

CAPITOLO XV

COMPORAMENTO DEI MATERIALI SOTTO CARICO

100 — Generalità.

Le caratteristiche di elasticità e di resistenza dei materiali da costruzione si determinano sperimentalmente, sottoponendo alle diverse sollecitazioni semplici, per mezzo di macchine adatte, saggi di forma e di dimensioni appropriate.

Più frequenti sono le prove di trazione e quelle di compressione: le prime impiegate in generale per i materiali metallici, le seconde per i materiali lapidei naturali e artificiali. Anche usate sono le prove di torsione e quelle di flessione e taglio.

Le prove di carattere industriale, richieste dagli ordinari capitolati di appalto, si limitano per lo più ad accertare la resistenza a rottura e, per certi materiali, anche talune deformazioni dopo la rottura. Le prove scientifiche servono invece a stabilire le costanti d'elasticità e, più generalmente, a rilevare i fenomeni che si manifestano durante l'azione del carico, in relazione a prestabilite condizioni dell'esperienza.

In ogni macchina di prova si possono riconoscere facilmente le seguenti parti:

l'organo che esercita lo sforzo, costituito in alcuni tipi di macchine da una vite — comandata a mano o per mezzo di motore elettrico — e spostabile in una madrevite fissa (fig. 94); in altri tipi formato da un dispositivo analogo ad un compressore idraulico, con olio e glicerina, o uno di questi liquidi emulsionato con acqua, come fluido in pressione (figg. 95, 96);

L'organo che trasmette lo sforzo al saggio, costituito da *staffe* o *morse* nelle prove di trazione, *piastre* nelle prove di compressione, *coltelli* nelle

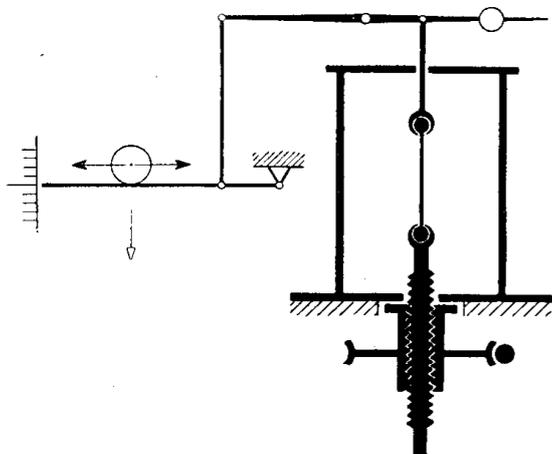


Fig. 94

prove di flessione. I dispositivi di questa categoria devono essere conformati in guisa da garantire che sul saggio venga esercitata esclusivamente l'azione richiesta dal tipo di sollecitazione a cui si sperimenta; perciò sono generalmente provvisti di snodi sferici, i quali permettono al saggio di orientarsi nel modo richiesto dallo sforzo;

l'organo misuratore del carico, costituito da una bilancia a leva,

per lo più provvista di romano (fig. 94), o da una bilancia a pendolo (fig. 95), o finalmente da manometri a molla o a mercurio (fig. 96).

Il carico deve essere *statico*, crescere cioè gradualmente dal valore zero al valore finale, e con tale lentezza da permettere che si compia almeno la parte più rilevante della deformazione del saggio; deve inoltre potersi regolare d'intensità, tanto in aumento che in diminuzione. L'approssimazione ordinariamente richiesta per

l'apparato dinamometrico è fra l'uno e il due per cento.

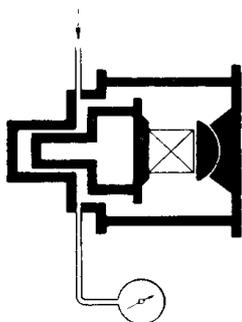


Fig. 96

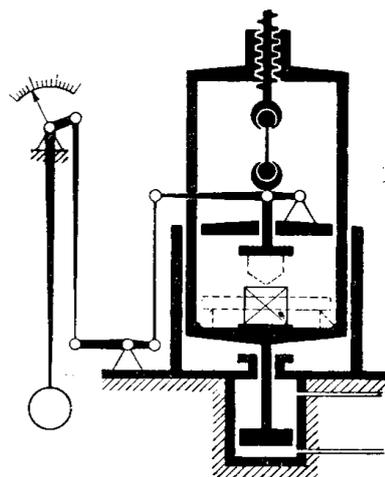


Fig. 95

101 — Preparazione dei saggi.

Siccome dai risultati delle prove si vuole risalire alle caratteristiche del materiale in opera, è essenziale usare certe cautele nel prelievo e nella preparazione dei saggi, affinché essi, ancorchè di piccole dimensioni, possano rispecchiare il meglio possibile le proprietà dei pezzi dai quali furono isolati.

Il numero dei provini, la loro posizione nel pezzo da cui provengono, le modalità di prelevamento e di preparazione sono specificate dalle tabelle UNI.

I materiali metallici debbono essere prelevati e successivamente lavorati a freddo mediante trapano, pialla, fresatrice o tornio, ed eventualmente rifiniti con la lima. I campioni isolati con la cesoia si piallano o si fresano sulle faccie del taglio onde asportarvi lo strato di metallo incrudito; quelli ricavati da pezzi curvi si raddrizzano con la morsa oppure battendoli con martelli di rame.

Si evita di regola di sottoporre le provette a trattamenti che implicherebbero cambiamenti di struttura del materiale e conseguenti alterazioni delle qualità elastiche e resistenti.

Il prelievo deve eseguirsi nelle zone dove il materiale, per la sua provenienza o per effetto della lavorazione, si presuma di qualità meno buona: ad esempio in una rotaia nella parte centrale del fungo, in una sbarra nella estremità corrispondente alla parte alta del lingotto.

Per i profilati i saggi si prelevano in genere soltanto nella direzione di laminazione, per le lamiere sia in questa direzione, sia in quella normale; per i materiali fusi si ricavano dai pezzi finiti o da appendici fuse con i pezzi stessi.

Le provette dei legnami si essicano uniformemente entro stufe a temperatura intorno a $30^{\circ} \div 40^{\circ}$, con circolazione d'aria asciutta, fino a peso praticamente costante. I saggi si lavorano poi con la sega e, sulle superfici calibrate, con la pialla e col tornio; la rifinitura si eseguisce con la lima o con la carta vetrata. È opportuno che le provette abbiano, per quanto possibile, le fibre parallele o normali alla direzione dello sforzo, e siano esenti da nodosità od altri difetti.

I saggi dei materiali lapidei si preparano mediante seghe apposite, con tagli normali o paralleli ai piani di stratificazione delle rocce; le faccie dei tagli vengono quindi spianate e talvolta tirate a pulimento con mole e lucidatrici.

I saggi di conglomerato cementizio si isolano talvolta da pezzi di maggiori dimensioni con gli stessi mezzi usati per le pietre naturali; più spesso vengono confezionati già con la forma e le dimensioni volute.

