Le Prove Meccaniche

La caratterizzazione dei materiali

PROPRIETA' ⇒ Forniscono indicazioni riguardanti le attitudini che hanno i materiali a lasciarsi trasformare od a resistere agli sforzi esterni

Proprietà fisiche

Si riferiscono alle caratteristiche generali della materia

Tra le quali:

- -Massa volumica
- -Dilatazione termica
- -Capacità termica massica (calore specifico)
- -Conducibilità termica
- -Conducibilità elettrica

Proprietà chimiche

Riguardano i fenomeni che si producono fra il materiale in considerazione e l'ambiente in cui esso è posto

Distinguiamo due aspetti:

1. **Aspetti utili** per il materiale (cromatura, decapaggio, ecc..)
2. **Aspetti dannosi** per il materiale (corrosione)

Proprietà meccaniche

Indicano l'attitudine di un materiale a resistere alle sollecitazioni esterne che tendono a deformarlo

SOLLECITAZIONI

- •Statica
- •Dinamica
- •A fatica

DEFORMAZIONI

- •Elastiche
- •Permanenti

Proprietà tecnologiche

Indicano l'attitudine di un materiale ad essere lavorato in un dato modo

Si distinguono:

- -Plasticità
- -Duttilità
- -Malleabilità
- -Fusibilità
- -Saldabilità
- -Truciolabilità
- -Temprabilità

Proprietà magnetiche

Indicano l'attitudine dei materiali metallici, posti in un campo magnetico, a modificare le proprietà del campo stesso.

Sensibilità magnetica

- -**Paramagnetici** (insensibile, ma rafforza il campo, sono debolmente attratti dalle calamite. Es. alluminio)
- -**Magnetici** (poco sensibili, attratti debolmente dalle calamite. Es. cromo)
- -**Ferromagnetici** (molto sensibili, molto attratti. Es. ferro, acciai e ghise)
- -**Diamagnetici** (insensibili, indeboliscono il campo, sono respinti dalle calamite.Es.oro)

Il comportamento meccanico dei materiali

I componenti strutturali presentano un comportamento diverso in funzione

- *del tipo di materiale con il quale sono realizzati*
- *del tipo di sollecitazione alla quale sono sottoposti*
- *della geometria (forma e dimensioni),*
- *delle condizioni fisiche e chimiche (temperatura, ambiente, velocità di applicazione del carico ecc)*

Tuttavia è necessario disporre di informazioni standardizzate sui materiali che sono necessarie per definirne il campo ed i limiti di impiego

Queste informazioni sono di norma ottenute da un insieme di test sperimentali classificati genericamente sotto la dicitura di

PROVE MECCANICHE

Le prove meccaniche

Le ***prove meccaniche*** si possono classificare come segue:

STATICHE

- Trazione
- Compressione
- Flessione
- Torsione
- Durezza

IMPULSIVE

- Resilienza

CICLICHE

- Fatica

A CARICO COSTANTE

- Usura
- Scorrimento

Le prove meccaniche

I grandi vantaggi di poter disporre di prove meccaniche sono essenzialmente di due tipi:

• **stabilire metodologie standardizzate** (prova ripetibile ovunque da soggetti diversi in condizioni prefissate, risultati pienamente confrontabili)

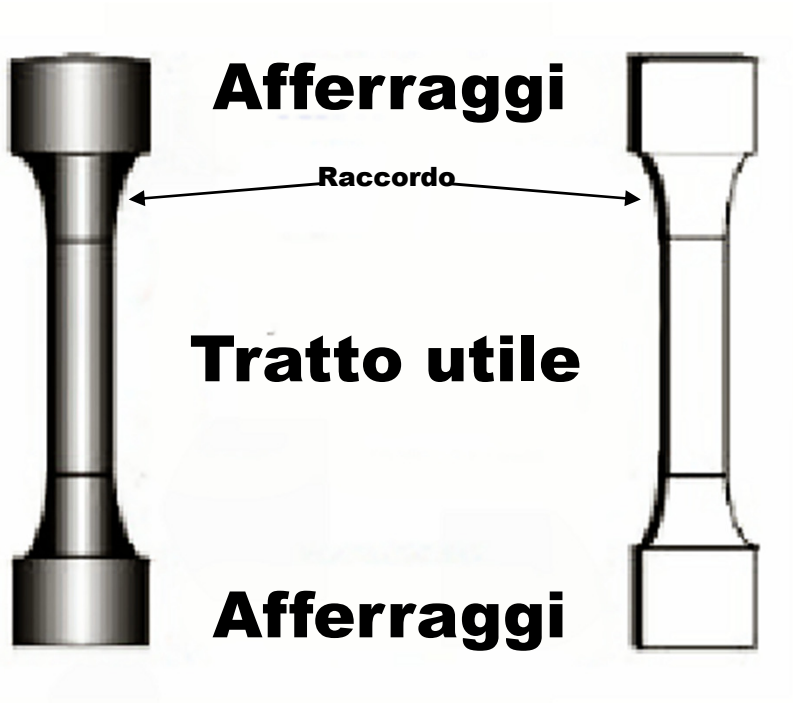
• **valutare le proprietà intrinseche del materiale** (indipendenti dalla geometria e costanti a parità di condizioni fisiche e chimiche)

A livello Europeo le modalità di esecuzione delle prove sono fissate dalle normative UNI EN

• *Prova di trazione UNI EN 10002*
• *Prova di durezza UNI EN 6507 (Vickers) 6506 (Brinell) 6508 (Rockwell)*
• *Prova di resilienza Charpy UNI EN 10045*

La prova di trazione

La prova di trazione, definita dalla norma UNI EN 10002 *(Materiali metallici – Prova di trazione – Parte 1: Metodo di prova a temperatura ambiente)*, è la più importante tra le prove meccaniche distruttive. Consiste nel sottoporre un provino del materiale, opportunamente prelevato e preparato, ad **uno sforzo di trazione** (che si prolunga fino alla rottura) allo scopo di determinare una serie di caratteristiche meccaniche

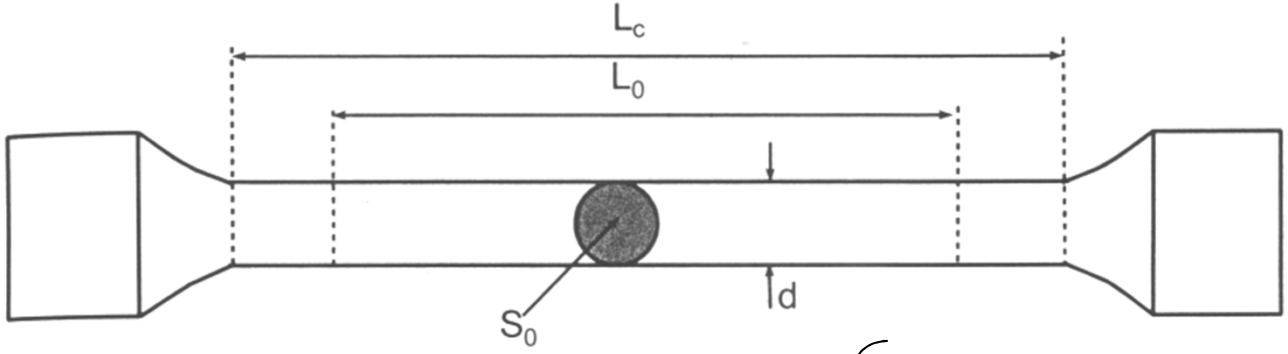


- *Il provino è di norma ottenuto mediante lavorazione meccanica di un saggio prelevato da un prodotto.*
- *Può avere forma circolare o rettangolare*
- *In esso si possono individuare:*
  - un tratto a sezione costante (all'interno del quale si individua il cosiddetto "tratto utile")
  - due teste (afferraggi)

opportunamente raccordate per evitare l'insorgere di sovrasollecitazioni

La prova di trazione: *provini a sezione circolare*

La normativa fissa in modo rigoroso le proporzioni tra gli elementi geometrici del provino (lunghezza L_0 del tratto utile, diametro della sezione circolare d, area della sezione S_0) come segue:

