

SULLA STORIA DEGLI STUDI DI FRATTURA IN ITALIA

Roberto L. COLOMBO¹, Donato FIRRAO²

¹*Consulente, Pino Torinese (TO)*

²*Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino,
Corso Duca degli Abruzzi 24 -10129 Torino*

SOMMARIO: La storia degli studi sulla frattura è inestricabilmente connessa con il progresso della tecnologia. All'inizio pochissimo fu scritto. Dobbiamo riconoscere a Leonardo e Galileo il merito di essere stati fra i primi a scrivere su questo problema e sui modi di misurare e prevedere carichi di rottura. Più tardi, scienziati italiani si distinsero nel tentativo di stabilire leggi sulla resistenza dei materiali e sui criteri di rottura sotto sforzi multipli. In questa memoria si descrivono i lavori degli scienziati italiani dei secoli scorsi e si confrontano con i lavori di altri scienziati europei del passato.

PAROLE CHIAVE: Leonardo, Galileo, Cavalli, Curioni, Beltrami, Storia della frattura, Gruppo Italiano Frattura, Criteri di frattura.

INTRODUZIONE

Che l'uomo primitivo avesse nozione dell'esistenza dei gas è altamente dubbio. Al contrario, egli certamente conosceva la differenza fra liquidi e solidi. Per lui, i liquidi non offrivano praticamente nessuna resistenza alla deformazione, mentre i solidi la offrivano. La ragione di questa differenza di comportamento per molto tempo eluse la sua capacità di riflessione. Nell'antica Grecia, Democrito (460-370 A.C.) ed Epicuro (341-270 A.C.) tentarono di risolvere il problema. Poichè la maggior parte dei loro lavori è andata perduta, noi sapremmo ben poco di quel che scrissero se non fosse stato per Lucrezio (94-50 A.C.), un grande poeta latino mancante tuttavia di qualsiasi originalità scientifica, che riferì il pensiero di Epicuro nel suo "De rerum natura": i solidi sono così resistenti perchè gli atomi che li costituiscono sono legati da uncini o "ami" (Caro, 57 A.C.). Ciò può sembrare piuttosto ingenuo all'uomo moderno, ma fino a questo secolo ben poco progresso venne fatto in questo campo: nei fatti, la teoria della coesione nei solidi, così come la conosciamo oggi, è parte della Fisica dei Solidi e necessita di concetti di Meccanica Quantistica.

LEONARDO

Tutti sanno che la Fisica Sperimentale, almeno ai suoi inizi, è una conquista del Rinascimento Italiano. Crediamo che il primo uomo ad occuparsi della resistenza dei solidi agli sforzi sia stato Leonardo da Vinci (1542-1519), che certamente trasse profitto da molte visite agli arsenali italiani, tra i quali quello di Venezia ebbe la più alta reputazione, che gli

meritò una citazione da parte di Dante nella sua Commedia. Nel Folio 325 del "Codex Atlanticus" (da Vinci, 1483-1518) si legge:

Sperienza della forza che può fare un filo di ferro di varie lunghezze

Ricordo come tu debbi fare sperienza del reggere, o vero quanto peso po sostenere uno filo di ferro; alla quale sperienza terrai questo modo: Appicca uno filo di ferro di lunghezza di 2 braccia, o circa, in loco che stia forte; di poi li appicca uno cavagno, o sporta, o quello che a te pare, nel quale, per uno picciolo buso, verserai una tramoggia di minuta rena; e quando esso filo di ferro non potrà più sostenere, si rompa, adatta una molletta che subito el buso della tramoggia si riserri, acciò che più rena non caggi in esso cavagno, il quale caderà in piè, perchè ½ dito caderà da alto; e nota quanto peso fu quello che esso filo spezzò, e nota in che parte di sè detto filo si rompe, e fa più volte questa pruova, per confermare se sempre 'n un medesimo loco si rompe. Di poi fa esso filo più corto la metà di prima, e nota quanto peso sostiene di più; e poi lo fa 1/4 della prima lunghezza, e così di mano in mano farai in diverse lunghezze, notando il peso che ciascuno rompe e 'l loco dove si rompe...

