

Capitolo 5

Prove sui materiali metallici

5.1 Introduzione

Le prove sui materiali hanno lo scopo di determinarne le caratteristiche onde verificare la loro conformità all'impiego cui sono destinati. L'elenco seguente, anche se non esaustivo, riporta le principali proprietà rilevabili con metodologie unificate:

- chimiche: ad esempio composizione, resistenza alla corrosione;
- elettriche: ad esempio costante dielettrica, resistività, rigidità dielettrica;
- fisiche: ad esempio dimensione, struttura;
- acustiche: ad esempio coefficiente di assorbimento, velocità di propagazione del suono;
- meccaniche: ad esempio resistenza a trazione, a compressione, agli urti;
- termiche: ad esempio conducibilità, coefficiente di dilatazione;
- tecnologiche: ad esempio piegamento, temprabilità, colabilità, imbutibilità;
- di continuità: ad esempio porosità, soffiature, cricche.

Nell'ambito di questo capitolo sono riportate le prove meccaniche e le prove tecnologiche relative ai materiali metallici, che rivestono maggiore interesse nell'industria manifatturiera.

5.2 Prove meccaniche

Le proprietà meccaniche sono le proprietà che i materiali manifestano se sottoposti ad un sistema di forze statiche o dinamiche. In relazione alla modalità di applicazione del carico, le prove meccaniche si possono dividere in:

- prove statiche, nelle quali il carico viene incrementato lentamente o viene mantenuto costante durante la prova (prova di durezza, prova di trazione, prova di compressione, prova di flessione, prova di torsione e prova a taglio);

- prove dinamiche, nelle quali il carico viene incrementato con notevole velocità (prova di resilienza);
- prove di fatica, nelle quali il carico varia periodicamente in grandezza e, in alcuni casi, in grandezza e direzione.

Le prove meccaniche si possono eseguire a temperatura ambiente (assunta per convenzione pari a 20 °C) o a temperatura diversa da quella ambiente, che in tal caso deve essere obbligatoriamente indicata.

5.3 Prove di durezza

Mediante le prove di durezza si determina la resistenza opposta da un materiale a lasciarsi penetrare da un altro materiale (penetratore). Le prove di durezza si dividono in:

- durezza Brinell;
- durezza Vickers;
- microdurezza;
- durezza Rockwell;
- durezza per confronto (prova Poldi).

Le prove di durezza Brinell e Vickers si differenziano solo per i valori del carico e tipo di penetratore, mentre la metodologia di prova Rockwell è completamente differente. Per eseguire le prove di durezza, con l'esclusione della prova Poldi, si utilizza un'apparecchiatura denominata durometro, fig. 5.1.

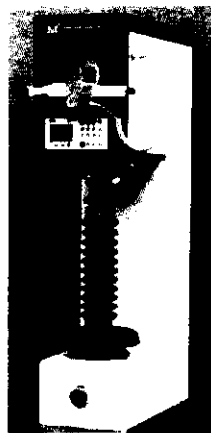


Fig. 5.1 - Apparecchiatura per prove di durezza

5.3.1 Prova di durezza Brinell

La prova di durezza Brinell, definita dalla norma UNI EN ISO 6506-1, si esegue applicando un carico sul provino, mediante un opportuno penetratore, e misurando la superficie dell'impronta lasciata sullo stesso. La durezza Brinell è proporzionale al rapporto tra il carico di prova diviso per l'area dell'impronta:

$$\text{Durezza Brinell} = 0.102 \cdot \frac{F}{S} \quad (5.1)$$

dove F è il carico applicato espresso in newton, S è la superficie dell'impronta espressa in millimetri quadrati e 0.102 è una costante.

Il penetratore è costituito da una sfera di metallo duro e può avere diametro pari a 1, 2.5, 5 o 10 mm. Il diametro della sfera deve essere scelto il più grande possibile, in modo da ottenere un'impronta sufficientemente ampia allo scopo di sottoporre a prova una zona rappresentativa della provetta. Quando lo spessore della provetta lo consente si utilizza di preferenza una sfera di 10 mm di diametro. I diametri più piccoli si adoperano per effettuare la prova su campioni di limitato spessore, per evitare che la deformazione prodotta dal penetratore interessi uno spessore di materiale tale da essere influenzato dalla presenza dell'incudine di appoggio del pezzo stesso.

Per la scelta del carico bisogna riferirsi al materiale da provare ed al diametro del penetratore, in quanto usando carichi e sfere arbitrari non si otterrebbero dei valori di durezza confrontabili. Infatti, l'entità della penetrazione dipende dal carico applicato ed, al variare di quest'ultimo, varia l'angolo di penetrazione α , delimitato dalle due tangenti alla sfera ai bordi dell'impronta, fig. 5.2. Di conseguenza si avrà una variazione della superficie dell'impronta differente da quella di variazione del carico in quanto il rapporto F/S non si mantiene costante.

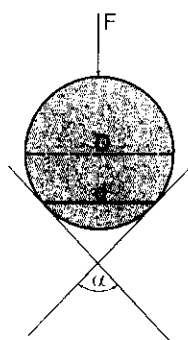


Fig. 5.2 - Angolo di penetrazione

Tab. 5.1 - Valori della costante *k* per alcuni materiali

Materiale	Costante <i>k</i> [N/mm ²]
Leghe di stagno e piombo	1
Leghe di alluminio	5
Leghe di rame	10
Acciai	30
Leghe di nichel	30
Leghe di titanio	30

Il carico, espresso in newton, si seleziona, quindi, utilizzando una legge di similitudine meccanica:

$$k = 0.102 \cdot \frac{F}{D^2}$$

(5.2)

dove *k* è una costante, detta anche rapporto forza-diametro, legata al materiale da testare e *D* è il diametro del penetratore, espresso in millimetri.

Si riportano, in tab. 5.1, i valori della costante *k* usualmente impiegati per alcune classi di materiali.

Esecuzione della prova

Il provino deve essere opportunamente preparato in modo che la superficie sulla quale effettuare la prova sia pulita ed esente da corpi estranei. Mediante un sistema ottico si visualizza la superficie su di uno schermo con un ingrandimento che può essere

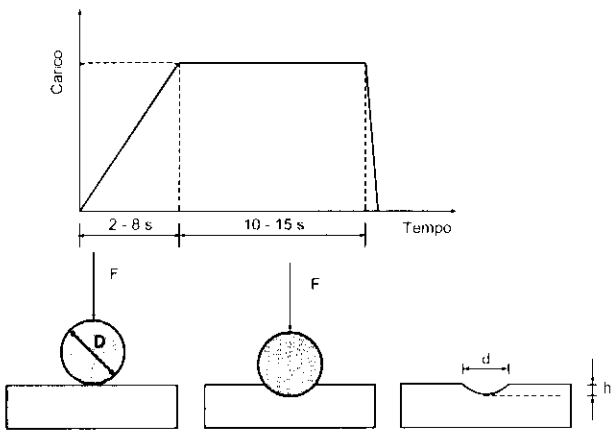


Fig. 5.3 - Modalità di applicazione del carico e di esecuzione della durezza Brinell

20X, oppure 70X. Si serra il provino sull'apposito portaprovino, in modo che non vi siano spostamenti durante la prova, e si applica il carico precedentemente scelto.

Il carico viene applicato come riportato in fig. 5.3; esso viene incrementato fino al raggiungimento del valore prescelto in un tempo variabile tra 2 s e 8 s e poi resta applicato sul provino per un tempo variabile tra 10 s e 15 s. Trascorso tale tempo si elimina il carico e si visualizza la superficie del provino sulla quale sarà impressa l'impronta che sullo schermo apparirà come una circonferenza. L'esecuzione della prova è schematizzata ancora nella fig. 5.3 dove è stato indicato con d il diametro dell'impronta ottenuta sul materiale e con h la sua profondità.

Si può osservare che il valore della profondità h dell'impronta è molto piccolo in confronto a quello del diametro d dell'impronta e pertanto, a parità di precisione degli strumenti impiegati per la misura, l'errore percentuale, che si commette misurando h , è più grande di quello che si ottiene misurando d , anche perché, in tal modo, la misura non è influenzata dagli scostamenti del profilo dell'impronta da un arco di circonferenza.

Considerando l'impronta come una calotta sferica di diametro uguale a quello del penetratore, fig. 5.4, ed indicando con h la profondità, con d il diametro dell'impronta e con D il diametro del penetratore, poiché la superficie della calotta sferica è data da:

$$S = \pi \cdot D \cdot h$$

se si esprime la profondità dell'impronta h in funzione di D e d :

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)$$

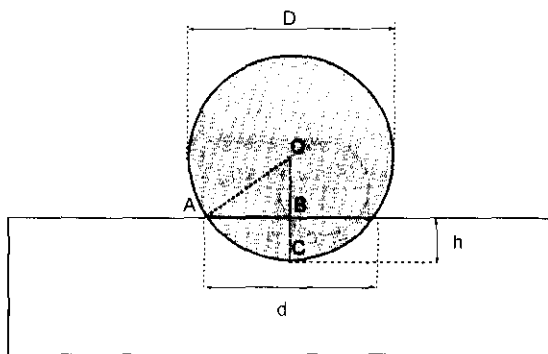


Fig. 5.4 - Calcolo della profondità dell'impronta

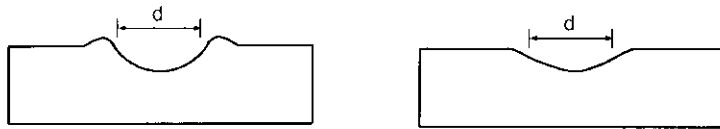


Fig. 5.5 - Sezione dell'impronta

la superficie della calotta sferica può essere calcolata in funzione dei diametri dell'impronta e del penetratore:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

Per tener conto dell'eventuale anisotropia del materiale, la norma UNI EN ISO 6506-1 impone di eseguire sempre una coppia di misure ortogonali dei diametri (d_1 e d_2) e si adotta la loro media aritmetica d per ricavare il valore dell'area S dell'impronta lasciata dal penetratore, fig. 5.6.

Sostituendo tale valore nella definizione di durezza Brinell (5.1), si ha:

$$\text{Durezza Brinell} = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (5.3)$$

dove il valore della forza F è espresso in newton, il diametro del penetratore D e la media dei diametri dell'impronta d , sono espressi in millimetri. La durezza Brinell, così come è definita, ha le dimensioni di una pressione (forza/superficie); tuttavia l'unità di misura non viene indicata ed il suo valore deve essere considerato adimensionale.

Una sezione dell'impronta, ortogonale alla superficie sulla quale è stata effettuata la prova di durezza, si presenta come in fig. 5.5, dove il colletto di rifollamento è tipico di materiali facilmente deformabili.

