra (in generale tra due qualunque corpi aventi masse date) non è influenzata né dal loro moto (l'attrazione fra una per-

sona e la Terra è la stessa sia che la persona stia ferma sia che stia viaggiando all'interno di un'automobile, che a sua volta attrae la Terra e ne è attratta),

² Per evidenziare variazioni delle forze peso ci vogliono strumenti sensibili da usare o zone con forti differenze di altitudine o zone con forti differenze di densità della crosta terrestre (dovute a concentrazioni di rocce contenenti grandi quantità di elementi molto pesanti o di elementi molto leggeri).

³ La forza di attrazione Terra-oggetto diminuirebbe anche se l'oggetto penetrasse all'interno della Terra, fino ad annullarsi quando ne avesse raggiunto il centro. Infatti l'oggetto sarebbe attratto sia verso l'interno, dalla parte di Terra in cui non è ancora penetrato, sia verso l'esterno, dalla parte di Terra già attraversata. Al centro della Terra sarebbe attratto nello stesso modo in tutte le direzioni dalla massa di Terra che lo circonda, così che la forza d'attrazione sarebbe nulla.

né dalla presenza di altri corpi materiali (la forza d'interazione Sole-Terra non viene modificata quando la Luna passa tra di essi). Si dice che le forze gravitazionali sono forze non schermate dalla presenza di altri corpi.

Consideriamo ora le forze magnetiche. Come quelle gravitazionali, sono anch'esse *forze a distanza*: se si vuole mantenere una calamita ad una certa distanza (non *troppo grande*, vedi nel seguito) da un armadio di ferro, si deve esercitare una forza che bilanci la forza magnetica di attrazione che tenderebbe a far avvicinare la calamita (e la mano) all'armadio. All'equilibrio, le due forze esercitate sulla calamita rispettivamente dalla mano e dall'armadio di ferro sono uguali ed opposte. Mentre però la prima è una forza di contatto, la seconda non richiede nessun contatto per esplicare la propria azione. Come la forza gravitazionale, anche le forze magnetiche diminuiscono all'aumentare della distanza di separazione fra gli oggetti interagenti, però tale diminuzione è ben percettibile, al contrario di quanto avviene per le forze gravitazionali in vicinanza della superficie terrestre. Le forze magnetiche possono essere sia attrattive che repulsive, secondo i casi (Cap. I, § 1.5.), ed inoltre possono essere schermate. La forza d'interazione fra due calamite, o fra una calamita ed un oggetto di ferro, diminuisce quando fra essi è interposto un corpo ferroso: ad esempio per raccogliere gli spilli con una delle apposite calamite a ferro di cavallo si deve levare la barretta metallica *di chiusura* (fig. 5.2 a). Ancora, è facile rendersi conto che l'interazione magnetica fra due oggetti dipende, oltre che dalla loro distanza, anche dalla configurazione spaziale complessiva del sistema da essi formato: a parità di distanza due magneti possono respingersi o attrarsi con intensità diverse, a seconda della reciproca orientazione; disponendo in modi diversi, ma sempre alla stessa distanza, una calamita ed un oggetto di ferro si può far variare la loro forza di interazione (fig. 5.2 b). Distanza ed orientazione reciproca sono caratteristiche del sistema complessivo formato dai due oggetti che si considerano: come per ogni sistema gravitazionale anche per ogni sistema magnetico l'intensità di interazione è però determinata anche da una proprietà dei singoli oggetti che lo costituiscono. Per la gravitazione, si tratta della massa dei corpi interagenti, per il magnetismo si tratta di qualcosa di molto più complesso. Questa proprietà è ben nota nell'esperienza quotidiana: si parla in genere di calamite più o meno potenti. Addentrarsi nel discorso disciplinare a questo proposito sarebbe im-

possibile: vedremo però come sia possibile costruire per i bambini attività che consentono di ordinare le calamite di un insieme dalla "più potente" alla "meno potente". Ciò consentirà di affrontare una difficoltà intuitiva molto diffusa: se ogni calamita ha una sua "potenza" è facile pensare che, fissata la sua distanza da un altro magnete o da un oggetto di ferro, nonché le reciproche orientazioni, la forza che la calamita stessa eserciterà sarà determinante solo dalla sua "potenza" ed indipendentemente dalle caratteristiche del secondo oggetto, cosa che invece è falsa e contraddice il principio di simmetria tra le forze in serie facenti parte di una stessa catena chiusa. Nel lavoro che suggeriamo di fare con i bambini non andremo, per le forze magnetiche, al di là di quanto accennato in queste poche righe: ogni tentativo di ulteriore approfondimento sarebbe immediatamente troppo complesso per le fasce d'età che ci interessano. Riteniamo tuttavia che lavorare sull'interazione magnetica presenti indubbi vantaggi, anche a questo livello:

- consente comunque una prima ristrutturazione di esperienze quotidiane diffuse e coinvolgenti (giocare con le calamite è di solito un passatempo affascinante per i bambini), e la costruzione di un modello interpretativo in grado di spiegare la fenomenologia corrente;
- dà un'ulteriore occasione di verificare in un contesto nuovo il modello generale già costruito, arrivando a generalizzarlo anche nel caso di azioni a distanza;
- serve nel contempo sia a sottolineare l'esistenza di aspetti generali dell'azione a distanza (quelli comuni alle interazioni gravitazionali e magnetica), che ad evidenziare l'esistenza di aspetti specifici del particolare tipo di interazione a distanza volta per volta considerato.

5.2. Quanto fa forza una calamita? Le attività iniziali e il modello "spontaneo" di interazione magnetica

Mettiamo i ragazzi a giocare con le calamite e con oggetti dei materiali più diversi (noi abbiamo usato calamite a sbarretta con i due poli colorati rispettivamente di rosso e di verde, chiodi, blocchetti di ferro, di alluminio, di rame, di ottone, di legno, palline e barattoli di

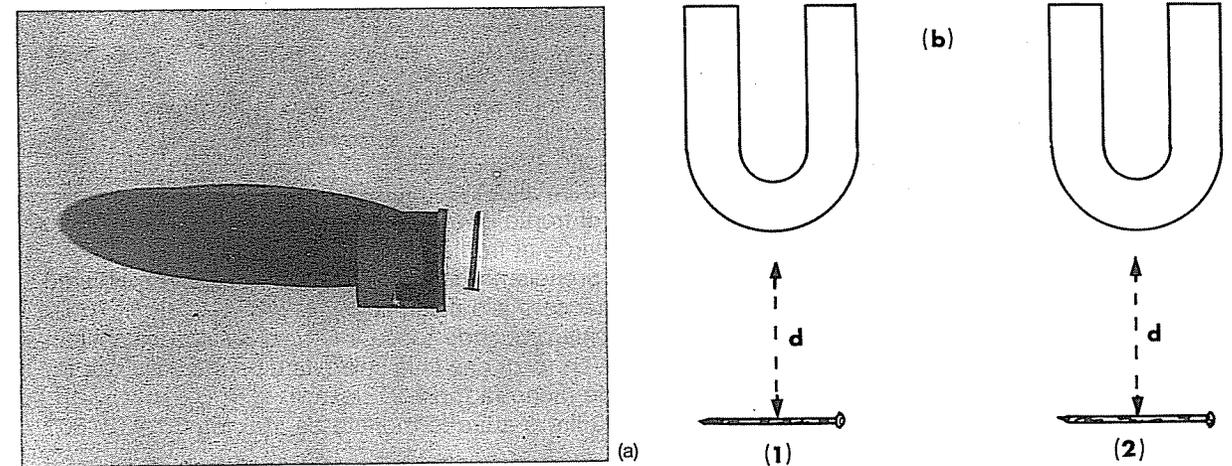


Figura 5.2 - Due caratteristiche delle forze magnetiche

(a) Anche a distanza molto ravvicinata il chiodo non viene attratto dalla calamita "chiusa" dalla sua sbarretta: le forze magnetiche vengono "schermate" da materiali ferrosi. (Si possono fare giochi in cui fra magneti e oggetto si interpongono schermi di ferro, spazialmente separati da ambedue, constatandone l'effetto).
(b) Pur essendo eguali le distanze chiodo-calamita nelle due situazioni, non sono uguali le forze di reciproca attrazione, maggiori in fig. (1) che non in fig. (2): l'intensità delle forze magnetiche, oltre che dalla distanza, dipende anche dall'orientazione degli oggetti che formano il sistema magnetico.

ATTIVITÀ
vetro, cubetti di ghiaccio, pezzi di polistirolo, cartone e carta di vario spessore ...); e poi invitiamoli a raccontare quanto hanno fatto ed osservato.

In scheda 5.1 sono riportate alcune osservazioni dei ragazzi, tratte dalla discussione che c'è stata alla fine di queste attività iniziali nella classe in cui abbiamo sperimentato l'itinerario didattico che proponiamo.

Il modello esplicativo che viene fuori dalla riflessione sulle attività svolte fotografa ciò che comunemente si pensa dei fenomeni di cui ci stiamo occupando ed è così articolato:

- a) le azioni di forza che si manifestano fra due calamite sono attrattive o repulsive ("si attaccano o si respingono"). Il tipo di forza, attrattiva o repulsiva, dipende dalla configurazione spaziale reciproca (rosso-rosso o verde-verde, repulsione; verde-rosso, attrazione);
- b) le azioni di forza che si manifestano tra i materiali ferrosi ed una calamita sono sempre attrattive ("il ferro si attacca sulla calamita");
- c) le intensità delle forze di interazione dipendono dalla distanza di separazione tra le calamite o tra la calamita ed un oggetto di ferro. Più la distanza a cui si vogliono tenere fermi i due oggetti è piccola, più è grande la forza che si deve fare per contrasta-

re la loro reciproca attrazione o repulsione. Le forze di interazione diminuiscono rapidamente all'aumentare della distanza;

d) ci sono molti materiali che non si "accorgono" della presenza della calamita. Non danno luogo ad azioni di forza quando sono vicino od a contatto con una calamita "il vetro, il legno, la plastica, l'acciaio inossidabile delle pentole e delle posate, il polistirolo, la carta, il ghiaccio, il rame, l'oro, l'alluminio, un sasso di calcare, il tufo ...". I materiali non ferrosi non interagiscono con le calamite. Gli oggetti dell'ambiente in cui viviamo possono dunque essere suddivisi in due classi: della prima fanno parte tutti quelli che godono della proprietà di essere sollecitati da forze in prossimità di una calamita, alla seconda appartengono tutti gli altri. Questi ultimi, al contrario dei primi, se vengono interposti tra due calamite o tra una calamita ed un pezzo di ferro non influenzano l'interazione sempre che il loro spessore non sia comparabile alla distanza a cui non si riesce più ad evidenziarla (vedi più avanti);

e) un pezzo di ferro o di acciaio che sia stato posto a contatto con una calamita "acquista un po' di capacità di attirare un pezzo di ferro, per un po' di tempo". Il ferro o l'acciaio, cioè, si magnetizzano parzialmente a contatto con una calamita, ma non in modo permanente.

Scheda 5.1 - Come fa forza una calamita

I ragazzi giocano con calamite (a barretta, con un polo colorato in verde e l'altro in rosso) ed altri oggetti dei più svariati materiali, e fanno le loro osservazioni:

“La calamita per fare forza deve avere un avversario... può essere un pezzo di ferro o un'altra calamita”.

“Se l'avversario è il ferro si attacca alla calamita. Se è un'altra calamita si attirano o si respingono”.

“La forza della calamita è di due modi. Se mettiamo di fronte il verde ed il verde e il rosso ed il rosso di due calamite, esse si respingono. Se mettiamo il verde di fronte al rosso si uniscono”.

“Se mettiamo un pezzo di ferro sulla calamita e poi prendiamo un altro pezzo di ferro e lo mettiamo sul primo, il secondo si attacca, perché il primo è attaccato alla calamita”.

“La calamita fa una forza grande quando è molto vicina e quando tocca il ferro o un'altra calamita...”

La forza diventa molto piccola anche a poca distanza. La forza che fa la calamita dipende dalla distanza. Più la distanza è piccola più fa forza, più è grande meno fa forza”.

“La calamita non attira le monete da 10 lire e da 200 lire e attira le monete da 100, da 50 e da 500 lire”.

“Quando mettiamo il lato della calamita colorato di verde vicino a quello di un'altra calamita colorato di rosso, si attirano”.

“La calamita può fare forza anche con il suo peso”.

“Un pezzo di ferro attaccato alla calamita attira altri pezzi di ferro, se sono piccoli, per esempio i chiodi di piccoli. Se mettiamo vicino ad un chiodo grande attaccato alla calamita un altro chiodo grande, questo si attacca alla calamita ed anche tanti altri chiodi si attaccano uno dopo l'altro... ad un certo punto la forza si esaurisce, perché non si attacca più nessun altro chiodo”.

“Una calamita va appresso [“si avvicina a”, n.d.A.] al ferro, perché lo vuole attirare ed il ferro va appresso alla calamita, perché la calamita l'attira: il ferro non si vuole attaccare e la calamita lo vuole attaccare”.

“La calamita fa forza sul barattolo di vetro solo se c'è il ferro dentro”.

“Se mettiamo il polistirolo tra i chiodi e la calamita e spostiamo la calamita che sta sotto, i chiodi vanno appresso [“si avvicinano a”, n.d.A.] alla calamita, questo succede anche se c'è il legno, la carta ed il banco tra i chiodi e la calamita”.

“La calamita non si attacca sul legno, sull'alluminio, sui blocchetti di rame e sul ghiaccio”.

Tutti questi elementi del modello spontaneo corrispondono a descrizioni fenomenologiche corrette. Ad essi c'è da attendersi che i bambini ne aggiungano però altri che si basano o su generalizzazioni inadeguate di aspetti percettivi, o su intuizioni tipiche del senso comune che portano a previsioni errate sul comportamento dei sistemi considerati. In particolare è probabile che i bambini affermino che:

f) una calamita per fare forza deve avere un avversario, che può essere un'altra calamita od un pezzo di ferro. Probabilmente questo tipo di affermazione corrisponde all'individuazione della calamita singola come sistema completo in grado di fare forza, analogamente ad una molla o al proprio corpo. L'interazione viene letta ricorrendo ad uno schema che in se stesso risulta valido (“per fare forza bisogna essere almeno in due”, l'uno avversario dell'altro). Solo che in questo caso il sistema con cui si interagisce quando si gioca con calamite portate mol-

to vicino, o a contatto, di altre calamite o di materiali di ferro, è composto da due corpi: due calamite o una calamita ed un pezzo di ferro. È questo sistema che fa forza quando cambia la configurazione spaziale delle parti componenti. Rappresenta, questo, un punto molto delicato ed essenziale per la comprensione dei fenomeni che si stanno indagando: è abbastanza complesso, concettualmente, comprendere che la calamita e il ferro costituiscono un unico sistema, come una molla e che l'avversario di una calamita non esiste, ma esiste l'avversario di una coppia calamita - calamita, o calamita - ferro (per esempio una molla interposta che impedisce loro di toccarsi come in fig. 5.3);

g) la calamita “attira” il ferro, e il ferro “è attirato” dalla calamita. Generalmente ciò implica l'attribuzione di un ruolo attivo alla calamita, e di un ruolo puramente passivo al ferro, mentre i due ruoli sono in realtà simmetrici: ognuno dei due oggetti è sor-

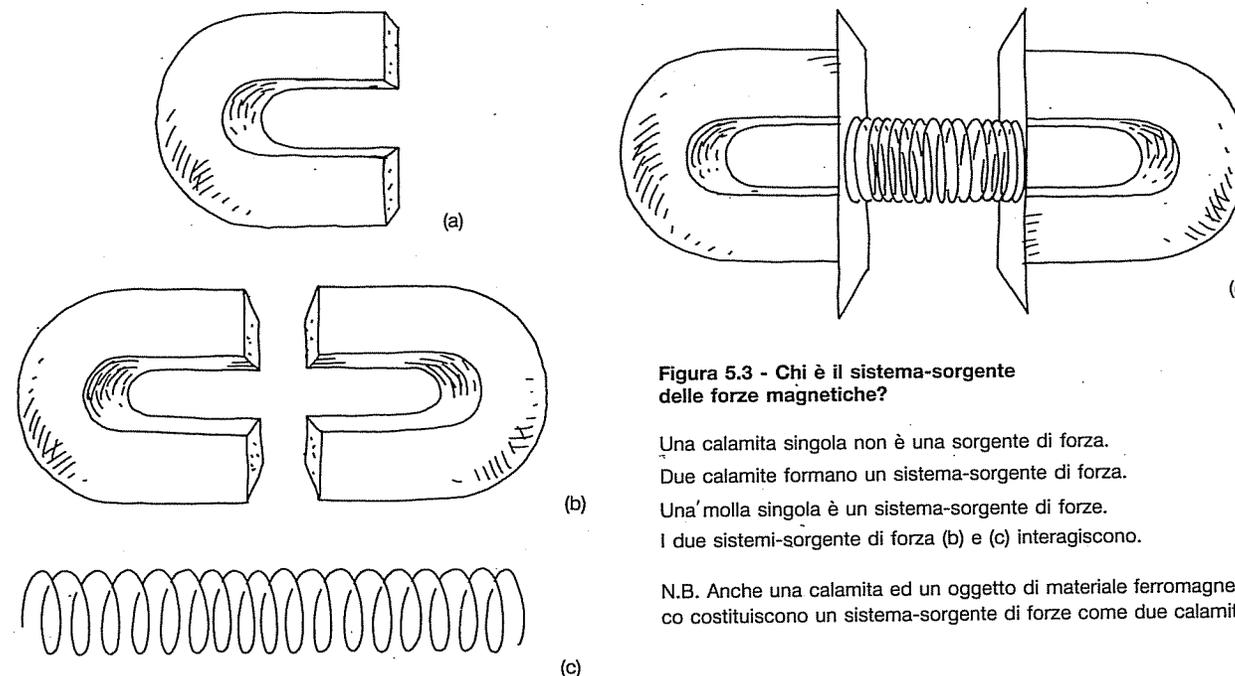


Figura 5.3 - Chi è il sistema-sorgente delle forze magnetiche?

Una calamita singola non è una sorgente di forza.

Due calamite formano un sistema-sorgente di forza.

Una molla singola è un sistema-sorgente di forze.

I due sistemi-sorgente di forza (b) e (c) interagiscono.

N.B. Anche una calamita ed un oggetto di materiale ferromagnetico costituiscono un sistema-sorgente di forze come due calamite.

gente di forze attrattive che si esercitano sull'altro, ed è oggetto di attrazione da parte di esso;

b) un'altra intuizione spesso presente, anche se non necessariamente esplicitata nei giochi iniziali, è che nell'interazione fra due calamite la calamita “più potente” eserciti su quella “meno potente” un'attrazione maggiore di quella che risente;

i) quando la distanza calamita - calamita o ferro - calamita diventa abbastanza grande, la forza magnetica d'interazione scompare bruscamente. I punti *f*, *g*, *h*, *i*, sono tutte schematizzazioni che hanno le loro buone ragioni di essere, anche se non sono corrette. Con un lavoro accorto e paziente è però possibile, come vedremo nei paragrafi successivi, modificarle, costruendone altre che si presentano come più adeguate ai fenomeni indagati e che sono coerenti con gli schemi già costruiti.

