

# 1 Prove sui materiali

## 1.1 PROVA DI TRAZIONE

La più comune prova sui materiali è quella di trazione. Un provino, di forma e dimensioni unificate (ma talvolta si deroga alle dimensioni, ferma restando la forma) viene ammorsato tra le ganasce della macchina di prova e sottoposto ad un carico crescente.

Per i prodotti in lastre, fogli o lamine il provino viene ritagliato dal grezzo e ha perciò sezione rettangolare; per gli altri prodotti (getti, trafilati, fucinati) il provino è a sezione circolare (vedi fig. 2).

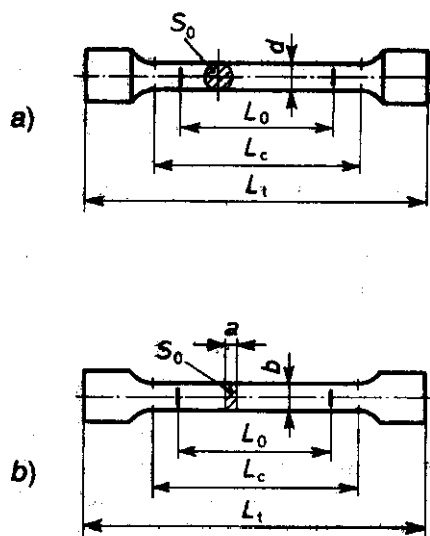


Figura 2: Provini per prove di trazione: a) sezione circolare; b) sezione rettangolare

Le parti estreme espanse servono per l'ammorsamento alla macchina di prova; la parte centrale è quella su cui vengono effettuate le misure vere e proprie; le due parti devono essere opportunamente raccordate per evitare effetti d'intaglio.

Le caratteristiche geometriche fondamentali del provino sono l'area  $S_0$  della sezione ristretta e la lunghezza  $L_0$  del tratto di misura. Tra esse intercorrono precise condizioni geometriche: si hanno così provette lunghe, corte, proporzionali lunghe e proporzionali corte.

Durante la prova vengono rilevati istante per istante la forza  $P$  agente sul provino e la lunghezza  $L$  del tratto di riferimento, dai quali si risale alle seguenti grandezze convenzionali:

- tensione  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{P}{S_0}$$

- deformazione  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Come si vede le grandezze convenzionali così definite possono confondersi con quelle analoghe definite dalla Scienza delle Costruzioni solo se i carichi e gli allungamenti sono sufficientemente piccoli, tali da garantire che il provino deformato non sia geometricamente troppo discosto da quello

indeformato; però le definizioni convenzionali sopra ricordate fanno fede ai fini dell'accettazione del materiale anche in caso di grandi deformazioni.

### 1.1.1 DIAGRAMMA $\sigma$ - $\epsilon$

Nel seguito si farà riferimento al diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ <sup>1</sup> per il più caratteristico dei materiali, ossia per l'acciaio a basso tenore di carbonio.

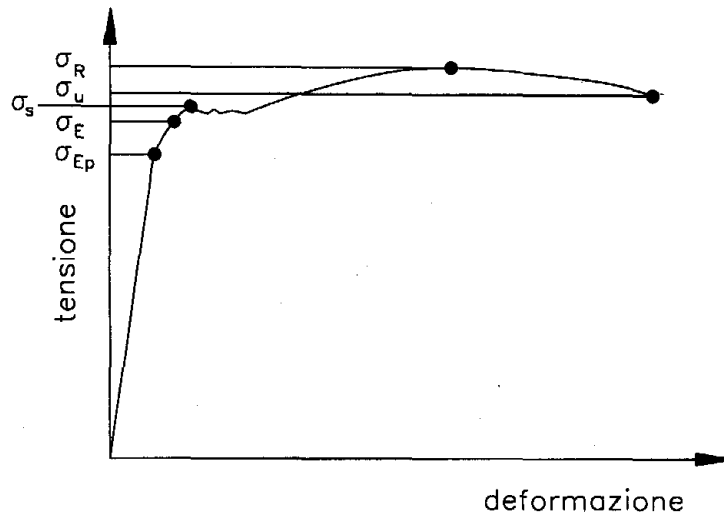


Figura 3: Tipico diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per un acciaio a basso tenore di carbonio

Questo diagramma (fig. 3) riporta in ascisse la deformazione<sup>2</sup> e in ordinate la tensione. Il diagramma presenta

