

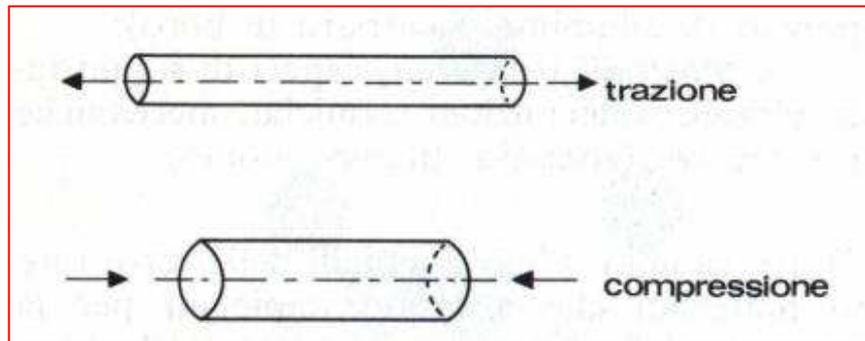
PROVA DI TRAZIONE STATICA

(UNI 551 – UNI 552 – UNI 556 – UNISIDER 4 – UNI EN 10002/1)

La norma UNI EN 10002/1 afferma che la prova di trazione statica, effettuata a temperatura costante, consiste nel sottoporre una provetta ad un carico di trazione applicato con una certa velocità d'incremento fino a provocare la rottura, allo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità, deformabilità.

In meccanica, viene definita *forza di trazione* quella forza esercitata su un corpo che, fissato ad un estremo, venga tirato dall'altro estremo.

La sollecitazione applicata è di tipo statico, cioè gradualmente crescente.



È una prova distruttiva in quanto provoca la distruzione del provino sulla quale si effettua.

È la prova meccanica più importante in quanto permette di misurare le fondamentali proprietà meccaniche con le quali si classificano, si designano e si scelgono i materiali metallici. In particolare, mediante questa prova, sono ricavati il carico unitario di snervamento, il carico unitario di rottura, l'allungamento percentuale a rottura.

La prova di trazione si compie anche su elementi quali catene, ganci, asole, funi, giunzioni saldate, chiodature.

Inoltre, questa prova costituisce il mezzo di controllo dei processi tecnologici (stampaggio, fucinatura, saldatura, laminazione, trafilatura, trattamenti termici, ecc.) offrendo al progettista valori di riferimento per il calcolo e il dimensionamento degli organi di macchine.

La prova di trazione deve essere svolta secondo le norme UNI 556-62 ed è applicabile per:

- materiali ferrosi di diametro $d \geq 4$ mm
- materiali ferrosi aventi spessore $s \geq 3$ mm
- materiali non ferrosi aventi diametro o spessore $\geq 0,5$ mm

PROVETTE PER LA PROVA DI TRAZIONE

- Prelievo dei saggi e preparazione delle provette

Le provette per effettuare la prova, devono essere prelevate e preparate conformemente alle prescrizioni delle norme europee relative ai diversi materiali e alle sezioni dei pezzi che si andranno a testare.

Quando le provette sono ricavate dal pieno, mediante lavorazione meccanica, hanno sezione circolare; quando sono ricavate da lamiera hanno sezione rettangolare, conservando le superfici di

laminazione. Fili e barre (come già detto), fino a che la dimensione minore della sezione non supera 8 mm, sono provati nella forma originaria, lo stesso per i tubi con diametro esterno inferiore a 25 mm.

Con il termine “saggio” si intende la parte di materiale, prelevata dall’elemento di cui si vuole effettuare il collaudo, in quantità sufficiente per ricavare da esso una o più provette.

Si definisce “barrotto” la parte del saggio, che ha subito un trattamento meccanico ed eventualmente un trattamento termico, destinato alla preparazione delle provette.

La provetta é parte di un “saggio”. Essa ha forma e dimensioni fissate, lavorata di macchina o no, portata allo stato voluto per subire una determinata prova. Sulla provetta può essere effettuato un trattamento termico che conferisca uno stato diverso da quello di partenza.

La norma UNI 551-61 indica come ricavare le provette dal materiale da esaminare (saggio).

Anche la norma UNI EU 18 indica, per gli acciai ed i prodotti siderurgici in genere, come prelevare e preparare le provette.

La norma UNI 552-86 indica i vari simboli da adottare e le definizioni.

Il materiale da esaminare (saggio) e la preparazione della provetta devono avvenire in modo da non alterare le caratteristiche del materiale.

Di regola la provetta é ottenuta mediante lavorazione meccanica a freddo di un saggio prelevato da un prodotto colato, evitando che il materiale subisca riscaldamenti o incrudimenti, che modificherebbero le proprietà meccaniche originarie.

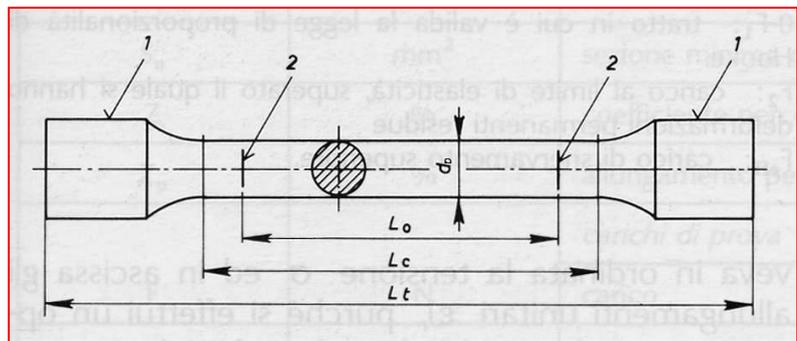
Le provette lavorate non devono presentare tracce di utensile e rigature in quanto, per l’effetto intaglio, abbasserebbero i valori delle caratteristiche meccaniche. Per questo é bene che siano lucidate.

I prodotti di sezione costante (profilati, barre, fili ...) possono essere sottoposti alla prova di trazione senza essere stati preventivamente lavorati (spezzoni grezzi). Si parla, in questo caso, di “provette non sagomate”.

- Parti della provetta

In una provetta si distinguono le seguenti parti:

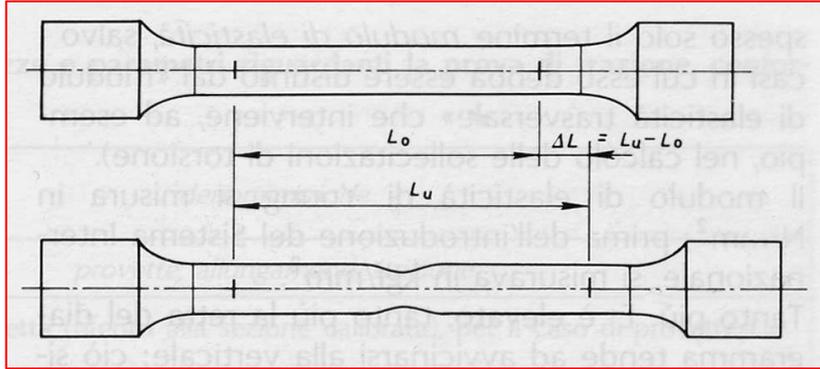
- la lunghezza della cosiddetta “parte centrale calibrata” L_c
- la lunghezza iniziale L_0 tra i riferimenti (2), più breve della precedente
- il diametro d della parte calibrata a cui corrisponde una sezione S_0 (nel caso di provette a sezione circolare, larghezza a e l’altezza b della sezione se questa è rettangolare)
- le teste di serraggio (1), che hanno forma e dimensioni tali da essere afferrate tra le ganasce della macchina con cui si effettua la prova
- i raccordi ad archi di cerchio tra la parte calibrata e le teste, necessari per evitare pericolose concentrazioni di sforzi che influirebbero sui risultati della prova
- la lunghezza totale L_t



Sulla parte calibrata devono essere incisi, prima della prova, i riferimenti che individuano il “tratto utile” L_0 ed un certo numero di intervalli N tra tali riferimenti.

L'esperienza ha evidenziato che la forma e le dimensioni della provetta influenzano notevolmente le deformazioni. Per questo, è necessario assumere convenientemente la lunghezza L_0 in modo da garantire un'uniforme distribuzione dello sforzo sull'intero tratto.

La distanza tra i riferimenti dopo la rottura, misurata portando a far combaciare i due spezzoni, è detta lunghezza ultima L_u .



L'allungamento subito dalla provetta è:

$$\Delta L = L_u - L_0$$

- Tipi di provette

In generale, si hanno:

- provette proporzionali
- provette non proporzionali

Le norme UNI prescrivono l'impiego "normale" di provette proporzionali, che soddisfano un rapporto costante fra l'area della sezione iniziale S_0 e la lunghezza fra i riferimenti L_0 ; si ha quindi la seguente relazione:

$$L_0 = K\sqrt{S_0} = K\sqrt{\frac{\pi d^2}{4}}$$

con $K = 5,65 \rightarrow L_0 = 5d$

Si parla in questo caso di "provette corte".