5.3. La costruzione di un nuovo modello

Al solito, si può ottenere la modifica del modello spontaneo verso un modello più adeguato, sia spingendo i ragazzi ad applicare ai nuovi fenomeni schemi e regole già costruite, sia facendo loro realizzare semplici esperienze aventi un'evidenza percettiva il più possibile immediata. Riesaminiamo dunque gli aspetti *f*, *g*, *h*, *i*, del paragrafo prece-

dente e vediamo come si può intervenire per modificarli.

Il sistema - sorgente di forze:

di fronte a descrizioni o schizzi di situazioni diverse (fig. 5.4) si possono porre domande del tipo “Quali sono i sistemi che fanno forza?” - “Chi è “avversario” di chi...?” - “...” e far discutere i ragazzi dando loro l'opportunità di realizzare le esperienze. Si può chiedere di rappresentare graficamente alla lavagna le azioni di forza individuate e si può intervenire nella discussione richiamando esperienze precedenti in cui era stato affrontato lo stesso tipo di problema. Si possono poi confrontare le situazioni in cui gli oggetti sono tenuti in mano da qualcuno (come in scheda 5.1) con situazioni in cui sono appoggiati ad un tavolo, sospesi a dei fili, posti su zattere che galleggiano (vedi nel seguito).

ATTIVITÀ

Pensiamo che nulla meglio della registrazione delle discussioni in classe, che noi riportiamo (parzialmente) in scheda 5.2⁴ possa dare l'idea di come, attraverso queste diverse esperienze (ed una guida

⁴ Riportiamo in scheda 5.2 momenti salienti di tutto il percorso svolto con i ragazzi sulle forze magnetiche in modo che sia evidente il continuo intrecciarsi dei diversi problemi ed il progressivo dipanarsi delle difficoltà attraverso una successione di attività che si completano l'una con l'altra.

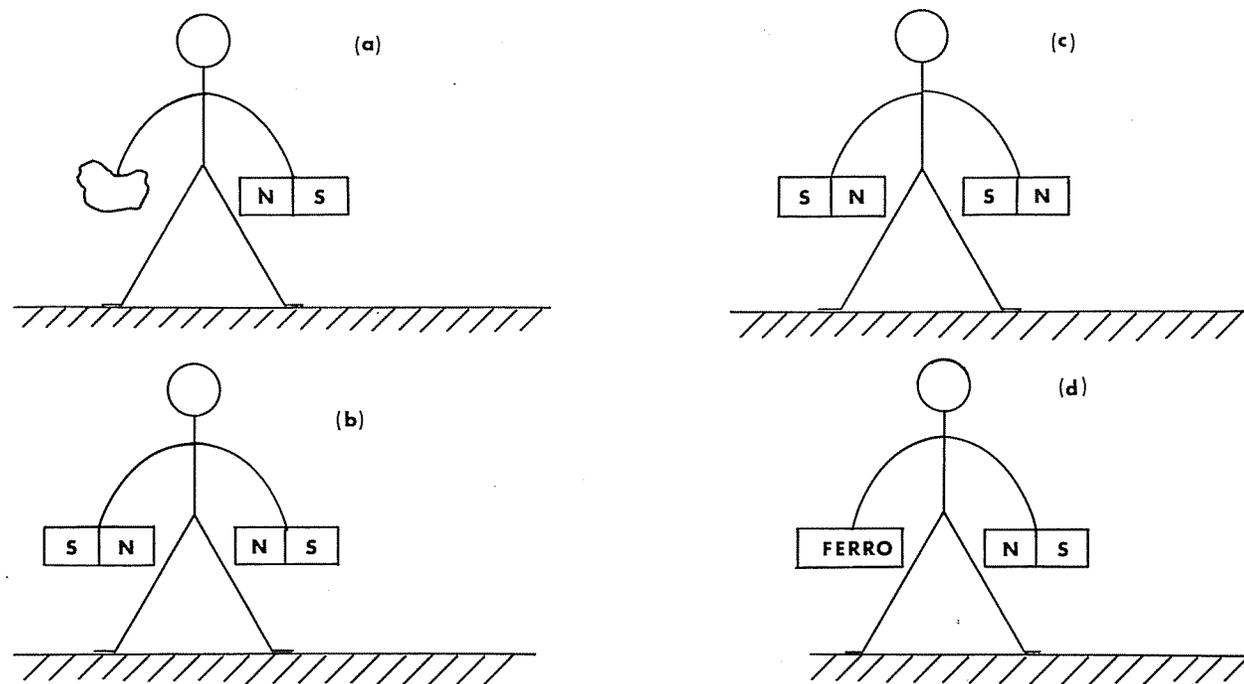


Figura 5.4 - La catena delle forze

In fig. (a), (b), (c), (d) un bambino regge con le due mani coppie di oggetti diversi: un sasso ed una calamita; due calamite con affacciati poli uguali; una calamita ed un blocchetto di ferro. Cosa sentono le sue mani e le sue braccia? Contro chi fa forza? Cosa succede se avvicina i due oggetti l'uno all'altro?...

accorta da parte dell'insegnante!), i ragazzi possono arrivare a comprendere che il sistema-sorgente di forze magnetiche con cui interagiscono gli altri sistemi volta a volta facendo parte della catena complessiva è composto da due parti (calamita - calamita oppure calamita - ferro), che si attraggono o si respingono reciprocamente e che giocano entrambe un ruolo sia attivo che passivo (attirano e sono attratte o, viceversa, respingono e sono respinte), l'una rispetto all'altra.

- La distanza di interazione:

è probabile che il problema della massima distanza a cui si risentono ancora le forze magnetiche nasca dai ragazzi stessi, in connessione con la scoperta dell'attrito come sistema antagonista, nella situazione in cui i magneti e gli oggetti di ferro sono appoggiati ad una superficie (tavolo, pavimento). Altrimenti può essere l'insegnante stesso a sollecitarlo con domande opportune (per esempio "Come mai le calamite appoggiate sul tavolo non si muovono, mentre se le tengo in mano sento che si attirano ...?"). Può giovare richiamare alla memoria dei ragazzi, se sono state eseguite, le esperienze

sul confronto fra forze elastiche e forze d'attrito (Cap. III, § 3.7.). Nel momento in cui ci si rende conto che l'attrito può "mascherare" l'esistenza di forze magnetiche quando la distanza fra le due parti del sistema magnetico è abbastanza grande,⁵ nasce l'esigenza di ridurre il più possibile la forza d'attrito per osservare la dipendenza della forza magnetica dalla distanza. Nella nostra sperimentazione i ragazzi hanno proposto, come prima soluzione del problema, di tenere le calamite ed i pezzi di ferro sospesi a dei fili, ed è stato fatto. In questo modo è agevole constatare che le azioni di forza si manifestano anche a distanze maggiori di quelle evidenziabili con gli oggetti appoggiati su una superficie.

ATTIVITÀ

Si verificano però anche fenomeni complessi (gli oggetti sospesi si mettono a ruotare, si inclinano ...)

⁵ "Abbastanza" rispetto all'entità della massima forza d'attrito statico, che può essere diversa per le due parti del sistema (per cui una delle due può muoversi verso l'altra che resta ferma), e che dipende, come sappiamo, dal loro peso oltre che dalla natura delle superfici a contatto.

Scheda 5.2 - Discussione (in classe)

Si dice ad un ragazzo (Mimmo) di prendere in mano due oggetti alla volta (vedi scheda 5.1) e gli altri devono discutere, per decidere "contro chi fa forza Mimmo":

"Quando ho in mano una calamita devo fare forza contro il peso per non farla cadere... se avvicino la mano [e la calamita, n.d.A.] ad un'altra calamita o ad una porta di ferro devo fare un'altra forza" (qui è Mimmo che parla).

Quando Mimmo regge il sasso e la calamita deve fare forza solo contro i pesi, anche quando li avvicina e li fa toccare... se vuole allontanarli non deve fare forza.

"... Se ha nelle mani due calamite deve fare forza contro il peso e pure contro la forza che fanno le calamite... quando il rosso ed il verde sono di fronte deve fare forza per non farle toccare... è come quando si allunga una molla".

"Se però sono di fronte rosso e rosso e verde e verde deve fare forza per farle toccare... se le calamite sono molto potenti non ce la fa a farle toccare, perché la forza è molto grande... più sono vicine e più fanno forza... succede la stessa cosa quando schiacciamo tra le mani una molla per i divani".

"Se Mimmo ha nella mano sinistra un pezzo di ferro e nella mano destra una calamita deve pure fare una forza per non farli toccare... se non fa forza le due mani si muovono e si avvicinano... succede come quando abbiamo legato ai due lati della molla due carrelli e poi l'abbiamo allungata e lasciata... i due carrelli andavano al centro... venivano tirati dalla molla".

Si discute ora di cosa avviene se gli oggetti sono posti a due a due sulla cattedra, nelle stesse configurazioni in cui Mimmo li teneva in mano:

"Quando la pietra e la calamita stanno sul tavolo... fanno forza con i loro pesi ed il tavolo fa forza perché non vuol farsi schiacciare... e le forze sono uguali".

"... Anche quando una calamita sola sta sul tavolo la calamita fa forza con il suo peso e basta, e schiaccia il tavolo... se metto un'altra calamita o un blocco di ferro c'è anche la forza delle calamite... perciò una calamita non può essere l'avversario di un'altra... sono tutte e due insieme che fanno forza... ma non sono sicuro".

"Per fare forza contro la forza che viene dalle calamite ci vogliono due calamite ad una calamita ed un ferro".

"... Quando mettiamo le calamite sul tavolo però c'è anche la forza di attrito che è grande quando il peso è grande... la forza della calamita c'è anche quando sono ferme, non si muovono... la forza di attrito vince contro la forza delle calamite. Però se le mettiamo molto vicine la forza delle calamite può anche vincere".

"Quando mettiamo al posto del sasso una calamita o un blocchetto di ferro c'è anche un'altra forza che li fa muovere".

"No, non è vero, perché non si muovono sempre... se la forza è poca non si muovono perché quando stanno sul tavolo c'è anche la forza di attrito".

"Poi dipende dove stanno. Se le mettiamo molto lontane... ai bordi del tavolo la forza è piccola perché la distanza è grande... e non vince contro la forza di attrito e le calamite non si muovono".

I ragazzi sono dunque consapevoli che quando le due parti del sistema magnetico sono appoggiate su una superficie intervengono anche le forze di attrito. Si pone il problema di come fare per ridurle e su suggerimento dei ragazzi stessi si realizzano le solite configurazioni (fig. 5.4), ma con gli oggetti sospesi a dei pezzi di spago. I ragazzi sono invitati a descrivere le esperienze:

"Abbiamo preso prima due calamite, le abbiamo legate con due fili di spago e poi abbiamo legato i fili a due anelli di ferro che stavano agganciati alla mazza [il manico, n.d.A.] della scopa che stava appoggiata ai due lati a due banchi. I due anelli non erano stretti, così potevamo cambiare la distanza tra le calamite... perché la distanza è importante per la forza che fanno le calamite. Se le mettiamo vicine si attaccano perché la forza è grande... se le mettiamo più distanti non si attaccano perché la forza è minore... Vediamo che la forza c'è anche a distanza più grande che quando stanno sulla cattedra... perché non c'è la forza di attrito".

"Se prendiamo una calamita piccola ed una calamita grande notiamo che quando sono ad una certa distanza la calamita grande non si sposta e la calamita piccola va a sbattere contro la calamita grande". Ricercatore: "Secondo voi perché succede questo?".

"Perché la calamita piccola fa una forza piccola e non riesce a spostare la calamita grande e rimane ferma".

Ricercatore: "Cosa succede se mettiamo al posto della calamita piccola un blocchetto di ferro?".

"Il blocco di ferro va a sbattere contro la calamita anche quando lo mettiamo a distanza più grande... però la calamita non si sposta perché il ferro non attira la calamita".

"... No, non è vero, il ferro attira la calamita, ma con una forza più piccola... come quando c'è la calamita piccola".

Ricercatore: "Cosa succede se mettiamo sospesi un grande blocco di ferro e una calamita piccola?".

"Il ferro non si muove...".

"Il ferro va verso la calamita perché lo attira".

"Il ferro non si muove, ma la calamita va a sbattere contro il ferro, perché è piccola e viene attirata dal ferro, però la distanza deve essere piccola perché se la distanza è grande la forza c'è, ma non ce la fa a spostare la calamita".

Si fa l'esperienza ponendo il blocco di ferro e la calamita a distanze diverse e si giunge alla conclusione seguente:

"Abbiamo notato che se il blocco di ferro è grande e la calamita è piccola, la calamita va a sbattere contro il ferro che sta fermo, perciò anche il ferro attira la calamita".

"... Il ferro attira la calamita e la calamita attira il ferro".

Poiché sospendere gli oggetti elimina le forze d'attrito radente, ma fa sorgere altri problemi (forze peso non completamente compensate, effetti di orientamento relativo degli oggetti sospesi, effetti del campo magnetico terrestre...), si chiede ai ragazzi se secondo loro per eliminare sensibilmente l'attrito, evitando le complicazioni che si verificano con la sospensione degli oggetti, si potrebbe metterli su delle zattere che galleggiano sull'acqua. I ragazzi pensano di sì, ma vogliono verificare che davvero l'attrito sull'acqua sia trascurabile. Suggestiscono ed eseguono le esperienze di fig. 5.5 e le descrivono:

"Abbiamo preso un blocchetto di legno e delle zattere di polistirolo con due pesi sopra e li abbiamo tirati con una stessa molla sulla cattedra e sull'acqua. Abbiamo notato che la molla si allunga molto di più quando stanno sulla formica che quando stanno sull'acqua. Sull'acqua la forza di attrito è inferiore, perché la superficie (dell'acqua) è sempre liscia".

Constatato che l'attrito fra una zattera di polistirolo e l'acqua è molto debole, i ragazzi eseguono le esperienze di fig. 5.6 b) e d) con gli oggetti posti su delle zattere e descrivono quello che hanno osservato:

"Abbiamo preso due pezzi di polistirolo e ci abbiamo appoggiato le due calamite per non farle affondare nell'acqua. Abbiamo notato che le due calamite si sono attirate a molta distanza e la forza, perciò c'è anche a molta distanza, perché le due zattere si avvicinano e dopo un po' di tempo si toccano". La stessa cosa succede se mettiamo su una zattera un blocchetto di ferro e sull'altra una calamita.

Il ricercatore riprende il problema di quale sia il sistema che fa forza: "All'inizio tutti avete detto che una calamita per fare forza deve avere un avversario che può essere un'altra calamita o un pezzo di ferro. Lo pensate ancora? Una calamita da sola può fare forza?".

"No... non fa forza... fa forza solo col suo peso... la forza c'è solo quando c'è un'altra calamita vicino o un pezzo di ferro... come abbiamo visto. Io posso fare forza contro il peso della calamita... per fare forza contro la forza che fa la calamita ci deve essere una calamita vicino o un ferro... tutti e due insieme fanno forza attirandosi o respingendosi, e se non voglio farle attirare devo fare forza".

"Secondo me... come abbiamo notato sono tutte e due le calamite insieme che attirandosi o respingendosi fanno forza... una sola non può fare forza... perché dovrebbe attirare il sasso come faccio io ma non l'attira...".

"La stessa cosa succede quando c'è un chiodo... un pezzo di ferro ed una calamita... insieme fanno forza, però si attirano sempre".

Il ricercatore pone il problema di come si può decidere quale fra due calamite è più "potente", così da poter ordinare tutte le calamite a disposizione in ordine dalla meno potente alla più potente (ci sono calamite di 5 fogge diverse). Si trovano due metodi diversi di confronto, che danno risultati concordi (vedi fig. 5.7 e 5.8), e che permettono di seriare le calamite. I ragazzi descrivono così le esperienze fatte:

"Per 'misurare' la forza di una calamita abbiamo preso tanti blocchi di ferro con pesi diversi e li abbiamo sollevati con le calamite ed abbiamo notato che la calamita più potente è la grigia. La calamita grigia è più potente della rossa perché la grigia sosteneva un pezzo di ferro più pesante della rossa... le altre calamite sostenevano pezzi di ferro ancora meno pesanti e perciò erano meno potenti della grigia e della rossa".

"C'è ancora un altro modo per 'misurare' la forza di una calamita. Abbiamo preso una molla e l'abbiamo legata alla porta, poi abbiamo preso una piastra di ferro e l'abbiamo attaccata alla calamita grigia e abbiamo legato la molla alla piastra.

Abbiamo tirato la molla tenendo in mano la calamita ed abbiamo visto che quando la molla si è allungata di ventidue mattonelle, la piastra si è staccata. Poi abbiamo fatto la stessa cosa con la calamita rossa e le altre. Abbiamo notato che quando la molla si è allungata di quattordici mattonelle, la piastra di ferro si è staccata dalla calamita rossa, mentre per le altre calamite la piastra si è staccata dopo nove, cinque, tre ed una mattonella. Perciò ha più forza la calamita grigia della rossa e delle altre". Il ricercatore pone a questo punto il problema della simmetria fra le forze che calamite di potenza diversa esercitano l'una sull'altra: "Le forze che agiscono su due calamite, per esempio la grigia e la rossa, quando si attraggono o si respingono sono uguali?".

"... La calamita grigia, poiché è più potente, ha più forza... attira la calamita rossa, che ha meno forza, con una forza maggiore. La calamita rossa attira la calamita grigia con una forza minore. Solo se le due calamite sono uguali cioè hanno la stessa forza, le forze sono uguali".

Per verificare le previsioni fatte, i ragazzi stessi suggeriscono di fare le esperienze di fig. 5.9, sottolineando la necessità di procurarsi molle molto sensibili, perché le forze magnetiche diventano rapidamente molto piccole all'aumentare della distanza fra le parti del sistema. Ecco le loro conclusioni al termine della sperimentazione:

"Abbiamo messo le due calamite rosse che hanno la stessa forza sulle due zattere, legate mediante le molle sensibili ed uguali al bordo della vasca con un filo di ferro piegato ad uncino. Abbiamo aspettato un po' di tempo e le due zattere si sono avvicinate e poi si sono fermate. Abbiamo misurato la lunghezza delle due molle ed erano uguali... perciò le forze sono uguali".

"Poi abbiamo messo la calamita grigia più potente su una zattera e sull'altra la calamita rossa con meno forza. Prima si sono attirate e poi si sono fermate. Abbiamo misurato la lunghezza delle due molle ed erano uguali... Anche se la calamita grigia ha più forza della calamita rossa si attirano con la stessa forza".

Poi abbiamo messo su una zattera la calamita grigia e un blocchetto di ferro sull'altra. Abbiamo misurato la lunghezza delle molle ed abbiamo visto che le due molle avevano la stessa lunghezza. Perciò il ferro attira la calamita e la calamita attira il ferro con la stessa forza.

