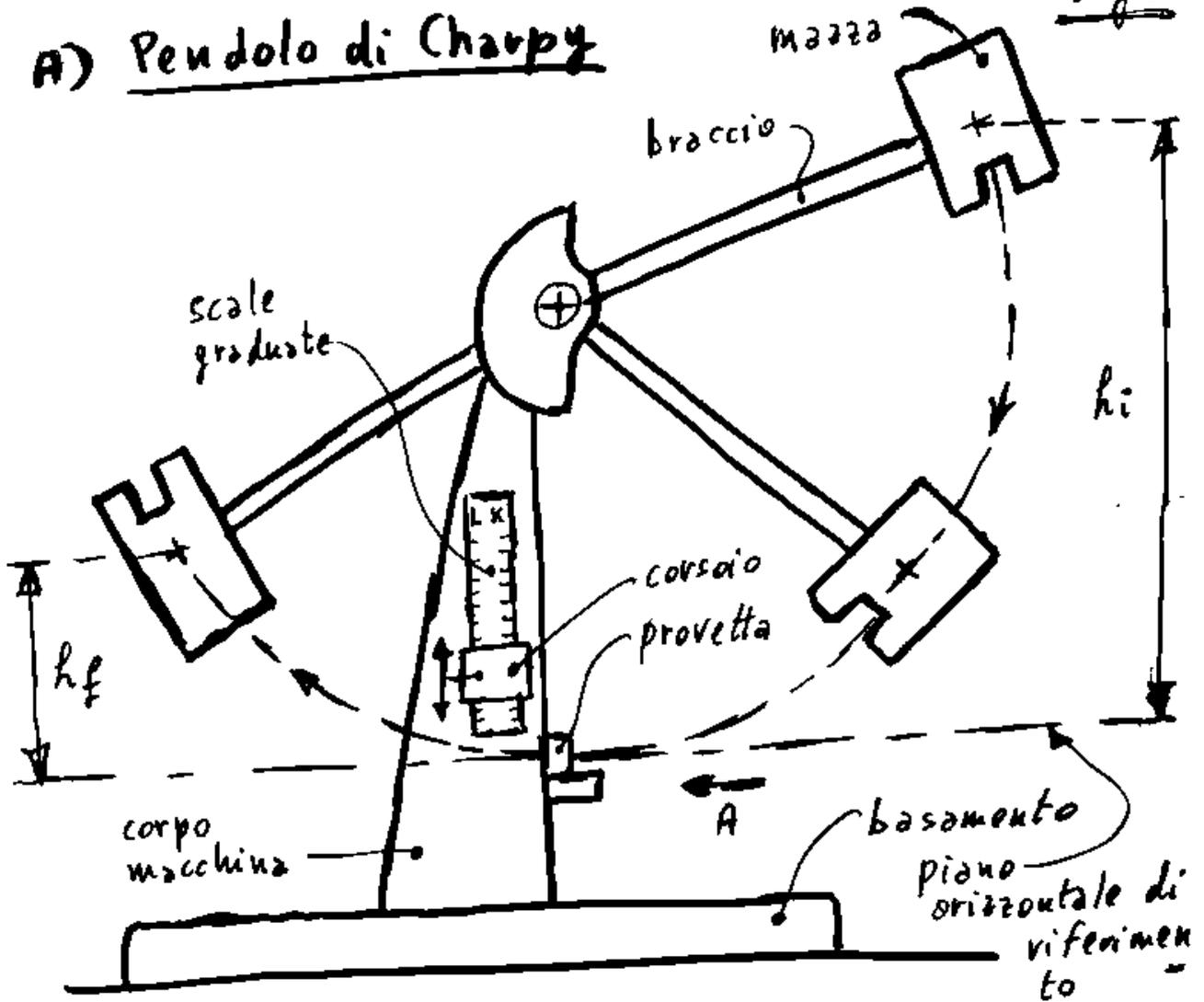


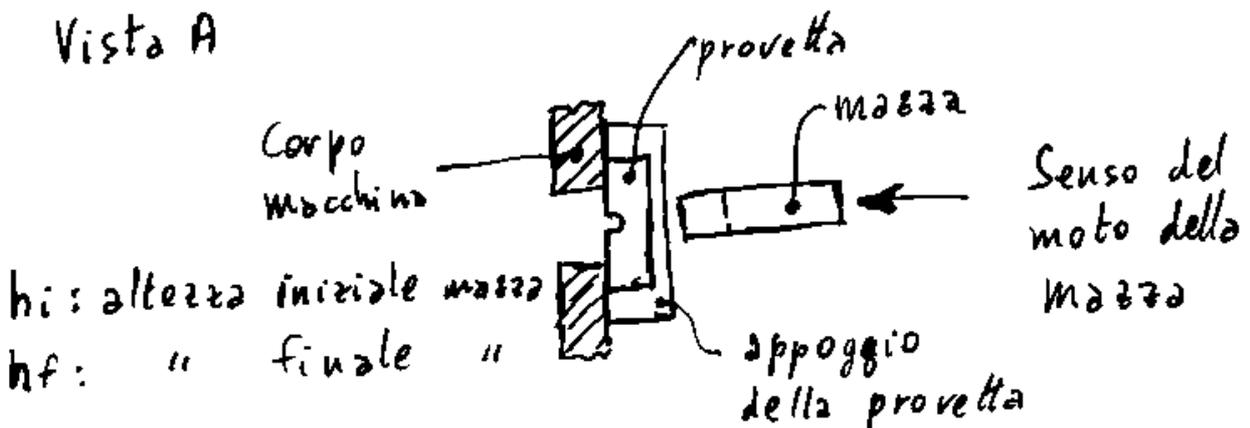
PROVE DI LABORATORIO

A) Pendolo di Charpy

Fig.2



Vista A



PROVE DI LABORATORIO

CANZONETTA ANDREA

Corsi Speciali Abilitanti per ITP
A.S. 2006/07

PREMESSA

Questo materiale che vi sto proponendo è frutto degli incontri e delle lezioni frontali tenute dall'Ing. Ordonselli Renzo, in occasione dello svolgimento dei Corsi Speciali Abilitanti presso l'I.T.I.S. "Merloni" di Fabriano

Il modulo in questione ha trattato, in maniera approfondita, le prove di laboratorio e lo studio delle proprietà dei materiali.

IL FERRO. DIAGRAMMA FERRO-CARBONIO

1. Il ferro	1
1.1. Generalità	2
1.2. Stati allotropici del ferro	2
2. Il diagramma ferro carbonio	4
2.1. Le strutture del diagramma ferro – carbonio	5
2.3. Strutture non previste nel diagramma Fe – C	7
2.4. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 0,02 ÷ 0,83%	9
2.5. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 0,83 ÷ 2,06%	10
2.6. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 2,06 ÷ 4,3%	11
2.7. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 4,3 ÷ 6,67%	12
2.8. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 6,67%	12
3. Punti critici degli acciai	13
3.1. Generalità	13
3.2. Variazione dei punti critici in base alla velocità di raffreddamento o di riscaldamento	14
3.3. Strutture che si formano con raffreddamenti via via più veloci e durezza relative.	15
4. Curve di Bain	16
4.1. Curve di Bain TTT (o di trasformazione isoterma)	16
4.2. Curve di Bain TRC o di trasformazione a raffreddamento continuo	16
4.3. Considerazioni sulle curve di Bain	16
Gli acciai	17
Acciai al carbonio. Classificazione pratica	17
Acciai speciali	17
Designazione convenzionale degli acciai (secondo UNI 5372 – 70)	17
Esempi di designazione:	20

1. Il ferro

1.1. Generalità

Il ferro è normalmente usato in lega insieme al carbonio (C) o con altri elementi come nichel (Ni), cromo (Cr), vanadio (V), tungsteno (W), ecc.

Il ferro chimicamente quasi puro si può ottenere:

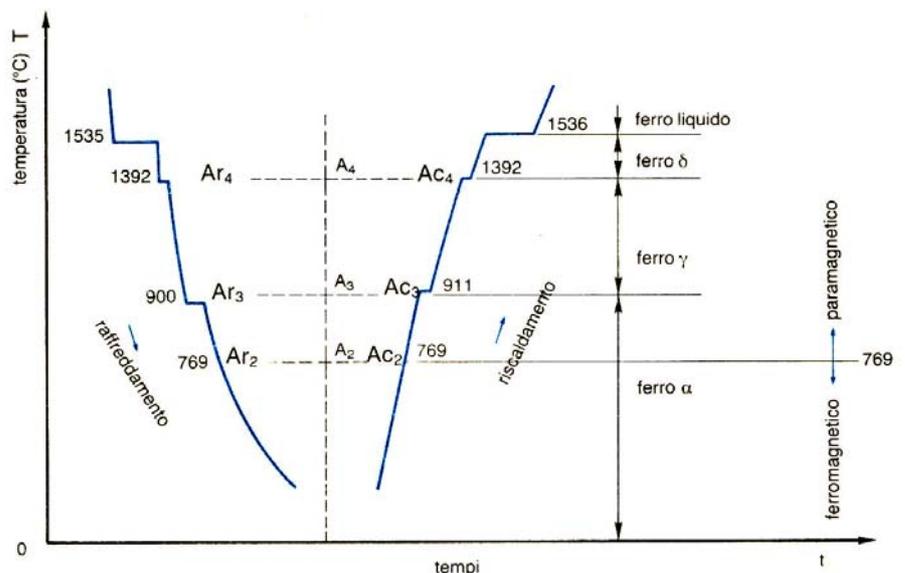
- per riduzione diretta ad alta temperatura dei suoi ossidi;
- per elettrolisi dei suoi sali disciolti.

Principali proprietà meccaniche e fisiche del ferro:

Proprietà del ferro puro		Simbolo	Valore numerico	Unità di misura
Durezza		HB	50 ÷ 80	N/mm ²
Carico unitario	al limite elastico	R _e	100 ÷ 140	N/mm ²
	di snervamento superiore	R _{eH}	80 ÷ 120	N/mm ²
		R _m	180 ÷ 250	N/mm ²
Modulo di elasticità		E	210	kN/mm ²
Allungamento		A	40 ÷ 55	%
Coeff. Percentuale di strizione		Z	70 ÷ 83	%
Massa volumica (a 20°C)		ρ	7,87	kg/dm ³
Capacità termica massica (fra 0 e 100°C)		C _{tm}	450	J/kg °C
Calore massico di fusione			268	kJ/kg
Temperatura	di fusione		1536	°C
	di ebollizione		2900	°C

1.2. Stati allotropici del ferro

Gli atomi di un metallo puro o di una lega allo stato solido sono disposti secondo un certo sistema cristallino (Cubico Corpo Centrato, Cubico Facce Centrate, ecc); alcuni elementi, però, assumono strutture cristalline diverse a seconda della temperatura alla quale si trovano e questo fenomeno è detto "allotropia".



Curve temperatura/tempi e valori della temperatura dei cambiamenti allotropici del ferro.

Il lento raffreddamento o il lento riscaldamento del ferro puro (curve temperatura/tempi sono riportate in fig.) mostrano che, a determinate temperature, il ferro emette o cede calore. Queste anomalie corrispondono a delle trasformazioni allotropiche del ferro puro.

Raffreddamento lento (dallo stato liquido)

Temperatura (°C)	Stato allotropico
1535	Il ferro solidifica in Ferro δ
1392	Da Ferro δ a Ferro γ
900	Da Ferro γ a Ferro α

Riscaldamento lento (da temperatura ambiente)

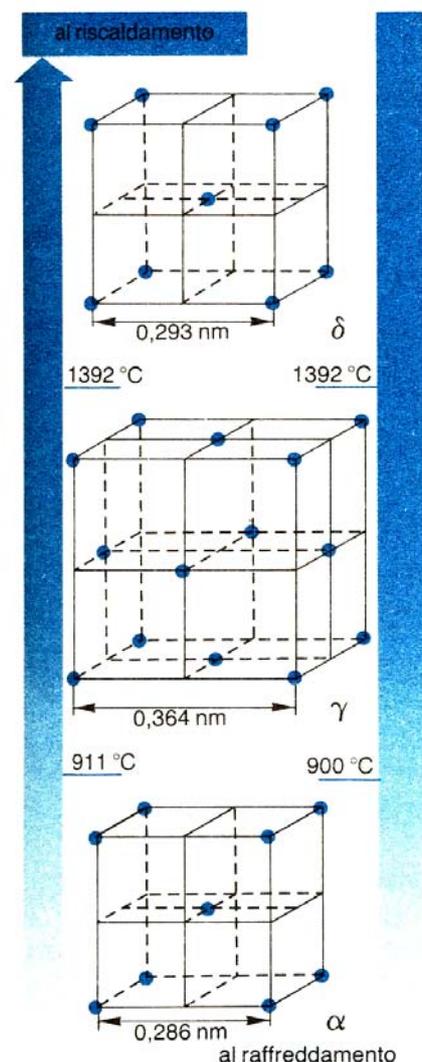
Temperatura (°C)	Stato allotropico
911	Da Ferro α a Ferro γ
1392	Da Ferro γ a Ferro δ
1536	Il ferro fonde

Gli stati allotropici sono caratterizzati da reticoli cristallini indicati nel disegno schematico a destra.

Ferro α : struttura cristallina Cubico Corpo Centrato (9 atomi: 8 atomi posizionati sui vertici più uno al centro). Il **Ferro α** sopra i 769°C da magnetico diventa paramagnetico.

Ferro γ : struttura cristallina Cubico Facce Centrate (14 atomi: 8 atomi posizionati sui vertici, 6 atomi posizionati al centro di ogni faccia).

Ferro δ : struttura cristallina Cubico Corpo Centrato (9 atomi: 8 atomi posizionati sui vertici più uno al centro); pertanto il **Ferro δ** non deve essere considerato un terzo stato allotropico vero e proprio ma semplicemente il **Ferro α** a temperatura elevata.



2. Il diagramma ferro carbonio

Il diagramma di equilibrio ferro - carbonio è, in un sistema di assi cartesiani (temperatura/composizione), un insieme di curve e segmenti che delimitano il campo di esistenza di fasi composte da ferro e carbonio.

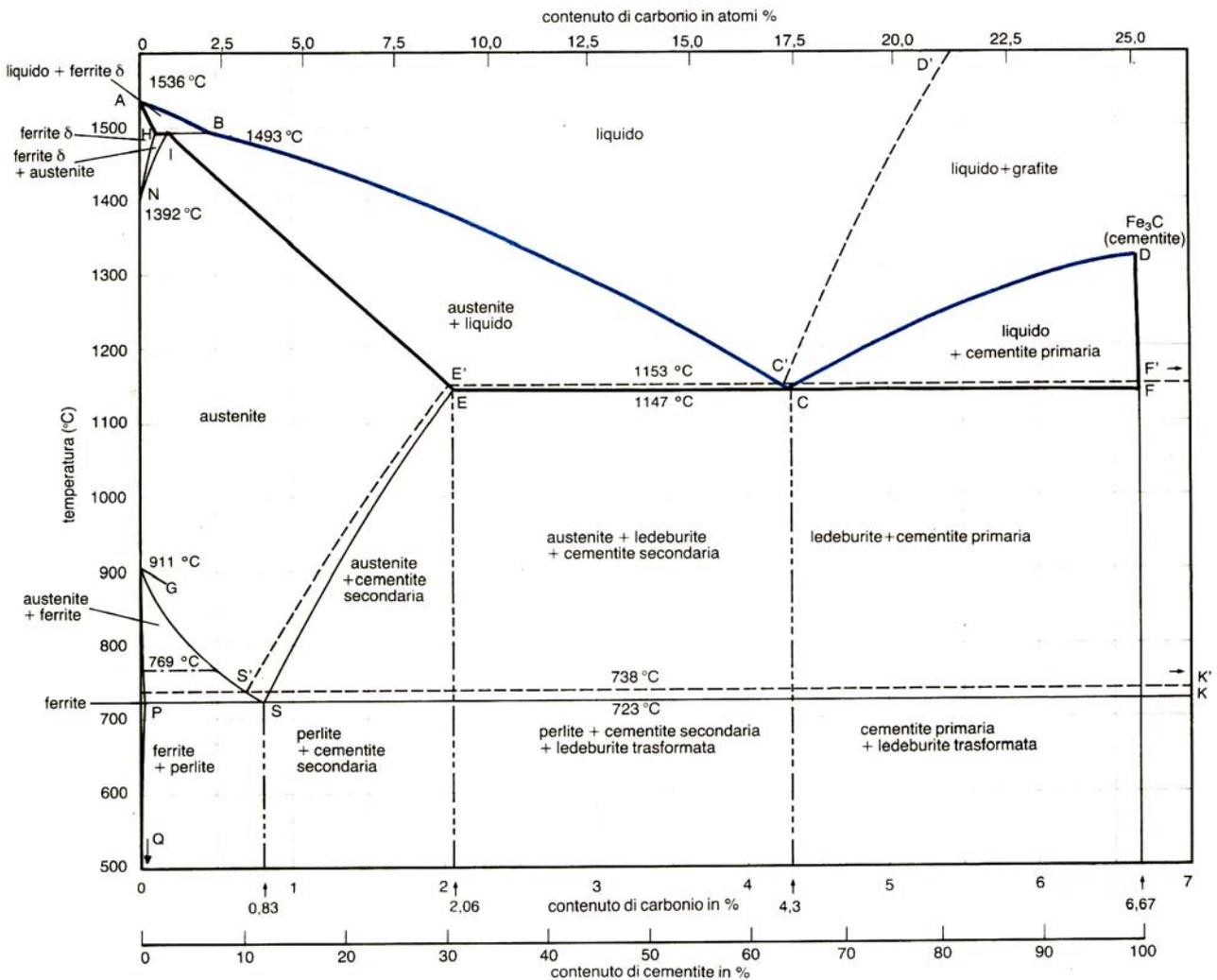


Diagramma ferro-carbonio: ----- metastabile (a cementite); - - - - stabile (a grafite)

2.1. Le strutture del diagramma ferro – carbonio

Si esamineranno le strutture che si incontrano nel diagramma ferro – carbonio “metastabile” cioè il diagramma in cui il carbonio è legato con il ferro, formando il composto intermetallico **cementite Fe_3C** , oppure è sciolto nel ferro.

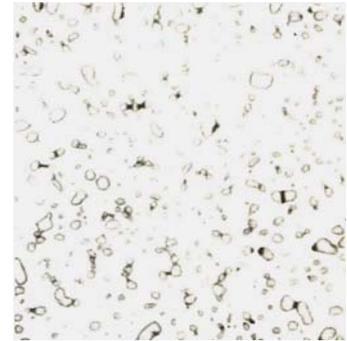
a. Cementite Fe_3C : a destra del diagramma Fe – C si ha il 100% di cementite a cui corrisponde il 6,67% di carbonio.

A questa forma cristallina conseguono proprietà meccanica completamente differenti da quelle del ferro e del carbonio:

- durezza HRC = 65;
- carico di rottura a trazione Rm = 30 N/mm²;
- allungamento A = 0%;
- resilienza KV = 0.

La cementite, secondo la sua provenienza e con riferimento al diagramma Fe – C, è denominata:

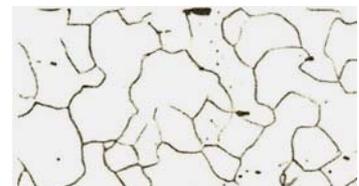
1. **cementite primaria:** quando si forma direttamente dalla fase liquida;
2. **cementite secondaria:** quando si forma dalla fase austenite;
3. **cementite terziaria:** quando si forma dalla fase ferrite α .



Microstruttura di cementite globulare in acciaio ricotto (1000x).

b. Ferrite α (e Ferrite δ): la ferrite è una soluzione solida a basso tenore di carbonio. La ferrite α (da temperatura ambiente a 911°C) non differisce, come visto, dalla ferrite δ (da 1392°C a temperatura di fusione).

- La massima soluzione di C in **ferrite δ** è rappresentata dal punto H (trasformazione **peritettica** a 1493°C) del diagramma Fe – C in cui C = 0,10%.
- La massima soluzione di C in **ferrite α** è rappresentata dal punto P (trasformazione **eutettica** a 723°C) in cui C = 0,02%.
- La ferrite è magnetica fino a 769°C

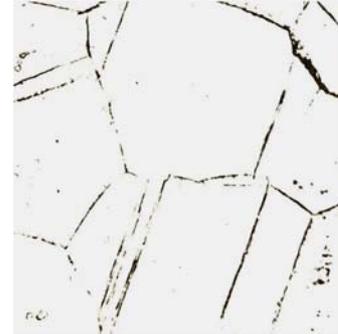


Microstruttura di ferrite. (Con attacco e 100x).

Le proprietà meccaniche sono prossime a quelle del ferro puro. Esse sono:

- durezza HRC = 70 ÷ 90;
- carico di rottura a trazione Rm = 300 N/mm²;
- allungamento A = 40%;

c. Austenite: è una soluzione solida di carbonio nel *ferro* γ . Nel diagramma Fe – C il campo di esistenza dell'austenite è racchiuso nella zona delimitata dai punti N-I-E-S-G, se ne deduce che negli acciai comuni al carbonio l'austenite non può esistere a temperatura ambiente. l'austenite a temperatura ambiente, ottenuta con raffreddamenti rapidi o con l'aggiunta di particolari elementi di alligazione, è l'unica a non essere magnetica.

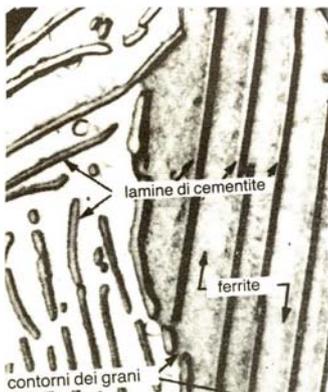


Microstruttura di austenite (500x).

Tra le proprietà meccaniche dell'austenite ricordiamo:

- durezza HRC = 180;
- carico di rottura a trazione Rm = 670 N/mm²;

d. Perlite: la perlite è un agglomerato formato da lamelle (perlite lamellare) o globuli (perlite globulare) di ferrite alternate a lamelle di cementite. Il campo di esistenza della perlite si trova al di sotto dei 723°C in corrispondenza del punto **S** a cui giunge la composizione dell'austenizzazione quando si raffredda.



Microstrutture di perlite a forte ingrandimento (2500x circa).

e. Ledeburite: è la struttura che si forma in corrispondenza del punto C. E' una struttura del tipo eutettico a lamelle o, spesso, a globuli alternati di austenite saturo (corrispondenti alla composizione del punto E) e di cementite.



Microstruttura (con attacco e 200x) formata da ledeburite (le zone punteggiate) e cementite (le macchie bianche).