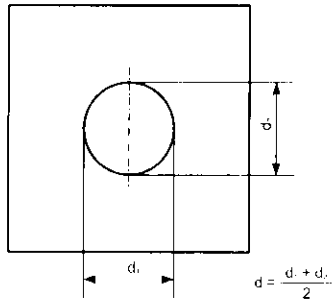


Fig. 5.6 - Misura del diametro medio dell'impronta

La durezza Brinell è designata con il simbolo *HBW*, anche se, talvolta, seguendo una vecchia designazione potrebbe trovarsi indicata con il simbolo *HB* (*Hardness Brinell*). Esso è preceduto dal valore di durezza ed è completato da indici, separati da sbarrette, che precisano le condizioni di prova nel seguente ordine:

- valore del diametro del penetratore utilizzato in millimetri;
- valore del carico di prova, espresso in chilogrammi forza;
- durata di applicazione del carico in secondi, qualora differisca da quella standard prevista dalla normativa vigente.

Nell'eseguire la prova bisogna tenere presente che:

- il risultato della prova non è attendibile se non risulta verificata la condizione $0.24 \cdot D < d \leq 0.6 \cdot D$;
- le impronte non devono essere troppo vicine l'una all'altra o al bordo del pezzo per cui la distanza tra il centro dell'impronta e il bordo del pezzo non deve essere minore di $2.5 \cdot d$, mentre la distanza tra i centri di due impronte vicine non deve essere minore di $3 \cdot d$;
- lo spessore del pezzo s deve essere almeno otto volte la profondità h dell'impronta, in modo tale che, dopo la prova, nessuna deformazione deve essere visibile sulla faccia opposta a quella su cui è stato applicato il penetratore.

Esercizio 5.1

Definire il significato delle seguenti sigle: 350 *HBW* 5/750 e 600 *HBW* 1/30/20.

- 350 *HBW* 5/750 → durezza Brinell pari a 350 misurata con una sfera di diametro 5 mm, con un carico di prova di 7.355 kN applicato per un tempo di 10 ÷ 15 s.
- 600 *HBW* 1/30/20 → durezza Brinell pari a 600 misurata con una sfera di diametro 1 mm, con un carico di prova di 294.2 N applicato per un tempo di 20 s.

Esercizio 5.2

Su di un provino sono state eseguite diverse prove di durezza Brinell, i cui risultati sono riportati in tabella. Verificare che la legge di similitudine meccanica (5.2) sia rispettata e calcolare il valore di *HBW* in tutti i casi.

	D penetratore [mm]	d impronta [mm]	carico [kgf]
Prova n. 1	10	4.75	3000
Prova n. 2	5	2.35	750
Prova n. 3	2.5	1.19	187.5
Prova n. 4	1	0.47	30

Essendo il valore del carico espresso in chilogrammi forza, per calcolare il valore della costante k dalla (5.2) bisogna fare il rapporto tra il carico applicato in newton ed il quadrato

del diametro del penetratore, moltiplicandolo per la costante 0.102; quindi si ha:

$$k_1 = 0.102 \cdot \frac{F}{D^2} = 0.102 \cdot \frac{3000 \cdot 9.807}{10^2} = 30 \quad k_2 = 0.102 \cdot \frac{750 \cdot 9.807}{5^2} = 30$$

$$k_3 = 0.102 \cdot \frac{187.5 \cdot 9.807}{2.5^2} = 30 \quad k_4 = 0.102 \cdot \frac{30 \cdot 9.807}{1^2} = 30$$

I valori di durezza Brinell sono:

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot 3000 \cdot 9.807}{\pi \cdot 10 \cdot (10 - \sqrt{10^2 - 4.75^2})} = 159$$

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot 750 \cdot 9.807}{\pi \cdot 5 \cdot (5 - \sqrt{5^2 - 2.35^2})} = 163$$

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot 187.5 \cdot 9.807}{\pi \cdot 2.5 \cdot (2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.19^2})} = 158$$

$$HBW = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot 30 \cdot 9.807}{\pi \cdot 1 \cdot (1 - \sqrt{1^2 - 0.47^2})} = 163$$

5.3.2 Prova di durezza Vickers

La prova di durezza Vickers, definita dalla norma UNI EN ISO 6507-1, si esegue applicando un carico sul provino, mediante un opportuno penetratore, e misurando la superficie dell'impronta rilasciata sullo stesso. La durezza Vickers è proporzionale al rapporto tra il carico di prova e la superficie dell'impronta. Il valore di durezza Vickers è, quindi, dato da:

$$HV = 0.102 \cdot \frac{F}{S} \quad (5.4)$$

dove F è il carico applicato espresso in newton, S è la superficie dell'impronta espressa in millimetri quadrati e 0.102 è una costante.

Il penetratore è costituito da un diamante a forma di piramide retta a base quadrata con un angolo diedro di 136° , fig. 5.7. Le quattro facce laterali della piramide devono incontrarsi in un punto; è ammesso un errore $e \leq 0.002$ mm.

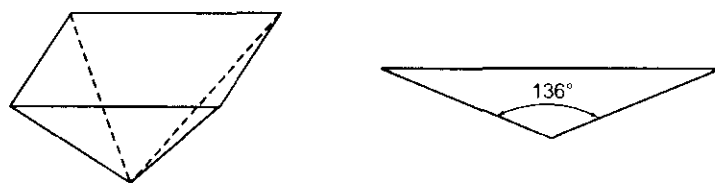


Fig. 5.7 - Penetratore Vickers

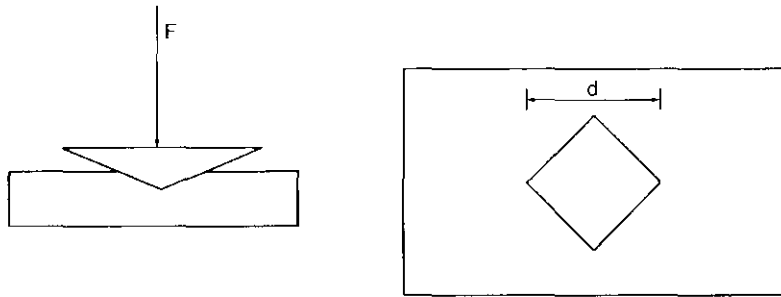


Fig. 5.8 - Durezza Vickers

L'esecuzione della prova di durezza Vickers è identica a quella della prova di durezza Brinell, fig. 5.8.

La prova deve essere eseguita su una superficie liscia, libera da ossidazione e la preparazione deve essere condotta in modo tale da minimizzare qualunque alterazione della superficie, ad esempio per riscaldamento o per incrudimento.

La finitura della superficie deve permettere un'accurata determinazione delle diagonali.

I carichi possono variare da un minimo di 1.961 N ad un massimo di 980.7 N. Il penetratore viene applicato sul materiale con un carico F gradualmente crescente in un tempo che varia tra i 2 s ed i 10 s e mantenuto per un tempo di 10 ± 15 s. Tolto il carico, si visualizza su un apposito schermo l'impronta che ha forma quadrata e si misurano le lunghezze delle due diagonali, la cui media aritmetica viene impiegata per il calcolo della superficie S dell'impronta. Per superfici piane la differenza fra le due diagonali misurate non deve essere maggiore del 5%.

La superficie dell'impronta è l'area laterale di una piramide retta a base quadrata, avente lo stesso angolo al vertice del penetratore, fig. 5.9. Pertanto, indicando con d la media aritmetica delle diagonali misurate, con a il lato di base della piramide e

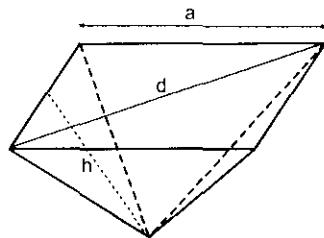


Fig. 5.9 - Superficie dell'impronta

con h l'altezza delle facce della piramide, si ha che:

$$S = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot h$$

dove a ed h valgono, rispettivamente:

$$a = \frac{\sqrt{2} \cdot d}{2} \quad h = \frac{d}{4} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sin 68^\circ}$$

e quindi:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin 68^\circ}$$

da cui:

$$HV = 0.102 \cdot \frac{F}{S} = 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5.5)$$

dove F è espresso in newton e la media delle diagonali d è espressa in millimetri. Il valore che esprime la durezza Vickers, analogamente alla Brinell, deve considerarsi adimensionale.

Nell'esecuzione della prova bisogna tenere presente che:

- la distanza tra il centro dell'impronta e il bordo del pezzo e fra i centri di due impronte adiacenti deve essere almeno 2.5 volte il valore medio delle diagonali dell'impronta nel caso di acciai o leghe di rame, almeno 3 volte il valore medio delle diagonali dell'impronta se il materiale è stagno, piombo o una lega leggera;
- lo spessore del pezzo non deve essere minore di 1.5 volte la diagonale dell'impronta e dopo la prova nessuna deformazione deve essere visibile sulla faccia opposta a quella su cui è stato applicato il penetratore;
- se il campione presenta superfici curve è necessario, dopo aver calcolato la durezza, applicare un fattore di correzione riportato nell'appendice B della norma UNI EN ISO 6507-1.

La durezza Vickers viene indicata con il simbolo HV (*Hardness Vickers*), preceduto dal valore della durezza e seguito da:

- a) valore del carico espresso in chilogrammi forza;
- b) tempo di permanenza del carico espresso in secondi, se diverso dal tempo precedentemente specificato.

Questi valori sono separati da sbarrette.

Esercizio 5.3

Definire il significato delle seguenti due sigle: 350 HV 30 e 600 HV 10/20.

- 350 HV 30 → durezza Vickers di 350 determinata con un carico di prova di 294,2 N mantenuto per un tempo di 10 : 15 s.
- 600 HV 10/20 → durezza Vickers di 600 determinata con un carico di prova di 98,07 N mantenuto per un tempo di 20 s.

5.3.3 Prova di microdurezza

La prova di microdurezza si effettua con carichi piccolissimi su campioni lucidati ed attaccati per l'esame metallografico. In tal modo si può valutare la durezza di un singolo costituente cristallino oppure le variazioni di durezza all'interno di regioni molto piccole del pezzo, ad esempio in corrispondenza di uno strato sottoposto precedentemente a trattamenti termici superficiali o su lamierini sottilissimi.

Il carico applicato sul penetratore, in questo caso, può variare da 0,1 a 1.961 N. Il penetratore più comunemente usato è quello Vickers. L'impronta è molto piccola (valore della diagonale d di qualche decina di micrometri) ed essendo la deformazione indotta sul provino determinata da una componente plastica ed una componente elastica, per piccoli valori del carico l'impronta lasciata sul provino ha dimensioni leggermente minori dopo che si è allontanato il carico per effettuare la lettura dell'impronta. Nella prova Vickers unificata ciò non avviene in quanto il recupero elastico risulta trascurabile essendo maggiore il valore del carico e delle dimensioni dell'impronta. Quindi, il valore della durezza assume valori maggiori quanto più piccolo è il carico, ovvero quanto maggiore è l'aliquota di recupero elastico rispetto alle dimensioni dell'impronta.