Ci vorranno secoli prima che un esperimento così accurato con una apparecchiatura così sofisticata venga fatto o almeno progettato (non sappiamo se Leonardo lo eseguì mai davvero, probabilmente no). In ogni modo è sorprendente che tanta attenzione venga dedicata alla lunghezza del filo, che noi sappiamo irrilevante, piuttosto che al suo diametro. Possiamo offrire solamente due spiegazioni: una è che ai tempi di Leonardo la misura del diametro di un filo sottile di una data lunghezza fosse molto difficoltosa, l'altra che i fili fossero sovente difettosi per insufficienze tecnologiche e che la probabilità di avere difetti di dimensioni rilevanti fosse più alta in una certa lunghezza di filo e più bassa in fili di lunghezza inferiore i quali quindi raggiungerebbero carichi di rottura più elevati. Se questa seconda interpretazione fosse quella valida, potremmo considerare Leonardo un diretto precursore delle teorie probabilistiche di frattura.

In un' altra parte del Codex Leonardo si dilunga sulle resistenze relative di colonne di forma differente e sulla posizione delle rotture.

Leggendo Leonardo bisogna por mente al fatto che egli non è a rigore nè uno scienziato, nè un filosofo, ma bensì un uomo dotato di una straordinaria curiosità per i fatti della natura, che egli riferisce in una serie di aforismi piuttosto che in trattati accademici, come avrebbe fatto Galileo, e che molto spesso non si preoccupò di giustificare teoricamente (Recupero, 1966). Questo lo condusse spesso ad incredibili intuizioni e qualche volta ad errori.

GALILEO

Galileo Galilei (1564-1642) è universalmente considerato il fondatore della Fisica Sperimentale, che egli perseguì attivamente, quasi devotamente, in contrasto con l'Aristotelismo imperante ai suoi tempi. Il problema della rottura fu uno di quelli che attrassero la sua attenzione. Egli ne trattò nel suo "Discorsi e dimostrazioni matematiche

intorno a due nuove scienze" (Galilei, 1638), libro scritto nel medesimo stile del più famoso "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo" (Galilei, 1632): cioè una conversazione immaginaria tra tre persone, Salviati, Sagredo e Simplicio, le prime due scienziati-filosofi morti giovani poco prima l'apparire dei due trattati, l'ultimo avente il nome, ovviamente significativo, di un filosofo aristotelico del VI secolo d.C., si ignora se appartenuto realmente a qualche contemporaneo o semplicemente fantastico.

La conversazione va avanti per tre giorni, dei quali quello che ci interessa è il secondo. Simplicio incomincia pretendendo che la resistenza di una fune o di una trave dipenda dalla sua lunghezza, un'affermazione condivisa a quei tempi da molte persone intelligenti, tra cui, come abbiamo visto, Leonardo. Salviati non ha difficoltà a mostrarne l'infondatezza. In seguito egli si dimostra sorpreso dal fatto che, se si sospende la trave in qualche posto con un peso all'estremità (Fig. 1), essa si romperà con un carico molto inferiore a quello che causerà la rottura nel caso in cui fosse stata incastrata orizzontalmente in un muro di mattoni (Fig. 2). Queste sono evidentemente le condizioni che oggi chiamiamo di trazione e di flessione. Sembra ovvio che Galileo non avesse una chiara comprensione delle sollecitazioni che si manifestano sotto differenti condizioni di carico. In ogni modo, usando brillanti analogie, egli viene alla conclusione che il carico (non la **tensione**) di rottura è inversamente proporzionale alla lunghezza l della trave e direttamente proporzionale al cubo del raggio della sua sezione (se cilindrica, altrimenti egli sarebbe bene in grado di distinguere fra il ruolo dell'altezza e quello della larghezza). Ora, consideriamo un campione cilindrico di raggio R ed un prisma parallelepipedo avente una sezione di altezza h e larghezza w . Sappiamo dalla teoria dell'elasticità che al limite elastico, σ_0 , il carico è

$$P = (R^3/2l) \sigma_0 \text{ (cilindro) e } P = (bh^2/6l) \sigma_0 \text{ (prisma)}$$

così che noi siamo subito colpiti dalla somiglianza di queste espressioni (che, non dimentichiamolo, sono valide solo in campo elastico, certamente non fino allo snervamento e men che meno alla rottura - torneremo su questi concetti in seguito) con le proporzionalità di Galileo. Ma Galileo non si preoccupava nè del carico al limite elastico, nè dello snervamento. Prima di tutto, egli non sapeva nulla dell'elasticità, che è la proprietà per cui se un carico agisce su di un corpo, il corpo da parte sua agisce sul carico. In più, come abbiamo visto, non aveva alcuna chiara visione delle tensioni. Si deve ricordare, come abbiamo detto, che ciò che lo preoccupava era il calcolo del carico di rottura ed in questo proposito egli fallì completamente, seppure scusabilmente. Gordon (Gordon, 1971) spiega che gli scienziati del passato erano confusi dall'analogia col comportamento degli animali (inclusi gli uomini). Se uno sostiene un peso di qualche sorta, generalmente non si vedono deformazioni nel suo corpo (per quanto naturalmente qualche deformazione avrà luogo nel suo scheletro). Ma uno allora reagisce al peso mettendo i suoi muscoli in tensione, e questo lo stanca e produce un certo lavoro, sicchè alla fine deve smettere e deporre il peso.