2.2. Strutture non previste nel diagramma Fe – C

f. Troostite: si ottiene mediante raffreddamento discretamente veloce di un acciaio eutettoide. Si tratta di una struttura apparentemente identica alla perlite: lamelle alternate di ferrite e cementite; ma queste lamelle sono talmente piccole che per vederle sono necessari forti ingrandimenti (circa 50.000x) ottenibili solo con microscopi elettronici.

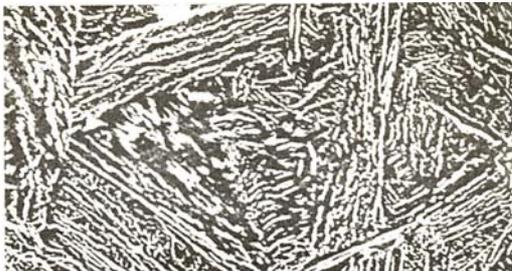
microstruttura a 800x di troostite (macchie nere) e martensite (macchie bianche)



g. Bainite: ferrite α e particelle di cementite più o meno finemente suddivise e più o meno orientate. Si distinguono:

- bainite superiore;
- bainite inferiore.

La prima si forma a temperature più elevate della seconda.



Microstruttura di bainite superiore



Microstruttura di bainite inferiore (con attacco e 1000x)

h. Martensite: struttura che si ottiene partendo dall'austenite delle leghe ferro – carbonio sulla quale si effettua un raffreddamento molto rapido. Si può definire come una soluzione soprasatura di carbonio in ferro α .

Si prenda in esame il diagramma Fe – C. Le linee G-P-Q danno, in condizioni di equilibrio, la massima percentuale del carbonio nel ferro α . Nel caso della martensite la quantità di carbonio sciolto nel ferro α è molto maggiore: in pratica ci si ritrova, a partire da 0,02% fino a 2,06% di carbonio, tutto il carbonio dell'austenite nel ferro α . Ciò avviene perché con un raffreddamento rapido dell'austenite il carbonio non riesce ad uscire dalle celle cubiche della ferrite γ per formare la cementite. L'inizio e la fine della trasformazione dell'austenite in martensite è definita rispettivamente dalle temperature caratteristiche M_s e M_f



Microstruttura di martensite (500x)

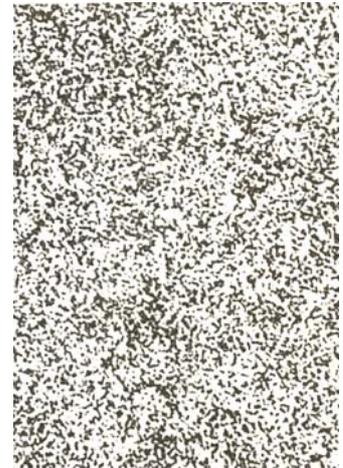
i. Austenite residua: con raffreddamento a velocità molto elevata di una struttura austenitica si ottiene martensite e una certa quantità di austenite non trasformata (denominata austenite residua). La presenza negli acciai di austenite residua produce:

- diminuzione di durezza;
- minore resistenza all'usura;
- minor stabilità dimensionale;
- aumento del limite di fatica negli stati carbocementati e temprati.

L'austenite residua può essere successivamente eliminata con un rinvenimento a bassa temperatura o media temperatura che trasforma in modo parziale o totale l'austenite residua in carburi in forma submicroscopica.

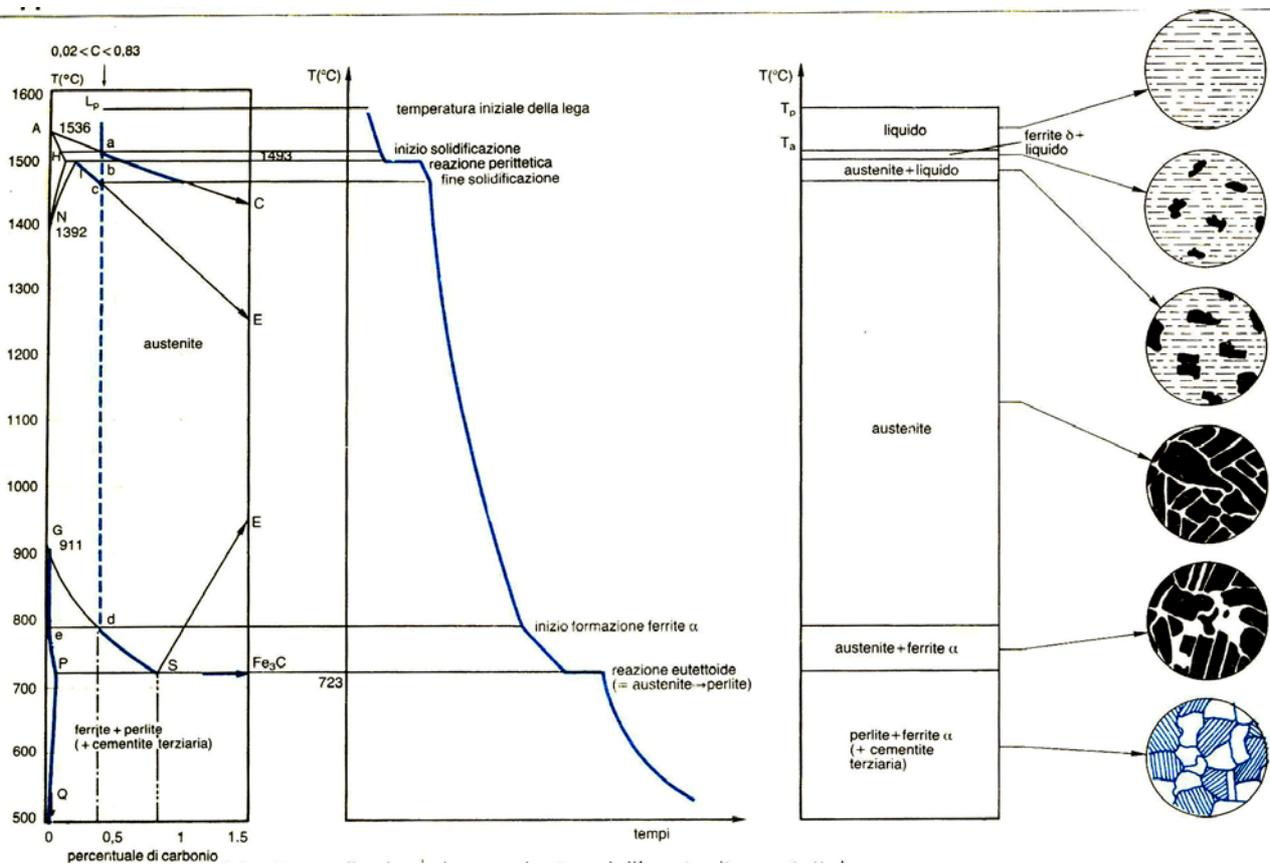
j. Sorbite: Si tratta di una struttura globulare, omogenea e molto fine; aggregato di ferrite e cementite non lamellare e privo dell'aspetto caratteristico della martensite. La si ottiene effettuando un riscaldamento della martensite a temperatura di circa 500°C.

Questa struttura ha buone proprietà meccaniche di durezza, resilienza e resistenza a trazione; essa è la struttura caratteristica degli acciai da costruzione.



*Microstruttura sorbite di un acciaio
U52NiCrMo 6 UNI 2955 temprato
(con attacco e 500x)*

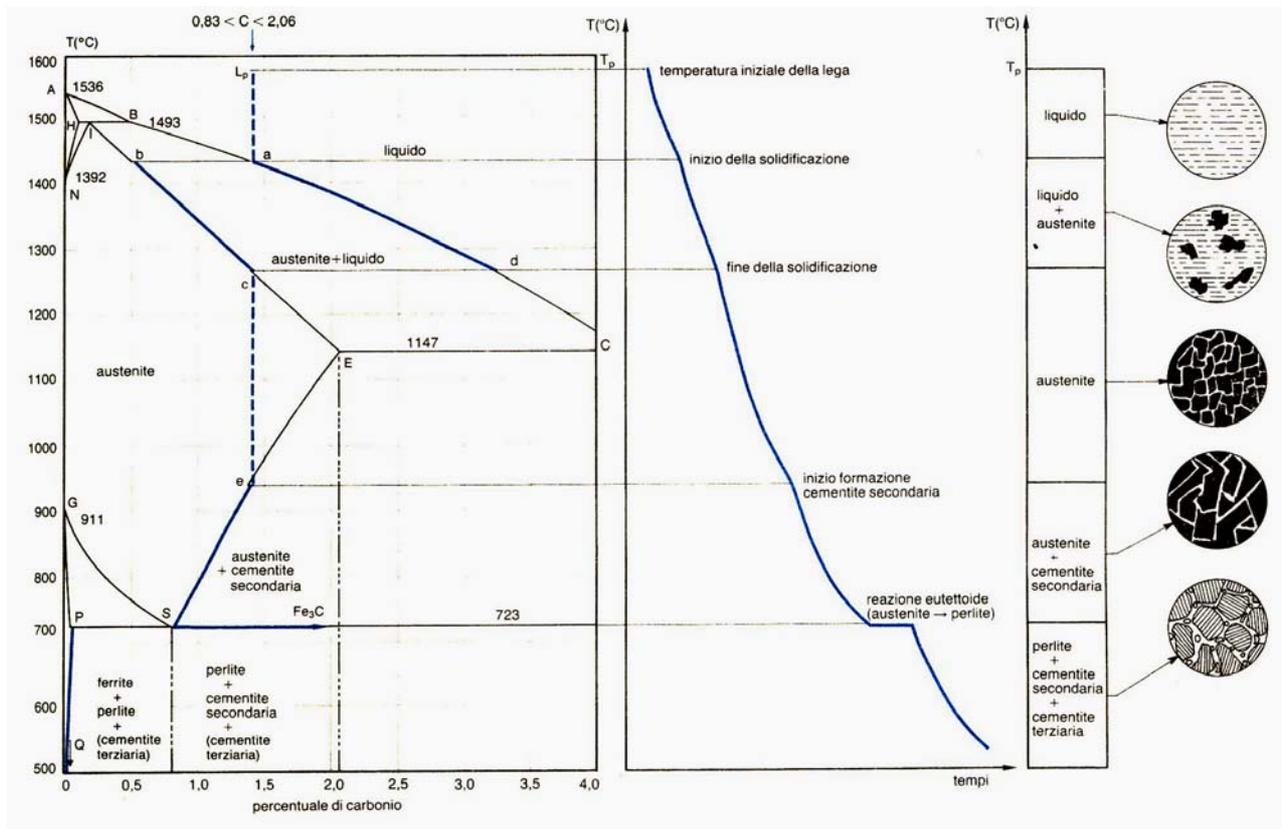
2.3. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con $C = 0,02 \div 0,83\%$



La lega in esame avendo $C < 0,83\%$ è denominato **“ipoeutettoide”** e nel raffreddamento subisce le seguenti trasformazioni:

1. Alla temperatura corrispondente al punto c (si trascuri, perché di poco interesse, quello che avviene al di sopra del punto c), la lega è composta da cristalli di austenite;
2. mediante lento raffreddamento, si arriva fino al punto d senza incontrare trasformazioni;
3. alla temperatura corrispondente al punto d inizia a formarsi dai cristalli di austenite dei cristalli di ferro α (con caratteristiche di cristallizzazione del punto e);
4. la ferrite α continua a raffreddarsi e la trasformazione segue la linea e – P;
5. l'austenite si arricchisce di carbonio seguendo la curva d – S;
6. a temperatura 723°C l'austenite inizia a trasformarsi in perlite con la struttura caratteristica lamellare a strati di cementite e ferrite α ;
7. scendendo via via al di sotto dei 723°C la ferrite α libera passa da un contenuto di carbonio dello 0,02% allo 0,0008% (curva P – Q) e quella contenuta nelle lamelle della perlite perde carbonio il quale dà origine alla cementite terziaria (non visibile al microscopio ottico).

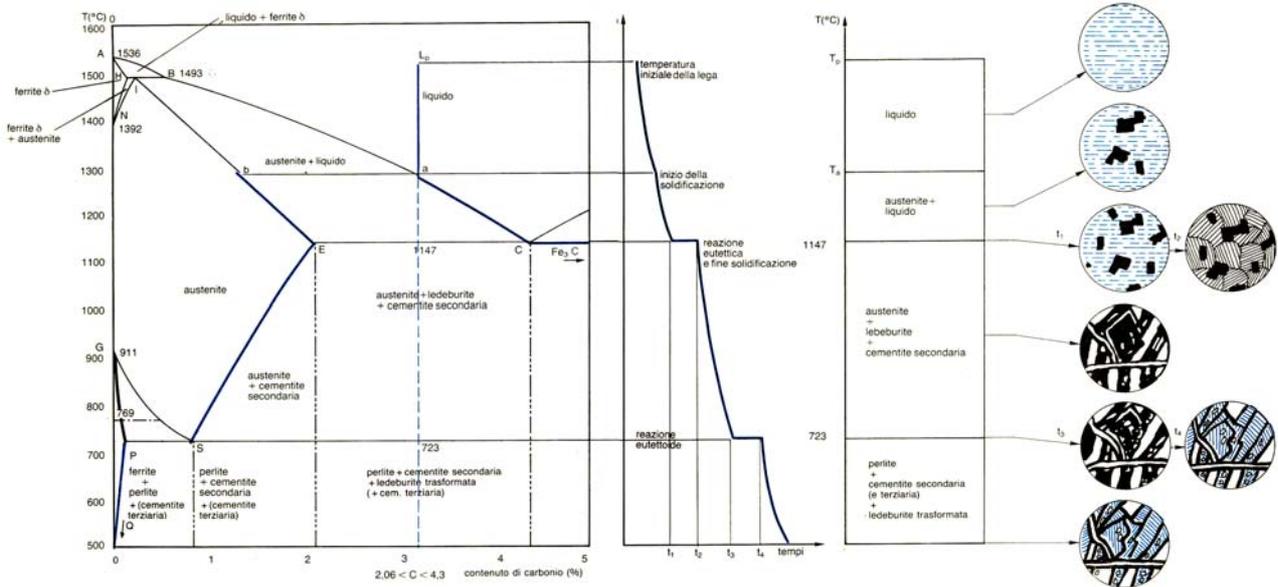
2.4. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con $C = 0,83 \div 2,06\%$



La lega in esame avente $C = 0,83 \div 2,06\%$ viene chiamata lega **“ipereutettoidi”** e durante il raffreddamento subisce le seguenti trasformazioni:

1. inizialmente la lega si trova allo stato fluido a temperatura T_p ;
2. lentamente si raffredda fino al punto **a** dove inizia la solidificazione in austenite con i primi cristalli che ha la composizione corrispondente al punto **b**;
3. il raffreddamento dei cristalli dell'austenite prosegue con le composizioni previste dalla curva **b – c** ovvero una composizione più ricca di ferro;
4. il liquido, arricchito in carbonio, segue le composizioni indicate dalla curva **a - d**
5. l'austenite solida arrivata alla temperatura indicata dal punto **c** avrà raggiunto la composizione iniziale, il carbonio dello stato liquido si sarà esaurito;
6. esaurito tutto il liquido l'austenite si raffredda senza subire trasformazioni fino al punto **e** ;
7. dal punto **e** l'austenite inizia ad emettere cristalli di cementite (secondaria) cambiando la sua composizione seguendo la curva **e – S**
8. a 723°C avviene un arresto di temperatura per un intervallo di tempo durante il quale l'austenite si trasforma in cristalli di perlite;
9. quando tutta l'austenite si è trasformata in perlite la temperatura ricomincia ad abbassarsi;
10. scendendo via via al di sotto dei 723°C la ferrite α segue l'andamento della curva **P – Q** cedendo carbonio il quale dà vita alla cementite terziaria. Quest'ultimo fenomeno è però abbastanza trascurabile.

2.5. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 2,06 ÷ 4,3%



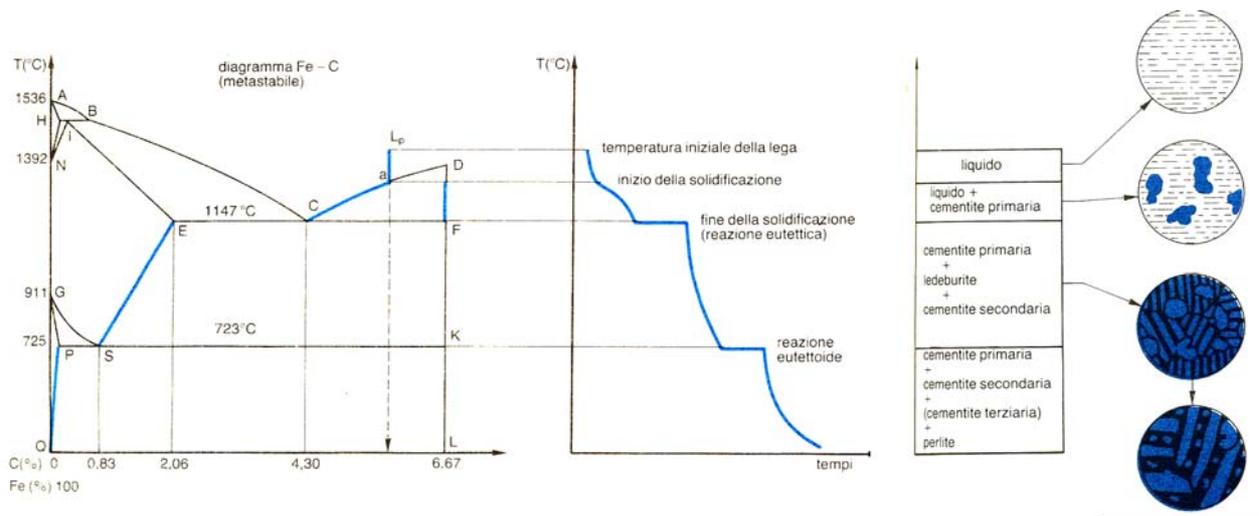
La lega in esame avente C = 2,06 ÷ 4,3% viene chiamata lega **"ipoeutettica"** e durante il raffreddamento subisce le seguenti trasformazioni:

1. inizialmente la lega si trova allo stato fluido a temperatura T_p;
2. il raffreddamento porta la lega sino al punto **a** dove iniziano a formarsi cristalli di austenite con la composizione indicata nel punto **b**;
3. l'ulteriore raffreddamento dell'austenite segue le trasformazioni previste dalla curva **b – E**;
4. il liquido in diminuzione in quantità, si arricchisce di carbonio secondo la curva **a – C**;
5. a 1147°C la temperatura si arresta; l'austenite ha la composizione prevista dal punto E (austenite satura); il liquido si trova alla composizione del punto C (composizione eutettica C=4,3%);
6. dal liquido si formano cristalli eutettici composti da lamelle di austenite satura alternata a cementite (ledeburite);
7. avvenuta la trasformazione in ledeburite la temperatura ricomincia a scendere;
8. scendendo sotto i 1147°C l'austenite satura segue le composizioni individuate dalla curva **E – S**;
9. nel raffreddamento, di cui al punto precedente, sia l'austenite satura libera che le lamelle di austenite satura contenute nella ledeburite perdono carbonio che dà origine alla cementite secondaria;
10. alla temperatura di 723°C la temperatura si arresta in quanto l'austenite inizia a trasformarsi in perlite;
11. quando tutta l'austenite si è trasformata in perlite la temperatura ricomincia a scendere;
12. scendendo via via al di sotto dei 723°C la ferrite α (della perlite) segue l'andamento della curva P – Q cedendo carbonio il quale dà vita alla cementite terziaria.

Alla fine, esaminando la lega al microscopio si nota la presenza di:

- cementite (che si è prodotta a 1147°C dal liquido per formare la ledeburite);
- cementite secondaria (proveniente dall'austenite libera e dall'austenite delle lamelle della ledeburite);
- perlite (formatasi dall'austenite libera e dalle lamelle austenitiche della ledeburite);
- cementite terziaria (formatasi dalle lamelle di ferrite α della perlite).

2.6. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 4,3 ÷ 6,67%



La lega in esame avente C = 4,3 ÷ 6,67% durante il raffreddamento subisce le seguenti trasformazioni:

1. la lega si raffredda a partire dalla temperatura indicata dal punto L_p ;
2. dal punto a inizia la solidificazione e si cominciano a separare dal liquido cristalli di cementite primaria;
3. successivamente la cementite si impoverisce di carbonio secondo la curva $a - C$;
4. al punto C la lega, oramai solidificata, cessa di emettere cementite primaria e comincia la trasformazione in ledeburite;
5. scendendo sotto i 1147°C le lamelle di austenite della ledeburite si impoveriscono di carbonio secondo la curva $E - S$;
6. quando la temperatura perviene a 723°C le lamelle di austenite della ledeburite hanno raggiunto la composizione (eutettoide) con C = 0,83% e inizia la trasformazione in perlite;
7. quando tutta l'austenite si è trasformata in perlite e la temperatura ricomincia ad abbassarsi avviene la separazione dalle lamelle di ferrite della perlite di cementite terziaria.

2.7. Trasformazioni con il raffreddamento delle leghe Fe – C con C = 6,67%

Questa lega corrisponde al composto intermetallico Fe_3C (cementite) e pertanto essa si comporta come un elemento puro.

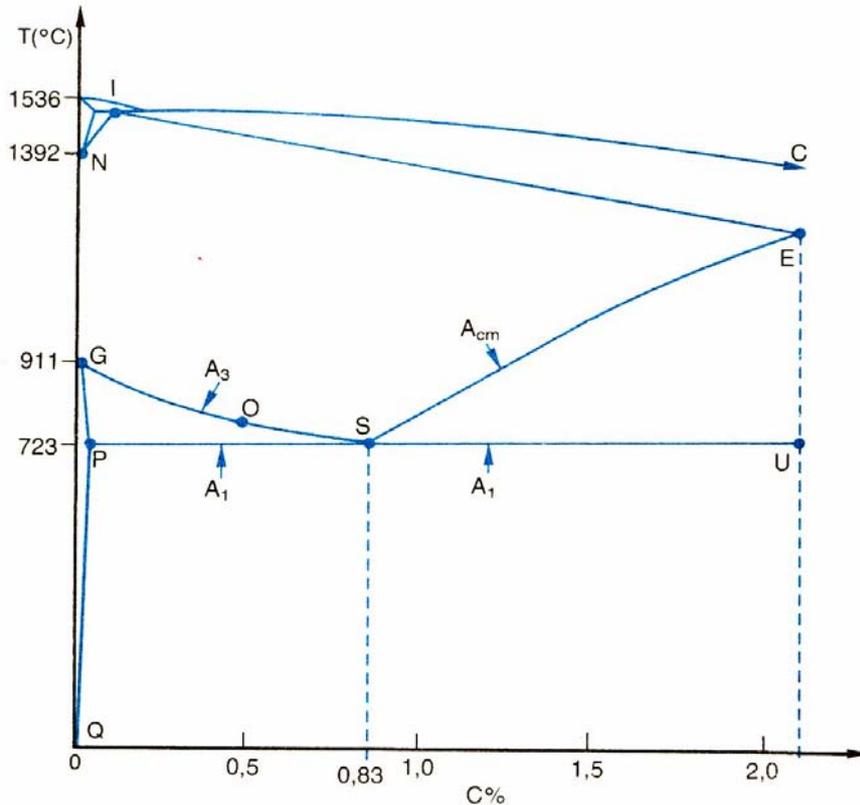
Quando nel corso del raffreddamento la lega raggiunge la temperatura corrispondente al punto D la lega inizia a solidificare; a temperatura costante si raffredda fino a temperatura ambiente senza subire trasformazioni.