In casi particolari si può assumere $K = 11,3 \rightarrow L_0 = 10d$.

Si parla in questo caso di "provette lunghe".

La lunghezza del tratto calibrato L_c , detto d il diametro per le provette a sezione circolare, deve essere:

$$L_0 + 0,5d \leq L_c \leq L_0 + 2d$$

Preferibilmente si assume:

$$L_c = L_0 + 2d$$

La lunghezza totale L_t dipende dal modo di fissaggio della provetta nei dispositivi di serraggio della macchina. Generalmente si assume:

$$L_t > L_c + 2d.$$

Di seguito sono indicate le caratteristiche geometriche delle provette proporzionali.

Diametro provetta d_0	Lunghezza raccordo a	Lunghezza testa h	Diametro Testa d_1	Normale lunga			Normale corta		
				Lunghezza tra i riferimenti L_0	Lunghezza tratto calibrato L_c	Lunghezza totale provetta H	Lunghezza tra i riferimenti L_0	Lunghezza tratto calibrato L_c	Lunghezza totale provetta H
10	25	50	14	100	120	270	50	70	220
15	25	50	19	150	180	330	75	105	255
20	25	50	24	200	240	390	100	140	290

Le provette “non proporzionali” devono essere utilizzate qualora sia impossibile ricavare la provetta proporzionale. Ciò va indicato nel certificato di prova.

- Tolleranze di lavorazione delle provette

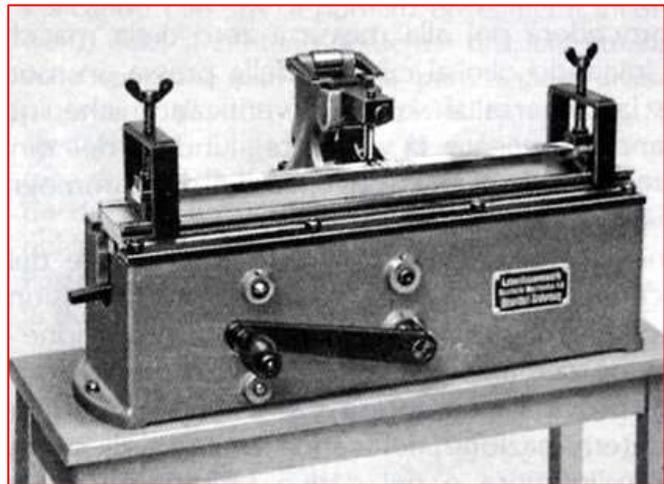
La tolleranza di lavorazione sul diametro delle provette lavorate alla macchina é del tipo j 12, mentre la tolleranza di forma é IT 9.

Come già detto, alcuni prodotti come i profilati e le barre, possono essere sottoposti alla prova di trazione allo stato grezzo, senza cioè la necessità di condurle alla forma ed alle dimensioni suddette.

Nel caso di materiali metallici non ferrosi, le modalità di prelievo e di preparazione nonché la forma e le dimensioni delle provette sono indicati nelle norme specifiche di ciascun materiale.

- Tracciatura della provetta

Prima dell’esecuzione della prova, mediante apposita macchina tracciatrice, si divide la lunghezza iniziale tra i riferimenti L_0 in un certo numero di parti pari ed uguali N (di solito 10 o 20 e comunque non inferiore a 10, per esempio ogni 5 o 10 mm, arrotondando se il caso il valore calcolato di L_0 al multiplo più vicino). I segni devono essere delle piccole incisioni e non degli intagli, che provocherebbero delle rotture premature. Nell’apparecchiatura per tracciare, i vari segni sono ricavati azionando una manovella, che determina lo spostamento trasversale di un utensile tracciante; successivamente la provetta avanza automaticamente di una quantità pari ad una graduazione.



MACCHINA DI PROVA PER MISURARE LA RESISTENZA A TRAZIONE

I macchinari per la prova di trazione servono per determinare la resistenza a sollecitazioni statiche dei vari materiali metallici. Questi macchinari sono costituiti da un’incastellatura, dal dispositivo per l’applicazione del carico, dagli organi per il fissaggio del provino o dell’elemento e dagli strumenti per la misura della forza.

Le macchine solitamente usate per la prova di trazione sui metalli possono applicare carichi da 1000 Kg fino a 40.000 Kg; esse sono classificate in base alla portata di carico che possono applicare al materiale:

- Piccole da 1 kg fino a 400 kg
- Medie da 1000 kg fino a 40000 kg
- Pesanti con campi di 100.000 kg e oltre
- Speciali da 1 g fino a 100 o 200 g con elementi di fissaggio controbilanciati
- Speciali da 1 kg fino a 1000 o 2000 kg, costruite con principi diversi dai precedenti sopra descritti, per consentire al macchinario un elevato campo di forza nella trazione.

Considerati gli urti inevitabili per la rottura del provino, gli snodi e i morsetti devono essere molto robusti e tali da sopportare anche forze di attrito di valore variabile.

La macchina di trazione cui qui si fa riferimento è la macchina universale Dartek, che è una macchina per prove su materiali metallici con acquisizione ed elaborazione dati computerizzati e comprende i seguenti componenti:

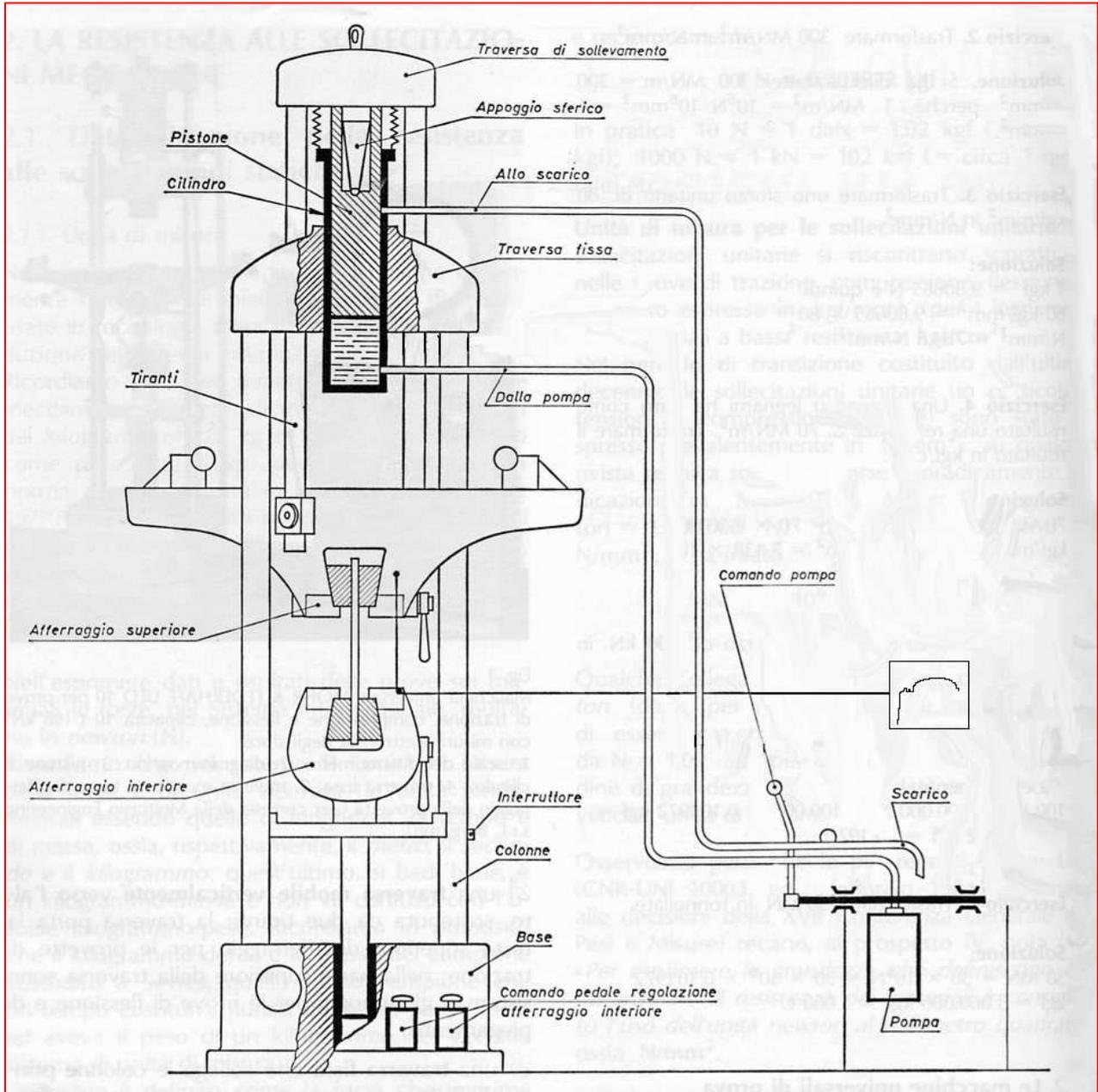
- 1) un basamento;
- 2) colonne di sostegno;
- 3) una traversa fissa;
- 4) un cilindro ricavato sopra la traversa fissa;
- 5) uno stantuffo dentro il cilindro ;
- 6) una traversa solidale allo stantuffo;
- 7) due aste montanti;
- 8) una traversa di lavoro.