102 — Tipi di provette.

La prova di resistenza più importante per i materiali metallici è quella di trazione. Essa viene eseguita su saggi allestiti secondo tipi unificati,

a sezione circolare o rettangolare o, eccezionalmente, di qualsiasi altra forma; nei saggi a sezione rettangolare il rapporto fra i lati della sezione non deve essere minore di 1:4.

La provetta normale è quella tonda (fig. 97) con diametro $d = 20$ mm; la lunghezza del *tratto utile* sul quale vengono eseguite le misure, è:

$$l = 10 d = 200 \text{ mm nella provetta normale lunga,}$$

$$l = 5 d = 100 \text{ » » » normale corta.}$$

La *provetta proporzionale* può avere sezione di forma ed area qualsiasi; la lunghezza del suo tratto utile si stabilisce calcolando il diametro d della sezione circolare avente area A equivalente a quella della

sezione effettiva e facendo:

$$l = 10 d = 11,3 \sqrt{A}$$

per la provetta lunga,

$$l = 5 d = 5,65 \sqrt{A}$$

per la corta.

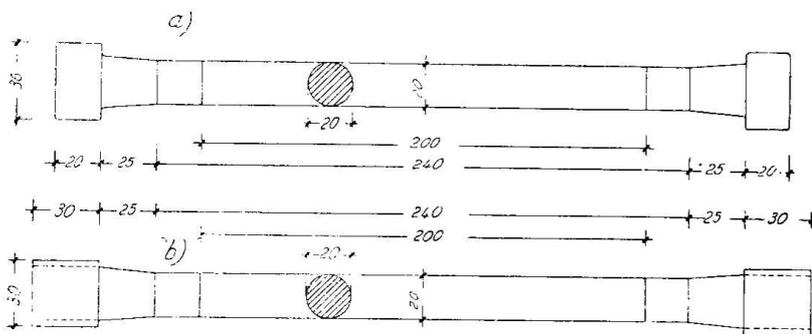


Fig. 97

La lunghezza del tratto prismatico si fa $l_1 = l + 2d$ per le provette tonde $l_1 = l + 2b$ — essendo b la massima dimensione nella sezione — per le altre.

Le teste delle provette tonde devono essere raccordate a tronco di cono al tratto cilindrico: possono essere lisce (fig. 97, a) — in tal caso vengono assicurate alle staffe della macchina mediante ghiera spaccate — oppure filettate, una a filetto sinistro, l'altra a filetto destro (fig. 97, b). Le provette a sezione rettangolare sono in generale munite di teste piatte,

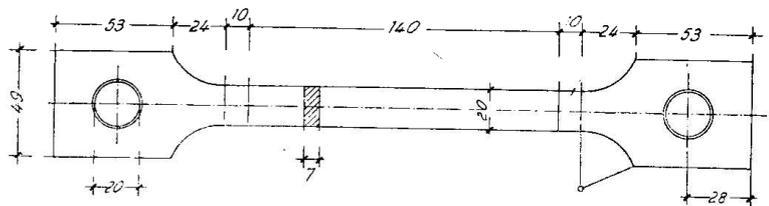


Fig. 98

raccordate ad arco di cerchio al tratto centrale, e vengono prese con cunei oppure con perni passanti entro appositi fori (fig. 98).

Per prove speditive spesso si sperimentano a trazione tronchi di barre tonde, piatte o di altra sezione, prendendoli nella macchina senza alcuna preventiva preparazione. Le misure vengono sempre effettuate su tratto utile di lunghezza pari a $11,3 \sqrt{A}$ oppure a $5,65 \sqrt{A}$.

Per la ghisa i saggi si ricavano da apposite appendici dei getti, di spessore non superiore a 30 mm, o da barrette del diametro di 30 mm colate a parte o, infine, direttamente dai getti. Le provette vengono tornite al diametro di 24 mm e completate da una strozzatura centrale della lunghezza di 22 mm, formata per 6 mm da un tratto cilindrico di 20 mm di diametro, e per la rimanenza da due raccordi simmetrici ad arco di cerchio con raggio di 20 mm (fig. 99).

I saggi per prove a trazione di legnami hanno generalmente le fibre disposte nel senso del loro asse; la sezione è per lo più rettangolare, talvolta anche circolare.

Maggiore importanza presenta la forma dei saggi nelle prove a compressione. Le faccie destinate a venire in contatto con le piastre della macchina devono essere perfettamente parallele; le provette devono essere poi sufficientemente corte da escludere fenomeni secondari che darebbero luogo ad alterazioni notevoli dei risultati.

Generalmente i saggi per prove di compressione sono cubici, più di rado cilindrici con altezza uguale al diametro della sezione retta. Per prove di elasticità l'altezza si tiene pari a tre volte il lato del quadrato o il diametro del cerchio sezione retta del saggio.

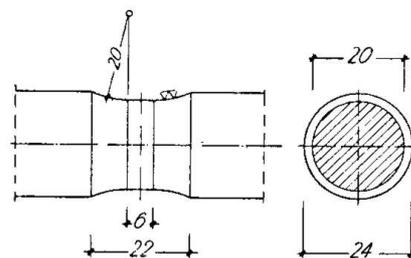


Fig. 99

103 — Diagrammi di deformazione. Classificazione dei materiali.

Un preciso giudizio sulle qualità elastiche e resistenti del saggio sperimentato si ottiene dall'esame del *diagramma di deformazione*, che a volte viene tracciato automaticamente da un apparecchio annesso alla macchina di prova. Tale diagramma ha per ordinate il carico sul saggio, per ascisse un'opportuna caratteristica della deformazione di questo: per lo più la variazione di lunghezza nelle prove a trazione ed a compressione, la freccia d'inflexione nelle prove a flessione, la rotazione relativa delle teste nelle prove a torsione.

L'esame del diagramma di deformazione permette di classificare i materiali nelle seguenti categorie: *duttili*, *vetrosi* e *plastici*.

Alla prima categoria appartiene la maggior parte dei materiali metallici, il cui comportamento nelle prove di trazione o di compressione risulta caratterizzato dai fenomeni seguenti:

periodo di piccole deformazioni, pressochè coincidente col periodo elastico convenzionale;

periodo di snervamento;

periodo delle grandi deformazioni.