3. Punti critici degli acciai

3.1. Generalità

In relazione ai trattamenti termici alcune curve del diagramma Fe – C sono molto importanti.

Per questo motivo gli studiosi hanno ritenuto utile indicarle con determinati simboli che andremo ad analizzare.



A₁: temperatura alla quale:

- **durante il raffreddamento**: l'austenite, divenuta eutettoidica (C=0,83%) si trasforma in perlite; oppure;
- **durante il riscaldamento**: la perlite si trasforma in austenite eutettoidica (C=0,83%).

Segmento P-S-U.

A₃: temperatura alla quale:

- **durante il raffreddamento**: l'austenite di un acciaio ipoeutettoide (C<0,83%) inizia ad emettere cristalli di ferrite α ;
- **durante il riscaldamento**: la struttura di un acciaio ipoeutettoide termina la trasformazione in austenite.

Curva G – S.

A_{cm}: temperatura alla quale:

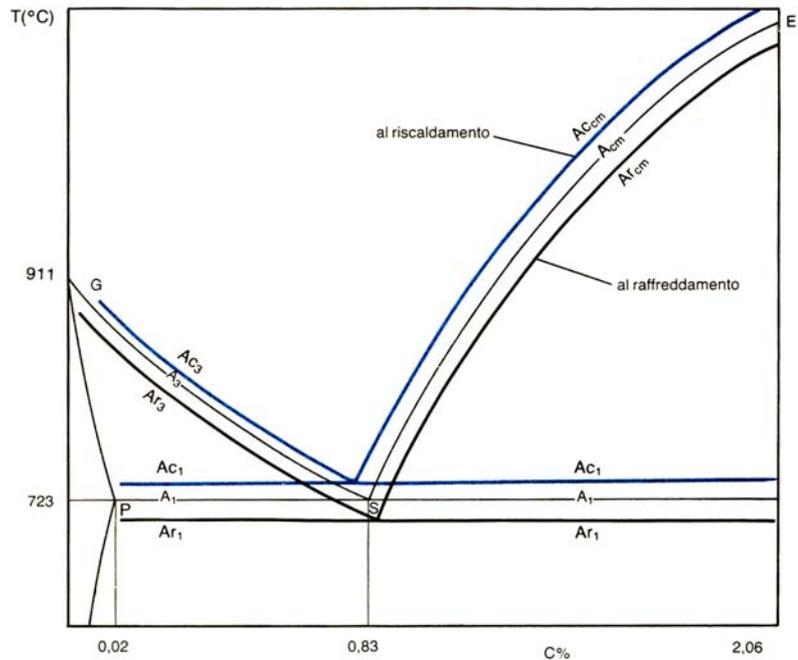
- **durante il raffreddamento**: l'austenite di un acciaio ipereutettoide (C = 2,06 ÷ 4,3%) inizia ad emettere cristalli di cementite secondaria;
- **durante il riscaldamento**: un acciaio ipereutettoide (C = 2,06 ÷ 4,3%) inizia termina la trasformazione in austenite.

Curva S – E.

3.2. Variazione dei punti critici in base alla velocità di raffreddamento o di riscaldamento

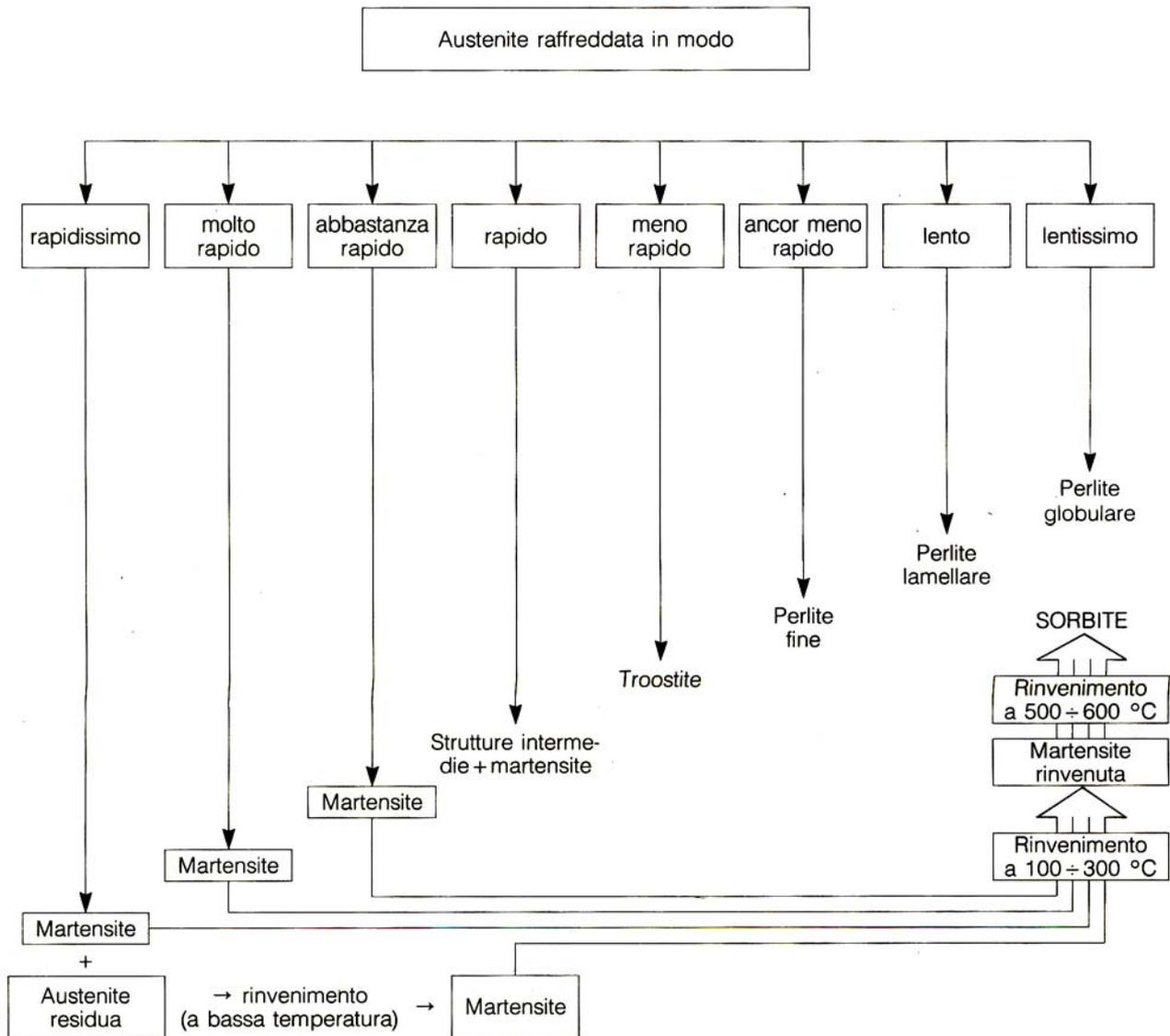
Quanto visto nei paragrafi precedenti è valido per riscaldamenti o per raffreddamenti molto lenti. Se questa condizione non è rispettata le leghe Fe – C si trasformano con velocità tanto maggiore quanto più veloce è la velocità di riscaldamento o di raffreddamento.

Nella figura sono evidenziate le variazioni dei punti critici intorno al punto S (eutettoide) in riferimento al riscaldamento e al raffreddamento rapido.



Gli studiosi per questo diverso comportamento hanno preferito attribuire simboli diversi come visibile nel grafico.

Nella figura seguente si è voluto rappresentare, in forma schematica, e per un acciaio ipoeutettoide, le variazioni dei punti critici e le strutture che si ottengono man mano che aumenta la velocità di raffreddamento. Queste strutture hanno l'interessante caratteristica che il valore della durezza va gradatamente ad aumentare.



3.3. Strutture che si formano con raffreddamenti via via più veloci e durezza relative.

Struttura	Durezza HV
Perlite globulare	150
Perlite lamellare grossolana	165
Perlite lamellare fine	290
Perlite molto fine	390
Troostite	400
Bainite superiore	420
Bainite inferiore	550
Martensite	>600 (variabile con %C)

4. Curve di Bain

Precedentemente si è visto come la velocità di raffreddamento influisce sulla formazione delle strutture finali. È noto, inoltre, come a parità di velocità di raffreddamento, si ottengano, in base alla composizione chimica del materiale, diverse strutture. Dal punto di vista pratico una rappresentazione chiara delle strutture che conseguono con ogni tipo di raffreddamento dell'austenite è data dalle curve di Bain.

4.1. Curve di Bain TTT (o di trasformazione isotermica)

Le curve di Bain TTT sono ottenute sperimentalmente e vengono riportate in un sistema di assi cartesiani in Temperatura/tempo (tempi in scala logaritmica).

Nel grafico sono riportate due curve:

- la curva di inizio della trasformazione;
- la curva di fine della trasformazione;

4.2. Curve di Bain TRC o di trasformazione a raffreddamento continuo

Gran parte dei trattamenti termici avviene con raffreddamento continuo (raffreddamenti isotermitici). Per questi trattamenti le curve di Bain TTT possono fornire solo indicazioni orientative. Per questo motivo le case produttrici di acciai si sono adoperate per la costruzione di curve di Bain con raffreddamenti continui denominate curve TRC (trasformazione a raffreddamento continuo o CCT da "Continuous Cooling Transformation").

Le curve di Bain TRC si ottengono:

- con il metodo dilatometrico;
- misurando le variazioni delle proprietà magnetiche.

4.3. Considerazioni sulle curve di Bain

Ogni acciaio ha le sue curve di Bain TTT e TRC. La presenza di elementi di alligazione ha l'effetto di:

- abbassare la temperatura M_s ;
- spostare verso destra (ovvero verso tempi maggiori) le curve di Bain (sia di inizio che di fine trasformazione)
- le curve di Bain sono state ottenute con provini molto piccoli. In realtà i trattamenti termici sono eseguiti sia su pezzi piccoli sia su pezzi grandi pertanto i risultati possono anche non rispettare quanto indicato dalle curve;
- il carbonio ha lo stesso effetto degli elementi di alligazione;
- le curve di Bain TRC non sono ancora state costruite per tutti gli acciai in commercio. Tuttavia si possono usare entro certi limiti le curve TTT anche per i trattamenti termici che prevedono raffreddamenti continui.

Gli acciai

Acciai al carbonio. Classificazione pratica

Gli acciai al carbonio sono quelle leghe di ferro e carbonio con percentuale massima del 2% di carbonio più altri elementi presenti (in percentuali molto inferiori) come residui della lavorazione.

La presenza di carbonio conferisce nell'acciaio durezza; per questo motivo nella pratica dell'officina è in uso la classificazione seguente (per i cosiddetti acciai ipoeutetoidi):

<i>Acciai al carbonio</i>	<i>C %</i>
Extradolci	< 0,15%
Dolci	0,15 ÷ 0,30%
Semiduri	0,30 ÷ 0,45%
Duri	0,45 ÷ 0,65%
Exstraduri	0,65 ÷ 0,80%

Acciai speciali

Gli acciai speciali oltre agli elementi ferro e carbonio, sempre presenti negli acciai comuni, contengono anche altri elementi in quantità tali da modificarne le proprietà.

Fra gli acciai speciali più significativi si possono menzionare:

Acciai al nichel;
Acciai al cromo;
Acciai al manganese;
Acciai al cobalto;
Acciai maraging (Ni, Co, Mo, Titanio);
Acciai inossidabili (Cr, Ni).

Designazione convenzionale degli acciai (secondo UNI 5372 – 70)

Secondo la tabella UNI 5372 – 70, di cui di seguito si riporta un riassunto, gli acciai vengono suddivisi in due grandi gruppi e successivi sottogruppi:

GRUPPO 1	
Sottogruppo 1.1	Sottogruppo 1.2
Acciai designati partendo dalle caratteristiche meccaniche	Acciai designati partendo dalle caratteristiche di impiego
GRUPPO 2	
Sottogruppo 2.1	Sottogruppo 2.2
Acciai non legati destinati al t.t.	Acciai non legati destinati ad impieghi particolari
Sottogruppo 2.3	Sottogruppo 2.4
Acciai debolmente legati e legati in cui la percentuale di ogni elemento della lega è < 5%	Acciai fortemente legati in cui la percentuale di almeno uno degli elementi leganti > = 5%

Tabella 4.7 - Quadro riassuntivo della simbologgiatura degli acciai secondo UNI 5372-70.

Suddivisione ai fini della simbologgiatura		1. Acciai designati partendo dalle loro caratteristiche meccaniche e acciai designati partendo dall'impiego		2. Acciai designati partendo dalla loro composizione chimica				
		Sottogruppo	1.1 Partendo dalle caratteristiche meccaniche	1.2 Partendo dall'impiego	Acciai non legati		Acciai debolmente legati e acciai legati	
2.1 Destinati al trattamento termico	2.2 Destinati a impieghi particolari				2.3 Tenore di ogni elemento di lega < 5%	2.4 Tenore di almeno un elemento di lega ≥ 5%		
S I M B O L E G G I A T U R A I N D I C A Z I O N I D I B A S E	Indicazioni complementari	0. Prefisso	—	—	Se del caso: una cifra indicante il grado qualitativo dell'acciaio, secondo la specificazione relativa al prodotto		Se del caso: una lettera indicante il grado qualitativo dell'acciaio, secondo la specificazione relativa al prodotto	
		1. Simbolo iniziale	Fe	Fe	C	C , seguito da una lettera indicante l'impiego al quale è destinato l'acciaio (secondo la specificazione relativa al prodotto)	G , unicamente nel caso di acciaio per getti	X , seguito dalla lettera G nel caso di acciaio per getti
		2. Cifre o lettere distintive della caratteristica principale	Valore minimo garantito del carico unitario di rottura a trazione (in kilogrammi forza al millimetro quadrato) oppure valore minimo garantito del carico unitario di snervamento (in kilogrammi forza al millimetro quadrato) preceduto dal simbolo E	Una lettera indicante l'impiego seguita da un numero di due o più cifre (secondo la specificazione relativa al prodotto)	Tenore percentuale di carbonio moltiplicato per 100			
		3. Lettere indicanti alcuni elementi di lega	Se del caso: simbolo chimico dell'elemento la cui presenza intenzionale permette di ottenere alcune proprietà particolari	—	Se del caso: simbolo chimico dell'elemento la cui presenza intenzionale permette di ottenere alcune proprietà particolari, seguito eventualmente da una cifra (secondo la specificazione relativa al prodotto)		Simboli chimici degli elementi di lega che caratterizzano l'acciaio	
		4. Cifre indicanti i tenori di elementi di lega	—	—	—	—	Tenori percentuali dei principali elementi di lega moltiplicati per 4 o per 10 o per 100 o per 1000 secondo l'elemento	Tenori percentuali dei principali elementi di lega
	Indicazioni complementari	5. Lettera indicante il grado di insensibilità alla frattura fragile	A, B, C, D	—	—	—	—	—
		6. Cifra indicativa del grado qualitativo definito da criteri diversi dall'insensibilità alla frattura fragile	1, 2, 3, ... secondo la specificazione relativa al prodotto		—	—	—	—
		7. Lettere indicanti i requisiti particolari	Lettere convenzionali di riferimento F, S, K, H, M, R, N, G, T , seguite da un'altra lettera (secondo la specificazione relativa al prodotto)					
	Riferimento dell'unificazione UNI	UNI						

Tabella 4.8 - Simbologgiatura degli acciai: lettere convenzionali di riferimento per i requisiti particolari e per il grado dei requisiti secondo UNI 5372-70.

F per il modo di disossidazione	FU per l'acciaio effervescente;
	FN per l'acciaio non effervescente calmato e semicalmato;
	FF per l'acciaio calmato a grano fine ecc.
S per le garanzie di saldabilità: saldabilità possibile a determinate condizioni ecc.	
K per le proprietà particolari di utilizzazione	KD per l'attitudine alla deformazione a freddo;
	KQ per l'attitudine alla bordatura;
	KR per l'attitudine alla produzione di tubi saldati;
	KU per l'attitudine alla costruzione di utensili;
	KW per l'attitudine all'impiego ad alte temperature ecc.
H per le modalità di produzione: laminato a caldo, laminato a freddo, deformato a freddo, trafilato ecc.	
M per l'aspetto della superficie	MA per superficie con piccoli difetti;
	MB per superficie praticamente impeccabile;
	MG per superficie decapata;
	MF per strato di ossido aderente ecc.
R per la finitura della superficie	RM per la finitura matta;
	RR per la finitura rugosa;
	RL per la finitura liscia;
	RN per la finitura lucida ecc.
N per la forma della superficie: nervata, striata ecc.	
G per il rivestimento o il trattamento della superficie: zincata, piombata, fosfatizzata ecc.	
T per lo stato di trattamento termico del materiale allo stato di fornitura	TA per la ricottura di distensione;
	TB per la ricottura di coalescenza;
	TC per la ricottura completa;
	TD per la normalizzazione;
	TE per la normalizzazione e il rinvenimento di distensione;
	TF per la bonifica;
	TG per l'austenitizzazione ecc.

Quando il simbolo deve comprendere due o più lettere convenzionali di riferimento, queste lettere di riferimento devono essere disposte, se possibile, nell'ordine sopra indicato. La lettera T deve però essere obbligatoriamente sempre l'ultima.

Esempi di designazione:

GRUPPO 1 Acciai del sottogruppo 1.1	
Fe 48	Fe E 30-2
Acciaio con Rm garantito minimo di 48 Kgf/mm ² (circa 470 N/mm ²)	Acciaio con Re garantito minimo di 30 Kgf/mm ² (circa 294 N/mm ²), grado qualitativi 2.
Fe 37 C	Fe 45 B-KR
Acciaio con Rm garantito minimo di 37 Kgf/mm ² (circa 362 N/mm ²), grado di insensibilità alla frattura fragile C	Acciaio con Rm garantito minimo di 45 Kgf/mm ² (circa 441 N/mm ²), grado di insensibilità alla frattura fragile B, con attitudine alla produzione di tubi saldati.

GRUPPO 1 Acciai del sottogruppo 1.2		
<p>Tabella 4.9 - Lettera, indicante l'impiego, da usare per la designazione degli acciai del sottogruppo 1.2: acciai designati partendo dall'impiego (UNI 5372-70).</p>		
Lettera		
V	per le applicazioni magnetiche, nel caso di lamiere e nastri a grani non orientati;	<p>Nota: Quando si utilizza la lettera B (impiego in cemento armato), le due cifre che seguono devono indicare il valore minimo garantito del carico unitario di snervamento, espresso in kilogrammi forza al millimetro quadrato; queste due cifre, contrariamente a quanto detto per il sottogruppo 1.1, non devono essere precedute dalla lettera E. Quando si utilizza la lettera G (acciaio per getti), le due cifre che seguono questa lettera devono indicare il valore minimo garantito del carico unitario di rottura a trazione, espresso in kilogrammi forza al millimetro quadrato.</p>
M	per le applicazioni magnetiche, nel caso di lamiere e nastri a grani orientati;	
P	per l'attitudine all'imbutitura;	
B	per l'impiego in cemento armato;	
H	per l'attitudine alla laminazione a freddo;	
D	per l'attitudine alla deformazione a freddo;	
R	per l'impiego nei tubi saldati o per l'attitudine alla bordatura;	
G	per l'impiego nella produzione di getti ecc.	
Fe P 02 MG	Fe V 360 50HB	
Acciaio per imbutitura (=P) con grado di attitudine all'imbutitura 02, con superficie decapata (=MG)	Acciaio in lamiera per applicazioni magnetiche a grani non orientati. Perdita massima 3,6 W/Kg per lo spessore di 0,5 mm; modalità di produzione (=H); laminato a caldo e ricotto in continuo (=B).	
Fe B 26	Fe G 40	
Acciaio per cemento armato (=B) con Re garantito minimo di 26 Kgf/mm ² (circa 255 N/mm ²).	Acciaio per getti avente Rm garantito minimo di 40 Kgf/mm ² (circa 392 N/mm ²).	