La macchina di tipo “universale” è in grado di eseguire, oltre la prova di trazione, anche prove di compressione, flessione, imbutitura, taglio

- **Funzionamento della macchina universale**

La macchina di prova può essere a comando meccanico o a comando idraulico. Quest'ultimo è quello più potente e diffuso, basandosi sul principio del torchio idraulico. L'energia per produrre lo sforzo nella macchina viene fornita da una pompa ad alta pressione accoppiata ad un motore elettrico; variando la corsa della pompa oppure il numero di corse al minuto è possibile una regolazione pressoché continua entro ampi limiti della portata dell'olio e quindi di velocità di applicazione del carico.





Il funzionamento, nel caso di una prova a trazione, avviene nel modo seguente. La provetta viene fissata alla ganascia collegata al basamento e alla ganascia collegata alla traversa di lavoro. La pompa invia l'olio dal serbatoio al cilindro, obbligando il pistone a salire; quest'ultimo trascina la traversa di sollevamento che, tramite i tiranti, solleva l'afferraggio superiore. Per questo *la provetta viene sollecitata a trazione*. Se si interrompe l'invio di olio nel cilindro e si apre un rubinetto, l'olio passa dal cilindro al serbatoio e lo stantuffo si abbassa.

Collegato alla macchina è un dispositivo per la registrazione delle deformazioni della provetta, che fornisce direttamente il grafico della prova.

Prima di avviare la prova, é necessario applicare un carico minimo in modo che la provetta si assesti negli organi di presa della macchina. Tale carico, nel caso di provette d'acciaio, può essere assunto pari a 1000 N.

I dati dell'intera prova, parametri, tempi e anche il tracciamento del diagramma carico-allungamento sono oggi interamente gestiti elettronicamente da un computer con apposito programma.

La durata della prova é compresa tra 2 e 5 minuti.

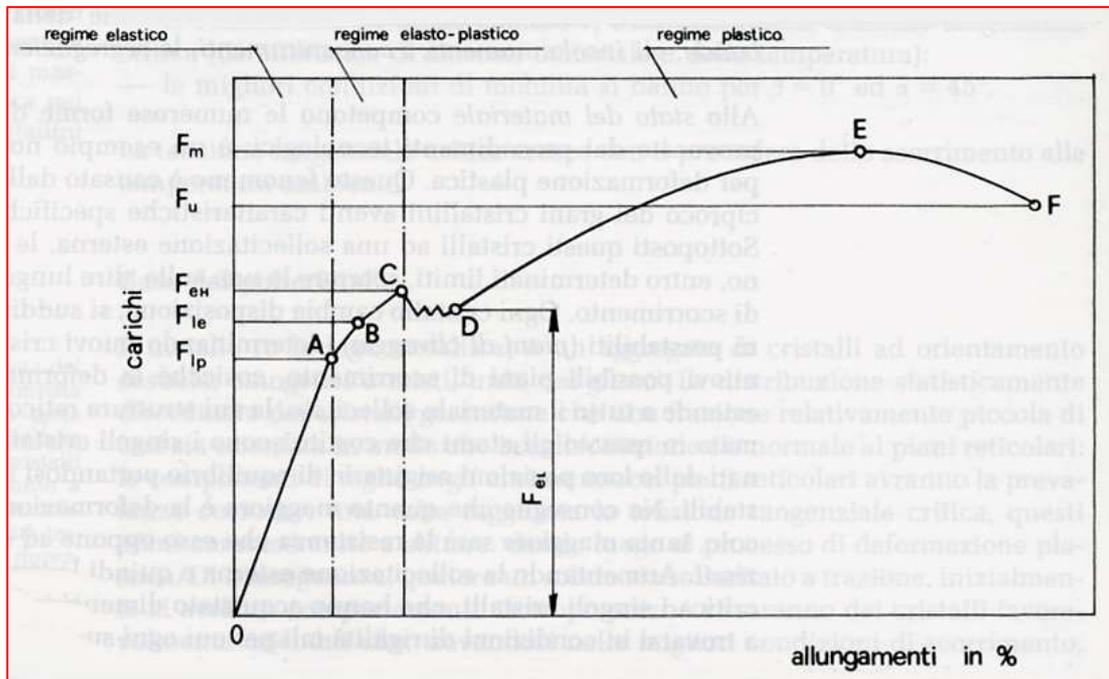
DIAGRAMMA CARICHI-ALLUNGAMENTI E FASI COSTITUTIVE

Come già enunciato, nella prova di trazione si sottopone una provetta ad un carico gradualmente crescente fino a provocarne la rottura.

Il carico di prova é applicato gradatamente a partire da un carico unitario non superiore a 49 N/mm², con un incremento che, fino al carico di snervamento, non deve superare i 10 N/s per mm² di sezione della provetta.

A causa dello sforzo di trazione, la provetta presa in esame subisce un certo allungamento, che verrà misurato dopo la rottura facendo combaciare perfettamente i due spezzoni della provetta. Contemporaneamente all'allungamento, la provetta subisce una diminuzione delle sue dimensioni trasversali. Tale diminuzione si manifesta con sviluppo di calore, che deriva dalla trasformazione del lavoro di deformazione a cui viene sottoposta la struttura cristallina del materiale durante la prova.

La prova é effettuata per individuare le caratteristiche di resistenza, deformabilità ed elasticità di un materiale. Tali elementi sono individuabili in un diagramma, detto “diagramma carichi-allungamenti” che, per un acciaio dolce, assume la forma rappresentata di seguito.



All'interno del diagramma, che ha in ordinata il carico ed in ascissa l'allungamento, si individuano vari campi che, tecnicamente parlando, vengono detti “regimi”, cioè si parla di regime elastico, regime elasto-plastico, regime plastico. Tramite questi regimi, è possibile individuare le

caratteristiche del materiale che viene sottoposto alla prova di trazione statica, cioè quei parametri quali, la deformabilità, la resistenza e l'elasticità.

Si possono distinguere:

- un tratto di *elasticità e proporzionalità OA*: l'applicazione di un carico determina un proporzionale allungamento della provetta; il diagramma é rettilineo; le deformazioni sono elastiche: dopo l'eliminazione della forza la provetta riacquista le dimensioni iniziali. In questa fase, se si raddoppia o si triplica il carico, anche l'allungamento raddoppia o triplica.

In questa parte della prova, tutta l'energia che viene “scaricata” sul pezzo, affinché nasca un certo allungamento, rimane completamente utile per la fase di ritorno, dove il pezzo riacquista la forma e le dimensioni originarie (deformazione inversa).

L'elasticità é quindi la proprietà che ha un corpo metallico di deformarsi per effetto di un carico esterno e di riacquistare forma e dimensioni originarie quando cessa il carico stesso.

Nel tratto OA é valida la legge di Hooke, (astronomo e fisico inglese vissuto tra il 1635 ed il 1703) secondo la quale le deformazioni provocate dalle sollecitazioni sono proporzionali alle sollecitazioni stesse:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F_i}{E \times S_0}$$

dove:

ΔL = allungamento elastico;

L_0 = lunghezza iniziale tra i riferimenti, prima dell'applicazione del carico;

S_0 = sezione trasversale della parte calibrata della provetta, prima della prova;

F_i = carico qualunque fornito dalla macchina che esegue la prova, compreso però entro il regime elastico;

E = modulo di elasticità normale, caratteristico di ciascun materiale.

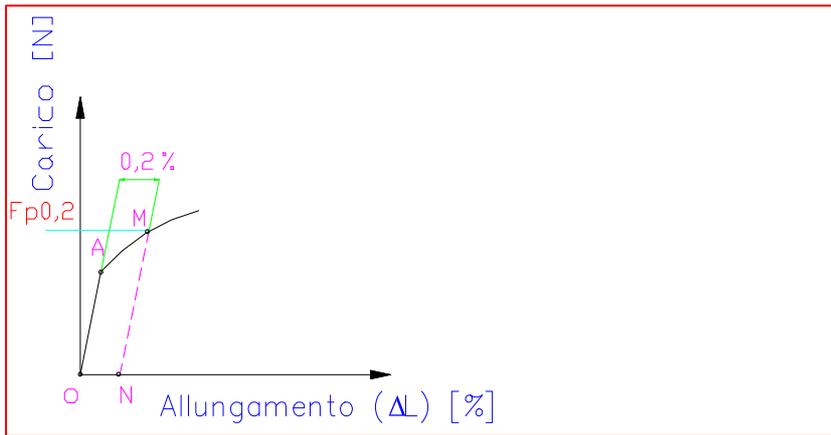
Il punto A del diagramma rappresenta il “carico al limite di proporzionalità” F_{1p} , carico oltre il quale cessa la proporzionalità tra il carico e l'allungamento della provetta.