Supposto trattarsi d'una esperienza di trazione o di compressione, le ascisse del diagramma rappresentano le variazioni di lunghezza Δl del saggio, e le ordinate i valori N del carico (fig. 100). In corrispondenza di un certo punto P del diagramma termina il cosiddetto periodo di proporzionalità; l'ordinata N_p di questo punto misura il *carico limite di proporzionalità*, ossia quello al disotto del quale le deformazioni variano linearmente col carico e si annullano con esso. Entro questo periodo è prati-

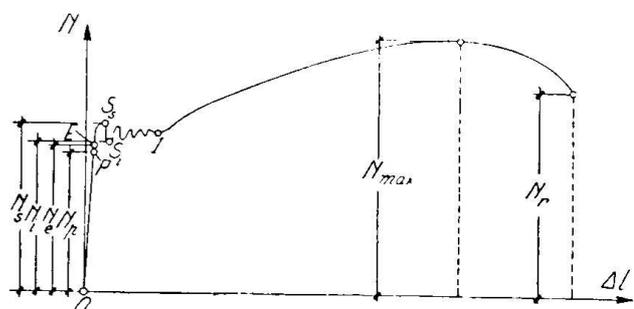


Fig. 100

camente verificata la legge enunciata fin dal 1676 da Roberto Hooke: *ut tensio sic vis*. Le fibre del saggio parallele all'asse subiscono tutte la medesima dilatazione, la quale, in accordo con la terza delle (153) è in rapporto costante con la tensione $\sigma = N/A$. Trasversalmente il saggio si contrae se la forza N è di

trazione, si dilata nel caso opposto; in ogni caso anche la dilatazione trasversale è in rapporto costante con la dilatazione longitudinale, e ciò conformemente alle prime due delle (153).

Restano così convalidate le leggi di elasticità a suo tempo dedotte per i solidi omogenei ed isotropi, nonchè la sovrapponibilità degli effetti, di cui l'accennata proporzionalità rappresenta un caso particolare.

Il periodo delle piccole deformazioni termina in corrispondenza di un certo punto E del diagramma, la cui ordinata N_e misura il *carico limite di elasticità*. Se la sollecitazione si annulla prima che abbia oltrepassato tale carico, la deformazione che si era prodotta svanisce integralmente rivelandosi così totalmente elastica; essa però non dipende più linearmente dal carico, almeno da un certo punto P in poi.

Effettivamente col perfezionarsi degli strumenti di misura, si riscontrano scostamenti dalla legge di Hooke e deformazioni permanenti sotto carichi sempre più bassi, sicchè la definizione dei suddetti carichi limiti presenta tutte le incertezze delle definizioni fatte muovendo da criteri soggettivi. Comunemente *il limite pratico o apparente di elasticità si sta-*

bilisce alla tensione per cui la deformazione permanente nella prova di trazione semplice raggiunge il 0,02 % della lunghezza iniziale del tratto su cui viene effettuata la misura.

Per gli usuali acciai da costruzione tale limite è compreso fra 1,9 e 2,2 t/cm². A scanso di erronei apprezzamenti si deve però avvertire che esso può riuscire notevolmente più elevato se il saggio su cui vien eseguita la determinazione sia stato precedentemente assoggettato a successioni di carico e scarico.

Il limite di proporzionalità dei materiali ferrosi non differisce sensibilmente da quello d'elasticità, però la determinazione ne è più agevole, in quanto non richiede successioni di carico e scarico, che, come si è osservato, modificano le proprietà del materiale.

Aumentando la sollecitazione, gli allungamenti prendono a crescere in proporzione maggiore dei carichi; il diagramma di deformazione, che fino al punto *P* si era conservato rettilineo, s'incurva volgendo la concavità verso l'asse delle ascisse, finchè viene raggiunto il *periodo di snervamento*.

Questo periodo, assai breve, si palesa all'inizio con un brusco incremento della deformazione, accompagnato da una diminuzione pure brusca del carico; quindi ha luogo un ulteriore aumento di deformazione sotto un carico sensibilmente costante.

Veramente si dovrebbe distinguere un carico di snervamento superiore N_s da un carico di snervamento inferiore N_i , ma i corrispondenti punti S_s ed S_i del diagramma di deformazione sono sempre molto vicini, mentre per talune varietà di materiali duttili è praticamente impossibile distinguerli in modo netto. Si ritiene perciò in generale che il periodo di snervamento si riduca a un sol punto del diagramma, la cui ordinata viene detta senz'altro *carico di snervamento*. Per altri materiali non si riscontra alcuna singolarità nel diagramma: la dilatazione del saggio si compie in modo continuo. In tal caso si suole sostituire al *limite di snervamento* il cosiddetto *limite 0,2* rappresentato dalla *tensione capace di produrre un allungamento permanente del saggio pari al 0,2% della lunghezza primitiva*.

Il periodo di prova limitato nel diagramma dal punto *E* (termine del periodo elastico) e dal punto *I* (termine del tratto di ordinata costante dopo lo snervamento), viene detto *periodo plastico*.

Poco dopo lo snervamento s'inizia il cosiddetto *incrudimento* del saggio: la resistenza manifesta una certa ripresa ed il carico torna ad aumentare; ma le dilatazioni cominciano a crescere in proporzione note-

volissima. Nelle prove di trazione, l'allungamento, che dapprima appariva uniforme su tutta la lunghezza del saggio, si localizza, dando luogo ad una strozzatura; questa determina un indebolimento sempre maggiore fintantochè, sotto un carico N_r , generalmente inferiore a quello massimo, il saggio si rompe. Nelle prove di compressione, il saggio si schiaccia assumendo un rigonfiamento più o meno localizzato, secondo l'entità dell'attrito fra le piastre della macchina e le superfici premute, ma non ha luogo una vera e propria rottura con separazione di parti.

* * *

Assai diversi da quello sopradescritto sono i diagrammi di deformazione dei corpi vetrosi e di quelli plastici. Nei primi il periodo di proporzionalità si estende fin quasi alla rottura (fig. 101, *a*), alla quale si perviene bruscamente, con deformazioni permanenti assai piccole o addirittura inapprezzabili. I secondi (fig. 101, *b*) si allontanano notevolmente dalla

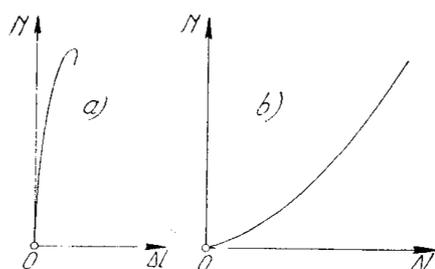


Fig. 101

legge di Hooke e accusano forti deformazioni permanenti già per carichi moderatissimi; nei corpi plastici le successioni di carico e scarico agiscono però nel senso di ridurre la parte non elastica delle deformazioni.

Spesso in luogo dei diagrammi *sforzi-allungamenti* ($N, \Delta l$), si considerano i diagrammi *tensioni-dilatazioni* (σ, ϵ), sostituendo ai carichi N le tensioni $\sigma = N/A_0$, agli allungamenti Δl le dilatazioni $\epsilon = \Delta l/l_0$, essendo A_0 ed l_0 rispettivamente l'area della sezione e la lunghezza iniziale del tratto utile del saggio. Tale sostituzione è però accettabile soltanto in via convenzionale, perchè essa conduce a trascurare l'influenza della strizione e presuppone che lo sforzo si ripartisca uniformemente sulla sezione del saggio, il che può ammettersi soltanto in via di approssimazione. Naturalmente l'errore che si commette non ha influenza sensibile se le considerazioni si limitano al periodo di prova che precede le grandi deformazioni, oppure se il diagramma si riferisce ad un corpo vetroso,

104 — Caratteristiche che si desumono da una prova di trazione.

