

Lezione II

2.1 Introduzione storica sullo studio materiali sottoposti a sollecitazioni meccaniche

In molte discipline scientifiche il progresso ha dovuto attendere l'introduzione di nuovi metodi matematici o di strumenti sofisticati come i telescopi o i microscopi elettronici. I maggiori ostacoli incontrati da fisici e astronomi non sono generalmente di tipo concettuale; questi scienziati sanno benissimo quali sono i loro problemi, anche quando non hanno i mezzi per risolverli. Inoltre il linguaggio professionale dei fisici e degli astronomi, se può sembrare oscuro all'uomo della strada, è di fatto abbastanza libero da complicazioni introdotte dall'inconscio. Le ricerche sulle stelle e sugli atomi sono progredite anche grazie al fatto che queste entità sono così lontane dalla nostra esperienza di tutti i giorni da non essere gravate da troppi preconcetti.

Le innovazioni tecnologiche e i balzi in avanti del pensiero matematico hanno certamente favorito la scienza dei materiali e lo studio della loro risposta alle sollecitazioni meccaniche, ma le vere difficoltà e i veri progressi sono stati proprio di natura concettuale. Le difficoltà sono state sicuramente causate dalla familiarità degli esseri umani con le strutture e i materiali della vita di tutti i giorni.

Noi esseri umani non siamo bravi quanto gli uccelli nello stimare la resistenza degli oggetti (gli uccelli si posano su rami sottilissimi, che a volte sono chiaramente marci, tuttavia è molto raro vedere un ramo rompersi sotto il peso di un uccello del nostro ambiente) ma la maggior parte di noi dimostra una certa abilità in questo campo. Non pattiniamo sul ghiaccio sottile, non ci appoggiamo a strutture malferme, non ci avventuriamo su ponti instabili, e quando guidiamo la macchina cerchiamo di evitare le pozzanghere. Senza alcun dubbio la nostra capacità di evitare questi errori è in parte dovuta a istinti ereditari propri della nostra specie, e in parte acquisita durante l'infanzia in seguito a esperienze dolorose. In ogni caso le nostre decisioni tendono a essere inconsce.

Questo approccio intuitivo e soggettivo alla resistenza dei materiali e delle strutture si riflette nella natura del nostro linguaggio. Nel linguaggio ordinario il significato di parole come « forte », « solido », « duro » e « rigido » è di solito molto vago, e queste parole sono spesso usate come sinonimi. Di fatto basta consultare un dizionario o parlare con un operaio edile per rendersi conto della straordinaria confusione di parole e di idee associate al concetto di resistenza dei materiali.

Il greco antico e il latino erano imprecisi quanto le lingue moderne per quello che riguarda la terminologia relativa ai materiali e alle strutture con essi costituite. Per esempio, *tensio* in latino poteva significare sia tensione che allungamento: «*Ut tensio, sic vis* » (La forza è proporzionale all'allungamento). L'imprecisione linguistica degli antichi rende ancora più notevole la loro fantastica abilità nelle misurazioni e nella simmetria delle costruzioni; furono infatti in grado di erigere una serie meravigliosa di edifici e di altri manufatti, che però - con l'eccezione dei macchinari utilizzati a scopi militari - erano strutturalmente inefficienti. Per esempio, il Partenone di Atene, costruito attorno al 440 a.C., è di una precisione geometrica che quasi certamente non è più stata raggiunta da nessun edificio moderno. Un impegno concettuale, un'accuratezza e una strumentazione straordinarie devono essere stati necessari per ottenere una simile precisione nelle proporzioni. Comunque, nonostante la simmetria e la bellezza del risultato, la struttura non è corretta. Molte delle architravi si sono incrinare, essendo chiaramente inadeguate allo scopo.



Figura 2.1 Il Partenone di Atene

Nonostante i notevoli risultati tecnici dei Romani, essi facevano affidamento più di quanto non volessero ammettere sull'abilità e l'esperienza degli artigiani illetterati.