D'altro canto dobbiamo far credito a Galileo della prima osservazione scritta (primo giorno) del fatto che sotto trazione travi più grandi sostengono carichi più elevati e col primo disegno di una prova di trazione su di un corpo di grande sezione (Fig. 1). Tuttavia egli non riuscì a trasferire questo concetto alla flessione, perchè oltre tutto gli mancava il concetto di

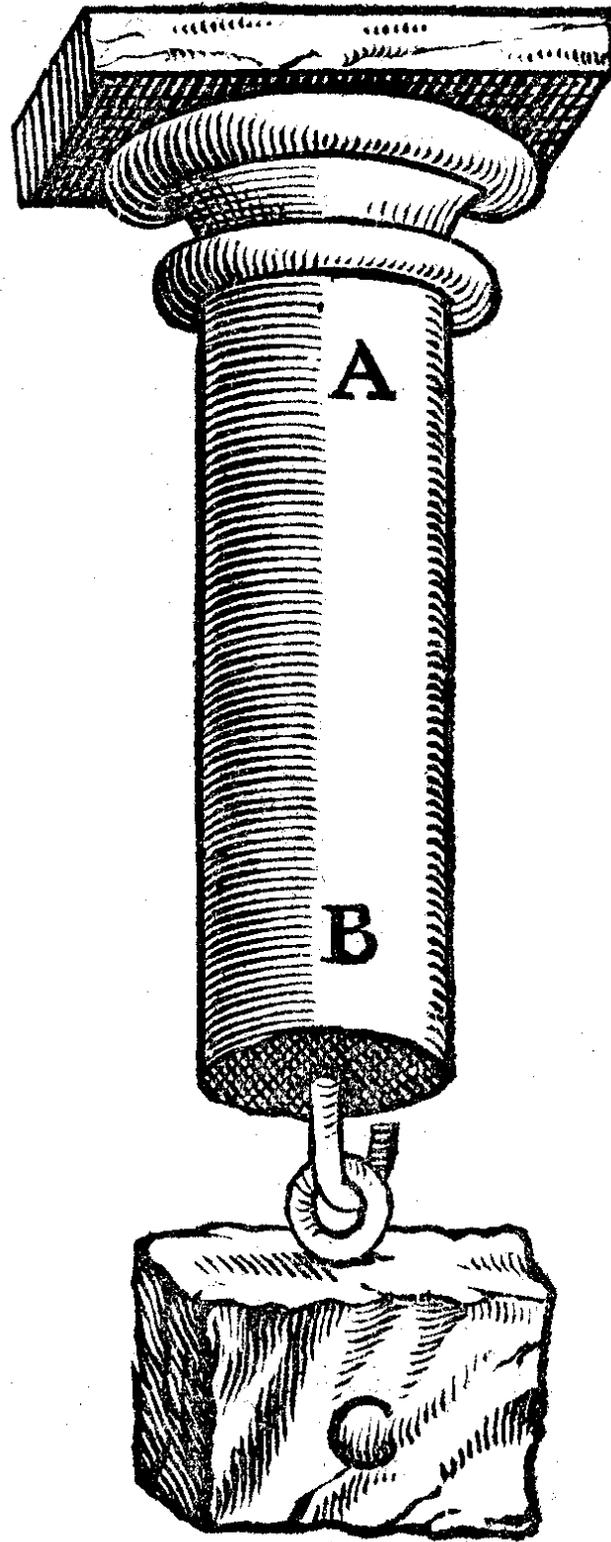


Figura 1 - Prova di trazione di una colonna (Galilei, 1638, p.7).