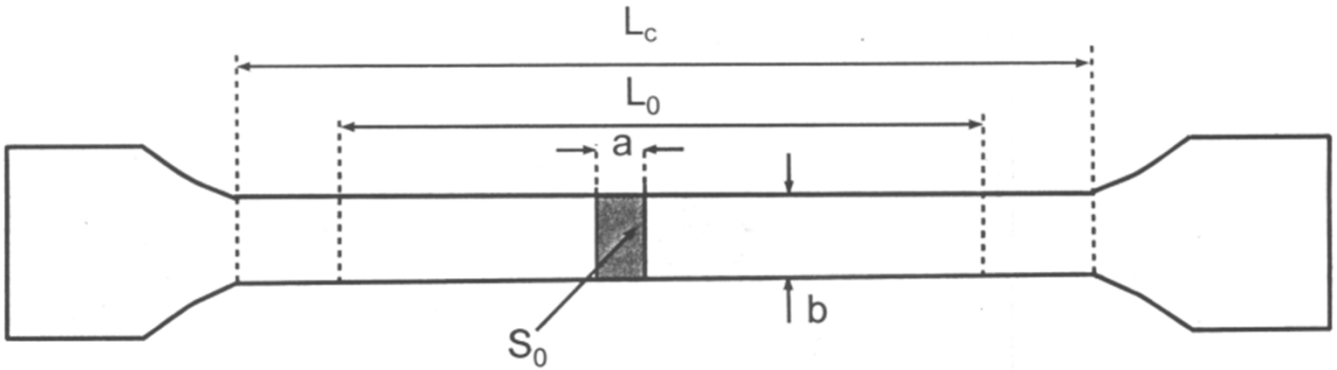


$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad \begin{cases} k = 5.65 \text{ (corti)} \\ k = 11.3 \text{ (lunghi)} \\ L_0 \geq 20 \text{ mm} \end{cases}$$

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

Più semplicemente…. $L_0 = 5\,d$ $\quad L_0 = 10\,d$

La prova di trazione: *provini a sezione rettangolare*



Nel caso di provini con spessore *a ≥ 3 mm* si consiglia una larghezza *b ≤ 8a*

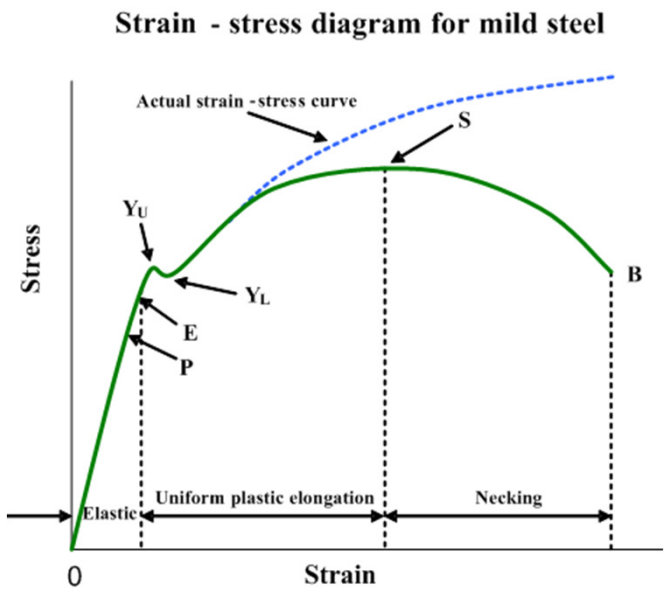
$$L_c \geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$$

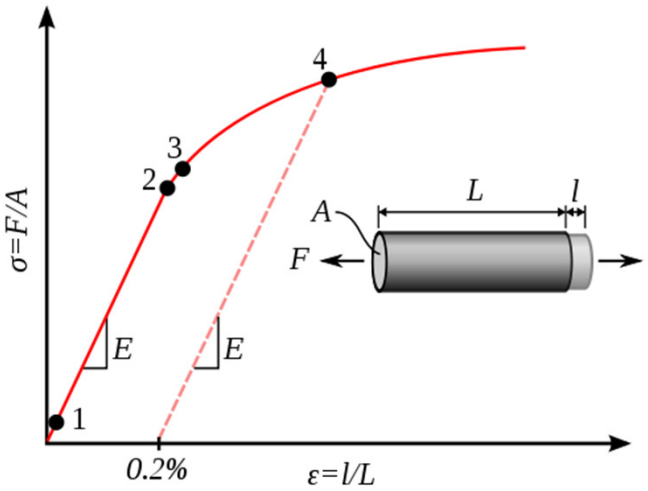
E un raggio di raccordo *r ≥ 12 mm*

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$$

Sebbene le norme non diano indicazioni particolari per quanto riguarda il grado di finitura superficiale del provino, è sempre opportuno che questo sia buono (almeno nel tratto a sezione costante)

La prova di trazione





Il diagramma presenta:

• **un primo tratto rettilineo**, durante il quale il provino ha comportamento elastico. Ciò equivale a dire che se il carico viene rimosso, il provino ritorna esattamente alla forma e alla dimensione iniziali;

• **un tratto curvo** (la concavità è verso il basso) in cui il comportamento è ancora elastico; si parla di *elasticità non lineare*, ma questo tratto è difficilmente rilevabile e non ha importanza ai fini dell'accettazione del materiale;

• **lo snervamento**, ossia una rapida riduzione del carico, che, giunto alla tensione di snervamento superiore bruscamente cade alla tensione di snervamento inferiore, e successivamente rimane quasi stazionario attorno a questo valore, mentre la deformazione cresce notevolmente;