- un primo tratto rettilineo, durante il quale il provino ha comportamento elastico, vale a dire che se scaricato ritorna esattamente alla forma e dimensione iniziali;
- un tratto curvo (la concavità verso il basso) in cui il comportamento è ancora elastico; si parla di elasticità non lineare, ma questo tratto è difficilmente rilevabile e non ha importanza ai fini dell'accettazione del materiale;
- lo snervamento, ossia una rapida riduzione del carico, che, giunto alla *tensione di snervamento superiore* bruscamente cade alla *tensione di snervamento inferiore*, e successivamente rimane quasi stazionario attorno a questo valore, mentre la deformazione cresce notevolmente;
- l'incrudimento ossia una forte risalita del carico, ma con pendenza minore di quella del tratto elastico,
- la zona delle grandi deformazioni, ossia quella in cui il carico raggiunge un massimo e poi decresce fino alla rottura finale.

<sup>1</sup>Gli ingegneri indicano un diagramma con la successione ordinata-ascissa, come in questo caso, mentre i fisici fanno il contrario.

<sup>2</sup>convenzionale, ma d'ora in poi ometteremo questo aggettivo per tutto questo capitolo, salvo il caso di possibile confusione

In corrispondenza della zona delle grandi deformazioni il provino presenta il fenomeno della strizione, ossia si restringe vistosamente in una zona limitata del tratto di misura; è evidente che da questo momento in poi la sezione effettiva non ha niente a che fare con la sezione nominale e ciò spiega come mai il carico diminuisca proprio mentre il materiale raggiunge la massima tensione vera (cioè riferita all'area istantanea).

Dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  si ricavano i seguenti valori caratteristici della tensione:

- tensione al limite di proporzionalità  $\sigma_{Ep}$
- tensione al limite di elasticità  $\sigma_E$
- tensione di snervamento superiore o inferiore (la tensione di snervamento *simpliciter*<sup>3</sup>  $\sigma_s$  è quella inferiore)
- tensione di rottura  $\sigma_R$ , che è quella in corrispondenza del massimo del diagramma.
- tensione ultima  $\sigma_u$ , che è quella in corrispondenza dell'effettiva rottura del provino<sup>4</sup>

La tensione al limite di elasticità viene di solito stabilita in maniera convenzionale come quella che lascia, dopo lo scarico, una deformazione residua di 0.002%.

Nel caso in cui lo snervamento non sia chiaramente visibile si definisce una tensione di snervamento convenzionale, come quella che lascia, dopo lo scarico, una deformazione residua dello 0.2%.

Nella figura 4 sono riportati i diagrammi tensione-deformazione per un certo numero di acciai.

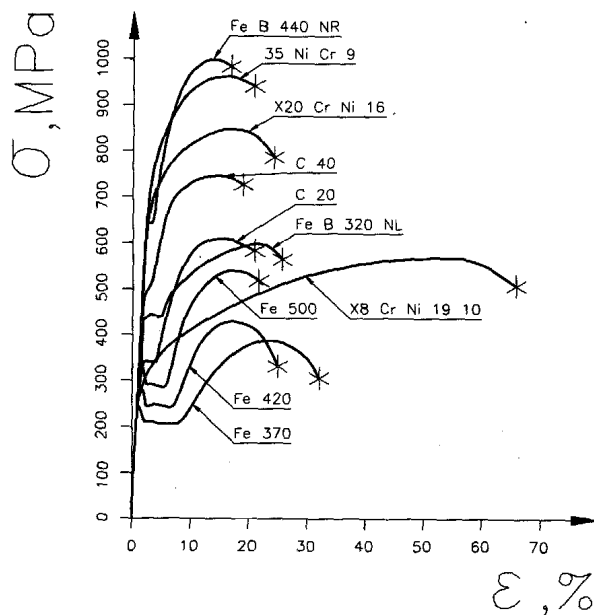


Figura 4: Diagrammi  $\sigma$ - $\epsilon$  per acciai.

<sup>3</sup>O tout court.

<sup>4</sup>Questa denominazione mi sembra francamente da evitarsi, visto che si può facilmente confondere con l'anglosassone *ultimate tension*, anch'essa indicata con  $\sigma_u$  e che corrisponde invece alla nostra tensione di rottura  $\sigma_R$ .

## 1.2 LA TENSIONE AMMISSIBILE

Molto spesso, specie nelle norme tecniche, le capacità di resistenza di un materiale sono espresse dalla *tensione ammissibile*, ossia una tensione tale da garantire la resistenza degli organi di macchine (e anche da garantire il progettista contro eventuali conseguenze legali).

