

## 10. PROPRIETÀ DEI MATERIALI E PROVE MECCANICHE

Si definisce *materiale* una qualità di *materia* solida adatta alla costruzione. Generalmente il materiale è costituito da un insieme di più *sostanze* (qualità di materia di composizione chimica ben definita).

I materiali da costruzione devono essere adatti a:

- assumere forma e dimensioni di progetto con tolleranze definite (essere *lavorabili*),
- resistere a sollecitazioni meccaniche e termiche, ad usura e corrosione,
- subire deformazioni contenute (avere una certa *rigidezza*),
- mantenere caratteristiche costanti al variare del tempo (non essere soggetti ad *invecchiamento*).

Queste caratteristiche dipendono dalle proprietà *meccaniche*, *termiche* e *tecnologiche* del materiale.

Altre caratteristiche d'interesse, a parte le proprietà elettriche, sono:

- peso (dipendente dalla proprietà fisica *densità*),
- affidabilità,
- durata,
- costo (che comprende quello del materiale e della sua lavorazione),
- caratteristiche estetiche,
- sostenibilità ecologica (*riciclabilità*, *impatto ambientale*, possibilità di *smaltimento*).

È importante ricordare che le caratteristiche meccaniche di un *elemento di macchina* dipendono, oltre che dalle proprietà del materiale utilizzato, dal processo di costruzione e dalla sua *geometria* (forma e dimensioni).

Va ricordato che le principali cause di danneggiamento degli elementi meccanici sono la rottura per fatica e il deterioramento delle superfici.

### Classi dei materiali

I materiali da costruzione possono essere classificati in tre grandi categorie:

- **metallici**: costituiti da elementi a carattere metallico; hanno struttura cristallina; buona resistenza meccanica, densità elevata; sono malleabili, duttili, conduttori calore ed elettricità, poco trasparenti alla luce. Acciai e ghise, alluminio e leghe, rame e leghe (bronzi e ottoni), magnesio e leghe, nichel e leghe, titanio e leghe, zinco e leghe.
- **ceramici**: ossidi e/o silicati; hanno struttura cristallina (a parte il vetro); sono duri e fragili, resistenti a corrosione e usura, non conduttori di calore ed elettricità, con elevate temperature di fusione. Ceramiche tradizionali (cemento, vetri, laterizi, piastrelle, porcellana, pietre naturali, gesso), ceramici speciali.
- **polimerici**: composti organici macromolecolari, sintetici o naturali; la struttura è costituita da catene di molecole; hanno densità bassa, scarsa stabilità dimensionale; sono amorfi, facilmente modellabili, rammolliscono o bruciano per effetto della temperatura. Naturali (gomma, legno, adesivi, vernici, bitumi), artificiali (termoplastici, plastiche termoindurenti, elastomeri).

I *materiali compositi* (a volte identificati come la 4<sup>a</sup> categoria di materiali) sono ottenuti miscelando o incollando due o più materiali mutuamente insolubili dei quali uno costituisce la *matrice*, che agisce da legante, e gli altri la *carica*, che può agire da *rinforzo*, destinato a migliorare rigidezza e resistenza nel caso dei materiali strutturali, o da *riempitivo*, destinato a migliorare proprietà di vario genere, quali resistenza alla fiamma, all'abrasione e all'impatto e conducibilità elettrica. La matrice può essere costituita da un materiale polimerico (nella maggior parte dei casi), metallico o ceramico. La carica può essere costituita da *fibre lunghe*, *fibre corte* o particelle. La maggior parte dei materiali compositi destinati alla costruzione hanno un rinforzo costituito da fibre lunghe di materiali come vetro, carbonio, boro o Kevlar. L'introduzione delle fibre è dovuta al fatto che i materiali ridotti in fibre di diametri dell'ordine dei 5÷15 µm (vetro, carbonio, Kevlar) o dei 100÷200 µm (boro), presentano proprietà meccaniche molto più elevate grazie alla minore presenza di difetti nella struttura cristallina.

### **Microstruttura**

I materiali metallici e ceramici hanno *struttura cristallina* nella quale gli atomi si dispongono ordinatamente assumendo una struttura geometricamente definita. I materiali polimerici hanno invece *struttura amorfa*.

I materiali, come si evidenzia osservando con un ingrandimento tra  $10^2$  e  $10^4$ , possono essere *omogenei* cioè costituiti da una sola sostanza o diverse sostanze solubili allo stato solido, o *eterogenei* cioè costituiti da componenti non solubili formanti un sistema polifasico. In questo caso si osservano cristalli di sostanze differenti. Materiali omogenei sono, ad esempio, il rame puro (99.99%Cu) usato come conduttore elettrico o il bronzo da lavorazione (95%Cu, 5% Sn). Materiali eterogenei sono acciai, laterizi, porcellane. Nel granito si osservano ad occhio nudo grani di quarzo, di feldspato e mica. I materiali compositi sono polifasici nei quali le diverse fasi sono state deliberatamente disposte con un criterio mirante a realizzare una certa proprietà.

### **Isotropia e Anisotropia**

Un materiale si definisce isotropo se le sue proprietà sono uguali in tutte le direzioni. Si deve osservare che il singolo cristallo di materiale è tipicamente anisotropo, tuttavia i materiali costituiti da aggregati di cristalli possono

risultare isotropi, poiché questi ultimi si dispongono con orientazione casuale (in pratica in tutte le direzioni). I materiali amorfi sono generalmente isotropi perché il disordine molecolare si riproduce statisticamente in tutte le direzioni. Lavorazioni come laminazione, trafilatura e forgiatura possono rendere anisotropo un materiale, perché provocano un orientamento preferenziale dei grani cristallini. I materiali compositi sono spesso volutamente anisotropi, grazie alle differenti proprietà meccaniche di matrice e fibre.

In tab.1 sono riassunte le principali caratteristiche delle varie categorie di materiali.

### **Proprietà fisiche di interesse**

Vengono di seguito riassunte le proprietà fisiche di interesse per i materiali da costruzione. Alcune di esse sono approfondite nei paragrafi successivi, mentre il comportamento in campo plastico e la resistenza a frattura e a fatica sono trattate in capitoli specifici. Nella tab.2 sono riassunte alcune delle proprietà fisiche di maggiore interesse di vari materiali da costruzione.

- **Proprietà meccaniche**

Descrivono il comportamento del materiale assoggettato a forze statiche o dinamiche:

- comportamento sforzi-deformazioni (elastico, plastico, viscoelastico) e resistenza statica (tipicamente quantificata mediante le tensioni di *snervamento* e *rottura*),
- comportamento sforzi-deformazioni e resistenza statica ad *alta temperatura*,
- resistenza all'indentazione, alla scalfittura e all'abrasione (*durezza*),
- resistenza agli urti (*resilienza*),
- resistenza a frattura (*tenacità* a frattura),
- resistenza a fatica.

- **Proprietà termiche**

Descrivono il comportamento del materiale assoggettato a variazioni di temperatura:

- dilatazione termica,
- capacità termica,
- conduttività termica,
- resistenza allo shock termico.

- **Temperatura di fusione**

La temperatura di fusione  $T_f$  è la temperatura alla quale il materiale passa dallo stato solido a quello liquido. Ovviamente le temperature di esercizio dei componenti meccanici devono essere convenientemente minori di essa. Per i polimeri è altrettanto importante la *temperatura di transizione vetrosa*  $T_g$ , che è la temperatura al di sotto della quale i polimeri diventano rigidi e fragili come il vetro. Le plastiche rigide hanno  $T_g$  di circa 100°C. Le plastiche flessibili e gli elastomeri gommosi hanno  $T_g$  inferiori alla temperatura ambiente.

- **Densità**

La densità  $\rho$  è definita come rapporto tra la massa del materiale e il volume occupato, tipicamente espressa in  $\text{g/cm}^3$ . Nei casi in cui il peso di un componente ha rilevanza, si può parlare di *resistenza specifica* del materiale, intendendo il rapporto tra la grandezza che identifica la resistenza e la densità (ad esempio la resistenza specifica a rottura è il rapporto tra la tensione di rottura e la densità).

- **Proprietà elettriche**

La principale proprietà elettrica d'interesse dei materiali da costruzione è la conduttività (o il suo opposto, la resistività), che è l'attitudine a trasmettere la corrente elettrica.

### **Proprietà tecnologiche**

Le proprietà tecnologiche descrivono l'attitudine di un materiale a essere lavorato per produrre dei manufatti o a essere trattato per acquisire determinate proprietà.

- **Duttilità/Malleabilità**

Queste proprietà si riferiscono all'attitudine di un materiale a essere lavorato a freddo per deformazione plastica. La duttilità e la malleabilità si riferiscono rispettivamente all'attitudine del materiale a essere ridotto in fili mediante trazione e in lamine mediante compressione.

- **Fusibilità**

È l'attitudine di un materiale a passare dallo stato solido a quello liquido mediante riscaldamento, per essere poi raffreddato in modo da assumere la forma desiderata. La fusibilità di un materiale cresce al diminuire della temperatura di fusione.

- **Saldabilità**

È l'attitudine di un materiale a essere saldato, cioè la proprietà in base alla quale pezzi del materiale possono essere uniti ad altri pezzi dello stesso o di altri materiali, se portati a temperature prossime (ma inferiori) al loro punto di fusione.

- **Temprabilità**

È l'attitudine di un materiale ad acquistare maggiore durezza e resistenza meccanica attraverso il processo di tempra, costituito da un riscaldamento a temperatura elevata ma minore di quella di fusione, e un successivo raffreddamento brusco.

MATERIALE	Legame	Microstruttura	Vantaggi	Svantaggi
<b>Metalli e leghe</b> Acciai e ghise Alluminio e leghe Rame e leghe Magnesio e leghe Nichel e leghe Titanio e leghe Zinco e leghe	Metallico	Grani cristallini	Resistenza Rigidezza Duttilità Conduc. Elettrica	Peso Corrosione
<b>Polimeri</b> Naturali (gomma, legno, vernici, bitumi, adesivi) Artificiali (termoindurenti, termoplastici, elastomeri)	Catene di molecole	Catene di molecole	Costo Leggerezza Resist. Corrosione	Resist. Meccanica Resist. Temperatura Rigidezza Scorrimento Invecchiamento
<b>Ceramici</b> Tradizionali (cemento, mattoni, gesso piastrelle, porcellana, pietre naturali) Vetro Speciali	Ionico Covalente  Amorfo	Grani cristallini  Amorfo	Resist. Meccanica Resist. Temperatura Resist. Corrosione Rigidezza Durezza	Fragilità
<b>Compositi</b> A matrice polimerica A matrice metallica A matrice ceramica	Vari	Matrice e fibre	Resist. meccanica Rigidezza Leggerezza	Costo Resist. Temperatura Delaminazione

Tab.10.1 - Tabella riassuntiva di alcune caratteristiche delle principali categorie di materiali.