Nella fig. 5.10 viene mostrata la diminuzione del valore della microdurezza all'aumentare del carico applicato sino a raggiungere un valore pressoché costante e

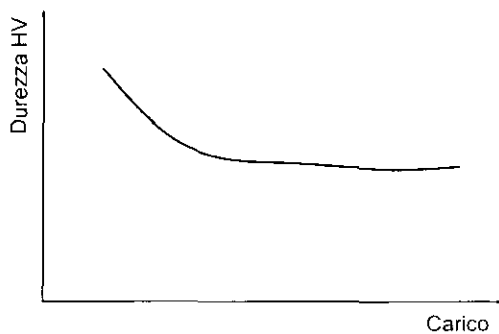


Fig. 5.10 - Variazione della microdurezza in funzione del carico applicato

pari al valore della durezza Vickers unificata. È, pertanto, necessario che nel resoconto della prova di microdurezza il simbolo *HV* sia sempre seguito dal valore del carico utilizzato.

5.3.4 Prove di durezza Rockwell

Le prove di durezza Rockwell, definite dalla norma UNI EN ISO 6508-1, sono completamente diverse da quelle Brinell e Vickers. Infatti, per eseguire la prova Rockwell si sottopone il materiale ad un carico in due tempi mediante un penetratore. Si misura l'aumento residuo h della profondità dell'impronta sotto il carico iniziale (precarico), F_0 , dopo l'eliminazione del carico aggiuntivo F_1 , fig. 5.11. In questo modo si tiene conto del ritorno elastico del materiale. La lettura della profondità dell'impronta viene eseguita direttamente sulla macchina mediante uno strumento analogico o digitale.

Esistono differenti tipi di scala Rockwell, ognuna caratterizzata dall'aver un preciso valore del carico da applicare ed un determinato tipo di penetratore.

Il valore della durezza Rockwell viene calcolato usando la formula:

$$\text{Durezza Rockwell} = N - \frac{h}{S} \quad (5.6)$$

dove N è il numero specifico della scala, S è l'unità specifica della scala espressa in millimetri ed h , espressa in millimetri, è l'aumento residuo della profondità di penetrazione sotto il carico iniziale dopo l'eliminazione del carico aggiuntivo.

Le norme prescrivono che la provetta deve essere pulita e la superficie deve essere esente da ossidi e materiali estranei ed, inoltre, la preparazione della superficie della provetta deve essere curata con attenzione affinché sia ridotta al minimo ogni

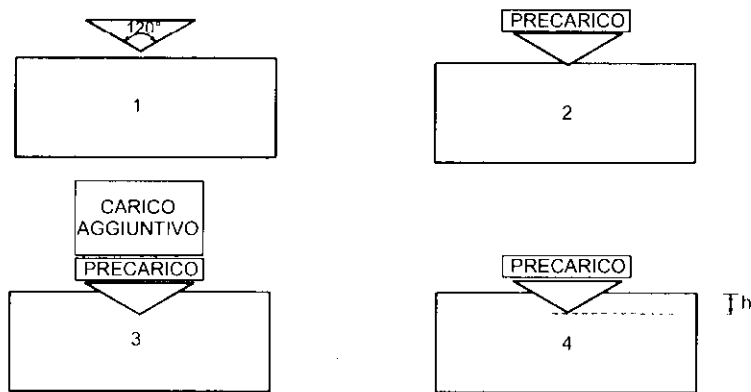


Fig. 5.11 - Durezza Rockwell

alterazione indotta, ad esempio, da riscaldamento o incrudimento. Dopo la prova nessuna deformazione deve essere visibile sulla superficie della provetta opposta all'impronta.

La durezza Rockwell viene indicata mediante il simbolo *HR* (*Hardness Rockwell*), seguito dalla lettera indicante la scala impiegata; qui di seguito si riportano le scale più frequentemente utilizzate per questa classe di prove di durezza.

Durezza Rockwell B

Il penetratore è costituito da una sfera di acciaio trattato del diametro di 1.587 mm, che corrisponde ad 1/16 di pollice. Si porta il penetratore a contatto con la superficie del pezzo da provare e si applica un carico iniziale (precarico) F_0 di 98.07 N; si azzerà l'indicatore di profondità e, in un tempo di $1 \div 8$ s, si aggiunge il carico addizionale F_1 pari a 882.6 N in modo da avere un carico totale di 980.7 N. Trascorsi 4 s, il carico addizionale F_1 viene tolto e si misura sull'indicatore la profondità di penetrazione h , utilizzando come unità di misura $S = 0.002$ mm e mantenendo il carico F_0 . Con riferimento alla (5.6) il valore della durezza è dato da:

$$HRB = 130 - \frac{h}{S} \quad (5.7)$$

Viene usata su materiali aventi una durezza Rockwell B compresa tra 20 e 100.

Durezza Rockwell C

Il penetratore è costituito da un cono di diamante con angolo di apertura di 120° e raggio di curvatura in corrispondenza della punta di 0.2 mm. Similmente alla prova precedente, si porta il penetratore a contatto con la superficie del pezzo da provare e si applica un carico iniziale F_0 di 98.07 N; si azzerà l'indicatore di profondità e, in un tempo di $1 \div 8$ s, si aggiunge il carico addizionale F_1 pari a 1373 N in modo da avere un carico totale di 1471 N. Trascorsi 4 s, si toglie il solo carico addizionale e si misura sull'indicatore la profondità di penetrazione h , utilizzando come unità di misura $S = 0.002$ mm e mantenendo il carico F_0 . Con riferimento alla (5.6) il valore della durezza è dato da:

$$HRC = 100 - \frac{h}{S} \quad (5.8)$$

Viene usata su materiali aventi una durezza *HRC* compresa tra 20 e 70.

Nell'eseguire le prove di durezza Rockwell bisogna fare in modo che lo spessore della provetta sia almeno pari a $10 \cdot h$, per prove effettuate con il penetratore conico, ed almeno $15 \cdot h$, per prove effettuate con il penetratore sferico. Inoltre, la distanza tra i centri di due impronte adiacenti deve essere almeno di 2 mm e la distanza tra il

centro dell'impronta ed il bordo della provetta deve essere almeno uguale a 1 mm. Se si eseguono prove su superfici convesse o sferiche è necessario applicare un fattore di correzione riportato nelle appendici C e D della norma UNI EN ISO 6508-1.

Esercizio 5.4

Definire il significato delle seguenti due sigle: 60 HRC e 89 HRB.

- 60 HRC → durezza Rockwell, misurata sulla scala C, pari a 60.
- 89 HRB → durezza Rockwell, misurata sulla scala B, pari a 89.

5.3.5 Prova di durezza per confronto (prova Poldi)

Spesso è necessario effettuare prove di durezza su componenti o strutture già in opera, per cui, non essendo possibile prelevare un campione rappresentativo senza compromettere la funzionalità del manufatto, è opportuno ricorrere a metodi alternativi di prova con strumenti portatili che consentano una misura della durezza, anche se in condizioni non standard e, quindi, non riconducibili ad una norma UNI. A tale scopo si utilizza il metodo proposto da Poldi con il suo apparecchio di misura della durezza per confronto. Il penetratore è costituito da una sfera di acciaio trattato di diametro D ; l'apparecchiatura di prova è schematizzata in fig. 5.12, dove è stato indicato con A il materiale di cui si vuole determinare la durezza HB_x e con B la barretta campione di riferimento avente durezza nota HB_0 . Posto l'apparecchio con il suo asse normale alla superficie del materiale, si dà un energico colpo di martello sulla barretta B .

Il penetratore lascerà sul pezzo da controllare un'impronta di superficie S_x e un'impronta sulla barretta campione di superficie S_0 . Le durezze dei due materiali,

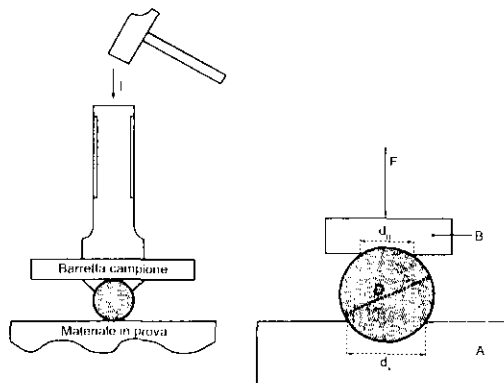


Fig. 5.12 - Prova di durezza per confronto

secondo la definizione Brinell, sono:

$$HB_x = 0.102 \cdot \frac{F}{S_x} \quad HB_0 = 0.102 \cdot \frac{F}{S_0}$$

ovvero, indicando con d_x il diametro dell'impronta lasciata sul materiale da testare e con d_0 il diametro dell'impronta lasciata sul materiale campione:

$$HB_x = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_x^2} \right)}$$

$$HB_0 = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_0^2} \right)}$$

per cui:

$$\frac{HB_x}{HB_0} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_x^2}}$$

e quindi:

$$HB_x = HB_0 \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_x^2}} \quad (5.9)$$

Misurati, pertanto, i diametri dell'impronta sulla barretta e sul materiale è possibile risalire alla durezza incognita. Questa prova dà valori tanto più prossimi a quelli reali quanto più il diametro d_x dell'impronta è prossimo al diametro d_0 dell'impronta della barretta campione. È pur sempre, però, affetta dall'imprecisione derivante dall'aver eseguito una prova dinamica (colpo di martello) in luogo di una prova statica.

5.4 Prova di trazione

La prova di trazione, definita dalla norma UNI EN ISO 6892-1, è la più importante tra le prove meccaniche distruttive. La prova consiste nel sottoporre una provetta del materiale, opportunamente prelevata e preparata, ad uno sforzo di trazione, fino alla rottura, allo scopo di determinare una o più caratteristiche meccaniche che saranno di seguito descritte. La prova viene, generalmente, eseguita a temperatura ambiente.

5.4.1 Dimensioni e forma delle provette

La provetta è di regola ottenuta mediante lavorazione meccanica di un saggio prelevato da un prodotto. Tuttavia i prodotti a sezione costante (profilati, barre, fili, ecc.) così come le provette grezze di fonderia (ghise, leghe non ferrose) possono essere sottoposti alla prova senza essere stati precedentemente lavorati. Le provette prevalentemente possono essere a sezione circolare o sezione rettangolare.