Il calcolo della tensione ammissibile non è di pertinenza del progettista, ma degli enti di normazione (in base al principio oggi in Italia obsoleto che il ‘controllore’ deve essere diverso dal ‘controllato’), e tiene conto sia delle caratteristiche di resistenza del materiale (tensione di rottura e/o di snervamento) sia della variabilità delle stesse sia delle approssimazioni introdotte dai metodi usuali di calcolo.

Dal punto di vista concettuale essa viene ottenuta dividendo una delle caratteristiche di resistenza per un *coefficiente di sicurezza* (variabile a seconda dei casi da 2 a 5 o anche di più). Ciò che importa in questa sede è sottolineare *quale* caratteristica di resistenza venga scelta come riferimento.

Una lunga tradizione sceglieva il carico di snervamento, in base al consolidato principio che mai e poi mai il materiale dovesse uscire dall’ambito elastico. A tale scapo ci si dovette inventare un ‘carico di snervamento’ (cosiddetto convenzionale: vedi sopra) anche per materiali che non presentassero lo snervamento come fenomeno constatabile. La tendenza attuale è invece di usare il carico di rottura (che ovviamente è una caratteristica fisica di tutti i materiali), magari al costo di ritoccare un po’ verso l’alto i coefficienti di sicurezza.

In mancanza di ogni altra indicazione, dividere il carico di rottura per 3 (che corrisponde circa a dividere il carico di snervamento più o meno convenzionale per 2.5 o per 2) dovrebbe essere una norma di larga massima.

In caso di tensione variabile nel tempo il coefficiente dovrebbe essere aumentato e, al limite, raddoppiato; ma tali casi vanno meglio trattati con riferimento alle specifiche prove di fatica (ossia con carichi variabili).

## 1.3 ALTRE PROVE

Si darà qui un cenno sommario di alcune prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali. Le prove di creep, di tenacità alla frattura e di fatica verranno trattate più tardi, nei rispettivi capitoli.

### 1.3.1 PROVA DI COMPRESSIONE

Si distingue la prova tecnologica di schiacciamento, che serve solo per determinare la modalità di rottura, da quella di compressione che serve a determinare quantitativamente le caratteristiche meccaniche di un materiale.

In quest’ultimo caso le provette devono avere forma cilindrica, con diametro  $d_0 \geq 20$  mm, ed altezza  $L_0 = 3d_0$ . Tuttavia questa prova è usata raramente per materiali metallici e più spesso per materiali non metallici da costruzione, per i quali la forma dei provini è fissata da apposite norme.

È ben noto il caso dei provini cubici (‘cubetti’) di calcestruzzo.

### 1.3.2 PROVA DI FLESSIONE

Il provino è una barretta parallelepipedica o cilindrica appoggiata alle estremità e caricata in mezzzeria perpendicolarmente al suo asse (flessione a tre punti) o in due punti simmetrici rispetto agli appoggi (flessione su quattro punti); in quest’ultimo caso la sezione centrale del provino è soggetto ad un momento flettente uniforme.

### 1.3.3 PROVA DI RESILIENZA

Permette di stabilire la resistenza all'urto degli acciai. La più usata è la prova Charpy. Consiste nel rompere a flessione per urto, con una massa imperniata a pendolo, un provino di forma intagliata appoggiato orizzontalmente su due sostegni.

La parte del pendolo che urta il provino è sagomata a forma di coltello e urta il provino dalla parte non intagliata in modo da indurre tensioni di trazione, quindi più pericolose, sulla parte intagliata.

Il pendolo viene portato ad una certa altezza e poi lasciato andare; nel suo punto più basso trancia il provino e poi prosegue la sua corsa risalendo fino ad una certa altezza. La perdita di energia potenziale corrisponde all'energia assorbita dal provino. Questa fornisce la resilienza del materiale, misurata in J. Non è possibile comparare la resilienza misurata su provini di dimensioni diverse. Vedi UNI EN 10045.