"Noi con le esperienze che abbiamo fatto abbiamo notato che due calamite ed una calamita ed un blocchetto di ferro si attirano con la stessa forza... la rossa attira la grigia con la stessa forza con cui la grigia attira la rossa, questo succede quando le calamite hanno la stessa forza e quando hanno forze diverse".

che dipendono da altri fattori: le forze magnetiche sono legate in maniera complicata alla configurazione spaziale complessiva di tutto il sistema magnetico; l'azione della forza peso di ciascun oggetto è totalmente compensata dalla reazione del filo di sostegno solo quando il filo è verticale (non appena ci si discosta da questa posizione anche la forza peso diventa, per una frazione più o meno grande, antagonista della forza magnetica); gli oggetti sospesi tendono ad orientarsi secondo il campo magnetico terrestre.⁶ È evidente che permane anche l'asimmetria di comportamento fra oggetti con pesi (e quindi anche masse, e inerzia) diversi: uno spillo riuscirà a muoversi verso una pesante calamita fino ad attaccarvisi, senza che succeda il contrario.

Conviene porsi in una situazione in cui le forze peso sono compensate dalle reazioni vincolari e le forze di attrito sono ridotte al minimo. Questo può essere realizzato appoggiando gli oggetti su zattere di polistirolo o di legno che galleggino sull'acqua. Si può suggerire questo metodo ai ragazzi, chiedere cosa ne pensano (se hanno già lavorato con le forze d'attrito viscoso sanno che esse sono molto

⁶ Probabilmente la maggior parte dei bambini ha sentito parlare della bussola; si può dire loro che una calamita sospesa può comportarsi come l'ago di una bussola; e che l'orientazione spontanea di un magnete è dovuta al fatto che la Terra nel suo insieme si comporta come una gigantesca calamita.

piccole per piccole velocità; altrimenti faranno previsioni diverse a seconda dei tipi di esperienza quotidiana cui si riferiranno) e vedere se riescono a immaginare come si potrebbe verificare se l'attrito sull'acqua è minore di quello sul banco, o sul pavimento ...

Da soli, o su suggerimento dell'insegnante, dovrebbero pensare a confrontare l'allungamento di una molla che tira lo stesso oggetto nelle due situazioni (fig. 5.5) e decidere quindi di proseguire nello studio delle forze magnetiche utilizzando calamite e pezzi di ferro posti su zattere che galleggiano.

È immediato rendersi conto anche in questa situazione del fatto che le forze magnetiche agiscono a distanze maggiori di quanto non appaia nell'esperienza quotidiana (fig. 5.6 in particolare una calamita galleggiante costituisce un'ottima bussola).

– Il confronto di calamite diverse: mettendo un oggetto di ferro a contatto con tante calamite diverse, nella posizione in cui la forza di attrazione è massima, e poi cercando di staccarlo, ci si rende conto percettivamente che bisogna esercitare forze diverse. Possiamo dire che ci sono calamite "più potenti" e calamite "meno potenti", per usare un termine utilizzato dai ragazzi. Per confrontare la "potenza" di calamite diverse, e riuscire così a disporle in una serie ordinata (cosa indispensabile per affrontare il problema della simmetria,

vedi più avanti), si possono adottare due metodi. Il primo (fig. 5.8) consiste nel confronto tra forze magnetiche e forze peso: avendo a disposizione una serie di oggetti di ferro di peso crescente e con superficie abbastanza estesa⁷ si vede qual è, per ogni calamita, l'oggetto più pesante che riesce a sollevare. Il secondo metodo (fig. 5.7) si basa invece sul confronto fra forze magnetiche e forze elastiche: si misura l'allungamento di una molla in corrispondenza alla forza fatta per staccare le diverse calamite da uno stesso oggetto di ferro (che può essere un armadio metallico, così da non dover usare precauzioni per "tenerlo fermo" mentre si tira la molla attaccata alla calamita). I due metodi forniscono informazioni concordi e fungono ognuno come sistema di controllo della bontà dell'altro.

⁷ Se si utilizzano oggetti di ferro diversi con la stessa calamita si può constatare che anche in questo caso le forze a contatto possono essere diverse. La forza a contatto fra una calamita da sarta ed uno spillo è minore della forza a contatto fra la stessa calamita e la sua barretta di chiusura. Se però gli oggetti di ferro che si usano hanno tutti dimensioni abbastanza grandi (in particolare, se è abbastanza estesa la superficie di contatto oggetto-calamita), non si notano più differenze. Questo comportamento dipende dalle proprietà particolari del campo magnetico e non può essere spiegato in modo elementare (teoricamente si dice che il campo magnetico deve essere "saturato"). Per quanto riguarda il lavoro con i bambini, è bene che esso sia notato e che si decida, di conseguenza, di utilizzare solo oggetti con superfici abbastanza estese, così da mettersi nelle situazioni in cui la forza magnetica è la più grande possibile.

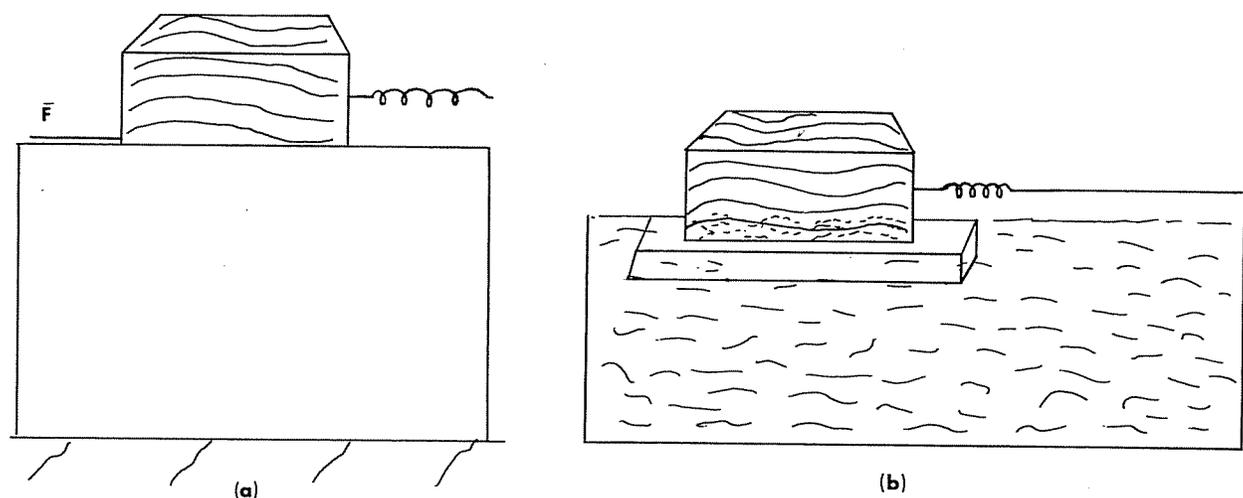


Figura 5.5 - Confronto fra forze di attrito

Per far muovere lo stesso blocco sulla cattedra o sull'acqua (appoggiandolo su una zattera), occorrono forze diverse. L'allungamento della molla in fig. (a) è decisamente maggiore che in fig. (b): la forza d'attrito sulla cattedra è maggiore della forza d'attrito sull'acqua.

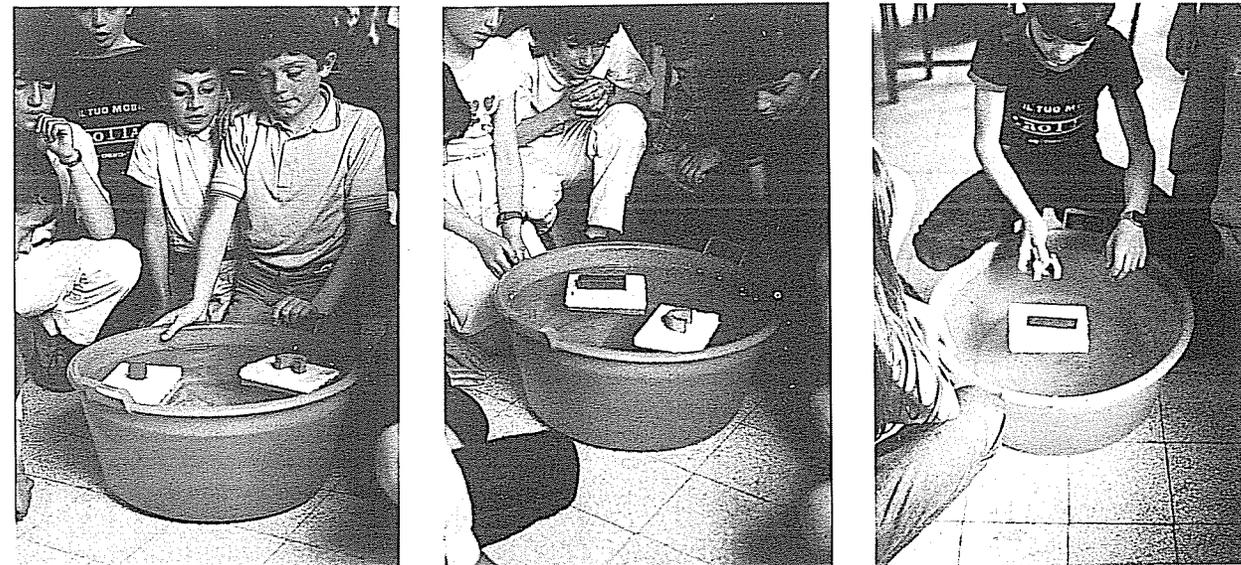


Figura 5.6 - Come evidenziare le forze magnetiche a distanze abbastanza grandi

Dopo aver constatato che le due parti di un sistema magnetico si muovono una verso l'altra solo per distanze piccolissime (qualche centimetro), se sono appoggiate al pavimento, i ragazzi provano a vedere cosa succede nell'acqua e verificano che si ha movimento anche a partire da distanze di separazione molto più grandi.

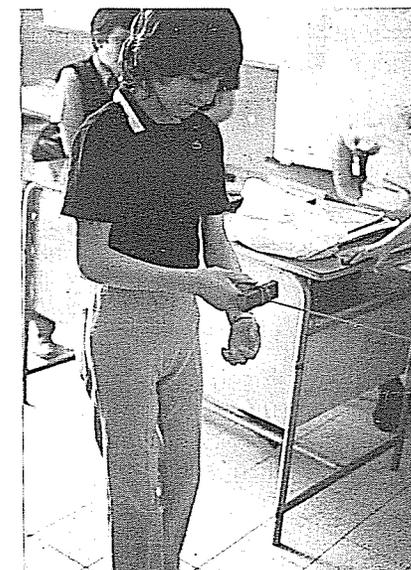


Figura 5.7 - "Potenza" di una calamita: confronto forze magnetiche-forze elastiche

Si può misurare la massima forza che una calamita può esercitare provando a staccarla mediante una molla da una piastra di ferro abbastanza estesa e non troppo sottile.

– Simmetria delle forze magnetiche: sono uguali o diverse le forze che due calamite con "potenze" diverse esercitano l'una sull'altra? E quelle che si esercitano fra una calamita ed un blocco di ferro? Forse ai ragazzi stessi verrà in mente come realizzare un'esperienza per rispondere a

queste domande, utilizzando quanto già sanno sulle forze elastiche (una molla esercita una forza uguale ai due lati) e sulle forze di attrito fra una zattera e l'acqua. Basta infatti disporre i due oggetti di cui si vogliono confrontare le forze di interazione su due zattere di polistirolo ancorate, per mezzo di due



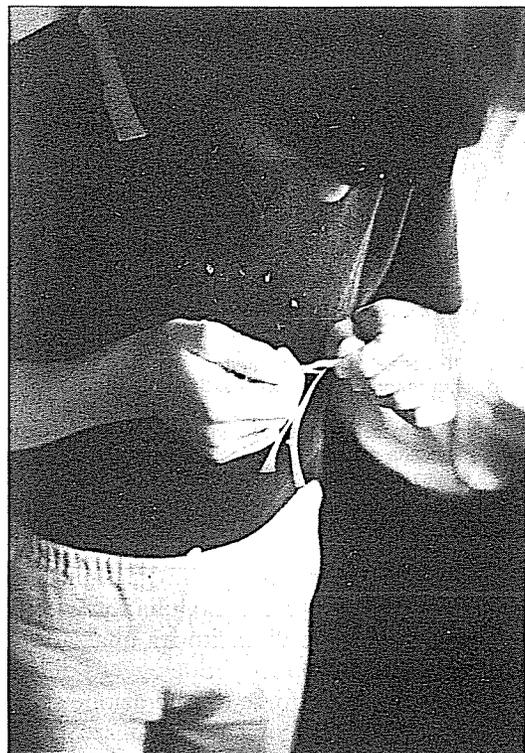
(a)

Figura 5.8 - "Potenza" di una calamita: confronto forze magnetiche-forza peso

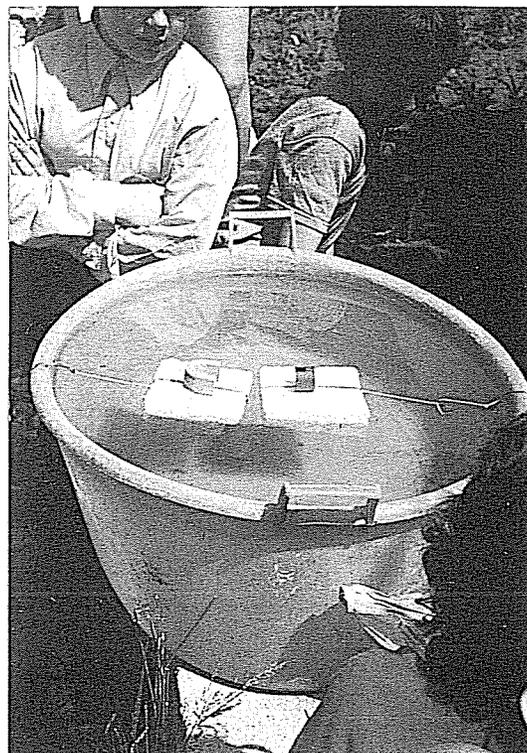
In fig. (a) si possono confrontare le "potenze" di calamite diverse vedendo qual è il massimo peso dei blocchetti di ferro che ognuna di esse riesce a sollevare. In fig. (b) i blocchi con pesi crescenti sono stati messi in corrispondenza alle serie delle calamite di "potenza" crescente.



(b)



(a)



(b)

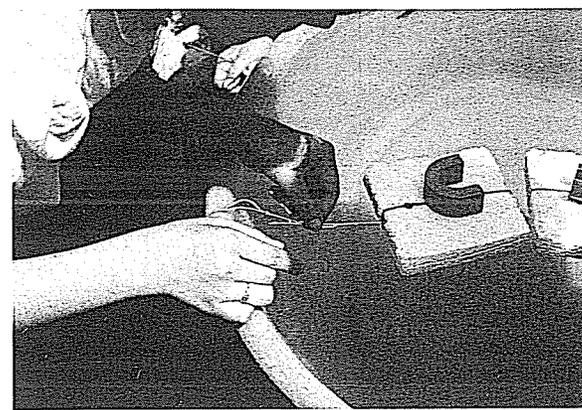


Figura 5.9 - La simmetria delle forze magnetiche

a) Una ragazza ritaglia un elastico da indumenti per procurarsi l'elastico interno, che costituisce una molla molto sensibile. Per la buona riuscita di un'esperienza non solo bisogna avere consapevolezza dello scopo che si vuole raggiungere, ma occorrono anche intuito e capacità manuali per costruirsi i materiali necessari.
b), c) La calamita rossa e la calamita grigia, di "potenza" diversa l'una dall'altra, si attraggono reciprocamente facendo allungare di una stessa quantità gli elastici cui sono fissate: le forze di interazione sono simmetriche (si confrontano gli allungamenti servendosi di un fusticino d'erba).

molle uguali, al bordo della vaschetta che le contiene (fig. 5.9). Per la buona riuscita dell'esperienza si dovrà disporre di molle molto sensibili, dal momento che la forza di attrazione magnetica diminuisce rapidamente con la distanza e diventa molto debole, con le calamite ordinarie, anche per distanze di appena qualche decimetro. Ogni volta gli allungamenti delle due molle sono uguali: per ogni coppia di oggetti c'è sempre simmetria tra le forze che si scambiano, anche se, a parità di distanza, l'entità delle forze generalmente cambia cambiando gli oggetti della coppia.⁸

Ci sembra che questa esperienza possa essere estremamente significativa, nella sua semplicità ed evidenza, perché pone particolarmente in risalto, specie se eseguita al termine di un lungo itinerario sulle forze, il vantaggio di una ricostruzione del reale che si assegni l'obiettivo di trovare modelli il più generali e coerenti possibile per spiegare i diversi fenomeni indagati. Ancora una volta infatti, le previsioni che si possono trarre dal modello sullo

scambio di azioni di forza fra sistemi sono in accordo con quanto realmente avviene, per quanto fortemente anti-intuitive. Inoltre la verifica della simmetria delle forze di interazione magnetica può costituire un buon precedente per accettare un'altra simmetria, che in genere appare agli studenti ancora più drammaticamente anti-intuitiva e non verificabile: la simmetria fra le forze di attrazione gravitazionale che si esercitano fra la Terra e gli oggetti sulla sua superficie, o fra il Sole e qualunque pianeta.

⁸ È bene, d'altra parte, tenere presente le differenze qualitative fra le due situazioni: la forza gravitazionale si esercita fra due corpi qualunque, in proporzione alla massa di ciascuno dei due; la forza magnetica presuppone l'esistenza di almeno un sistema "magnetizzato" (in modo permanente attraverso una corrente elettrica); e questo spiega la discriminazione fra corpi "attivi" e "passivi", oltre che inerti. Nel caso delle forze gravitazionali, invece, l'unilateralità intuitiva dell'attrazione è legata esclusivamente alla differenza di massa, quindi di inerzia, dei due sistemi interagenti: un corpo è "tenuto" dalla Terra come una piccola calamita è "tenuta" da un armadio di ferro ...

Capitolo 6. Le forze sono grandezze vettoriali

6.1. Introduzione

Fin da piccoli impariamo che l'effetto prodotto da una spinta, da una trazione ... insomma dall'azione di una forza su un oggetto, dipende non solo dall'intensità della forza, (e in molti casi, dal punto in cui viene applicata¹), ma anche dalla direzione e dal verso lungo i quali agisce. Per un ciclista fa una bella differenza se il vento soffia in direzione e verso concordi od opposti a quelli del movimento! Nel primo caso riceverà, ovviamente, un vantaggio, mentre nel secondo dovrà esercitare sui pedali una spinta maggiore per mantenere la stessa velocità, staccandosi di più. Se poi il vento spinge lateralmente, potrà diventare problematico mantenere l'equilibrio. Analogamente, non è la stessa cosa, per un gruppo di amici in gita su una barca a vela, se il vento soffia verso la riva o verso il mare aperto. Chi di noi, dovendo far muovere un'automobile in panne, la spinge "di traverso"? Sappiamo che questa è la maniera di spingere più conveniente. Per descrivere dunque senza ambiguità le forze dobbiamo specificarne oltre alla grandezza anche la direzione ed il verso.