MATERIALE	$E$ [GPa]	$\sigma_f$ [MPa]		$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$T_f$ [°C]	$\nu$
<b>Diamante</b>	1.000	750		3,515		0,1
<b>Acciai</b>	190÷215	200÷2.500		7,87	1.530	0,28÷0,3
<b>Ghise</b>	170÷190	100÷700		7,87	1.530	0,28÷0,3
<b>Leghe di nichel</b>	177	480÷750		8,90	1.453	0,34
<b>Leghe di titanio</b>	85÷130	270÷1.450		4,51	1.668	0,36
<b>Leghe di rame (Ottoni)</b>	120÷150	240÷400		8,96	1.083	0,35
<b>Leghe di rame (Bronzi)</b>	100	300÷760		8,96	1.083	0,35
<b>Leghe di alluminio</b>	70÷80	140÷550		2,70	660	0,35
<b>Leghe di magnesio</b>	40÷45	150÷380		1,74	650	0,29
<b>Ceramici</b>	60÷70	trazione 50÷580	compressione 560÷3.500	2,4÷5,8	700÷2.800	0,18÷0,22
<b>Plastiche</b>	0,1÷6,0	10÷200		0,9÷2	110÷640	0,33÷0,34
<b>Elastomeri</b>	0,01÷0,1	9÷25			T esercizio 80÷250	
<b>Resine poliuretatiche, viniliche epossidiche, fenoliche, silconiche</b>	3,0÷5,0	25÷100			110÷640	0,33÷0,37
<b>Fibre vetro, carbonio, boro, kevlar</b>	70÷400	2.300÷3.800		1,7÷2,6		0,2÷0,35
<b>Composito resina e fibre   </b>	45÷320	1.100÷1.700		1,3÷2		0,25÷0,34
<b>Composito resina e fibre +</b>	1,2÷11	30÷45				
<b>Legno Longitudinale   </b>	6÷16	trazione 40÷200	compressione 20÷100	0,3÷1	-	0,29 <sub>LR</sub>
<b>Legno Radiale +</b>	0,5÷1	3,5÷5			-	0,02 <sub>RL</sub>

Tab.10.2 - Alcune proprietà dei materiali da costruzione ben rappresentative della rigidità, della resistenza e della possibilità d'impiego ad alta temperatura: il modulo di Young  $E$ , la tensione di rottura  $\sigma_f$ , la densità  $\rho$ , la temperatura di fusione  $T_f$  e il coefficiente di Poisson  $\nu$ .

### Comportamento sforzi/deformazioni - Prova di trazione

Il comportamento del materiale per ciò che concerne il rapporto tra le tensioni cui è soggetto e le deformazioni che si destano è definito:

- *lineare* se la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata,
- *elastico* se le deformazioni si annullano al cessare delle tensioni applicate,
- *plastico* se rimangono deformazioni permanenti al cessare delle tensioni applicate.

La deformazione elastica è legata allo stiramento dei legami interatomici nei solidi che cessa al cessare delle tensioni, mentre la deformazione plastica è legata allo slittamento tra piani di atomi nei grani cristallini che accade in modo incrementale a causa del movimento delle dislocazioni sotto tensioni elevate. Per questa natura fisica, la deformazione plastica non provoca variazioni di volume nel materiale.

Il comportamento sforzi-deformazioni di un materiale è generalmente caratterizzato mediante la *prova di trazione*.

Essa consiste nel sottoporre un provino di geometria e dimensioni opportune (solitamente standardizzate da norme tipo ISO o ASTM) ad una forza di trazione unidirezionale  $F$  crescente lentamente da 0 ad un valore tale da determinarne la rottura, misurando la forza applicata e la deformazione in uno dei modi che verrà descritto nel seguito. Usualmente il provino è una barretta a sezione costante circolare (con diametro iniziale  $d_0$ ) o rettangolare di area iniziale  $A_0$ . In molti casi esso è conformato in modo di avere delle estremità più robuste da afferrare e una porzione più sottile che costituisce il tratto utile per la prova di lunghezza  $L_0$ .

Il provino viene collegato ad una *macchina di prova* (fig.1) dalle estremità, mediante *afferraggi*, uno dei quali è fisso, e l'altro è solidale alla *traversa mobile* della macchina (o al *pistone attuatore*). Lo spostamento di quest'ultima permette l'applicazione del carico. La distanza tra gli afferraggi è indicata con  $h$ .

Durante la prova si misurano la forza applicata mediante un apposito trasduttore (*cella di carico*) e lo spostamento dell'elemento mobile  $\Delta h$  (mediante un dispositivo detto *Linear Variable Differential Transformer* o *LVDT*). In molti casi si misura l'allungamento localizzato su un piccolo tratto del provino mediante un *estensometro* o direttamente la deformazione un *estensimetro*; la lunghezza del tratto su cui si effettua la misura è pari alla *base di misura* del trasduttore stesso.

I dati misurati sono riportati su un diagramma tensioni *nominali*-deformazioni *nominali* ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ), nel quale le prime sono date dal rapporto tra il carico applicato e l'area iniziale del provino

$$\sigma = \frac{F_i}{A_0} \quad (10.1)$$

e sono misurate in MPa, le seconde dal rapporto tra l'allungamento totale e la lunghezza iniziale:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (10.2)$$

e sono adimensionali. In alcuni casi può essere conveniente esprimere le deformazioni in percentuale: in questo caso basta moltiplicare il valore misurato con la (2) per 100 e aggiungere il simbolo % (ad es.  $\varepsilon=0.1$  corrisponde ad una deformazione del 10%). Nelle misure effettuate con gli estensimetri, per comodità, si misurano le deformazioni in micrometri per metro  $\mu\text{m}/\text{m}$ ; in questo caso basta moltiplicare il valore misurato con la (2) per 1.000.000 (essendo  $1\mu\text{m}=1\text{m}/1.000.000$ ).

In alcuni casi l'allungamento  $\Delta L$  viene stimato dallo spostamento dell'attuatore, semplicemente come  $\Delta L = \Delta h$ . In generale questo valore coincide con l'allungamento medio del tratto del provino compreso tra gli afferraggi, che coincide con l'allungamento locale solo in campo elastico. Poiché il valore medio è influenzato dalla lunghezza iniziale  $L_0$ , essa è standardizzata e tipicamente si ha  $L_0=5d_0$ . Se si utilizza l'estensometro, il valore  $L_0$  coincide con la base di misura dello stesso: il vantaggio è che il valor medio è calcolato su un tratto ridotto ed è più vicino al valore locale. Per materiali di elevata rigidità si verifica spesso uno slittamento del provino negli afferraggi e l'utilizzazione dell'estensometro/estensimetro diventa necessaria.

Si deve notare che la tensione nominale non coincide con quella realmente agente, poiché, come si vedrà nel seguito, la sezione del provino scarico  $A_0$  è maggiore di quella che si ha durante l'applicazione della tensione per via

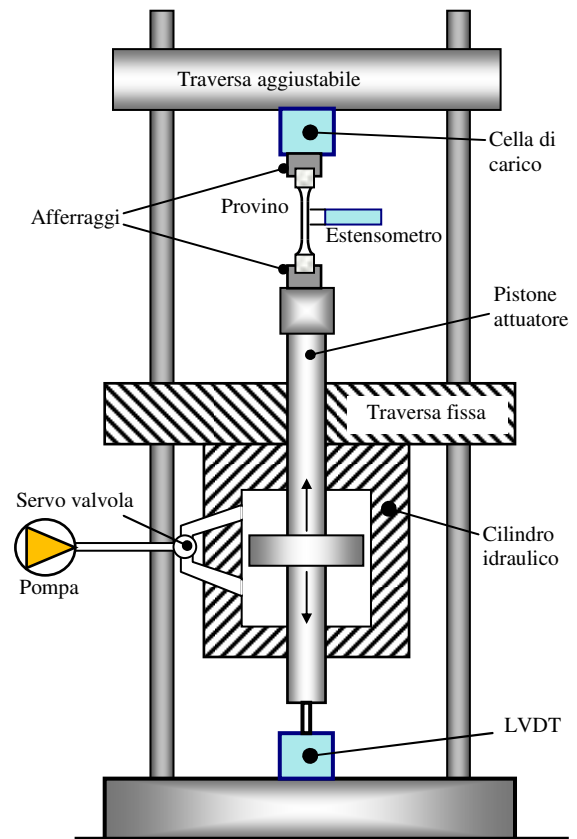


Fig.10.1 - Macchina di prova servoidraulica.

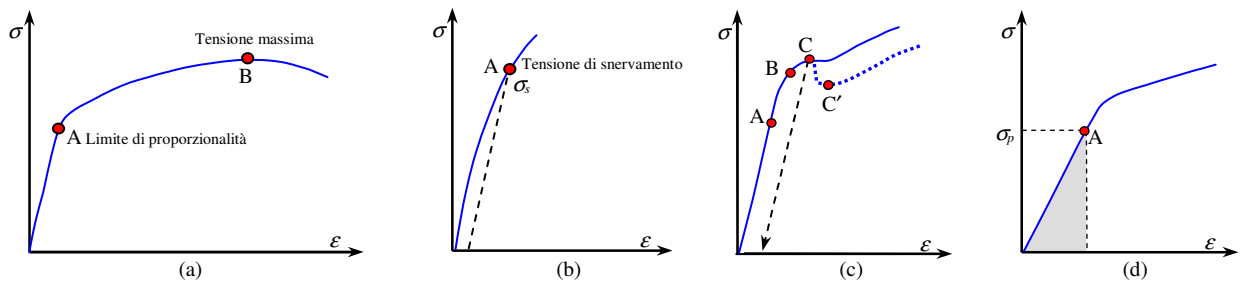


Fig.10.2 - Diagramma  $\sigma$ - $\varepsilon$ : (a) materiale duttile; (b) materiale fragile; (c) limiti di proporzionalità (A), elastico (B) e di snervamento (C) e (C'); (d) energia elastica totale.

dell'effetto Poisson; questa differenza è trascurabile fino a quando il materiale si mantiene in campo elastico. Si deve notare, inoltre, che la deformazione nominale, in dipendenza dal modo con cui è misurato  $\Delta L$ , è data dalla deformazione media rispetto alla base di misura dell'estensimetro. Le tensioni e deformazioni nominali riportate nel diagramma sono dette anche *ingegneristiche*.

Le prove possono essere condotte imponendo che la traversa della macchina si muova con velocità  $dh/dt$  costante (controllo di spostamento) oppure che la deformazione applicata cresca con velocità  $d\varepsilon/dt$  costante (controllo di deformazione). In alternativa si impone che il carico cresca con velocità  $dF/dt$  costante (controllo di carico).

Il primo caso è quello più frequente e la velocità di spostamento della traversa (o del pistone) è spesso imposta dalle normative.

Una prima osservazione del diagramma permette di distinguere due categorie di materiali: i *duttile* (fig.2a), che giungono a rottura con ampi valori di deformazione (acciai, alcuni polimeri ecc...) e i *fragili* (fig.2b), che giungono a rottura con valori di deformazione limitati (ghise, materiali ceramici, alcuni polimeri).