Sulla terraferma gli incidenti strutturali si verificavano molto raramente, fatta eccezione per le insulae, alti edifici divisi in appartamenti che erano sorti a Roma ai tempi di Augusto. In tutti gli altri casi i Romani costruirono i loro ponti, fortificazioni e acquedotti con quelli che oggi chiameremmo margini di sicurezza

molto ampi.

In mare gli incidenti erano molto più comuni, ed escludendo gli errori di navigazione e di manovra, la maggior parte dei naufragi era dovuta alla debolezza, dal punto di vista meccanico, degli scafi e delle attrezzature. Le tecniche di costruzione delle navi nell'antichità erano così disastrose che sembra strano che gli antichi filosofi abbiano prestato così poca attenzione a questo problema.

Il primo Medioevo fu un periodo di decadenza per la cultura europea, ma le capacità artigianali dei costruttori fecero notevoli progressi, soprattutto nel campo dell'architettura navale. Le navi normanne erano sicuramente più robuste, non imbarcavano acqua dalle fessure e tenevano meglio il mare delle navi romane. Prima del XV secolo alcuni di questi pregi strutturali finirono con l'influenzare i costruttori di navi spagnoli, olandesi e inglesi, con i risultati che possiamo vedere nelle moderne carte geografiche e nei libri di storia. Tutte le conoscenze relative alla costruzione navale erano comunque ancora nelle mani degli artigiani, e il loro *modus operandi* era raramente quantitativo e analitico. Il rafforzamento degli scafi secondo un metodo scientifico, per esempio, non si affermò fino al 1900.

Sulla terraferma, in tutta Europa i castelli e le altre fortificazioni continuarono a essere costruiti secondo la tradizione romana, consistente nel mantenere il maggior margine di sicurezza possibile. Le chiese e le cattedrali gotiche sono rappresentative di una filosofia, di un modo di fare architettura completamente diverso da quello seguito nei tempi antichi. Ampi studi sulle cattedrali gotiche hanno mostrato che i mastri muratori, benché costruissero le loro strutture ad arco e a volta con caratteristiche vicine allo stato limite, certamente non pensavano o progettavano in modo moderno. Molte fra le cattedrali gotiche più ambiziose rovinarono a terra, durante o dopo la loro costruzione.

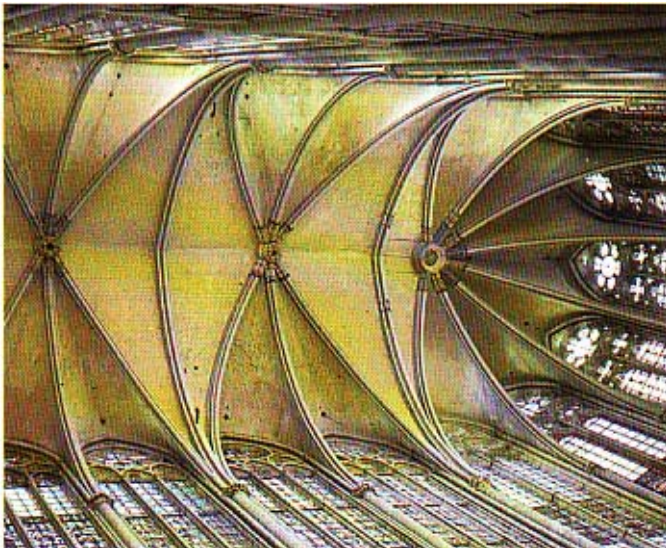


Figura 2.2 Interno dell'abside della cattedrale di Beauvais in Francia. La costruzione iniziata nel 1225, doveva essere la più alta volta gotica (45 m). Il tetto cadde nel 1284 e fu ricostruito con dei rinforzi

La prima testimonianza storica di un approccio scientifico ai problemi della resistenza dei materiali si trova nei manoscritti di Leonardo da Vinci (1452-1519). Egli sottopose alcuni cavi a carichi costituiti da secchielli di sabbia per controllarne la resistenza alla trazione, al fine di determinare la dimensione del più piccolo carico che potesse romperli (trazione si riferisce all'azione del carico).

Leonardo tentò anche, con scarso successo, di analizzare la resistenza di travi, travature reticolari e

pilastrini. Se qualcuno merita il titolo di «padre» della scienza moderna della resistenza dei materiali, questi è Galileo Galilei (1564-1642).