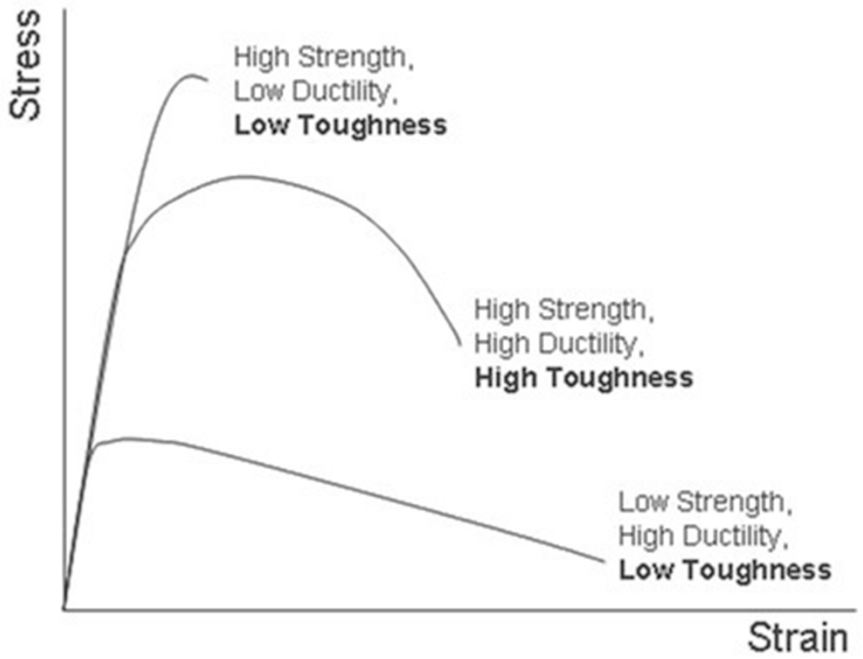
• **la zona delle grandi deformazioni**, ossia quella in cui il carico raggiunge un massimo e poi decresce fino alla rottura finale.

La prova di trazione

https://www.youtube.com/watch?v=D8U4G5kcpcM

Video su prova di trazione

La prova di trazione



L'analisi della curva sforzi-deformazioni consente di valutare anche qualitativamente il comportamento del materiale dal punto di vista della **duttilità, tenacità e della resistenza**

La prova di trazione: *modalità di rottura*

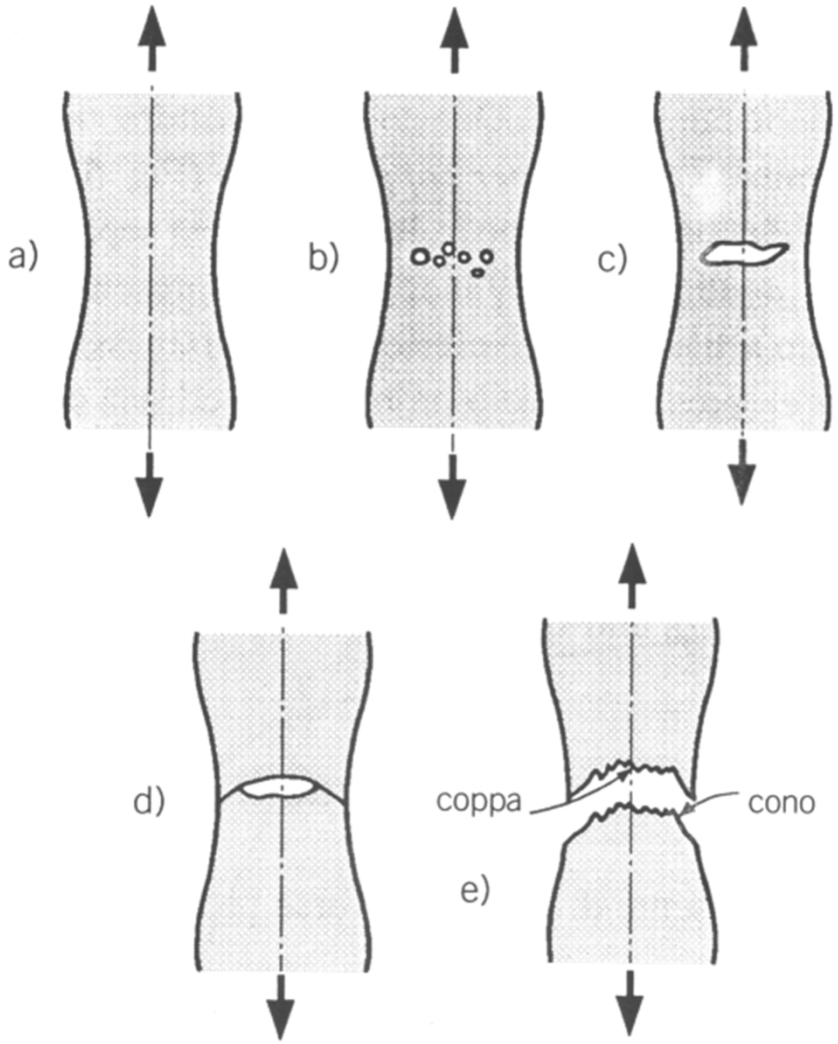
Il processo che conduce alla rottura con separazione delle parti si articola in diversi passi

a-b) Dapprima, dopo l'inizio della strizione, all'interno del provino si formano, in corrispondenza di microdifetti, cavità di piccole dimensioni (microvuoti)

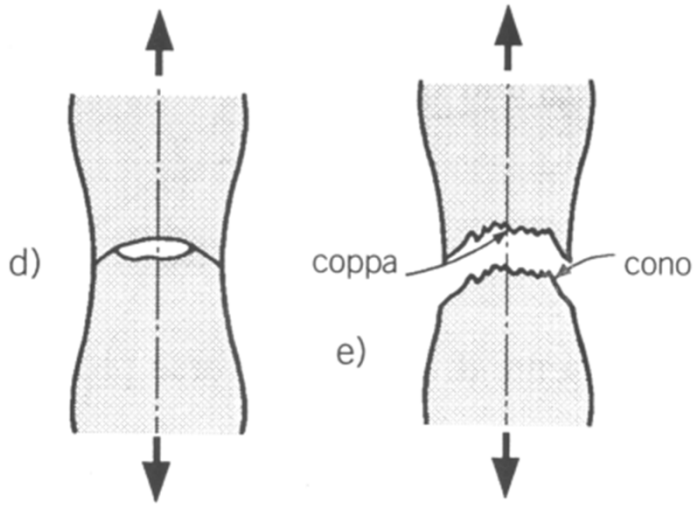
c) Al procedere della deformazione, queste microcavità tendono ad allargarsi e a fondersi tra loro fino a formare una fessura interna di forma approssimativamente ellittica con asse maggiore ortogonale all'asse del provino

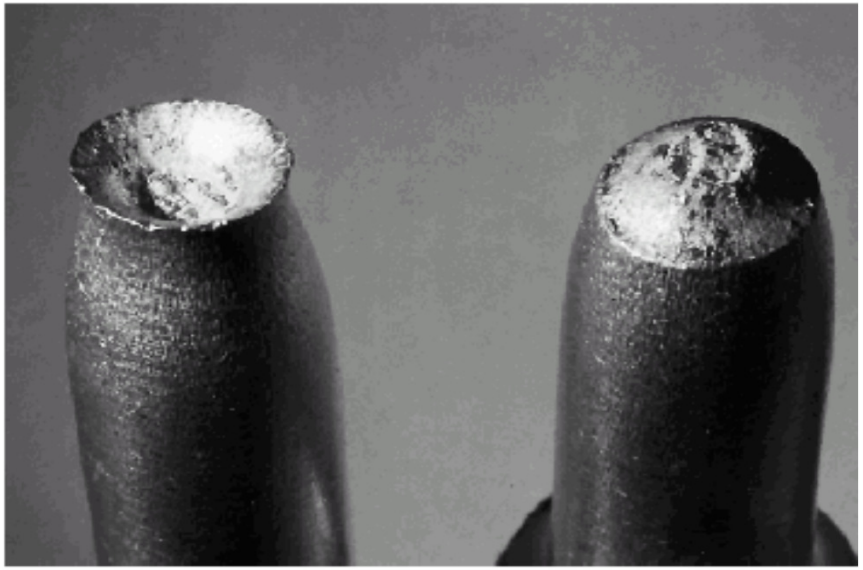
d) Infine la frattura tende rapidamente a propagarsi verso l'esterno mediante scorrimento lungo una superficie conica inclinata a 45° rispetto all'asse del provino (direzione delle massime tensioni tangenziali)

e) Questo tipo di rottura, tipico del materiali duttili, è talvolta denominato "frattura a coppa e cono" per la particolare forma assunta dai due monconi del provino dopo la loro completa separazione