Indicando con S_0 la sezione iniziale della provetta, il “carico unitario al limite di proporzionalità” é dato da:

$$R_{1p} = \frac{F_{1p}}{S_0} \quad [N/mm^2]$$

Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità R_p

Il punto A, e quindi F_{1p} , é difficilmente individuabile. Per questo si preferisce sostituire a F_{1p} ed a R_{1p} rispettivamente $F_{p(0,....)}$ e $R_{p(0,....)}$, che rappresentano il carico totale ed il carico unitario che hanno provocato un allungamento percentuale, rispetto alla lunghezza iniziale L_0 , pari al valore indicato in parentesi.



Sia per esempio $F_{p(0,2)}$. Consideriamo la parte inferiore del diagramma carichi-allungamenti. Dal punto di ascissa 0,2 mm (punto N) si tira la parallela alla retta OA fino ad incontrare la curva. Al punto di intersezione M corrisponde, per lettura diretta sull'ordinata, il cosiddetto “carico di scostamento dalla proporzionalità” $F_{p(0,2)}$.

In pratica al di là del punto A le deformazioni crescono maggiormente. Al carico $F_{p0,2}$ corrisponde uno scostamento di 0,2 % dalla proporzionalità (vedi figura). Un carico quasi uguale (“carico al limite di deformazione permanente dello 0,2%”) produce una deformazione plastica di 0,2 % dopo il ritorno al valore nullo della forza applicata (tratto MN).

La normativa non dice quanto deve essere il valore indicato in parentesi, anche se è intuibile che esso debba essere il più piccolo possibile, compatibilmente con la precisione dello strumento di misura, in modo da avvicinarsi a F_p e R_p .

In pratica è assunto il valore $F_{p(0,002)}$, cui corrisponde il “carico unitario di scostamento dalla proporzionalità”:

$$R_{p(0,002)} = \frac{F_{p(0,002)}}{S_0}$$

- un tratto di *elasto-plasticità AC*: aumentando il carico oltre F_{lp} , le deformazioni non sono più direttamente proporzionali ai carichi applicati; il diagramma s'incurva leggermente verso destra: la provetta si allunga, gli allungamenti aumentano in modo più rapido rispetto all'aumentare del carico ed agli allungamenti elastici si sommano anche allungamenti permanenti, che sono tanto più ampi quanto più si è vicini al punto C.

In particolare, nel tratto AB (*di sola elasticità*), aumentando il carico, il materiale si comporta ancora elasticamente, cioè le deformazioni permanenti sono trascurabili rispetto a quelle elastiche. In questa fase non è rispettata la legge di proporzionalità e quindi la provetta si allunga di più di quanto aumenta il carico, però se togliamo il carico non permane alcuna deformazione e la provetta riprende la lunghezza iniziale.

Al punto B del diagramma corrisponde il “carico al limite di elasticità” F_{le} , sotto il quale le deformazioni permanenti sono minime.

Il “carico unitario al limite di elasticità” risulta quindi:

$$R_{le} = \frac{F_{le}}{S_0}$$

Nel tratto BC (dove c'è elasticità e plasticità) la provetta subisce delle deformazioni, che permangono in parte anche dopo l'eliminazione del carico. Tali deformazioni sono cioè sia elastiche (quindi spariscono) sia plastiche (permanenti). Se viene tolto il carico, l'allungamento si riduce ma la provetta non riprende le dimensioni iniziali.

Dopo l'eliminazione della forza svaniscono le sole deformazioni elastiche, e rimangono impresse le deformazioni plastiche (permanenti). Qui l'energia meccanica utilizzata per effettuare l'allungamento della provetta (si dà inizio al fenomeno vibratorio degli atomi), non viene riutilizzata completamente per il "riposizionamento" della struttura: una parte è utilizzata per riportare gli atomi nella posizione originaria ed una parte viene dissipata sotto forma di calore causando una deformazione plastica permanente.

- Un tratto di *plasticità CD*: superato il punto C, va scomparendo l'elasticità e si evolve un fenomeno di deformazione plastica che con l'aumentare del carico si manifesta in maniera sempre più evidente e che porterà poi alla rottura della provetta. L'aumento della plasticità raggiungendo il punto C del diagramma, neutralizza ciò che riguarda l'elasticità e dopo tale confine riguarda unicamente deformazioni di tipo plastico.

Quando il carico raggiunge il punto C del diagramma, le distanze interatomiche del reticolo cristallino sono divenute così grandi che, anche quando dovesse cessare l'applicazione del carico, gli atomi non riprendono più la posizione primitiva. Dopo il punto C, quindi, ha inizio la deformazione plastica in quanto le deformazioni sono irreversibili.

Per i materiali duttili, raggiunto tale valore della forza, detto "carico di snervamento", punto C, la provetta subisce un sensibile allungamento pur se non cresce la forza. A partire dal punto C, in pratica, la deformazione della provetta aumenta per la prima volta senza che il carico aumenti, o addirittura quando il carico diminuisce.

Nel tratto CD il carico non mantiene una regolarità, dovuta alla natura del materiale (alla sua struttura cristallina, alla forma del reticolo atomico della propria cella elementare, gli atomi interstiziali e le vacanze, ecc.). Queste variazioni sono comprese tra i punti F_{eH} e F_{eL} . F_{eH} corrisponde al *carico di snervamento superiore*. In tale punto si passa bruscamente dalle piccole alle grandi deformazioni e si osserva la prima diminuzione del carico. F_{eL} corrisponde al *carico di snervamento inferiore*, cioè il valore più basso raggiunto dal carico nel corso dello snervamento.

Lo snervamento ha luogo quando il carico necessario a vincere le forze secondarie intermolecolari è minore di quello necessario a rompere i legami molecolari. Le molecole cominciano a districarsi e a scorrere le une rispetto alle altre. Il materiale continua ad allungarsi fino a quando non si realizza una orientazione delle molecole sufficiente a far sì che il carico venga contrastato dai legami molecolari primari. A questo punto il carico comincia di nuovo a crescere fino a che la resistenza dei legami primari non è vinta e il materiale si rompe.

Il brusco allungamento della provetta causa un altrettanto brusco spostamento dello stantuffo nel cilindro di forza dell'olio in pressione della macchina. A ciò corrisponde una caduta di pressione dell'olio non solo nel cilindro di forza della macchina ma anche in tutto il circuito idraulico.

La fase di snervamento non compare nei materiali fragili come le ghise e negli acciai duri, che hanno elevata percentuale di carbonio. Questi materiali pervengono alla rottura senza passare attraverso la fase di snervamento.

DETERMINAZIONE DEL CARICO UNITARIO DI SNERVAMENTO

Dato il carico di snervamento F_{eH} , che è il valore del carico in cui la provetta subisce un sensibile allungamento pur se non cresce la forza e dove si passa bruscamente dalle piccole alle grandi deformazioni permanenti, viene definito *carico unitario di snervamento* R_{eH} il rapporto tra il carico di snervamento F_{eH} e l'area della sezione iniziale S_0 :

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [\text{in N/mm}^2]$$

Esempio di calcolo eseguito per il materiale Fe370:

Dati $F_{eH} = 51000$ [N]; $S_0 = 113,097$ [mm²], allora:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} = \frac{51000}{113,097} = 450,9 \quad [\text{N/mm}^2]$$

Il carico di snervamento può essere convenzionalmente sostituito con il carico di scostamento dalla proporzionalità $R_{p(0,2)}$.

Nel tratto **DE** si manifesta un “autoincrudimento” del materiale che provoca un aumento della resistenza e gli allungamenti crescono notevolmente.

Nel punto E il carico raggiunge il valore massimo F_m .

Il *carico massimo* F_m (o carico di rottura) rappresenta la massima forza sopportata dalla provetta durante la prova. Perciò superato il punto E ci si avvicina sempre più alla rottura del materiale sottoposto alla prova.