Nei *Discorsi* Galileo discute la resistenza, per esempio, di aste con sezioni trasversali di area differente. Misurò la loro resistenza a trazioni assiali da carichi differenti, e trovò che il carico di rottura è proporzionale all'area della sezione trasversale, come ci dovremmo aspettare. Egli analizzò anche la resistenza di vari tipi di travi. Alcuni risultati sono corretti, altri invece no. Galileo, che è vissuto e ha operato ben due generazioni prima di Newton, non poteva avvalersi della dimostrazione newtoniana del fatto che azione e reazione sono uguali e contrarie, in modo tale che tutte le forze esterne e interne a un corpo devono reciprocamente compensarsi.

NOTA: Il libro di Galileo diede inizio a un modo nuovo di considerare razionalmente i problemi della resistenza dei materiali, e ciò non influì soltanto sul mondo degli accademici e dei filosofi. Questa tendenza venne accettata nella Marina inglese, con disappunto degli appaltatori fraudolenti. Il memorialista Samuel Pepys (1633-1703) è stato di fatto il fondatore della moderna amministrazione pubblica inglese. Egli può essere considerato il primo funzionario pubblico ad aver fatto ricorso alla scienza dei materiali: "Povey, Sir W. Batten e io siamo arrivati a Woolich per via di mare; e là abbiamo assistito a una prova delle funi di Sir R. Ford (delle quali ci siamo tanto occupati ultimamente: e io in particolare me ne sono molto preoccupato per via del nostro costruttore di funi, Mr. Hughes, che ne parlava così male) e abbiamo trovato che erano di pessima qualità, e che si rompevano prima cinque di quelle che quattro funi di quelle fabbricate a Riga; constatammo anche che alcune funi erano di materiale vecchio e che erano state impeciate e ricoperte di canapa nuova, il che è un imbroglio tale che non si è mai sentita una cosa simile."

La terza legge di Isaac Newton (1642-1727) afferma che azione e reazione sono uguali e contrarie, e che tutte le forze che agiscono in un sistema devono bilanciarsi. Se un peso appoggiato per terra esercita sul pavimento una forza diretta verso il basso, il pavimento deve esercitare sul peso una forza di uguale intensità diretta verso l'alto. Oppure se

un peso di 100 kg è appeso a una fune, la fune stessa per sostenerlo deve esercitare una forza di 100 kg, uguale e opposta, sul peso. Se il carico viene aumentato fino a 200 kg, allora la fune deve esercitare una forza di 200 kg; se la fune non può produrre la forza necessaria si rompe e il peso cade. Questo principio si applica a qualsiasi struttura, semplice o complicata.

Newton osservò anche che un corpo fermo diventa pesante per l'azione del campo gravitazionale della Terra sulla sua massa. Nel caso della collisione fra corpi in movimento - un proiettile che urta contro un bersaglio, il vento che soffia contro un ostacolo, una nave che ne sperona un'altra - la forza applicata, come diceva Newton, è generata dall'accelerazione o decelerazione delle masse in moto. Questi principi sono validi se dobbiamo calcolare le forze a cui sarà probabilmente soggetta una struttura, ma ci dicono troppo poco sulle forze generate nel materiale da cui è costituita la struttura. Se appendiamo un peso a una fune, come e perché la fune resiste?

Il merito di aver risposto a questa domanda piuttosto importante va al fisico inglese Robert Hooke (1635-1703). A differenza di Newton, Hooke aveva un grande interesse per quanto avveniva nelle cucine, negli arsenali, nei cantieri, in breve per tutti gli aspetti meccanici della vita e i suoi problemi pratici.