### Modulo di Young-Coefficiente di Poisson-Limite di proporzionalità

Il primo tratto del grafico  $\sigma$ - $\varepsilon$  è spesso approssimabile ad una retta: in questo caso il materiale presenta un comportamento detto lineare-elastico nel quale le deformazioni misurate sono *direttamente proporzionali* alle tensioni agenti e le deformazioni si annullano al cessare del carico. Il rapporto fra tensione applicata e deformazione è una costante tipica del materiale che prende il nome di *modulo di Young*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (10.3)$$

espresso in MegaPascal. Se si diminuisce il carico, il punto rappresentativo sul diagramma  $\sigma$ - $\varepsilon$  ripercorre il tracciato a ritroso sino all'origine degli assi evidenziando l'assenza di deformazioni residue. Per una maggiore precisione è opportuno che  $E$  sia valutato considerando il rapporto tra le differenze tra tensioni e deformazioni misurate in due punti distanti sul tratto rettilineo del grafico  $\sigma$ - $\varepsilon$ , evitando i punti troppo vicini all'origine degli assi e al valore di snervamento (ad es. i punti con tensione pari al 10% e al 50% della tensione massima della prova). Una stima più precisa può essere ottenuta effettuando una regressione lineare su tutti i valori del tratto lineare compresi tra due punti opportuni.

In altri casi non vi è una regione lineare ben definita e il concetto di modulo di Young deve essere considerato con cautela. In alcuni casi si considera il *coefficiente angolare della retta tangente alla curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  nell'origine*.

Com'è noto, sempre in campo elastico, applicando una tensione monoassiale longitudinale, oltre alla deformazione longitudinale imposta, si verifica una contrazione trasversale ad essa proporzionale, misurabile dalla variazione del diametro del provino. La costante di proporzionalità tra le deformazioni è il coefficiente di Poisson (valore positivo) che può essere valutato misurando la deformazione trasversale e utilizzando la relazione

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} = -\frac{(d-d_0)/d_0}{\varepsilon} \quad (10.4)$$

Le costanti  $E$  e  $\nu$  sono definite *costanti ingegneristiche*, in quanto direttamente ricavabili dalle prove meccaniche.

A un certo valore della tensione, il *limite di proporzionalità*  $\sigma_p$ , la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  comincia a deviare dalla linea retta come nel punto A delle figg.2a e 2c; oltre questo valore il materiale può essere ancora elastico, ma non obbedisce più alla legge lineare di Hooke. Per molti materiali è possibile aumentare la tensione oltre il limite di proporzionalità sino a un valore di tensione detto *limite elastico* (punto B di fig.2c) senza che si abbiano deformazioni residue permanenti (misurabili, cioè, quando il carico viene riportato a zero). È difficile ottenere questo valore dai diagrammi di trazione, in quanto sarebbe necessario che il provino venisse scaricato di volta in volta per misurare la deformazione residua.

### Tensione di snervamento-Tensione di rottura

Per molti materiali si nota un valore di tensione in corrispondenza del quale la deformazione comincia ad aumentare molto rapidamente senza un equivalente incremento di tensione. Tale tensione è definita *tensione di snervamento*  $\sigma_s$  (punto C in fig.2c) e caratterizza il passaggio del materiale dallo stato elastico a quello plastico. Le deformazioni plastiche sono permanenti: all'azzeramento del carico il comportamento del materiale è descritto da una retta parallela a quella relativa al comportamento elastico con pendenza pari al modulo di Young (fig.2c). Tale retta, ovviamente, interseca l'asse delle ascisse (tensione nulla) a un valore di deformazione maggiore di zero.

Per i materiali duttili il punto di snervamento s'identifica facilmente grazie al fatto che, in corrispondenza ad esso, la tensione rimane quasi costante, come in fig.2c nel diagramma a tratto continuo. In qualche caso, come in fig.2c, linea a punti, la pendenza della curva assume valore negativo per un breve intervallo e si parla di snervamento *superiore* e *inferiore*. Superato tale punto, la rottura avviene dopo una deformazione irreversibile molto maggiore di quella elastica. La deformazione plastica nei materiali duttili è legata a scorrimenti tra i piani atomici e cristallini provocati dalle *tensioni tangenziali*. Tali scorrimenti avvengono particolarmente lungo piani che inclinati di circa 45° rispetto alla direzione della tensione normale dovuta alla trazione, dove insiste la *massima* tensione tangenziale. Per un acciaio duttile il provino mostra una contrazione della sezione, detta *strizione*, chiaramente visibile in corrispondenza della zona nella quale si ha lo snervamento. La maggior parte dell'allungamento si verifica in corrispondenza della zona interessata dalla strizione e non coincide con il valor medio sul tratto del provino tra gli afferraggi ottenuto dalla misura di  $\Delta h$ .

All'aumentare della deformazione si verifica la *rottura del provino*. Tipicamente la superficie della sezione di rottura dei materiali duttili presenta dei piani inclinati di circa 45° rispetto alla direzione della trazione, poiché, come detto, i massimi scorrimenti avvengono lungo tali piani. La tensione corrispondente è detta *tensione di rottura*  $\sigma_r$ . Paradossalmente, per molti materiali, inclusi gli acciai, la tensione nominale di rottura non è la massima del diagramma. Ciò è dovuto al fatto che, alla rottura, la sezione resistente diminuisce sensibilmente a causa della strizione e il carico richiesto per l'ulteriore deformazione diminuisce. In conseguenza di ciò, mentre la tensione reale globalmente aumenta, poiché è data dal rapporto tra forza applicata e sezione reale, la tensione nominale diminuisce a causa del minore carico richiesto. In questi casi, come tensione di rottura, si utilizza il *valore massimo della tensione nominale* letto sul diagramma.

Per i materiali fragili non si nota una brusca variazione della pendenza nel diagramma tensioni- $\sigma$ - $\epsilon$ , per cui la tensione di snervamento non è facilmente identificabile. In questo caso, convenzionalmente, si utilizza il valore della tensione (punto A di fig.2b) che si ottiene dall'intersezione tra il diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  e una retta parallela al tratto rettilineo del diagramma stesso, spostata di un valore di deformazione prefissato, usualmente pari 0.001÷0.002 (o 0.1÷0.2%), che deve essere indicato (es.  $\sigma_{s0.2}$ ). Superato lo snervamento, la rottura avviene senza ulteriore apprezzabile deformazione. La sezione di rottura dei materiali fragili appare piana e ortogonale alla direzione di trazione, in quanto la rottura avviene per l'improvvisa propagazione di una frattura in un piano ortogonale alla *massima tensione normale agente*.

### **Deformazioni e tensioni reali**

La *tensione reale* è definita semplicemente dal rapporto tra la forza applicata e l'area della sezione corrente (deformata) del provino A:

$$\sigma_R = F/A \quad (10.5)$$

Come già detto la tensione reale risulta generalmente maggiore di quella nominale poiché generalmente è  $A < A_0$  a causa della strizione. Sperimentalmente si osserva, inoltre, che la tensione reale cresce sempre durante la prova.

Come visto precedentemente, le deformazioni nominali sono valori medi rispetto alla lunghezza di riferimento  $e$ , per la loro valutazione, l'allungamento complessivo  $\Delta L$  viene riferito alla lunghezza iniziale  $L_0$ . In realtà l'allungamento complessivo  $\Delta L$  può essere visto come la somma di incrementi istantanei di lunghezza  $dL_i$  ciascuno dei quali avviene mentre il provino ha lunghezza istantanea  $L_i$  maggiore di quella iniziale. La deformazione reale istantanea è data dal rapporto  $dL_i/L_i$  e la deformazione totale all'istante *iesimo* è data dall'integrale di tale rapporto tra la configurazione iniziale e quella nell'istante considerato:

$$\epsilon_R = \int_{L_0}^L \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (10.6)$$

Introducendo  $L=L_0+\Delta L$  nella (6), si può mostrare che sussiste la seguente relazione:

$$\epsilon_R = \ln(\epsilon + 1) \quad (10.7)$$

In campo elastico le tensioni e deformazioni reali risultano praticamente coincidenti, mentre in campo plastico le deformazioni reali ottenute dalla (7) sono inferiori a quelle nominali. È bene notare che la (7) è utilizzabile solo in assenza di strizione, perché nella definizione di deformazioni reali (6) devono essere introdotti gli allungamenti locali della sola zona soggetta a deformazione e non quelli relativi a tutta la lunghezza utile del provino o alla base di misura dell'estensometro. Per questo motivo, a dispetto della (7), le deformazioni reali nei materiali duttili risultano maggiori di quelle nominali.

Poiché gli allungamenti reali nella zona deformata sono difficili da misurare è spesso necessario sfruttare la costanza del volume del materiale in campo plastico. Trascurando le modeste variazioni di volume dovute alla deformazione elastica, la costanza del volume del provino può essere espressa dalla seguente relazione

$$A_0 L_0 = A L \quad (10.8)$$

dalla quale è possibile ricavare l'espressione della area della sezione istantanea del provino:

$$A = A_0 L_0 / L \quad (10.9)$$

Utilizzando queste espressioni è possibile scrivere le seguenti relazioni tra tensioni e deformazioni nominali e reali:

$$\sigma_R = \sigma(\varepsilon + 1) \quad \varepsilon_R = \ln A_0 / A = \ln d_0 / d \quad (10.10,11)$$

### **Altre proprietà deducibili dalla prova di trazione: Duttilità/Malleabilità - Resilienza - Tenacità**

#### **Duttilità/Malleabilità**

La *duttilità* è la capacità di un materiale di assorbire deformazioni anelastiche senza rompersi. A parità di resistenza e durezza, i materiali più duttili sono più adatti ad assorbire sovraccarichi e ad essere lavorati a freddo per deformazione plastica.

La duttilità viene quantificata mediante la *deformazione al momento della rottura*:

$$\varepsilon_r = \frac{L_r - L_0}{L_0} \quad (10.12)$$

ottenuta sul diagramma  $\sigma$ - $\varepsilon$ , o mediante l'*allungamento percentuale* = 100  $\varepsilon_r$ .

Usualmente si ammette che al di sotto del 5% di allungamento il materiale sia *fragile*, al di sopra *duttile* (fig.2a,b). Per una valutazione più realistica della duttilità, l'allungamento del materiale può essere misurato con un estensometro.

Una misura alternativa della duttilità è data dalla riduzione percentuale della sezione, chiamata *%RA*:

$$\%RA = 100 \frac{A_0 - A_r}{A_0} = 100 \frac{d_0^2 - d_r^2}{d_0^2} \quad (10.13)$$

L'analogia grandezza misurata mediante una prova di compressione viene definita *malleabilità*; i materiali malleabili sono adatti ad essere lavorati per deformazione plastica per ottenere lastre.

#### **Resilienza – Tenacità a trazione**

L'energia totale di deformazione immagazzinata nel volume  $V$  del provino nell'istante  $i$  di prova (pari al lavoro compiuto dalla forza applicata) è data dalla seguente espressione:

$$U_i = \int_V \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon dV \approx V \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon \quad (10.14)$$

In campo elastico esso è pari al lavoro compiuto dalla forza applicata sul provino, mentre in campo plastico una grande quantità di questo lavoro è dissipato in forma di calore.