DETERMINAZIONE DEL CARICO UNITARIO DI ROTTURA (o Resistenza a trazione)

Dato il carico massimo F_m (o carico di rottura) che è la massima forza sopportata dalla provetta nel corso della prova, viene definito *carico unitario di rottura* R_m (o *carico unitario massimo* o *resistenza a trazione*) il rapporto tra il carico massimo F_m e l'area della sezione iniziale S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{in N/mm}^2]$$

Esempio di calcolo eseguito per il materiale Fe370:

Dati $F_m = 53600$ [N]; $S_0 = 113,097$ [mm²], allora:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{53600}{113,097} = 473,9 \quad [\text{N/mm}^2]$$

In verità questo calcolo è usato come verifica, infatti il computer, collegato alla macchina di prova, fornisce già il valore di R_m , ma null'unità di misura del [MPa]; ma sappiamo che:

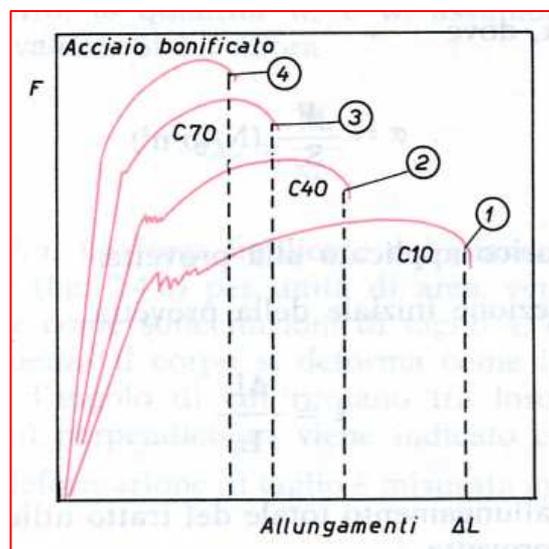
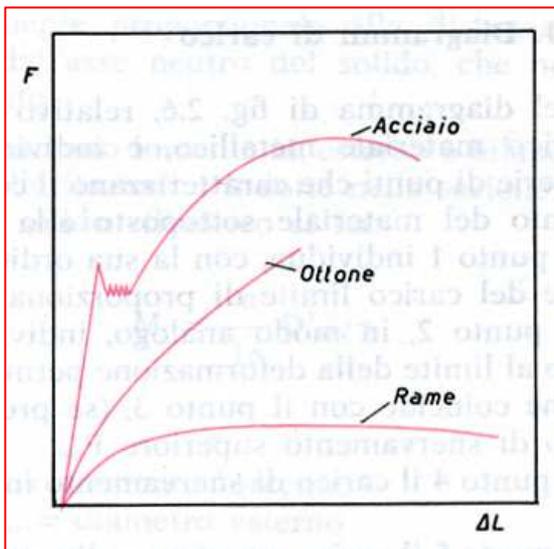
$$1[\text{MPa}] = 10^6[\text{Pa}] = \frac{10^6[\text{bar}]}{10^5} = 10^6 \frac{[\text{N}]}{[\text{m}^2]} = \frac{[\text{N}]}{[\text{mm}^2]}$$

Nell'intervallo **EF** si ha un allungamento localizzato della provetta anche se il carico diminuisce. Tale allungamento è tanto più grande quanto più duttile è il materiale. La sezione si restringe visibilmente dando luogo al cosiddetto fenomeno della *strizione*. In tale zona si ha la rottura della provetta.

Nel punto F si ha la rottura della provetta ed il carico che la determina è detto “carico ultimo” F_u . Esso ha scarsa importanza.

Il diagramma a cui si è fatto fin qui riferimento, relativo ad un acciaio dolce o ad un acciaio ricotto, è stato scelto perché permette di individuare chiaramente tutti i punti oggetto di discussione.

Le fasi di cui si è parlato non sempre sono così distinte. Alcuni materiali, come il rame, l'ottone, le leghe leggere e gli acciai bonificati passano dalle piccole alle grandi deformazioni senza che si manifesti alcuna discontinuità relativa allo snervamento. Anche nell'ambito degli stessi acciai, il diagramma si modifica a seconda della composizione e dei trattamenti termici subiti.



In generale, il diagramma carichi-allungamenti si allunga e si abbassa, avvicinandosi all'asse delle ascisse, con l'aumentare della duttilità del materiale.

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI STRIZIONE

Tale coefficiente viene misurato dal rapporto, espresso in percentuale, tra la differenza delle aree della sezione utile iniziale S_0 e della sezione minima S_u dopo rottura, e la sezione utile iniziale S_0 :

$$Z = 100 \times \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad [\%]$$

Il coefficiente di sicurezza rappresenta la diminuzione della sezione in un punto della provetta, causata da un allungamento localizzato. Tale diminuzione *avviene in maniera più evidente quanto più duttile è il materiale.*

Il valore del coefficiente di strizione é un indice della duttilità del materiale: tanto più piccolo é il valore di S_u , tanto più elevato é il valore del coefficiente di strizione Z , tanto più duttile é il materiale.

Esempio di calcolo eseguito per il materiale Fe370:

Dati $d_0 = 12$ [mm]; $d_u = 7,26$ [mm]; $Z =$ coefficiente di strizione, allora:

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \times 100 = \frac{\frac{d_0^2 \pi}{4} \times \frac{d_1^2 \pi}{4}}{\frac{d_0^2 \pi}{4}} \times 100 = \frac{\frac{12^2 \pi}{4} \times \frac{7,26^2 \pi}{4}}{\frac{12^2 \pi}{4}} \times 100 = \frac{113,097 - 41,396}{113,097} \times 100 = 63,39\%$$

DETERMINAZIONE DELL' ALLUNGAMENTO PERCENTUALE DOPO ROTTURA

Se si considera il tratto utile L_0 della provetta diviso in tre parti uguali e la rottura avviene nella parte centrale (detta “terzo medio”), l’allungamento si ricava attraverso l’espressione:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

dove L_0 é la lunghezza iniziale tra i riferimenti (tratto utile) misurata prima della prova ed L_u é la lunghezza ultima tra i riferimenti dopo che é avvenuta la rottura della provetta, misurata dopo aver riaccostato e fatto combaciare esattamente i due spezzoni.

Il valore di L_0 è però diverso a seconda del tipo di provetta utilizzato.

Solitamente, nella prova di trazione su materiali ferrosi, vengono usate provette *proporzionali*, cioè con un rapporto costante fra l’area della sezione iniziale e la lunghezza fra i riferimenti della parte calibrata, al fine di ottenere, entro certi limiti, dei valori di allungamento confrontabili tra i diversi materiali metallici considerati.

- per le provette corte a sezione circolare, si ha $L_0 = K \sqrt{S_0}$ con $K = 5,65$.

Per cui:

$$L_0 = 5,65 \sqrt{\frac{(\pi d^2)}{4}} = 5d$$

Quindi la lunghezza iniziale L_0 tra i riferimenti é pari a 5 volte il diametro stesso ($L_0 = 5d$).

- Nel caso di provette *proporzionali* con lunghezza iniziale fra i riferimenti diversa dalla precedente, l'indicazione dell'allungamento si effettua completando il simbolo A con un pedice indicante il coefficiente di proporzionalità utilizzato.

Per esempio, nel caso delle provette lunghe a sezione circolare, che hanno coefficiente $K = 11,3$ si ha:

$$L_0 = 11,3 \sqrt{\frac{(\pi d^2)}{4}} = 10d$$

Quindi la lunghezza iniziale L_0 tra i riferimenti é pari a 10 volte il diametro stesso ($L_0 = 10d$).

Quindi l'allungamento é indicato con: $A_{11,3} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$

con $L_0 = 10d$, come prima determinato.

Nel caso di *provette non proporzionali*, il simbolo A deve essere invece completato da un pedice indicante la lunghezza iniziale fra i riferimenti, in millimetri.

Esempio:

A_{70} = allungamento percentuale su una lunghezza iniziale fra i riferimenti L_0 di 70 mm.

I risultati della prova non sono considerati validi (salvo accordo tra le parti) se la distanza della sezione di rottura rispetto al riferimento più vicino risulta inferiore alla lunghezza iniziale tra i riferimenti L_0 .

Quando si verificano le condizioni prima enunciate e si vogliono evitare scarti di provette, si può ricorrere ad un procedimento di correzione.

Procedimento di correzione per la determinazione dell'allungamento nelle prove non valide

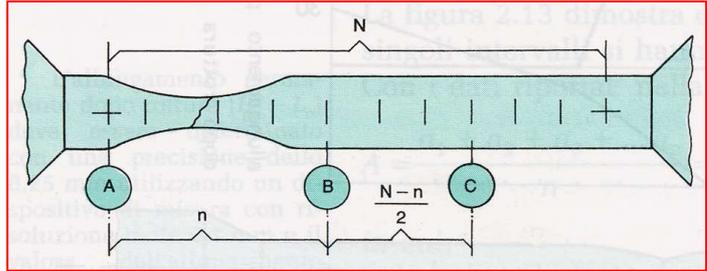
Si supponga che sulla lunghezza L_0 della provetta siano stati preventivamente tracciati $N = 10$ intervalli e che, dopo la rottura, i due spezzoni siano stati accostati in modo da fare coincidere i due assi.

Sia A il riferimento del frammento dello spezzone più corto e B il riferimento delle divisioni segnate sullo spezzone più lungo, tale che la sua distanza dal punto di rottura sia circa uguale a quella tra il punto di rottura e il riferimento A.

Si conta il numero di intervalli n esistenti nel tratto AB e si vede se n é pari o dispari.

L'allungamento dopo rottura viene determinato come appresso descritto.

1) Se $N - n$ è un numero pari, si misura la distanza fra A e B e la distanza tra B e la divisione C situata a $(N - n)/2$ intervalli oltre B.