Questa caratteristica è peculiare delle forze. Ci sono altre grandezze fisiche che sono completamente individuate, oltre che dal loro valore, anche dalla loro direzione e dal loro verso: a spostamenti, velocità, accelerazioni ... per nominarne le più note. Per tutte, si dice che sono *grandezze vettoriali* e l'insieme delle regole che definiscono come operare su di esse costituisce l'algebra vettoriale. È importante, per l'insegnante che vuole lavorare in classe sulle forze, conoscerne i rudimenti. A questo scopo può bastare un buon testo di scuola media inferiore

¹ Sappiamo ad esempio, che una porta gira più facilmente quando la spingiamo in prossimità del bordo esterno, piuttosto che quando la spinta viene esercitata vicino ai cardini.

o superiore, in cui sia trattata l'algebra degli spostamenti. Qui vi accenneremo soltanto, per poter illustrare le conoscenze minime che permettono di comprendere quanto avviene nei casi più volte incontrati nelle guide, in cui bisogna tener conto della direzione delle forze agenti per comprendere i fatti che succedono.

Supponiamo dunque che una persona si sposti sul pavimento di una stanza da una posizione iniziale P_i ad una posizione finale P_f (fig. 6.1) seguendo un percorso qualunque. Quale che sia la lunghezza del percorso effettivamente seguito, il risultato finale del movimento è il cambiamento di posizione, definito dallo spostamento da P_i a P_f ; a sua volta, lo spostamento è completamente identificato dalla posizione di P_i in un sistema di riferimento fissato (in fig. 6.1 il riferimento è il pavimento dell'aula), dalla distanza fra P_i e P_f , dalla direzione del segmento congiungente questi due punti e dal verso orientato P_i-P_f . Si può rappresentare lo spostamento in un piano cartesiano mediante una *freccia* che collega i punti rappresentativi delle posizioni P_i e P_f , orientata da P_i a P_f (fig. 6.1). Uno spostamento è dunque una grandezza vettoriale (perché identificato da un numero, una direzione e un verso, in un opportuno sistema di riferimento e con opportune unità di misura) ed è, per definizione, rappresentato geometricamente da un segmento rettilineo orientato.

Ovviamente una persona può spostarsi da P_i a P_f seguendo il percorso rettilineo P_i-P_f (fig. 6.1), ed in questo caso il percorso reale si identifica con lo spostamento, ma può seguire altre vie, ad esempio il percorso $P_i - P - P_f$ (fig. 6.1 percorso b), o un altro percorso qualunque (che può anche essere parzialmente o totalmente curvilineo, fig. 6.1 percorso c). Se la persona segue il percorso (b) raggiunge in un certo istante la posizione P e successivamente la

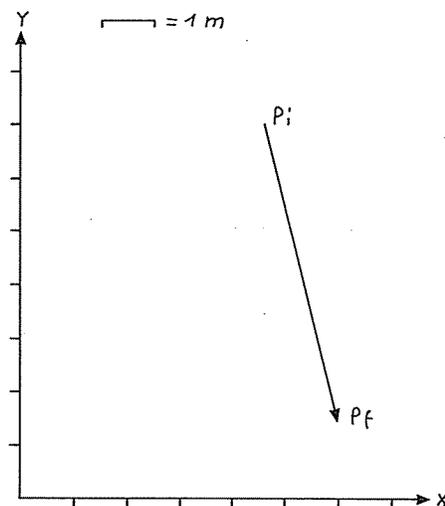
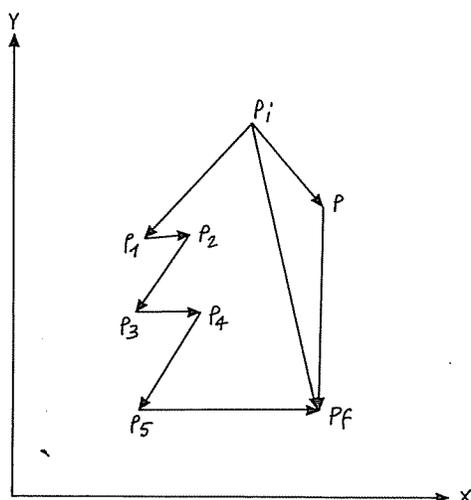
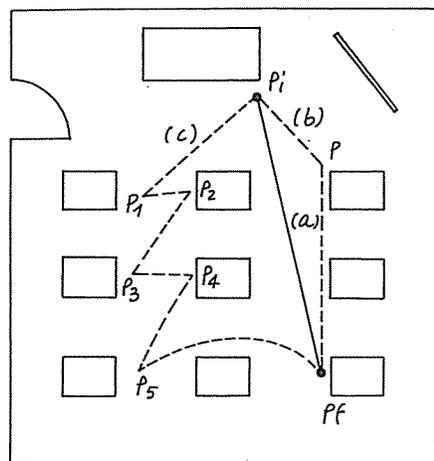


Figura 6.1 - I vettori "spostamento"

A) Durante un'esercitazione in classe, un ragazzo (ultimo banco a destra in fig. (A)), chiama l'insegnante per avere una spiegazione. L'insegnante può andare direttamente da lui (percorso a), o fermarsi a dare un'occhiatina a quello che sta facendo qualcun altro degli allievi (percorso b o percorso c). In tutti e tre i casi l'insegnante complessivamente si sposta dalla posizione iniziale P_i alla stessa posizione finale P_f .
 B) Su di un piano cartesiano i cui assi x ed y individuano le direzioni delle pareti dell'aula, lo spostamento dell'insegnante è rappresentato da un segmento orientato avente per estremi i due punti P_i e P_f che rappresentano le posizioni iniziale e finale dell'insegnante nell'aula. Il segmento orientato $P_i P_f$ è la rappresentazione geometrica del vettore spostamento $P_i P_f$.
 C) Ognuno dei percorsi b e c in fig. A può essere visto come una successione di spostamenti parziali, ciascuno rappresentato in piani cartesiani da un segmento orientato. Il segmento orientato $P_i P_f$ che rappresenta lo spostamento totale si ottiene in entrambi i casi collegando l'origine del primo spostamento della successione con il termine dello spostamento.

posizione P_f . Se segue il percorso (c) raggiunge prima il punto P_1 , poi P_2 , poi ancora P_3 ... ed infine P_f . Nel primo caso potremo dire che c'è stato uno spostamento $P_i P_f$; nel secondo che c'è stata la successione di spostamenti $P_i P_1, P_1 P_2, P_2 P_3, \dots, P_5 P_f$. In ogni caso lo spostamento totale sarà sempre dato da $P_i P_f$. Si dice che $P_i P_f$ è lo spostamento somma degli spostamenti $P_i P_1$ e $P_1 P_2$, ovvero che $P_i P_f$ è lo spostamento somma degli spostamenti $P_i P_1, P_1 P_2, P_2 P_3, \dots, P_5 P_f$. Come si vede in fig. 6.1 in entrambi i casi $P_i P_f$ è rappresentato dal segmento che ha origine nel punto in cui ha origine il primo spostamento della serie e termina nel punto in cui termina l'ultimo spostamento della serie. Tutti gli spostamenti sono rappresentati da segmenti orientati fra loro consecutivamente. Ciò è del tutto generale: in fig. 6.2 sono dati altri esempi di somma di spostamenti. Se gli spostamenti da sommare sono solo

due, la fig. 6.3 indica un modo alternativo, ma geometricamente equivalente, di trovare lo spostamento somma: due segmenti orientati rappresentativi degli spostamenti vengono disegnati da un'origine unica, mantenendo però inalterate le loro lunghezze, direzioni, orientazioni. Costruendo il parallelogramma di cui essi costituiscono due dei lati, il segmento orientato coincidente con la diagonale avente origine nell'origine comune ai due spostamenti, ha ovviamente lunghezza, direzione e verso coincidenti con quelli del vettore somma trovato nel modo precedente. A questa nuova rappresentazione è intuitivamente legata una situazione fisica distinta da quella già considerata (spostamento totale come somma di spostamenti parziali successivi nel tempo) e cioè la situazione in cui si ha, ad esempio, una persona che si sposta su un oggetto (potrebbe essere una nave, fig. 6.3 b) che a sua volta si sta spo-

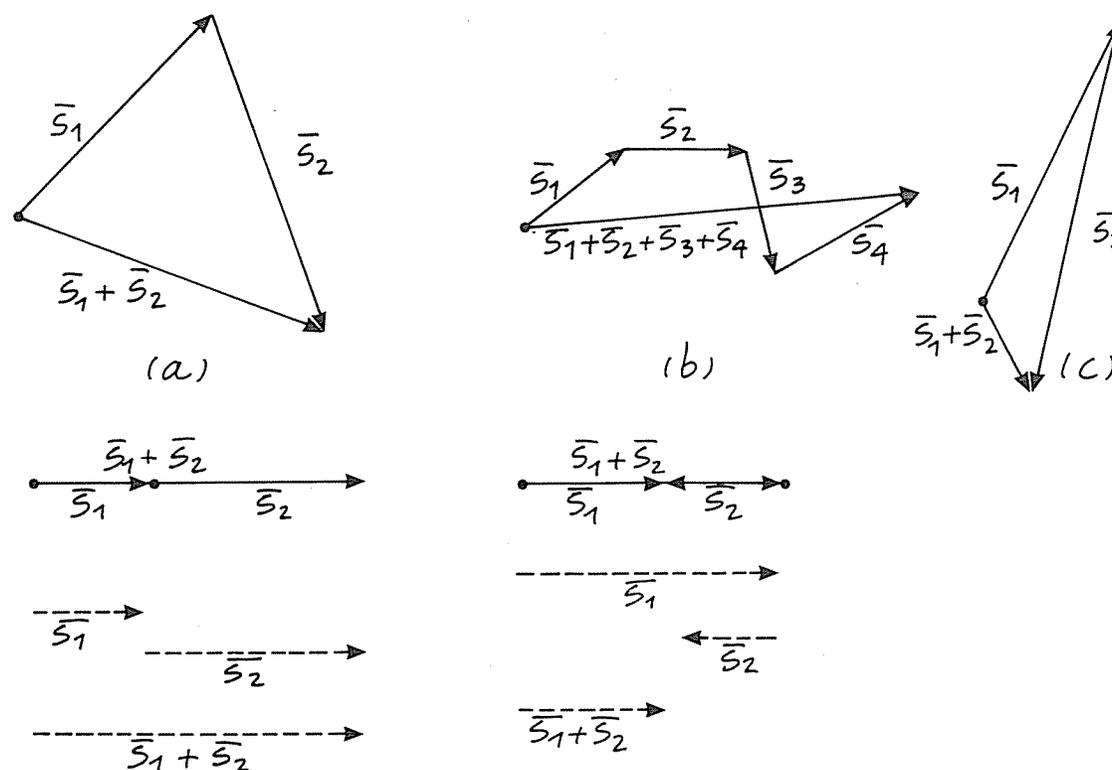


Figura 6.2 - Composizione di spostamenti successivi

Lo spostamento complessivo derivante dalla composizione di spostamenti successivi viene detto "spostamento somma" o "spostamento risultante" degli spostamenti parziali, a loro volta detti "spostamenti componenti". In figura sono riportati vari casi di somma di spostamenti, effettuata con lo stesso procedimento che abbiamo visto in fig. 6.1C. Si può notare quanto sia importante la direzione relativa dei vari spostamenti componenti nel determinare l'entità dello spostamento somma. Osserviamo in particolare i casi (c), (d), (e). In (c) osserviamo che ai due spostamenti componenti $s_1 + s_2$ corrisponde uno spostamento somma s_1 ed s_2 di entità molto più piccola delle entità di s_1 ed s_2 . In (d) ed (e) è illustrato il caso particolare in cui gli spostamenti componenti hanno la stessa direzione: in questa situazione l'entità dello spostamento somma è data dalla somma aritmetica dell'entità di s_1 ed s_2 , se il loro verso è concorde, e dalla differenza tra di esse, se è discorde. I valori di $s_1 + s_2$ in (d) ed (e) rappresentano rispettivamente il massimo ed ultimo valore che può assumere la somma al variare dell'angolo fra le direzioni di s_1 ed s_2 .

stando rispetto ad un riferimento considerato fisso (in figura, la superficie del mare). Allora, contemporaneamente, la persona partecipa allo spostamento dell'oggetto su cui si trova, e si sposta rispetto ad esso. Se consideriamo il suo cambiamento di posizione rispetto al riferimento fisso, è come se essa si stesse muovendo lungo la diagonale del parallelogramma rappresentato in fig. 6.3 b) (supponendo costanti sia la velocità della nave che quella della persona). D'altronde la nave avrebbe potuto muoversi mentre la persona stava ferma su di essa, e successivamente, a nave ferma, la persona spostarsi, o viceversa: lo spostamento complessivo non sarebbe cambiato (fig. 6.3 b). La stessa operazione geometrica serve dunque sia per trovare lo spostamento somma di spostamenti successivi (eseguiti in qualsivoglia ordine), sia per trovare lo spostamento

che deriva dalla composizione di spostamenti contemporanei.

Torniamo ora alle forze, e riprendiamo in esame una situazione in cui ci siamo imbattuti in Cap. III (forze d'attrito²): la forza che si deve esercitare per far spostare un blocco sul pavimento è diversa a seconda della direzione con cui si tira (o si spinge) il blocco stesso; è minima se questa direzione è orizzontale (fig. 3.10 a). In questo caso infatti tutta la

² Il lettore potrà analizzare in modo analogo a quanto faremo ora altre situazioni di esperienza quotidiana (o incontrate via via nella lettura della guida), in cui si abbia a che fare con sistemi che si scambiano azioni di forza in varie direzioni. Nel caso più generale è però necessario considerare tutte e tre le dimensioni dello spazio, e non solo due, come avviene nel caso che, per semplicità, ci limiteremo a trattare.

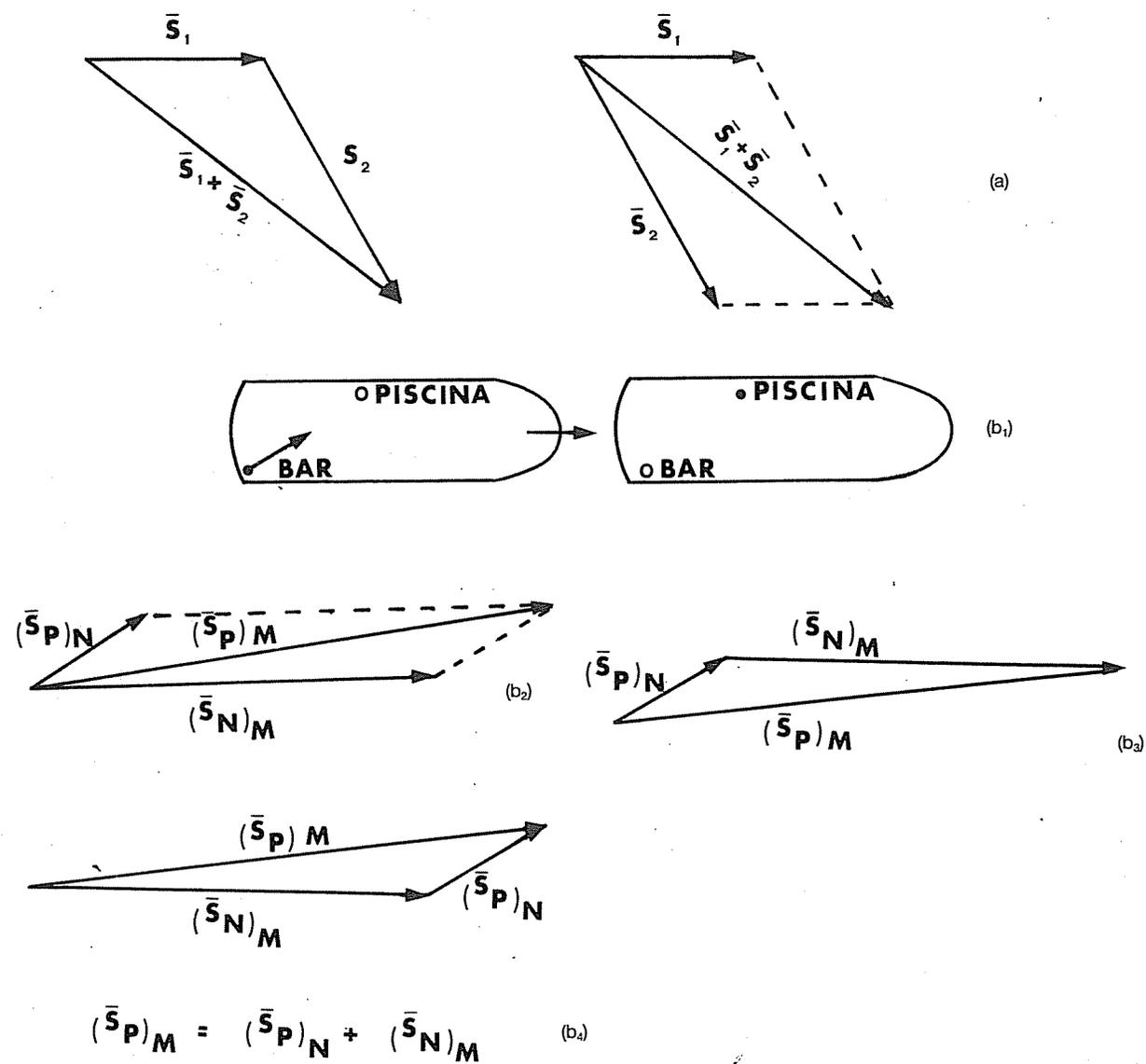


Figura 6.3 - E se gli spostamenti sono contemporanei?

(a) La figura mostra un modo equivalente a quello illustrato in fig. 6.1 per ottenere la rappresentazione grafica di uno spostamento somma di due spostamenti componenti: la cosiddetta "regola del parallelogramma", valida per qualunque grandezza vettoriale.

(b) Consideriamo una situazione reale in cui si compongano due spostamenti contemporanei: mentre una nave si stacca dal molo, un passeggero si sposta sul ponte. In fig. (b₁) sono rappresentate le posizioni iniziali e finali della nave e del passeggero. In fig. (b₂) sono rappresentati tre vettori spostamento. $(S_p)_N$ è lo spostamento del passeggero rispetto alla nave: parlando con chiunque egli può benissimo dire di essersi spostato dal bar alla piscina, senza tenere in nessun conto il fatto che la nave si è mossa. $(S)_M$ è lo spostamento della nave (e quindi del bar ad essa solidale) rispetto al mare: è lo spostamento che viene segnalato da un radar che segue il percorso della nave. $(S_p)_M$, infine, è lo spostamento del passeggero rispetto al mare: quello che sarebbe seguito dalla vista di una persona che dall'alto di una terrazza guardasse il passeggero. Come si vede, quest'ultimo spostamento, che deriva da due movimenti contemporanei, si ottiene ancora con la regola del parallelogramma, a partire da due spostamenti che si ricavano considerando ciascuno dei due movimenti separatamente dall'altro. In fig. (b₃) e (b₄) si mostra infine che, com'è intuitivamente evidente, anche se il passeggero si fosse spostato sul ponte prima che la nave partisse, e poi fosse rimasto fermo mentre la nave si spostava (b₃), o viceversa (b₄), lo spostamento complessivo sarebbe rimasto invariato.

forza che esercitiamo è efficace per equilibrare la forza d'attrito, mentre se la corda è inclinata rispetto all'orizzontale, una parte della forza da noi esercitata serve per schiacciare il corpo contro il pavimento (corda inclinata verso il basso) o per diminuire lo schiacciamento dovuto all'interazione gravitazionale blocco-Terra (corda inclinata verso l'alto). È come se il cambiamento di direzione "dividesse la forza in due parti" (come dicono i bambini), una che può far muovere il blocco, l'altra che lo solleva o lo schiaccia ancora di più sulla superficie d'appoggio, a seconda dei casi. Possiamo dunque considerare un'unica forza, avente una direzione definita, come equivalente³ alla sovrapposizione di altre forze, aventi direzioni diverse, che vengono dette forze componenti. Qual è però il legame fra l'intensità della forza complessiva e le intensità delle singole forze in cui possiamo pensarla scomposta (ovviamente, sempre, in infiniti modi diversi)?