La *resilienza* è la capacità di assorbire energia nel campo elastico. Il modulo di resilienza è l'energia di deformazione ad unità di volume immagazzinata nel materiale quando la tensione è al limite di proporzionalità; ponendo  $V=1$ ,  $\sigma=\sigma_p$  e considerando che in campo elastico  $\varepsilon_p=\sigma_p/E$  si ottiene:

$$U_p = \frac{\sigma_p^2}{2E} = \frac{1}{2} F_p \Delta h_p \quad (10.15)$$

In fig.2d il punto A rappresenta la  $\sigma_p$  e l'area tratteggiata rappresenta l'energia  $U_{res}$ . La resilienza risulta elevata per alti valori della  $\sigma_p$  e bassi valori di  $E$ .

La *tenacità* a trazione (da non confondere con la *tenacità a frattura*) è la capacità di assorbire energia prima della rottura. Essa si quantifica misurando l'energia di deformazione totale alla rottura rappresentata da tutta l'area sottesa dalla curva  $\sigma$ - $\varepsilon$ .

Se la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  è tendenzialmente piatta dopo il valore di snervamento, come accade per i materiali duttili, una buona approssimazione dell'energia è data da questa espressione:

$$U_{ten} = \frac{\sigma_s + \sigma_r}{2} \varepsilon_r \quad (10.16)$$

In materiali fragili per i quali la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  ha un andamento parabolico si può utilizzare la seguente espressione:

$$U_{ten} \approx \frac{2}{3} \sigma_r \varepsilon_r \quad (10.17)$$

#### **Prova di Compressione**

Vari materiali impiegati nella costruzione di elementi meccanici hanno proprietà differenti se sottoposti a trazione o a compressione. Tipicamente i materiali fragili hanno un carico di rottura a compressione nettamente superiore a quello di trazione. Si deve ricordare che le tensioni di trazione tendono a fare propagare le discontinuità nel materiale (fratture, difetti) mentre quelle di compressione tendono a chiuderle.

I provini di compressione hanno geometrie diverse da quelli di trazione, infatti, se il provino è troppo lungo si può indurre una flessione spuria o si può verificare un caso d'instabilità, se è corto, l'attrito alle estremità può rendere lo stato di tensione più complesso di quello monoassiale necessario per la determinazione della curva sforzi-deformazioni. Il compromesso migliore si raggiunge con provini cilindrici con rapporto  $l/d \approx 3$ .

Nel caso di materiali duttili la tensione di rottura in compressione non può essere determinata poiché nella regione plastica l'incremento della superficie diminuisce notevolmente la tensione agente a parità di carico applicato. Ancora, all'aumentare del carico il materiale si schiaccia e tende a ridursi ad un disco piatto; in definitiva, a differenza della trazione, non vi è un valore di tensione ben definito nel quale si ha una variazione di sezione. I risultati delle prove sono rappresentati da un diagramma tensione-deformazione in modo simile alle prove di trazione. Le prove di trazione e compressione devono essere eseguite separatamente, diversamente si assume che il materiale ha la stessa resistenza nei due casi.

### Prova di flessione

La prova di flessione permette di determinare il modulo di Young e stimare la tensione di rottura di materiali fragili; tale tensione deve essere indicata come tensione di rottura a flessione  $\sigma_{rf}$ . Nella prova a tre punti i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati al centro da un cuneo solidale alla traversa mobile della macchina. Nella prova a quattro punti la traversa mobile spinge due cunei disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria del provino. Nel corso della prova si misurano lo spostamento della traversa  $Y$ , coincidente con la freccia in mezzeria, e il carico applicato  $F$ .

La prova di flessione presenta i seguenti vantaggi:

- semplicità d'afferraggio ed esecuzione,
- semplice geometria del provino generalmente a sezione rettangolare,
- spostamenti ampi di misurazione più precisa.

Poiché la tensione varia linearmente lungo lo spessore, lo snervamento viene raggiunto inizialmente solo in un sottile strato superficiale; superato il campo elastico, inoltre, gli spostamenti misurati non possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni e l'unica informazione utile è la forza a rottura  $F_r$ . La prova di flessione risulta, quindi, poco sensibile per la determinazione dell'inizio dello snervamento ed è adatta alla caratterizzazione di materiali fragili con comportamento lineare.

La geometria del provino (fig.3) è descritta dai seguenti parametri:

- $l$ =lunghezza utile (la parte tra gli appoggi),
- $b$ =larghezza della sezione,
- $h$ =altezza della sezione.

La tensione massima agisce in mezzeria sulla superficie del lato teso ( $x=l/2, y=h/2$ ). Nel caso di flessione a tre punti essa può essere espressa mediante la formula di Navier come segue:

$$\sigma = \frac{h M}{2 I} = \frac{h Fl/4}{2 b h^3/12} = \frac{3 l}{2 b h^2} F \quad (10.18)$$

Introducendo  $F_r$  nella (18) si ottiene la tensione di rottura a flessione del materiale.

La deformazione massima, a sua volta, può essere espressa in funzione della freccia nel seguente modo (vedi appendice):

$$\varepsilon = 6 \frac{h}{l^2} Y \quad (10.19)$$

In teoria il modulo di Young potrebbe essere valutato con una qualsiasi coppia di valori  $F, Y$  misurati in campo elastico mediante la seguente relazione

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F}{Y} \quad (10.20)$$

Una migliore precisione può essere ottenuta utilizzando due punti sperimentali nel seguente modo:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{\Delta F}{\Delta Y} \quad (10.21)$$

In particolare, utilizzando i punti  $F_1=F_r/10, Y_1$  e  $F_2=F_r/2, Y_2$  si ottiene

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F_r/2 - F_r/10}{Y_2 - Y_1} \quad (10.22)$$

da cui

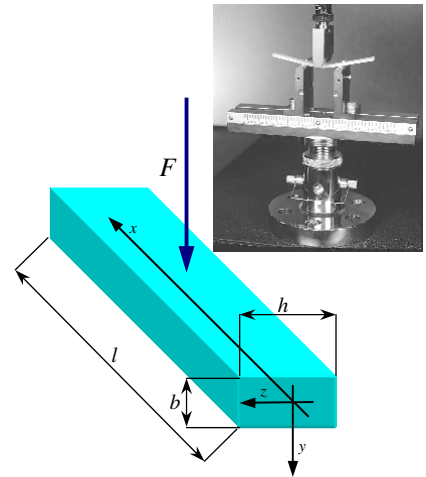


Fig.10.3 - Il provino di flessione.



$$E = \frac{1}{10} \frac{l^3}{bh^3} \frac{F_r}{Y_2 - Y_1} \quad (10.23)$$

Le (20) e (21) possono essere riscritte utilizzando la pendenza  $K$  della retta  $F(Y)$  che descrive l'andamento del carico in funzione della freccia in campo elastico

$$K = F/Y = \Delta F/\Delta Y \quad (10.24)$$

ottenendo

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3}{bh^3} K \quad (10.25)$$

Questa relazione permette di calcolare  $E$  nel caso in cui  $K$  può essere stimato dai dati sperimentali  $F-Y$  nella zona lineare, ad esempio mediante una regressione lineare.

### Prove di Durezza

La *durezza* è l'attitudine degli strati superficiali di un materiale a resistere all'indentazione (creazione di una impronta sulla superficie), alla scalfittura, all'abrasione e alla deformazione per compressione.

La durezza si determina creando un'impronta sulla superficie del materiale mediante un elemento penetratore (*indentatore*), che viene pressato ortogonalmente alla superficie in modo statico con un valore di carico  $F$  prefissato, e misurando una dimensione caratteristica dell'impronta stessa. Esistono vari metodi (Brinell, Rockwell, Vickers e Knopp) che si differenziano per la forma del penetratore e per il modo di misurare l'impronta. Le prove di durezza non sono distruttive e possono essere eseguite direttamente sul componente.

#### **Durezza Brinell**

La prova di durezza Brinell viene effettuata con una sfera con diametro  $D=10\text{mm}$  e carichi  $F$  pari a 500, 1500 o 3000 Kg applicati per un periodo superiore a 15 sec. La durezza Brinell  $Hb$  è espressa con un numero risultante dal rapporto tra il carico e l'area dell'impronta costituita da un segmento di sfera di diametro  $d$  in millimetri, ottenuto mediante la seguente equazione:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (10.26)$$

Il numero di durezza Brinell può essere usato per ottenere una stima della resistenza a trazione degli acciai o delle ghise; rispettivamente si ha:

$$\sigma_r = 3.1Hb \quad \sigma_r = 1.58Hb - 86 \quad (10.27,28)$$

con le tensioni espresse in MPa.

#### **Durezza Rockwell**

La prova di durezza Rockwell viene effettuata con due diversi tipi di indentatori e vari valori di forza. Le combinazioni danno luogo a diverse scale di misura (tab.3) e i valori ottenuti possono essere confrontati solo se appartengono alla stessa scala.

La grandezza che viene misurata nella prova Rockwell è la profondità di penetrazione  $h$  determinata come differenza tra l'affondamento  $h_1$  ottenuto ad un valore di carico iniziale, detto *carico minore* pari a 10kg, e l'affondamento  $h_2$  ottenuto al carico di prova finale, detto *carico maggiore*.

Gli indentatori sono un diamante conico con angolo al vertice di  $120^\circ$  (indentatore di Brale) e sfere con diametri tra 1.588 e 12.7 mm. I carichi variano tra  $F=60\text{Kg}$  e  $F=150\text{Kg}$ . Le combinazioni, le sigle delle scale e i campi di applicazione sono riassunte in tab.3.

Il valore della durezza si ottiene mediante la seguente relazione

$$HRX = Max - \frac{h}{0.02} \quad (10.29)$$

nella quale ad  $X$  deve essere sostituita la lettera relativa alla scala e  $Max$  è il valore massimo della scala stessa. Lettere e valori di fondo scala sono mostrati in Tab.3.

Scala X	Indentatore	Carico [kg]	Max	Applicazione
A	Brale	60	100	Materiali per utensili
B	Brale	100	130	Ghise, lastre metalliche
C	Brale	150	100	Acciai, leghe di alluminio, ghise dure
D	1.588	100	100	Acciai teneri, leghe di alluminio e rame
E	3.175	100	130	Metalli teneri, polimeri rinforzati
M	6.350	100	130	Metalli molto teneri, polimeri con alto modulo
R	12.70	60	130	Metalli molto teneri, polimeri con basso modulo

Tab.10.3 - Scale di durezza Rockwell.

### Proprietà alle alte temperature e scorrimento (creep)

Le proprietà meccaniche dei materiali, che vengono ordinariamente determinate a temperatura ambiente, subiscono notevoli variazioni al variare della temperatura stessa. Frequentemente gli elementi di macchina operano a temperature differenti da quella ambiente; ad esempio componenti metallici di aerei e macchine sottomarine spesso lavorano a temperature inferiori allo zero, mentre componenti di turbine a gas operano a temperature elevate.