Nelle ordinarie prove a trazione vengono determinati usualmente le seguenti caratteristiche:

resistenza massima,
tipo di rottura,
allungamento percentuale di rottura,
contrazione o strizione percentuale di rottura.

Meno frequenti sono le determinazioni delle seguenti altre :

carico di snervamento,
carico limite di elasticità,
modulo di elasticità normale E.

La resistenza massima è la tensione corrispondente al carico massimo, riferita alla sezione originaria del saggio.

Essa è praticamente indipendente dalle dimensioni del saggio; il suo valore diminuisce tuttavia leggermente al crescere della sezione resistente. Nelle provette cortissime, con teste relativamente grandi, la resistenza aumenta invece notevolmente al diminuire della lunghezza del tratto utile, ciò che l'esperienza porta ad attribuire all'ostacolo che le teste oppongono alla contrazione laterale. Di qualche influenza appare anche la *forma* della sezione trasversale della provetta.

Il tipo e l'aspetto della superficie di rottura dipendono dalle caratteristiche del materiale, e vi influiscono pure le modalità con cui è stata eseguita l'esperienza.

Nei materiali duttili è frequentissima la rottura a forma d'*imbuto tronco conico* (figura 102, a), meno frequente quella ad *imbuto* (fig. 102, b), rara la *rottura ad anello* (figura 102, c); quest'ultima ha luogo soltanto se la deformazione si mantiene praticamente simmetrica rispetto alla sezione dove si va formando la strizione. Nei materiali vetrosi la superficie di rottura non presenta in generale una forma caratteristica.

Le superfici di rottura possono assumere aspetti assai diversi: o sono cosparse di piccolissime cavità, e hanno allora lucentezza assai scarsa; o hanno aspetto cristallino, talora brillante sugli orli ma alquanto appannato verso il centro; o infine la superficie cosparsa di minuti risalti, si presenta come stellata. La struttura che si rende evidente sulle superficie di rottura può essere a *grana grossa* — come nelle ghise, — a *grana fina* — come negli acciai temperati, — *fibrosa lamellare* o *scagliosa*. I legnami

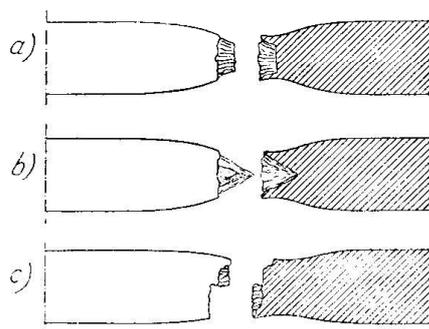


Fig. 102

presentano una struttura *scheggiata*; le pietre hanno rottura irregolari, non sempre chiaramente definibili.

Assai caratteristiche sono certe modificazioni che la rottura produce sulla superficie laterale dei saggi di certi materiali duttili. Appena superato lo snervamento cominciano a notarsi su di essa, e vanno poi mano mano completandosi fino alla rottura, due sistemi di striature, simmetrici rispetto all'asse del saggio e mutuamente inclinati di un angolo di circa 90°. Le strie, rettilinee se la provetta è piatta, avvolte ad elica se è cilindrica, sono le tracce sulla superficie laterale del saggio delle superfici interne secondo le quali si producono gli scorrimenti molecolari che precedono la rottura: esse sono dette *linee di Hartmann*, o di *Piobert*, o di *Lüders*, o anche figure di snervamento.

I saggi di alcuni materiali fucinati si scagliano in superficie; quelli di acciaio ricotto si appannano, mentre non presentano modificazioni sensibili i saggi di ghisa e quelli di acciaio temperato. Nei provini di acciaio dolcissimo, di bronzo e di rame la superficie si vena. Altre modifiche possono aver luogo sulla superficie quando vi siano inclusioni di scorie che interrompano la continuità del materiale.

L'allungamento di rottura viene misurato sul tratto utile, ossia su 20 cm per la provetta normale lunga, su 10 cm per la normale corta, su $11,3\sqrt{A}$ per la proporzionale lunga, su $5,65\sqrt{A}$ per la proporzionale corta. I coefficienti 11,3 e 5,65 vennero determinati accettando la legge di similitudine del Barba, secondo la quale l'allungamento è lo stesso per provette di forma qualunque, purchè determinato su lunghezze che stiano in un rapporto costante con le radici quadrate delle aree delle sezioni trasversali.

La misura dell'allungamento si effettua portando a contatto i due tronchi della provetta rotta e misurando per mezzo di un regolo graduato la distanza l che intercorre fra due segni che siano stati tracciati sulla provetta prima dell'esperienza onde delimitare il tratto utile l_0 . L'allungamento si esprime in percentuali della lunghezza iniziale di questo tratto, ed è quindi:

$$(364) \quad \delta = 100 \frac{l - l_0}{l_0} ;$$

anzinchè uniforme sulla lunghezza del tratto utile, esso si accentua fortemente in vicinanza della sezione di rottura. La fig. 103 rappresenta la legge di variazione della dilatazione permanente dopo la rottura per una provetta normale di acciaio dolce: l'allungamento specifico corrispondente

alla dilatazione massima risulta più che quadruplo di quello medio che si ottiene dalla (364). Ciò spiega l'importanza di specificare su quale lunghezza l'allungamento venne determinato, perchè le provette corte dànno luogo ad allungamenti percentuali notevolmente più elevati, per l'influenza più sentita che vi esercita la contrazione trasversale.

Talvolta si formano nella provetta due o più zone contratte, e perciò l'allungamento risulta alquanto maggiore del normale. Altre volte invece la rottura ha luogo in vicinanza d'un estremo del tratto utile, ed una parte cospicua dell'allungamento si produce fuori di questo, sicchè l'applicazione della (364) porterebbe ad un allungamento minore di quello che si avrebbe per una rottura in zona centrale (fig. 104). Si ovvia a tale inconveniente sostituendo alla

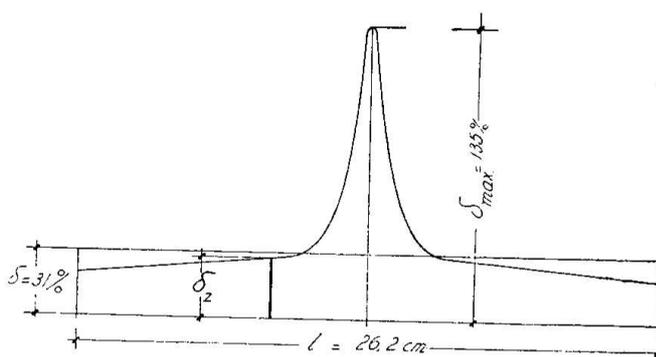


Fig. 103

lunghezza l della formula una lunghezza l_1 uguale alla distanza l' fra la traccia C che delimita il tratto utile nel tronco di provetta più corto, e la traccia N ad essa inizialmente simmetrica rispetto alla sezione ove poi si è prodotta la rottura, aumentata del doppio della lunghezza $l'' = \overline{MN}$ che inizialmente era una metà del segmento \overline{SN} . La determinazione dei

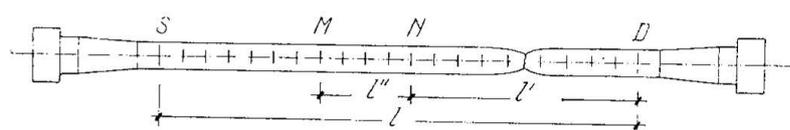


Fig. 104

punti M ed N si effettua con facilità quando si sia usata l'avvertenza di suddividere in precedenza il tratto utile in centimetri.