Valgono le stesse regole che abbiamo visto per gli spostamenti: la forza complessiva (detta forza risultante) deve poter essere rappresentata con un segmento che viene ad essere la diagonale di un parallelogramma i cui lati sono i segmenti rappresentativi delle due forze componenti. La fig. 6.4 mostra come è possibile, applicando questa regola, trovare le intensità delle forze componenti imponendo la loro direzione e verso, una volta nota la forza risultante.

Ovviamente, vale anche il discorso simmetrico: come più spostamenti (successivi o contemporanei) equivalgono ad un unico spostamento-somma degli spostamenti componenti, così l'azione di più forze (questa volta, però, soltanto contemporanee!) su uno stesso oggetto equivale all'azione di una sola forza, la forza risultante, che si ottiene sommando vettorialmente le forze componenti. Riprendiamo in esame l'esempio del blocco che viene tirato sul pavimento in direzione non orizzontale (per esempio la corda è inclinata verso l'alto), e per semplicità supponiamo che la forza con cui viene tirato non sia sufficiente a farlo muovere.⁴ Evidentemente la forza esercitata per tirare il blocco deve essere equilibrata da un'altra ad essa uguale e contraria. Chi esercita questa forza equilibratrice? Manifestamente non c'è nessun altro a tirare! Sappiamo però che il nostro blocco è inserito in equilibrio fra tre sistemi diversi: il sistema gravitazionale; il sistema attrito, che si oppone al suo distacco dal piano; il sistema pavimento, schiacciato fra il corpo e la Terra. Vi sono dunque complessivamente tre azioni di forza esercitate sul blocco, che equilibrano l'azione

di trazione. Di queste azioni, due sono in direzione verticale (il peso, verso il basso; la reazione vincolare del pavimento, verso l'alto) e si trovano complessivamente in equilibrio con la componente verticale della forza di trazione; una è esercitata in orizzontale (la forza di attrito) ed equilibra la componente orizzontale della forza di trazione. Gli schizzi di fig. 6.5 illustrano il complesso delle forze agenti sul blocco nelle quattro situazioni: 1) nessuna trazione; 2) trazione orizzontale; 3) trazione inclinata verso l'alto; 4) trazione inclinata verso il basso. Il gioco della forza d'attrito e della reazione vincolare del pavimento, le cui intensità variano in maniera da adattarsi esattamente alla forza complessiva da equilibrare nelle rispettive direzioni, consente di ottenere l'equilibrio statico in tutti questi casi.⁵

Se ci si pone in una sola direzione (come nella maggioranza delle situazioni da noi affrontate), queste regole ci fanno subito ritrovare risultati in accordo con i principi generali già noti, e con l'intuizione (§ 6.2.); d'altra parte esse ci dicono anche qualcosa in più, che a prima vista può risultare fortemente antiintuitivo: il fatto, ad esempio, che si possa avere come forza risultante di due forze una forza molto piccola, anche se le forze componenti sono molto grandi, analogamente a quanto avviene per gli spostamenti (fig. 6.2 per questi ultimi e § 6.2. per le forze).

³ L'idea di equivalenza è cognitivamente delicata: si può constatare la presenza di più entità e individuare concettualmente un'unica che, se presente, sarebbe appunto equivalente a tutte le altre dal punto di vista degli effetti considerati; o si può constatare la presenza di una sola entità, e considerarla equivalente ad un insieme di entità omogenee. Nel primo caso, la composizione è univoca; nel secondo caso la decomposizione può avvenire in molti (infiniti) modi diversi. Notare che la stessa problematica si incontra, ovviamente, fin dall'aritmetica elementare.

⁴ In realtà, come abbiamo più volte sottolineato nel corso della guida, dal punto di vista delle forze si può fare un discorso analogo, se consideriamo che l'oggetto si muove di moto uniforme.

⁵ Naturalmente non devono essere superati i limiti definiti dal sistema materiale considerato (fig. 6.5), se F è maggiore della rigidità della corda, questa si spezza; se nella situazione (c) Fv diventa maggiore di P , il blocco si solleva staccandosi dal pavimento, ed N scompare; se F_0 è maggiore della massima forza di attrito statico il blocco inizia a muoversi di moto accelerato (la forza d'attrito diventa la forza di attrito dinamico F_d , minore di F_0 , e ad essa si aggiunge la forza d'inerzia del blocco, che è data, se m è la sua massa, $ma \cdot a$, cosicché durante il moto si ha $F_0 = F_d + ma$, in Cap. I § 1.8.; se F_0 dopo aver raggiunto il valore della massima forza di attrito statico (così che si abbia il distacco fra blocco e pavimento), diminuisce fino al valore di F_d e resta quindi costante, il blocco si muove di moto uniforme con la velocità raggiunta nella fase di accelerazione iniziale ...

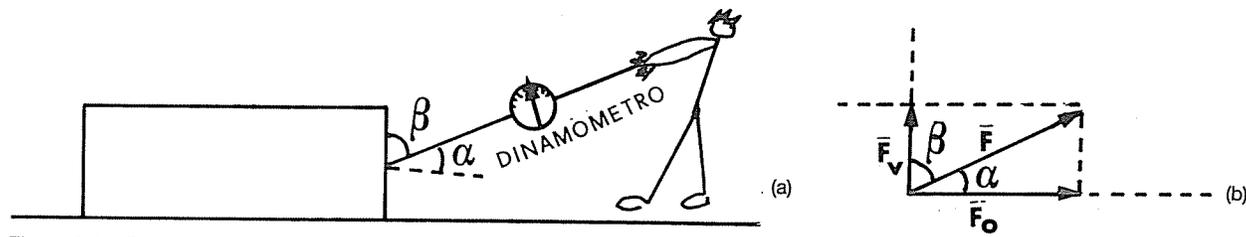


Figura 6.4 - Scomposizione di una forza nota in due componenti aventi direzioni note

La forza di trazione F esercitata dall'omino in fig. (a) equivale all'azione di due forze diverse: una in direzione orizzontale efficace per far spostare il blocco sul pavimento (F_o); l'altra in direzione verticale efficace a diminuire lo schiacciamento reciproco blocco-pavimento dovuto all'attrazione gravitazionale fra il blocco e la Terra (F_v). Se si misura l'angolo fra la direzione della corda e la direzione orizzontale (o verticale), e si misura con un dinamometro l'intensità della forza complessiva F , è possibile, utilizzando le regole del parallelogramma, trovare geometricamente l'intensità delle due forze componenti F_o ed F_v , come mostrato in fig. (b). Misurando la lunghezza dei lati del parallelogramma si potranno ottenere le intensità di F_o ed F_v , moltiplicando le misure ottenute per lo stesso fattore di conversione che è stato usato per disegnare il segmento orientato rappresentativo di F .

6.2. Attività con i bambini

Nella nostra classe sperimentale (V) non ci siamo spinti a dare ai bambini un vero e proprio modello di composizione vettoriale delle forze. Abbiamo però ritenuto indispensabile far loro svolgere alcune attività che da un lato dessero ragione di quello che già potevano ricavare (nelle situazioni in cui si ha a che fare con forze aventi un'unica direzione) dalla loro esperienza, dall'intuizione, dall'applicazione del modello di interazione già costruito; e d'altro lato considerassero anche quegli aspetti anti-intuitivi della composizione di grandezze vettoriali, che si presentano quando si ha a che fare con forze in più direzioni.

È immediato che i ragazzi riconoscano che l'azione di una forza dipende dalla sua direzione, come abbiamo sottolineato all'inizio del capitolo.

È inoltre intuitivo il principio di sovrapposizione per forze nella stessa direzione: abbiamo visto in Cap. II che per i bambini è del tutto scontato che più oggetti sospesi ad una molla abbiano lo stesso effetto di un unico oggetto di peso eguale alla somma dei loro pesi, e questo è visto come caso particolare della regola generale che più forze aventi la stessa direzione e lo stesso verso si addizionano secondo le regole dell'aritmetica elementare. Le esperienze sulla composizione di forze elastiche in serie ed in parallelo concordano con questa intuizione ed evidenziano la simmetria delle forze in serie. Infatti una molla sola collegata in serie con più molle collegate fra loro in parallelo è in equilibrio con esse, e ciò si interpreta dicendo che la molla da sola esercita la stessa forza che le molle in parallelo esercitano complessivamente. Ciò può essere equivalentemente interpretato sia come prova del fatto che la forza della molla singola "si divide" nelle for-

ze delle molle in parallelo, sia come prova del fatto che le forze esercitate dalle molle in parallelo si sommano in modo da dare come risultante la forza della singola molla. Inoltre è anche intuitivo che, nelle situazioni di equilibrio statico di un oggetto sottoposto all'azione di due forze aventi la stessa direzione e verso opposto, l'intensità delle due forze debba essere uguale (abbiamo più volte detto che la difficoltà sta nel considerarle ancora uguali in condizioni di equilibrio stazionario!). Potrebbe però già essere problematico decidere che questa situazione equivale ad una forza risultante nulla, giacché, anche se non c'è movimento (più correttamente si dovrebbe dire *accelerazione*, cioè variazione di movimento), ci sono sempre sia gli effetti di deformazione, sia gli effetti di "sforzo" e "fatica", a distinguere le due situazioni, che perciò solo da un certo punto di vista possono essere considerate "equivalenti". Abbiamo d'altronde detto che non è necessario arrivare con i bambini alle regole dell'algebra vettoriale, nell'ambito di un lavoro sulle forze affrontato al livello esposto in questa guida.⁶

⁶ L'algebra vettoriale può essere avviata nella scuola elementare, ed affrontata in modo abbastanza esteso a livello di scuola media. Secondo noi, però, se si vuole che i ragazzi capiscano davvero cos'è una grandezza vettoriale e come si può operare con essa, è necessario che siano posti di fronte a più grandezze che hanno questa caratteristica, non solo delle forze. In particolare, ci sembra opportuno che il lavoro di formalizzazione sia affrontato a partire dallo studio degli spostamenti, in quanto vettori definibili in uno spazio tridimensionale che coincide con lo spazio fisico. Questo elimina inizialmente le grosse difficoltà comunque connesse alla costruzione/compressione di spazi astratti, come quelli definiti dalle componenti di un vettore forza, o velocità, o accelerazione... Anche questo è però un discorso che nella sua completezza esula dagli scopi, e dagli spazi, di questo libro.

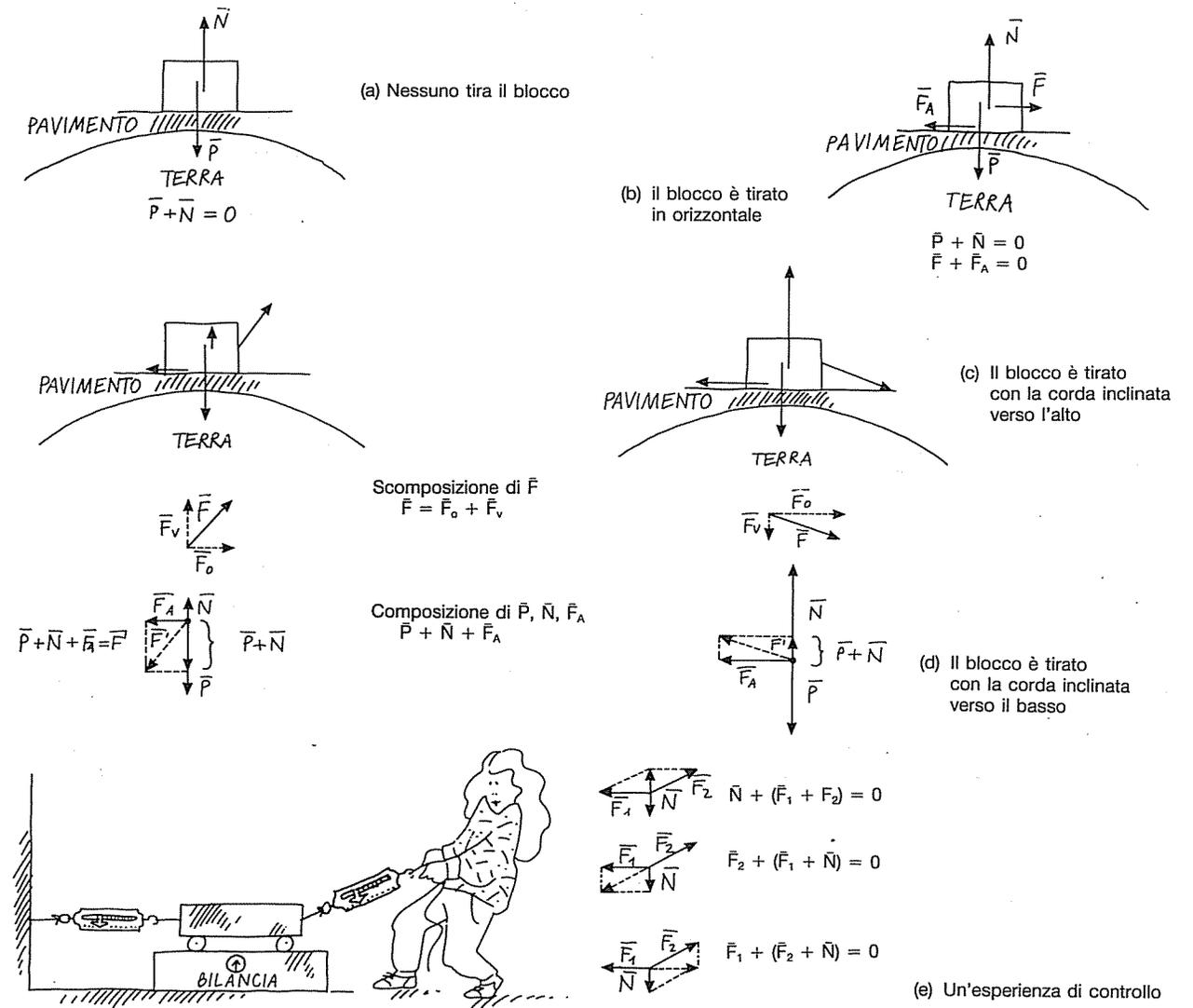


Figura 6.5 - Composizione e scomposizione di forze

In fig. (a), (b), (c), (d) sono rappresentate le azioni di forza che si esercitano su un blocco appoggiato al pavimento in quattro situazioni diverse. In (c) e (d) si può verificare come la scomposizione della forza F (esercitata da qualcuno che tira il blocco) in due componenti F_o ed F_v , una orizzontale e l'altra verticale, o alternativamente la composizione delle forze esercitate dal pavimento (F_a ed N) e dalla Terra (P) sul blocco in un'unica forza con direzione né orizzontale né verticale, rende ragione dell'equilibrio del blocco statico in (a); statico o stazionario in fig. (b), (c), (d), a seconda che F sia troppo piccola per provocare il distacco del blocco dal pavimento o sufficientemente grande da farlo spostare a velocità costante. Infatti si può alternativamente vedere che la reazione vincolare del pavimento equilibra la risultante della forza peso e della componente verticale di F (in formula $N + F_v = 0$ sia in (c) che in (d), mentre la forza d'attrito equilibra la componente orizzontale di F ($F_a + F_o = 0$ in entrambi i casi); oppure che la forza F è equilibrata da una forza F' ad essa eguale e contraria che è la risultante di tutte le altre forze agenti sul blocco [$F + (F_a + P + N) = 0$].

In fig. (e) è invece illustrata un'esperienza che permette di verificare la regola del parallelogramma. La bilancia permette di misurare la forza complessivamente esercitata sul blocco del pavimento e dalla Terra in direzione verticale (uguale a P se l'omino non tira in orizzontale; minore di P se la corda è inclinata verso l'alto, come nel disegno; maggiore di P se è inclinata verso il basso); il dinamometro (1) fornisce l'intensità della forza orizzontale esercitata dalla parete; il dinamometro (2) quella della forza di trazione. Riportando su un foglio i segmenti rappresentativi delle tre forze misurate, rispettando le rispettive direzioni, si può constatare che la risultante ottenuta applicando le regole del parallelogramma a due qualunque di esse, è uguale ed opposta alla terza.

Ciò che va comunemente affrontato è il problema di cosa succede quando su un oggetto agiscono forze aventi direzioni diverse: può infatti succedere che i

bambini abbiano la convinzione (esplicita o implicita) che valga ancora (talvolta) una regola di somma aritmetica. È importante che invece compren-

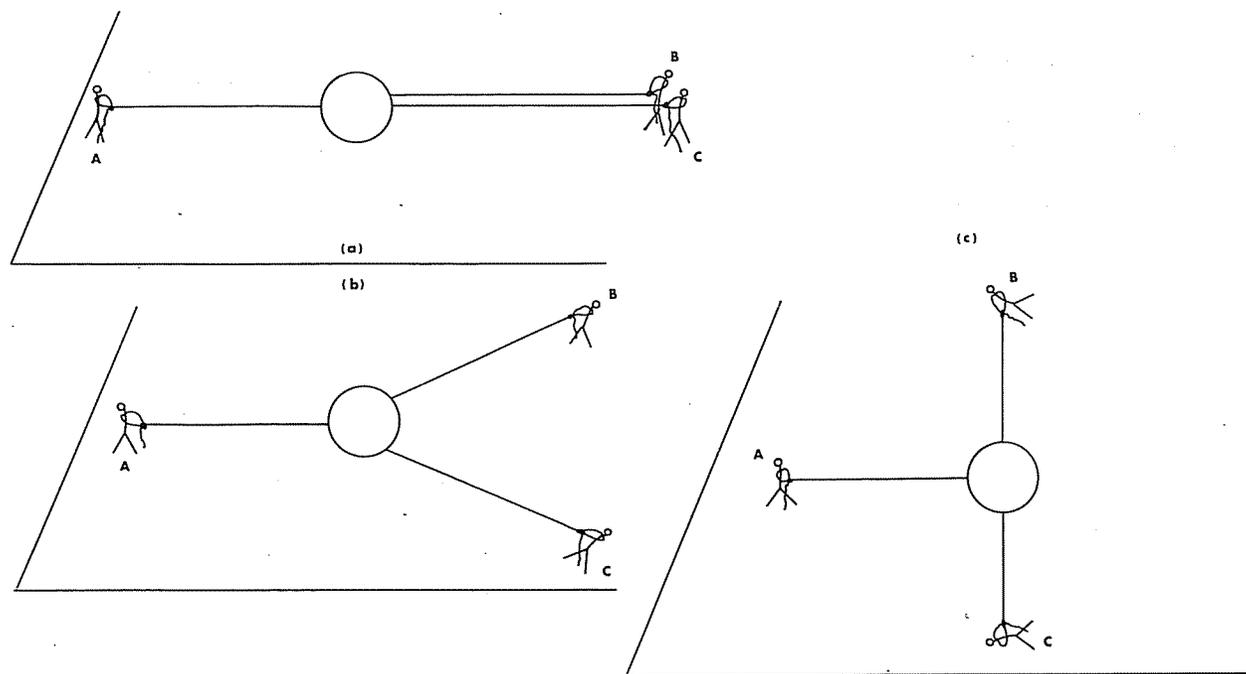


Figura 6.6 - Tiro alla fune a tre squadre

Giocando al tiro alla fune a tre squadre è percettivamente immediato rendersi conto di quanta importanza hanno le direzioni di più forze esercitate su uno stesso oggetto nel determinare l'entità della forza risultante. L'omino A per non perdere dovrebbe esercitare in (a) una forza di intensità eguale esattamente alla somma delle intensità delle forze esercitate da B e da C; in (c) "vince" anche esercitando una forza piccolissima; in (b) l'intensità della forza che deve esercitare è ancora ragguardevole, ma inferiore alla somma delle intensità delle forze esercitate da B e da C. Se le direzioni delle tre funi formano tre angoli uguali, di 120° ciascuno, nel caso di forze uguali si ha equilibrio.