GRUPPO 2																																																	
Acciai del sottogruppo 2.1																																																	
2 C 35 TC	C 40 S	1 C 50 S TB																																															
Acciaio non legato da trattamento termico, con tenore medio di carbonio di 0,35%, grado qualitativo 2, fornito allo stato di ricottura completa.	Acciaio non legato da trattamento termico, con tenore medio di carbonio di 0,40% e con tenore minimo garantito di zolfo.	Acciaio non legato da trattamento termico, con tenore medio di carbonio di 0,50%, con tenore minimo garantito di zolfo, fornito allo stato di ricottura di coalescenza.																																															
Acciai del sottogruppo 2.2																																																	
2 CD 15	CD 30 Cr	CG 20																																															
Acciaio di uso generale per vergella, con tenore di carbonio medio di 0,15%, grado qualitativo 2.	Acciaio di uso generale per vergella con tenore di carbonio medio di 0,30%, con aggiunta di cromo.	Acciaio non legato per getti, con tenore di carbonio medio di 0,02%.																																															
Acciai del sottogruppo 2.3																																																	
<p>Tabella 4.10 - Fattore di moltiplicazione della percentuale degli elementi chimici presenti nell'acciaio del sottogruppo 2.3 (UNI 5372-70).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Simbolo</th> <th>Elemento chimico</th> <th>Fattore di moltiplicazione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Co</td><td>cobalto</td><td rowspan="5">4</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>cromo</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>manganese</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>nicel</td></tr> <tr><td>Si</td><td>silicio</td></tr> <tr><td>W</td><td>wolframio</td><td rowspan="10">10</td></tr> <tr><td>Al</td><td>alluminio</td></tr> <tr><td>Be</td><td>berillio</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>rame</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>molibdeno</td></tr> <tr><td>Nb</td><td>niobio</td></tr> <tr><td>Pb</td><td>piombo</td></tr> <tr><td>Ta</td><td>tantalio</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>titanio</td></tr> <tr><td>V</td><td>vanadio</td></tr> <tr><td>Zr</td><td>zirconio</td></tr> <tr><td>N</td><td>azoto</td><td rowspan="2">100</td></tr> <tr><td>P</td><td>fosforo</td></tr> <tr><td>S</td><td>zolfo</td><td rowspan="2">1000</td></tr> <tr><td>B</td><td>boro</td></tr> </tbody> </table>			Simbolo	Elemento chimico	Fattore di moltiplicazione	Co	cobalto	4	Cr	cromo	Mn	manganese	Ni	nicel	Si	silicio	W	wolframio	10	Al	alluminio	Be	berillio	Cu	rame	Mo	molibdeno	Nb	niobio	Pb	piombo	Ta	tantalio	Ti	titanio	V	vanadio	Zr	zirconio	N	azoto	100	P	fosforo	S	zolfo	1000	B	boro
Simbolo	Elemento chimico	Fattore di moltiplicazione																																															
Co	cobalto	4																																															
Cr	cromo																																																
Mn	manganese																																																
Ni	nicel																																																
Si	silicio																																																
W	wolframio	10																																															
Al	alluminio																																																
Be	berillio																																																
Cu	rame																																																
Mo	molibdeno																																																
Nb	niobio																																																
Pb	piombo																																																
Ta	tantalio																																																
Ti	titanio																																																
V	vanadio																																																
Zr	zirconio																																																
N	azoto	100																																															
P	fosforo																																																
S	zolfo	1000																																															
B	boro																																																
A 20 Mn 5	30 Cr Al Mo 5 10'																																																
Acciaio debolmente legato con percentuale media di carbonio di 0,2% e manganese di 1,25% grado qualitativo A.	Acciaio legato con percentuale media di carbonio di 0,3%, cromo di 1,25%, alluminio di 1% con percentuale di molibdeno non precisata.																																																
18 Ni Cr 16	G 90 Cr 4																																																
Acciaio legato con percentuale media di carbonio di 0,18%, percentuale di nichel 4% con percentuale di cromo non specificata.	Acciaio legato per getti con percentuale di carbonio media 0,9% e cromo 1%.																																																

Acciai del sottogruppo 2.4		
X 10 Cr 13	X 10 Cr Ni 18 8	X 150 Cr Mo 12 KU
Acciaio inossidabile al cromo, con tenore medio di carbonio di 0,1% con tenore di cromo 13%	Acciaio al cromo-nichel resistente alla corrosione, con tenore medio di carbonio di 0,1%, tenore di cromo 18% e nichel dell'8%.	Acciaio inossidabile, con tenore medio di carbonio di 1,5%, cromo del 12% e molibdeno non precisato, atto (K) alla costruzione di utensili (U).
A X 15 Cr 9	X 50 Ni Cr 21 9	X G 15 Cr 13
Acciaio inossidabile al cromo, con tenore medio di carbonio di 0,15% e con tenore di cromo dell'8%, grado qualità A.	Acciaio al cromo-nichel resistente alla corrosione, con tenore medio di carbonio di 0,5%, tenore di nichel del 21% e cromo del 9%.	Acciaio legato per getti, con tenore medio di carbonio di 0,15% e con tenore di cromo del 13%.

Norme sulla designazione convenzionale degli acciai secondo UNI EU 27

Nel gennaio del '77 l'UNI ha pubblicato la tabella UNI EU 27 sulla designazione convenzionale degli acciai che sostituisce, differenziandosi in modo lieve, dalla UNI 5372 – 70. Qui sono elencate queste differenze con particolare riferimento al paragrafo precedente.

F per il modo di disossidazione	FU per l'acciaio effervescente; FN per l'acciaio non effervescente calmato e semicalmato; FF per l'acciaio calmato a grano fine ecc.
S per le garanzie di saldabilità: saldabilità possibile a determinate condizioni, ecc.	
K per le proprietà particolari di utilizzazione	KD per l'attitudine alla deformazione a freddo; KQ per l'attitudine alla bordatura; KR per l'attitudine alla produzione di tubi saldati; KU per l'attitudine alla costruzione di utensili; KW per l'attitudine all'impiego ad alte temperature ecc.
H per le modalità di produzione: laminato a caldo, laminato a freddo, deformato a freddo, trafilato ecc.	
M per l'aspetto della superficie	MA per superficie con piccoli difetti; MB per superficie praticamente impeccabile; MG per superficie decapata; MF per strato di ossido aderente ecc.
R per la finitura della superficie	RM per la finitura matta; RR per la finitura rugosa; RL per la finitura liscia; RN per la finitura lucida ecc.
N per la forma della superficie: nervata, striata ecc.	
G per il rivestimento o il trattamento della superficie: zincata, piombata, fosfalizzata ecc.	
T per lo stato di trattamento termico del materiale allo stato di fornitura	TA per la ricottura di distensione; TB per la ricottura di coalescenza; TC per la ricottura completa; TD per la normalizzazione; TE per la normalizzazione e il rinvenimento di distensione; TF per la bonifica; TG per l'austenizzazione ecc.

Quando il simbolo deve comprendere due o più lettere convenzionali di riferimento, queste lettere di riferimento devono essere disposte, se possibile, nell'ordine sopra indicato. La lettera T deve però essere obbligatoriamente sempre l'ultima.

UNI EU 27

Alla lettera **K** deve seguire, oltre alle lettere **D, Q, R, U, W**, anche una delle lettere seguenti:

G: per l'attitudine all'impiego alle temperature climatiche (ambiente), limitatamente ai casi nei quali è necessaria una distinzione di questo acciaio da un corrispondente tipo (di acciaio) con prescrizioni di caratteristiche a basse o ad alte temperature;

P: per l'attitudine alla profilatura a freddo;

S: per l'attitudine alla fucinatura a stampo chiuso o libero;

T: per l'attitudine all'impiego a basse temperature;

Z: per l'attitudine alla trafilatura.

Alla lettera **H** deve seguire una di queste lettere (con il significato riportato):

K: per il prodotto allo stato incrudito;

W: per il prodotto allo stato grezzo di laminazione.

GRUPPO 1		
Acciai del sottogruppo 1.1		
<ul style="list-style-type: none"> • Il simbolo iniziale Fe per gli acciai fucinati, laminati, trafilati, o della colata continua e Fe G per gli acciai per getti; • Il carico unitario minimo garantito di rottura a trazione in N/mm² oppure il carico unitario di snervamento a trazione in N/mm² preceduto dalla lettera E 		
Fe 410 D	Fe G 440	Fe E 355
Acciaio avente Rm garantito di 410 N/mm ² e grado di insensibilità alla frattura fragile D.	Acciaio per getti con Rm di 440 N/mm ²	Acciaio avente Re garantito di 355 N/mm ²
Acciai del sottogruppo 1.2		
Nessuna differenza		

GRUPPO 2
Acciai del sottogruppo 2.1
<ul style="list-style-type: none"> • Il simbolo iniziale C, al quale va anteposta la lettera G nel caso di acciai per getti.
G C 20
Acciaio non legato per getti, con percentuale media di carbonio di 0,20%.
Acciai del sottogruppo 2.2
Nessuna differenza
Acciai del sottogruppo 2.3
Nessuna differenza
Acciai del sottogruppo 2.4
<ul style="list-style-type: none"> • Il simbolo X va preceduto dalla lettera G nel caso di acciai per getti.
G X 15 Cr 13
(in sostituzione di X G 15 Cr 13): acciaio legato per getti con percentuale media di carbonio di 0,15% e con tenore di cromo del 13%.

LA PROVA DI TRAZIONE

1. Prove e proprietà meccaniche dei materiali ferrosi	2
1.1. Generalità e classificazione	2
1.2. Principali proprietà dei materiali metallici	2
2. Prova di trazione	4
2.1. Generalità	4
2.3. Macchina Universale per prove meccaniche a funzionamento idraulico	5
2.4. Principio di funzionamento	6
2.5. Provette	11
2.6. Modalità esecutive	12
2.7. Grafico carichi/allungamenti. Costruzione delle scale	19
2.7.1 Studio del grafico carichi/allungamenti.	20
2.8. Modulo di elasticità normale	28
2.9. Calcolo dell'allungamento dopo rottura	29
2.10. Calcolo dell'allungamento A in tutti i casi di rottura	30
2.11. Risultati delle prove di trazione effettuate in laboratorio	33
2.11.1. Aspetto delle rotture	35
2.11.2. Conclusioni	35

1. Prove e proprietà meccaniche dei materiali ferrosi

1.1. Generalità e classificazione

Delle varie proprietà dei materiali interessano soprattutto (ma non solo) quelle meccaniche e tecnologiche che sono valutate con apposite prove utilizzando ben determinate provette. Le prove sono quasi tutte **unificate** e, pertanto, i risultati sono confrontabili tra loro; esse però non possono dare un giudizio assoluto sui pezzi meccanici nelle condizioni effettive d'impiego, in quanto le condizioni di prova sono, quasi sempre, notevolmente diverse.

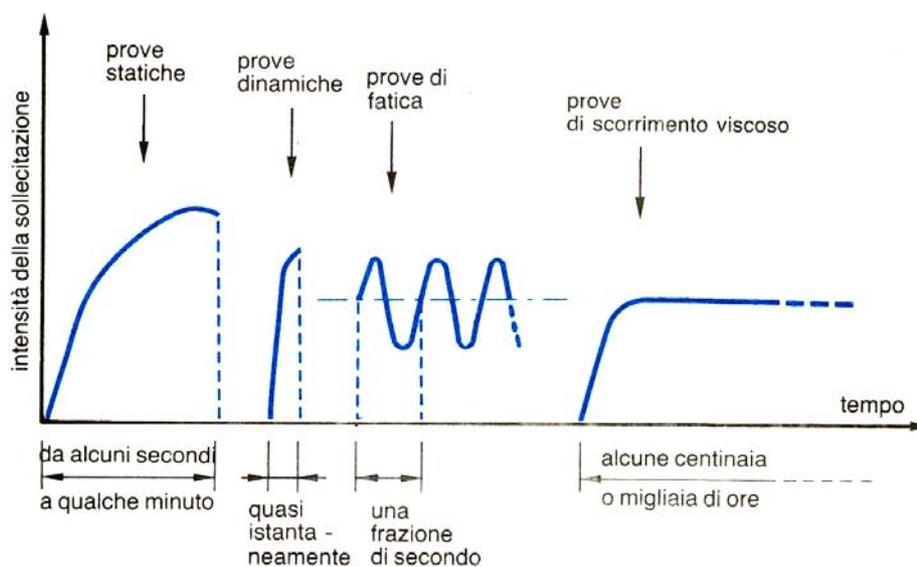
Le principali proprietà che interessano possono essere classificate nel modo seguente.

1.2. Principali proprietà dei materiali metallici

1. Fisiche	2. Chimiche	3. Meccaniche	4. Tecnologiche
Dilatazione termica	Corrosione	Resistenza alle sollecitazioni statiche	Fusibilità
			Malleabilità
Conducibilità elettrica		Resistenza alle sollecitazioni dinamiche (resilienza)	Duttilità
			Estrudibilità
Conducibilità termica		Resistenza alla fatica	Imbutibilità
Temperatura di fusione		Resistenza allo scorrimento viscoso	Piegabilità
			Saldabilità
Massa volumica		Resistenza all'usura	Temprabilità
Proprietà magnetiche		Durezza	Lavorabilità alle macchine utensili

Per quanto riguarda il **modo** e il **tempo** in cui le sollecitazioni sono applicate, le prove meccaniche si possono classificare nel modo seguente:

<p>1. Statiche</p>	<p>Quando la sollecitazione gradualmente crescente è applicata per un tempo variabile da alcuni secondi a qualche minuto. Le principali prove di questo tipo sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • prova di trazioni; • prova di compressione; • prova di flessione; • prova di torsione; • prova di taglio; • prova di durezza Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop.
<p>2. Dinamiche</p>	<p>Quando la sollecitazione è applicata per un tempo brevissimo (quasi istantaneo). Le principali sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • prova di resilienza; • prova di Shore.
<p>3. Periodiche</p>	<p>Quando la sollecitazione è applicata con intensità variabile in una frazione di secondo con legge approssimativamente sinusoidale per un grande numero di cicli. Sono denominate prove di fatica.</p>
<p>4. Di scorrimento</p>	<p>Quando la sollecitazione è applicata con intensità costante per un tempo di centinaia o migliaia di ore. Di solito queste prove si eseguono a temperature più o meno elevate. Esse sono denominate: prove di scorrimento viscoso.</p>



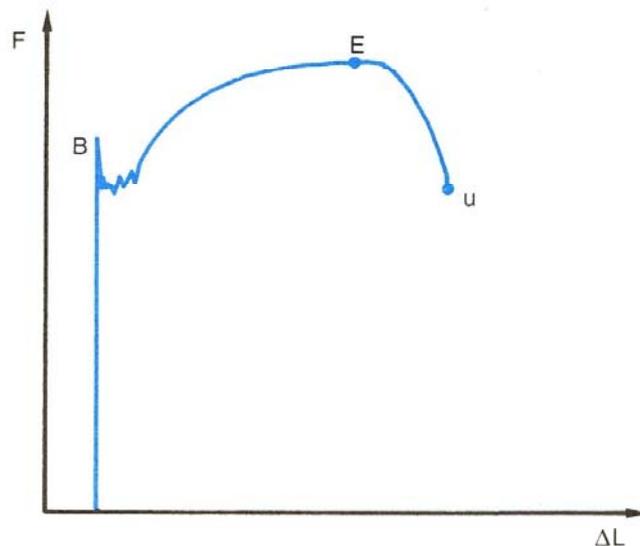
Forma delle sollecitazioni nelle varie prove meccaniche

2. Prova di trazione (UNI EN 10002-92)

2.1. Generalità

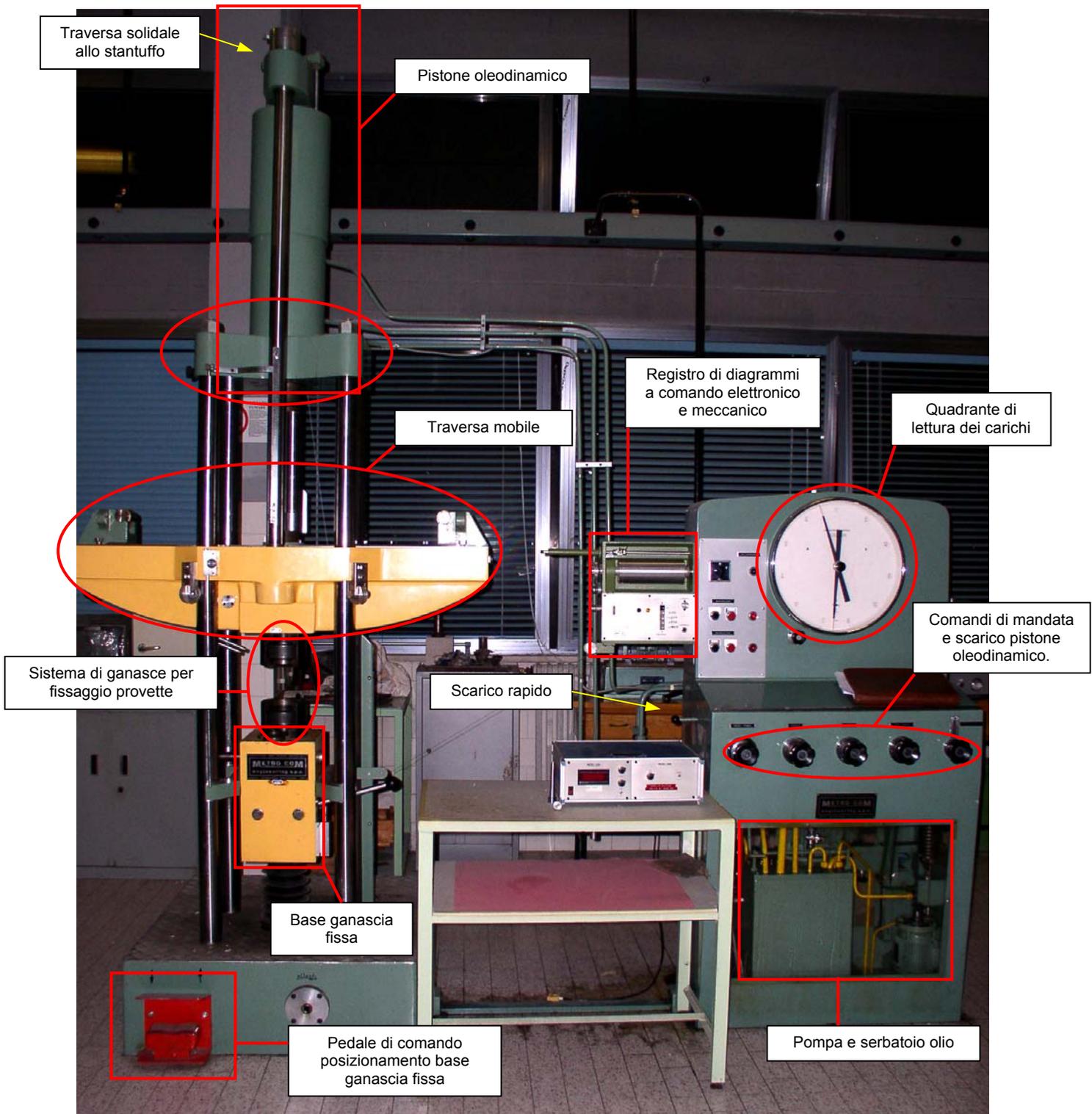
La prova di trazione è indubbiamente la più importante. Essa consiste nel sottoporre una determinata provetta ad uno sforzo gradualmente crescente di trazione sino alla rottura del provino stesso. Lo sforzo è esercitato, generalmente, da una macchina "Universale", ovvero che può effettuare quasi tutte le prove meccaniche di tipo statico.

La temperatura a cui si svolge la prova è solitamente quella ambiente. Con la prova di trazione si perviene ad indici che riguardano l'elasticità, la deformabilità e la resistenza dei materiali e si ricava, di solito, un grafico in un sistema di assi cartesiani che ha in ascisse gli allungamenti della provetta ed in ordinate i carichi applicati.



Esempio di grafico "sollecitazioni/allungamenti" in una prova di trazione su provetta di acciaio dolce.

2.3. Macchina Universale per prove meccaniche a funzionamento idraulico



Macchina universale per prove meccaniche presente presso ITIS Merloni di Fabriano..

2.4. Principio di funzionamento

Le macchine di prova che rilevano le proprietà meccaniche debbono essere costruite con criteri universalmente validi per garantire l'attendibilità e la ripetibilità delle prove: ciò è garantito e previsto dagli enti di unificazione.

L'energia per produrre lo sforzo nelle macchine di prova viene fornito da una pompa ad alta pressione accoppiata ad un motore elettrico; variando la corsa o il numero di corse al minuto della pompa è possibile una regolazione pressoché continua entro ampi limiti della portata dell'olio e quindi della velocità di applicazione del carico.

Nella figura sotto è disegnato lo schema funzionale di una macchina universale idraulica.

Essa è costituita da un'incastellatura comprendente:

- 1 basamento;
- 2 due o quattro colonne di sostegno;
- 3 traversa fissa;
- 4 cilindro;
- 5 stantuffo;
- 6 traversa solidale allo stantuffo;
- 7 due aste montanti;
- 8 traversa di lavoro
- 9 cilindro secondario;
- 10 stantuffo secondario;
- 11 barra orizzontale con pennino;
- 12 tamburo.

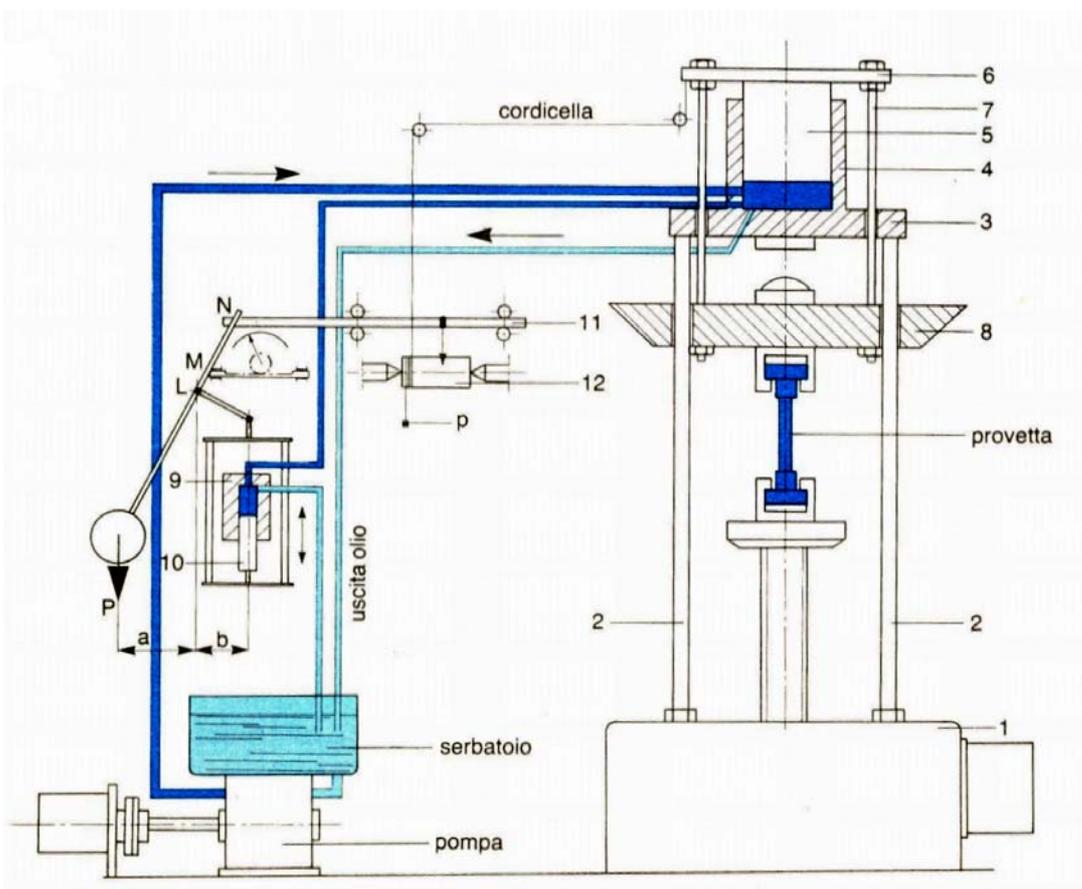
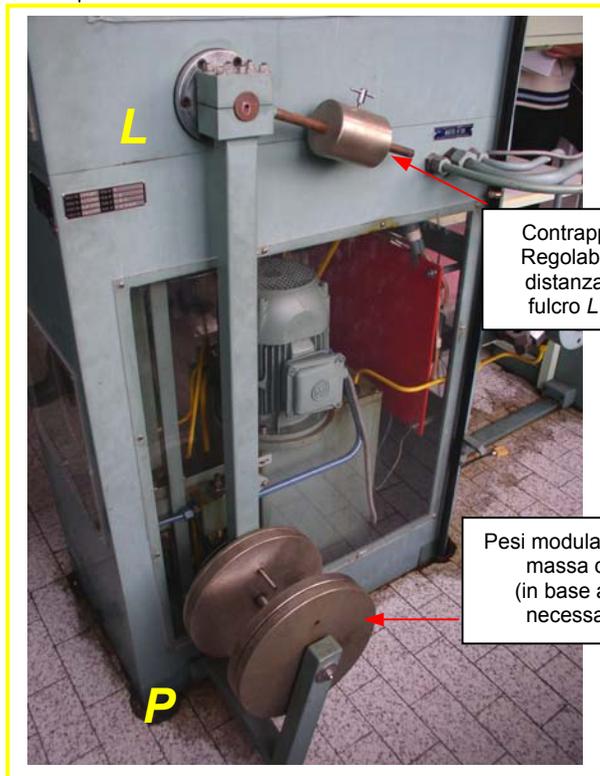
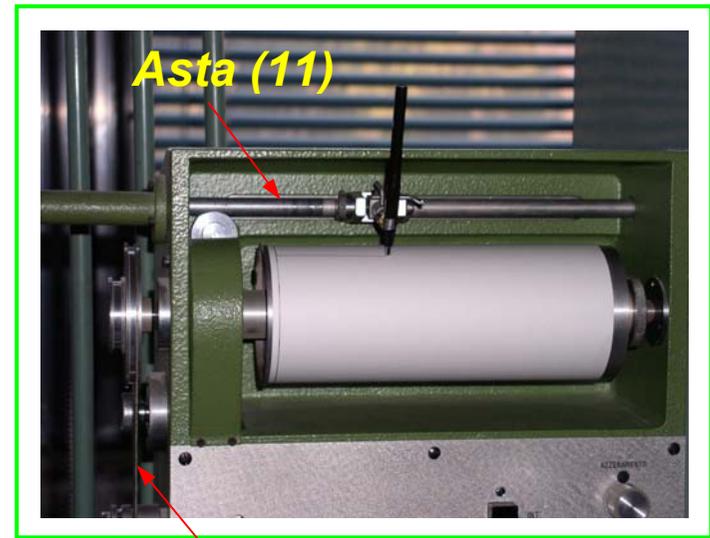
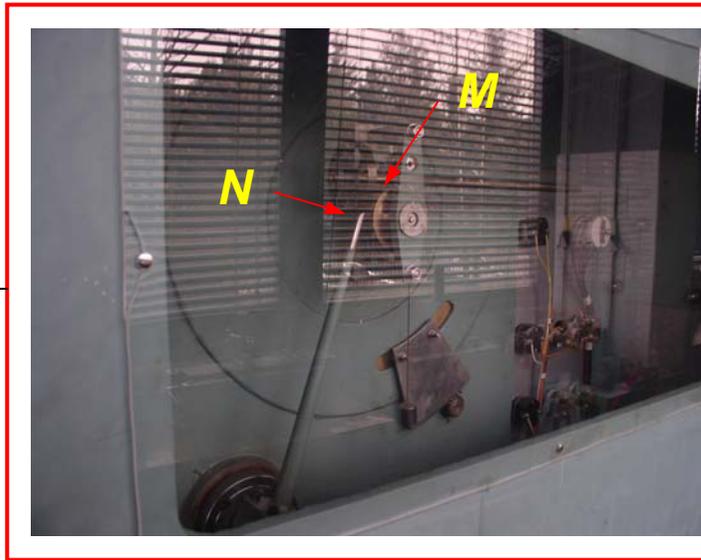