La sostituzione di l con l_1 torna opportuna quando la rottura

avvenga ad una distanza della mezzeria del saggio di $1/4$ della lunghezza del tratto utile; essa presuppone che la deformazione sia simmetrica rispetto alla sezione di rottura, ciò che può ammettersi in via di approssimazione, tanto più che i risultati a cui il metodo conduce concordano sensibilmente con quelli che si trovano per rottura del saggio in zona centrale.

Dal valore dell'allungamento si giudica della duttilità del materiale. In genere un materiale viene ritenuto tanto migliore quanto più elevata è la sua resistenza e quanto maggiore è l'allungamento di rottura.

In vista di ciò talora si qualificano gli acciai segnalandone il *coefficiente di qualità* di Tetmajer:

$$(365) \quad C = \sigma_R \delta,$$

prodotto dalla resistenza σ_R espressa in kg/mm^2 per l'allungamento percentuale δ , oppure quello di Wöhler-Kirkaldy:

$$(365') \quad C_1 = \sigma_R + \delta,$$

uguale alla somma delle medesime caratteristiche.

L'acciaio da costruzione contraddistinto nelle tabelle UNI con la sigla *A 37* presenta una resistenza σ_R fra 37 e 45 kg/mm^2 , un allungamento δ fra il 20 e il 35 %, e pertanto coefficienti di qualità C_1 compresi fra 57 e 80.

La strizione va pure espressa in percentuali della sezione originaria A_0 . Indicando con A l'area della sezione contratta è perciò:

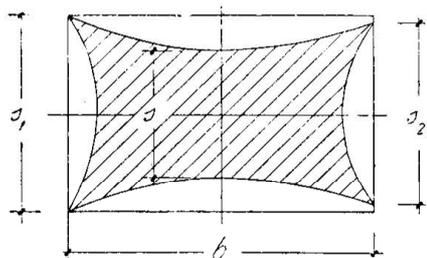


Fig. 105

$$(366) \quad \psi = 100 \frac{A_0 - A}{A_0}.$$

La determinazione di A per provette cilindriche viene fatta riguardando la sezione contratta come circolare, con diametro uguale alla media degli spessori della provetta misurati in corrispondenza di quella sezione secondo due direzioni ortogonali.

Se la sezione è rettangolare, si determina A mediante la formula di Simpson, in base alla quale, dettr s_1 , s_2 , s , gli spessori della provetta ai lembi e al centro, b la larghezza, è da porre (fig. 105):

$$(367) \quad A = \frac{b}{6} (s_1 + 4s + s_2).$$

La contrazione, come l'allungamento, è un indice della duttilità del materiale.

Il carico di snervamento viene rilevato dall'osservazione degli apparecchi dinamometrici: nelle macchine munite di bilancia a leva, la stadera subisce una caduta brusca; negli indicatori d'altro tipo la lancetta indicatrice si arresta bruscamente e in generale retrocede leggermente. Si può anche desumere il carico di snervamento dal diagramma di deformazione ricercandovi il punto in cui l'andamento accusi l'inizio delle grandi deformazioni.

Alcuni materiali presentano un decorso di prova privo di discontinuità fino alla rottura; il carico di snervamento, non essendo in tal caso definibile in modo preciso, si sostituisce con il limite 0,2 già indicato.

Il carico limite d'elasticità deve essere determinato avendo cura di non assoggettare lo stesso saggio a più d'una prova, perchè le successioni di carico e scarico modificano la caratteristica che si vuole determinare. I vari tentativi necessari per raggiungere la deformazione permanente già dichiarata, debbono dunque essere fatti su saggi diversi, tutti del medesimo materiale, cimentandoli ciascuno una volta sola. Le misure vengono eseguite mediante *estensimetri*, strumenti adatti ad apprezzare allungamenti di appena $\frac{1}{5000}$ di millimetro, come l'apparecchio a specchi di Martens.

Il funzionamento di quest'ultimo è schematicamente indicato in fig. 106. Se m ed n sono la prima e la seconda lettura effettuate col canocchiale a reticolo C sulla scala graduata G riflessa dallo specchio S ,

talchè sia $a = n - m$, dalla figura si ha subito:

$$\Delta l = h \operatorname{sen} \alpha \quad , \quad a = D \operatorname{tg} 2 \alpha .$$

Il rapporto r di moltiplicazione dello strumento, tenuto conto della piccolezza di α , vale perciò:

$$r = a : \Delta l = \frac{D \operatorname{tg} 2 \alpha}{h \operatorname{sen} \alpha} = \approx \frac{2 D}{h} .$$

Di regola le misure si effettuano simultaneamente su due generatrici opposte della provetta per compensare gli errori dovuti a possibili dissimmetrie nella distribuzione dello sforzo.

Il modulo di elasticità normale E si determina effettuando misure di

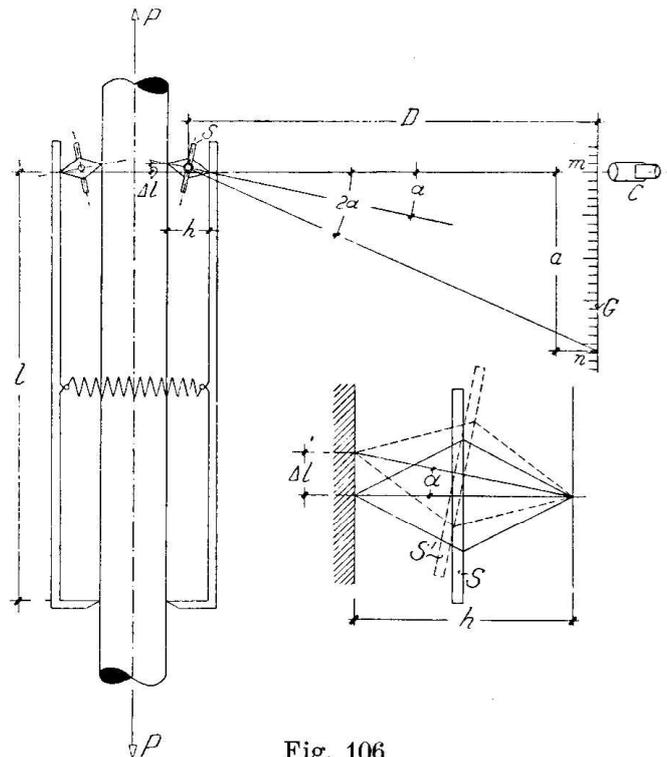


Fig. 106

precisione che vengono anch'esse eseguite con gli apparecchi ora indicati. Noto l'allungamento Δl corrispondente ad un carico N inferiore al carico limite di proporzionalità, dalla (152) si deduce:

$$(368) \quad E = \frac{N l}{\Delta l A} .$$

Il valore di E non è praticamente influenzato dalla forma e dalle dimensioni della provetta; aumenta tuttavia lievemente al crescere dell'area della sezione trasversale e per provette cilindriche è un pò maggiore che per provette piatte.