La prova di trazione: *rottura duttile*





La prova di trazione

La prova di trazione consente di rilevare diverse proprietà meccaniche del materiale testato

Resistenza alla trazione (o carico unitario di rottura) è il rapporto tra il massimo carico raggiunto durante la prova e l'area della sezione iniziale del provino. La resistenza alla trazione è tra i risultati di maggior interesse pratico.

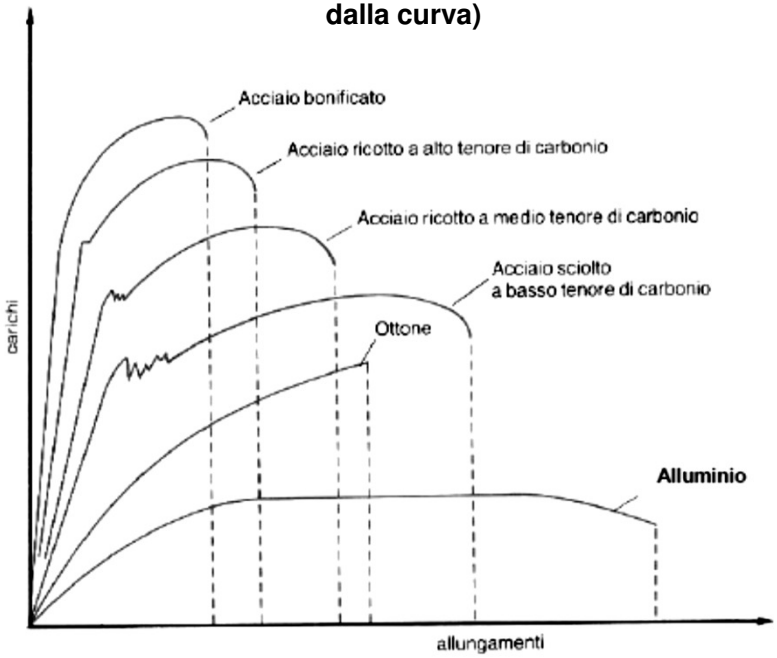
Coefficiente di Poisson è espresso dal valore assoluto del rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale.

Modulo di elasticità longitudinale (o modulo di Young) è il rapporto tra tensioni e deformazioni in campo elastico

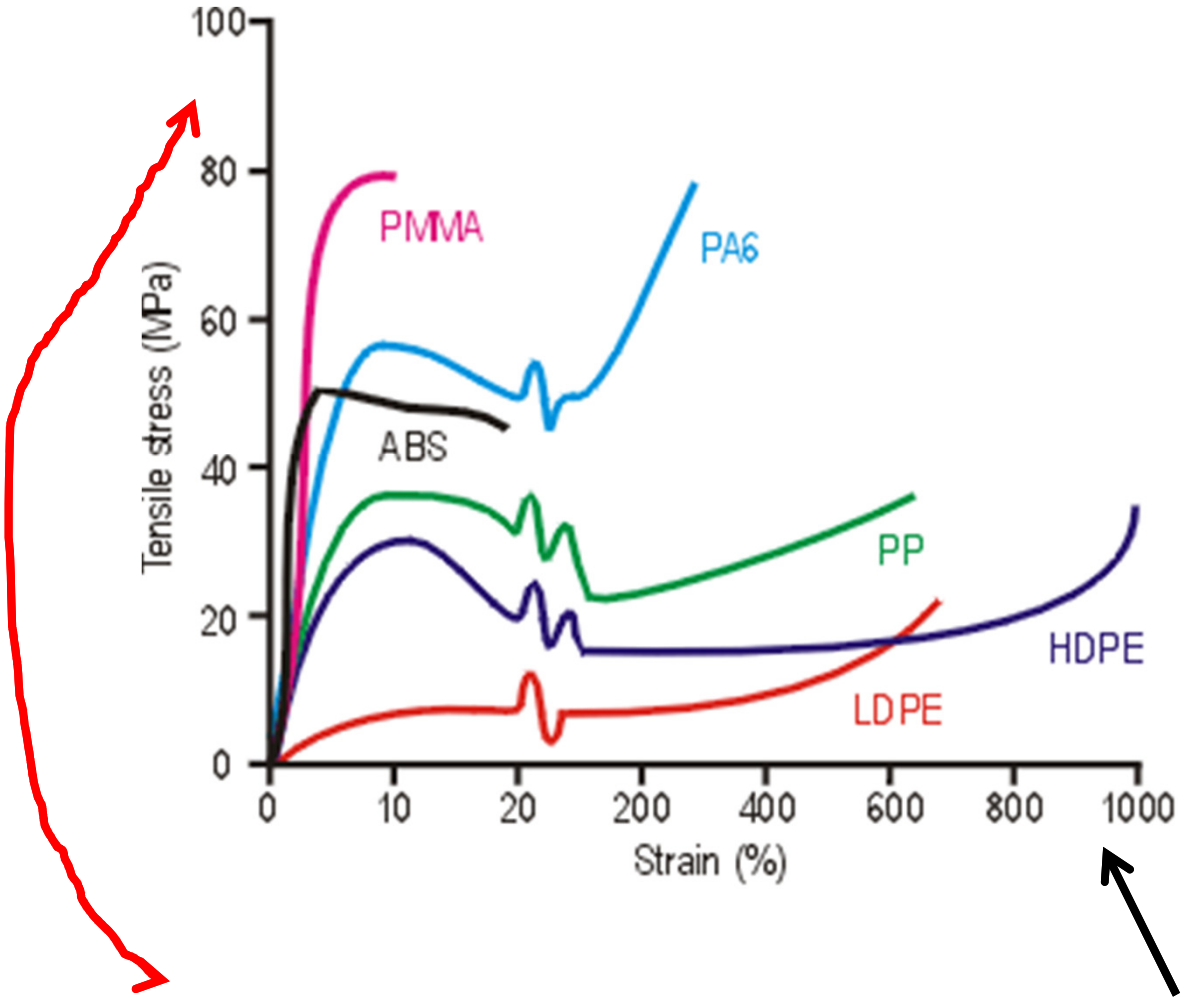
Strizione percentuale è definita dal rapporto fra la variazione dell'area della sezione trasversale del provino al momento della rottura e l'area primitiva

Allungamento a rottura è definito dal rapporto fra l'allungamento finale subito dal tratto utile del provino e la sua lunghezza iniziale