In tutti questi giochi diventa chiaro come "risultante zero" delle forze agenti sia ben diverso da "forze nulle".

dano, sia pure a livello puramente qualitativo, che in questo caso anche se le forze possono sempre "sommarsi", nel senso che esse nel loro insieme equivalgono ancora ad una forza unica, questa ha però direzione diversa da quella delle forze componenti (nel caso particolare che le componenti siano solo due, la direzione della risultante è compresa fra le loro direzioni) ed ha intensità uguale o inferiore alla somma aritmetica delle intensità delle forze componenti (sempre nel caso che queste siano due, l'intensità della risultante è tanto più piccola, quanto è più grande l'angolo fra di esse).

È possibile far incontrare i bambini con questi aspetti vettoriali delle forze per esempio attraverso un gioco di tiro alla fune a tre squadre. Esso consente infatti di lavorare con delle forze tutte dello stesso tipo, e di studiare l'effetto, sull'intensità della forza risultante, della direzione relativa di due azioni di forza di pari intensità (entro buoni limiti). Si può partire con tre bambini (chiamiamoli A, B, C) che tirano ognuno il capo di una fune legata con l'altro estremo ad un robusto anello di metallo. A e B possono mettersi a fianco a fianco contro C, di

fronte a loro. Poi A e B possono allontanarsi lentamente fra loro, fino ad arrivare alla posizione in cui sono uno di fronte all'altro con C che tira la sua fune in direzione perpendicolare a quella delle loro funi (vedi fig. 6.6, a, b, c.).

Nella posizione iniziale se tutti i bambini tirano al massimo delle loro forze (e non ci sono grosse differenze fra loro), C perde irrimediabilmente (gioca da solo contro due), ma, man mano che A e B si allontanano fra loro, C riesce a resistere sempre meglio, fino ad arrivare a "vincere" spesso (contro l'intuizione!) con sempre minore sforzo, e praticamente addirittura senza alcuno sforzo nella situazione finale (A e B fanno forza uno contro l'altro, e nessuno si oppone a C!).

Si possono inventare molte varianti del gioco, per esempio sostituire ad A, B, C, delle squadre diversamente numerose, e vedere in che posizione si devono mettere affinché nessuna di loro riesca a vincere se non con molta difficoltà ... Si possono poi inserire degli estensori fra le funi e l'anello (scheda 6.1 fig. 3.1), che con il loro allungamento indicano le intensità relative delle forze esercitate

nelle tre direzioni ... o ancora interporre fra funi ed anello dei dinamometri su cui leggere le intensità delle tre forze (fig. 6.9) ... E si può discutere ogni volta di quello che succede ... fino a passare, con esperienze e dati, all'interpretazione quantitativa secondo il modello vettoriale.

In scheda 6.1 riportiamo le osservazioni dei ra-

gazzi in situazioni di questo genere, nonché un esempio di come il raggiungimento di questo tipo di conoscenza qualitativa sia sufficiente per rendersi conto di quanto avviene in situazioni reali in cui la vettorialità della forza è determinante (discussione dell'esperienza di attrito sul piano inclinato, Cap. III § 3.4.).

Scheda 6.1 - Aspetto vettoriale delle forze: attività svolte con i ragazzi

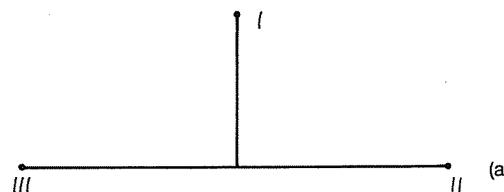
All'inizio del lavoro sulle forze, dopo aver giocato a braccio di ferro e a spingere i banchi, i ragazzi giocano al tiro alla fune (fig. 6.11) e discutono sui modi di fare forza:

"Quando facciamo il gioco del tiro alla fune dobbiamo fare forza con le mani contro l'avversario e con i piedi contro il pavimento".

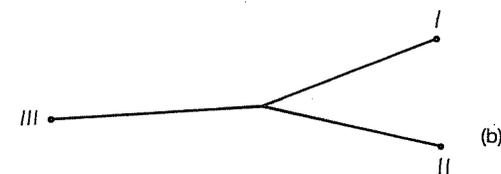
"Quando facciamo forza con le mani tirando la fune la forza si trasmette lungo la fune".

"Se sotto i piedi dell'avversario ci mettiamo il cartone, scivola e perde, perché non può fare forza né con le mani né con i piedi contro il pavimento".

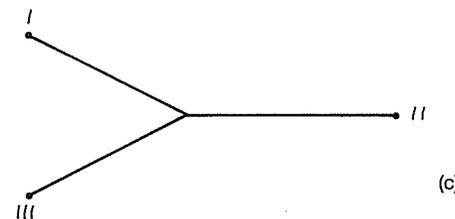
La volta successiva, si fa il tiro alla fune a tre squadre (vedi fig. 6.6 e fig. 6.1.2), partendo dalla situazione in cui le due squadre sono allineate e la terza sta di fronte (fig. 6.6a) ed arrivando alla situazione in cui due squadre sono direttamente opposte e la terza tira in direzione perpendicolare (fig. 6.6c e 6.8b). I ragazzi si rendono subito conto che quello che avviene dipende dagli angoli fra le direzioni delle tre funi ("la forza si perde nell'angolo" è il commento di uno di loro). Terminato il gioco si discute alla lavagna, aiutandosi con schizzi delle varie situazioni, "chi è avversario di chi":



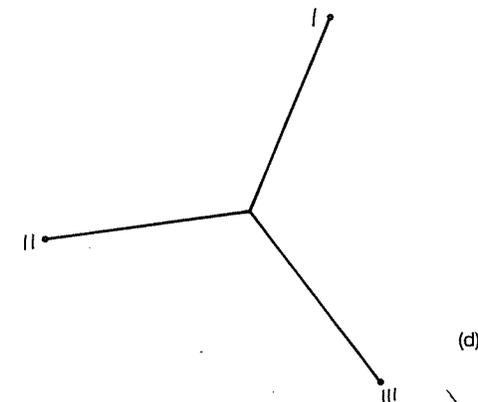
In questo modo gli avversari della prima squadra sono la seconda e la terza squadra.



In questo modo gli avversari della terza squadra sono la prima squadra e la seconda squadra.



In questo modo gli avversari della seconda squadra sono la prima squadra e la terza squadra.



In questo modo gli angoli sono tutti uguali. Le squadre sono tutte avversarie. La prima squadra è avversaria della seconda squadra e della terza. La terza squadra è avversaria della prima e della seconda.

La situazione di partenza (due squadre allineate frontalmente alla terza), induce i bambini a guardare tutte le situazioni nello stesso modo: ci sono due squadre "alleate" contro la terza. La situazione simmetrica (tre angoli di 120°) rompe questo automatismo e spinge i bambini a rendersi conto della reciprocità circolare delle interazioni. Un ulteriore dibattito porta i ragazzi a stabilire uno schema più generale:

"Quando l'angolo aumenta le forze diminuiscono. Quando l'angolo ha un certo valore l'avversario vince e subisce meno forza".

"Quando non c'era l'angolo le forze dei due ragazzi si sono addizionate ed hanno vinto loro. Quando hanno formato l'angolo le forze dei due ragazzi si sono addizionate, però la forza era di meno e l'altro ragazzo facendo la stessa forza di prima ha resistito di più".

"La forza si perde quando l'angolo aumenta. La forza va nell'angolo. La forza sta in tutto l'angolo".

Al termine della discussione, i ragazzi svolgono un compito in classe.

Per verificare, ad un livello qualitativo, le conclusioni raggiunte, si pensa ad un'esperienza che evidenzia anche visivamente che all'aumentare dell'angolo fra le funi dei ragazzi inizialmente allineati (fig. 6.6a), la forza esercitata dalla terza squadra per mantenere l'equilibrio diminuisce fino ad annullarsi (fig. 6.6c). Si decide di utilizzare al posto delle funi 3 estensori uguali (fig. 6.8.3), che con i loro allungamenti evidenziano le relazioni fra le entità delle forze esercitate dalle tre squadre nelle varie configurazioni. Si decide che i due ragazzi inizialmente allineati cercheranno di esercitare sempre la stessa forza in tutte le posizioni, mentre il terzo dovrà adattare la propria in modo da ottenere l'equilibrio. La costanza delle forze esercitate dai primi due ragazzi può essere controllata dagli allungamenti dei rispettivi estensori. Dopo l'esperienza se ne discute.

"Piano piano che l'angolo tra due estensori si comincia ad aprire, l'avversario che è solo incomincia a resistere di più perché deve fare una forza minore, come si vede guardando le molle dell'estensore che sono sempre meno allungate. Le forze che fanno i due che sono uniti si dividono e cominciano a lottare anche tra loro e quindi l'avversario che era da solo è più avvantaggiato. Quando i due ragazzi che erano prima uniti si allontanano, le loro forze non si addizionano, perché tirano anche uno contro l'altro. Quando i due estensori formano un angolo piatto, cioè che sono nella stessa direzione, il terzo vince sempre perché non ha avversari e le molle dell'estensore non sono proprio allungate. Se l'angolo è uguale a 120° tra tutti e tre gli estensori, chi ha più forza vince".

"La somma delle forze di Carmine e di Vincenzo è zero quando gli estensori di Carmine e di Vincenzo fanno un angolo piatto; e tirano uno contro l'altro, ed Elisa vince perché non ha più avversari contro cui tirare. L'estensore di Elisa ha un angolo di 90° con quelli degli altri due e non si allunga proprio".

Ricercatore: "Molti di voi dicono che quando le direzioni del corde o dei due estensori formano un certo angolo le forze si dividono in due parti. Cosa intendete?".

"Le forze si dividono" vuol dire che della forza di Vincenzo una parte tira contro Carmine e una parte tira contro Elisa".

"La parte della forza di Vincenzo che tira contro Carmine è piccola quando l'angolo è piccolo ed è grande la parte di forza che tira contro Elisa... Quando l'angolo è grande invece è grande la parte della forza di Vincenzo che tira contro Carmine ed è piccola la parte di forza che tira contro Elisa...".

A questo punto i bambini avvertono l'esigenza di stabilire chi è il più forte della classe e si procede ad una classifica usando un dinamometro. ("Abbiamo agganciato una piccola bilancia [dinamometro, n.d.A.] al termosifone e dalla parte dell'uncino ognuno di noi ha tirato per dimostrare la propria forza. Infine abbiamo stabilito una classifica che dimostrava in ordine di forza, quanti kg era riuscito a far segnare sulla bilancia ogni "ragazzo", vedi fig. 6.9e). Si passa poi ad una vera e propria misura dell'intensità delle forze nelle diverse configurazioni del tiro alla fune a tre squadre, collegando dapprima i dinamometri in serie agli estensori (fig. 6.9b) e poi utilizzandoli direttamente (fig. 6.9c). In tutte le configurazioni si fa in modo che due delle squadre tirino sempre con la stessa forza (che si legge sui dinamometri rispettivi) e si legge la forza equilibratrice sul terzo dinamometro. Al termine delle esperienze si può così compilare la seguente tabella:

I	II	III	
8	8	16	Angolo zero
8	8	14	Angolo acuto
8	8	11	Angolo ottuso
8	8	17	Angolo ottuso più grande
8	8	7	Angolo ottuso ancora più grande
8	8	3	Angolo ottuso grandissimo
8	8	0	Angolo piatto

N.B. Gli angoli della quarta colonna sono quelli formati caso per caso tra i due dinamometri che segnano sempre la forza di 8 kg.

Nel corso di tutte le successive attività si vede che i ragazzi utilizzano le acquisizioni e gli schemi costruiti attraverso le attività che abbiamo descritto, ogni qualvolta si ha a che fare con situazioni in cui quello che succede è determinato dalla composizione di forze aventi direzioni diverse.

Vediamo due esempi.

1) I ragazzi hanno lavorato sulle forze d'attrito, tirando tramite una molla oggetti appoggiati ad una superficie orizzontale. Per valutare l'attrito dall'allungamento delle molle hanno sempre fatto attenzione a tirarle in direzione orizzontale.

Ricercatore: "In tutte le esperienze che abbiamo svolto sulle forze d'attrito abbiamo sempre tirato l'oggetto con la molla parallela alla superficie d'appoggio. Sapreste dire perché?"

"La molla deve essere parallela, perché deve servire solo a tirare l'oggetto. Se la molla è inclinata fa un angolo verso l'alto con la superficie e fa anche alzare l'oggetto, perché la forza si divide in due parti: una lo fa alzare perché tende a sollevarlo, l'altra parte lo fa strisciare".

Ricercatore: "Cosa succede alla forza di attrito?"

"La forza di attrito diminuisce, perché una parte del peso viene mantenuto dalla mano che tira, sappiamo che la forza di attrito aumenta quando aumenta il peso e perciò se diminuisce il peso diminuisce anche l'attrito".

Ricercatore: "Cosa succede se si tira con la molla inclinata verso il basso?"

"La forza che faccio si divide in due parti: una si aggiunge al peso dell'oggetto e l'attrito aumenta, perché è come se il peso fosse maggiore, e l'altra che tira l'oggetto sulla superficie serve per trascinare l'oggetto".

Per verificare la validità di queste affermazioni si esegue la seguente esperienza (fig. 6.5e): si pone una tavoletta di legno sulla bilancia, e sulla tavoletta un oggetto che viene tirato con una stessa molla, dapprima parallelamente al piano poi obliquamente verso l'alto ed obliquamente verso il basso. Ecco le conclusioni dei ragazzi:

"Abbiamo visto che conviene tirare parallelamente alla tavola o alla superficie dove appoggiamo l'oggetto. Quando si tira parallelamente la forza che facciamo è uguale alla forza di attrito, non si suddivide e la bilancia segna sempre lo stesso. Se tiriamo verso l'alto la forza si divide in due: una tira l'oggetto lungo la tavola e l'altra solleva l'oggetto e la bilancia segna di meno. In questo modo l'attrito diminuisce perché è come se il peso fosse diminuito".

"Anche quando tiriamo con la molla obliquamente verso il basso la forza che facciamo si divide in due parti. Una si aggiunge al peso e infatti la bilancia segna di più ed anche la forza di attrito aumenta: l'altra forza tira orizzontalmente e non ce la fa a trascinarlo".

Ricercatore: "Quand'è che la parte di forza che fa strisciare è grande rispetto a quella che fa alzare o schiacciare il blocco? E quando è che è piccola?"

"La forza che fa strisciare è grande, anzi è massima [rispetto alla forza totale esercitata da chi tira, n.d.A.] quando la molla è parallela e non c'è la forza che fa alzare o schiacciare perché la forza non si divide. Quando l'angolo [con l'orizzontale, n.d.A.] è piccolo la forza che fa strisciare è grande, e la forza che fa alzare o che schiaccia è piccola. Se l'angolo è grande la forza che fa strisciare è piccola e quella che alza o schiaccia è grande. Se l'angolo è di 90° la forza che lo fa strisciare non c'è e tutta la forza o lo alza o lo schiaccia".

2) Un blocchetto di ferro è appoggiato su un piano inclinato: i ragazzi discutono sulle forze agenti e su cosa può accadere:

Ricercatore: "Cosa succede in questo caso? Qual è la forza che fa scivolare l'oggetto?".
 L'oggetto non scivola quando il piano è poco inclinato, perché grazie alla forza di attrito esso riesce a stare fermo sul banco.
 "La forza di attrito lotta per far rimanere il blocchetto di ferro sul banco mentre il peso lotta per farlo cadere".
 "Non è tutto il peso che lo fa scivolare. Il peso si divide in due parti, una parte per farlo scivolare e un'altra parte schiaccia contro il piano".
 "Il blocchetto scivola se la parte di peso che tira il blocco verso il basso vince contro la forza di attrito".



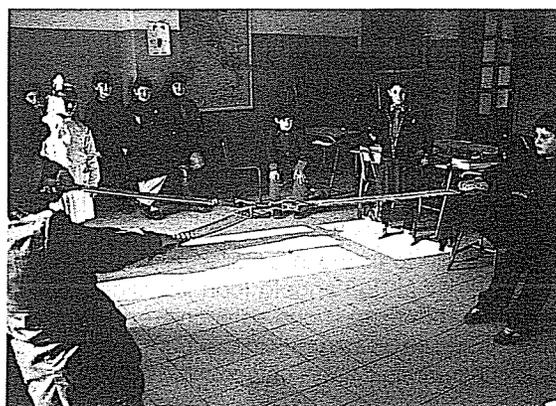
Figura 1 - Tiro alla fune a due squadre



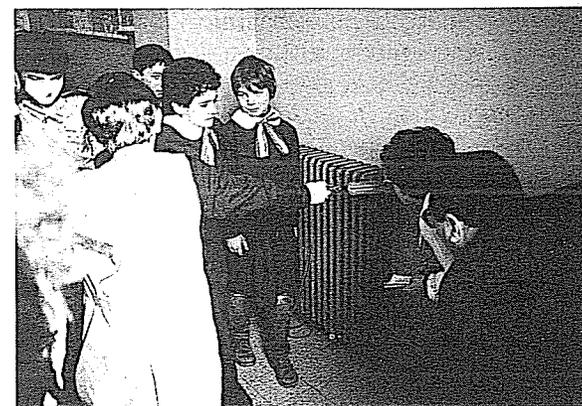
Figura 2 - Tiro alla fune a tre squadre



Figura 3 - Tiro alla fune a tre squadre con gli estensori (a)



(b)



(a)



(b)



(c)

Figura 4 - Si misurano le forze

Si cerca "il più forte" (a). I più forti fanno il tiro alla fune a tre squadre misurando con dei dinamometri le forze esercitate in varie configurazioni di equilibrio (b) e (c).