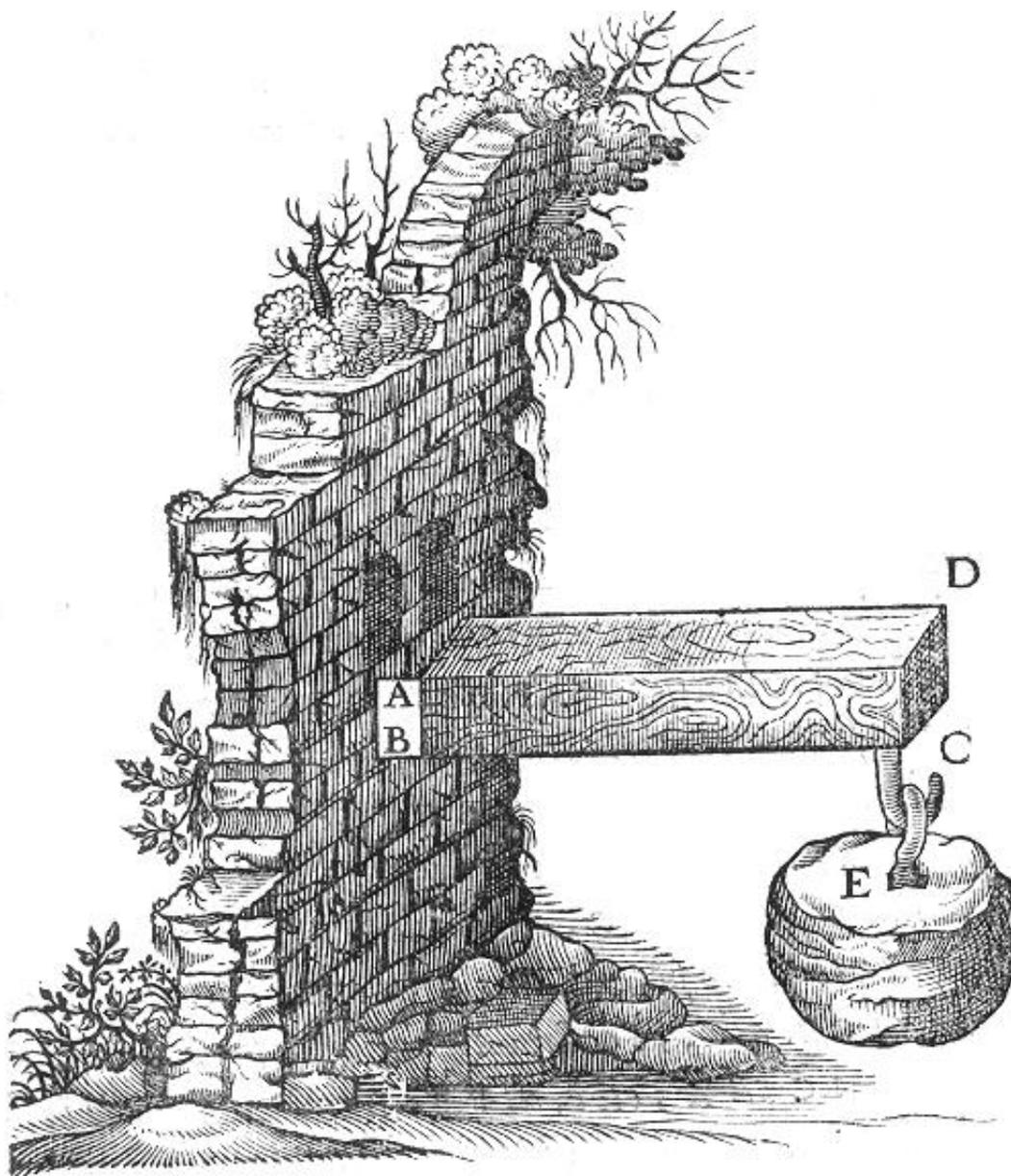


Figura 2 - Prova di flessione di una trave (Galilei, 1638, p. 128).

asse neutro. Certamente ci ha dato anche le prime immagini di quanto può essere considerata una prova di flessione su tre punti (Fig. 3).