Nel XVII secolo Hooke non poteva avvalersi delle idee moderne sulle forze generate dalla deformazione dei legami interatomici; tuttavia può darsi che avesse intuito che qualcosa del genere dovesse avvenire al livello della struttura dei materiali. Egli affrontò lo studio degli effetti delle forze sui differenti materiali da un punto di vista macroscopico e pragmatico. Prese in considerazione una notevole varietà di cavi, molle e travi di legno e le sottopose a carichi via via crescenti, aggiungendo pesi sul piatto di una bilancia. Utilizzando un paio di compassi misurò poi meglio che poté la deformazione elastica provocata dai vari carichi. Ottenne così un grafico della deformazione in funzione della variazione del carico che in tutti i casi era una linea retta. Inoltre quando il carico veniva progressivamente rimosso, anche il ritorno alle condizioni iniziali era lineare e, tenendo conto dei margini d'errore delle sue misure, che naturalmente non erano molto accurate, si poteva dire che tutti gli oggetti presi in considerazione riacquistavano la loro lunghezza originale.

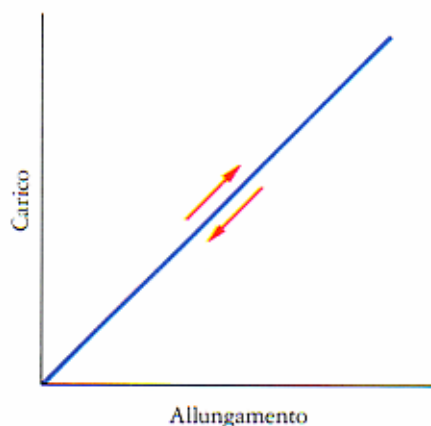


Figura 2.3 comportamento completamente elastico hookiano. L'allungamento dipende linearmente dalla intensità della forza applicata

Per proteggere i suoi diritti di priorità, e forse per irritare Newton, Hooke pubblicò nel 1677: *A decimate of the centesme of the inventions I intend to publish*. Quest'elenco di progetti includeva un capitolo intitolato: *The true theory of elasticity or springiness*, che era seguito dall'anagramma «ceiinossttuu». Hooke rivelò la soluzione di quell'anagramma nel 1679, nel suo *De potentia restitutiva or of a spring*: la vera teoria dell'elasticità era «ut tensio, sic vis» che significa «la forza è proporzionale all'allungamento»; in latino tensio significava generalmente allungamento

o stiramento, piuttosto che tensione nel senso di forza, anche se altrove i Romani, com'è intuibile, confondevano i due concetti.

Hooke scriveva: *E' del tutto evidente che la Regola o Legge di Natura di ogni corpo elastico è che la forza o potenza di ritornare alla sua posizione naturale è sempre proporzionale alla distanza o spazio di separazione da quella posizione naturale da cui è stato allontanato, vuoi per rarefazione o separazione delle parti l'una dall'altra, vuoi per condensazione o avvicinamento delle parti. Né ciò è osservabile solo in quei corpi, ma in ogni altro corpo elastico, sia esso metallo, legno, pietra, terracotta, capello, corno, seta, osso, tendine, vetro e simili.*

Hooke stava dicendo che un solido può resistere a una forza esterna solo cambiando la sua forma: allungandosi se è soggetto a una forza di trazione, contraendosi se è soggetto a una forza di compressione. La sua scoperta era una logica conseguenza della terza legge di Newton.

Non esiste, secondo Hooke, una struttura o un materiale perfettamente rigido. E' vero che le deformazioni dovute a un carico, nel caso delle opere in muratura o in cemento armato, sono così piccole da poter essere misurate solo da strumenti sofisticati, ma il movimento, sia pur impercettibile, è reale. D'altro lato gli alberi vengono visibilmente piegati dal vento e tutti avremo notato, osservandole dal finestrino di un aereo in volo, le punte delle ali compiere piccoli movimenti in su e in giù. Le molle e gli elastici sono solo gli esempi più evidenti di un comportamento quasi universale.

2.2 Hooke: la teoria dell'elasticità

Nel caso di un materiale come il metallo, le variazioni di lunghezza, sia del solido nel suo insieme sia delle distanze interatomiche, sono generalmente fra lo 0,1 e l'1,0 per cento della lunghezza originale. Che l'allungamento o la contrazione dei legami interatomici di un solido cristallino come l'acciaio corrisponda in proporzione all'allungamento o

alla contrazione su scala macroscopica del materiale, è stato controllato con grande precisione da Norton e Loring nel 1941, utilizzando metodi basati sul fenomeno della diffrazione dei raggi X. Anche se le principali conseguenze delle idee di Hooke non sono recepite fino al 1830, quando vennero accettati i sforzi e le deformazioni, il suo lavoro è stato di grande importanza quindi vale la pena di riassumere i tre punti principali della sua teoria commentandoli dal punto di vista delle conoscenze attuali.