Indipendentemente dalle dimensioni e dal tipo di sezione, nella provetta si possono individuare un tratto a sezione costante L_c e due teste, le cui dimensioni dipendono dalla geometria dei morsetti di serraggio della macchina di trazione, raccordate con il tratto a sezione costante, fig. 5.13. Il raccordo risulta necessario per evitare sovrassollecitazioni locali e per distribuire il carico su tutta la sezione del provino. All'interno del tratto a sezione costante L_c si individua un tratto di lunghezza L_0 , definito tratto utile. Il tratto L_0 , prima della prova, viene diviso, di solito, in N tratti uguali ($N \geq 5$) mediante l'ausilio di una macchina denominata segnaprovini. Tale suddivisione permette, al termine della prova, di valutare l'allungamento del provino.

Per quanto riguarda le dimensioni, le provette sono dette proporzionali se:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad k = 5.65 \quad (5.10)$$

dove S_0 è la sezione iniziale della provetta nel tratto calibrato e L_0 è la lunghezza iniziale del tratto utile che deve essere almeno 15 mm; nel caso in cui il valore della sezione iniziale S_0 sia troppo piccolo per soddisfare tale condizione con $k = 5.65$, si può utilizzare un valore di k più elevato, preferibilmente $k = 11.3$, oppure una provetta non proporzionale. Nel caso di provette non proporzionali il valore della lunghezza fra i riferimenti viene scelto, quindi, indipendentemente dalla sezione S_0 .

Nella fig. 5.14 è schematizzata una provetta a sezione circolare in cui il diametro del tratto a sezione costante è indicato con d_0 . Con riferimento all'appendice D della norma UNI EN ISO 6892-1, se le provette sono a sezione circolare con $d_0 \geq 4$ mm si deve avere:

$$L_c \geq L_0 + \frac{d_0}{2}$$

$$\text{raggio del raccordo} \geq 0.75 \cdot d_0$$

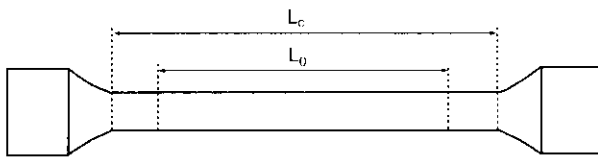


Fig. 5.13 - Provetta per la prova di trazione

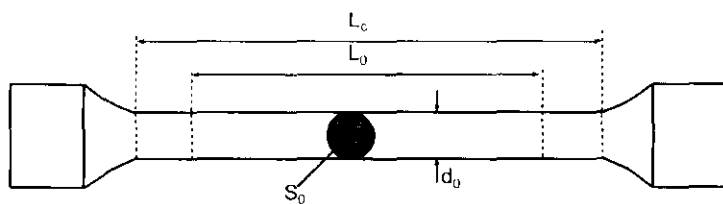


Fig. 5.14 - Provetta a sezione circolare

In caso di contestazione deve sempre aversi $L_c = L_0 + 2 \cdot d_0$, a meno che la dimensione del materiale disponibile non lo consenta.

Come detto precedentemente, di regola, bisogna impiegare provette proporzionali. In tal caso, la (5.10), ovvero la relazione che rappresenta il legame fra la lunghezza iniziale tra i riferimenti L_0 e la sezione iniziale S_0 , può essere scritta più semplicemente come:

$$L_0 = 5 \cdot d_0$$

Infatti:

$$L_0 = 5.65 \cdot \sqrt{S_0} = 5.65 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4}} = 5 \cdot d_0$$

mentre, nel caso di $k = 11.3$, la (5.10) diventa:

$$L_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0} = 10 \cdot d_0$$

Nella fig. 5.15 è riportato lo schema di una provetta a sezione rettangolare in cui è indicato con a_0 lo spessore della provetta e con b_0 la sua larghezza. Nel caso di provette a sezione rettangolare con spessore $a_0 \geq 3 \text{ mm}$ (norma UNI EN ISO 6892-1 appendice D) si consiglia di preparare le provette in modo che la larghezza soddisfi la relazione $b_0 \leq 8 \cdot a_0$. Le norme prescrivono che:

$$L_c \geq L_0 + 1.5 \cdot \sqrt{S_0}$$

$$\text{raggio del raccordo} \geq 12 \text{ mm}$$

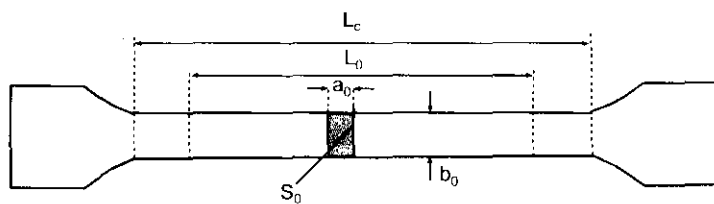


Fig. 5.15 - Provetta a sezione rettangolare

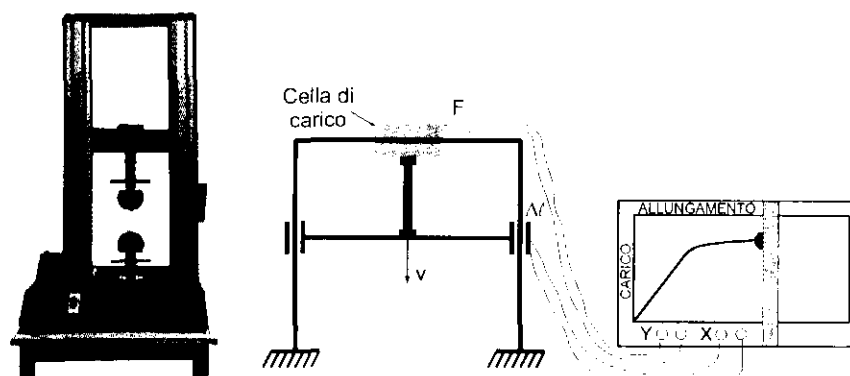


Fig. 5.16 - Macchina universale per prova materiali e sua rappresentazione schematica

In caso di contestazione deve sempre aversi $L_e = L_0 + 2 \cdot \sqrt{S_0}$.

La lunghezza del tratto utile L_0 è sempre calcolata utilizzando la (5.10); il rapporto fra l'allungamento e la lunghezza del tratto utile, moltiplicato per cento, viene definito allungamento percentuale.

Non vi sono particolari prescrizioni circa le lavorazioni da eseguire per la preparazione delle provette, ma è necessaria una buona finitura superficiale nel tratto a sezione costante. Si tenga presente che la maggior parte delle provette, ricavate generalmente da profilati o lamiere, sono lavorate da utensili solo sul contorno, mentre le facce non subiscono alcuna lavorazione, rimanendo allo stato grezzo di laminazione.

5.4.2 Esecuzione della prova e diagramma carico-allungamento

Per eseguire la prova di trazione si utilizza una macchina universale di prova mediante la quale è possibile non solo eseguire prove di trazione, ma anche prove di compressione, di flessione ed a fatica.

Negli ultimi anni, accanto alle macchine tradizionali, sono state introdotte sul mercato delle macchine di prova computerizzate. Esse danno la possibilità di acquisire i dati provenienti dalla prova ed, attraverso elaborazioni software, consentono di effettuare calcoli che in precedenza erano compito dello sperimentatore. Inoltre, questa tipologia di macchina di prova permette mediante l'uso di controllori ed attuatori di variare, in un ampio spettro, le condizioni di prova (rif. 5.4.4).

In fig. 5.16 è mostrata una macchina universale di prova tradizionale ed una sua rappresentazione schematica nella quale viene evidenziato il plotter impiegato per ottenere il diagramma carico-allungamento oppure carichi unitari - allungamenti percentuali.

L'afferraggio delle teste della provetta fra le ganasce della macchina di trazione

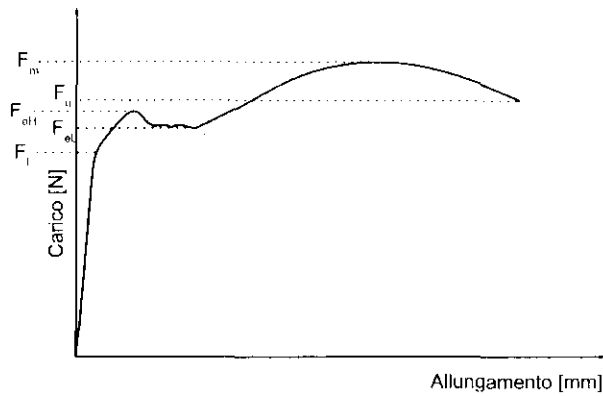


Fig. 5.17 - Diagramma carico-allungamento

deve essere tale da ottenere nella provetta una distribuzione di tensione monoassiale (ad esempio a mezzo di giunti cardanici).

In fig. 5.17 è riportato il diagramma $F-\Delta l$ ottenuto su di un campione di un materiale duttile, ad esempio un acciaio a basso tenore di carbonio.

Sul diagramma sono stati individuati e riportati alcuni valori caratteristici dei carichi:

- F_l è il carico al limite di proporzionalità fra carichi e deformazioni prodotte dagli stessi. Fino a questo valore del carico vale la legge di Hooke:

$$F = k \cdot \Delta l$$

che regola la diretta proporzionalità tra carichi applicati F ed allungamenti Δl . Arrestando la prova ad un valore del carico immediatamente inferiore a F_l , scaricando lentamente la macchina, non si ottiene nessuna deformazione permanente sul provino. Tale tratto è rappresentato come un tratto rettilineo.

- F_{elH} è il carico al limite di snervamento superiore cioè quel carico al cui raggiungimento le deformazioni diventano permanenti. Dopo che il carico ha raggiunto il valore F_{elH} si nota una rapida diminuzione ed una piccola oscillazione transitoria del carico. Questo comportamento, che è caratteristico degli acciai a basso tenore di carbonio, è imputabile a delle contrazioni elementari che avvengono nel materiale. Tali contrazioni possono essere rese evidenti se si sottopone alla prova un provino opportunamente lucidato e brunito. In tal caso, raggiunto il valore F_{elH} , si noteranno sul provino delle striature inclinate di 45° rispetto alla direzione del carico, definite come linee di Lüders o di Hartmann, e la rottura del provino avverrà proprio dove è presente il maggiore addensamento di tali linee. Per i materiali che non manifestano snervamento evidente in diagramma le normative relative ai singoli

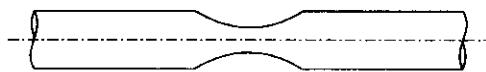


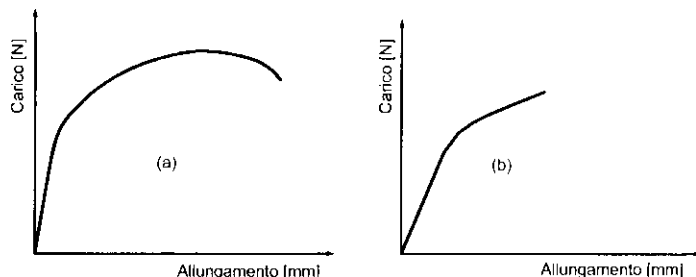
Fig. 5.18 - Strizione di un provino cilindrico

prodotti prevedono l'impiego del carico di scostamento dalla proporzionalità per un valore prefissato dell'allungamento percentuale.