Vedi fig. 5

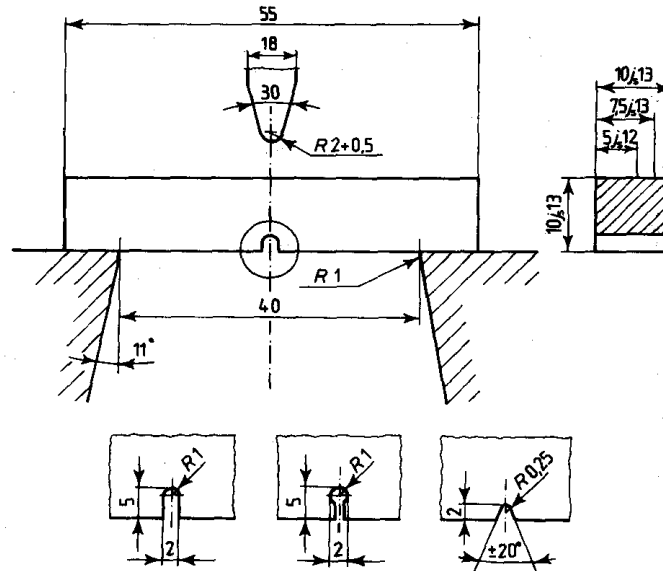


Figura 5: Provini per prove di resilienza

### 1.3.4 PROVA DI DUREZZA

Consiste nel comprimere la superficie del pezzo in esame con una punta di materiale più duro, in modo da determinarne una locale plasticizzazione. La misura consiste nel determinare l'area dell'impronta (nelle prove Brinell e Vickers) o la profondità di penetrazione dell'indentatore (prova Rockwell). Per gli elastomeri si usa la prova Shore, per materiali duri e fragili, come il vetro, si usa la prova Knoop (talvolta usata anche per metalli), con penetratore di diamante.

Nell'ambito di ciascuna classe di prove esistono parecchie varietà, e se ne usa l'una o l'altra a seconda della durezza presunta del materiale e anche della grandezza e soprattutto dello spessore del pezzo da misurare. Infatti in questi casi non si usano provini, ma si effettua la prova direttamente sul pezzo finito, a meno che questo non sia eccessivamente ingombrante.

Per le prove di durezza non si usano le macchine universali, ma macchine dedicate, dette durometri.

**Prova Brinell<sup>5</sup>** Il penetratore è una sfera di acciaio extraduro di diametro  $D$  normalizzato. Dopo la prova si misura il diametro  $d$  dell'impronta, e se ne calcola la superficie, considerandola una calotta sferica di diametro  $D$ . La durezza Brinell (HBS) si ottiene dividendo il carico applicato *espresso in kgf* per l'area trovata *espressa in millimetri quadrati*. La ragione del permanere di queste unità superate sta nel fatto di non voler cambiare i valori della durezza ben noti per i vari materiali. La formula unificata, con la forza  $F$  espressa in newton e i diametri in millimetri, è:

$$HBS = \frac{2 \times 0.102F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Per un incredibile miracolo la stessa formula è usata anche in America, che questa volta ci ha risparmiato le libbre e i pollici; quindi i valori di HBS da testi americani non hanno bisogno di conversione.

La durezza Brinell si indica con HBW quando si usa una sfera di metallo duro, invece che di acciaio. È ancora usata peraltro la vecchia indicazione HB.

Il simbolo HBS o HBW è preceduto dal valore della durezza e seguito da un'indicazione numerica che riporta il diametro della sfera e il valore della forza applicata. Ovviamente questi valori sono unificati e ciò dà luogo ad una trentina di varietà di questa prova.

Il valore del carico deve essere scelto in modo che

$$0.24D \leq d \leq 0.6D$$

Inoltre il rapporto  $0.102F/D^2$  deve essere scelto in funzione del materiale secondo la tabella 1.

Tabella 1: Durezza Brinell: Rapporto  $0.102F/D^2$  in funzione del materiale di prova

Materiale	Durezza Brinell	$0,102 \frac{F}{D^2}$
Acciaio		30
Ghisa(*)	< 140	10
	≥ 140	30
Rame e sue leghe	< 35	5
	da 35 a 200	10
	> 200	30
Metalli leggeri e leghe leggere	< 35	1,25
		2,5
	da 35 a 80	5
		10
		15
Piombo, stagno		10
		15
		1
		1,25

(\*) Per prove sulla ghisa, il diametro nominale della sfera deve essere 2,5, 5 o 10 mm.

Lo spessore del pezzo in prova deve essere maggiore di 8 volte la profondità dell'impronta. quando lo spessore del pezzo lo permette è opportuno usare la sfera di diametro 10 mm.