105 — Influenza della durata delle prove.

La durata della prova, specie nel periodo delle grandi deformazioni, esercita un'influenza notevole sui risultati.

L'aumento dello sforzo dovrebbe essere lentissimo se si volesse dar tempo alla deformazione di compiersi integralmente per ogni grado di carico; la resistenza ne sarebbe alquanto diminuita. Una prova rapida conduce invece ad un carico di snervamento e ad una resistenza più elevata, mentre diminuisce l'allungamento percentuale.

Nelle prove dei materiali ferrosi è prescritto che l'aumento di tensione sia di circa 1 kg/mm² al minuto secondo. La prova di trazione di una provetta normale, che ha una sezione di 314 mm², dura perciò circa mezzo minuto primo; in questo tempo il carico cresce da zero a circa dieci tonnellate.

In generale l'esperienza dimostra che lo stato di deformazione dipende non solamente dal valore attuale del carico, ma anche dalla legge temporale con cui tale valore è stato raggiunto e dalle modalità di eventuali precedenti sollecitazioni.

Ne sono tipiche dimostrazioni i fenomeni seguenti:

l'elasticità susseguente: raggiunto il carico il suo valore finale, la deformazione continua a prodursi per un certo tempo, tanto più lungo (fino a più giorni per certi materiali), quanto più elevato è il carico in rapporto al tempo occorso per la sua applicazione. Analogamente, annullando il carico che ha agito per un certo tempo, la deformazione residua va lentamente diminuendo;

l'effetto Bauschinger: una provetta cimentata oltre il limite d'elasticità

e quindi scaricata, ad una nuova operazione di carico manifesta un limite d'elasticità più grande di quello precedentemente superato. Una pausa inserita tra lo scarico ed il successivo carico produce di regola un ulteriore innalzamento di quel limite e soltanto eccezionalmente dà luogo ad una diminuzione. Se allo scarico si fa seguire l'applicazione d'un carico di segno opposto a quello che aveva agito precedentemente (per esempio compressione se prima aveva agito trazione), il limite d'elasticità si abbassa. Identiche constatazioni si fanno nei confronti del limite di snervamento.

Dell'effetto Bauschinger, che è poi il fenomeno al quale s'intende alludere quando si parla d'incrudimento del materiale, il Colonnetti dà la seguente elegante interpretazione.

Il limite d'elasticità, data l'imperfetta omogeneità del saggio, non viene raggiunto simultaneamente in tutti i punti, sicchè le successive deformazioni plastiche non sono distribuite uniformemente, nè sono più congruenti come quelle corrispondenti al regime elastico; a questo si sovrappone così uno stato di coazione che permane allo scarico con l'energia vincolata che gli è propria e con tensioni di segno opposto — per reazione — in quegli elementi che, avendo raggiunto il limite di elasticità, si sono deformati plasticamente. Una nuova sollecitazione dello stesso segno della precedente dovrà annullare le suddette autotensioni prima che il primitivo stato di tensione possa ricomparire; perchè si producano nuove deformazioni plastiche, occorrerà pertanto una sollecitazione più grande, — ciò che induce a pensare ad un innalzamento del limite d'elasticità, mentre in realtà è soltanto mutato lo stato iniziale. Se sul saggio incrudito da una ben determinata sollecitazione si fa agire la sollecitazione opposta, le tensioni di questa, anzichè sottrarsi, si sommano a quelle dello stato di autotensione. Rispetto a questa nuova sollecitazione le condizioni di resistenza sono dunque peggiorate anzichè migliorate, e il limite d'elasticità appare diminuito;

l'isteresi elastica: supponiamo di cimentare una provetta, per esempio a trazione, fino a una certa tensione σ_{\max} superiore al limite di snervamento, e quindi di effettuare lo scarico. Il corrispondente diagramma (σ, ϵ) mette in evidenza che le linee corrispondenti al carico ed allo scarico sono distinte, essendo quella relativa allo scarico spostata nel senso con cui crescono le ϵ (fig. 107, *a*). La linea corrispondente ad una fase di carico risulterebbe invece spostata in senso inverso rispetto a quella che rappresenta lo scarico precedente, e così via. Questo ritardo della

deformazione sullo sforzo prende appunto il nome di *isteresi elastica*.

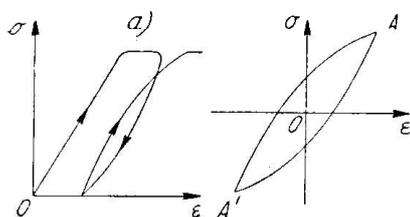


Fig. 107

Il fenomeno è anche evidente quando si fa oscillare la tensione fra due limiti uguali e di segno opposto; allora il punto (σ, ϵ) percorre un ciclo (fig. 107, b) la cui area misura il lavoro di deformazione che il saggio accumula, trasformato il calore, ad ogni alternativa di sforzo. Questo lavoro è tanto più grande, quando più avanzata è nel campo

plastico la posizione dei punti d'inversione A, A' .

106 — Caratteristiche che si desumono da una prova di compressione.

Nelle prove di compressione si misura generalmente il solo carico di schiacciamento e se ne deduce la resistenza.

L'attrito tra le due piastre della macchina ed il saggio modifica la resistenza ed altera il tipo di rottura. Per i materiali vetrosi, se l'esperienza è eseguita, come di regola, con piastre asciutte, la rottura è istantanea e fragorosa; e per il saggio cubico dà origine a due tronchi di piramide più o meno netti (fig. 108), aventi come basi maggiori le facce premute, coincidenti le basi minori, all'incirca a metà altezza del saggio. Se invece s'interpone tra il saggio e ciascuna piastra un foglio di piombo o di altro materiale cedevole, la rottura diviene graduale e silenziosa, e si produce sotto un carico notevolmente minore.