- F_{el} è il carico al limite di snervamento inferiore ed è il valore minimo prima dell'aumento regolare della forza applicata.
- F_m è il carico massimo sopportato dalla provetta. Dopo il raggiungimento del carico massimo si nota una diminuzione del carico imputabile al fenomeno della strizione, ossia una riduzione locale della sezione. La provetta inizialmente si è deformata allungandosi, ma conservando la sua configurazione iniziale. Dopo che il carico ha raggiunto il valore massimo F_m , la provetta vede la propria sezione resistente diminuire localmente e di conseguenza la forza necessaria per produrre ulteriori allungamenti risulta minore di quella richiesta se la sezione si mantenesse costante. Il fenomeno della strizione è tanto più evidente quanto maggiore è la duttilità del materiale. Nella fig. 5.18 è riportata la zona di strizione di un provino cilindrico.
- F_u è il carico ultimo, cioè il carico al quale si verifica la rottura.

Il diagramma di fig. 5.17 non è rappresentativo di tutti i materiali; infatti, alcuni di essi, come si è già visto nel cap. 2.3, non presentano un evidente fenomeno di snervamento prima dell'inizio delle deformazioni plastiche, fig. 5.19-a, mentre altri esibiscono un comportamento fragile, ovvero la rottura si manifesta poco dopo una limitata deformazione plastica e senza strizione, fig. 5.19-b.

Per materiali che non presentano evidente snervamento è utile definire convenzionalmente un valore limite del carico applicato per il quale si produce nella provetta una deformazione permanente piccola ma apprezzabile, usualmente dello 0.1% o

Fig. 5.19 - Diagramma $F' - \Delta l$ per materiali duttili (a) e fragili (b)

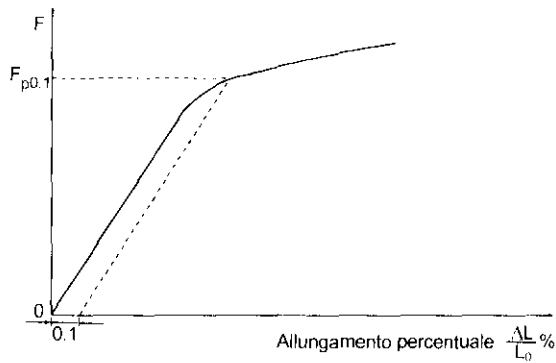


Fig. 5.20 - Calcolo del carico di scostamento dalla proporzionalità per $\Delta L/L_0 \% = 0.1\%$

0.2%. Nella fig. 5.20 è indicata la metodologia per la valutazione del carico di scostamento dalla proporzionalità, $F_{p0.1}$, per un valore dell'allungamento percentuale pari allo 0.1%. Sul diagramma del carico in funzione dell'allungamento percentuale, tracciando la parallela al tratto lineare, per un valore dell'allungamento percentuale fissato, si può calcolare il carico come la sua intercetta con la curva.

Nella fig. 5.21 è riportato un diagramma nel quale viene evidenziata la variazione della lunghezza del tratto utile L_0 del provino sottoposto ad una forza di trazione. Superato il valore del carico massimo il provino subirà una strizione nella zona di rottura, ovvero una riduzione locale della sezione resistente.

5.4.3 Carichi unitari e valori caratteristici

Si definisce carico unitario R il rapporto fra il carico applicato e la sezione iniziale del provino:

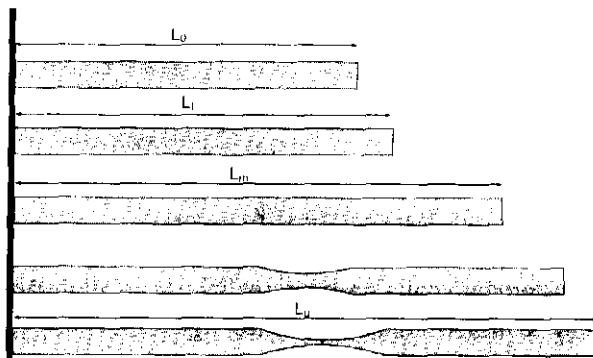


Fig. 5.21 - Deformazioni di un provino sottoposto a trazione

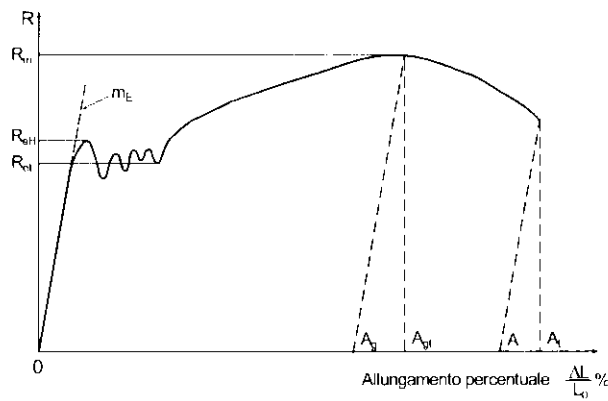


Fig. 5.22 - Diagramma carichi unitari - allungamenti percentuali

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (5.11)$$

che ha lo stesso significato di sollecitazione convenzionale già introdotta nel cap. 2. Nel diagramma di fig. 5.22, sono riportati i valori dei carichi unitari caratteristici, espressi in megapascal, in funzione degli allungamenti percentuali.

Carico unitario di snervamento superiore:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (5.12)$$

Carico unitario di snervamento inferiore:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (5.13)$$

Resistenza a trazione:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (5.14)$$

Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità:

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \quad (5.15)$$

Talvolta, in assenza di snervamento evidente, si assume convenzionalmente il carico unitario di scostamento dalla proporzionalità per un allungamento percentuale dello 0.2% come carico unitario di snervamento, fig. 5.23.

Nel grafico di fig. 5.22 è indicata con m_E la pendenza del tratto lineare di proporzionalità fra carichi unitari ed allungamenti percentuali. Tale valore non è altro che il modulo di Young del materiale, moltiplicato per cento.

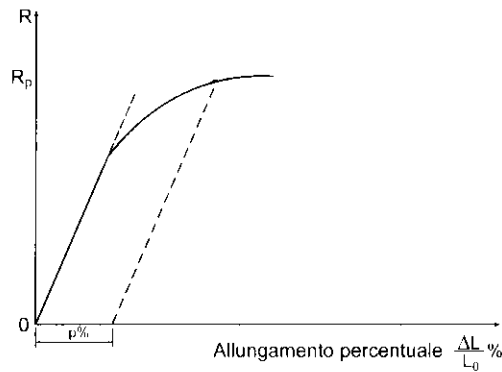


Fig. 5.23 - Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità

Si definisce strizione percentuale e si indica con Z , il rapporto:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (5.16)$$

dove S_u è il valore della sezione minima della provetta, misurato dopo rottura.

Si definisce allungamento percentuale dopo la rottura, indicato con la lettera A , il rapporto:

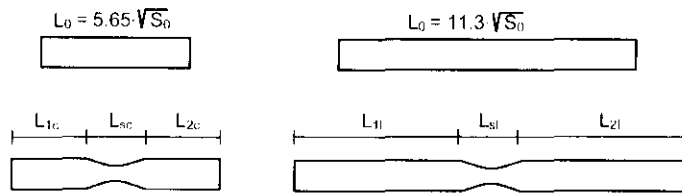
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (5.17)$$

dove L_u è la lunghezza del tratto utile dopo la rottura, misurato facendo combaciare i due spezzoni della provetta.

Nel caso di provette proporzionali, con un valore di $k \neq 5.65$, il simbolo A deve essere completato da un pedice indicante il coefficiente di proporzionalità utilizzato; ad esempio: $A_{11.3}$ indica l'allungamento percentuale dopo la rottura di un provino che ha una lunghezza fra i riferimenti $L_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0}$.

Nel caso di provette non proporzionali il simbolo A deve essere completato da un pedice che indica la lunghezza L_0 utilizzata espressa in millimetri. Ad esempio, $A_{80 \text{ mm}}$ indica l'allungamento percentuale dopo la rottura subito da un provino avente lunghezza fra i riferimenti di 80 mm.

La necessità di indicare la lunghezza del tratto utile è dettata dal fatto che il valore calcolato dell'allungamento percentuale dopo rottura è dipendente dalla lunghezza del tratto utile. Infatti, l'allungamento totale è determinato dalla somma di due contributi: il primo, dovuto ad un uniforme allungamento plastico del provino ed il secondo ad un allungamento locale nella zona di strizione.

Fig. 5.24 - Allungamento a rottura in provette proporzionali con $k = 5.65$ e $k = 11.3$

Il fenomeno della strizione influenza il valore dell'allungamento percentuale dopo la rottura A nel senso che, a parità di materiale e di sezione, quello relativo ad una provetta ottenuta con $k = 5.65$, è più elevato di quello relativo a una provetta ottenuta con $k = 11.3$. Infatti, supposto di confrontare due provette limitatamente al tratto L_0 , prima e dopo la prova, si può osservare che le lunghezze finali delle provette sono la somma di quantità (L_{sc} e L_{sl}) sostanzialmente uguali e che contribuiscono in maniera notevole alla formazione di L_u e di quantità (L_{1c} , L_{2c} , L_{1l} , L_{2l}) che sono proporzionali con buona approssimazione alle lunghezze iniziali. È evidente, quindi, che il peso dell'allungamento del tratto interessato alla strizione è maggiore nella provetta con $k = 5.65$ che in quella con $k = 11.3$ ed, in definitiva, l'allungamento percentuale dopo la rottura per la provetta con $k = 5.65$ è maggiore di quello della provetta con $k = 11.3$, fig. 5.24.

La norma UNI EN ISO 6892-1, oltre all'allungamento percentuale dopo rottura, definisce altri tre allungamenti percentuali: A_g , A_{gt} , A_t . A_g rappresenta l'allungamento percentuale permanente sotto carico massimo F_m . A_{gt} rappresenta l'allungamento percentuale totale sotto carico massimo F_m . A_t l'allungamento percentuale totale a rottura.

Nel caso di provette a sezione rettangolare è, talvolta, opportuno definire un coefficiente di anisotropia che tenga conto del diverso comportamento del materiale nelle direzioni ortogonali a quella di applicazione del carico. La norma UNI 8341 prevede la definizione del coefficiente di anisotropia come rapporto delle deformazioni naturali relative rispettivamente alla larghezza ed allo spessore del provino:

$$r = \frac{\bar{\varepsilon}_b}{\bar{\varepsilon}_a} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_u}}{\ln \frac{a_0}{a_u}} \quad (5.18)$$

essendo b_0 e b_u le larghezze iniziali e finali del provino, mentre analogamente a_0 e a_u gli spessori iniziali e finali dello stesso.