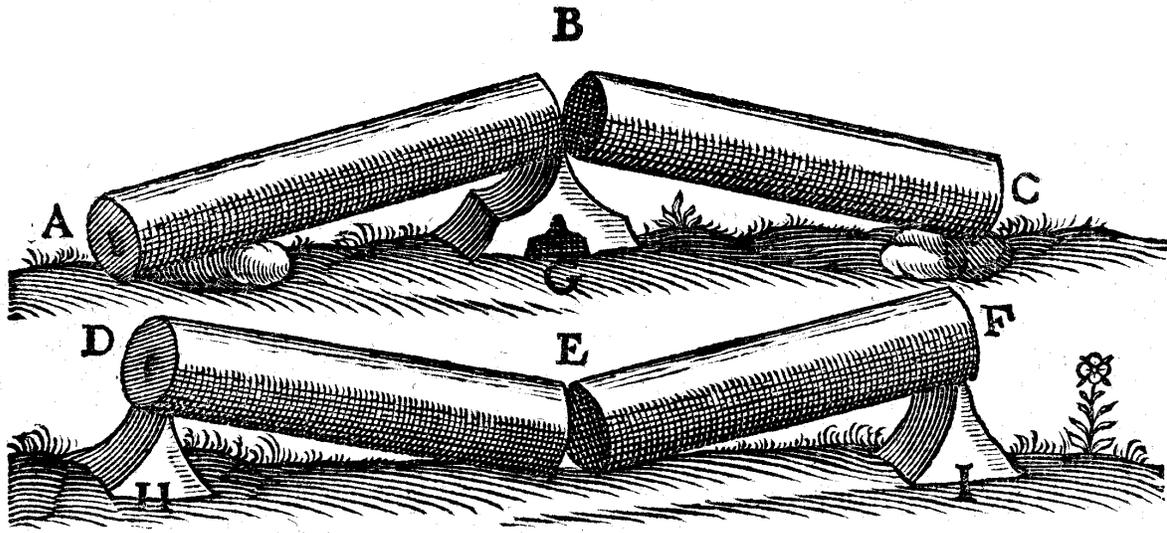


Figura 3 - Modi di rottura sotto flessione (Galilei, 1638, p. 133).

HOOKE, NEWTON E YOUNG

Non possiamo passare a prendere in considerazione scienziati italiani in secoli posteriori senza riferire di altri grandi scienziati che diedero inizio al lavoro che condusse alla scoperta dell'elasticità.

L'elasticità non è altro che un aspetto del principio di azione e reazione di Isacco Newton (1642-1727), per quanto questi apparentemente non se ne accorgesse: il carico agisce su un solido deformandolo ed il solido reagisce opponendovisi. L'uomo che se ne accorse fu Robert Hooke (1635-1702), che per questo è considerato il padre della teoria dell'elasticità. Nel 1660, riflettendo sull'opera di un amico che era un famoso orologiaio, egli annunciò i suoi risultati nel seguente anagramma:

CEIINOSSTTVV

Fortunatamente, nel 1676 (!) in un trattato intitolato "De potentia restitutiva" egli risolse così l'anagramma:

VT TENSIO SIC VIS

Certamente E. Mariotte (1620-1684) disse qualcosa sull'elasticità lineare prima del 1676, ma non prima del 1660, inoltre non tentò di risolvere l'anagramma dello Hooke. Per questo noi consideriamo costui, e non il Mariotte, padre (forse sarebbe meglio dire nonno) della teoria dell'elasticità.

Tuttavia lo Hooke con la parola "tensio" non intese quello che oggi intendiamo noi, ma piuttosto "estensione", cioè, in parole povere, "allungamento". Nei fatti, egli comprese l'elasticità, ma non quello che noi intendiamo per tensione. Questo perchè egli si disinteressò della forma e delle dimensioni del solido di cui andava occupandosi. Inoltre egli non si accorse che la sua legge era valida solamente nel campo che noi chiamiamo elastico. Ci ritorneremo su.

Thomas Young (1773-1829) ebbe senza alcun dubbio una chiara comprensione delle tensioni. Nel 1807 era stato appena licenziato dalla Royal Society perchè il suo lavoro non era considerato abbastanza pratico (per fortuna fu presto assunto dal Bureau des Longitudes). In quell'anno egli annunciò la legge che porta il suo nome, cioè:

$$\sigma / \varepsilon = E$$

dove σ e ε sono ciò che noi chiamiamo tensione e deformazione. Il coefficiente di proporzionalità E prende il nome di modulo di Young o di elasticità. L'invenzione del modulo di Young fu un fatto rivoluzionario ed il primo anello di una catena che in una ventina d'anni consentì di sviluppare la scienza dell'elasticità su basi rigidamente matematiche.

Come abbiamo suggerito, la legge di Hooke è valida soltanto nel campo elastico, cioè fino al cosiddetto limite elastico o di proporzionalità. In seguito la deformazione cresce più rapidamente, cioè il materiale si snerva. Alla fine si raggiunge un massimo nella tensione ingegneristica ed il solido incomincia a rompersi.

CAVALLI

Mentre gli scienziati si occupavano di sviluppare la matematica della teoria dell'elasticità usando l'analisi differenziale, introdotta da Newton e da Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), l'interesse per lo snervamento e la rottura andava scemando.

Chi tentò di affrontare il problema, sebbene in maniera un po' rozza, fu Giovanni Cavalli (1807-1879). Quando era capitano di artiglieria nell'esercito del Re di Sardegna, egli inventò un cannone a retrocarica e soprattutto il cannone a canna rigata, ed oggi è ricordato solo per questo, il che è francamente ingiusto.