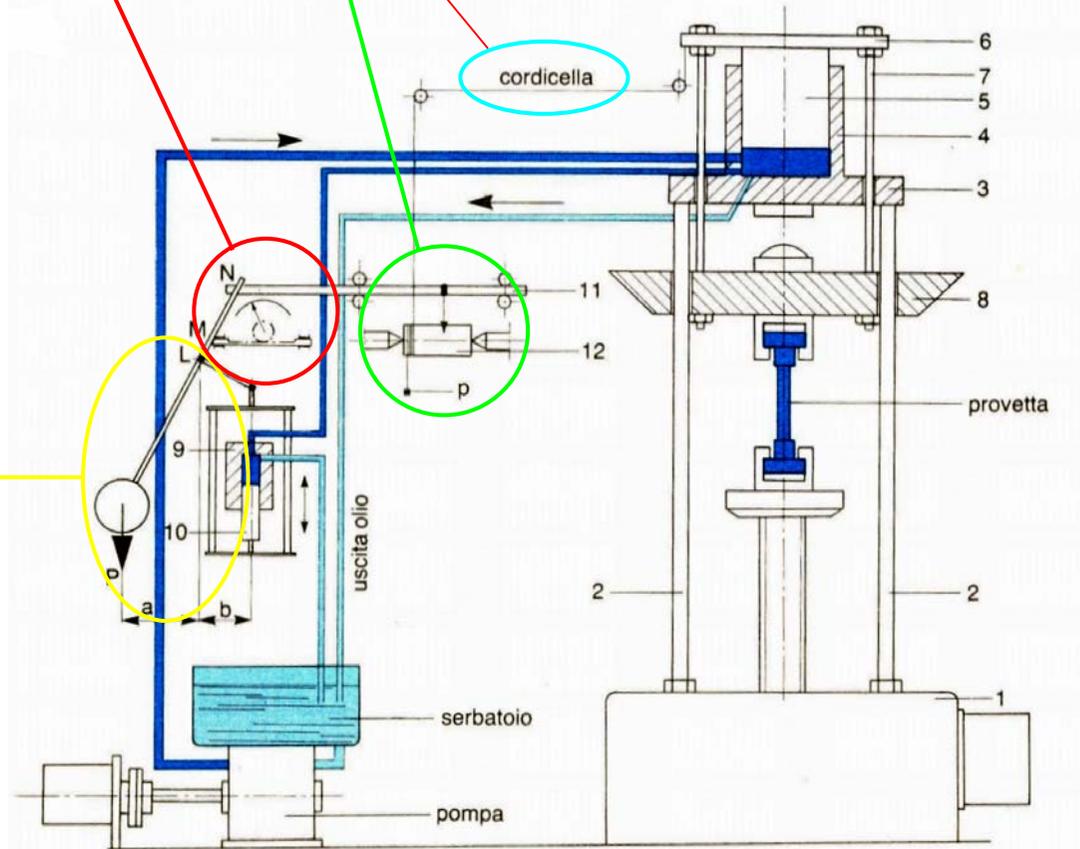
Fig.1

Viste posteriori della macchina Universale



Contrappeso pendolo. Regolabile variando la distanza (braccio) dal fulcro L della massa.

Pesi modulari per variazione massa del pendolo. (in base al fondoscala necessario stimato)

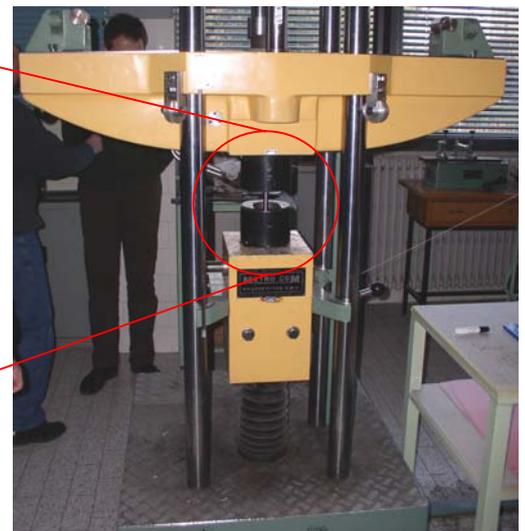
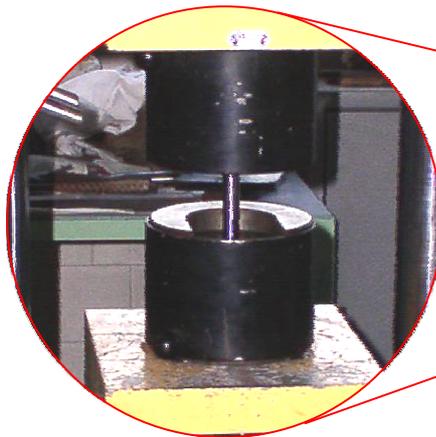


Il principio di funzionamento nel caso di una prova di trazione è il seguente:

1. La provetta viene fissata alla ganasca collegata al basamento e alla ganasca collegata alla traversa di lavoro (vedi immagini).



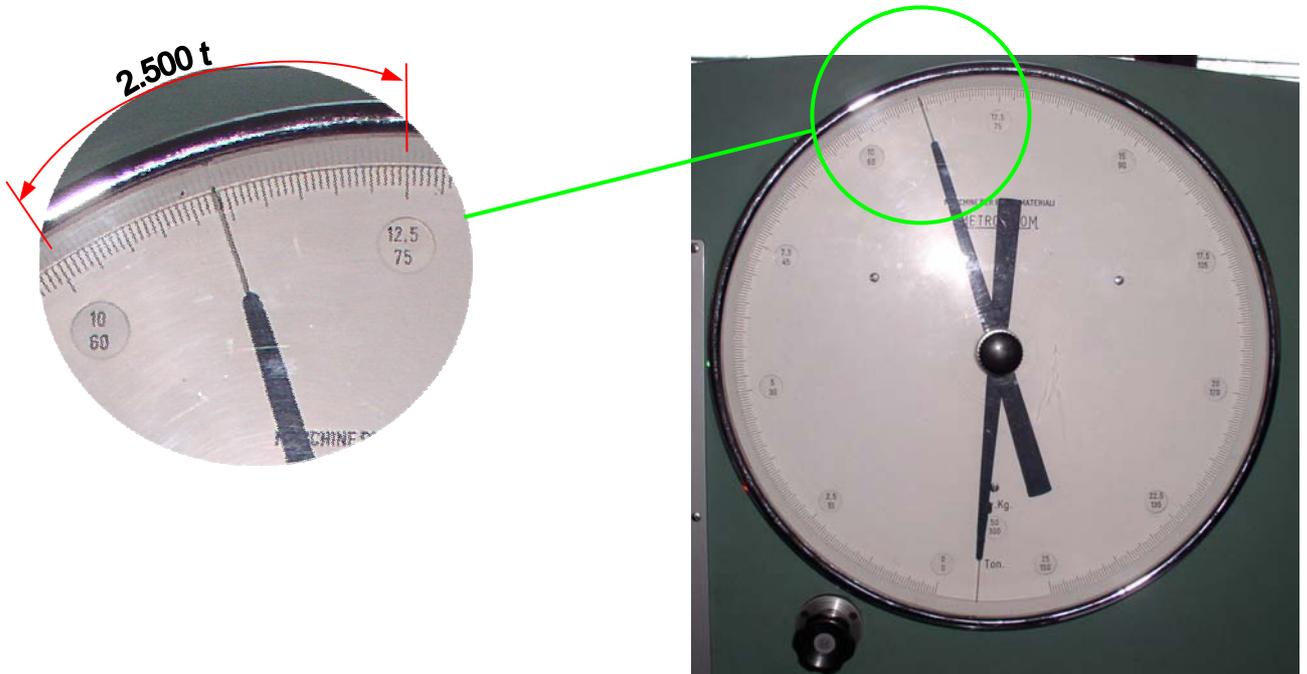
Supporti per ganasce per provette con teste a spalla



2. La pompa invia l'olio dal serbatoio al cilindro (4) obbligando lo stantuffo (5) a salire; quest'ultimo trascina la traversa (6) e la traversa di lavoro (8) per cui la provetta viene sollecitata a trazione.

3. Per la misura degli sforzi applicati si usa un dinamometro sul cui quadrante si muovono due indici: uno si muove in modo proporzionale allo sforzo applicato e l'altro viene trascinato dal primo, quest'ultimo rimarrà fermo al momento della rottura e ci darà la possibilità di leggere il carico applicato sulla provetta all'istante della rottura stessa.

Per questa provetta la rottura si è verificata ad un carico di $F_m=11.200 \text{ [Kgf]} = 109.872 \text{ [N]}$; fondoscala 25.000 Kgf.



4. La pressione dell'olio nel cilindro (4) è trasmessa, mediante il tubo visibile in figura, al cilindro (9).

5. Man mano che la pressione nel cilindro (4) aumenta (e ciò significa aumenta lo sforzo di trazione) aumenta anche la pressione nel cilindro (9) per cui lo stantuffo (10) è costretto ad abbassarsi assieme alle aste ad esso collegate.

6. il movimento di cui al punto precedente è impedito dalla massa P fissata all'estremità di un'asta che può solo ruotare sul perno L.

7. La massa P si dispone in una posizione di equilibrio per cui vale la relazione:

$$P \cdot a = F \cdot b$$

con

P = forza-peso del pendolo;

F = forza esercitata dall'olio sul pistoncino (10) che vale: pressione dell'olio x area della sezione del pistoncino;

a = braccio per la massa P del pendolo;

b = braccio per la forza F del pistoncino (10).

8. La rotazione dell'asta del pendolo intorno ad L sposta con la sua parte superiore N la barra (11) solidale al pennino; dati i collegamenti tra le varie aste visibili in fig.1, il pennino si sposta tanto più a destra quanto più ruota l'asta del pendolo intorno ad L.

9. Contemporaneamente l'innalzarsi della traversa di lavoro (8) provoca la rotazione del tamburo (12) a mezzo di una cordicella collegata da una parte alla traversa mobile e dall'altra mediante rotismi ad un peso p avvolto intorno al tamburo (12).

10. Il contemporaneo movimento della barra (11), portante il pennino scrivente e la rotazione del tamburo (12), rende possibile la tracciatura del grafico carichi allungamenti.

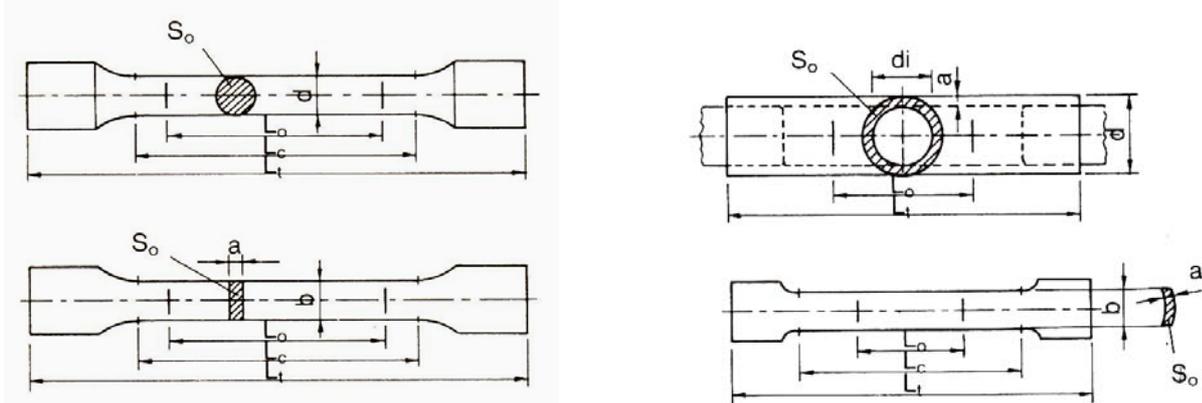
È evidente come la rotazione del tamburo è tanto maggiore quanto più si innalza lo stantuffo (5) vale a dire quanto più si allunga la provetta; mentre lo spostamento del pennino verso destra è tanto maggiore quanto più ruota l'asta del pendolo e, pertanto, quanto più elevato è lo sforzo a cui è soggetto lo stantuffo (5).

2.5. Provette

Le norme UNI 551 e 552 indicano rispettivamente:

- come ricavare la provetta dal materiale da esaminare (saggio);
- i vari simboli da adottare.

Tipi di provette per la prova di trazione:



Simbolo	Unità di misura	Denominazione
d	mm	Diametro della provetta tonda o diametro esterno del tubo
a	mm	Spessore della provetta piatta o della parete del tubo
b	mm	Larghezza della provetta piatta o a tegola
d ₁	mm	Diametro interno del tubo
L ₀	mm	Lunghezza iniziale tra i riferimenti
L _c	mm	Lunghezza del tratto a sezione costante
L _t	mm	Lunghezza totale della provetta (comprese le teste)
L _u	mm	Lunghezza ultima tra i riferimenti (dopo rottura)
S ₀	mm ²	Area della sezione della provetta misurata prima di iniziare la prova
S _u	mm ²	Idem come sopra al momento e nel punto della rottura

Nelle provette si distinguono:

- il tratto a sezione costante L_c;
- il tratto utile L₀;
- le teste per il fissaggio alla macchina.

Nel caso delle provette circolari il tratto a sezione costante vale:

$$L_c = L_0 + 2d$$

Per la UNI vigente si classificano come “Normali” solo le provette per le quali è valida la seguente proporzione:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$$

Per provette cilindriche con diametro d si può scrivere:

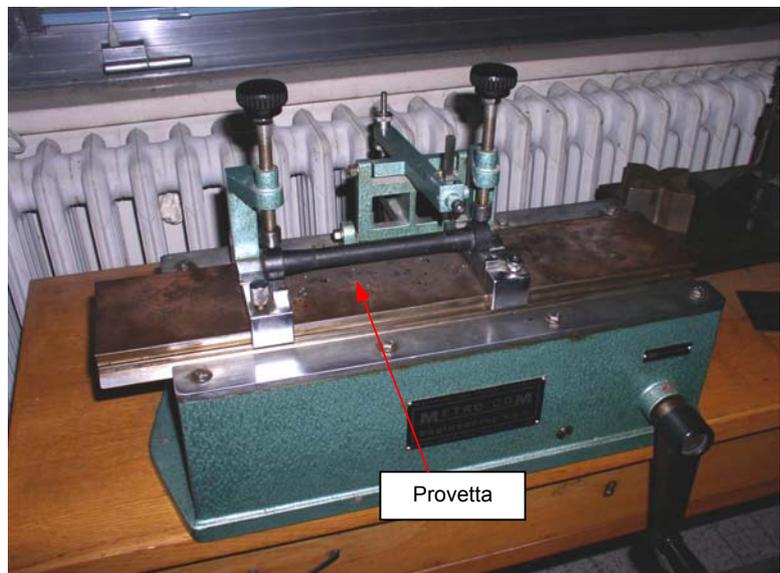
$$L_o = 5,65\sqrt{S_0} = 5,65\sqrt{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = 5 \cdot d$$

2.6. Modalità esecutive

Fasi dell'esecuzione della prova di trazione:

1. **Controllo e misura della provetta:** assicurarsi che le dimensioni della provetta siano esattamente quelle normate in riferimento a quanto previsto dalle UNI (comprese tolleranze dimensionali e di forma);

2. **Tracciatura della provetta:** il tratto utile della provetta viene diviso con apposita macchina tracciatrice in parti uguali equidistanti 5 o 10 mm in numero non inferiore a 10. (vedi foto).



Macchina per segnare le provette.

3. **Azzeramento del quadrante:** prima di iniziare la prova: la provetta deve essere posizionata sulla staffa appesa alla barra mobile; a questo punto va aperto il carico in modo da mandare in pressione l'olio nel cilindro del pistone della macchina (accertarsi di aver chiuso gli scarichi). L'indice sul quadrante inizierà a salire e si stabilizzerà in prossimità dello 0 della scala. Non resta che azzerare accuratamente l'indice sullo 0 agendo direttamente sul registro della barra (11) come si può vedere dalla foto.



N.B. E' possibile notare come i riferimenti del pendolo siano correttamente allineati. Nel caso in cui non si riesca ad azzerare l'indice sullo zero e quindi non si riesca ad avere un allineamento dei riferimenti del pendolo è opportuno agire sul contrappeso del pendolo stesso (vedi foto precedente del pendolo).



4. **Fissaggio della provetta:** a questo punto si passa al posizionamento vero e proprio della provetta sulle due ganasce come precedentemente mostrato. Assicurarsi che la provetta sia sollecitata a trazione e non a momento flettente.
5. **Scelta del fondoscala:** prima di iniziare la prova di trazione è bene scegliere un fondoscala idoneo al tipo di materiale e al tipo di provetta che si vuole testare in modo da poter sfruttare al meglio l'area sulla quale verrà tracciato il grafico. Per determinare il valore del fondoscala è opportuno munirsi di tabelle in cui sono riportati valori presunti di R_m [N/mm²] (carico unitario di rottura) per il materiale che si sta testando, il diametro dell'eventuale saggio d'origine dal quale è stata ricavata la provetta e l'eventuale stato strutturale (martensitico). Con questi valori si può facilmente risalire al carico F_m (forza di rottura) necessario per rompere la provetta applicando le seguenti relazioni:

$$se \ R_m = \frac{F_m}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad allora \ F_m = R_m \cdot S_0 [N] \quad dove \ S_0 = \frac{\pi d^2}{4} [mm^2]$$

con d = diametro provetta su L_0 .

N.B. Per orientarsi ancora meglio, nell'eventualità non si conosca con esattezza le caratteristiche del materiale, è possibile effettuare delle prove di durezza idonee (Vickers o Rockwell ad esempio) per poter poi risalire mediante tabelle comparative al R_m presunto.

Valori di conversione approssimativi della durezza e della resistenza a trazione per l'acciaio (utilizzabili come termini di confronto).