Materiali a differente tenacità (capacità di assorbire energia prima di arrivare a rottura, area sottesa dalla curva)

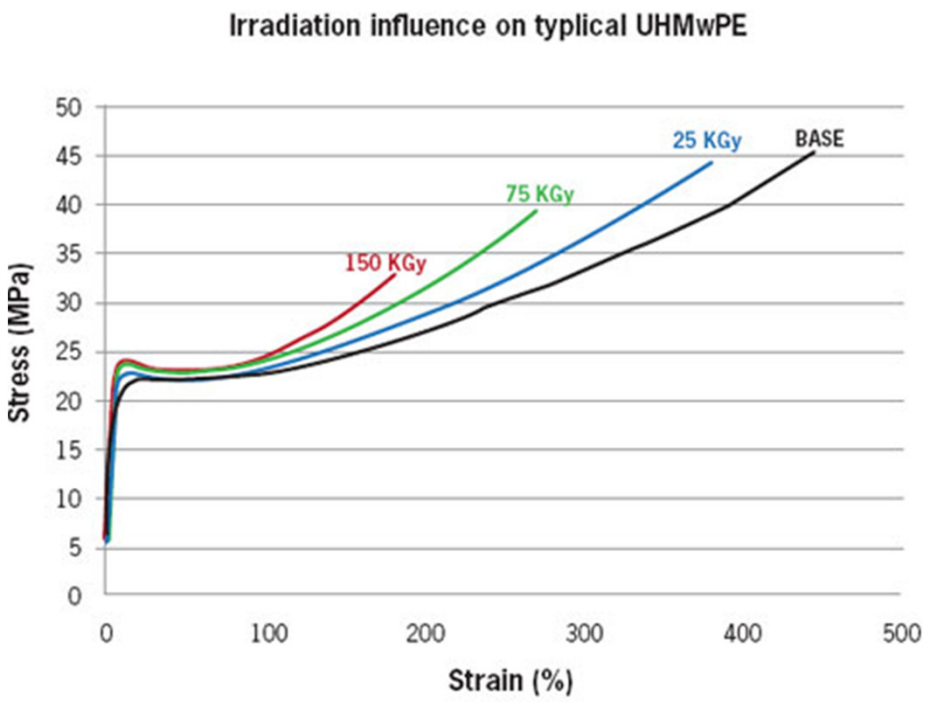


Materiali polimerici



Cosa notiamo di diverso rispetto ai materiali metallici?

Effetto dell'irradiazione



Il gray (simbolo Gy) è l'unità di misura della dose assorbita di radiazione del Sistema Internazionale. Un'esposizione di un gray corrisponde ad una radiazione che deposita un joule, (definito come 1 kg•m^2/s^2), per chilogrammo di materia (sia tessuti biologici che qualsiasi altra cosa).

$$\mathrm{Gy} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}} = \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$$

Nel polietilene UHMWPE, livelli crescenti di irradiazione migliorano la resistenza ad usura ma peggiorano in generale altre caratteristiche meccaniche quali resistenza a rottura e resistenza a fatica

Effetto della temperatura

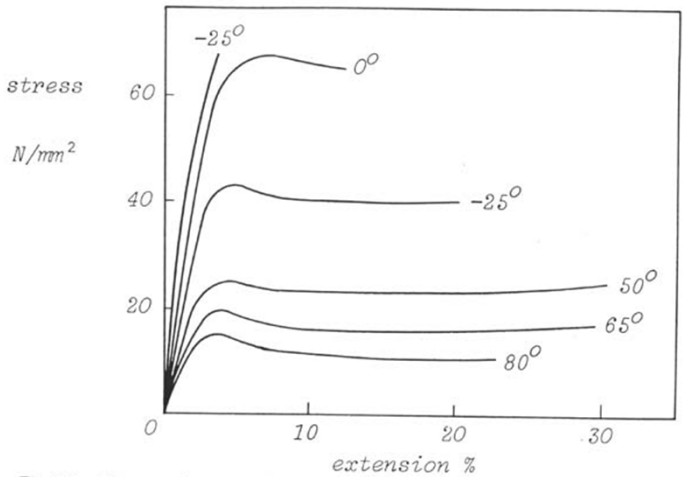
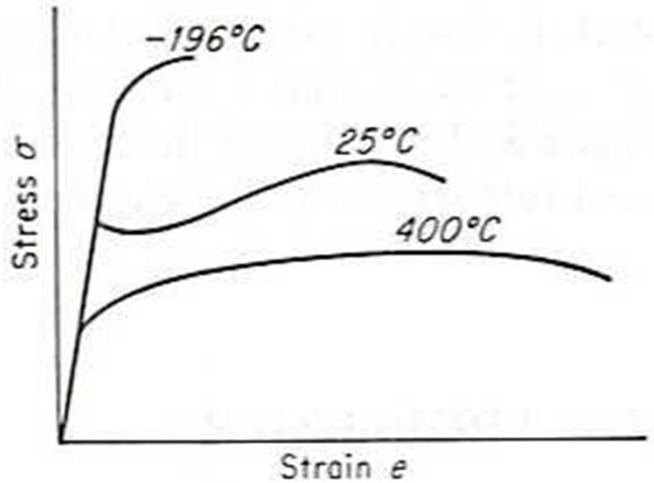


Fig. 5.3 – Stress-strain curves of cellulose acetate at various temperatures in °C. After Carswell and Nason (1944).



Effetto della temperatura sulle curve sforzi-deformazioni in un materiale polimerico termoplastico (sinistra) e in uno metallico (destra)

Durezza

In generale si definisce durezza la **resistenza di un materiale alla deformazione localizzata**, sia essa provocata mediante indentazione, graffio, taglio o flessione

Nei metalli, nei materiali ceramici e nei polimeri si considera la deformazione plastica, mentre per gli elastomeri (e qualche polimero), la durezza assume il significato di resistenza alla deformazione elastica.

Il fatto che per la durezza non esista una definizione univoca (come invece accade per altre proprietà meccaniche) lascia supporre che essa **non rappresenti una caratteristica fondamentale del materiale**. Piuttosto si potrebbe affermare che la durezza rappresenta una sorta di effetto combinato originato da resistenza di snervamento, di rottura, incrudimento[1], modulo di Young, ecc.

Le misure di durezza sono ampiamente utilizzate nel processo di controllo di qualità dei materiali perchè semplici e rapide da eseguire. Si considerano non distruttive (o semi-distruttive) quando vengono effettuate in regioni caratterizzate da bassi regimi di sforzo.

[1] L'**incrudimento** è un fenomeno metallurgico per cui un materiale metallico risulta rafforzato in seguito ad una deformazione plastica a freddo.

Ruolo della durezza negli impianti protesici

L'usura, fenomeno multifattoriale, è strettamente collegata al livello di durezza superficiale dei materiali a contatto.

In generale si può affermare che **il livello di usura è inversamente proporzionale alla durezza delle superfici accoppiate** quindi superfici estremamente dure sono potenzialmente meno usurabili.

Livello di usura minimo: ceramica su ceramica, seguito da metallo su metallo.