#### Proprietà meccaniche al variare della temperatura

In fig.4 sono mostrate le proprietà statiche di un acciaio al variare della temperatura. Gli andamenti sono rappresentativi del comportamento di molti materiali: la resistenza a trazione all'aumentare della temperatura rispetto a quella ambiente raggiunge un valore massimo oltre il quale comincia a diminuire molto rapidamente.

La resistenza degli acciai alle alte temperature può essere aumentata da alcuni elementi in lega, in particolare Mo, Cr, Ni, Mn. Per le basse temperature è utile il Ni.

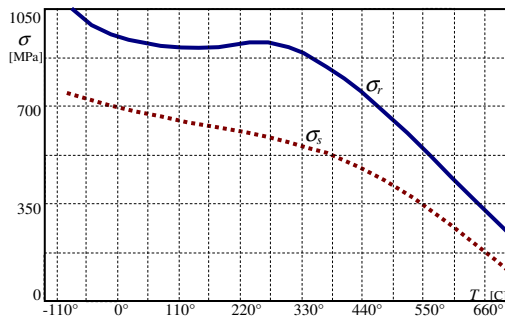


Fig.10.4 - Resistenza degli acciai al variare della temperatura.

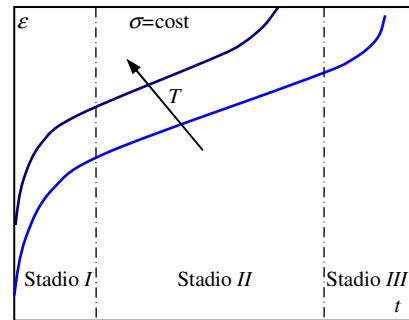


Fig.10.5 - Andamento della deformazione in funzione del tempo  $t$  e della temperatura  $T$ .

### Scorrimento

Si definisce *scorrimento (creep)* la deformazione che si verifica al variare del tempo  $t$  sotto carico costante; spesso tale fenomeno è associato alla presenza di uno stato tensionale in condizioni di temperatura  $T$  elevata. Provini di materiale ferroso (e ceramici cristallini) sottoposti a tensione costante per lunghi periodi di tempo ad elevate temperature, risultano, infatti, deformati permanentemente anche se la tensione effettiva è minore di quella di snervamento alla stessa temperatura. In generale si ha che la deformazione dipende dalla tensione applicata, dalla temperatura e dal tempo, cioè  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma, T, t)$  come in fig.5. Nella progettazione in presenza di scorrimento, la scelta del materiale è un fattore critico: nei metalli sono utili elementi (costosi) in lega come Cr, Ni, e Co, i nuovi materiali ceramici offrono interessanti opportunità di applicazione, mentre i polimeri hanno severe limitazioni di impiego.

La temperatura alla quale inizia lo scorrimento, definita  $T_s$ , è tanto più alta quanto maggiore è la temperatura di fusione  $T_f$  del materiale; tipicamente si ha  $T_s = 0.3 \div 0.6 T_f$ . In pratica, in materiali con bassa temperatura di fusione il fenomeno dello scorrimento si può verificare anche a temperatura ambiente. Per i polimeri si deve considerare la temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  in luogo di quella di fusione. Si dice che un materiale ha temperatura di scorrimento alta se  $T_s > 0.5 T_f$ .

Il meccanismo fisico dello scorrimento differisce molto per le varie classi di materiali. In generale esso è legato al movimento di atomi, molecole, dislocazioni e *vacanze* (difetti nella struttura cristallina dati dall'assenza di atomi in posizioni normalmente occupate), che avviene lentamente con il tempo in presenza di una sollecitazione di trazione e facilitato dalla temperatura elevata. L'insieme di questi fenomeni è detto *diffusione*.

Nei metalli il meccanismo fisico dello scorrimento è legato al flusso delle vacanze che provoca una variazione della geometria del cristallo e contribuisce alla deformazione macroscopica. Nei polimeri, a temperature maggiori di  $T_g$ , le *catene* di molecole slittano una dopo l'altra al variare del tempo (a temperature minori questo meccanismo è reso più difficile da vari fattori).

Il problema del progetto di elementi soggetti ad elevate temperature è quello di evitare che la loro deformazione superi un valore ritenuto accettabile o la rottura. Nel caso di elementi che hanno una breve vita di esercizio l'esecuzione di prove che forniscano le informazioni necessarie non è difficile. In altri casi, poiché non è pratico eseguire prove di durata paragonabile alla vita prevista per l'elemento, i risultati sperimentali devono essere estrapolati in modo da fornire le necessarie informazioni di progetto.

Una prova utile è quella di scorrimento con carico e temperatura costanti, nella quale si assoggettano vari provini ad un differente valore di tensione di trazione per un periodo di tempo che può variare da un minuto a diversi anni; in pratica per ciascuno provino si ha  $\sigma = \text{cost}$ ,  $T = \text{cost}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ . La figura mostra la curva deformazione-tempo tipica di questo tipo di prova. In ciascun punto la pendenza della curva è la *velocità di deformazione o di scorrimento*  $\dot{\varepsilon}'_s$ .

Le curve ottenute esibiscono tre differenti regioni (fig.5):

1. stadio primario o transitorio, nel quale sono presenti sia una deformazione elastica che plastica; esso mostra una velocità di scorrimento decrescente dovuta alla deformazione di incrudimento;
2. stadio secondario o stazionario, che mostra una velocità di scorrimento costante  $\dot{\varepsilon}'_s$  e di valore minimo causato dalla ricottura del materiale;
3. stadio terziario o instabile, nel quale il provino mostra una considerevole riduzione della sezione resistente che provoca un aumento della tensione reale e un aumento della velocità di scorrimento che porta alla rottura.

Le prove di scorrimento sono usualmente estese in modo da completare il primo stadio o da effettuare parte del secondo. All'aumentare della tensione l'ampiezza temporale delle tre fasi diminuisce.

I risultati possono essere riassunti fornendo le seguenti quantità: tensione di prova  $\sigma$ , temperatura  $T$ , velocità di scorrimento stazionario  $\dot{\epsilon}'_s$  e, se raggiunta, tempo alla rottura  $t_r$ .

Questi dati possono essere riassunti in vari diagrammi: per temperatura assegnata, la tensione rispetto alla velocità di deformazione stazionaria  $\sigma-\dot{\epsilon}'_s$  oppure la tensione rispetto al tempo alla rottura  $\sigma-t_r$ .

In alternativa, nei manuali è possibile trovare informazioni sul materiale relativamente a durate pari a 10.000 ore (14 mesi) e 100.000 ore (11 anni) per temperature assegnate. In particolare sono disponibili valori delle tensioni che causano rispettivamente la rottura e una deformazione permanente pari all'1% per le durate citate, come in tab.2.

Se, come è probabile, la durata richiesta a rottura o deformazione  $t_d$  è intermedia fra le due disponibili (10.000 e 100.000 ore), è necessario ricorrere ad una interpolazione che deve essere effettuata in coordinate bilogaritmiche, supponendo che, in tali coordinate, la relazione tra tensione e durata sia lineare.

In alcuni casi può essere necessario limitare la deformazione  $\epsilon_{sr}$  ad un livello diverso da quello assegnato (1%).

La velocità di deformazione può essere considerata costante e pari a

$$d\epsilon/dt = \epsilon_{sr}/t_d \quad (10.30)$$

T [°C]	10.000 ore		100.000 ore	
	$\sigma$	$\sigma_i$	$\sigma$	$\sigma_i$
450	370	260	290	200
500	220	170	150	120
550	105	80	50	40
600	50	30	20	10

Tab. 10.4 - Caratteristiche meccaniche dell'acciaio 14CrMo3 ad elevate temperature ( $\sigma_r=500$  MPa,  $\sigma_i=280$  MPa per  $T$  ambiente).

Materiale	$\alpha$ [ $\epsilon \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	$c_p$ [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	$\kappa$ [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
Vetro	9	840	0,8
Alluminio	24	900	205,0
Magnesio	23		7,8
Titanio	9		21,6
Ottone	19	380	109,0
Rame	17	386	397,0
Ferro	12	460	78,2
Acciai	12	460	16÷50
Tungsteno	4,5		
Ceramici	0,6÷13,5	700÷900	1,2÷155
Polimeri	50÷220	1000÷2000	0,1÷0,5

Tab.10.5 - Proprietà termiche di alcuni materiali.

## Proprietà termiche

### Dilatazione termica

Nei solidi, all'aumentare della temperatura, la distanza tra gli atomi (distanza interatomica) aumenta; questo si traduce in un incremento delle dimensioni. La deformazione conseguente è esprimibile secondo la relazione:

$$\epsilon_{i=x,y,z} = \alpha_i (T - T_0) = \alpha_i \Delta T \quad (10.31)$$

nella quale  $\alpha$  [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ] è il *coefficiente di dilatazione termica*, che può variare con la temperatura,  $T_0$  e  $T$  sono rispettivamente la temperatura iniziale (alla quale il solido si considera indeformato) e quella finale. I materiali isotropi soggetti a variazione di temperatura subiscono una deformazione uguale in tutte le direzioni, hanno, cioè, coefficiente di dilatazione termica uguale in tutte le direzioni.

### Capacità termica

La capacità termica viene quantificata tramite il *calore specifico*  $c_p$  [ $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ], che è la quantità di energia necessaria ad aumentare di un grado la temperatura di una massa di un Kg del materiale a pressione costante.

### Conduttività termica

Nei materiali l'energia termica viene trasportata dai punti a temperatura più elevata a quelli a temperatura più bassa: tale trasporto è definito *conduzione*. Il flusso di calore  $J$  (quantità di calore ad unità di superficie) in un corpo è proporzionale al *gradiente di temperatura* (la derivata della temperatura rispetto allo spazio,  $dT/dx$ ) secondo la seguente espressione

$$J = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad (10.32)$$

nella quale  $\kappa$  [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] è la *conduttività* o *conducibilità termica*.

Da notare che i materiali con maggiore conduttività termica tipicamente appaiono "più freddi" al tatto degli altri, a parità di temperatura.

### Resistenza allo shock termico

Una brusca variazione di temperatura può provocare in un solido elevati gradienti di temperatura ai quali si associano elevati gradienti di deformazione e conseguentemente di tensione. Se tali tensioni superano i valori limite si può verificare la rottura.

La capacità di *Resistenza allo Shock Termico (RST)* è espressa come:

$$RST \cong \frac{\kappa \sigma_r}{\alpha E} \quad (10.33)$$

Dall'eq.(33), è possibile osservare che la *RST* è direttamente proporzionale alla resistenza a rottura (per ovvi motivi) e alla conduttività termica, al crescere della quale cresce la capacità del materiale di smaltire il calore diminuendo il gradiente di temperatura; la *RST* è inversamente proporzionale al coefficiente di dilatazione, al crescere del quale crescono le deformazioni dovute alla variazione di temperatura, e al modulo di Young, al crescere del quale, a parità di deformazione, si hanno tensioni più elevate.

I materiali metallici e il vetro hanno elevati valori di *RST*: i primi perché hanno elevata conduttività termica, mentre il secondo ha un basso coefficiente di dilatazione.