**Prova Vickers<sup>6</sup>** Il penetratore è di diamante, a forma di piramide retta a base quadrata, con angolo al vertice di  $136^\circ$  tra facce opposte. La durezza si ottiene misurando la diagonale  $d$  dell'impronta

<sup>5</sup>dal nome del suo inventore, Johann August Brinell (Bringetofta, Svezia merid., 1849-Stoccolma 1925), ingegnere, metallurgo e metallografo

<sup>6</sup>dal nome dell'industriale inglese Edward Vickers (1814-1894)

e applicando la formula

$$HV = 0.102 \times 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

in cui la forza  $F$  è in newton e la diagonale  $d$  in millimetri.

Nella designazione, il simbolo HV è preceduto dal valore della durezza e seguito dall'indicazione numerica del carico di prova.

Anche qui il carico di prova viene scelto in funzione della durezza e dello spessore del pezzo.

**Prova Rockwell** La prova consiste nel far penetrare nel pezzo un indentatore conico o sferico misurando la profondità di penetrazione in due tempi: in una prima fase si usa un carico  $F_0$ , successivamente si aggiunge un carico addizionale  $F_1$ . Quello che conta è la *differenza* tra le profondità di penetrazione sotto il carico totale  $F_0 + F_1$  e sotto il carico iniziale  $F_0$ , misurata in micrometri. Questa a sua volta viene *sottratta* da un numero fisso (100 o 130 a seconda dei metodi).

Come penetratore si usa una sfera di acciaio o un cono di diamante.

Le scale Rockwell più usate sono la Rockwell B (simbolo: HRB) e la Rockwell C (simbolo: HRC). Per i particolari si rimanda alla normativa.

**Correlazioni tra le scale di durezza** Tra le varie scale di durezza esiste una correlazione empirica; inoltre la durezza è correlata anche con il carico di rottura del materiale. Vedi la tab. 2 e la fig. 6.

#### 1.4 MACCHINE DI PROVA

Le prove di trazione, di compressione, di flessione e talvolta quelle di fatica vengono effettuate per mezzo delle *macchine di prova universali*, suddivise in due categorie principali, quelle ad azionamento meccanico e quelle ad azionamento idraulico (oleodinamico).

Entrambi i tipi sono composti da due montanti, una traversa superiore e una traversa inferiore (figg. 7 e 8). Nelle macchine di prova meccaniche la ganascia inferiore è fissa e quella superiore viene fatta salire o scendere grazie ad un dispositivo vite-chiocciola (la rotazione della vite, azionata da un motore elettrico passo-passo, induce una traslazione della chiocciola e quindi della traversa).

Nelle macchine ad azionamento oleodinamico la traversa superiore è fissa, e ad essa è solidale la ganascia superiore, mentre la ganascia inferiore è solidale all'asta del pistone del cilindro oleodinamico, il cui mantello è collegato alla traversa inferiore.

Entrambe le macchine possono effettuare sia prove a deformazione imposta che prove a carico imposto.

Sulle macchine ad azionamento oleodinamico (le più diffuse) le prove a carico imposto vengono effettuate controllando semplicemente la pressione nel cilindro, mentre quelle a spostamento o deformazione imposta richiedono un controllo a retroazione, che faccia variare la pressione nel cilindro con una legge dipendente dalla forma d'onda che si vuole realizzare e dalla risposta del sistema macchina + provino.

Nelle macchine ad azionamento meccanico le prove a spostamento o deformazione imposta si ottengono semplicemente facendo ruotare la vite con una certa legge temporale, mentre quelle a carico imposto richiedono un controllo a retroazione, in quanto la rotazione della vite deve tener conto anche della risposta del sistema.

Oggi, con un po' di elettronica di controllo, entrambi i tipi di azionamento riescono altrettanto bene in entrambi i tipi di prova.

La misura del carico avviene con le cosiddette *celle di carico* che sono in effetti l'evoluzione concettuale dei vecchi dinamometri a molla. Un elemento deformabile (ma sufficientemente rigido), di solito a forma di anello, viene deformato dalla forza da misurare. La deformazione, a sua volta, viene misurata con dispositivi estensimetrici.