Sebbene egli si occupò soprattutto di problemi di carattere militare (in seguito raggiunse il grado di generale nell'esercito italiano, divenne Direttore della Scuola di Artiglieria, fu deputato al Parlamento ed infine senatore del Regno), condusse importanti studi in Ingegneria e di Meccanica Fondamentale: per esempio, con Federigo Menabrea e Carlo Mosca fu membro del Comitato di Consulenza per la Geologia creato dal Ministro dei Lavori Pubblici Pietro Paleocapa per il Traforo del Frejus. In tre memorie (Cavalli, 1858, 1859 e 1863) egli esprime il dubbio che la legge di proporzionalità dello Hooke possa non esser mai interamente valida, specialmente per certi materiali, tra i quali egli cita la ghisa ed il ferro, ed in ogni modo sicuramente non oltre una certa tensione, cioè il limite elastico, al di là della quale hanno luogo deformazioni permanenti.

Nell'insieme egli esprime diverse leggi:

1 - La proporzionalità fra carico e deformazione non esiste in maniera assoluta per la ghisa ed il ferro dolce, se non al massimo per tensioni fra 0 e la metà del carico di rottura.

2 - Un allungamento permanente ha luogo già sotto i carichi più bassi; il punto in cui la deformazione cresce molto più rapidamente che secondo la legge di Hooke è altamente variabile anche in ferri della stessa provenienza. In conseguenza, il limite elastico, se esiste, perde qualsiasi rilevanza pratica.

3 - omissis

4 - omissis

5 - Ferro e ghisa non sottoposti ad urti e vibrazioni sopportano indefinitamente tensioni vicine alla tensione di rottura istantanea.

6 - Le formule di resistenza in uso devono essere emendate.

Nel 1846 il Cavalli costruì una macchina di flessione, che sotto molti aspetti sembrava una macchina di rilassamento tipo Denyson, eccetto che il carico veniva applicato deponendo gentilmente dei pesi crescenti, e munita di un sistema di registrazione. Nei suoi esperimenti egli credette di poter distinguere due parti della deformazione, una elastica e reversibile, l'altra irreversibile dalla partenza e poi fino alla rottura: entrambe seguono leggi differenti, ma uniformemente regolari. Tra i pesi deposti, egli ne scopre uno, che la provetta non può sopportare stabilmente perchè al di sopra di esso incomincia un rilassamento, che poi accelera man mano che si avvicina la rottura, e questo anche se la durata della prova è breve. Come oggi sappiamo, questo rilassamento è una conseguenza dello snervamento, ma il Cavalli, cui va anche il merito di aver posto attenzione a un fenomeno come l'incrudimento, credette di aver scoperto una legge di natura. Egli propose che al carico intermedio che abbiamo appena descritto venisse dato il nome di limite di stabilità e che esso venisse usato nei calcoli di ingegneria al posto del limite elastico.

CURIONI

Molti tentarono di estendere la formula che fornisce il limite elastico alla tensione di rottura σ_R , scrivendo:

$$\sigma_R = \alpha Pl/(bh^2)$$

dove α è una costante numerica. Galileo la pose uguale a 2, Baumgarten a 2,5, Hodgkinson & Fairbain a 2,63, Leibniz a 3 ed infine Navier a 6, cioè trascurò completamente l'influenza dello snervamento. A molti sembrava possibile eliminare le incongruenze ammettendo semplicemente che al di sopra del limite elastico l'asse neutro non fosse più baricentrico, cioè che le caratteristiche meccaniche in trazione e compressione non fossero più uguali. Presto si scoprì negli Stati Uniti che non era per nulla una costante, il che significava che o la teoria era sbagliata o gli esperimenti in difetto.

Giovanni Curioni (1831-1887) incominciò la sua carriera come allievo del Mosca, che abbiamo già incontrato come membro del Comitato di Consulenza per il Traforo del Frejus e che progettò il ponte in muratura sulla Dora Riparia a Torino: a quel tempo, era considerata

un'impresa rischiosa, così il Mosca rimase sotto il ponte durante le prove di carico, per mostrare la sua fiducia nei suoi calcoli.

A tempo debito, il Curioni divenne Professore della Scuola di Applicazione per gli Ingegneri e del Politecnico di Torino e poi Direttore di quest'ultimo e scrisse un libro col titolo: "Resistenza dei materiali e stabilità delle costruzioni" (Curioni, 1874). Marchis e Jarre (1988) ricordano che costruì un buon numero di macchine di prova differenti fino al 1880.