Conclusioni

Siamo così arrivati al termine di questo libro. Abbiamo cercato di portare avanti tre discorsi per così dire "longitudinali", paralleli fra loro: una presentazione a livello adulto delle schematizzazioni disciplinari relative a diverse fenomenologie che coinvolgono aspetti di forza; una proposta di attività da svolgere in classe con bambini del secondo ciclo della scuola elementare, o all'inizio della media, avente come oggetto una ricostruzione di queste stesse fenomenologie a livello adeguato all'età, al tempo stesso coerente con le schematizzazioni adulte; una documentazione della sperimentazione da noi effettivamente svolta con bambini inizialmente di IV l'anno successivo di V elementare. Parallelamente a questi tre discorsi abbiamo cercato di portarne avanti un altro, molto più generale e per noi fondamentale: come lavorare in classe, affinché le attività di Educazione Scientifica risultino effettivamente formative da un punto di vista cognitivo e culturale per i nostri allievi. È dunque su questi diversi aspetti presentati che andremo a trarre le nostre conclusioni.

1. Il discorso disciplinare

Che cos'è, dunque, "una forza"?

Se siamo riusciti ad ottenere lo scopo che volevamo il lettore, insoddisfatto delle definizioni che generalmente si trovano agli inizi dei libri di testo,¹ dovrebbe sentire l'esigenza di riconsiderare un po' tutto il discorso che è stato fatto per trovare una risposta soddisfacente a questa domanda.

Noi proviamo a darne una, per quanto parziale² qui di seguito. In un certo senso, "le forze" non esistono. Non sono cioè nulla di concreto, né oggetti, né proprietà di oggetti. Il concetto di "forza", inizialmente basato su percezioni fisiologiche correlate a tutta una serie di interazioni del proprio corpo con altri sistemi materiali, diviene in Fisica una co-

struzione mentale atta a descrivere in modo unificante un aspetto particolare di tutta una classe di fenomeni di interazione fra sistemi materiali.

"Fare forza" è un nostro modo di schematizzare delle relazioni fra fatti, che sussistono ogni qualvolta due o più sistemi entrano in un'interazione che ne provoca una deformazione reciproca rispetto ad uno stato indeformato, nel senso che abbiamo via via definito per le varie fenomenologie esaminate. Si dice che "ha agito una forza" o che "sta agendo una forza" se si è riscontrata, o se si sta riscontrando, una qualunque di queste deformazioni. E questo "ha agito" o "sta agendo" significa che, in realtà, "c'è stata" o "è in atto" un'altra deformazione (almeno), correlata alla prima.

L'aspetto di queste interazioni di cui il concetto di forza dà ragione è la relazione che esiste, ad ogni istante, fra le deformazioni in atto dei vari sistemi interagenti in quell'istante.³ Fissati i sistemi materiali interagenti, si ha una corrispondenza biunivoca fra le deformazioni reciproche di ogni coppia di

¹ Forza come causa di variazione di velocità, o meglio di quantità di moto, in un sistema di riferimento inerziale; forza come causa di variazione della forma di un oggetto.

² Per esempio non riprenderemo in considerazione gli aspetti energetici delle interazioni fra sistemi ed il loro rapporto con le forze. Sottolineeremo soltanto alcuni punti di inquadramento generale per noi fondamentali.

³ Si dice che la forza è una grandezza "differenziale". Se invece si considerano le deformazioni totali che i vari sistemi interagenti hanno subito dall'istante d'inizio dell'interazione all'istante in cui essa è terminata (o a qualunque istante intermedio), si ha che l'entità di queste deformazioni dipende dall'entità del trasferimento d'energia fra i vari sistemi interagenti, avvenuto durante tutto il periodo di tempo considerato. A differenza della forza, che si riferisce ad un certo istante, l'energia, che viene trasferita durante un certo intervallo di tempo, è una grandezza "integrale".

essi. Di più: se ad uno dei sistemi interagenti se ne sostituisce uno diverso, si può ottenere una situazione del tutto equivalente (cioè le deformazioni degli altri sistemi restano le stesse), purché la deformazione del nuovo sistema sia quella in corrispondenza biunivoca con la deformazione del sistema sostituito (vedi fig. 7.1).

Queste relazioni di corrispondenza biunivoca e di sostituibilità ci permettono di "leggere" istante per istante la situazione di deformazione reciproca dei sistemi interagenti come una situazione di equilibrio fra le azioni deformanti che ognuno di essi sta esercitando sugli altri. Secondo le situazioni, si tratterà di un equilibrio statico, stazionario, o dinamico.

Ritornando alla fig. 7.1, abbiamo un equilibrio statico nel caso (1), ove le due deformazioni che si fanno equilibrio sono entrambe di natura puramente geometrica: il cambiamento di forma della molla che risulta allungata ed il cambiamento di distanza fra l'oggetto e la Terra, che non sono più a contatto. La configurazione dei sistemi interagenti non varia col tempo, non c'è movimento.

Nei casi (2) e (3) abbiamo a che fare con un equilibrio stazionario: una delle due deformazioni considerate consiste nel movimento relativo, a velocità costante, della barchetta rispetto all'acqua. La configurazione complessiva dei sistemi interagenti varia continuamente nel tempo, finché dura l'interazione, ma varia in maniera uniforme. Nel caso infine, che consideriamo sia la situazione (4), sia la situazione (5), abbiamo a che fare con un equilibrio dinamico: una delle deformazioni consiste nella variazione del movimento, cioè nell'accelerazione dell'oggetto rispetto al riferimento (la parete in (4), la Terra in (5)). La configurazione complessiva non solo varia continuamente nel tempo, ma varia in modo non uniforme.⁴

In tutti i casi è comunque possibile, sul piano matematico-formale, esprimere l'equilibrio istantaneo fra le deformazioni reciproche dei sistemi interagenti attraverso l'uguaglianza istantanea dei valori che assume, per ognuno dei sistemi, una grandezza appositamente definita, che tiene conto sia del tipo di deformazione che si sta considerando, sia

delle caratteristiche specifiche del particolare sistema materiale. Questa grandezza è, appunto, la "forza" coinvolta nell'interazione. Così nel caso (1) si dirà che la forza elastica di richiamo della molla è uguale alla forza-peso dell'oggetto (cioè all'attrazione gravitazionale che si esercita fra esso e la Terra) e si scriverà (1) $K(x - x_0) = (G m M)/d^2$; nel caso (2) si dirà che la resistenza viscosa opposta dall'acqua al moto della barchetta è uguale alla forza peso dell'oggetto e si scriverà (2) $f_v = (G m M)/d^2$; nel caso (3) si dirà che la forza elastica è uguale alla forza viscosa: (3) $K(x - x_0) = f_v$; nel caso (5), si dirà che la forza elastica della molla è uguale alla forza d'inerzia dell'oggetto: (5) $K(x - x_0) = ma$ e nella situazione (4), infine, che la forza peso dell'oggetto è uguale alla sua inerzia (4) $(G m M)/d^2 = mg$.

In ognuno dei membri di queste uguaglianze compaiono sia le variabili caratteristiche del tipo di deformazione (x = allungamento della molla; d = distanza fra l'oggetto ed il centro della Terra; v = velocità della barca rispetto all'acqua; a, g = accelerazioni dell'oggetto), sia parametri caratteristici del particolare sistema materiale con cui si ha a che fare (K , che dipende dalla rigidità e dalla lunghezza a riposo della molla; m ed M che rappresentano le masse gravitazionali dell'oggetto e della Terra; f e μ che sono rispettivamente legati alla forma della barca ed alla viscosità dell'acqua; m che rappresenta la massa inerziale dell'oggetto).

Per potere dare dei valori numerici alle forze così definite è necessario costruire dei sistemi di misura, cioè scegliere arbitrariamente un'unità di forza, darle un nome (Newton, dyne, kg-peso sono nomi che conosciamo dalla scuola secondaria ad esempio) e definire un modo per costruirne multipli e sottomultipli; poiché formalmente una forza si esprime sempre come prodotto di una variabile di deformazione e di uno o più parametri caratteristici del particolare sistema volta a volta considerato, costruire un sistema di unità di misura delle forze implica anche costruire dei sistemi di unità di misura dei parametri (per le variabili di deformazione i sistemi di unità di misura già esistono, indipendentemente dalle forze). Si può scegliere, in linea di principio di partire da un tipo di deformazione arbitraria, prendere un determinato sistema materiale in un determinato stato deformato (quello che corrisponde ad un valore unitario della deformazione) ed attribuire valore unitario sia al parametro che lo caratterizza nei confronti del tipo di deformazione scelta, sia all'azione di deformazione, cioè alla forza, che esso esercita in questa situazione sui sistemi

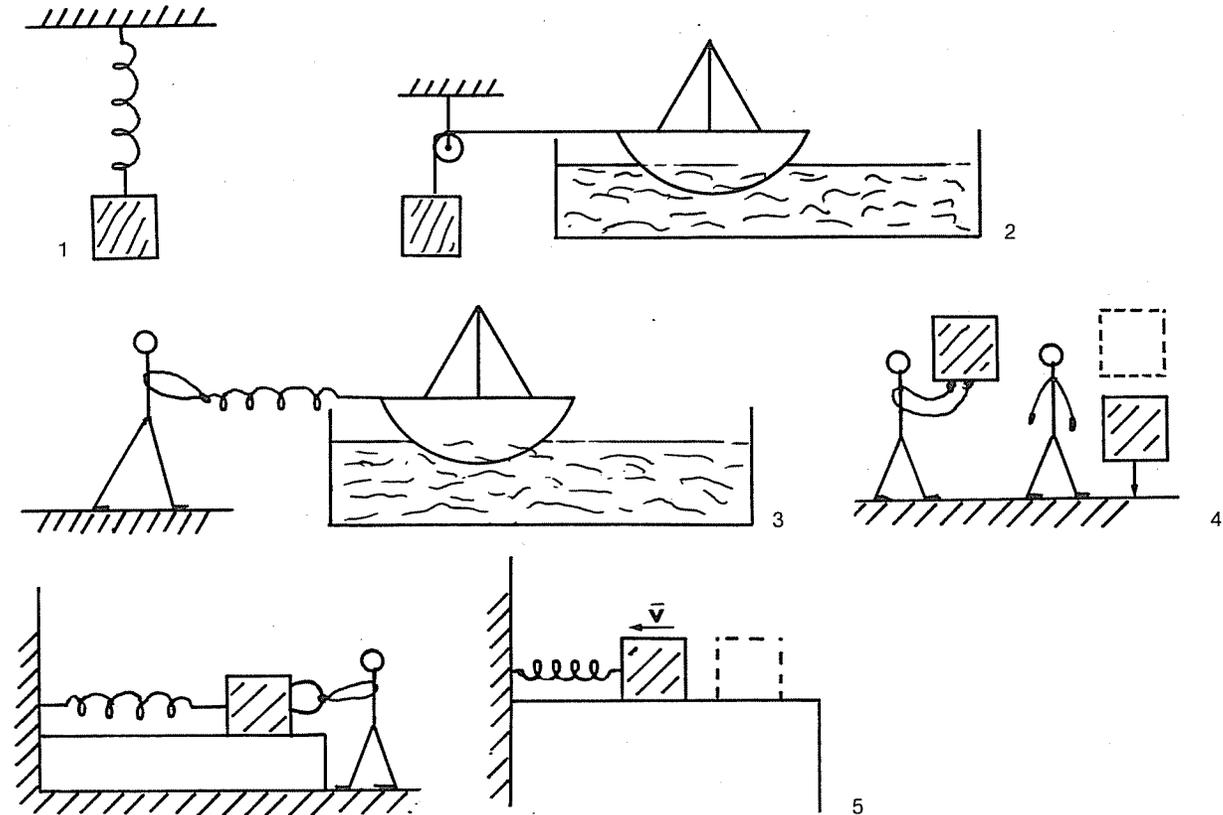


Figura 7.1 - Corrispondenza biunivoca e sostituibilità nelle interazioni di deformazioni fra sistemi

Abbiamo un oggetto, una molla, una barchetta ed un canale pieno di acqua. Consideriamo diverse situazioni.

(1) L'oggetto è appeso alla molla.

C'è corrispondenza biunivoca fra l'allungamento della molla ed il peso dell'oggetto.

(2) Lo stesso oggetto appeso ad un filo tira attraverso una carrucola la barchetta nell'acqua (la barchetta è più o meno a metà del percorso).

C'è corrispondenza biunivoca fra la velocità raggiunta dalla barchetta ed il peso dell'oggetto.

(3) La stessa barchetta tirata nell'acqua da una persona attraverso la molla allungata come in (1).

Se sostituisco la molla all'oggetto la barchetta raggiungerà la stessa velocità di regime del caso (2) quando la molla sarà allungata come nel caso (1).

(4) L'oggetto lasciato andare in caduta libera.

Esso cade con un'accelerazione costante: l'accelerazione di gravità.

(5) La solita molla, in orizzontale, con attaccato l'oggetto tenuta allungata da una mano fino alla quantità del caso (1) e poi rilasciata.

Se lasciamo l'oggetto, agganciato alla molla, dopo aver allungato quest'ultima come nel caso (1), osserviamo che l'oggetto all'attimo del rilascio parte con un'accelerazione uguale all'accelerazione di gravità. Man mano che l'oggetto si muove attaccato alla molla la sua accelerazione cambia, ma istante per istante c'è corrispondenza biunivoca fra l'allungamento della molla in quell'istante e l'accelerazione, nello stesso istante, dell'oggetto ad essa agganciato.

Se cambiamo oggetto e/o molla e/o barchetta e fluido, cambieranno le deformazioni reciproche (allungamento della molla, velocità a regime della barchetta, accelerazioni dell'oggetto), ma resteranno valide, per ogni nuovo gruppo di sistemi, tutte le relazioni che abbiamo stabilito fra le diverse deformazioni. Ci sarà ancora corrispondenza biunivoca fra le deformazioni reciproche di ogni coppia di sistemi interagenti, e sostituibilità fra i vari sistemi.

N.B. Quanto detto per i casi illustrati è vero solo in caso di "accoppiamento" ottimale fra i due sistemi di volta in volta considerati. Si devono cioè poter trascurare sia azioni di forze che trasferimenti di energia "paralleli" (in particolare tutti gli attriti, tranne ovviamente quello barchetta-acqua dei casi (2) e (3)). Sono invece indispensabili, e non cambiano il discorso, le interazioni "in serie" che chiudono la catena delle interazioni; interazioni con la persona, il pavimento, le pareti ...

⁴ Nel caso (4), si ha un'accelerazione costante, mentre nel caso (5) l'accelerazione cambia continuamente con l'allungamento della molla. Perché nel caso (4) si mantiene praticamente costante la deformazione antagonista (distanza dell'oggetto dal centro della Terra: vedi Cap. III), mentre nel caso (5) essa varia continuamente (allungamento, appunto, della molla).

con cui interagisce (e, ovviamente, all'azione di deformazione che essi esercitano su di lui).⁵ Per confronti successivi fra le deformazioni di questo sistema e le deformazioni di altri sistemi, sia dello stesso tipo che di tipo diverso, che fanno loro equilibrio, è possibile costruire multipli e sottomultipli dell'unità di forza e del parametro iniziale scelti. Contemporaneamente è possibile determinare, grazie alle relazioni formali che rappresentano le varie situazioni di equilibrio (del tipo delle (1) - (5) precedenti) ed alle misure delle reciproche deformazioni, i valori degli altri tipi di parametri, che caratterizzano gli altri tipi di deformazioni.

In definitiva è quindi la coerenza complessiva di tutto un sistema di fatti e delle relazioni che li rappresentano sul piano matematico-formale, che è alla base del concetto di forza, in una catena circolare di convalide reciproche. Questa circolarità intrinseca del discorso sulle forze urta, appunto, contro la possibilità di definirle come *causa* di determinati *effetti*. È la forza-peso dell'oggetto (causa) che allunga la molla (effetto), o è la forza elastica della molla (causa) che tiene l'oggetto lontano dalla superficie terrestre (effetto)? È la forza-peso dell'oggetto (causa) che tiene in moto la barchetta con velocità uniforme (effetto), o sono le resistenze viscosse (causa) che costringono l'oggetto a cadere con moto uniforme (effetto), invece che con accelerazione g?

Ciò che concretamente esiste sono delle catene di correlazioni, le deformazioni reciproche dei vari sistemi antagonisti. Sono queste deformazioni che vengono in realtà misurate direttamente, ed è da queste misure che si può ricavare il valore delle "forze d'interazione" sempre, istante per istante, eguali e opposte per ogni coppia di sistemi in interazione reciproca, all'interno di catene che sono sempre chiuse su se stesse. Le forze sono cioè caratteristiche grandezze trasdotte: gli strumenti di misura che si usano per misurarne il valore sono sistemi che vengono deformati per interazione con il sistema-sorgente che si considera. Essi "leggono", in effetti, la loro stessa deformazione, e sono tarati per dare il valore delle forze deformanti: generalmente grazie sia ad un confronto con deformazioni-cam-

pione (o forze-campione che dir si voglia), sia alle relazioni formali che descrivono il tipo di deformazione scelta. Ad esempio un dinamometro è spesso una molla lineare: essa viene tarata appendendovi dei pesi-campione crescenti, che servono a determinarne le condizioni d'uso, cioè la zona di linearità. L'ipotesi di deformazione lineare permette di utilizzare solo alcuni pesi-campione solo per controllare la validità: l'intervallo di allungamento lineare può poi essere a sua volta suddiviso servendosi semplicemente della relazione di proporzionalità pesi-allungamenti.

Tutti gli aspetti del concetto di forza cui abbiamo sin qui accennato sono secondo noi fondamentali, ma pensiamo che una loro padronanza non possa essere raggiunta che al termine di uno studio prolungato sulle forze. In esso si devono prendere in considerazione diverse situazioni di interazione fra sistemi, con l'intento sia di evidenziare tutti gli aspetti connessi che determinano nel loro complesso le proprietà di quell'ente astratto che è appunto "una forza"; sia di scoprire tutte le differenze, che valgono a specificare come tipi diversi di sistemi materiali siano in grado, ciascuno in un suo proprio modo, di esplicitare queste azioni di forza. Non per niente dopo un intero libro dedicato ad attività di scoperta di cosa sono le forze siamo arrivati solo nelle conclusioni ad alcune delle formule più semplici che si possano trovare in un testo di Meccanica!