I. - Un materiale solido può resistere a una forza applicata solo cedendo ad essa cioè contraendosi se sottoposto a compressione o allungandosi se sottoposto a trazione.

Hooke spiegava questo punto dicendo che le «parti sottili» (vale a dire atomi e le molecole) del materiale si avvicinano fra loro («sono condensate») o sono allontanate le une dalle altre («sono rarefatte»).

Genericamente parlando tutti i solidi ordinari, tanto quelli cristallini quanto quelli amorfi, seguono questa regola. Alcuni materiali «attivi», come i muscoli degli animali e i cristalli piezoelettrici, possono produrre forze meccaniche in altro modo, ma in ogni caso bisogna fornire loro energia. Un'eccezione più importante riguarda alcuni solidi particolarmente molli che hanno, come i liquidi, una tensione superficiale che può opporre una certa resistenza alle forze applicate. Questi materiali svolgono un ruolo importante nelle strutture biologiche. Comunque, per quello che riguarda le ordinarie strutture e i materiali tecnologici, quella di Hooke è una premessa valida e molto importante.

NOTA Quando ad un corpo solido si applicano delle forze esse tendono a modificarne la forma e lo stato di moto; il corpo, in un tempo molto breve, assume una nuova configurazione in corrispondenza della quale le forze interne risultano variate in maniera tale da equilibrare quelle esterne. Le forze interne sono dovute alle interazioni tra le molecole che costituiscono il corpo: la forza che si esercita tra le due molecole dipende dalla loro distanza relativa nel modo mostrato in figura 2.4, dove in ascisse è riportata la distanza tra i centri delle molecole; valori positivi o negativi di F stanno ad indicare repulsione o attrazione tra le due molecole. Quando il corpo è isolato la distanza media tra le due molecole ha un valore prossimo ad r_0 , tale che la forza totale media risentita da ciascuna molecola del corpo sia nulla; a causa dell'agitazione termica ogni molecola oscilla intorno ad una posizione di equilibrio e l'ampiezza di oscillazione cresce con la temperatura. Se il corpo viene compresso la distanza media tra le molecole diminuisce e nascono le forze repulsive che, opponendosi alla compressione, determinano una nuova configurazione di equilibrio; viceversa, se si cerca di aumentare il volume di un corpo, cioè di aumentare la distanza media tra molecole, si generano delle forze di richiamo.

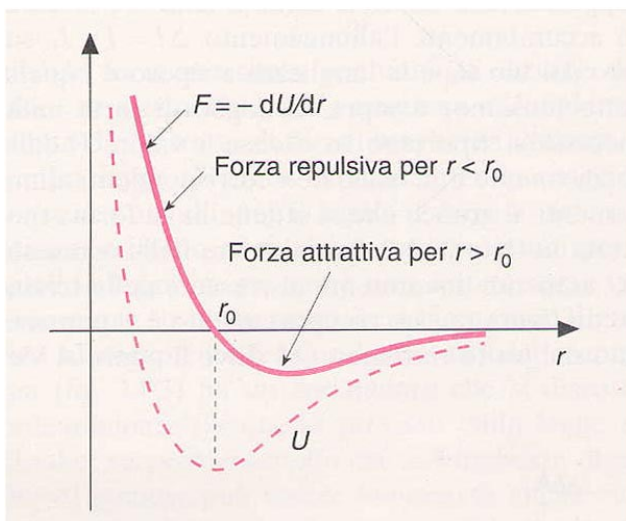


Figura 2.4 Forza tra due molecole e relativa energia potenziale.

II. - I materiali solidi sono elastici: vale a dire, riacquistano forma e dimensione originale quando viene rimosso un carico che era stato loro applicato in precedenza.