Questa differenza di risultati dipende dalle azioni tangenziali che si sviluppano sulle facce premute del saggio: dirette verso il centro, nel senso cioè di ostacolare le dilatazioni trasversali, nel primo caso: dirette in senso opposto, e perciò disgreganti, nel secondo, tanto più che, sfuggendo il materiale interposto dalla periferia dell'area compressa, il carico si concentra nella regione centrale.

Nei materiali duttili, come già si osservò, la rottura non avviene con separazione di parti: sotto carico il saggio di compressione subisce un rigonfiamento nella regione centrale, talora accompagnato da fessurazio-

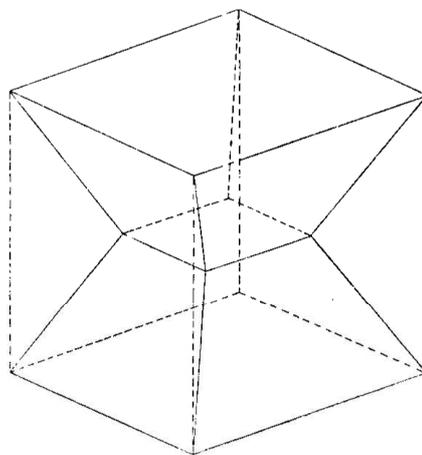


Fig. 108

ni dirette dalla superficie verso il centro. Si assume in tal caso come resistenza la tensione corrispondente al carico capace di produrre un accorciamento permanente del 0,2%.

Notevole influenza esercita sulla resistenza la forma del saggio. Il provino a sezione circolare dà risultati alquanto più elevati di quello cubico; tuttavia per *resistenza cubica* s'intende comunemente quella determinata su provini sia di forma cubica, sia di forma cilindrica, con altezza uguale al diametro dalla sezione retta.

Al crescere dell'altezza del saggio, a parità di altre dimensioni, la resistenza diminuisce perchè la rottura tende facilmente a prodursi per scorrimento di una parte sull'altra secondo un'unico piano inclinato.

107 — Prove di flessione.

La sollecitazione a flessione pura si ottiene mediante uno dei due dispositivi di prova equivalenti indicati in figura 109; nel tratto centrale del saggio (generalmente prismatico a sezione rettangolare quadrata o circolare), le caratteristiche della sollecitazione si riducono al momento flettente costante $M = Pa$. La disposizione, pure talvolta usata, di un unico carico applicato al centro del saggio, deve essere possibilmente evitata, perchè in essa al momento flettente, variabile da sezione a sezione, si accompagna una forza tagliante, la cui influenza non è sempre trascurabile sui risultati.

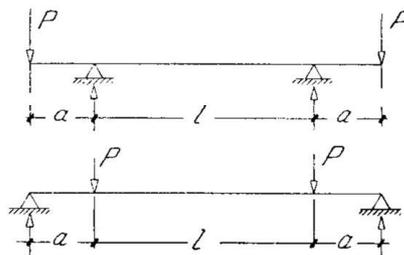


Fig. 109

I coltelli mediante i quali si produce l'inflessione non devono impedire le variazioni di lunghezza del saggio, nè comunque ostacolarne le deformazioni durante tutto il decorso dell'esperienza; per questo motivo sono costituiti da rulli girevoli intorno al proprio asse.

Nelle prove di flessione si determinano in via normale:

il *momento flettente di rottura*:

$$(369) \quad M_r = P_r a;$$

la *tensione ideale di rottura*:

$$(370) \quad \sigma_r = \frac{M_r}{W}$$

calcolata nella ipotesi, certamente non verificata, che la legge di Hooke sia valida fino alla rottura;

la *freccia d'inflexione*, ossia la saetta dell'arco circolare con cui coincide la linea elastica nel tratto di saggio di lunghezza l (fig. 110), di cui si effettua la misura per mezzo di apparecchi detti *flessimetri*.

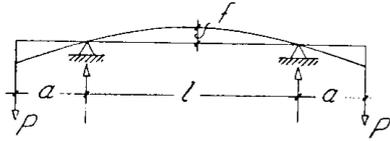


Fig. 110

Dalla freccia f , misurata nel periodo di proporzionalità, si può risalire facilmente al modulo d'elasticità normale E . Detto r il raggio della linea elastica, trascurando per la sua piccolezza il quadrato di f , si ha infatti:

$$(371) \quad r = \frac{l^2}{8f};$$

d'onde, ricordando la (169):

$$(372) \quad E = \frac{1}{8} \frac{M}{J} \frac{l^2}{f}.$$

Ancora più facilmente e in modo più preciso si può effettuare la determinazione del modulo di Young quando si disponga di un *clinometro*, strumento capace di rilevare variazioni angolari dell'ordine di grandezza di qualche minuto primo. In tal caso misurando la rotazione α che nella deformazione subisce una certa sezione retta S del saggio, scelta nel tratto centrale alla distanza ζ dalla mezzeria (fig. 111), avremo $r = \zeta/\alpha$, e ancora con riguardo alla (169):

$$(373) \quad E = \frac{M}{J} \frac{\zeta}{\alpha}.$$

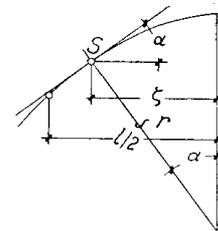


Fig. 111

Le qualità f ed α che compaiono nelle precedenti espressioni si misurano con maggiore facilità di quelle necessarie per dedurre il modulo da esperienze di trazione o di compressione.

108 — Altre prove sui materiali da costruzione.

Tra le numerose altre esperienze sui materiali da costruzione, accenneremo alle seguenti:

prove a torsione, con le quali si determinano il momento torcente sotto il quale si produce la *rottura*, quelli limiti d'elasticità o di proporzionalità, e se ne deducono le tensioni tangenziali massime corrispondenti; esse offrono pure il mezzo migliore per determinare il modulo di elasticità tangenziale G .

Per quest'ultima determinazione si opera in generale su provette a sezione circolare, misurando la rotazione relativa ϑ tra due sezioni situate alla distanza z , prodotta da un dato momento torcente M_o ; applicando la (209), si ha:

$$(374) \quad G = \frac{M_o}{J_o} \frac{z}{\vartheta},$$

espressione in tutto analoga alla (373).

Nelle prove a torsione dei fili, oltre che assoggettato a torsione crescente fino alla rottura, il saggio viene teso con uno sforzo invariabile pari a 1/10 del carico di rottura per trazione: in queste condizioni si misura il numero dei giri necessari per produrre la rottura del filo, e se ne trae giudizio sulla duttilità ed omogeneità del materiale;

prove di piegamento su fili, con le quali il filo, assoggettato ad una trazione diversa a seconda del diametro, viene stretto tra due sagome simmetriche ed alternativamente piegato su di esse fino a produrre la rottura. Il numero dei piegamenti che il saggio subisce prima di rompersi, fornisce anche qui un giudizio sulla duttilità del materiale;

prove di durezza: l'indice usuale di durezza si deduce per mezzo della *prova Brinell*, in funzione del diametro d dell'impronta a cui dà luogo una sfera d'acciaio di diametro D assegnato, quando venga premuta in una certa misura e per un tempo determinato su di un tratto spianato del saggio (fig. 112).