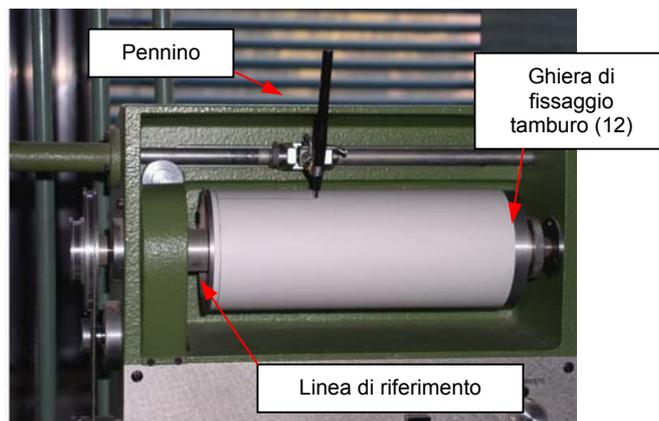
Durezza Brinell (HB)	Durezza Rockwell		Durezza Vickers (HV)	Durezza Knoop con 5 N (HK)	Resistenza alla trazione Rm (N/mm ²)	Durezza Shore (Hs)	Durezza Mohs	Durezza Brille (HB)	Durezza Rockwell		Durezza Vickers (HV)	Durezza Knoop con 5 N (HK)	Resistenza alla trazione Rm (N/mm ²)	Durezza Shore (Hs)	Durezza Mors
	(HRB)	(HRC)							(HRB)	(HRC)					
80	36,4		80	91	280			200	95,0		200	220	680		5
85	42,4		85	96	300			205	95,8		205	230	700		
90	47,4		90	101	320			210	96,6		210	235	720	35	
95	52,0		95	105	330			215	97,6		215	240	730		
100	56,4		100	111	350			220	98,2		220	245	750		
105	60,0		105	116	370			225	99,0		225	250	770		
110	63,4		110	121	390			230	19,2		230	250	780		
115	66,4		115	126	400			235		20,2	235	260	800		
120	69,4		120	131	420			240		21,2	240	265	820		
125	72,0		125	138	430		4,5	245		22,1	245	266	840		
130	74,4		130	143	450			250		23,0	250	270	850	40	
135	76,4		135	149	470			255		23,8	255	275	870		
140	78,4		140	155	480			260		24,6	260	280	890		
145	80,4		145	158	500			265		25,4	265	285	900		
150	82,2		150	163	510			270		26,2	270	290	920		
155	83,8		155	168	530			275		26,9	275	293	940		
160	85,4		160	173	550			280		27,6	280	296	960	45	
165	86,8		165	178	560			285		28,3	285	300	970		
170	88,2		170	190	580			290		29,0	290	305	990		
175	89,6		175	195	600	30		295		29,6	295	310	1010		
180	90,8		180	200	620			300		30,3	300	315	1030		
185	91,8		185	205	630			310		31,5	310	325	1060		
190	93,0		190	210	650			320		32,7	320	335	100	50	6
195	94,0		195	215	670			330		33,8	330	345	1130		

Durezza Brinell (HB)	Durezza Rockwell-		Durezza Vickers (HV)	Durezza Knoop con 5 N (HK)	Resistenza a trazione Rm (N/mm ²)	Durezza Short (Hs)	Durezza Mohs	Durezza Brinell (HB)	'Durezza Rockwell		Durezza Vickers (HV)	Durezza Knoop con 5 N (HK)	Resistenza alla trazione Rm (N/mm ²)	Durezza Short (Hs)	Durezza Mohs
	(HRB)	(HRC)							(HRB)	(HRC)					
340		34,9	340	356	1170					53,3	580	586			
350		36,0	350	366	1200					53,8	590	596		75	
359		37,0	360	376	1230					54,4	600	606			
368		38,0	370	385	1260	55				54,9	610	618			
376		38,9	380	395	1290					55,4	620	630			
385		39,8	390	405	1320					55,9	630	644		80	
392		40,7	400	414	1350					56,4	640	656			
400		41,5	410	422	1380					56,9	650	668			
408		42,4	420	432	1410	60				57,4	660	679			
415		43,2	430	442	1440					57,9	670	690			
423		44,0	440	452	1460					58,4	680	700			
430		44,8	450	463	1490					58,9	690	710			
		45,5	460	473						59,3	700	720		85	
		46,3	470	483		65				60,2	720	744			
		47,0	480	493						61,1	740	765			
		47,7	490	503						61,9	760	726			
		48,3	500	512			7			62,8	780	807			
		49,0	510	521						63,5	800	828		90	
		49,7	520	530						64,3	820	848			7,5
		50,3	530	540		70				65,0	840	870			
		50,9	540	550						65,7	860	890			
		51,5	550	558						66,3	880	920			
		52,1	560	568						67,5	920	960			
		52,8	570	577						68,0	940	970			

6. **Tracciatura linea di riferimento (ascisse) sul grafico:** una volta posizionata la carta sul rullo (12) sbloccarlo allentando l'apposita ghiera di fissaggio e, appoggiando il pennino, far compiere manualmente un giro completo al tamburo (12) in modo da ottenere una linea che servirà come riferimento per il grafico che verrà tracciato dalla macchina durante la prova. Bloccare il tamburo serrando opportunamente l'apposita ghiera.



Posizionamento carta sul tamburo (12)



Vedete la linea di riferimento che fa da base (asse delle ascisse quindi degli allungamenti) al grafico che si sta tracciando durante una prova.

7. **Applicazione della forza di trazione:** lo sforzo di trazione deve essere applicato gradatamente senza strappi con un incremento che, sino al carico di snervamento, non deve superare 10 N/s per 1 mm² di sezione della provetta; ciò corrisponde ad una velocità massima di allungamento, per l'acciaio, di circa 0,3% del tratto utile della provetta al minuto.

Oltrepassato il carico di snervamento, la velocità di incremento del carico può essere aumentata ma in modo che l'allungamento non superi il 25 % del tratto utile al minuto. Per le provette usualmente adottate, le suddette condizioni corrispondono ad una durata da 2 a 5 minuti. Si opera sulla macchina mediante gli appositi rubinetti di carico presenti sulla macchina (vedi foto).



Comandi per prove con carico stabilizzato

- 8. Lettura del carico di snervamento superiore:** quando si perviene allo snervamento, carico applicato (qui ci si riferisce al caso in cui lo snervamento avviene con bruschi cedimenti) bruscamente diminuisce (perché si ha un repentino allungamento della provetta) facendo retrocedere l'indice comandato dall'organo misuratore mentre l'indice trascinato si mantiene fermo: a questo punto, velocemente, si fa la lettura sull'indice fermo della carico totale di snervamento. L'indice comandato dopo varie oscillazioni riprende a girare con continuità verso carichi sempre crescenti.
- 9. Lettura del carico di rottura:** quando avviene la rottura l'indice comandato torna a zero mentre l'indice trascinato rimane fermo sul carico massimo raggiunto. Il valore letto in corrispondenza dell'indice trascinato è il carico totale di rottura (F_m).

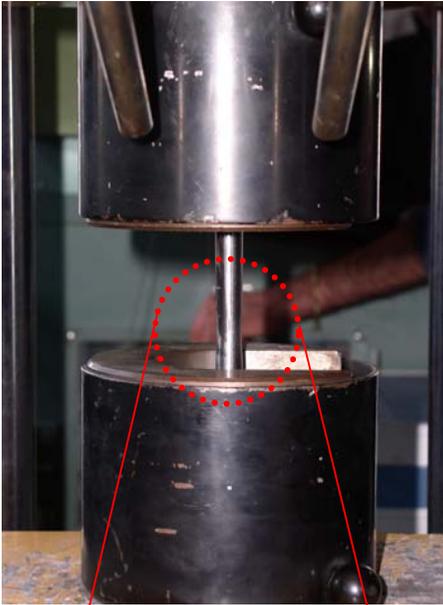
In questa fase è opportuno agire repentinamente sulla macchina in modo da:

1. sollevare il pennino nell'attimo immediatamente successivo alla rottura (facilmente riconoscibile dall'emissione del caratteristico suono dovuto alla decoesione delle fibre del materiale della provetta) per evitare segni indesiderati sul grafico forze /allungamenti;
2. azionare lo scarico rapido dell'olio per azzerare la pressione sul pistone oleodinamico;
3. chiudere il rubinetto della mandata e aprire lo scarico per mettere a riposo la macchina.

(Vedi foto)

N.B. La lettura su quadrante della prova di seguito fotografata è quella vista precedentemente.

Fasi della strizione e della successiva rottura della provetta (18 Ni Cr Mo 5, Laminato):



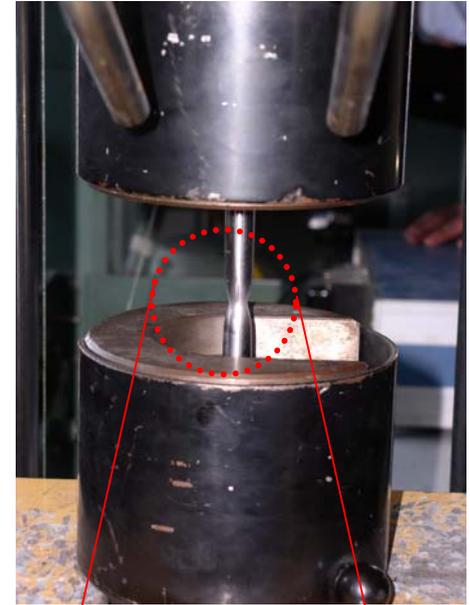
1



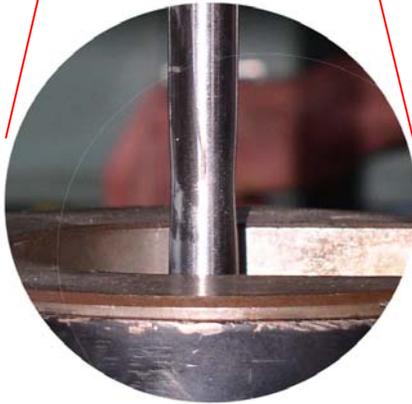
2



3



4



Rottura

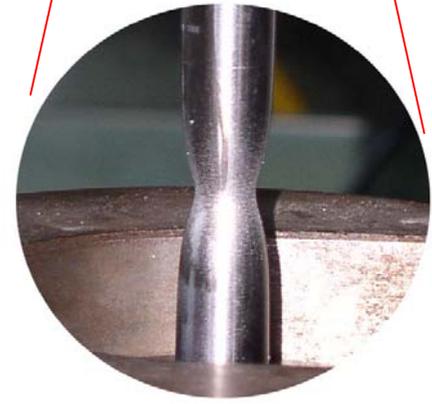
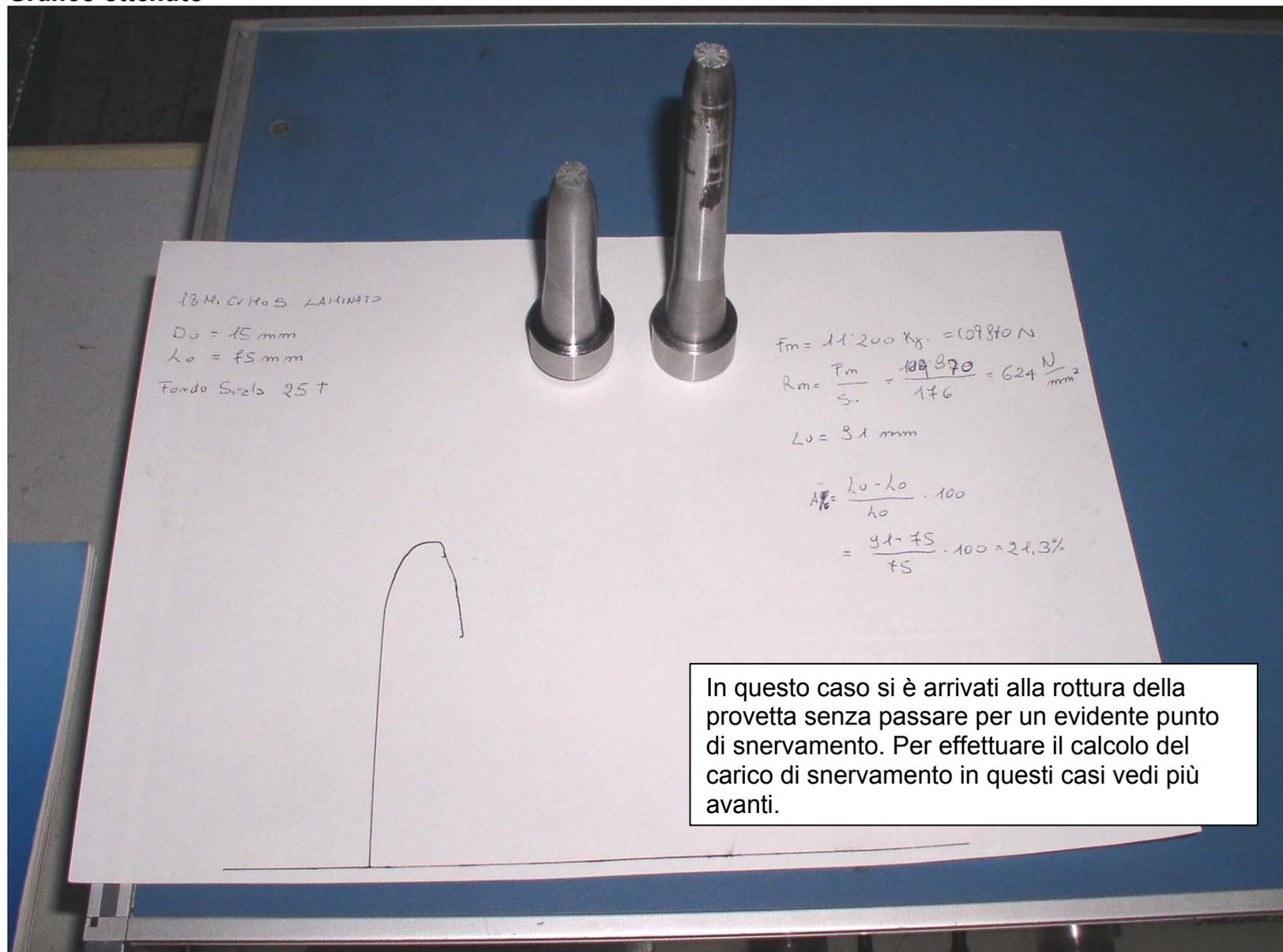


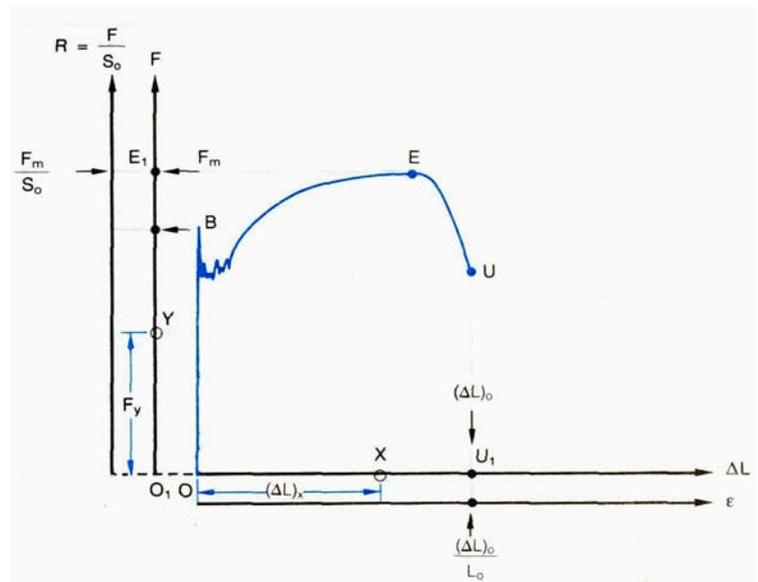
Grafico ottenuto



10. Calcolo degli altri parametri della prova: tolti dal dispositivo di afferraggio i due spezzoni della provetta, si procede alla misura delle dimensioni necessarie per il calcolo dell'allungamento percentuale, dell'indice di qualità, ecc.

2.7. Grafico carichi/allungamenti. Costruzione delle scale.

La prova di trazione porta come risultato immediato il grafico carichi/allungamenti; però il grafico è privo di scale che devono essere costruite con dati rilevati nel corso della prova e successivamente. Nella figura a lato è riportato un grafico di esempio sul quale sono state costruite delle scale di riferimento sulle ordinate e sulle ascisse nel seguente modo.



1. Scala dei carichi (ordinate):

La scala dei carichi si può costruire perchè si conoscono:

il carico nullo al punto O_1 corrispondente all'inizio del grafico O .

il carico F_m relativo al punto E (corrispondente al carico totale di rottura indicato dall'indice trascinato a fine prova).

Per ogni altro punto Y della scala F il valore del carico F_y si ottiene misurando (in mm) il segmento O_1E_1 e con la seguente proporzione:

$$\frac{O_1E_1}{F_m} = \frac{O_1Y}{F_y}$$

La scala dei carichi unitari R (riferiti all'unità di sezione della provetta) si ottiene dividendo per la sezione iniziale S_0 i valori di F . In realtà durante la prova il valore di S_0 diminuisce ma non se ne tiene conto.

2. Scala degli allungamenti (ascisse):

La scala degli allungamenti ΔL del tratto utile della provetta viene costruita attribuendo al punto U_1 il valore:

$$(\Delta L)_0 = L_u - L_0$$

dove:

L_u = lunghezza del tratto utile rilevato dopo la rottura della provetta;

L_0 = lunghezza tratto utile prima della prova.

Ciò vale nel caso in cui la rottura sia avvenuta nel tratto centrale (**terzo medio**). Se la rottura è avvenuta fuori dovranno essere applicate delle formule di correzione per il calcolo di ΔL (vedi più avanti).

Per ogni altro punto $(\Delta L)_x$ della scala degli allungamenti si ottiene misurando in mm il segmento OU_1 e con la proporzione:

$$\frac{OU_1}{(\Delta L)_0} = \frac{OX}{(\Delta L)_x}$$

La scala degli allungamenti unitari ε (allungamento di 1 mm del tratto utile) si ottiene dividendo i valori riportati sulla scala ΔL per L_0 :

da notare che essendo ΔL ed L_0 espressi in mm ed $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ esso è un numero adimensionale.

2.7.1 Studio del grafico carichi/allungamenti.

Simboli delle sollecitazioni usate nella prova di trazione:

Simboli per l'uso pratico	Simbolo per l'uso scientifico	Unità di misura	Denominazione
F		N	Carico totale
F _{eH}		N	Carico di snervamento superiore
F _{eL}		N	Carico di snervamento inferiore
F _{r(0,...)}		N	Carico al limite di deformazione permanente
F _{p(0,...)}		N	Carico di scostamento dalla proporzionalità
F _m		N	Carico massimo o carico di rottura
F _u		N	Carico ultimo
R		N/mm ²	Carico unitario
	σ	N/mm ²	Sollecitazione normale unitaria di trazione
R _{eH}	σ_s	N/mm ²	Carico unitario di snervamento superiore
R _{eL}	σ_i	N/mm ²	Carico unitario di snervamento inferiore
R _{r(0,...)}	$\sigma_{r(0,...)}$	N/mm ²	Carico unitario al limite di deformazione permanente
R _{p(0,...)}	$\sigma_{p(0,...)}$	N/mm ²	Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità
R _m	σ_m	N/mm ²	Carico unitario massimo o carico unitario di rottura
R _u	σ_u	N/mm ²	Carico unitario ultimo
A			Allungamento % dopo rottura su provetta unificata $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$
Z		%	Coefficiente percentuale di strizione
ε			Allungamento longitudinale unitario
ε_t			Allungamento trasversale unitario
E		N/mm ²	Modulo di elasticità normale (modulo di Young)

Nella figura a lato è tracciato un generico grafico carichi/allungamenti. Lo studio del grafico permette di definire i parametri della prova di trazione.

Accanto alla scala dei carichi totali F , è stata posta la scala dei carichi unitari R . analogamente, in ascisse, accanto alla scala degli allungamenti totali ΔL è stata posta la scala degli allungamenti unitari ε (allungamento subito da un mm del tratto utile della provetta).

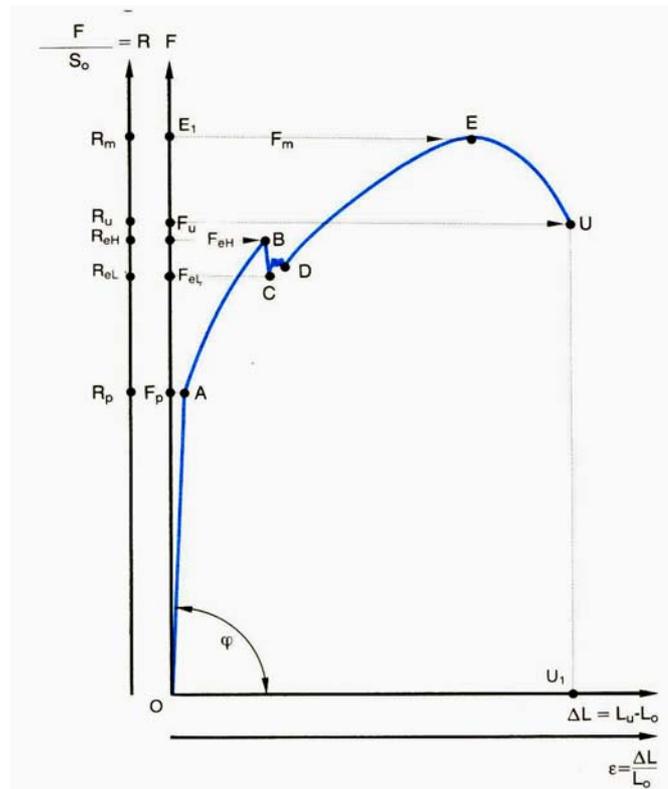


Fig. 2 Grafico generico Carichi/allungamenti.

Carichi

La provetta si allunga proporzionalmente al carico applicato come indicato dal tratto OA (legge di Hooke). Se il carico fosse riportato a zero l'allungamento scomparirebbe. In questo campo di variazione del carico si distinguono:

1. **Carico al limite di proporzionalità F_p :** superato il quale iniziano le deformazioni plastiche permanenti.
2. **Carico unitari al limite di proporzionalità R_p :** è il carico al limite di proporzionalità F_p riferito alla sezione unitaria di 1 mm^2 .

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

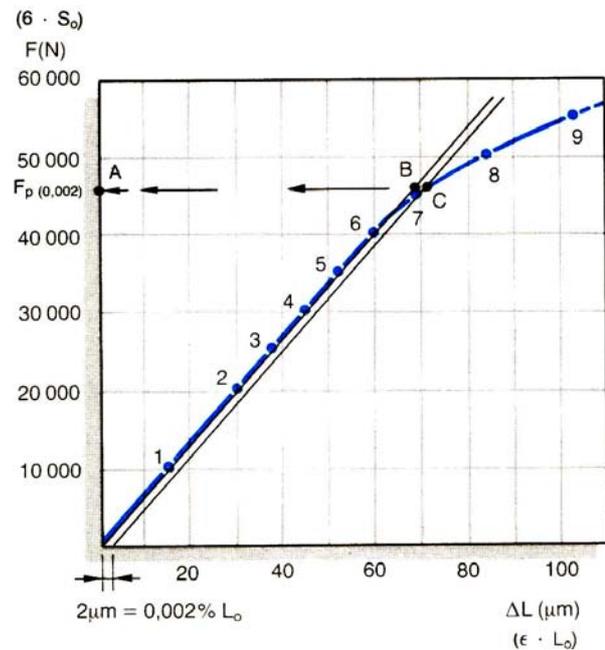
3. **Carico di scostamento dalla proporzionalità:** il punto A, in una prova pratica, è difficilmente individuabile, ne consegue che risulta pressoché impossibile conoscere sia F_p che R_p . pertanto si sostituiscono ad essi i due carichi convenzionali $F_{p(0,...)}$ e $R_{p(0,...)}$ i quali indicano il carico totale e unitario che hanno provocato un allungamento percentuale della quantità indicata tra parentesi. Le norme UNI non definiscono quale valore di $F_{p(0,...)}$ e $R_{p(0,...)}$ sostituiscono rispettivamente F_p e R_p , l'ideale è un valore percentuale, fra le parentesi, il più piccolo possibile; un ostacolo sta nello strumento di misura che non può andare oltre una certa precisione.