Ciò è molto vicino al vero nel caso di materiali inorganici come le ceramiche e i metalli duri, specialmente quando si tratti di carichi moderati, per esempio i carichi cui vengono sottoposte le sospensioni delle automobili o le molle degli orologi. A volte i materiali del mondo vegetale sono in grado di riacquistare la loro forma solo molto lentamente: ecco il motivo per il quale si possono vedere le impronte sull'erba di un prato.

Molti metalli duttili (malleabili) sono elastici solo fino a un certo punto (figura 2.5 a sinistra), oltre il quale cedono in modo non elastico, irreversibile. Questo è il motivo per cui è possibile lasciare una piega permanente in un coperchio di metallo o in un cavo, oppure ottenere delle lamiere ricurve per la carrozzeria delle automobili, comprimendo fogli di acciaio inizialmente piani.

III. - La legge di Hooke.- nei materiali o nelle strutture la deformazione è sempre proporzionale al carico applicato.

La legge di Hooke è rigorosamente vera solo per i prodotti ceramici, il vetro, la maggior parte dei minerali e i metalli molto duri. I metalli duttili come l'acciaio dolce obbediscono alla legge solo per carichi modesti; per carichi elevati il loro comportamento se ne allontana irreversibilmente.

La maggior parte dei tessuti animali non obbedisce alla legge di Hooke (figura 2.5 a destra). Benché la loro deformazione sotto carico sia del tutto elastica e reversibile, non è affatto lineare. La maggior parte dei tessuti del nostro corpo ha una curva carico-allungamento con una forma a j, come possiamo verificare esercitando una pressione sulle

labbra o sul lobo dell'orecchio. Una tiratina leggera produce un notevole allungamento, mentre un ulteriore aumento di tensione produce un modesto incremento dell'allungamento. Questo comportamento conferisce al tessuto animale una resistenza che risulta di grande utilità.

Invece la curva carico-allungamento di un materiale molle come la gomma, che è elastica ma non hookiana, non è a forma di j, ma di S. Questa proprietà può rendere il materiale pericolosamente fragile, come si può constatare pungendo con uno spillo un palloncino gonfiabile.

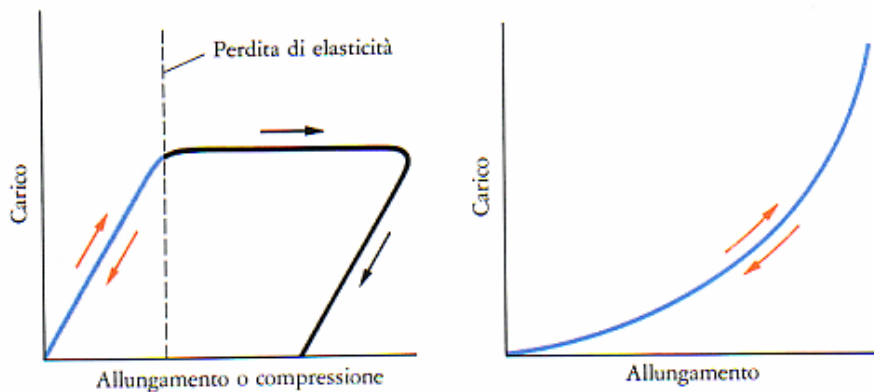


Figura 2.5 Sinistra: comportamento elastico e plastico di metalli duttili. Per piccoli carichi l'allungamento o la compressione variano linearmente, ma quando viene raggiunto un certo carico, il metallo cede, si verificano cioè un allungamento o una compressione notevoli, in gran parte irreversibili. Destra: curva a j tipica del comportamento completamente elastico dei tessuti animali. Maggiore è il carico e minore è l'allungamento o la compressione. Questa proprietà conferisce ai tessuti la resistenza desiderata.

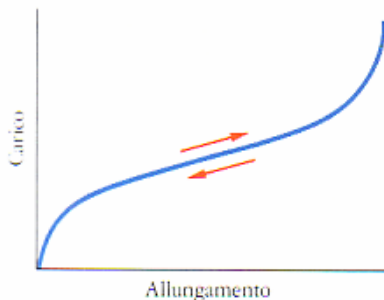


Figura 2.6 Curva a S tipica del comportamento completamente elastico della gomma. La maggior parte dell'allungamento si verifica in corrispondenza di un intervallo relativamente stretto di carichi di media grandezza. Questi solidi possono essere fragili se sottoposti a forti carichi.