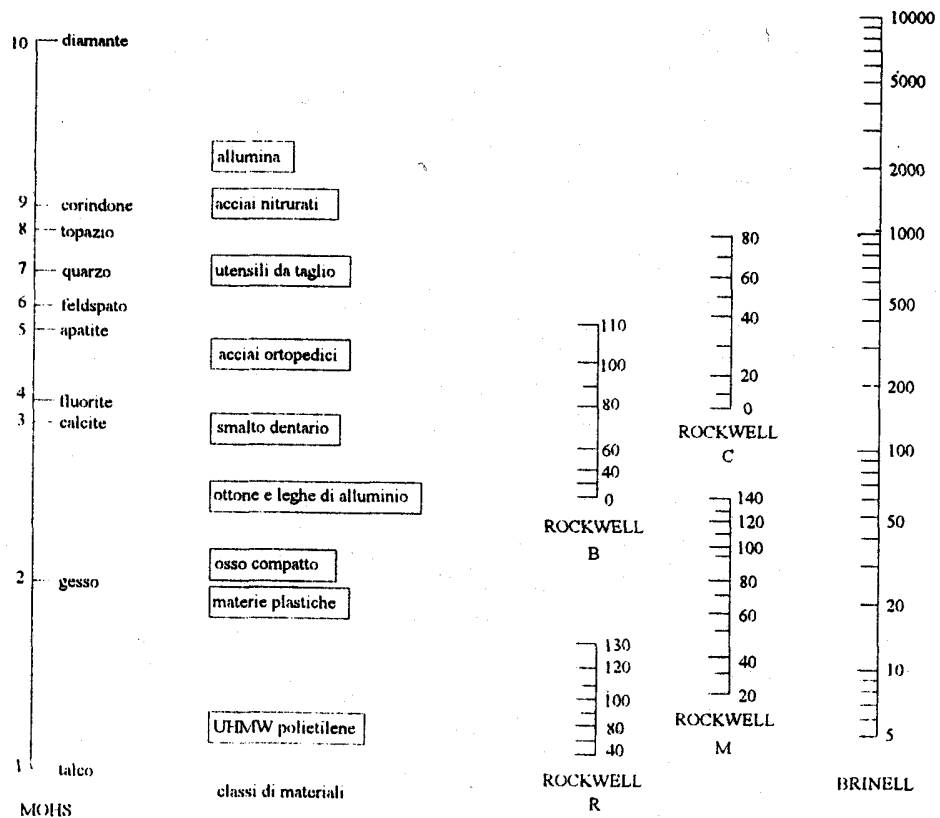
Tabella 2: Correlazione tra varie scale di durezza e il carico di rottura degli acciai.

Durezza Brinell ( $F = 30 D^2$ )	Durezza Rockwell			Durezza Vickers ( $F = 294 N$ ) HV	Resistenza alla trazione R N/mm <sup>2</sup>
	Diametro della impronta $d$ mm	HB	HRB		
5,88	100	56,4	—	100	350
5,75	105	60,0	—	105	370
5,63	110	63,4	—	110	390
5,52	115	66,4	—	115	400
5,41	120	69,4	—	120	420
5,31	125	72,0	—	125	439
5,22	130	74,4	—	130	450
5,13	135	76,4	—	135	470
5,04	140	78,4	—	140	480
4,96	145	80,4	—	145	500
4,88	150	82,2	—	150	510
4,81	155	83,8	—	155	530
4,74	160	85,4	—	160	550
4,67	165	86,8	—	165	560
4,61	170	88,2	—	170	580
4,54	175	89,6	—	175	600
4,48	180	90,8	—	180	620
4,43	185	91,8	—	185	630
4,37	190	93,0	—	190	650
4,32	195	94,0	—	195	670
4,27	200	95,0	—	200	680
4,22	205	95,8	—	205	700
4,17	210	96,6	—	210	720
4,12	215	97,6	—	215	730
4,08	220	98,2	—	220	750
4,03	225	99,0	—	225	770
3,99	230	—	19,2	230	780
3,95	235	—	20,2	235	800
3,91	240	—	21,2	240	820
3,87	245	—	22,1	245	840
3,83	250	—	23,0	250	850
3,79	255	—	23,8	255	870
3,76	260	—	24,6	260	890
3,73	265	—	25,4	265	900
3,69	270	—	26,2	270	920
3,66	275	—	26,9	275	940
3,63	280	—	27,6	280	960
3,60	285	—	28,3	285	970
3,57	290	—	29,0	290	990
3,54	295	—	29,6	295	1010
3,51	300	—	30,3	300	1030
3,46	310	—	31,5	310	1060
3,40	320	—	32,7	320	1100
3,35	330	—	33,8	330	1130
3,30	340	—	34,9	340	1170
3,26	350	—	36,0	350	1200
3,22	359	—	37,0	360	1230
3,18	368	—	38,0	370	1260
3,15	376	—	38,9	380	1290
3,10	385	—	39,8	390	1320
3,08	392	—	40,7	400	1350
3,05	400	—	41,5	410	1380
3,02	408	—	42,4	420	1410
3,00	415	—	43,2	430	1440
2,97	423	—	44,0	440	1460
2,95	430	—	44,8	450	1490

La misura dell'allungamento avviene misurando la rotazione della vite nelle macchine ad azionamento meccanico, o la traslazione dell'asta del pistone in quelle ad azionamento oleodinamico, o anche misurando direttamente la deformazione del provino a mezzo dei cosiddetti estensometri.