### **Aspetti generali delle prove meccaniche**

Generalmente, nelle prove meccaniche, un provino (o il prototipo di un componente o il componente stesso) viene assoggettato a una o più forze, spesso variabili nel tempo, fino al cedimento. Durante la prova viene misurata la forza applicata e lo spostamento e/o la deformazione di uno o più punti del provino stesso. In alcuni tipi di prove vengono monitorati anche parametri ambientali quali temperatura e umidità o altre caratteristiche del provino quali la dimensione di una frattura. Alcuni dei dati registrati nel corso della prova vengono elaborati (successivamente o nel corso dell'esecuzione) per ottenere grandezze fisiche da essi derivate (ad es. il modulo di Young).

Una classificazione delle prove meccaniche può essere effettuata in base al tempo nel quale il carico di prova viene raggiunto.

### **Prove statiche**

Nelle prove statiche i carichi vengono applicati dai valori minimi ai massimi in tempi che variano dai secondi a pochi minuti. In generale essi vengono fatti crescere in modo monotono dal valore nullo al valore che provoca il cedimento del provino.

Tra le principali prove statiche si annoverano:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. la prova di trazione     | 4. la prova di taglio                      |
| 2. la prova di compressione | 5. la prova di flessione (a 3 e a 4 punti) |
| 3. la prova di torsione     |  |

Queste prove hanno lo scopo di determinare le costanti elastiche o le costanti ingegneristiche del materiale, le caratteristiche di resistenza, e, in alcuni casi, i parametri che caratterizzano il comportamento plastico. A questo scopo, generalmente, nell'applicazione dei carichi si cerca di provocare nel materiale uno stato di tensione monoassiale o puramente tangenziale.

Nei primi 3 casi viene effettivamente applicata solo la sollecitazione che dà il nome alla prova, mentre nel caso del taglio e della flessione spesso risultano presenti altre sollecitazioni con la conseguenza che i dati ottenuti possono essere affetti da approssimazioni. È utile osservare che nel caso delle prove di trazione e flessione e in quello delle prove di taglio e torsione, il materiale è sottoposto, nel punto più sollecitato, allo stesso tipo di tensione, rispettivamente normale e tangenziale. In entrambi i casi i due tipi di prove sono destinati alla determinazione di grandezze simili, ma si differenziano per varie caratteristiche operative.

Tra le prove statiche devono essere considerate

6. le prove di frattura

che si svolgono in modo analogo alle prova di trazione o a quella di flessione, ma nelle quali il provino contiene una frattura prodotta appositamente.

Nelle prove statiche generalmente riveste notevole importanza il fatto che la velocità di applicazione del carico sia contenuta al fine di evitare il destarsi di fenomeni legati al comportamento viscoelastico del materiale.

In realtà, ove possibile, è importante che, nel corso della prova, la *velocità di deformazione* sia mantenuta costante e contenuta, piuttosto che quella della forza, come verrà meglio puntualizzato nel seguito. Generalmente, a questo fine, le normative prescrivono opportune velocità di esecuzione della prova.

### **Prove dinamiche**

Nelle prove dinamiche i carichi vengono applicati in tempi dell'ordine dei millisecondi durante i quali nel materiale si destano effetti dinamici, cioè forze di inerzia dovute all'accelerazione delle masse e forze di natura viscoelastica proporzionali alla velocità di deformazione. Le prove dinamiche più tipiche sono quelle di *impatto*, ma varie prove dinamiche vengono eseguite utilizzando procedure uguali a quelle delle prove statiche con appropriate velocità di applicazione del carico.

Le principali prove di impatto sono quelle di *Charpy* e di *Izod*. In entrambi i casi sul provino viene praticato un un intaglio dal quale si origina la frattura nel corso della prova e il carico è applicato mediante un pendolo oscillante.

Nella prova di Charpy il provino è appoggiato alle estremità e viene impattato nella zona centrale, mentre nella prova di Izod il provino è incastrato da una parte e viene impattato all'estremità libera. La resistenza alla frattura è valutata in base all'energia necessaria alla frattura ed è misurata dall'altezza raggiunta dal pendolo dopo la frattura del provino. I risultati ottenuti con le diverse prove non sono direttamente confrontabili.

### Prove di durata

Nelle prove di durata i carichi vengono applicati per tempi prolungati dell'ordine di ore÷mesi. Le prove di durata più importanti sono

- le prove di fatica (a flessione rotante, a trazione alternata, prove di propagazione della frattura),
- le prove di scorrimento.

Nelle prove di fatica il carico viene fatto variare in modo *ciclico*, fig.6, cioè in modo che la funzione temporale che lo descrive  $F(t)$  presenti una successione di minimi  $v$  (valli) e massimi  $p$  (picchi), ovviamente alternati. Il singolo ciclo è costituito dalla storia di carico compresa tra due valli o due picchi consecutivi ed è caratterizzato dall'ampiezza e dal valor medio definiti rispettivamente come  $a=(p-v)/2$  e  $m=(p+v)/2$ . Il valore degli estremi è tale che le tensioni corrispondenti sono sempre inferiori al valore di rottura e il numero dei cicli applicato è dell'ordine delle centinaia÷decine di migliaia. I cicli vengono ripetuti a frequenze medie dell'ordine dei 30Hz per i metalli e dei 5÷10Hz per i compositi, valori scelti in modo da minimizzare il tempo di prova, ma limitare il riscaldamento dei provini, data la minore conducibilità termica dei compositi.

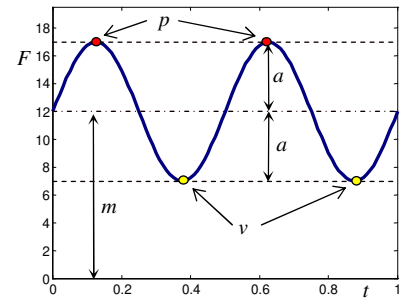


Fig.10.6 - Carico di fatica.

Anche tenendo presente il fatto che nella fatica ad alto numero di cicli le tensioni applicate sono inferiori al limite elastico, le frequenze utilizzate sono tali che gli effetti dinamici possono essere trascurati, per cui le prove di fatica vanno considerate, da questo punto di vista, alla stregua di quelle statiche.

Nelle prove di scorrimento un carico statico viene applicato per settimane÷mesi.

### Altre modalità e tipi di prove

Altre prove meccaniche possono essere effettuate con modalità simili alle precedenti

- variando le condizioni ambientali di prova per simulare le condizioni di esercizio (temperatura, umidità, ambiente aggressivo),
- variando le caratteristiche geometriche del provino introducendo intagli che riproducano i valori del fattore di concentrazione delle tensioni del componente reale.

Altre prove meccaniche vengono effettuate applicando una combinazione di carichi in modo da provocare nel materiale uno stato tensionale multiassiali, di solito biassiale.

### Apparecchiature di carico

Come detto le prove meccaniche richiedono l'applicazione di forze sul provino e, di conseguenza, di un dispositivo apposito. La maggior parte delle prove meccaniche viene effettuata mediante le cosiddette *macchine di prova universali* (fig.7). In tali macchine, parti del provino (le estremità o punti della superficie) vengono fissate (o appoggiate) ad una *parte fissa* e ad un *elemento mobile* della macchina mediante appositi *afferraggi* e il carico viene applicato facendo traslare la parte mobile mediante un opportuno *meccanismo di movimento*.

Generalmente, durante la prova, il carico applicato e lo spostamento della traversa vengono misurati mediante appositi *trasduttori* e visualizzati su *indicatori* posti sul *pannello di controllo* della macchina. In molti casi viene misurata la deformazione di uno o più punti del provino mediante altri trasduttori le cui letture possono essere effettuate su indicatori posti sulla macchina o esterni.

### Macchine di prova universali

Nelle macchine universali di prova (fig.7) si distinguono, quindi

- la parte fissa, costituita dal telaio,
- l'elemento mobile (traversa o pistone attuatore),
- il meccanismo di movimento con velocità regolabile (elettromeccanico o idraulico, es. pompa),
- gli afferraggi,
- il pannello di controllo.

Le caratteristiche meccaniche di maggiore interesse di una macchina sono il *carico massimo* che può essere applicato (o *portata*), la *velocità massima di applicazione del carico* e lo *spostamento massimo (corsa)* dell'elemento mobile. Altre caratteristiche interessanti sono le possibilità di controllo, la sicurezza operativa, l'ingombro e l'economicità.

Le macchine di prova universali vengono distinte in base all'elemento motore in *elettromeccaniche* e *servoidrauliche*. Nelle prime il meccanismo di movimento è un motore elettrico collegato alla traversa mobile tramite ingranaggi; nelle seconde è una pompa idraulica dalla quale il fluido in pressione viene fatto fluire in cilindro in modo da spingere il *pistone attuatore* (o semplicemente *attuatore*); controllando la portata del fluido tramite una valvola si applica la forza desiderata. Per macchine di elevata portata e capacità dinamica, la pompa risulta essere tanto molto ingombrante e rumorosa da necessitare la collocazione in un locale separato dalla macchina. I due tipi di macchine hanno caratteristiche sovrapponibili per alcuni aspetti e complementari per altri; entrambi sono adatti a compiere prove statiche nelle quali, tuttavia, le macchine elettromeccaniche hanno una maggiore semplicità e sicurezza operativa.

MACCHINE Caratteristiche tipiche	Elettromeccaniche	Servoidrauliche
Portata $P$	$P < 4 \text{ KN}$	$P > 20 \text{ KN}$
Corsa massima $c_m$	$c_m > 500 \text{ mm}$	100+200 mm
Carichi statici	***	**
Carichi dinamici	NO	SI
Possibilità di controllo	*	***
Sicurezza	***	*
Ingombro	***	*

Tab.10.6 - Caratteristiche delle macchine di prova elettromeccaniche e servoidrauliche.

Le caratteristiche tipiche dei due tipi di macchine sono poste a confronto in tab.6, nella quale il maggior numero di asterischi implica sempre un aspetto vantaggioso.

Le macchine elettromeccaniche generalmente hanno corse dell'elemento mobile molto più lunghe, mentre la velocità di applicazione del carico è generalmente inferiore a quella delle servoidrauliche. Le macchine elettromeccaniche non si prestano alle prove dinamiche e a quelle di fatica, al contrario delle servoidrauliche.

Le macchine servoidrauliche generalmente sono costruite per portate elevate, maggiori di 20KN, di conseguenza se si effettuano prove statiche con bassi livelli di carico le macchine elettromeccaniche risultano più convenienti.