2.3 I concetti di sforzo e di deformazione

I vari oggetti con cui Hooke aveva condotto i suoi esperimenti e di cui aveva trattato (i cavi, le molle e le travi) non erano solo «campioni di vari materiali», erano anche strutture, ciascuna con la sua particolare forma e dimensione. Come si potevano applicare i risultati di Hooke alla progettazione e all'analisi di altre strutture fatte di altri materiali? In che misura il comportamento di una struttura è influenzato dal materiale da cui è costituita e in quale misura è invece governato dalla sua forma e dimensione?

Durante tutto il Settecento i pochi studiosi di elasticità si ridussero ad affrontare la problematica posta seguendo gli stessi passi di Hooke: trattando le forze e le deformazioni come caratteristici di una struttura come un tutto piuttosto che cercando di capire le condizioni che si verificano in un punto interno al materiale. Oggi l'approccio moderno consiste nell'evitare di fare una distinzione troppo netta fra materiale e struttura. Comunque, tenendo conto della situazione all'inizio dell'Ottocento, in cui le strutture esaminate erano generalmente semplici strutture metalliche, questa distinzione si rivelò una procedura analitica necessaria e feconda. Di fatto rappresentò un importante passo avanti nella storia della scienza della resistenza di materiali e strutture.

Lo studio delle condizioni che si verificano in un arbitrario punto interno a un materiale soggetto a forze meccaniche porta ai concetti di *sforzo* e di *deformazione*. Il riconoscimento dell'importanza di questi concetti come strumenti analitici è stato uno dei più importanti successi nella storia dello studio della resistenza e dell'elasticità.

L'enunciazione dei concetti di sforzo e deformazione in una forma utilizzabile e non ambigua è opera di un francese, Augustin Cauchy (1789-1857). I suoi importanti lavori sui concetti di sforzo e deformazione vennero presentati all'Accademia delle Scienze nel 1822, quando aveva trentatré anni. Che le idee di Cauchy abbiano impiegato molto

tempo, specialmente nei paesi anglosassoni, prima di essere usate e comunemente accettate, può essere in parte dovuto al fatto che egli le presentò in un modo generale e matematico.

2.3.1 Il concetto di sforzo

Cauchy definì lo sforzo come la forza per unità di superficie della sezione trasversale passante per un punto particolare del materiale. In simboli lo sforzo σ (Figura 2.7) esercitato da una forza P perpendicolare all'area A soddisfa l'equazione

$$\sigma = P/A \quad (2.1)$$

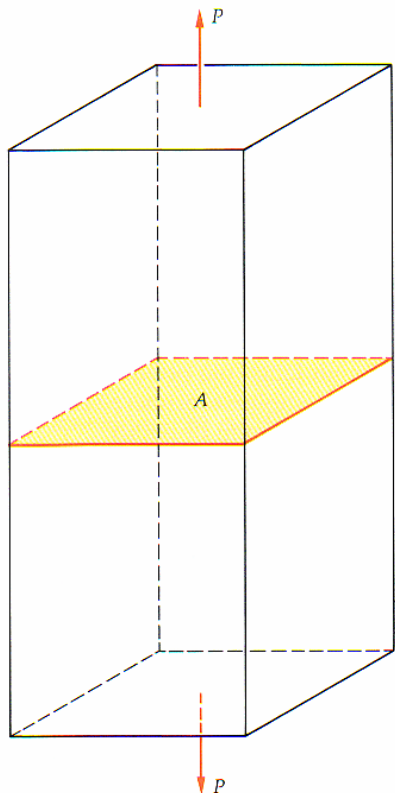


Figura 2.7 Definizione di sforzo. Per esso viene generalmente adottata la convenzione di segno che considera gli sforzi di trazione come positivi, quelli di compressione come negativi.