Esempio:

Si vuole determinare $F_{p(0,002)}$ di una provetta in acciaio con $L_0 = 100$ e $d_0 = 20$ mm.

In pratica si vuole conoscere qual è il carico al quale la provetta subisce un allungamento del tratto L_0 pari allo 0,002% ovvero di 0,002 mm su 100 mm totali.

La prova viene eseguita mediante l'uso di un estensimetro applicato alla provetta (vedi foto) il quale, collegato via cavo con il registratore di grafici elettronico, consente di avere un grafico con gli allungamenti fortemente amplificati (100x, 200x, 500x, 1000x). La prova si interrompe non appena ci si rende conto di aver oltrepassato il carico di proporzionalità (ovvero quando la retta del grafico inizia ad incurvarsi). L'amplificazione di cui sopra ci da come risultato un grafico simile a quello in figura sul quale possiamo agevolmente lavorare per determinare il carico di scostamento dalla proporzionalità.



Tratto iniziale del grafico carichi/allungamenti della prova di trazione con amplificazione elettronica sugli allungamenti di 500x.



Estensimetro applicato alla provetta.



Registratore di grafico comandato elettronicamente direttamente dall'estensimetro.

Dal punto di ascissa 0,002 mm si tira la parallela alla prima parte del grafico. Questa parallela incontra il grafico nel punto C a cui corrisponde per lettura diretta sulla scale delle F , $F_{p(0,002)} = 46.000$ N. Ciò significa che al carico corrispondente a 46.000 N corrisponde un allungamento del tratto utile della provetta pari alla quantità AC maggiore di AB di 0,002 mm (con la provetta sempre sotto carico).

Dal valore $F_{p(0,002)}$ così trovato si ricava il corrispondente valore unitario $R_{p(0,002)}$:

$$R_{p(0,002)} = \frac{F_{p(0,002)}}{S_0} = \frac{46000}{\frac{\pi \cdot 20^2}{4}} \cong 146,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

4. Carico da F_p a F_m (A B C D E del grafico di Fig. 2): aumentando la sollecitazione oltre F_p la provetta si allunga non più in modo proporzionale con i carichi ma, come indicato dall'arco AB, gli allungamenti iniziano ad essere maggiori e a prendere caratteri via via di plasticità (nel tratto AB gli allungamenti sono ancora di tipo elastico con aumento di allungamenti permanenti man mano che ci si avvicina al punto B). Dal punto B segue un periodo critico per la provetta con bruschi allungamenti permanenti (snervamento) fino al punto D del grafico. Dal punto D la provetta riprende ad allungarsi regolarmente secondo l'arco DE.

5. Carico unitario al limite di elasticità R_e : rappresenta il rapporto tra il carico F_e compreso fra A e B oltre il quale la provetta inizia a presentare deformazioni plastiche permanenti dopo la cessazione della sollecitazione a trazione e la sezione iniziale della provetta:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In realtà il valore di F_e è impossibile da ricavare ma è possibile determinare il carico a limite della deformazione plastica $R_{r(0,..)}$ (vedi prossimo punto) uguagliando R_e con $R_{r(0,002)}$; in questo caso esso viene definito **Carico unitario a limite di elasticità convenzionale**.

6. Carico unitario al limite delle deformazioni plastiche $R_{r(0,..)}$: si definiscono rispettivamente $F_{r(0,..)}$ e $R_{r(0,..)}$ il carico totale e unitario che danno luogo ad una deformazione permanente dello 0,..%.

La misurazione di questo carico è laboriosa e necessita di un estensimetro come per la determinazione del carico di scostamento dalla proporzionalità. In pratica la determinazione si effettua come segue:

1. determinare il valore di allungamento da verificare (valore tra parentesi);
2. si applica alla provetta un estensimetro di adeguata precisione;
3. si sollecita la provetta con carichi via via crescenti e ogni volta il carico deve essere mantenuto per $10 \div 15$ s;
4. prima di passare da un carico al successivo, la provetta viene scaricata e si misura la quantità di cui si è allungata (inizialmente gli allungamenti risulteranno essere nulli in quanto i carichi applicati sono inferiori al limite di elasticità F_e , successivamente le deformazioni saranno via via crescenti);
5. la prova continua fino a quando non si perviene ad un allungamento di poco superiore al valore in parentesi (se per caso si perviene ad un carico che dà un allungamento pari al valore in parentesi quello è il carico cercato).
6. si effettua un'interpolazione lineare fra l'ultimo ed il penultimo carico applicato e si ottiene il valore cercato.

Esempio:

Si vuole determinare $R_{r(0,2)}$ di una provetta dalle seguenti dimensioni:
 $d_0 = 20 \text{ mm}$; $L_0 = 100 \text{ mm}$

Soluzione:

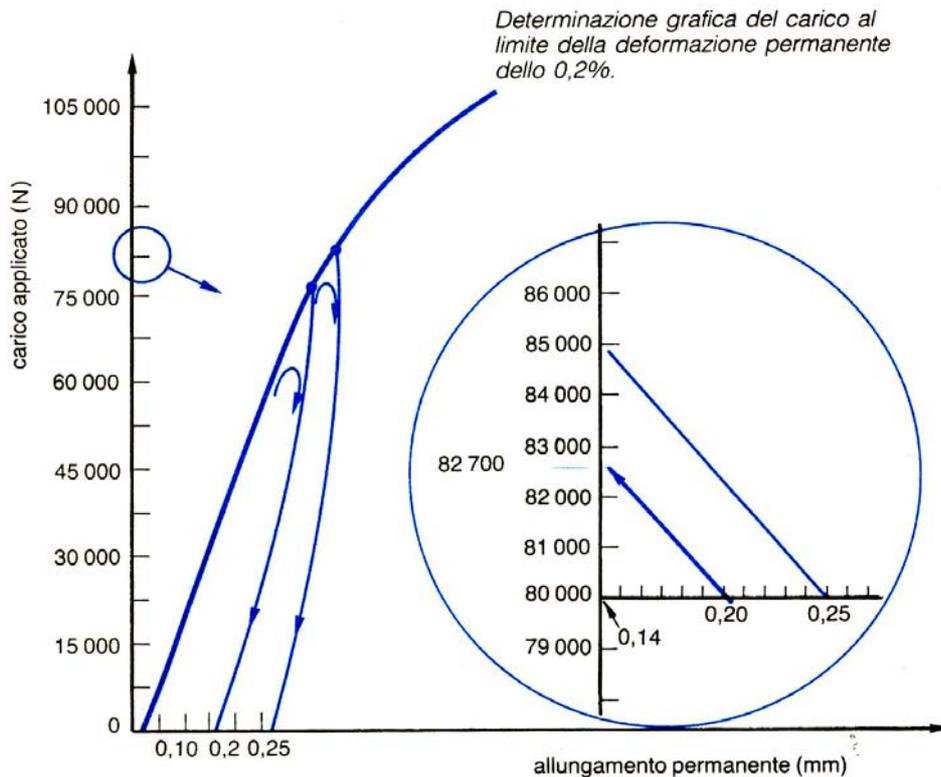
l'allungamento a cui si riferisce il simbolo $R_{r(0,2)}$ vale:

$$0,2\% \cdot L_0 = 0,2\% \cdot 100 = 0,2 \text{ mm}$$

Applicando carichi via via crescenti (ogni volta, ad esempio, di 5000 N), considerando solo i dati che interessano la prova si perviene a:

- con carico di 80.000 N l'allungamento permanente vale: 0,14 mm;
- con carico di 85.000 N l'allungamento permanente vale: 0,25 mm.

Si procede alla costruzione grafica seguente:



La figura in particolare si ricava:

1. posizionando l'origine di un sistema cartesiano di riferimento sul il carico e l'allungamento relativo al valore inferiore dell'allungamento richiesto;
2. collegare il valore successivo dell'allungamento ricavato durante la prova con il relativo carico in modo da ottenere una retta come in figura;
3. traslare la retta fino ad incrociare sull'asse delle ascisse l'allungamento voluto;
4. leggere il valore corrispondente sulle ordinate (indicato dalla freccia).

Con la costruzione grafica della figura sopra si ricava:

$$F_{r(0,2)} = 82.700 \text{ N}$$

da cui:

$$R_{r(0,2)} = \frac{F_{r(0,2)}}{S_0} = \frac{F_{r(0,2)}}{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4}} = \frac{82.700}{314,16} \cong 263 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

7. Carico unitario di snervamento: aumentando le sollecitazioni oltre il punto B del grafico si hanno generalmente dei bruschi allungamenti della provetta. La macchina, non essendo predisposta per aumentare il carico istantaneamente, diminuisce la forza di trazione applicata e il grafico assume una forma ad andamento alterno fino al punto D. Successivamente l'allungamento della provetta si stabilizza ed essa riprende a deformarsi con regolarità fino a rottura.

- In corrispondenza del punto B si ha il **carico di snervamento superiore** F_{eH} e il relativo **carico unitario** che vale:

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

- In corrispondenza del punto D si ha il **carico di snervamento inferiore** F_{eL} e il relativo **carico unitario** che vale:

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

NOTA: l'andamento alternato caratteristico da B a D del grafico non si presenta così evidente su tutti i materiali, pertanto la determinazione del carico di snervamento viene determinato convenzionalmente come di seguito descritto.

8. Carico unitario di snervamento convenzionale: si definisce carico di snervamento convenzionale nei seguenti due modi:

- $F_{eH} = F_{p(0,2)}$;

Analogamente:

- $F_{eH} = F_{r(0,2)}$.

- $R_{eH} = R_{p(0,2)}$;

- $R_{eH} = R_{e(0,2)}$.

9. Carico da E ad U del grafico: superata la fase di snervamento il grafico continua secondo un andamento regolare passando per il punto E corrispondente al punto di massimo. Successivamente si perviene al fenomeno della strizione consistente in un rapido allungamento della provetta, in una zona casuale, superiore della velocità di incremento del carico per cui il grafico presenta un andamento verso il basso. In questo caso la macchina non tiene conto della diminuzione di sezione della provetta nel punto di strizione soprattutto dopo lo snervamento. Se si costruisce il grafico con in ascisse la stessa scala degli allungamenti ma in ordinate $\frac{F}{S}$ (e non $\frac{F}{S_0}$), essendo S la sezione istantanea

della provetta durante la prova si otterrebbe il grafico indicato in figura dalla curva azzurra.

Come si vede nel grafico seguente in realtà il carico effettivo applicato alla provetta dopo lo snervamento è sempre in aumento sino al carico ultimo della rottura.

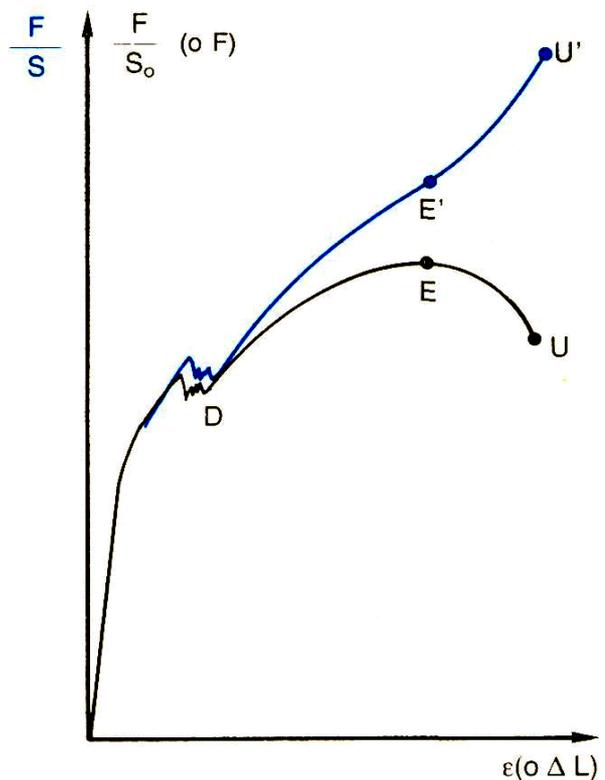


Grafico carichi/allungamenti, ottenuto considerando la sezione S_0 iniziale della provetta oppure la sezione variabile S (in azzurro).

10. Carico unitario di rottura (o carico massimo) R_m : è il carico totale o unitario individuato nel punto E del grafico di Fig. 2., rappresenta il parametro più importante della prova di trazione ed individua un indice di giudizio sulla qualità del materiale.

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

11. Carico unitario ultimo R_u : a partire dal punto E del grafico inizia la strizione della provetta fino alla rottura che avviene nella sezione ridotta nel punto U. Il carico unitario $\frac{F}{S}$ raggiunge nel punto U' un determinato valore dipendente dal materiale.

$$R_u = \frac{F_u}{S_0} \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

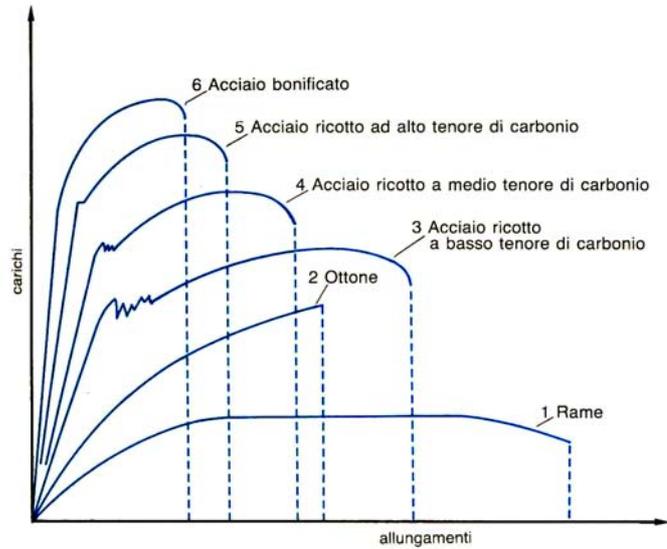
Il carico R_u ha scarso interesse; infatti la rottura avviene con questo carico ma solo dopo che nella provetta è stato superato il carico massimo F_m .

12. Coefficiente di strizione: si definisce **coefficiente di strizione** e si indica con Z il valore percentuale dato dalla seguente espressione:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

se la provetta è cilindrica:

$$Z = \frac{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_u^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4}} \cdot 100 = \frac{d_0^2 - d_u^2}{d_0^2} \cdot 100 \text{ [%]}$$

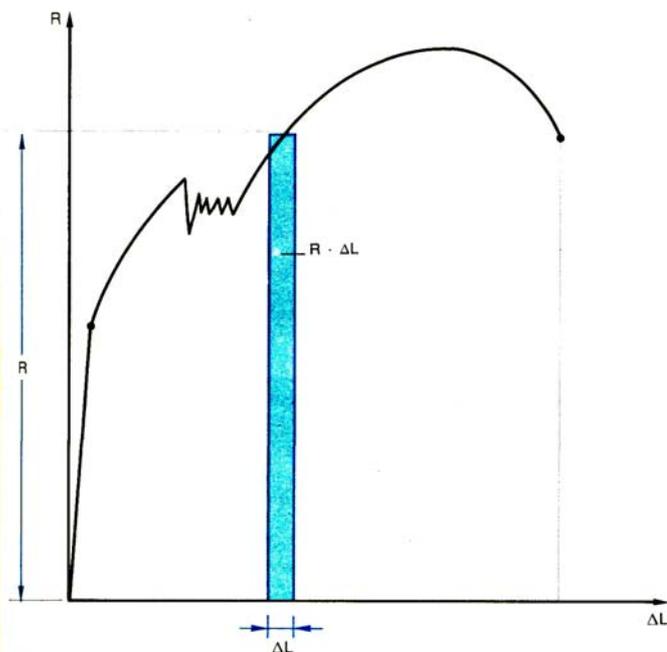


Diagrammi carichi-allungamenti di materiali metallici diversi.

13. Indice di qualità: in generale un acciaio è tanto migliore quanto più grandi sono R_m e A , per tener conto di entrambi i parametri si definisce l'indice di qualità Q nel seguente modo:

$$Q = R_m \cdot A$$

se si esamina il diagramma carichi/allungamenti di una prova di trazione (vedi figura a lato) è evidente che l'area tratteggiata è proporzionale a Q . Se la si considera come la somma di tanti rettangoli di area $R \cdot \Delta L$, essa rappresenta il lavoro di deformazione che è stato speso per deformare e rompere la provetta. L'indice di qualità di un materiale, quindi, esprime la capacità di assorbire quando è sollecitato.



Area del grafico carichi-allungamenti rappresentante il lavoro di deformazione che provoca la rottura della provetta.

L'indice di qualità è spesso considerato nei contratti di fornitura di materiali metallici ma non è previsto dalle norme UNI.

2.8. Modulo di elasticità normale

La parte iniziale di un grafico carichi/allungamenti è rettilinea per cui può essere rappresentata dalla relazione:

$$F = K \cdot \Delta L \quad (1)$$

con $K = \text{cost. di proporzionalità}$

Analogamente con riferimento ai valori unitari di:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2) \quad \text{e} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

vale la relazione

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

con $E = \text{cost. di proporzionalità detta modulo di elasticità o modulo di Young.}$

Dalla (4) si definisce che:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{tg}\varphi \quad (5)$$

La (5) sta ad indicare che il modulo di elasticità E assume un valore tanto più elevato quanto più piccolo è ε ovvero quanto più rigido è il materiale a cui si riferisce.

Se nella (5) si sostituiscono la (2) e la (3) si ha:

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

da cui si può ricavare l'allungamento:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_0}{E \cdot S_0} \quad (6)$$

Modulo di elasticità di alcuni materiali:

Materiale	Modulo di elasticità normale (in kN/mm²)
Acciaio	210
Ghisa	~100
Allumino	65
Leghe di magnesio	~43
Ottone	80
Legno	10 ÷ 15

2.9. Calcolo dell'allungamento dopo rottura

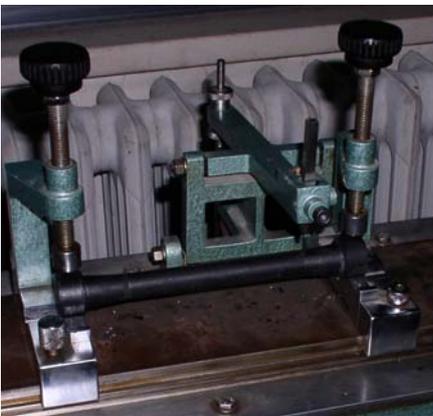
L'allungamento dopo rottura viene determinato nel modo seguente:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

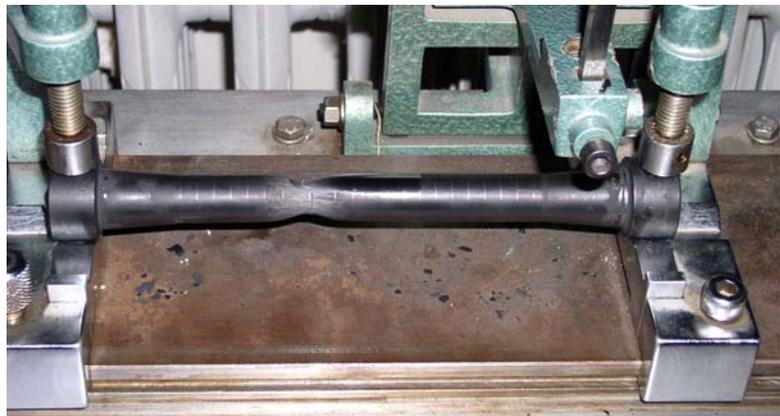
dove

L_0 = lunghezza tratto utile prima della prova

L_u = lunghezza tratto utile dopo la rottura ricongiungendo i due spezzoni.



Provetta posizionata per la tracciatura.



Provetta riposizionata dopo la rottura per la misurazione dell'allungamento.

Il valore A è una delle caratteristiche più importanti di un acciaio e deve essere valutato tenendo presente che esso varia numericamente con:

- la lunghezza del tratto utile;
- la posizione di rottura nel tratto utile.

Per questi motivi vanno usate provette proporzionate secondo quanto previsto dalle norme UNI, ovvero:

$$L_0 = 5 \cdot d_0$$

2.10. Calcolo dell'allungamento A in tutti i casi di rottura

Nella prova di trazione, ai fini della determinazione dell'allungamento percentuale dopo rottura, si possono presentare i seguenti casi:

- 1. Rottura entro il terzo medio:** se si considera il tratto utile diviso in tre parti uguali e la rottura avviene entro la parte centrale (entro il terzo medio) il calcolo di A si effettua, dopo aver ricongiunto i due spezzoni, applicando la seguente relazione:

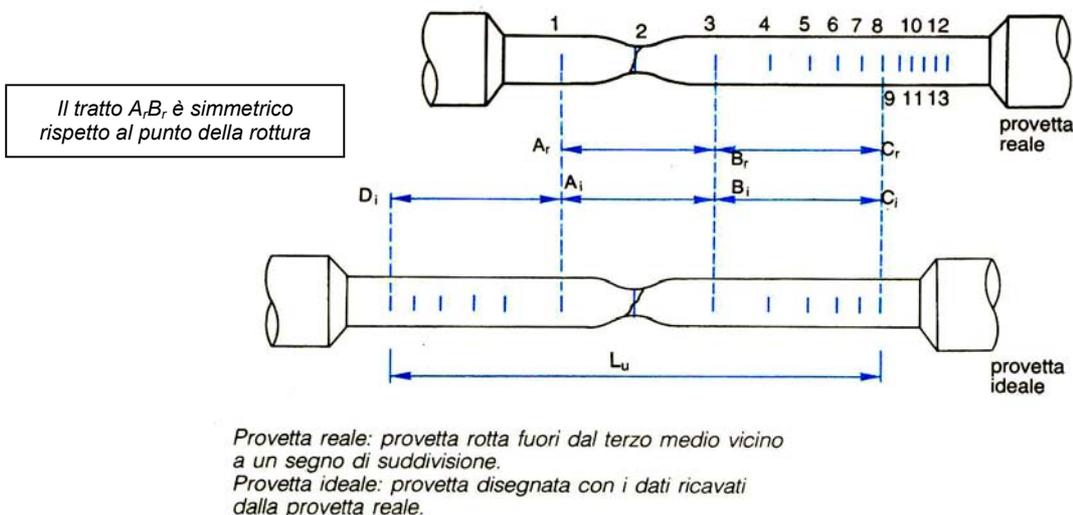
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

- 2. Rottura fuori dal terzo medio:** in questo caso non si può applicare la relazione precedente perché si otterrebbero valori dell'allungamento inferiori al reale. Si distinguono 2 casi:

1° Caso: rottura vicino a uno dei segni di suddivisione del tratto utile (tratto utile precedentemente suddiviso in 12 parti come nella figura). Ottenuta la rottura si constata che:

- la rottura è avvenuta fuori dal terzo medio;
- la rottura è avvenuta vicino al segno 2 e, pertanto, la si considera avvenuta sul segno 2.