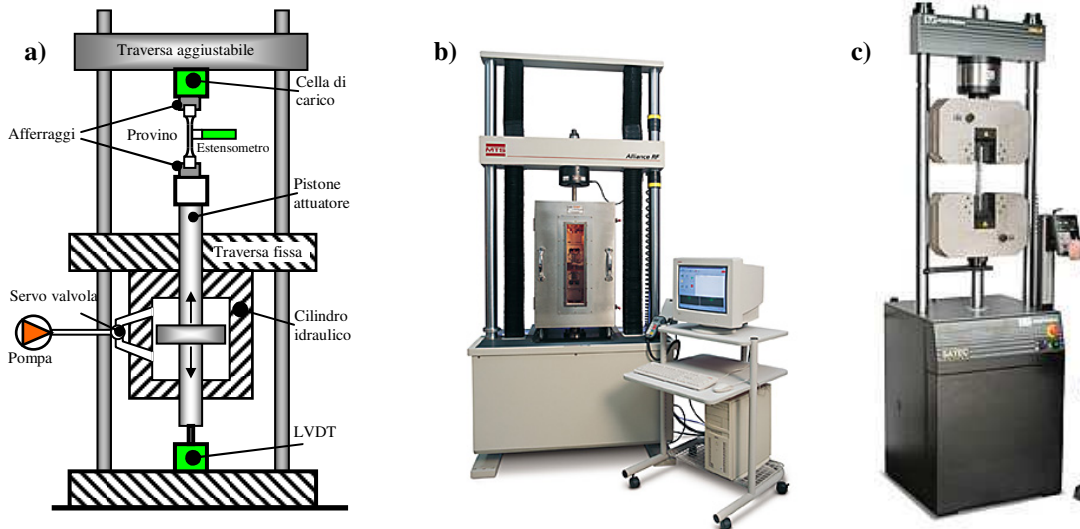


Fig.10.7 - Macchine di prova universali: a) schema, b) elettromeccanica MTS, c) servoidraulica Instron.

### Controllo del carico applicato

Come precedentemente detto, il carico viene trasmesso al provino dall'elemento mobile della macchina tramite gli afferraggi, e, in pratica, nell'esecuzione viene controllato proprio lo spostamento della traversa o dell'attuatore.

Poiché la forza applicata, lo spostamento e, in alcuni casi, la deformazione vengono costantemente misurati, il movimento della traversa/attuatore può essere effettuato in controllo di:

- spostamento,
- carico,
- deformazione.

La traversa (o l'attuatore) viene movimentata in modo che nei tre casi, rispettivamente, la posizione  $h$  della traversa stessa, la forza applicata  $F$  e la deformazione misurata in un punto del provino  $\varepsilon$ , seguano una funzione imposta  $f(t)$ .

Nelle macchine più sofisticate è possibile imporre che la variabile controllata esegua delle funzioni del tempo complesse quali sinusoidi o successioni di rampe a pendenza differente utili per le prove di fatica o per effettuare misure a vari livelli di carico.

Nel caso delle prove statiche, tipicamente, le variabili controllate ( $h$ ,  $F$ ,  $\varepsilon$ ) seguono una funzione temporale costituita da una rampa a pendenza costante, cioè nei tre casi si ha

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} = \text{cost} \quad \dot{F} = \frac{dF}{dt} = \text{cost} \quad \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \text{cost} \quad (10.34-36)$$

Poiché nelle prove statiche, per evitare l'innescio di forze viscoelastiche, è importante che la velocità di deformazione nel materiale sia mantenuta entro valori accettabili, spesso imposti dalle norme, è utile vedere che relazione esiste tra tale velocità e le velocità di applicazione di spostamento e carico nei rispettivi casi.

Nel caso di controllo di spostamento, l'allungamento del provino coincide con lo spostamento della traversa/attuatore, si ha cioè  $\Delta L = \Delta h$ . Ricordando la classica definizione di deformazione nominale, si ha:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{1}{L_0} \dot{h} \quad (10.37)$$

essendo  $L_0$  la lunghezza iniziale del tratto di misura sul provino ed  $L$  la lunghezza durante la prova. Da questa espressione si ottiene

$$\dot{h} = L_0 \dot{\epsilon} \quad (10.38)$$

In campo lineare la (38) consente di calcolare la velocità da imporre alla traversa per ottenere la velocità di deformazione desiderata.

Si deve notare che se si verifica lo snervamento nel materiale, la deformazione si concentra in una zona limitata del provino di lunghezza  $L_1 \ll L_0$ ; anche se l'allungamento complessivo  $\Delta L = \Delta h$  dipende dalla deformazione di tutto il tratto  $L_0$ , dopo lo snervamento il contributo delle zone non snervate risulta trascurabile per cui si può considerare  $\Delta L_1 \approx \Delta L = \Delta h$ . La velocità di deformazione nella zona sottoposta a snervamento risulta quindi

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{1}{L_1} \dot{h} > \frac{1}{L_0} \dot{h} \quad (10.39)$$

molto maggiore di quella in campo elastico, per cui è necessario settare velocità della traversa molto minori di quella prevista dalla (38).

Nel caso la prova sia effettuata in controllo di carico la relazione tra velocità di deformazione e di carico è la seguente

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \frac{\sigma}{E} = \frac{d}{dt} \frac{F}{AE} \quad (10.40)$$

Nel caso di comportamento lineare del materiale, nel quale  $E$  è costante e la variazione di  $A$  può essere trascurata, l'espressione (40) diventa

$$\dot{\epsilon} = \dot{F} / AE \quad (10.41)$$

dalla quale si ottiene

$$\dot{F} = AE \dot{\epsilon} \quad (10.42)$$

In fig.8 è mostrato l'andamento qualitativo delle grandezze meccaniche presenti nelle (40) e (41) dopo lo snervamento: a causa della progressiva riduzione della sezione del provino  $A$  per la strizione, a parità di  $dF/dt$ , la tensione aumenta più velocemente rispetto al campo elastico, inoltre  $E$  diventa una funzione decrescente di  $\epsilon$ . Questi fenomeni fanno sì che la velocità della deformazione risulti notevolmente maggiore rispetto a quella prevista dalla (42). Anche in questo caso è necessario settare velocità di esecuzione minori di quelle previste in campo elastico.

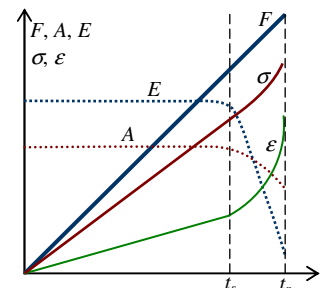


Fig.10.8 - Andamento qualitativo delle grandezze meccaniche nel corso di una prova in controllo di carico.

### Afferraggi

Gli afferraggi (fig.9) hanno lo scopo di trasmettere la forza dalla macchina al provino: lo sforzo può essere trasmesso *tangenzialmente* alla superficie del provino per attrito o *normalmente* per pressione.

Nel primo caso, come nelle prove di trazione o alcune prove di compressione, il provino viene stretto in ciascun afferraggio tra due superfici (ammorsato). L'ampiezza della superficie di contatto, le caratteristiche di tali superfici su afferraggi e provini e la pressione applicata determinano l'efficacia dell'ammorsaggio.

Nel secondo caso, come in alcune prove di compressione e quelle di flessione, il carico viene trasmesso dall'estremità dell'afferraggio per pressione sulla superficie del provino. Nel caso delle prove di flessione, in particolare, il provino viene appoggiato su un apparato che fornisce due appoggi con distanza regolabile e viene poi pressato da un cuneo cilindrico o da una coppia di cunei solidali alla traversa mobile. Anche nelle prove di trazione la forza può essere

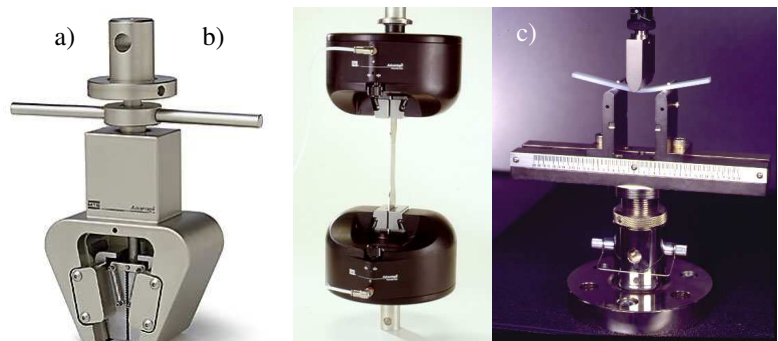


Fig.10.9 - Afferraggi: a) MTS meccanico, b) MTS pneumatico, c) Instron per flessione.

trasmessa al provino per pressione, tramite perni, attraverso fori effettuati sul provino.

Esistono numerosi tipi di afferraggi per la trasmissione di forze tangenziali, ma essi possono essere distinti in meccanici e pneumatici; nei primi il serraggio viene effettuato stringendo manualmente un meccanismo a vite mentre in quelli pneumatici viene effettuato tramite la pressione dell'aria o di un fluido. Naturalmente in quest'ultimo tipo di afferraggi, nettamente più costosi, la pressione può essere controllata per ottenere la forza di serraggio richiesta.

Le superfici degli afferraggi destinate al contatto con il provino sono generalmente seghettate e le superfici dei provini devono essere ben pulite.

L'ammorsaggio del provino in molti casi è l'operazione più critica della prova. I più comuni problemi sono lo slittamento del provino negli afferraggi e la rottura in corrispondenza della zona di ammassaggio.

Lo slittamento accade più frequentemente utilizzando morse meccaniche azionate a vite con superfici piatte.

La rottura all'afferraggio accade quando il campione dentro le morse è danneggiato da eccessive forze di serraggio o da superfici seghettate che incidono troppo profondamente. Quando si riscontrano problemi di afferraggio è comunque importante sperimentare; spesso il risultato voluto (assenza di scivolamento e rottura da ammassaggio) viene raggiunto in modo incidentale.

#### Soluzioni per il problema dello slittamento

- La superficie dell'afferraggio dovrebbe essere abbastanza larga da coprire tutta l'estensione del provino ad esso destinata.
- Si può coprire la superficie con nastro adesivo o vari gradi di carta smerigliata.
- Si possono utilizzare differenti superfici di contatto; ad esempio una piana, una coperta di gomma e una seghettata.
- Nelle prove ad elevata temperatura è preferibile usare facce rivestite di materiale di copertura dei freni piuttosto che gomma.

#### Soluzioni per il problema della rottura all'afferraggio

- Nelle morse a vite l'operatore potrebbe applicare una forza eccessiva durante il serraggio. Utilizzare una chiave dinamometrica o passare a morse pneumatiche.
- Usando morse pneumatiche, abbassare la pressione mantenendosi appena al di sopra del valore che causa lo scivolamento.
- Usando superfici seghettate, passare a superfici aventi più dentelli per unità di superficie meno profondi.
- Usando superfici seghettate, coprire con nastro adesivo o materiali simili. Questo attenuerà il morso prevenendo il danneggiamento del provino.

#### Altri problemi di ammassaggio

Altri problemi legati all'ammorsaggio dei provini riguardano l'allineamento del provino con gli afferraggi in modo che le forze agiscano lungo una sola retta d'azione e l'introduzione di forze spurie a causa dei vincoli imposti per l'ammorsaggio.

Il problema più importante delle prove di compressione è dato dall'instabilità elastica. Esso viene risolto con la riduzione del rapporto sezione/lunghezza nel provino e con l'uso di dispositivi di supporto alcuni dei quali, descritti nelle normative, costituiscono l'elemento caratterizzante della prova.