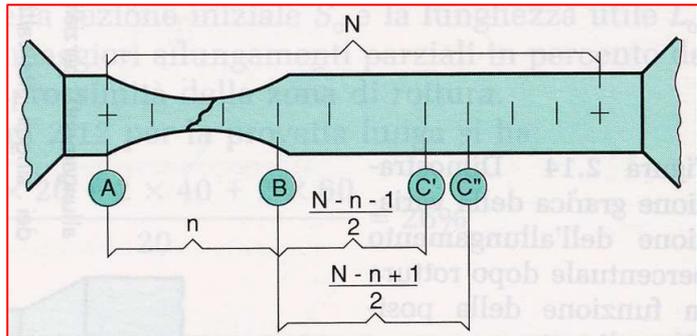
Esempio:

Si misura il tratto AB: $n = 4$ intervalli
 Si misura il tratto BC: $(N-n)/2 = (10-4)/2$

Si calcola l'allungamento percentuale dopo rottura con la formula:

$$A = \frac{AB + 2BC - L_0}{L_0} 100 \quad [\text{in \%}]$$

2) Se $N - n$ è un numero dispari, si misura la distanza fra A e B e la distanza fra B e le divisioni C' e C'' situate rispettivamente a $(N-n-1)/2$ e $(N-n+1)/2$ intervalli oltre B.



Esempio:

Si misura il tratto AB: $n = 3$ intervalli
 Si misura il tratto BC': $(N-n-1)/2 = (10-3-1)/2 = 3$
 Si misura il tratto BC'': $[(N-n-1)/2]+1 = [(10-3-1)/2]+1 = 4$

Si calcola l'allungamento percentuale dopo rottura con la formula :

$$A = \frac{AB + BC' + BC'' - L_0}{L_0} 100 \quad [\text{in \%}]$$

L'allungamento dopo rottura é l'indice che maggiormente esprime la deformabilità di un materiale.

Esso dipende dalle proprietà del materiale (composizione chimica, dimensione della grana cristallina, tipo di reticolo cristallino, trattamenti termici ...) e dalle dimensioni della provetta.

Con riferimento al diagramma carichi-allungamenti, l'aumento del carico fino al suo valore massimo (punto E) determina un allungamento uniforme su tutta la lunghezza della provetta. Oltre tale punto (tratto EF) l'allungamento é localizzato nella zona di strizione dove avverrà la rottura. Quindi l'allungamento subito da una provetta sottoposta a trazione fino alla rottura è la somma di un allungamento uniforme verificatosi in una prima fase e di un allungamento notevole localizzato nella zona di strizione e di rottura.

Gli allungamenti dopo rottura possono essere posti in un diagramma.

Si supponga che la rottura sia avvenuta esattamente a metà della lunghezza utile.

Dopo la rottura si misurano, per ciascuno spezzone cilindrico i tratti 1-2, 2-3, 3-4 ...

Ogni allungamento é posto in ordinata in scala ingrandita opportunamente, a partire dal punto medio di ciascun intervallo.

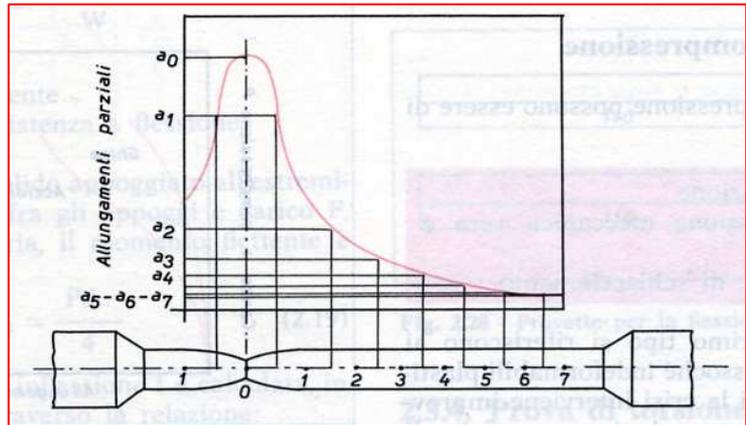
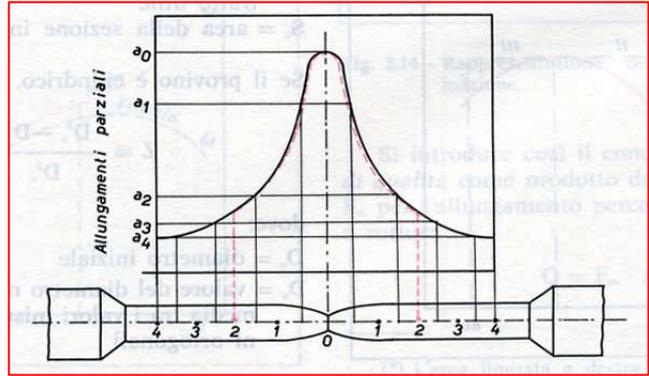
Si nota che:

- Gli allungamenti sono elevati vicino alla zona di rottura e decrescono notevolmente ai lati;
- Le zone simmetriche, rispetto alla rottura, hanno subito allungamenti uguali.

Una provetta più corta rispetto alla precedente, presenta lo stesso grafico con gli stessi allungamenti, ma un allungamento percentuale dopo rottura maggiore della provetta più lunga. Ciò é dovuto al fatto che gli allungamenti notevoli sono vicini alla zona di rottura.

Qualora la rottura avvenga in una zona periferica della provetta, il grafico dimostrativo dell'allungamento é quello accanto.

Di seguito sono riportati, a titolo orientativo, i valori medi di allungamento per alcuni materiali metallici.



Materiale	Allungamento A%
Acciaio extradolce	22 ÷ 25
Acciaio al Cr-Ni bonificato	10 ÷ 15
Acciaio extraduro temprato	10
Bronzo col 14% di Sn	10
Ottone OT 58	25
Avional bonificato	4 ÷ 8

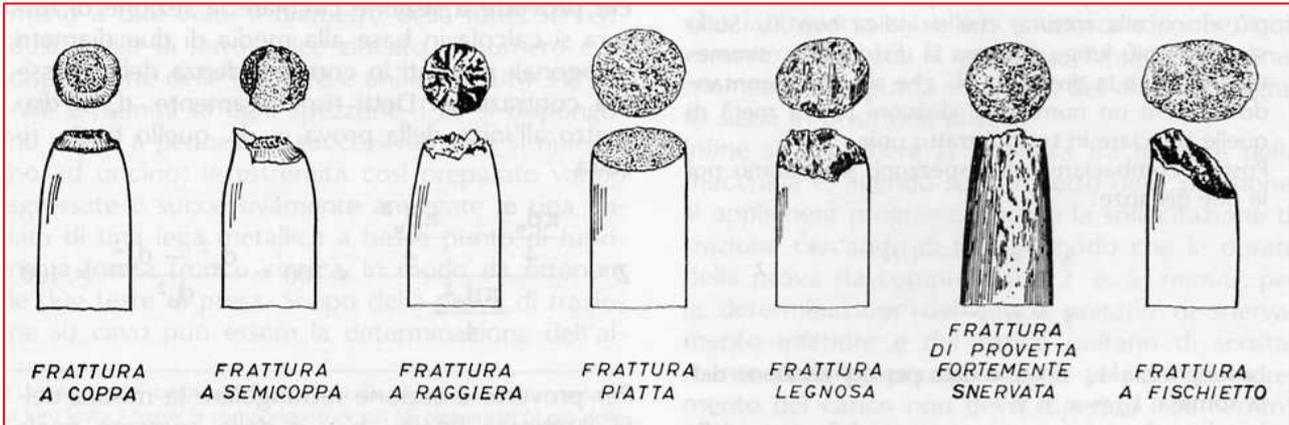
ANALISI DELLA FRATTURA

A secondo del materiale oggetto della prova, la sezione di rottura può assumere aspetti diversi.

L'esame visivo della frattura fornisce indicazioni riguardo la tenacità del materiale.

L'Ente di Unificazione Siderurgica ha elaborato la tabella UNISIDER 4, che raccoglie le principali tipologie di frattura degli acciai. Ricordiamo le seguenti fratture:

- 1 – a coppa
- 2 – a semicoppa
- 3 – a raggiera
- 4 – piatta
- 5 – legnosa
- 6 – fortemente snervata
- 7 – a fischiotto



La designazione della frattura si effettua indicando il numero della figura corrispondente. La designazione di una frattura “a raggiera” é quindi: “Frattura 3 UNISIDER 4” Nel caso di fratture non assimilabili a quelle della tabella, si dice “Frattura irregolare”.

Nel caso degli acciai, una frattura a coppa con forte contrazione trasversale é indice di tenacità; gli acciai duri presentano una frattura piatta.