Equazione di Archard

$$Q = \frac{KW}{H}$$

Q = tasso di usura
H = durezza del materiale
W = carico di compressione
K = costante (coefficiente di usura)

La prova di durezza

La durezza di un materiale è generalmente definita come ***resistenza che esso oppone alla penetrazione di un altro corpo*** (di durezza maggiore e di definita geometria) al quale è applicato lentamente un determinato carico nella direzione perpendicolare alla superficie da esaminare

E' una condizione **necessaria affinché il componente metallico possegga le caratteristiche di progetto, ma non sufficiente**. Infatti se la durezza non è corretta il componente non sarà certamente idoneo, ma in caso contrario non è certo che le altre caratteristiche siano conformi a quanto desiderato. ***La durezza influenza la resistenza all'usura, all' incisione, al taglio e talvolta anche alla corrosione***.

Nei materiali metallici la durezza può essere interpretata dunque come la resistenza alla deformazione plastica permanente (a sua volta correlabile empiricamente al carico di rottura)

Mentre nei materiali lapidei (concetto mineralogico) la durezza esprime la resistenza della superficie alla scalfittura (scala Mohs)

In sostanza, la durezza esprime la resistenza all'indentatura permanente della superficie

I vantaggi della prova di durezza risiedono nella sua facilità e rapidità, nella sua economicità visti anche i bassi costi delle apparecchiature usate e infine nel fatto di non essere una prova distruttiva (che quindi puo' essere ripetuta in piu' punti del provino)

La prova di durezza

DUREZZA

<u>Misura dell'impronta</u>
lasciata dal corpo che indenta la superficie oggetto di test

- ***Brinell***
- ***Vickers***

<u>Misura dell'abbassamento</u>
del corpo che indenta la superficie oggetto di test

- ***Rockwell***

Durezza Brinell (impronta)

La prova di durezza Brinell, definita dalla norma UNI EN 6506-1, si esegue applicando sul provino un carico, a mezzo di opportuno penetratore, e misurando la superficie dell'impronta lasciata sul materiale.

La durezza Brinell è proporzionale al rapporto tra il carico di prova diviso l'area della superficie curva originata nell'impronta

$$HB = 0.102 \cdot \frac{F}{S}$$

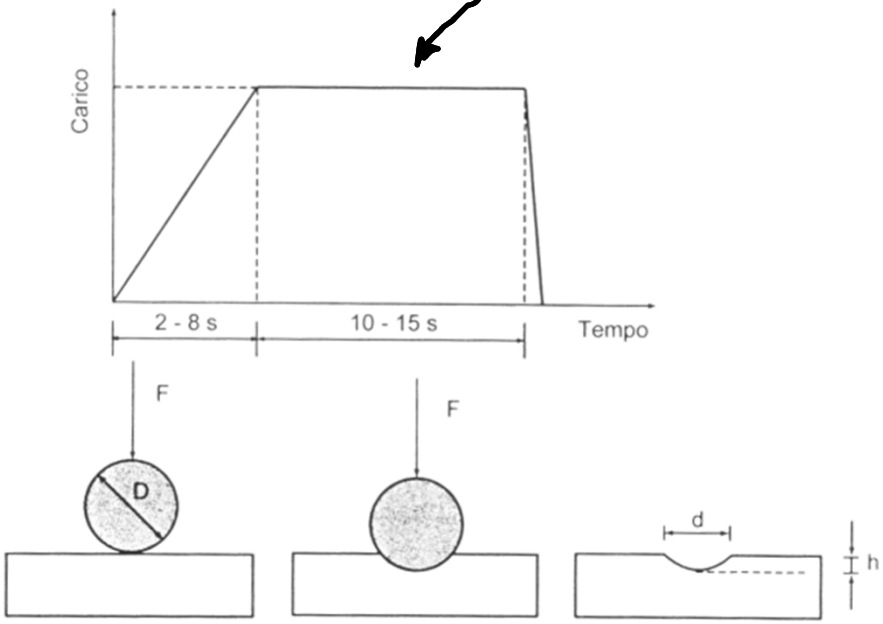
dove il fattore di conversione 0,102 serve per conservare immutati i valori delle durezze con il sistema originariamente adottato, prima dell'introduzione del sistema internazionale d'unita' (SI). Infatti: 1 N = 1 Kgf / 9,80665=1 Kgf x 0,102

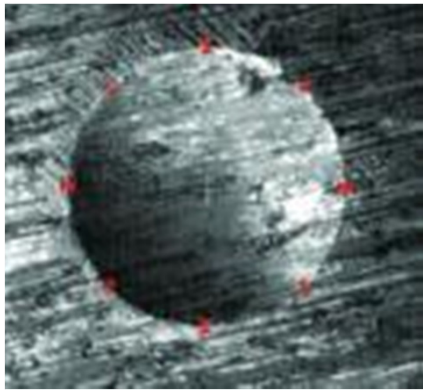
• **Il penetratore è costituito da una sfera di acciaio indurito** (utilizzata per materiali aventi durezza < 350) **oppure di carburo di tungsteno** (materiali con durezza fino a 650) che ha diametro 1, 2, 2.5, 5 o 10 mm, anche se è consigliabile impiegare sempre la sfera di diametro 10 mm, mentre i diametri inferiori sono utilizzati laddove lo spessore del provino sia inferiore a 6 mm.

• Il carico (che può variare tra 5000 e 30000 N) viene scelto in base a considerazioni relative al materiale ed al diametro del penetratore.

• L'entità della penetrazione dipende dal carico applicato e, al variare di questo, varia l'angolo di penetrazione che è delimitato dalla tangenti alla sfera ai bordi dell'impronta

Durezza Brinell





Il carico, espresso in Newton, si seleziona utilizzando la relazione

$$F = \frac{1}{0.102} \cdot k \cdot D^2$$

nella quale *k* è una costante legata al materiale da testare e *D* il diametro del penetratore espresso in mm.

I valori di *k* sono ricavabili dalla letteratura

Leghe di stagno e piombo	***1***
Leghe di alluminio	***5***
Leghe di rame	***10***
Acciai	***30***
Leghe di nichel	***30***
Leghe di titanio	***30***

Durezza Brinell

- Il provino deve essere opportunamente preparato in modo che la superficie sulla quale si effettua la prova sia **pulita ed esente da contaminanti**.