Il diametro della sfera e la pressione di usarsi per i materiali metallici sono stabiliti come segue dalle norme UNI:

Spessore del pezzo mm	Diametro sfera mm	Pressione $P = k D^2$		
		$k = 30$ Ghisa-Acciaio kg	$k = 10$ Bronzo-Ottone kg	$k = 25$ Metalli dolci kg
> 6	10	3000	1000	250
3 ÷ 6	5	750	250	62,5
< 3	2,5	187,5	62,5	15,6

In tutti i casi il valore P viene raggiunto in 15'' e mantenuto per 30'.

Il diametro dell'impronta si ottiene come media tra due diametri ortogonali, di cui si effettua la misura col microscopio a reticolo o con altri strumenti che permettano di apprezzare il centesimo di millimetro.

L'indice di durezza Brinell, da desumersi come valore medio di almeno due prove, è espresso dal rapporto:

$$(375) \quad \Delta = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

tra la pressione totale P in chilogrammi e l'area dell'impronta espressa in millimetri quadrati, ed è fornito da apposite tabelle costruite per una estesa gradazione di valori in d .

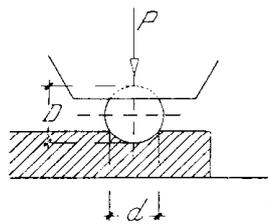


Fig. 112

Per i materiali aventi indici di durezza Brinell $\Delta > 400$, come gli acciai temperati e cementati, è particolarmente indicato il metodo Rockwell, nel quale la sfera del metodo Brinell è sostituita:

dal penetratore normale B , sferetta di acciaio durissimo di $1/16''$ di diametro, per materiali di durezza Rockwell $\Delta_R < 20$ (indice Brinell $\Delta < 200$);

dal penetratore normale C , cono di diamante con angolo di apertura di 120° e punta arrotondata ($r = 0,2$ mm), per materiali di durezza Rockwell $20 \leq \Delta_R \leq 100$. Il numero di durezza, definito dalla profondità dell'impronta, è misurato automaticamente dall'apparecchio, in corrispondenza delle scale relative ai due penetratori.

Naturalmente l'indice di durezza dipende strettamente dal procedimento con cui viene determinato. Quantunque siano assai complicate le relazioni che intercorrono tra la durezza e le caratteristiche meccaniche, esso è sensibilmente proporzionale alle resistenze a trazione ed a compressione. Per gli acciai per esempio, può ritenersi mediamente:

$$(376) \quad \sigma_R = 0,35 \Delta ;$$

prove di resilienza, che servono a valutare la tenacità dei metalli e specialmente per giudicare come questa venga modificata dai trattamenti termici. Si eseguono con dispositivi di flessione per urto su speciali provette provviste d'un intaglio affettuato colla fresa o colla limatrice in corrispondenza della mezzieria. La figura 113, a) rappresenta la provetta *Mésnager*. Il saggio, poggiato alle estremità, viene cimentato dalla parte opposta dell'intaglio.

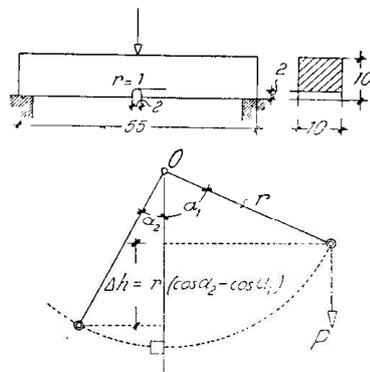


Fig. 113

La macchina più usata per tal genere di prove è il pendolo o maglio

Charpy, la cui mazza, cadendo da un'altezza prestabilita, colpisce con un suo spigolo la provetta in corrispondenza della sezione indebolita, e ne determina la rottura (fig. 113, b).

Se α_1 è l'angolo che il braccio rotante, di lunghezza r , forma con la verticale all'inizio della caduta, α_2 l'angolo di cui il braccio risale dopo aver colpito la provetta, P il peso della mazza, astraendo dagli attriti, nella rottura viene assorbito il lavoro :

$$L_r = Pr (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) .$$

Riferendo questo all'unità di area della sezione indebolita, che naturalmente è quella dove ha luogo la rottura, calcolando cioè il rapporto :

$$(377) \quad \rho = \frac{L_r}{A_i} ,$$

si ottiene la *resilienza*.

Sui risultati di queste esperienze influiscono notevolmente la grandezza e la forma della provetta, nonché la forma del coltello percuciente e la velocità di urto ;

prove ad urti ripetuti: prove dinamiche assai diverse dalle precedenti sono quelle in cui la rottura della barretta, anziché con un unico urto, viene ottenuta, in genere ancora per flessione, mediante urti ripetuti. Nelle esperienze di tal genere la provetta, a sezione circolare, viene appoggiata agli estremi ed assoggettata agli urti di un maglietto, di peso ed altezza di caduta regolabili, che la colpisce al centro, ove il saggio presenta l'indebolimento prodotto da un intaglio. Ad ogni colpo la provetta ruota in una frazione di giro, per lo più di 180° .

Quando si possiedono i risultati di numerose esperienze eseguite per una scala di valori della forza viva del maglio, naturalmente ogni volta su di una provetta diversa, il giudizio sul comportamento di un dato materiale si trae dall'esame di un diagramma avente per ascisse il numero dei colpi necessari per giungere alla rottura, e come ordinate le corrispondenti energie di caduta del maglio (fig. 114);

esami strutturali: l'analisi chimica dà norma circa la qualità e la quantità dei costituenti dei materiali metallici, ma non permette di stabilire né la ripartizione, né le modificazioni che in questa si producono per

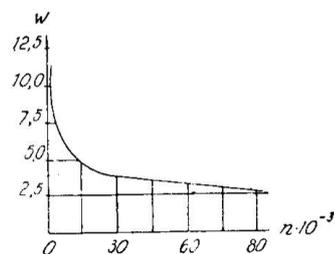


Fig. 114

effetto dei trattamenti termici e meccanici. Le ricerche per mezzo delle quali si perviene a questi accertamenti formano invece oggetto della *metallografia*. Esse si conducono su campioni con superfici perfettamente spianate e tirate a pulimento speculare, le quali, attaccate con opportuni mordenti, assumono rilievi le cui parti riflettono diversamente la luce, ovvero presentano differenti colorazioni. L'esame *macroscopico*, effettuato ad occhio nudo o con deboli ingrandimenti, permette di trarre indizi sulla ripartizione di massima dei costituenti, per esempio di accertare localizzazioni di fosforo o zolfo; l'esame *microscopico* si eseguisce con apparecchi a forte ingrandimento, i quali dànno modo di riconoscere la presenza, la forma e, se occorre, le dimensioni di tutti i componenti strutturali.