Nel caso di provini ricavati da lamiere, il comportamento non isotropo suggerisce la definizione di un coefficiente di anisotropia normale che tiene conto della

Tab. 5.2 - Velocità di incremento del carico in una prova di trazione

Modulo di elasticità del materiale	Velocità di incremento del carico unitario [MPa s ⁻¹]	
	min	max
< 150 GPa	2	20
> 150 GPa	6	60

Tab. 5.3 - Velocità di deformazione in una prova di trazione

Carichi unitari e valori caratteristici	Velocità di deformazione
R_p, R_{eL}, R_{eH}	0.00025 s ⁻¹
R_m, A, Z	0.0067 s ⁻¹

direzione di laminazione. Pertanto, per ottenere il coefficiente appena definito, devono essere prelevate tre provette ciascuna delle quali con l'asse longitudinale ad un angolo di 0°, 45° e 90° rispetto alla direzione di laminazione e, dopo aver calcolato i coefficienti di anisotropia (5.18) per ciascuna prova effettuata, si valuta il valor medio delle stesse:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (5.19)$$

5.4.4 Condizioni di prova

Per eseguire una prova di trazione, è necessario effettuare preliminarmente la calibrazione della macchina.

Nell'esecuzione di una prova di trazione grande attenzione deve essere prestata alla modalità di applicazione del carico. La norma UNI EN ISO 6892-1 prevede due metodi secondo i quali procedere per effettuare una prova di trazione. Il primo metodo si riferisce a macchine tradizionali per le quali viene imposta una velocità di incremento del carico unitario, \dot{R} , in funzione del modulo di elasticità del materiale, tab. 5.2.

Il secondo metodo, applicabile invece alle macchine per prove di trazione computerizzate, impone alcuni valori delle velocità di deformazione da impiegare in relazione ai carichi unitari ed ai valori caratteristici che si intendono misurare. Nella tab. 5.3 vengono riportati i valori raccomandati delle velocità di deformazione.

5.4.5 Report di prova

Il report di prova deve contenere almeno le seguenti indicazioni:

- riferimento alla norma UNI EN ISO 6892-1;
- identificazione della provetta;

- materiale, se noto;
- tipo di provetta;
- posizione e direzione di prelievo della provetta, se note;
- velocità di deformazione o velocità di incremento del carico unitario, se differenti da quelli raccomandati;
- risultati della prova.

Nel riportare i risultati di una prova di trazione bisogna ricordare che:

- i valori dei carichi unitari devono essere arrotondati al numero intero più vicino in megapascal;
- i valori dell'allungamento percentuale devono essere arrotondati allo 0.5%;
- i valori della strizione percentuale devono essere arrotondati all'1%.

Esercizio 5.5

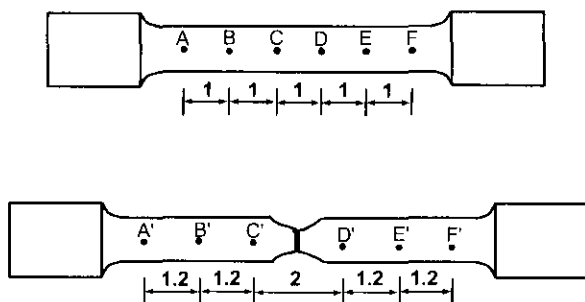
Il tratto utile di un provino sottoposto a trazione è stato suddiviso in cinque tratti uguali di lunghezza unitaria, come riportato in alto nella figura seguente. Le dimensioni del provino dopo la rottura sono riportate in basso nella stessa figura. Calcolare l'allungamento subito dal provino prendendo come lunghezza iniziale una volta il tratto \overline{BE} ed un'altra il tratto \overline{AF} .

Se viene presa come lunghezza L_0 il tratto \overline{BE} , il valore dell'allungamento percentuale dopo la rottura risulta:

$$A_{\overline{BE}} = \frac{4.4 - 3}{3} \cdot 100 = 47\%$$

mentre, se il tratto di riferimento è \overline{AF} , il valore dell'allungamento percentuale dopo la rottura risulta:

$$A_{\overline{AF}} = \frac{6.8 - 5}{5} \cdot 100 = 36\%$$



Quindi l'allungamento non è indipendente dalla lunghezza iniziale del tratto utile in quanto, come già detto precedentemente, una apprezzabile frazione della deformazione plastica è concentrata nella zona di strizione.

Esercizio 5.6

I seguenti punti sperimentali sono stati ottenuti durante una prova di trazione su di un provino di acciaio a basso contenuto di carbonio con diametro di 12 mm e lunghezza L_0 di 50 mm:

Carico [kN]	ΔL [mm]	Carico [kN]	ΔL [mm]
2.0	0.0041	26.2	0.55
4.0	0.0082	28.8	1.39
6.0	0.0123	30.4	1.96
8.0	0.0164	34.0	3.05
12.0	0.0246	38.3	4.76
14.0	0.0287	40.0	6.60
18.0	0.0369	40.4	7.62
19.8	0.0456	41.1	12.7
24.2	0.0797	40.2	14.7
25.2	0.1020	38.9	15.9
25.7	0.1410	35.7	17.7
25.9	0.1660	32.4	19.3

Tracciare il diagramma carico-allungamento.

Verificare se il provino è di tipo proporzionale.

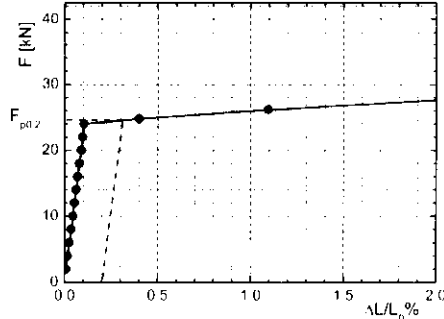
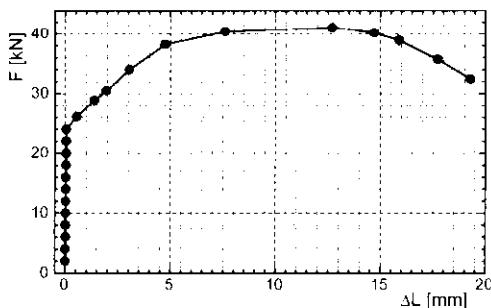
Determinare il valore del carico unitario di snervamento, il valore della resistenza a trazione, l'allungamento percentuale dopo la rottura e la strizione percentuale, se il diametro finale è di 6.3 mm.

Il valore della sezione iniziale è pari a:

$$S_0 = \pi \cdot 6^2 = 113.1 \text{ mm}^2$$

Mediante la (5.10) si verifica che il provino non è di tipo proporzionale:

$$k = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{50}{\sqrt{113.1}} = 4.7$$



Per il calcolo del carico unitario di snervamento si calcola dapprima il carico di scostamento dalla proporzionalità per un allungamento percentuale pari allo 0.2%, come indicato nel diagramma a destra della figura precedente, quindi il valore di tale carico unitario è pari a:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0} = \frac{24.5 \cdot 10^3}{113.1} = 217 \text{ MPa}$$

Il valore della resistenza a trazione è pari a:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{41,1 \cdot 10^3}{113,1} = 363 \text{ MPa}$$

L'allungamento percentuale dopo la rottura è pari a:

$$A_{50 \text{ mm}} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{69,3 - 50}{50} \cdot 100 = 38,5\%$$

La strizione percentuale è:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_u}{2}\right)^2}{\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} = \frac{d_0^2 - d_u^2}{d_0^2} = \frac{12^2 - 6,3^2}{12^2} \cdot 100 = 72\%$$

5.5 Prova di resilienza

La prova di resilienza, definita dalla norma UNI EN ISO 148-1, evidenzia il comportamento di un materiale assoggettato a rottura per orto-flessione. La prova consiste nel rompere, con un solo colpo, una provetta intagliata nella mezzeria e poggiata su due sostegni. L'energia assorbita (espressa in joule) rappresenta la resistenza agli urti del materiale ovvero la resilienza. La resilienza può essere considerata l'opposto della fragilità, in quanto misura l'attitudine del materiale ad assorbire energia in campo plastico. Un materiale è più resiliente quanto più è elevato il carico unitario al limite elastico e quanto più è basso il modulo di Young. È interessante anche verificare il comportamento dei materiali a bassa temperatura, per cui si eseguono delle prove a temperatura differente da quella ambiente. In genere, quanto più bassa è la temperatura tanto più il materiale diventa fragile, cioè occorre minore energia per portarlo a rottura.

La prova di resilienza viene eseguita generalmente su di una macchina schematizzata in fig. 5.25, denominato pendolo di Charpy.

5.5.1 Dimensioni e forma delle provette

Le provette devono avere una lunghezza pari a 55 mm e una sezione quadrata di lato pari a 10 mm. Le provette presentano un intaglio nella mezzeria del provino. Sono previsti due tipi di intagli:

- intaglio a *V* che ha un'apertura di 45° ed una profondità di 2 mm, raccordato sul fondo con un raggio di 0,25 mm. La sezione utile è $0,8 \text{ cm}^2$;
- intaglio a *U* o a buco di chiave profondo 5 mm con raggio del fondo dell'intaglio di 1 mm. La sezione utile è $0,5 \text{ cm}^2$.

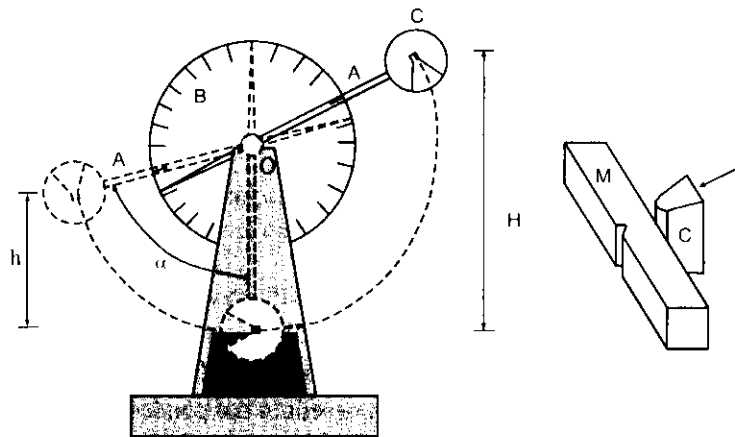


Fig. 5.25 - Pendolo di Charpy

Se non può essere realizzata una provetta con larghezza standard quest'ultima può assumere i valori di 7.5 mm, 5 mm e 2.5 mm realizzando solo un intaglio a V. Nella fig. 5.26 sono riportati il provino con intaglio a V e quello con intaglio a U.