Il Curioni definisce accuratamente le tensioni di snervamento e di rottura:

"Lo snervamento ha luogo nei corpi soggetti a forze esterne quando queste, crescendo al di sopra di un certo limite, hanno prodotto un tale spostamento molecolare che non è più possibile che le molecole spostate, mentre restano sotto l'azione delle dette forze, si riaggregino in un nuovo stato di equilibrio stabile, il che quindi col tempo produce una disaggregazione totale, cioè la rottura. La rottura può aver luogo pressoché immediatamente all'applicazione delle forze esterne, se sono abbastanza grandi."

Il Curioni fece anche delle osservazioni interessanti sull'influenza del tempo, dichiarando:

- a) una forza esterna, che non produce snervamento in un corpo in cui è applicata, può farlo se la sua azione si prolunga per un tempo abbastanza grande;
- b) una forza esterna, che non può rompere un corpo dopo aver agito su di esso per breve tempo, può romperlo dopo un tempo supplementare;
- c) forze esterne intermittenti ripetute abbastanza frequentemente possono produrre lo stesso effetto di un'azione continua.

Oggi chiamiamo questi effetti rilassamento meccanico, frattura ritardata e fatica. È interessante notare che due degli studiosi che abbiamo già nominato a proposito della tensione di rottura, e cioè E.A. Hodgkinson (Hodgkinson, 1851) e W. Fairbain (Fairbain, 1864), sono fra i pionieri nello studio di quella che diventerà la scienza della fatica.

BELTRAMI

Quando un corpo sottoposto ad un certo sistema di forze si snerva o si rompe (nei fatti, quando inizia lo snervamento massiccio, la rottura finisce col seguirne)? L'idea più semplice apparve ritenere che ciò succede quando la tensione di trazione raggiunge un certo valore, che è il carico di snervamento. Al di fuori della trazione pura, questo non è vero. Così sono stati introdotti numerosi criteri (Brutti, 1947). Fra questi il criterio di Tresca (in verità inventato dal Coulomb) suggerisce che lo snervamento ha luogo quando la tensione tangenziale risolta raggiunge un certo valore. Nel caso della torsione pura, cioè quando delle sei componenti della tensione soltanto τ_{xy} è diversa da 0, si trova:

$$\sigma_s = 2\tau_s$$

cioè:

$$\tau_s = 0.5\sigma_s$$

Di solito sperimentalmente si trova un valore più alto (0,58). Tuttavia il criterio di Tresca è ancora usato in ragione della sua semplicità.

Eugenio Beltrami (1835-1900) fu Professore di Matematica e Geometria Analitica nell'Università di Bologna, poi di Geodesia a Pisa, quindi di Meccanica ancora a Bologna, di Fisica Matematica e Fisica Superiore a Pavia, infine di Meccanica ed Analisi a Roma. Nel 1885 egli osservò che appena prima dello snervamento si raggiunge un equilibrio instabile allorchè l'energia potenziale di deformazione raggiunge un massimo. L'energia potenziale volumica φ è:

$$\varphi = (1/2E)(\sigma_{id}^2) = [(1+1/m)/E]\tau_{xy}^2$$

dove m è il modulo di Poisson, approssimativamente uguale a $10/3$.

Di qui:

$$\tau_s = 0.62\sigma_s$$

Questo fattore non è ancora soddisfacente, ma il criterio di Beltrami (nel mondo anglosassone individuato come criterio di Haig) è importante perchè è il primo basato sul concetto di energia piuttosto che su quello di tensione o deformazione. Oggi esso è sostituito da quello dovuto a Richard Von Mises, che notò come una pressione puramente idrostatica, per quanto elevata, non conduca allo snervamento, e quindi adottò un criterio analogo a quello di Beltrami, ma prendendo in considerazione solo quella parte delle tensioni che producono distorsione e non dilatazione (o contrazione). Il criterio di Von Mises fornisce il valore corretto per il rapporto $\tau_s/\sigma_s = 0,58$.