L'idea di sforzo o sollecitazione di rottura era già implicita negli esperimenti di Galileo eseguiti su aste sottoposte a trazioni. Come diceva Galileo, la forza o carico di rottura per aste di materiali simili soggette a trazioni assiali è proporzionale alle aree delle loro sezioni trasversali. Così, se un'asta con una sezione trasversale di 2 centimetri quadrati si rompe se sottoposta a un carico di 50 tonnellate, un'asta con una sezione trasversale di 4 centimetri quadrati si rompe se sottoposta a un carico di 100 tonnellate, e così via. Queste semplici operazioni aritmetiche ci portano al concetto di sforzo (o sollecitazione) di rottura: in questo caso lo sforzo di rottura è una forza di 25 t/cm^2 . Questo valore può essere usato per un'asta costituita dallo stesso materiale, ma di sezione diversa, per fare previsioni sulla sua resistenza a trazione, vale a dire sulla forza necessaria per romperla.

L'approccio innovativo di Cauchy consiste nell'aver applicato l'idea di sforzo non solo in alcuni particolari contesti, come la determinazione del carico di rottura dei cavi, ma anche nella determinazione delle condizioni che si verificano in qualsiasi punto di qualsiasi materiale o struttura, quando il materiale è ben lontano dal punto di rottura.

Lo sforzo in un materiale è analogo alla pressione in un fluido, un'idea ben più antica. La differenza è che in un fluido o in un gas la pressione viene esercitata in modo uniforme (idrostaticamente), in ogni direzione ed è perciò sempre perpendicolare rispetto alle pareti del contenitore, mentre lo sforzo varia a seconda della direzione.

2.3.2 Unità di misura dello sforzo

Lo sforzo può essere espresso da qualunque unità di forza divisa per qualunque unità di superficie. Le unità di misura utilizzate sono diverse. La maggior parte degli ingegneri anglosassoni pensa, e generalmente calcola, in libbre per pollice quadrato o in tonnellate per pollice quadrato. Data la possibile confusione fra tonnellata americana (2000 libbre) e tonnellata inglese (2240 libbre), le libbre per pollice quadrato (psi o lb/in^2) sono più sicure. Nell'Europa occidentale e nei paesi dell'Est lo sforzo è espresso in termini di chilogrammi-peso per centimetro quadrato (kgf/cm^2 o kg/cm^2).

Fattori di conversione per le unità di misura dello sforzo

MPa (MN/m^2)	kg/m^2	psi
1	10,2	146
0,098	1	14,2
0,00685	0,07	1

Tabella 2.1

Nel sistema internazionale, abbreviato in SI, l'unità di sforzo o pressione è il pascal (Pa), che corrisponde a un newton per metro quadrato. Poiché l'uso di quest'unità porta generalmente a numeri molto grandi, si preferisce utilizzare il megapascal (MPa)

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ MN/m}^2 \quad (2.2)$$

Resistenza a trazione approssimativa di vari materiali comuni

Materiale	psi	MN/m ²
<i>Metalli</i>		
Corde di pianoforte in acciaio (molto fragili)	450 000	3000
Acciaio ad alta resistenza utilizzato in ingegneria	225 000	1500
Acciaio dolce commerciale	60 000	400
Ferro battuto tradizionale	20 000-40 000	140-280
Ghisa tradizionale	10 000-20 000	70-140
Ghisa moderna	20 000-40 000	140-280
Alluminio puro	10 000	70
Leghe di alluminio	20 000-80 000	140-550
Rame	20 000	140
Ottone	18 000-60 000	120-400
Leghe di magnesio	30 000-40 000	200-280
Leghe di titanio	100 000-200 000	700-1400
<i>Non metalli</i>		
Legno di abete (lungo la vena)	15 000	100
Legno di abete (trasversalmente alla vena)	500	3
Vetro ordinario	5 000-25 000	30-170
Mattone ordinario	800	5
Calcestruzzo ordinario	600	4
Fibra di lino	100 000	700
Fibra di cotone	50 000	350
Budello	50 000	350
Ragnatela	35 000	240
Tendine umano	10 000	65
Fune di canapa	12 000	80
Cuoio	6 000	40
Osso umano	20 000	140
Fibra di nylon	140 000	1000
Fibra di Kevlar 29	400 000	2700

Tabella 2.2