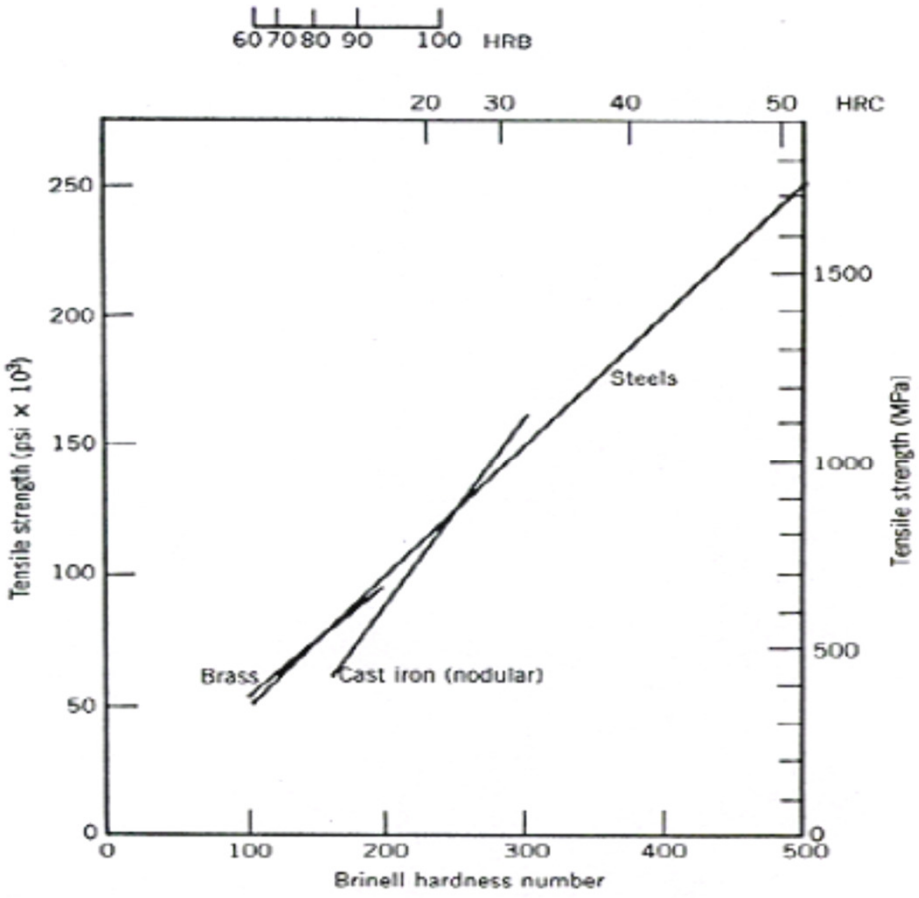
- Mediante un sistema ottico si visualizza la superficie su uno schermo con ingrandimento 20 o 70X e si serra il provino su un apposito portaprovino in modo che non si sposti durante la prova. Successivamente si procede **all'applicazione del carico**.

- Il carico è applicato secondo una rampa iniziale che si esegue in un tempo variabile tra 2 e 8 s, e resta costante al valore massimo per un periodo compreso tra 10 e 15 s. Trascorso tale tempo si rimuove il carico e **si visualizza la superficie sulla quale è impressa l'impronta**, che sullo schermo apparirà come una circonferenza.

- Per tenere conto di eventuali anisotropie del materiale si esegue una **coppia di misure ortogonali** dei diametri calcolando la media aritmetica per ricavare il valore dell'area S

- Questa prova richiede l'uso di provini con **superfici lucide e piatte**, inoltre bisognerà accertarsi che l'impronta non abbia raggiunto la superficie opposta del provino (lo spessore minimo deve essere almeno otto volte la profondità dell'impronta) o che non sia troppo vicina al suo bordo o ad un'impronta precedente

Durezza Brinell



Per gli acciai è stato determinato sperimentalmente che esiste una relazione lineare tra durezza Brinell e Carico di Rottura (espresso in MPa) secondo la relazione

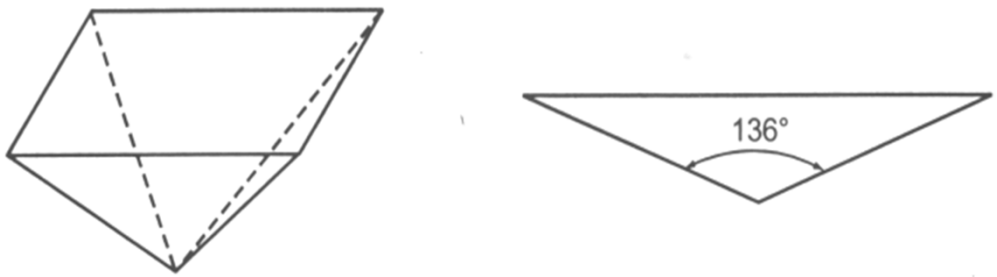
$$\sigma_R = 3.45 \cdot HB$$

Durezza Vickers (impronta)

<u>La prova di durezza Vickers</u>, definita dalla norma UNI EN 6507, si esegue applicando sul provino un carico mediante un opportuno penetratore a forma piramidale e misurando la superficie di impronta.

La durezza Vickers è proporzionale al rapporto tra il carico di prova e la superficie dell'impronta (F in Newton, S in mm^2)

$$HV = 0.102 \cdot \frac{F}{S}$$

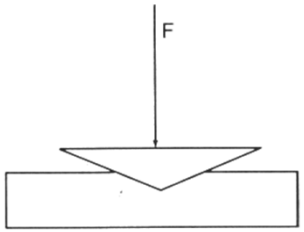


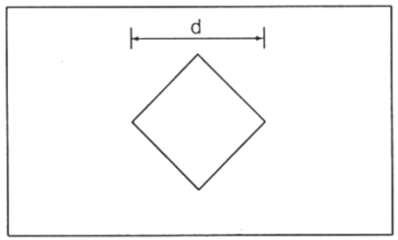
Il penetratore ha **<u>forma piramidale retta a base quadrata</u>** ed è realizzato in diamante. L'errore massimo ammesso nella realizzazione della punta è di soli 2 micron.

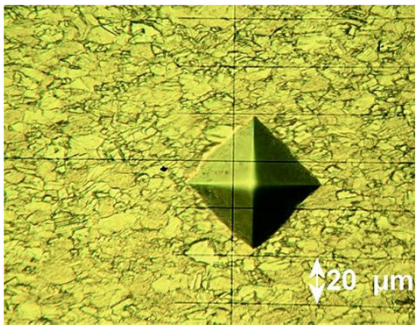
Il metodo Vickers estende e perfeziona la prova Brinell in quanto **<u>ha un campo d'applicazione illimitato sia per la durezza che per lo spessore del pezzo</u>** da provare senza la necessità di cambiare il penetratore, con la sola modifica del carico di prova.

Durezza Vickers

- La prova deve essere eseguita su una **superficie liscia, libera da ossidazione ed esente da alterazioni** dovute, ad esempio, a riscaldamento o incrudimento.
- La finitura della superficie deve essere tale da permettere un'accurata misurazione delle diagonali dell'impronta.
- I carichi possono variare da 1.9 a 980.7 N
- Il penetratore viene premuto sul materiale con un carico F gradualmente crescente, in un tempo variabile tra 2 e 10 s e mantenuto per 10-15 s.
- Una volta rimosso 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 artimetica viene impiegata per il calcolo della superficie S dell'impronta.