DAL 1900 AD OGGI

Da quei tempi ormai remoti, il lavoro sulla frattura ha fatto progressi in Italia come in qualsiasi altro paese. Poichè un corpo completo di cognizioni teoriche - come quello sviluppato da G.R. Irwin sulla meccanica della frattura statica - doveva attendere i tardi anni '50, molto dello sforzo compiuto nella prima metà di questo secolo fu dedicato alla fatica, che venne presto riconosciuta come la causa della rottura della maggior parte dei pezzi meccanici. La rapida crescita della FIAT Auto spinse la ricerca in questo campo nei suoi Laboratori Centrali sotto la guida di L. Locati, scomparso pochi anni fa. Più tardi, un certo lavoro sulla Meccanica della Frattura iniziò da qualche luogo senza tuttavia essere inserito in uno sforzo coordinato. Per esempio, S. Venzi & A.H. Priest (1968) scoprirono che nei primi stadi delle prove di resilienza l'influenza dell'inerzia è tanto importante quanto la reazione delle incudini, di modo che la significatività dei risultati per solidi molto fragili finisce per scemare grandemente. La ricerca post-Irwin iniziò al Centro Sperimentale Metallurgico a Roma ad opera di un gruppo di giovani ricercatori, principalmente S. Venzi, M. Mirabile, G. Buzzichelli e M. Castagna, sotto la direzione di P. Brozzo. Nel 1982 gli autori della presente memoria con numerosi compagni e per impulso di G. Caglioti, fondarono a Torino il Gruppo Italiano Frattura come foro per la circolazione di idee ed applicazioni e come punto di incontro per scienziati di tutte le nazioni, che sono affluiti numerosi ai suoi congressi e giornate di lavoro.

CONCLUSIONI

Il contributo degli scienziati italiani all'insieme della ricerca sulla frattura risale ai tempi di Roma antica: parole come "duttile" e "fragile" si trovano già nella "Naturalis Historia" di

Plinio il Vecchio (23-79 D.C.) e riflettono quell'abitudine all'osservazione che aprì la strada, dopo la rivoluzione culturale dell'umanesimo, ai grandi scienziati del Rinascimento e del principio dell'Età Moderna. Nel secolo scorso sono emersi contributi importanti da quella culla della scienza ingegneristica che fu a quei tempi l'Accademia delle Scienze di Torino, dove gli scienziati poterono anche condurre esperimenti sfruttando i progressi tecnologici dell'Arsenale locale. Abbiamo cercato di illustrare questi successi storici del nostro Paese, dedicando minore attenzione agli sviluppi più recenti. Abbiamo pensato infatti che il nostro contributo di storici autodidatti potesse giovare ai giovani ricercatori per fornire un senso dello sviluppo storico che li ha portati alle moderne teorie della meccanica della frattura, iniziate con G.R. Irwin a metà di questo secolo.

BIBLIOGRAFIA

- Brutti, C., 1947, "Costruzioni di macchine", parte I (Resistenza dei materiali. Dispense ciclostilate dalle lezioni universitarie).
- Caro, Lucretius T., 57 A.C., "De rerum natura". Testo latino con trad. ital. di E. Cetrangolo. 1978, Firenze, Sansoni.
- Cavalli, G., 1858, "Memoria su vari perfezionamenti militari". Mem. Acc. Sci. Torino, XVII, Serie II, pp.1-100.
- Cavalli, G., 1859, "Memoria sul delineamento equilibrato degli archi in muratura ed in armatura", Mem. Acc. Sci. Torino, XIX, Serie II, pp.143-200.
- Cavalli, G., 1863, "Mémoire sur la théorie de la résistance statique e dynamique des solides (surtout aux impressions comme celle du tir de canons), Mem. Acc. Sci. Torino, XXII, Serie II, pp.157-233.
- Curioni, G., 1874, "Resistenza dei materiali e stabilità delle strutture", Torino, Augusto Federico Negro.
- da Vinci, L., 1483-1518. "Codex Atlanticus", Milano, Biblioteca Ambrosiana Milano, 1894-1904, Pinnati.
- Fairbairn, W. Phil., 1864, Trans. Roy. Soc., p. 311
- Galilei, G., 1632, "Dialogo sui due massimi sistemi del mondo", Torino, 1990, Einaudi.
- Galileo, G., 1638, "Discorsi e dimostrazioni sopra due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali", Leida, Elsevirii.
- Gordon, J.E., 1971, "The new science of strong materials", Penguin Book, Harmondsworth.
- Hodkinson, E.A., 1851, Ponts et Chaussures, p.193.
- Marchis, V. & Jarre, G., 1988, "Accademici o tecnologi?", in: Società e Scienza. 200 anni di storia dell'Accademia delle Scienze di Torino, Torino, Allemandi & C., p.92.
- Recupero, J., 1966, "Selezione di scritti di Leonardo da Vinci", Roma, Editrice Italiana di Cultura.
- Venzi, S. & Priest, A.H., 1968, "Influence of inertial load on instrumented impact test", BISRA Rep. MG/C/61/68.