Prima di terminare questo paragrafo, vorremmo sottolineare in modo particolare il fatto di aver impostato sin dall'inizio il discorso sulle forze come un discorso d'interazione fra sistemi, che può essere parzialmente descritta attraverso relazioni fra variabili. Spesso il primo di questi due aspetti è trascurato nelle trattazioni della Meccanica, a vantaggio del secondo. Questo modo di fare induce molto spesso lo studente in errori grossolani (per es. quando ci si dimentica che non solo un oggetto è attratto dalla Terra, ma che succede anche l'opposto; e che Terra e oggetto schiacciano fra loro una bilancia. Ma c'è di più: saper guardare contemporaneamente quello che accade intorno a noi dal punto di vista sia dell'interazione fra sistemi sia delle relazioni fra variabili, cogliendo i rapporti fra questi due modi di vedere, è una strategia cognitiva fondamentale valida per tutte le aree di realtà, non solo dei fenomeni fisici. Ed è in quanto tale che appare opportuno svilupparla negli alunni sin dall'ini-

zio della loro educazione scientifica, quale che sia il campo d'indagine scelto.⁶

2. La nostra proposta

Abbiamo proposto una varietà di attività che difficilmente potranno essere svolte interamente in un anno, in una classe. Ma l'abbiamo fatto volutamente, per varie ragioni:

1) per mettere in evidenza la generalità del discorso sulle forze, e, di conseguenza, la sua importanza come chiave d'interpretazione di un vastissimo numero di fenomeni con cui si ha quotidianamente a che fare;

2) per sottolineare come sia vasta la gamma delle fenomenologie affrontabili in modo significativo già a livello di scuola elementare, contro la riduttività delle proposte didattiche che si ritrovano generalmente ancora a livello di scuola media;

3) contemporaneamente per evidenziare la pluralità di livelli a cui si può lavorare con i bambini: partendo dalle descrizioni puramente qualitative e giungendo a relazioni quantitative, a seconda delle situazioni considerate, in un crescente rendersi conto dell'articolazione complessa fra le diverse formalizzazioni. Questo punto ci sembra particolarmente importante, ed in contrasto con le due posizioni opposte, abbastanza diffuse fra chi si interessa di Didattica, secondo cui, rispettivamente, o non si dovrebbe parlare di alcun fenomeno fisico prima dell'università, o invece si potrebbe affrontare qualsivoglia argomento, a livelli di formalizzazione molto bassi (Aritmetica, Algebra, Geometria elementari). Per i sostenitori della prima tesi la "vera Fisica" è indissociabile dal suo elevato livello di formalizzazione ed ogni altra presentazione dei fenomeni fisici porta ad una distorsione pericolosa che può rendere più difficile, se non impossibile, un recupero successivo. E i dati delle recenti ricerche sui "concetti alternativi", i "misconcetti" ... vengono interpretati come prova a sostegno di questa tesi. Dall'altra parte si schierano coloro che pensano che il linguaggio storico-naturale sia sufficiente a rendere conto di qualunque conoscenza, nei suoi tratti essenziali e nei suoi significati, in quanto comprenderebbe in sé i fondamenti dei vari linguaggi specialistici. Ricollegandoci a quanto espo-

⁶ Cfr. anche M. Arcà, P. Guidoni: "Guardare per sistemi, guardare per variabili", di questa stessa serie.

sto nell'introduzione sui rapporti intercorrenti fra il processo individuale di costruzione di conoscenza e la costruzione storico-sociale delle varie discipline scientifiche e tecnologiche, è evidente che noi ci collochiamo a metà strada fra queste due posizioni. Scopo dell'Educazione Scientifica nella scuola dell'obbligo non è insegnare la vera Fisica in quanto tale; ma se non avesse alcun senso pretendere di inserire nel programma la Meccanica Quantistica o la Teoria della Relatività, altrettanto assurdo sarebbe non affrontare in maniera coerente, sistematica ed aperta uno studio sui fenomeni in cui quotidianamente viviamo immersi: che sono comunque oggetto di un'elaborazione cognitiva spontanea, individuale, frammentaria, casuale e caotica, rispetto alla quale le attività scolastiche del tipo delineato consentono di raggiungere i livelli di consapevolezza critica e di rigore sui contenuti che abbiamo visto;

4) la sovrabbondanza della proposta consente ampi margini di scelta all'insegnante, in funzione dei propri gusti e soprattutto degli orientamenti dei ragazzi; e dà ragguagli anche su quegli aspetti che, pur non essendo scelti come oggetto di studio approfondito, possono essere sempre evocati nelle discussioni. A questo proposito ci sono due osservazioni da fare: la prima è che comunque nello scegliere una linea di programmazione è importante rendersi conto delle propedeuticità implicite nell'esposizione della proposta così com'è stata delineata (quali esperienze con le forze elastiche portano a conclusioni che vengono utilizzate nelle discussioni delle esperienze sulle calamite, per esempio?); la seconda è che in una metodologia aperta d'insegnamento nessuno (nemmeno l'"esperto" universitario!) può pensare di saper rispondere a tutti i problemi che i bambini sono in grado di proporre. Da questo punto di vista è importante che l'insegnante non si senta in dovere di saper rispondere a tutte le possibili domande. Non è su *quante* cose sa che ha senso misurare la sua professionalità, ma su *come* conosce quelle che sa, su come guida i bambini nella loro scoperta, su come egli stesso è in grado di andare a cercare nuove risposte a nuovi problemi: magari scoprendo che, in alcuni casi, sono ancora problemi oggetto di ricerca scientifica. Saper "cercare insieme", insegnante e ragazzi, val molto di più che dare risposte già fatte limitate al (comunque) parziale dominio delle proprie conoscenze sicure;

5) infine, benché la sperimentazione sia stata svolta

⁵ Così si potrebbe partire da una determinata molla assunta come campione, porre per essa $K = 1$ e definire come unitaria la forza F che ne provoca l'allungamento di 1 m o di 1 cm ... secondo l'unità di misura scelta per le lunghezze. Ma è evidente che ha più senso definire l'unità di forza a partire da qualche forza molto più generale, come l'inerzia o la gravità.

nella scuola elementare riteniamo che la nostra proposta sia adatta anche per la scuola media. A questo livello, e tanto più quanto più sono grandi i ragazzi, i tempi necessari a svolgere le diverse attività si accorciano notevolmente, ed è possibile andare molto più oltre sul piano della formalizzazione. Si può arrivare a stabilire le relazioni algebriche che esprimono le proporzionalità dirette fra variabili, a definire matematicamente diversi parametri che caratterizzano i sistemi materiali in gioco (coefficienti di attrito statico o viscoso, rigidità di una molla o di sistemi di molle ...), a costruire rappresentazioni grafiche per dipendenze anche complesse, a rappresentare le proprietà formali delle forze in quanto grandezze vettoriali. È poi possibile costruire tutto il discorso sulle forze in più di un anno scolastico, riservandogli una parte non esaustiva delle ore dedicate allo studio delle Scienze Fisiche, Chimiche e Naturali, con un collegamento molto stretto con l'insegnamento delle Scienze Matematiche. Parallelamente si può lavorare su altri argomenti facenti parte delle scienze sperimentali, con un uso più diffuso di fonti scritte, filmati, diapositive ... ed eseguendo un minor numero di esperienze, di tipo anche più "scolastico". In questo modo il lavoro sulle forze può divenire un'attività emblematica del processo di costruzione di conoscenza che aiuta a trovare il giusto significato, cioè il collegamento con il reale, anche per altre conoscenze acquisite in modo più tradizionale, o meno diretto.

3. La documentazione

La documentazione sulla sperimentazione effettuata ha la duplice funzione di riferimento concreto su cui verificare il senso delle affermazioni contenute nella proposta e di testimonianza della fattibilità e dei risultati di un lavoro del tipo delineato. Non è invece assolutamente un'indicazione d'itinerario da riprodurre il più fedelmente possibile in qualsivoglia altra classe. Sono solo i tipi di problemi, proposte, scoperte, attività, attitudini ... dei bambini che restano sufficientemente generali da poter essere riconosciuti in classi diverse, situate in contesti socio-culturali diversi, con insegnanti e storie scolastiche precedenti diverse; non già i modi particolari in cui si sono concretizzati nella situazione sperimentale. È molto importante che ogni insegnante riesca ad inserirsi nel modo giusto nei processi di costruzione di conoscenza dei suoi propri allievi; ciò richiede che riesca ad interpretare nella maniera più cor-

retta e completa possibile i loro comportamenti. Possibilmente senza vedervi né più di quanto c'è effettivamente, né di meno. Cioè sforzandosi, situazione per situazione e allievo per allievo, di vedere quanta ambiguità, confusione, parzialità ... ancora resta al di là di ciò che i ragazzi sanno dire, fare, scrivere ...; e contemporaneamente quali capacità hanno di accorgersi degli aspetti del reale, di intervenire operativamente, di ragionarvi sopra costruendone schematizzazioni più o meno formalizzate, di confrontare le proprie opinioni con quelle degli altri ... I commenti sulla documentazione contenuti sia nel testo sia nelle didascalie dei riquadri potrebbero orientare il lavoro degli insegnanti in questo senso, fornendo un esempio di questo genere di considerazioni.

È importante, infine, sottolineare che la classe sperimentale era situata in un piccolo paese agricolo dell'entroterra casertano, quindi frequentata da allievi con famiglie in prevalenza contadine o piccolo borghesi che, pur stimando molto il ruolo dell'educazione scolastica nella vita dei propri figli, non avevano l'abitudine d'interferirvi. Dal punto di vista della tipica "cultura scolastica" i bambini provenivano quindi da un ambiente non molto stimolante. Per contro erano ben sviluppate le loro capacità manipolative ed essi avevano un grosso bagaglio di esperienze e di conoscenze pratiche, conseguenza del loro modo di vita quotidiano. Sono questi elementi da tener presenti nel considerare tutto ciò che si riferisce alla documentazione ed in ogni eventuale paragone con i propri allievi, perché contesti socio-culturali differenti accentuano in maniera diversa il ruolo rispettivo dei comportamenti concreti di tipo manipolativo, delle conoscenze pratiche, della padronanza linguistica, dei ragionamenti astratti.

4. Modi di lavoro in classe

Su questo punto ci si è già soffermati a lungo nell'introduzione e non resta ora che sottolineare alcuni aspetti che dopo la lettura del libro dovrebbero apparire più chiari.

Il bagaglio di linguaggio, esperienza, conoscenza che ogni bambino si porta dietro non può essere considerato solo il punto di partenza su cui imbastire una programmazione all'inizio di un anno, o di un ciclo, scolastico. Non può bastare un "test d'ingresso" (o una batteria di prove d'ingresso) per definire uno "stato" di abilità di pre-conoscenza

cui raccordarsi inizialmente, per poi costruirvi sopra dei percorsi tutti definiti dall'esterno. Ciò che il bambino pensa, sa fare, sa dire ... è un ingrediente che in ogni istante della vita scolastica interagisce, deve interagire, con le attività da svolgere. Ed è un ingrediente che continuamente, in virtù di ciò che si fa a scuola e di ciò che si fa fuori della scuola, nella vita di tutti i giorni, cambia, si accresce, si struttura sempre di più. Lungi dall'essere un luogo asettico, dove si cerca di rendere i ragazzi il più possibile "tutti uguali" con l'abolizione degli apporti personali derivanti dalla peculiarità della vita extrascolastica di ciascuno, la scuola deve essere un contesto in cui si confrontano e si determinano a vicenda tutti i possibili specifici apporti individuali. L'esperienza di classe deve riuscire ad inglobare almeno parti dell'esperienza di vita, proprio per potere essere significativa anche al di fuori delle pareti scolastiche.

Ci sono ragazzi che sanno scrivere, ragazzi che sanno parlare, ragazzi che sanno operare con le mani, o che amano ragionamenti astratti, o che sanno un sacco di cose perché le hanno viste, o imparate leggendo, e sentite alla televisione ... In un'organizzazione delle attività di classe così ricca come l'abbiamo delineata ci saranno per ognuno momenti in cui è importante quello che lui sa e sa fare particolarmente bene, e momenti in cui è invece importante quello che per lui presenta particolari difficoltà. In un discorso di classe che cresce continuamente intorno ad esperienze e problemi comuni, ognuno potrà offrire il suo contributo ed arricchirsi del contributo degli altri, così da completare la propria formazione senza sacrificare la propria individualità.

È dunque necessario, per l'insegnante, seguire costantemente nelle loro specificità e nel loro intreccio sia la dinamica della classe nel suo insieme sia quella dei singoli alunni, senza confondere i due piani. Non è una cosa facile e può aiutare in questo il ricorso a varie forme di documentazione, collettive ed individuali. Le più tradizionali e maneggevoli sono le produzioni scritte e grafiche: compiti individuali di vario tipo, elaborati di gruppo, cartelloni di classe. Possono situarsi in vari momenti dell'attività scolastica: quando si inizia qualcosa di nuovo e si vogliono conoscere le idee, le proposte, i problemi a priori; durante lo svolgimento di una sequenza didattica, per fissare i punti salienti delle attività che si vanno svolgendo; nel momento in cui si raggiungono delle conclusioni, per marcare le acquisizioni compiute ... Può essere interessante, a volte,

sullo stesso tema, far fare prima dei compiti individuali, poi dei lavori di gruppo ed infine ancora dei compiti individuali, per verificare l'apporto dei singoli al lavoro d'équipe e viceversa. Questa documentazione non può essere esaustiva, per varie ragioni. Se la stesura di un elaborato scritto obbliga ad un ripensamento e ad una ristrutturazione complessiva di quel che si pensa, presentando da questo punto di vista dei vantaggi rispetto all'intervento orale, d'altro canto, soprattutto con bambini ancora abbastanza piccoli, lo sforzo richiesto può condurre anche ad un netto impoverimento sul piano dei contenuti presi in considerazione e della complessità dei ragionamenti svolti rispetto alla ricchezza presente in un discorso orale, meno costruito nella forma e continuamente stimolato dagli interventi degli altri. È quindi necessario fare affidamento anche sugli interventi orali, specialmente su quelli all'interno di una discussione. Da questo punto di vista sarebbe bene che l'insegnante avesse un suo quaderno d'appunti su cui prendere nota del tipo d'interventi dei vari alunni; di tanto in tanto poi, quando si pensa di essere arrivati a punti particolarmente importanti del percorso didattico, può essere molto utile registrare le discussioni e riascoltare poi le registrazioni. Generalmente ciò fornisce una quantità di informazioni che sfuggono nel corso della lezione stessa, dove momento per momento è necessario decidere cosa fare. Infatti rimeditando a freddo sul lavoro svolto si può dare un'interpretazione diversa ad alcuni eventi, accorgersi di cose che non si erano notate in classe: sia rispetto all'argomento delle attività svolte, sia rispetto alle interazioni bambino-bambino o bambino-insegnante. Altre osservazioni, infine, sul quaderno d'appunti, potranno essere relative all'interazione dei bambini con gli oggetti nel corso delle attività manipolative.

Tutte queste forme di documentazione forniscono un aiuto prezioso per l'insegnante nel lavoro di programmazione e valutazione. E sono i ragazzi stessi che possono dare una mano a rendere più agevole il prendere nota di quanto avviene in classe. Il fatto non solo d'essere ascoltati, ma che le loro opinioni e quello che fanno siano così importanti che l'insegnante ritenga di doverne prendere nota, è di solito una motivazione sufficiente perché cerchino di autoimporsi un minimo di ordine e disciplina, cercando di intervenire uno alla volta, con calma. È anche gratificante per loro se di tanto in tanto l'insegnante riprende quello che era stato

detto, fatto, scritto ... da questo o da quello, se rilette brani di discussione, se fa loro riascoltare pezzi di registrazione ... Tra l'altro il confronto con se stessi, a distanza di tempo, è uno dei mezzi con cui più facilmente i bambini si rendono conto dei

progressi fatti. E niente più di questa consapevolezza dà fiducia e spinge a continuare ad andare avanti, ad apprendere per il piacere ed il gusto di capire e di sapere sempre di più. Il che è forse il regalo più grande che la scuola possa fare.

Bibliografia

Educazione alla conoscenza scientifica

- AA. VV., "Conoscenza scientifica e insegnamento", Loescher.
- AA. VV., "Educazione alla ricerca e trasmissione del sapere", Loescher.
- AA. VV., "Lavorando con gli insegnanti", La Nuova Italia.
- AA. VV., "L'educazione scientifica di base", La Nuova Italia.
- AA. VV., "Scienza e scuola di base", Istituto Enciclopedia Italiana.
- Arcà M., Guidoni P., "Guardare per sistemi, guardare per variabili", EMME Edizioni.
- Arcà M., Guidone P., Mazzoli P., "Insegnare scienza", F. Angeli.
- Driver R., "L'allievo come scienziato?", Zanichelli.
- Hawkins D., "Imparare a vedere", Loescher.
- "La Fisica nella Scuola", anno XIX, n. 2, 1986 (numero monografico su "Sviluppo cognitivo, rappresentazioni mentali e schemi concettuali in Fisica").

Fisica

(A) Testi generali

- Bernardini C., "Che cos'è una legge fisica", Editori Riuniti.
- Feynman R.P., "La legge fisica", Boringhieri.
- Toraldo di Francia G., "L'indagine del mondo fisico", Einaudi.
- Hesse M., "Forze e Campi", Feltrinelli.
- Jammer M., "Storia del concetto di forza", Feltrinelli.
- Clogget M., "La meccanica del medioevo", Feltrinelli.

(B) Testi in cui è possibile trovare una trattazione a livello di scuola secondaria superiore degli argomenti affrontati nella guida.

- I.P.S. Group, "Introduzione alla scienza fisica", Zanichelli.
- I.P.S. Group, "Project Physicus Course", Zanichelli.
- P.S.S.C., "Fisica", Zanichelli.
- Pugliese Jona S., "Fisica", La Nuova Italia.

(C) Testi con una trattazione della Meccanica e livello universitario.

- Feynman R.P., "La Fisica di Feynman", Vol. I, Addison Wesley, (traduzione italiana con testo a fronte).
- Mencuccini C., Silvestrini V., "Meccanica", Vol. I, Liguori.

(D) Altre proposte didattiche appartenenti alla stessa collana su argomenti di Meccanica.

- AA. VV., "Il galleggiamento", (in corso di stampa).
- Freddi M., Marioni C., Occa R., "Inerzia e moto".
- Mazzoli P., Arcà M., Guidoni P., "Forze e pesi".

Percezione e ricostruzione cognitiva del movimento.

- per una discussione generale vedi:
- Pierantoni R., "Forma Fluens", Boringhieri.

- 1 *B. Malfermoni, B. Tortoli Girardi*
Lettura come comprensione
- 2 *M. Arcà, P. Guidoni*
Guardare per sistemi, guardare per variabili
- 3 *P. Mazzoli, M. Arcà, P. Guidoni*
Forze e pesi
- 4 *M. Freddi, C. Marioni, R. Occa*
Inerzia e moto
- 5 *G. Bianchi, G. Bonera, L. Borghi, A. De Ambrosis, P.. Mascheretti, C..I. Massara*
Circuiti elettrici
- 6 *L. Bosman, F. Lazzeri, J. Legitimo, P. Violino*
Rappresentazioni spaziali quantitative
- 7 *A. Rimondi*
Terre, metalli e sale
- 8 *B. Pea*
Laboratorio del numero
- 9 *E. Giordano, C. Longo, P. Majorino Bonelli*
Calore e temperatura
- 10 *M. Arcà, P. Mazzoli, N. Sucapane*
Organismi viventi
- 11 *A. Cattaneo, L. Fiori*
La banca delle immagini
- 12 *B. Pea*
Laboratorio delle operazioni aritmetiche

- 13 *M. Moschietto*
Mondo sonoro
- 14 *M. Arcà, M. Ferrarini, N. Garuti, D. Guerzoni, P. Guidoni, M. Magni*
Esperienze di luce
- 15 *M. Gagliardi, G. Gallina, P. Guidoni, S. Piscitelli*
Forze, deformazioni, movimento
- 16 *A. Imeroni*
Il libro della ginnastica
- 17 *G. Marastoni*
Facciamo geometria
- 18 *A. Liotto, G. Terzo, P. Zolin*
Scrivere per narrare, descrivere, argomentare
- 19 *G. Laghi*
Schedario di geografia urbana

di prossima pubblicazione:

B. Pea
Laboratorio di topologia