Nei primi due casi, quando cioè si misura lo spostamento relativo di due parti della macchina, occorre tenere conto della deformabilità di tutta la catena di trasmissione della forza, che comprende non solo il provino, ma tutta una serie di elementi deformabili, ossia il telaio della macchina e soprattutto la cella di carico, la cui deformabilità, pur più piccola di quella del provino, non è affatto trascurabile.

L'estensometro è un dispositivo dotato di due terminali tenuti solidali al provino dall'attrito e che quindi si spostano l'uno rispetto all'altro man mano che il provino si deforma. Le figg. 10 e 11 mostrano un estensometro per prove ad alta temperatura; in questo caso i terminali sono due barrette ceramiche.



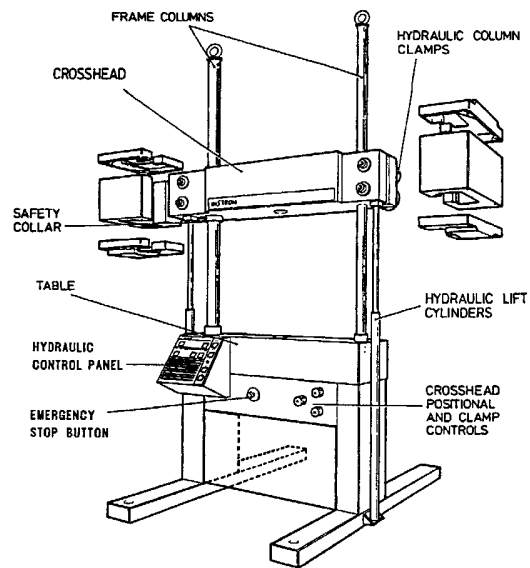


Figura 7: Telaio di macchina di prova a due montanti (INSTRON Ltd.)

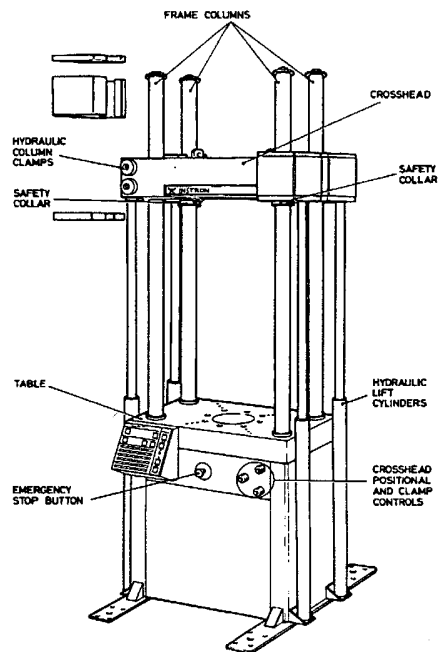


Figura 8: Telaio di macchina di prova a quattro montanti (INSTRON Ltd.)