5.5.2 Esecuzione della prova

Nella fig. 5.25 è schematizzata la macchina e sono stati indicati con A la mazza girevole in O, con attrito trascurabile, con C il coltello, con M la provetta, con B il quadrante su cui una coppia di indici (uno solidale con A e uno folle) segnano la posizione angolare di A o l'energia posseduta dal pendolo; nelle macchine di ultima generazione il quadrante analogico può essere sostituito da un display digitale per la visualizzazione delle grandezze misurate. La mazza girevole ha, in posizione di riposo, il baricentro ad un'altezza corrispondente alla posizione della provetta. Per eseguire la prova si porta il pendolo ad un'altezza H e si fissa il pendolo ad un fermo. Si posiziona la provetta sugli appositi appoggi facendo in modo che la faccia intagliata della provetta sia rivolta dalla parte opposta a quella su cui batte il pendolo. Quindi si lascia libero il pendolo che in caduta libera andrà a rompere la provetta e raggiunta l'altezza massima h continuerà ad oscillare. Le oscillazioni



Fig. 5.26 - Provini per prove di resilienza con diversi intagli

vengono smorzate mediante un freno elettromagnetico.

Prima di eseguire le prove di resilienza si effettuano delle prove a vuoto per verificare che l'indice mobile, solidale con il pendolo, segni zero sul quadrante, ovvero che siano trascurabili le perdite di energia dovute agli attriti.

L'energia disponibile è:

$$K_p = m \cdot g \cdot H$$

dove m è la massa del pendolo, g l'accelerazione di gravità ed H l'altezza di caduta.

Parte di tale energia viene spesa in lavoro di deformazione e rottura della provetta, la restante parte fa risalire il pendolo fino ad un'altezza h rispetto al piano di riferimento. In questa posizione l'energia posseduta dal pendolo è:

$$K_f = m \cdot g \cdot h$$

Il lavoro di deformazione e rottura della provetta è quindi dato da:

$$K = K_p - K_f = m \cdot g \cdot (H - h) \quad (5.20)$$

Indicando con l la lunghezza del pendolo e con α l'angolo formato dal pendolo con la verticale, dopo che ha raggiunto la massima altezza, si ha che:

$$h = l - l \cdot \cos \alpha = l \cdot (1 - \cos \alpha)$$

da cui sostituendo nella (5.20):

$$K = m \cdot g \cdot [H - l \cdot (1 - \cos \alpha)] \quad (5.21)$$

Da quest'ultima relazione si evince che il lavoro necessario per portare a rottura il materiale è solamente funzione delle caratteristiche del pendolo e dell'angolo formato dalla mazza battente con la verticale nel suo moto di risalita.

Dal quadrante si può effettuare direttamente la lettura del lavoro speso per la rottura del provino che è indicato dall'indice folle, il quale si arresta in corrispondenza della massima altezza raggiunta dal pendolo, dopo la rottura del provino stesso.

Essendo la resilienza K definita come il lavoro assorbito dal provino, essa deve essere espressa in joule.

Il valore della resilienza K non deve superare l'80% dell'energia potenziale K_p . Se ciò accade se ne deve fare menzione nel report di prova.

La superficie della provetta dopo la rottura si presenterà poco riflettente e di aspetto fibroso se la frattura è stata di tipo duttile, cioè preceduta da una notevole deformazione plastica. Nel caso di frattura fragile la superficie si presenterà riflettente

in quanto la deformazione plastica è praticamente nulla. Si noti altresì che l'intaglio deve essere eseguito accuratamente, in modo che non appaiano striature longitudinali al fondo dell'intaglio stesso.

I risultati vengono espressi con la seguente simbologia:

$$\begin{array}{ll} KU_2, KU_8 & \text{nel caso di provetta con intaglio a } U \\ KV_2, KV_8 & \text{nel caso di provetta con un intaglio a } V \end{array}$$

I pedici 2 ed 8 sono i valori in millimetri del raggio dello spigolo del coltello (fig. 5.25).

Normalmente le prove vengono eseguite a temperatura ambiente pari a $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Per prove a temperature differenti da quella ambiente, la provetta deve essere immersa nel mezzo di raffreddamento o riscaldamento per un tempo sufficiente a far raggiungere all'intera provetta la temperatura prescritta e non devono trascorrere più di 5 s tra il prelevamento a temperatura controllata e la fine della prova. In questo caso i valori della resilienza possono variare sensibilmente; infatti, a basse temperature la resilienza assume valori decisamente inferiori a quelli ottenuti a temperature superiori. Inoltre, si evidenzia un campo di temperature in cui i valori di resilienza subiscono una brusca variazione; esso è considerato il campo di transizione tra un comportamento fragile ed uno tenace, fig. 5.27.

5.5.3 Report di prova

Il report di prova deve contenere almeno le seguenti informazioni:

- riferimento alla norma UNI EN ISO 148-1;
- identificativo della provetta;
- tipo di intaglio;
- dimensione della provetta, se diversa da quella standard;

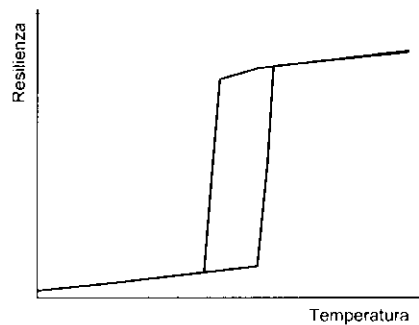


Fig. 5.27 - Transizione duttile-fragile

- temperatura di prova;
- energia assorbita, KV_2 , KV_8 , KU_2 o KU_8 ;
- eventuali anomalie riscontrate nel corso della prova.

Esercizio 5.7

La massa di un pendolo in una prova di resilienza è di 20 kg e la sua lunghezza è di 800 mm. Se la mazza parte dalla posizione orizzontale qual è l'energia posseduta dal pendolo? Qual è la velocità di impatto?

L'energia posseduta dal pendolo, prima dell'inizio della prova, è data dal valore dell'energia potenziale:

$$K_p = m \cdot g \cdot H = 20 \cdot 9.807 \cdot 800 \cdot 10^{-3} = 157 \text{ J}$$

La velocità di impatto è:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot K_p}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 157}{20}} = 3.96 \text{ m/s}$$

5.6 Prove tecnologiche

Le prove tecnologiche hanno lo scopo di determinare l'attitudine dei materiali a subire determinati processi ai quali saranno sottoposti per realizzare un certo prodotto.

Saranno esaminate le seguenti prove:

- prova di temprabilità;
- prova di colabilità;
- prova di imbutitura;
- prova di piegamento.

5.6.1 Prova di temprabilità secondo Jominy

La prova Jominy, relativa agli acciai e descritta dalla norma UNI EN ISO 642, consiste nel riscaldare, per una durata prestabilita, una provetta cilindrica di dimensioni determinate alla temperatura di tempra dell'acciaio in esame e nel raffreddarla ad una estremità mediante un getto d'acqua, in condizioni controllate. La temprabilità viene caratterizzata dalla variazione di durezza riscontrata nell'acciaio in prova lungo due generatrici del provino a partire dalla estremità sottoposta al raffreddamento.

Esecuzione della prova

L'apparecchiatura è costituita essenzialmente da un supporto che presenta al centro un'apertura circolare, fig. 5.28. Al di sotto dell'apertura si trova l'orifizio del tubo

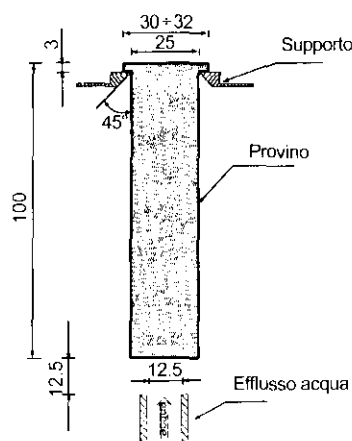


Fig. 5.28 - Schema dell'apparecchiatura per prove Jominy

dal quale esce l'acqua. La distanza fra il foro di efflusso dell'ugello e l'estremità della provetta deve risultare di 12.5 mm e tale è anche la dimensione del diametro dell'ugello. Sul tubo è inserito un rubinetto ad apertura rapida per permettere il passaggio di un getto d'acqua, la cui altezza libera di risalita deve risultare di 65 mm.

La provetta di sezione circolare, con diametro di 25 mm ed altezza di 100 mm, deve essere riscaldata alla temperatura di prova propria dell'acciaio in esame per almeno 20 min e, quindi, mantenuta alla temperatura prefissata per altri 30 min. A riscaldamento ultimato, la provetta deve essere rapidamente estratta dal forno ed introdotta nell'apposita apertura dell'apparecchiatura in un tempo non superiore a 5 s. Immediatamente dopo si deve aprire il rubinetto e la provetta viene raffreddata. La temperatura dell'acqua di raffreddamento deve essere di $20 \pm 5^\circ\text{C}$, il tempo di raffreddamento è almeno di 10 min.

La provetta completamente raffreddata viene rettificata secondo due generatrici, diametralmente opposte, per uno spessore di 0.4 : 0.5 mm, curando di evitare surriscaldamento locale che produrrebbe alterazione degli effetti della tempra. Sulle zone rettificate, a distanze indicate nella norma, si eseguono prove di durezza Rockwell C oppure prove di durezza Vickers con un carico pari a 294.2 N. Per verificare se durante le operazioni di rettifica si siano indotti nel materiale dei riscaldamenti non voluti, si sottopongono le provette ad un'operazione di attacco chimico della superficie rettificata, controllando le strutture con un microscopio metallografico.

Nel diagramma di fig. 5.29 sono riportati i risultati della prova di durezza in funzione della distanza del punto di misura dalla estremità raffreddata del provino. Quanto più alta risulta la curva, tanto più il materiale è temprabile.