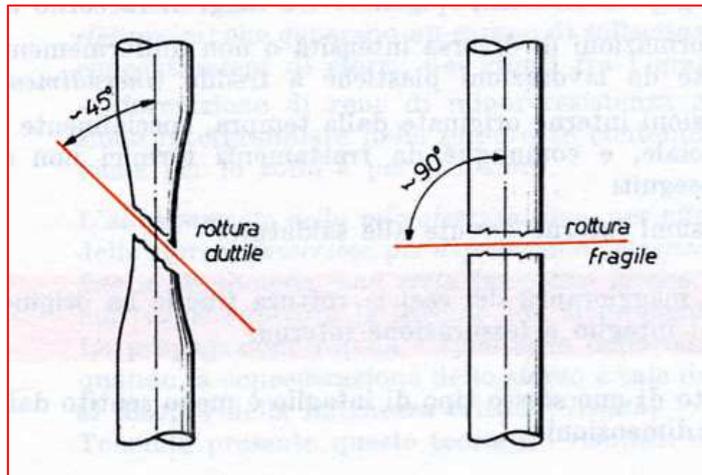
In generale si distinguono due tipi di rottura:

a) Rottura duttile

Si ha per deformazione plastica e conseguente scorrimento dei cristalli secondo piani orientati a circa 45° rispetto alla sollecitazione esterna.

L’allungamento e la diminuzione di sezione sono elevati.

Il carico di snervamento é molto inferiore rispetto al carico di rottura.



b) Rottura fragile

Avviene per decoesione dei cristalli, é netta e perpendicolare alla sollecitazione applicata. Si hanno allungamenti bassi, diminuzione della sezione resistente e rottura improvvisa. Il carico di snervamento é vicinissimo a quello di rottura. La grana è brillante.

La forma della rottura dipende da vari fattori:

- 1) al diminuire della temperatura, sotto zero, scompare l'allungamento plastico e l'acciaio si rompe per frattura fragile
- 2) la frattura fragile é favorita dalla presenza di tensioni interne (dovute ad incrudimenti, saldature, tempre ...)
- 3) intagli, fessurazioni, cricche, facilitano la rottura fragile, come pure la struttura cristallina a grano grosso o quella lamellare (che é innesco alla rottura)
- 4) per quanto riguarda la composizione chimica, favoriscono la rottura fragile una maggior percentuale di carbonio e di silicio, la presenza di impurezze come fosforo e zolfo, gas imprigionati come idrogeno, azoto ed ossigeno; favoriscono la rottura duttile l'alluminio ed il nichel, che affinano il grano.

Aumentando la velocità di applicazione del carico, la deformazione plastica non fa in tempo a manifestarsi, per cui diminuisce l'allungamento e la strizione e la rottura tende a divenire fragile.

DETERMINAZIONE DEL MODULO DI ELASTICITÀ NORMALE

Con riferimento al tratto rettilineo OA del diagramma carichi-allungamenti, si é detto che c'è proporzionalità tra il carico applicato ed il corrispondente allungamento della provetta. Per questo si può scrivere:

$$F = K \cdot \Delta L$$

con K una costante di proporzionalità.

Facendo riferimento ai valori unitari del carico e dell'allungamento, tale relazione diventa:

$$\frac{F_{lp}}{S_0} = K \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

La costante di proporzionalità K é detta "E" e prende il nome di "Modulo di elasticità normale" o "Modulo di Young".

Essendo $\sigma = \frac{F_{lp}}{S_0}$ la sollecitazione unitaria di trazione ed $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ l'allungamento unitario, si può scrivere:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

da cui:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [N/mm^2]$$

Si definisce quindi "Modulo di elasticità a tensione normale" o a trazione o "Modulo di Young" il rapporto tra la tensione normale unitaria entro il limite di proporzionalità e l'allungamento unitario corrispondente.

Sviluppato con il significato sopra descritto, si ha:

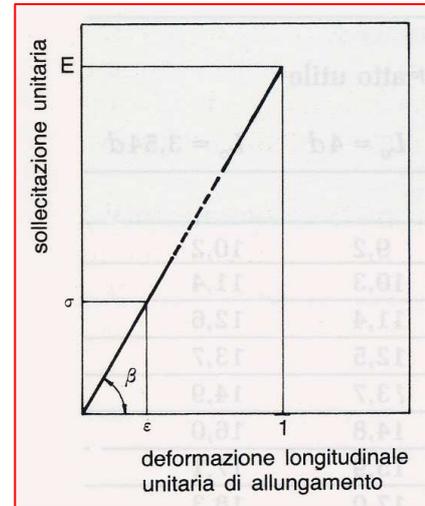
$$E = \frac{\frac{F_p}{S_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Con riferimento alla figura a lato, si ha:

$$E = \text{tg } \beta.$$

Cioè:

Il modulo di elasticità rappresenta la tangente dell'angolo del tratto iniziale rettilineo del grafico rispetto all'asse degli allungamenti unitari.



Il modulo di elasticità è un indice della “rigidità” di un materiale: quanto più il materiale é rigido tanto minore é l’allungamento al limite di proporzionalità e tanto più grande sarà il modulo di elasticità.

Per uno stesso materiale, il modulo di elasticità varia al variare della temperatura cui é posto il materiale e col trattamento subito dal materiale stesso.

Il modulo di elasticità diminuisce con l’aumentare della temperatura (che rende più plastico il materiale) ed aumenta nel caso di trattamenti che determinano durezza del materiale.

La tabella che segue riporta i moduli di elasticità di alcuni materiali alla temperatura di 20 °C.

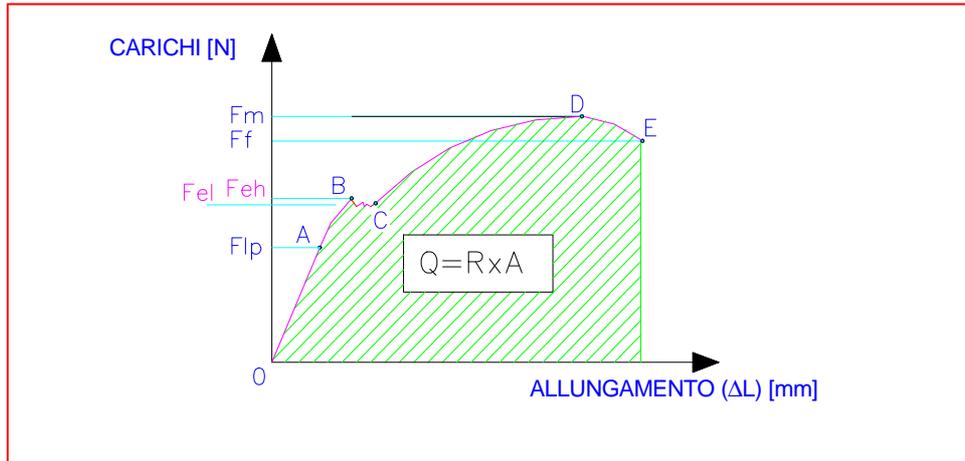
Materiale	Modulo di elasticità E [N/mm ²]
Alluminio	67000
Leghe leggere	80000
Ottone	80000
Ghisa	100000
Rame	110000
Bronzi	120000
Acciai comuni	200000
Acciai legati	210000
Carboresina	220000
Nichel	230000

INDICE DI QUALITÀ

In generale un acciaio è tanto migliore quanto più elevati risultano i suoi carichi di rottura R_m e gli allungamenti A . Così viene definito “indice di qualità” il prodotto:

$$Q = R \times A$$

Tale prodotto, se si osserva il diagramma riportato carichi-allungamenti, rappresenta l'area delimitata dalla curva caratteristica. Quest'area, che è comunque difficilmente valutabile data la sua irregolarità, rappresenta il lavoro di deformazione speso per provocare la rottura della provetta. L'indice di qualità di un acciaio esprime la capacità di questo di assorbire lavoro quando è sollecitato. Tanto maggiore è tale indice, tanto maggiore è la capacità del materiale di assorbire lavoro sotto l'azione delle sollecitazioni cui è sottoposto. In tal caso il materiale possiede grande resistenza a trazione accoppiata ad un buon allungamento, il materiale è cioè nel contempo tenace e duro.

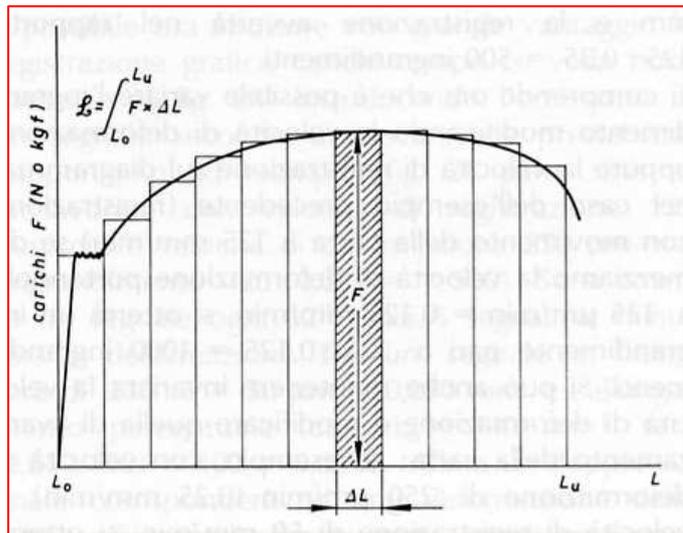


L'Indice di qualità (detto anche "coefficiente di qualità") non è previsto dalle norme UNI.