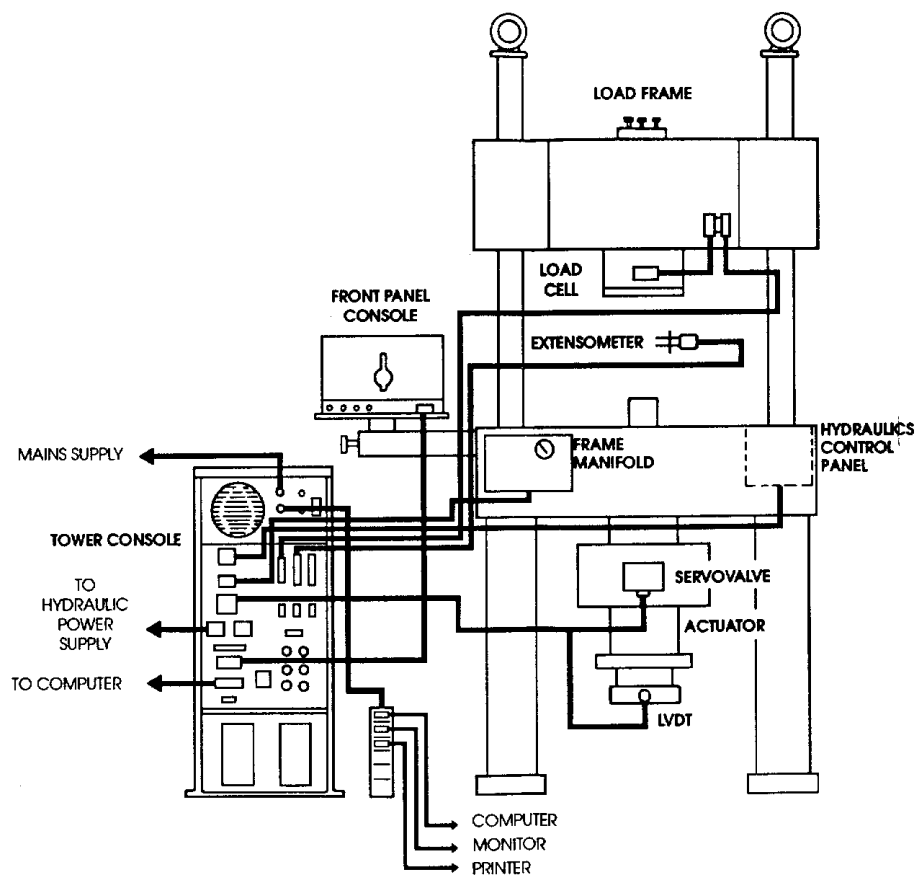


Figura 9: Schema di principio di una macchina di prova ad azionamento oleodinamico e controllo elettronico (INSTRON Ltd.)

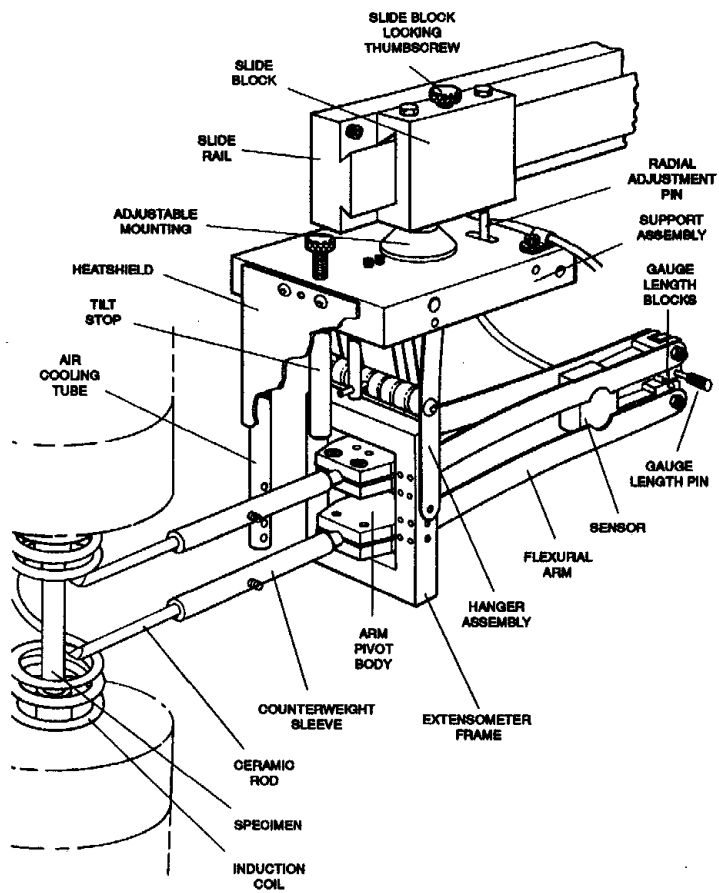


Figura 10: Estensometro per prove ad alta temperatura: vista assonometrica (INSTRON Ltd.)

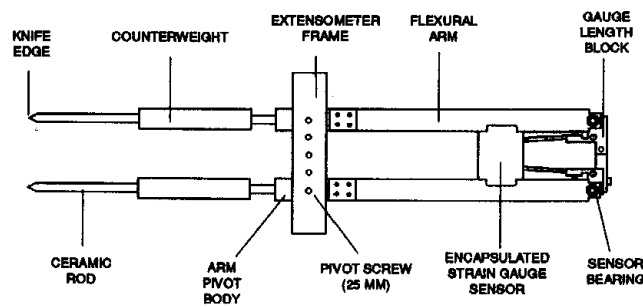


Figura 11: Estensometro per prove ad alta temperatura: vista laterale (INSTRON Ltd.)