#### Altre apparecchiature di carico

Come detto la determinazione delle caratteristiche di resistenza a fatica richiede l'applicazione di tensioni variabili nel tempo tra valori minimi e massimi prefissati. Un modo pratico per ottenere questo scopo è quello di sottoporre il provino alla cosiddetta *flessione rotante* mediante una apposita macchina, chiamata *macchina di Moore*, schematizzata in fig.10. In pratica il provino, collegato alla macchina e al carico tramite cuscinetti a rotolamento, viene posto in rotazione. Ciascun punto della superficie esterna del provino (es. P in figura) si sposta lungo una circonferenza e viene sottoposto ad una storia di tensione sinusoidale poiché il carico mantiene direzione costante. Il sistema di carico, inoltre, è tale da rendere nullo l'effetto del taglio lungo il tratto di misura.

Questa metodologia di prova non è adatta ai materiali composti.

La prova è descritta dettagliatamente nel capitolo sulla fatica.

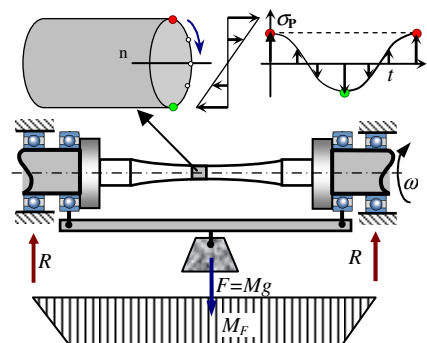


Fig.10.10 - Rappresentazione schematica della macchina di Moore.

#### Apparati di misura e dispositivi

Come già detto durante le prove meccaniche la forza applicata e lo spostamento e/o la deformazione di uno o più punti del provino/prototipo mediante appositi trasduttori che traducono le grandezze meccaniche in segnale elettrico.

I trasduttori sono caratterizzati dai seguenti parametri:

- la *risoluzione*, cioè la *variazione minima* della grandezza che il trasduttore è in grado di misurare,
- il *valore di fondo scala*, cioè il *valore massimo* della grandezza che il trasduttore è in grado di misurare,
- l'*incertezza*, cioè la semiampiezza dell'intervallo attorno al valore letto sullo strumento entro cui il *valore reale* è compreso col 95% di probabilità.



## Forza

La forza viene misurata con un trasduttore denominato *cella di carico* collegata ad uno degli afferraggi. Esso è costituita da un elemento elastico la cui deformazione sotto l'azione del carico viene misurata, in un modo descritto nel seguito, da estensimetri opportunamente disposti. Dal valore della deformazione si ricava la tensione agente e da essa il carico applicato.

La cella di carico è caratterizzata fundamentalmente dal valore di fondo scala o *capacità*, cioè dal carico massimo che può sopportare. Se si effettuano prove a valori della forza inferiori al 20% della capacità della cella può essere opportuno passare ad una cella di minore capacità, mentre se le prove vengono effettuate a valori inferiori al 2% della capacità della cella l'utilizzazione di una cella di minore capacità è necessaria.

Durante le prove sarebbe opportuno fare riscaldare la cella di carico per almeno 15 minuti.

La misura della forza è generalmente molto precisa, con incertezza inferiore allo 0.03%.

## Spostamento

Lo spostamento della traversa può essere misurato tramite un trasduttore chiamato *Linear Variable Differential Transformer* o *LVDT* (fig.11). Esso è basato sul principio con cui funzionano i trasformatori elettrici ed è costituito da un avvolgimento primario sottoposto ad una tensione alternata, due avvolgimenti secondari disposti in opposizione di fase a cui capi la tensione viene misurata e da un nucleo magnetico coassiale agli avvolgimenti che si muove solidalmente al punto il cui spostamento deve essere misurato. Quando il nucleo è in posizione centrale rispetto agli avvolgimenti secondari le tensioni nei secondari risultano uguali e opposte. Quando il nucleo si sposta varia la mutua induttanza di ciascun avvolgimento secondario rispetto al primario e di conseguenza il voltaggio indotto. Le variazioni di tensione nei due avvolgimenti in opposizione di fase si sommano e vengono misurate. Fisicamente gli induttori sono avvolti in un cilindro cavo, mentre il nucleo è costituito da un cilindro pieno, fig.11.

L'incertezza dell'LVDT è dell'ordine dello 0.25%, ma la misura dello spostamento della traversa è affetta da errori dovuti all'assestamento degli afferraggi, allo slittamento del provino tra i medesimi e alla deformazione della macchina. Il fondo scala può arrivare a 100.

In alternativa, per prove di tipo statico, la misura può essere effettuata con semplici potenziometri nei quali la posizione della traversa modifica la resistenza di un circuito elettrico (potenziometri a resistenza).

## Deformazione

La misura della deformazione del provino viene effettuata in alcuni punti mediante *estensimetri* o *estensometri* meccanici o ottici.

Gli estensometri meccanici presentano 2 coltelli che vengono posti a contatto col provino, dei quali uno è mobile o flessibile. Durante la deformazione lo spostamento del coltello mobile o la deformazione di quello flessibile vengono misurate utilizzando rispettivamente un principio analogo a quello dell'LVDT o della cella di carico. Al contrario degli estensimetri, gli estensometri possono essere utilizzati numerose volte, anche se sono alquanto vulnerabili poiché, a seguito della rottura del provino, possono cadere e, in alcuni casi, essere distrutti dall'attuatore (specie se opera in compressione e controllo di carico). Il costo tipico di un estensometro meccanico è dell'ordine dei 3000 €. Il fondo scala tipico degli estensometri meccanici è dell'ordine del 100% ( $\epsilon=1$ ) mentre nel caso di quelli ottici si può arrivare al 2000%. La precisione è analoga a quella di LVDT e celle di carico.

Gli estensimetri sono costituiti da una griglia di materiale dotato di resistenza elettrica posto su un supporto che viene incollato al provino. A seguito della deformazione la resistenza della griglia si modifica e la deformazione può essere ricavata valutando la variazione stessa di resistenza mediante un circuito tipo ponte di Wheatstone. La deformazione massima misurabile con un estensimetro è dell'ordine del 3÷5%, del 10÷20% per estensimetri speciali. Essi non sono riutilizzabili e la loro installazione richiede competenza. Il costo tipico è dell'ordine dei 5 €.

Le caratteristiche degli estensimetri e degli estensometri meccanici sono poste a confronto in tab.7.

TRASDUTTORI DI DEFORMAZIONE	Estensimetri	Estensometri
Precisione	1%	*****
Fondo scala	3+5%	10+20%
Calibrazione	***	*
Installazione	*	***
Vulnerabilità	***	*
Riutilizzabile	NO	SI
Costo	5	3000

Tab.10.7 - Caratteristiche degli estensimetri e degli estensometri meccanici.

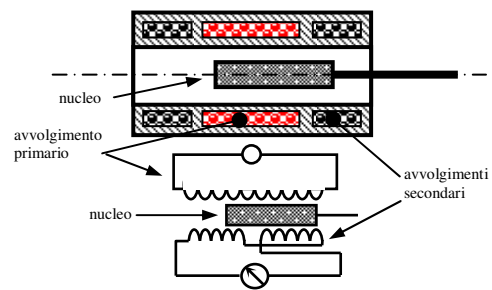


Fig.10.11 - Sezione trasversale di un LVDT e schema elettrico.

## Circuiti di misura e indicatori.

I trasduttori sono inseriti in circuiti di misura che forniscono l'alimentazione ai trasduttori e comprendono gli indicatori per la visualizzazione della grandezza misurata.

Aumentando la tensione di alimentazione del trasduttore è possibile aumentarne la risoluzione diminuendo, però, il fondoscala. Questa possibilità è utile nel caso in cui i valori massimi raggiunti dalle grandezze nel corso della prova della siano molto inferiori alla portata massima dei trasduttori. Da un punto di vista pratico questa operazione consiste nella scelta del fondo scala di misura, settabile come percentuale del fondo scala del trasduttore.

Generalmente i pannelli di controllo delle macchine universali prevedono i circuiti di misura con indicatori della forza e dello spostamento.

### Dispositivi vari

Altri dispositivi presenti sulle macchine di prova sono:

- dispositivi per l'azzeramento dei trasduttori (utili ad es. per eliminare dalla misura dello spostamento la posizione iniziale della traversa o il peso degli afferraggi dalla misura della forza),
- dispositivi per la memorizzazione dei valori massimi di forza, spostamento e deformazione raggiunti nel corso della prova,
- dispositivi per il conteggio dei cicli di carico,
- dispositivi per il ritorno automatico della traversa ad una posizione iniziale effettuata quando il carico scende al di sotto di una certa percentuale del carico massimo raggiunto,
- dispositivi di sicurezza che fermano l'esecuzione della prova quando lo spostamento o il carico superano un valore prefissato.

## APPENDICE

### A1. Relazione tra la freccia $Y$ e la deformazione $\varepsilon$ in travi soggette a flessione per tre punti

La relazione tra la freccia in mezzera  $Y$  e la deformazione delle fibre più sollecitate (nei punti di coordinate  $x=l/2$ ,  $y=h/2$ ) può essere ottenuta nel modo descritto nel seguito. Siano:

- $w$  la linea elastica del provino,
- $\phi$  la funzione che descrive le rotazioni delle sezioni,
- $k$  la funzione che descrive la curvatura del provino,
- $u$  la funzione che descrive lo spostamento in direzione  $x$  dei punti del provino in  $y=h/2$ , legata alla rotazione  $\phi$  mediante la relazione  $u=\phi h/2$ .

La freccia massima per trave appoggiata e caricata in mezzera da una forza  $F$  è data da

$$Y = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F}{E} \quad (\text{A1})$$

L'equazione della linea elastica per lo stesso caso può essere posta in funzione della freccia in mezzera tramite la seguente relazione

$$w(x) = Y \left( \frac{4x^3}{l^3} - \frac{3x}{l} \right) \quad (\text{A2})$$

Derivando una volta rispetto ad  $x$  si ottiene la funzione delle rotazioni

$$\phi(x) = w'(x) = \left( \frac{12x^2}{l^3} - \frac{3}{l} \right) Y \quad (\text{A3})$$

Derivando ulteriormente la (A3) si ottiene la funzione curvatura:

$$k(x) = w''(x) = 24 \frac{x}{l^3} Y \quad (\text{A4})$$

La deformazione longitudinale  $\varepsilon(x)$  in ciascun punto della trave è legata alla curvatura della trave stessa mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon(x) = \frac{d}{dx} u(x) = \frac{d}{dx} \left[ \frac{h}{2} \phi(x) \right] = \frac{h}{2} k(x) \quad (\text{A5})$$

In base alla (A4) si ottiene:

$$\varepsilon(x) = \frac{h}{2} 24 \frac{x}{l^3} Y \quad (\text{A6})$$

Infine, ponendo  $x=l/2$  nella (A6) si ricava la deformazione (19):

$$\varepsilon = 6 \frac{h}{l^2} Y \quad (\text{A7} \equiv 19)$$