Significato dell'area del diagramma

Si può pensare che l'area del diagramma sia costituita dalla somma di tanti rettangoli elementari aventi base ΔL ed altezza F. In questo modo, il prodotto F x ΔL non è altro che il prodotto di una forza per uno spostamento, cioè un lavoro. La somma dei rettangoli elementari che compongono l'area del diagramma rappresenta quindi il lavoro di deformazione che è stato speso per provocare la rottura della provetta.

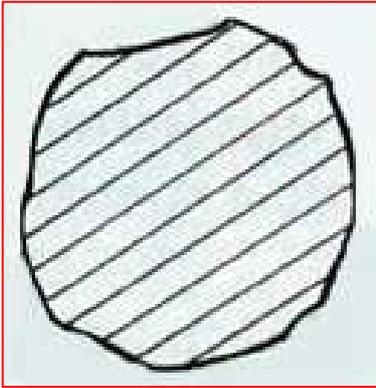
L'area del diagramma, cioè il lavoro di deformazione non è altro che l'integrale:



$$L = \int_{L_0}^{L_u} F \times \Delta L$$

COMPORAMENTO DEI MATERIALI METALLICI DURANTE LA PROVA DI TRAZIONE STATICA

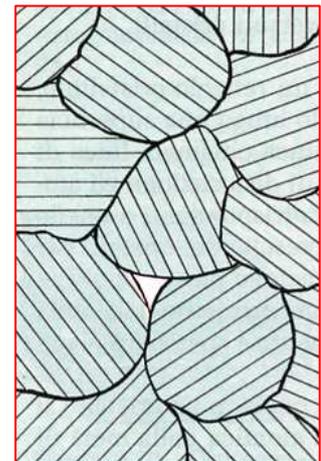
Un materiale metallico sottoposto ad una forza esterna agente in un'unica direzione, si comporta in modo diverso a seconda del valore della forza stessa. Ciò è dovuto alla reazione opposta dai singoli cristalli ed alle reciproche interazioni esistenti tra gli stessi.



Nell'ipotesi non reale che il materiale metallico in fase di collaudo fosse costituito da un solo grano (monocristallo) e questo venisse sottoposto ad una forza esterna, il reticolo cristallino subirebbe una deformazione causata dallo scorrimento dei piani atomici, con conseguente variazione della forma del grano (allungato nella direzione della forza) senza però che la forma e le dimensioni delle singole celle elementari subiscano variazioni. In questo caso le proprietà meccaniche del grano cristallino (monocristallo) risulterebbero diverse a seconda della direzione della sollecitazione o dell'orientazione del cristallo. Questo diverso comportamento alle sollecitazioni nelle varie direzioni è detta

“anisotropia”.

Nella realtà i materiali sono costituiti da più grani (policristallo) ed i piani atomici sono orientati in tutte le direzioni. Essi sono allora “isotropi”, cioè non variano le proprietà meccaniche qualunque sia la direzione della sollecitazione applicata, in quanto lo scorrimento dei piani atomici in un grano risulta ostacolato dai piani del grano adiacente, che sono orientati in direzioni diverse.



E' chiaro che all'aumentare della sollecitazione applicata, anche altri grani iniziano lo slittamento nella direzione della sollecitazione, fino a che il materiale non consentirà altre deformazioni plastiche. Quando la forza applicata aumenterà ulteriormente fino a superare la forza di coesione, si avrà la rottura del materiale.

Si possono effettuare alcune considerazioni riguardo alla struttura dei materiali, in particolare al tipo di grano e giunti di cui essi sono costituiti. Infatti è proprio dalle caratteristiche dei grani e dei giunti che dipendono le proprietà del materiale, più precisamente:

a) avremo un'elevata resistenza del materiale, e quindi *un alto valore del carico massimo di rottura*, quando:

- si ha un'*alta* resistenza del giunto al distacco;
- si ha un'*alta* resistenza dei grani alla deformazione.

b) avremo un'elevata plasticità del materiale, e quindi un *grande allungamento*, quando:

- si ha un'*alta* resistenza del giunto al distacco;
- si ha una *bassa* resistenza dei grani alla deformazione.

c) avremo un'elevata fragilità del materiale, e quindi un minor allungamento, quando:

- si ha una bassa resistenza del giunto al distacco;
- si ha un' alta resistenza dei grani alla deformazione.

Il comportamento dei materiali alla sollecitazione di trazione dipende da vari fattori.

- 1) Proprietà dei componenti strutturali, cioè dalla composizione chimica.
- 2) Dimensioni dei cristalli: cristalli piccoli (grana fine) offrono maggiore resistenza e si deformano di meno a causa dell'azione dei giunti e delle interazione tra i cristalli.
- 3) Distribuzione delle fasi. Cristalli semplici che portano a miscugli ed eutettici, composti chimici e soluzioni solide, la segregazione ecc. influenzano la resistenza dei materiali. Le soluzioni solide offrono le migliori caratteristiche.
- 4) Stato del materiale. Lavorazioni meccaniche a freddo, che determinano deformazioni dei reticoli cristallini e, quindi, incrudimento, aumentano la resistenza del materiale alle deformazioni, la sua durezza e fragilità con conseguente rottura all'aumentare della sollecitazione.
- 5) Temperatura. Al diminuire della temperatura diminuisce la mobilità degli atomi ed aumenta quindi la resistenza alla deformazione con conseguente aumento dei valori dei carichi unitari di snervamento e di rottura.

A temperatura ordinaria la coesione nei giunti é superiore a quella che c'è all'interno dei grani, quindi, se c'è frattura, essa avviene attraverso i grani (frattura transcristallina).

Quando la temperatura aumenta, diminuisce la coesione nei giunti e quindi é fra di essi che avviene una eventuale frattura (frattura intercristallina).

CARICO DI SICUREZZA

Quando bisogna dimensionare un organo meccanico e si vuole la certezza che in esso, quando é posto in opera, le deformazioni si mantengano nel campo elastico, occorre fare riferimento non al carico unitario di rottura ma al cosiddetto “carico di sicurezza”.

E' necessario che la sezione calcolata dia assoluta sicurezza di resistere al carico applicato, anche se dovessero intervenire circostanze accidentali. Se si dovesse effettuare il calcolo di una sezione in funzione del carico di rottura, basterebbe una leggera imperfezione della struttura del materiale o un modesto aumento del carico, per provocare la rottura dell'organo meccanico calcolato.

Per questo, nel calcolo, si fa riferimento non al carico di rottura ma ad un “carico di sicurezza”, che é una frazione del primo.

Il carico di sicurezza “k” é il rapporto tra il carico unitario di rottura R_m ed un coefficiente di sicurezza opportunamente scelto a seconda del tipo di sollecitazione (statica, dinamica, a fatica) e delle condizioni ambientali:

$$k = \frac{R_m}{n_R}$$

Il coefficiente di sicurezza deve essere tanto più elevato quanto più incerta é la previsione delle forze agenti, malsicura la qualità del materiale, quanto maggiore é il rischio per la vita umana, quanto maggiore é il danno economico provocato dalla rottura del pezzo.

La reazione suddetta può anche essere scritta: $\sigma_{am} = \frac{\sigma_R}{n_R}$

Si parla in tal caso di “tensione ammissibile”.

Oggi si preferisce dedurre la tensione ammissibile dal carico unitario di snervamento, introducendo un altro, minore, coefficiente di sicurezza:

$$k = \frac{R_{eH}}{n} \quad \text{oppure} \quad \sigma_{am} = \frac{\sigma_S}{n}$$

Quando il materiale non presenta un evidente fenomeno di snervamento, al posto di σ_S si pone il carico unitario di scostamento dalla proporzionalità $\sigma_{p(0,2)}$.

La seguente tabella riporta i coefficienti di sicurezza rispetto alla rottura ed allo snervamento.

Impiego	Coefficiente n_R	Coefficiente n
Pezzi ottenuti per lavorazioni plastiche di acciaio e leghe leggere	2,3 ÷ 3	1,5 ÷ 2
Pezzi ottenuti per lavorazioni plastiche di altri materiali	3 ÷ 4	2 ÷ 2,6
Pezzi ottenuti per fusione di acciaio	3,2 ÷ 4,2	1,8 ÷ 2,5
Pezzi ottenuti per fusione di altri materiali non fragili	3 ÷ 5,2	2,2 ÷ 3,2
Pezzi ottenuti per fusione di ghisa ed altri materiali fragili	5 ÷ 8	-
Per costruzioni di acciai in generale		1,5

In genere, il carico di sicurezza è contenuto nei seguenti limiti:

- nel caso di sollecitazioni statiche $k = (1/3 \div 1/5) R_m$
- nel caso di sollecitazioni dinamiche $k = (1/10 \div 1/20) R_m$

Indicando con σ la sollecitazione dovuta al carico esterno applicato sull'organo meccanico, il materiale non subirà sicuramente alcuna deformazione permanente quando è soddisfatta la condizione di stabilità $\sigma \leq k$.