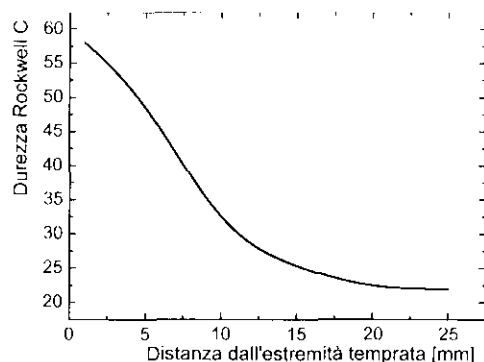


Fig. 5.29 - Curva di temprabilità di un acciaio dolce con lo 0.7% di manganese

Ogni acciaio di assegnata composizione nominale, presenta, in effetti, per ciascun elemento di alligazione un campo di tolleranza del tenore effettivo per cui ripetendo la stessa prova su provini di diverse partite dello stesso acciaio è inevitabile che le curve ottenute presentino un andamento simile, ma non perfettamente identico. Il risultato della valutazione sistematica di un tipo di acciaio con una serie di prove di temprabilità viene rappresentato con una «banda di temprabilità» anziché con una singola curva, come illustrato in fig. 5.30. Per caratterizzare una banda si possono seguire diversi metodi. Si può, ad esempio, intersecare la banda con una retta parallela all'asse delle ascisse, tracciata per un prefissato valore di durezza, e individuare così la distanza minima a e quella massima b dall'estremità raffreddata per la quale si riscontri l'assegnato valore della durezza. Un metodo alternativo di sintesi della banda Jominy è quello di intersecare le due curve con una retta parallela all'asse

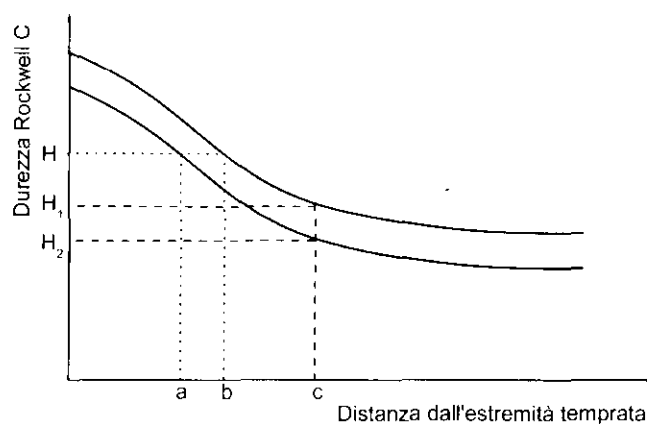


Fig. 5.30 - Banda di temprabilità

delle ordinate, per un prefissato valore della distanza c dall'estremità raffreddata, ed individuare, in tal modo, i valori della durezza massima H_1 e di quella minima H_2 .

La temprabilità di un materiale può essere indicata o con la curva Jominy, comprendente la curva limite superiore, quella inferiore e, quindi, la «banda di temprabilità» o con un indice di temprabilità. In quest'ultimo caso l'indice di temprabilità viene indicato con la lettera J , seguita da due numeri, indicanti il valore di durezza HRC e la distanza in millimetri dall'estremità temprata. Se l'indice di temprabilità è espresso in durezza Vickers l'indice deve comprendere il simbolo HV .

Esercizio 5.8

Definire il significato delle seguenti sigle: $J\ 35 - 15$; $J\ 46 - 6/18$; $J\ HV\ 340/490 - 15$.

- $J\ 35 - 15$ significa che la durezza HRC di 35 si ha ad una distanza pari a 15 mm dall'estremità temprata;
- $J\ 46 - 6/18$ significa che la durezza HRC di 46 si ottiene ad una distanza compresa tra 6 e 18 mm dall'estremità temprata;
- $J\ HV\ 340/490 - 15$ significa che la durezza HV è compresa tra 340 e 490 alla distanza di 15 mm dall'estremità temprata.

5.6.2 Prova di colabilità

La prova di colabilità ha lo scopo di verificare l'attitudine di un materiale fuso a fluire e riempire una forma. La colabilità di un metallo o di una lega può essere valutata misurando la lunghezza del percorso che il materiale, allo stato fuso, può effettuare in un canale, di sezione relativamente piccola, prima di arrestarsi a causa dell'iniziale solidificazione. I canali possono avere una configurazione rettilinea o a spirale e a sezione triangolare, le cui dimensioni sono generalmente pari a 8 mm di altezza e 8 mm di base. I canali sono graduati con marche in rilievo ogni 50 mm e sono di notevole lunghezza, circa 1,5 m.

Nella fig. 5.31 è illustrata la prova di colabilità con canale a spirale. Il metallo fuso viene colato in un serbatoio e poi, passando attraverso un filtro, va a riempire la spirale.

Dalla misura della lunghezza del percorso, seguito dal metallo liquido lungo la spirale, facendo riferimento al numero di marche, si giudica la colabilità del metallo. Per ottenere risultati attendibili e confrontabili è necessario che le dimensioni della cavità a spirale e l'altezza di caduta del metallo siano costanti. Inoltre, è consigliabile porre sotto il bacino di colata un filtro in sabbia agglomerata che, rallentando ed evitando moti turbolenti, assicura un riempimento uniforme del canale. Materiali che presentano una buona colabilità sono la ghisa, il bronzo e l'ottone, mentre gli acciai presentano una scarsa colabilità.

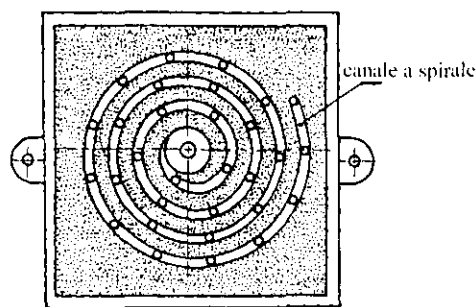


Fig. 5.31 - Prova di colabilità

L'indicazione della colabilità è importante nelle fusioni di serie, perché permette di determinare, per un certo materiale, il minimo valore di temperatura compatibile con un perfetto riempimento della forma e una buona riuscita del getto.

5.6.3 Prova di imbutitura

La prova di imbutitura Erichsen, descritta dalla norma UNI EN ISO 20482, consiste nell'imbutire una provetta bloccata in una matrice, mediante un punzone a calotta sferica oppure una sfera, fino al manifestarsi di una rottura incipiente e misurando la profondità di imbutitura. La prova dà indicazioni circa l'attitudine di un materiale ad essere sottoposto a stampaggio di media profondità. Il dispositivo di prova, illustrato in fig. 5.32, è utilizzato per lamiere o nastri di spessore compreso fra 0.1 mm e 2 mm. Per provette di spessore a tale che $2 \leq a < 3$ mm cambiano solo le dimensioni geometriche del dispositivo di prova. La provetta standard può essere di forma rettangolare, quadrata o circolare in modo tale che il lato, la larghezza o il diametro b sia almeno di 90 mm. La provetta prima della prova non può subire alcun trattamento termico o meccanico.

Esecuzione della prova

Montato il materiale, preventivamente spalmato di grasso grafitato, fra matrice e premilamiera, si premono questi elementi fra loro in modo da ottenere una forza di serraggio di circa 10 kN. In tal modo la formazione della coppetta avviene tutta a spese della deformabilità della lamiera interessata e non per il contributo del materiale che può affluire dai lati. Si fa, poi, lentamente avanzare il punzone di diametro d_1 fino alla comparsa della prima incrinatura all'estradosso del materiale. La velocità di avanzamento del punzone è compresa nell'intervallo $5 \div 20$ mm/min. Verso la fine della prova è opportuno riportare la velocità a valori vicini al suo limite inferiore per determinare con precisione il momento in cui si verifica l'inizio della rottura. Per

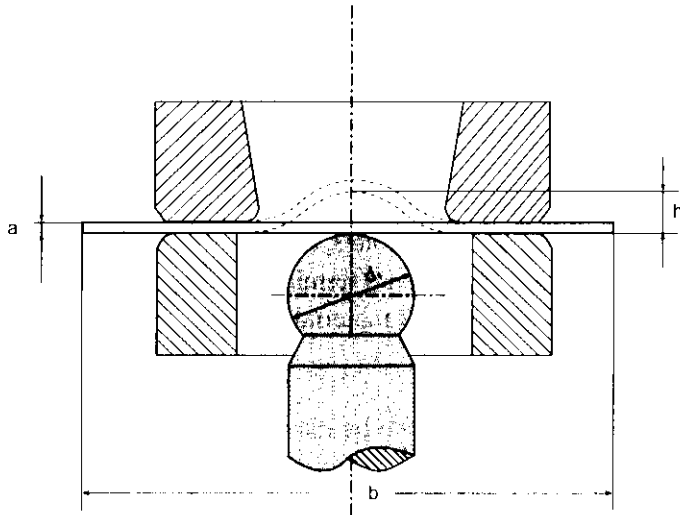


Fig. 5.32 - Prova di imbutitura a provette bloccate

convenzione vi è inizio di rottura quando appare una incrinatura che interessi l'intero spessore della provetta e, sia sufficientemente aperta, per lasciare passare la luce su almeno una parte della lunghezza. Al termine della prova si misura la profondità di penetrazione del punzone h , leggendo tale valore in millimetri. Il valore medio delle profondità di penetrazione di almeno tre prove rappresenta l'indice di imbutitura Erichsen, indicato con il simbolo IE .

5.6.4 Prova di piegamento

Lo scopo della prova, definita dalla norma UNI EN ISO 7438, è quello di determinare l'attitudine del materiale a lasciarsi deformare, fig. 5.33. Si effettua su di una provetta a sezione rettangolare a spigoli arrotondati o direttamente su spezzoni di barre a sezione circolare o poligonale (ad esempio tondo di acciaio per cemento armato). La prova consiste nel piegare il materiale di spessore a , gradualmente e lentamente, sottoponendolo ad una sollecitazione meccanica applicata mediante un cilindro di diametro D , definito dalla norma di prodotto. La lunghezza l dell'interasse dei due supporti deve soddisfare la relazione:

$$l = (D + 3 \cdot a) \pm \frac{a}{2} \quad (5.22)$$

e deve rimanere costante nel corso della prova.

L'esito della prova è positivo se si raggiunge l'angolo α senza che compaiano fessurazioni all'estradosso della provetta. In alcuni casi viene richiesto che l'angolo

sia di 180° ; in tal caso si procede come nella stessa fig. 5.33 con l'eventuale interposizione di un mandrino. Per i fili e le lamiere sottili è prevista una prova di piegamento a 90° alternata con una successiva in senso opposto. Per le barre laminate a caldo e deformate a freddo, utilizzate per il calcestruzzo armato, è prevista una prova di piegamento a 90° seguita da riscaldamento e successivamente da un raddrizzamento parziale a 30° . Questa prova misura il grado di duttilità di alcuni prodotti come lamiere, fili, tondi, profilati; misura, inoltre, la variazione della duttilità dovuta ai vari processi di formatura e di trattamento termico. La prova di piegamento permette, infine, di confrontare differenti tipi di materiali.

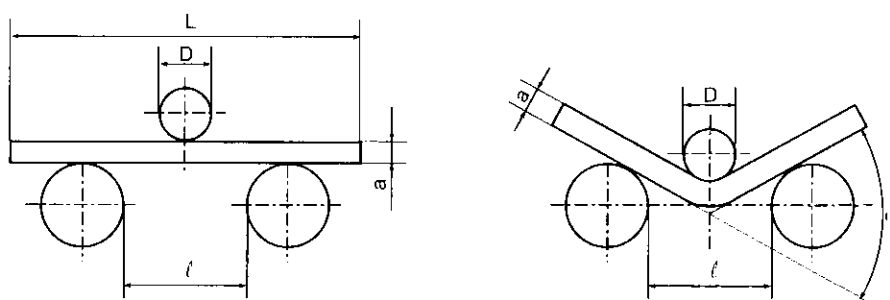


Fig. 5.33 - Prova di piegamento