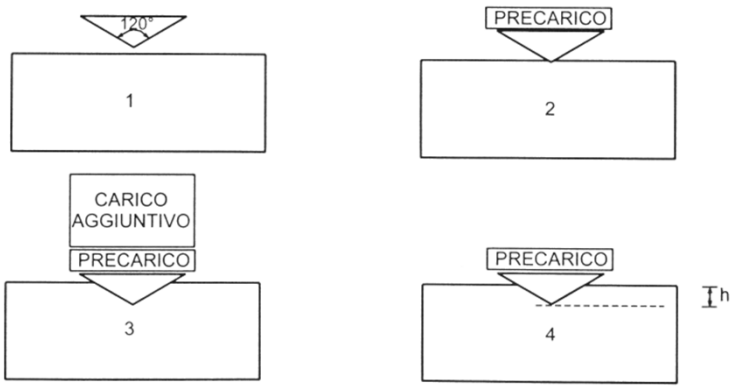


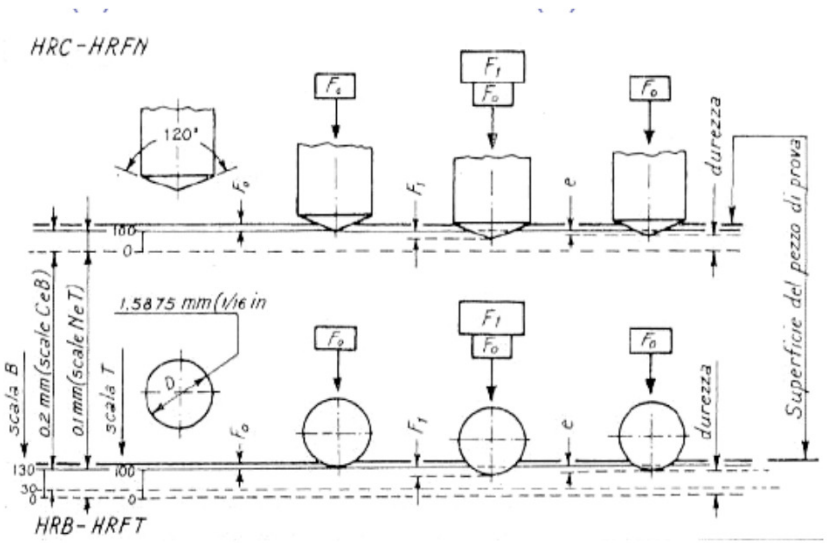
Durezza Rockwell (abbassamento)

Le prove di durezza Rockwell, definite dalla norma UNI EN 6508-1, sono completamente diverse da quelle Brinell e Vickers, infatti in questo caso **<u>si sottopone il materiale ad un carico in due tempi</u>** mediante un penetratore sferico o conico.

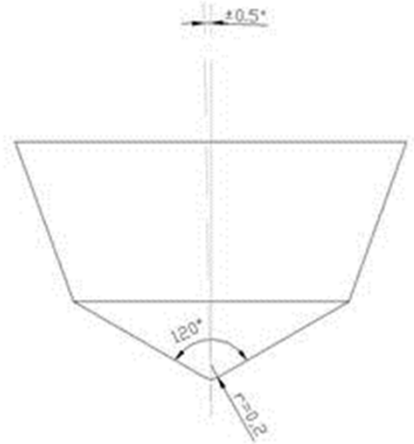
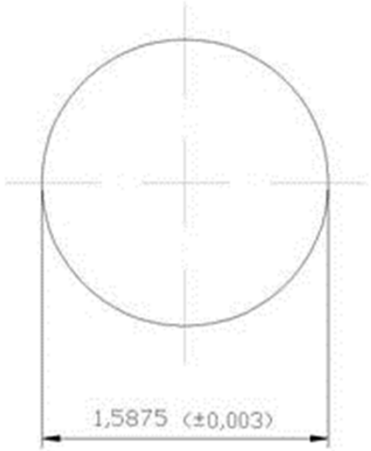
La prova consiste nel misurare l'aumento residuo h della profondità dell'impronta sotto il carico iniziale (precarico) F_0 dopo la rimozione del carico aggiuntivo F_1. In questo modo si tiene conto del ritorno elastico del materiale.

La lettura della profondità dell'impronta viene eseguita direttamente sulla macchina mediante uno strumento analogico o digitale.





Durezza Rockwell (abbassamento)

	Rockwell C	**Rockwell B**
		
Materiale	Diamante	Acciaio Temprato
Forma	Cono circolare retto	Sfera D>1.59 mm
N. impronte	Almeno due	Almeno due

Durezza Rockwell

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

Il valore della durezza Rockwell viene calcolato usando la formula

$$Durezza\ Rockwell = N - \frac{h}{e}$$

dove *N* è il numero specifico della scala (vale 100 o 130 a seconda che si impieghi un penetratore in diamante o in acciaio, *e* l'unità specifica della scala espressa in mm (0.002 mm) ed *h* l'aumento residuo della profondità di penetrazione sotto il carico iniziale dopo l'eliminazione del carico aggiuntivo

La prova Rockwell presenta alcuni vantaggi che la fanno spesso preferire alle altre:

- facilità e rapidità di esecuzione
- elevata capacità di diversificare acciai con durezza di poco differente
- piccole dimensioni dell'impronta (applicabile su pezzi finiti)
- possibilità di automatizzazione
- assenza di misure ottiche

Durezza Rockwell C (metalli duri)

Il penetratore è costituito da un **cono di diamante** con angolo di apertura 120° e raggio di curvatura, in corrispondenza della punta, di 0.2 mm

Si porta il penetratore a contatto con la superficie del pezzo da provare e si applica un precarico di 98.07 N; si azzera l'indicatore di profondità e, in un tempo compreso tra 2 e 8 s, si aggiunge il carico addizionale pari a 1373 N, in modo da avere un carico totale di 1471 N.

Trascorsi 4 s, il carico addizionale viene rimosso e si misura sull'indicatore la profondità di penetrazione h, mantenendo il precarico iniziale.

Il valore della durezza è dato dall'espressione:

$$HRC = 100 - \frac{h}{e}$$

Nell'eseguire le prove di durezza Rockwell bisogna fare in modo che lo spessore del provino sia almeno pari a *10h* per prove effettuate con l'indentatore conico ed almeno *15h* per prove effettuate con il penetratore sferico.

La distanza tra i centri di due impronte adiacenti deve essere di almeno 2mm e la distanza tra il centro dell'impronta ed il bordo del provino almeno 1 mm

In sintesi…..

1) Delle tre prove qui citate **la più versatile**, precisa, non distruttiva, per le modestissime dimensioni dell' impronta, e valida in un intervallo di durezze praticamente illimitato, è la **prova Vickers**, che si presta anche per le misure di microdurezza.

Tuttavia, stante la **piccola dimensione delle impronte**, questa prova risente molto delle eterogeneità della provetta e risulta alquanto laboriosa; infatti per garantire una sufficiente precisione è necessaria un accurata preparazione della superficie e un'altrettanto accurata lettura delle impronte col microscopio almeno a 100 ingrandimenti.

2) La prova Brinell è meno laboriosa, ma può esser talvolta distruttiva per **l'eccessiva dimensione delle impronte**. Tuttavia risente meno delle variazioni legate alle eterogeneità microstrutturali tanto da costituire talvolta l'unica alternativa per materiali fortemente eterogenei. **Valori ottenuti con sfere di diverso diametro sebbene caricate proporzionalmente non sono generalmente paragonabili fra loro**. La lettura del diametro dell' impronta richiede l'uso del microscopio, talvolta incorporato nel durometro, oppure portatile a 20 ingrandimenti almeno.

Nonostante le limitazioni succitate la misura e' relativamente semplice, affidabile e generalmente meno complicata di quella Vickers.

3) La prova Rockwell è la più semplice e rapida, ma anche la meno precisa ed affidabile. Infatti può dare valori errati per molteplici motivi; per esempio un cedimento dell' appoggio dovuto ad una qualsiasi causa (superficie ossidata o sporca, supporto cedevole, deformazioni elastiche, slittamenti, ecc.) darà misure in difetto.