Si può ora sostituire alla provetta rotta una ideale in cui la rottura è avvenuta esattamente al centro (vedi immagine).



Si risale al valore L_u misurando e sommando i seguenti tratti della provetta reale:

$$A_r B_r = A_i B_i; \quad B_r C_r = B_i C_i = D_i A_i;$$

in conclusione:

$$L_u = A_r B_r + 2B_r C_r$$

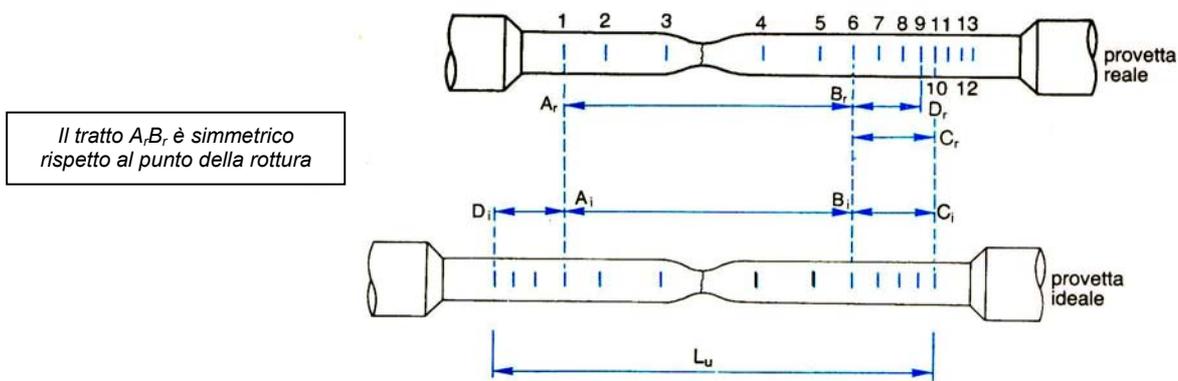
da cui

$$A = \frac{A_r B_r + 2B_r C_r - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

2° Caso: rottura quasi al centro tra due segni di suddivisione del tratto utile (tratto utile precedentemente suddiviso in 12 parti come nella figura). Ottenuta la rottura si constata che:

- la rottura è avvenuta fuori dal terzo medio;
- la rottura è avvenuta quasi al centro fra i segni 3 e 4 e, pertanto, la si considera avvenuta effettivamente al centro.

Si può ora sostituire alla provetta rotta una ideale in cui la rottura è avvenuta non al centro a metà fra il segno centrale e quello di sinistra (vedi immagine).



*Provetta reale: provetta rotta fuori dal terzo medio al centro di uno dei cilindri in cui è stata suddivisa.
 Provetta ideale: provetta disegnata con i dati ricavati dalla provetta reale.*

Si risale al valore L_u misurando e sommando i seguenti tratti della provetta reale:

$$A_r B_r = A_i B_i; \quad B_r C_r = B_i C_i; \quad B_r D_r = D_i A_i$$

in conclusione:

$$L_u = A_r B_r + B_r C_r + B_r D_r$$

da cui

$$A = \frac{A_r B_r + B_r C_r + B_r D_r - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Dai casi visti si può passare alla seguente regola generale valida quando la rottura avviene fuori dal terso medio.

- Si indichi con N il numero di parti in cui è stato diviso tutto il tratto utile della provetta.
- Si contino le n parti comprese nel tratto $A_r B_r$ simmetrico rispetto al punto della rottura.

a) se $N - n$ è pari:

1. si misura il tratto $A_r B_r$ comprendente le n parti;
2. si misura il tratto $B_r C_r$ comprendente $\frac{N-n}{2}$ parti;
3. l'allungamento vale:

$$A = \frac{A_r B_r + 2B_r C_r - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

b) se $N - n$ è dispari:

1. si misura il tratto $A_r B_r$ comprendente le n parti
2. si misura il tratto $B_r C_r$ comprendente $\frac{N-n+1}{2}$ parti;
3. si misura il tratto $B_r D_r$ comprendente $\frac{N-n-1}{2}$ parti;
4. l'allungamento vale:

$$A = \frac{A_r B_r + B_r C_r + B_r D_r - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

2.11. Risultati delle prove di trazione effettuate in laboratorio.

Materiale testato:

Acciaio da cementazione **18 Ni Cr Mo 5** UNI EN 10084

Dimensioni provette:

- diametro $d = 15$ mm;
- $S_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 176,7 \text{ mm}^2$
- lunghezza tratto utile $L_0 = 5 d = 75$ mm;
- provette con teste di aggancio.

Risultati delle prove di trazione eseguite in laboratorio:

Stato materiale	Carico di rottura F_m [N]	Carico unitario di rottura R_m [n/mm ²]	Allungamento. % A	Indice di qualità Q	Durezza HRC
Laminato	109.870	622	21,3	13.249	33
Ricotto	109.250	618	19,5	12.090	28
Temprato in olio a 850°C + rinvenimento a 180°C	227.360	1.285	12,5	16.025	48

segue

Grafico Forze – allungamenti ottenuti durante la prova.

227360 N
TEMPRA (in olio) A₂ 850 °C
~~227360~~ E RINVENUTO 180 °C

$$R_m = 128,5 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 12,0$$

$$Q = 16075$$

18 NiCrMo 5

109250 N
Ricotta ole 850 °C

$$R_m = 618 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 19,0$$

$$Q = 12090$$

2.11.1. Aspetto delle rotture

Materiale	Immagine rottura		Tipologia della rottura
18 Ni Cr Mo 5 v. UNI 7846 e UNI EN 10084 <i>Laminato</i>			Frattura a raggiera
18 Ni Cr Mo 5 v. UNI 7846 UNI EN 10084 <i>Ricotto</i>			Frattura a semicoppa
18 Ni Cr Mo 5 v. UNI 7846 UNI EN 10084 <i>Tempra + rinvenimento</i>			Frattura a semicoppa

2.11.2. Conclusioni

Come si può notare, e da quanto si andrà a descrivere nella sezione dedicata ai trattamenti termici, le prove hanno ottenuto i risultati previsti in riferimento alle caratteristiche possedute dal materiale prima e dopo i diversi trattamenti termici.

Tutti i trattamenti termici eseguiti sulle provette hanno dato sicuramente risultati accettabili:

- la ricottura ha disteso il materiale abbassando leggermente il carico di rottura massimo e diminuendo la durezza;
- la tempra e il successivo rinvenimento hanno ottenuto una struttura molto resistente aumentando notevolmente il carico massimo di rottura, l'indice di qualità e la durezza.

PROVE DI DUREZZA

1. Prova di durezza Brinell	3
1.2. Procedura della prova	4
1.3. Calcolo del carico di rottura a trazione conoscendo la durezza Brinell	6
2. Prova di durezza Vickers	7
2.1. Modalità di esecuzione della prova	8
2.2. Procedura della prova	8
2.3. Descrizione della prova	8
3. Prova di durezza Rockwell	11
3.1. Generalità	12
3.2. Descrizione della procedura seguita durante la prova	12
4. Considerazioni sui risultati dell'esercitazione n. 1	15

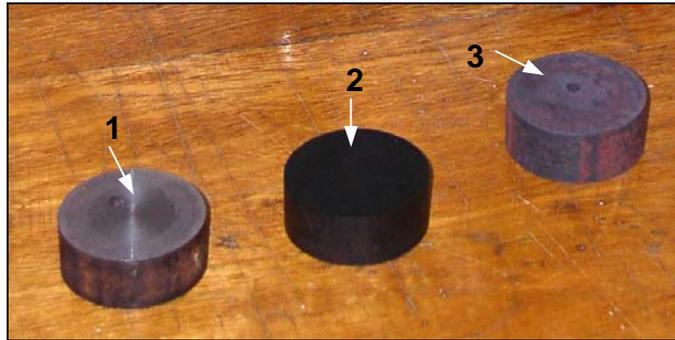
Prove di durezza

Si tratteranno le prove di durezza descrivendo delle esercitazioni svolte in laboratorio.

L'esercitazione propone di eseguire delle prove di durezza su di un determinato materiale, nella fattispecie un C 60 e riportare i dati su tabelle per poi commentarli.

Con questo materiale abbiamo realizzato n. 3 provini (vedi foto) i quali sono stati trattati termicamente in modi differenti:

1. non trattato termicamente;
2. temprato;
3. ricotto.



Su ogni provino sono state effettuate differenti prove di durezza:

1. Prova di durezza Brinell (da UNI 560);
2. Prova di durezza Vickers (da UNI 1955);
3. Prova di durezza Rockwell (da UNI 520).

Queste prove fanno parte delle prove meccaniche statiche non distruttive ovvero che prevedono l'applicazione dei carichi in modo statico e che non prevede la rottura del provino.

Macchine per la realizzazione delle prove di durezza



1



2



3

Andiamo ora a commentare e descrivere le procedure di esecuzione delle prove.

1. Prova di durezza Brinell

La prova di durezza Brinell consiste nel premere una sfera di materiale duro, di prefissato diametro **D**, sulla superficie del provino in esame con un carico di prova **F** per un prestabilito intervallo di tempo **T**.

Si definisce durezza Brinell **HB** (**S=steel=acciai**) il rapporto tra il valore di carico di prova **F** e l'area dell'impronta lasciata dalla sfera (penetratore) **S** sulla superficie del materiale, misurata dopo aver tolto il carico.

$$HBS = 0,102(*) \cdot \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

(*) il fattore di conversione 0.102 serve a mantenere invariati, per comodità, i valori della durezza Binell dopo l'ingresso del Sistema Internazionale rispetto a quelli usati con il Sistema Tecnico

in definitiva possiamo dire che :

$$F = m \cdot a \quad [1N = 1Kg \cdot 1m/s^2] \quad (1)$$

ma anche che il peso *P* in Kgf corrisponde a:

$$P = m \cdot g \quad [1Kgf = 1Kg \cdot 9,81m/s^2] \quad (2)$$

da cui $1Kg = \frac{1Kgf}{9,81m/s^2} \quad (3)$

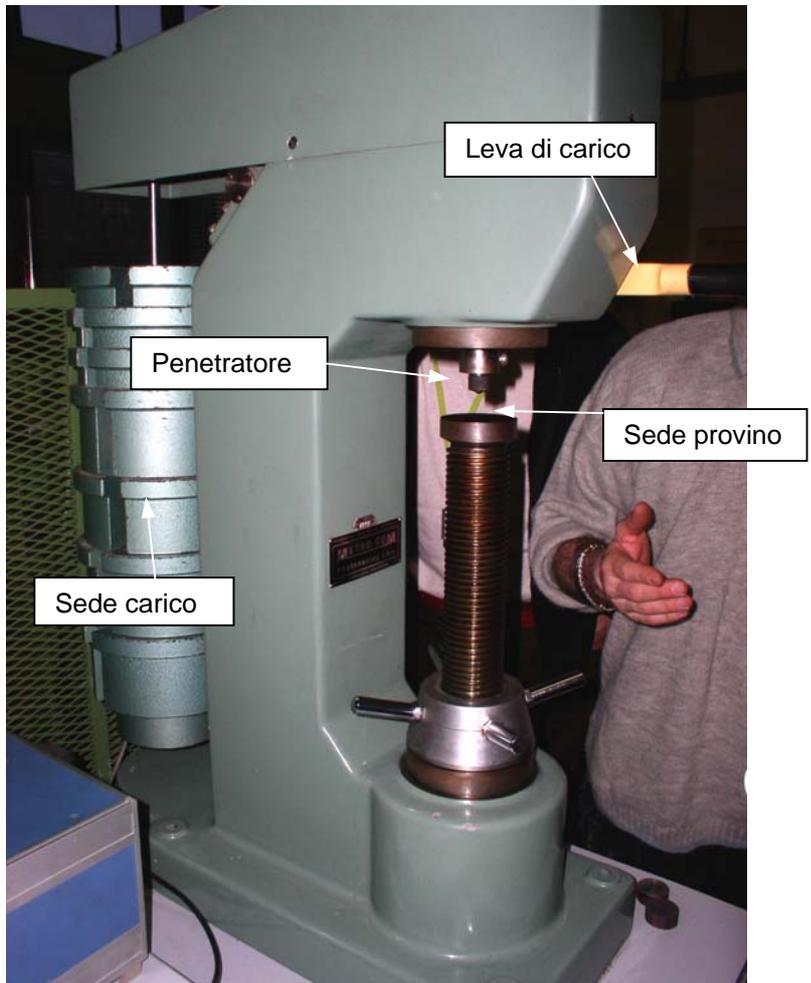
sostituendo la (3) nella (2) avremo che:

$$1N = \frac{1Kgf}{9,81m/s^2} \cdot 1m/s^2 \quad \text{ovvero} \quad 1N = 1Kgf \cdot \frac{1m/s^2}{9,81m/s^2} \quad \text{da cui} \quad 1N = 1Kgf \cdot 0,102(\text{numero puro})$$

pertanto si evince che esprimendo la forza *F* in N e moltiplicando per 0,102 si ottengono i Kgf pertanto la durezza verrà espressa in Kgf/mm², ma essendo stato, il Kgf, abolito dal SI, l'UNI ha convenuto di dichiarare il valore della durezza HB privo di unità di misura.

Nella tabella seguente andiamo a racchiudere i parametri da noi scelti (secondo norma UNI 560):

D (mm)	F (N)	T (s) per il carico	T (s) di mantenimento	Temperature
10	29400	~15	~10	Non rilevata



1.2. Procedura della prova

A questo punto si vanno a descrivere le varie fasi che hanno caratterizzato la prova:

Fase 1: taratura della macchina

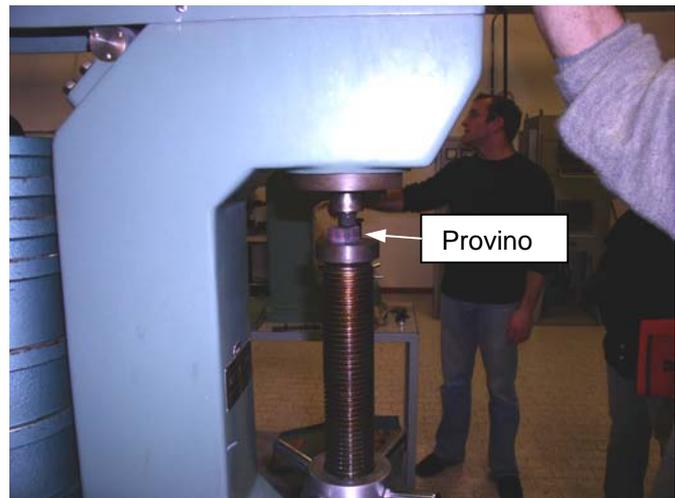
non avendo un provino con durezza HB definita, la taratura è stata eseguita per interpolazione dei valori risultanti dalla prova HRB su di un provino campione mediante l'ausilio di tabelle.

Fase 2: applicazione del carico **F**.

Il provino viene accostato al penetratore in modo da stabilire un contatto solido fra i due.

In seguito viene applicato il carico **F** mediante una leva azionata manualmente in un tempo di rilascio variabile fra i 2 e gli 8 secondi.

Una volta applicato il carico vengono contati 15 secondi di permanenza in modo da permettere una ulteriore penetrazione della sfera nel materiale. Ora il carico può essere tolto definitivamente riportando la leva alla posizione originale.

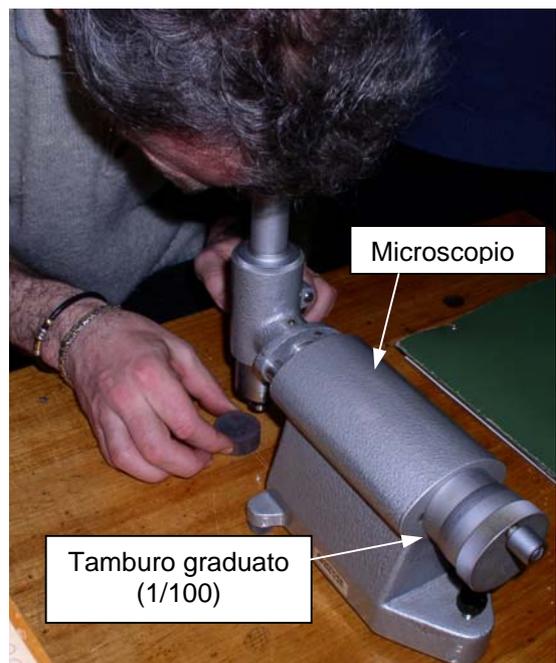


Fase 3: misura dell'impronta **d**

per la misurazione dell'impronta ci siamo avvalsi di un microscopio che ci ha dato la possibilità di poter rilevare, mediante un "crocino" di riferimenti e un tamburo graduato, il diametro dell'impronta lasciata dal penetratore sulla superficie del pezzo.

Le impronte rilevate sulle facce dei nostri provini in esame sono state le seguenti:

Materiale C 60	Diametro d (mm)
Non trattato	4.00
Temprato	3.10
Ricotto	3.90



Fase 4: determinazione dell'attendibilità della prova.

Per essere attendibile la prova appena effettuata deve essere valutata attentamente verificando che i risultati ottenuti fin'ora siano corretti e per tanto valutabili nella fase 5 successiva.

La prova si dice ideale quando il rapporto tra il diametro dell'impronta **d** e il diametro **D** del penetratore è uguale a :

$$\frac{d}{D} = 0.375$$

l'esperienza ha insegnato che la validità della prova è verificata quando:

$$\frac{d}{D} = 0.25 \div 0.5$$

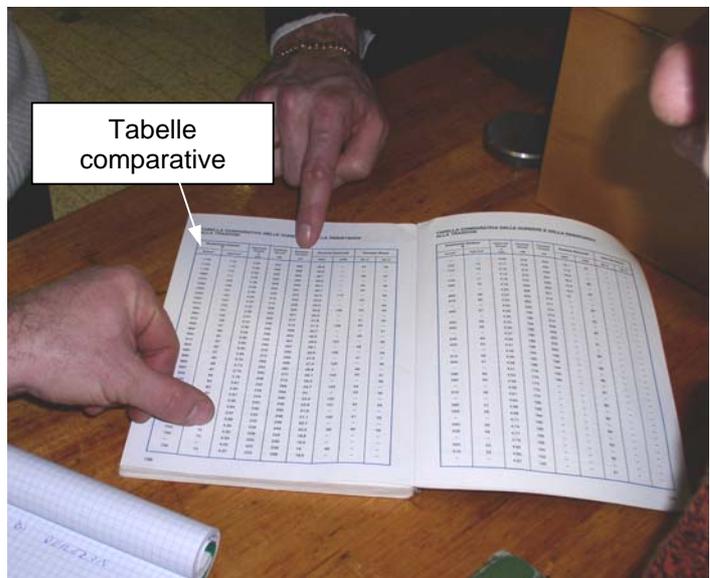
pertanto dalla verifica si ottiene:

Materiale C 60	Diametro d (mm)	d/D	Attendibilità
Non trattato	4.00	0.4	Si
Temprato	3.10	0.31	Si
Ricotto	3.90	0.39	Si

Per quanto esposto sopra diciamo che le nostre prove hanno verificato il criterio di attendibilità. Andiamo avanti.

Fase 5: calcolo della durezza.

Stabilita l'attendibilità della prova siamo andati a ricercare i valori corrispondenti ai diametri delle impronte su delle tabelle di conversione sulle quali abbiamo potuto leggere il valore della durezza HBS senza dover fare nessun tipo di calcolo.



Nella tabella riportiamo i risultati ottenuti:

Materiale C 60	HBS _{10/29400/10}	Tempo di permanenza (s)
Non trattato	228	
Temprato	388	
Ricotto	240	

1.3. Calcolo del carico di rottura a trazione conoscendo la durezza Brinell

Molti materiali presentano un carico di rottura proporzionale alla loro durezza. Qui di seguito si riportano alcune relazioni che permettono di calcolare il carico di rottura in modo abbastanza preciso ma non possono di certo sostituire le relative prove di trazione.

Materiale	Relazione HB-Rm
Acciaio	0,53xHB
Ghisa perlitica	0,12xHB
Rame e sue leghe	0,55xHB

In particolare le suddette relazioni riguardanti gli acciai sono valide per durezza HB ≤ 430 e non possono essere applicate:

- per gli acciai austenitici;
- per gli acciai ipereutettoi;
- per gli acciai che hanno subito indurimenti superficiali.

2. Prova di durezza Vickers

Questo metodo estende e perfeziona il metodo Brinell. Infatti:

- ha un campo di applicazione illimitato sia per la durezza che per lo spessore del pezzo da provare senza la necessità di cambiare il penetratore, con la sola modifica del carico di prova;
- il numero di durezza Vickers è praticamente indipendente dal carico di prova applicato ed è in ogni caso equivalente al numero Brinell ottenuto nelle condizioni di prova ideale ($d/D=0,375$).

La prova Vickers consiste nel far penetrare nel materiale un penetratore di diamante a forma di piramide a base quadrata al quale viene applicata una forza F e nel misurare la lunghezza della diagonale d dell'impronta permanente lasciata sul pezzo dopo aver tolto il penetratore. La durezza Vickers HV è data dalla relazione seguente:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{S}$$

dove:

F = forza applicata espressa in **N**

S = superficie dell'impronta in **mm²**

0,102 rappresenta il solito fattore di conversione **1 N = 0,102 Kgf**.

Il penetratore ha la forma di una piramide retta a base quadrata; l'angolo tra le facce opposte della piramide è di **136°±0,5°**: esattamente l'angolo di penetrazione ideale della durezza Brinell. Per questo motivo i valori della durezza HV coincidono con quelli della HB fino a valori per HB = 350, oltre questa durezza si ha la deformazione della sfera mentre nella HV si procede senza problemi.

Il rilevamento della durezza HV presenta come unica differenza la definizione di **S** infatti l'area dell'impronta corrisponde alla somma delle quattro facce laterali. Per **S** si può assumere il valore risultante dalla seguente formula:

$$S = \frac{d^2}{1,85436}$$

dove d è la diagonale dell'impronta lasciata dal penetratore.

Pertanto sostituendo alla precedente equazione si ottiene:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

In ultima analisi, per ottenere il valore della durezza Vickers, è sufficiente determinare, oltre al carico, la sola misura della diagonale dell'impronta lasciata sul pezzo in esame.

2.1. Modalità di esecuzione della prova

In riferimento alle norme **UNI** la prova deve rispettare quanto segue.

Carico	Tempo di applicazione	Tempo di permanenza	Temperatura
49÷980 (N) ± 1%	2÷10 (s)	10÷15 (s)	10÷30 °C

Il carico di prova normale per gli acciai è di **294 N (30 Kgf)**.

Il simbolo HV senza ulteriori specificazioni indica che la prova è stata eseguita con il carico normale di 294 N e con durata di permanenza normale del carico secondo norma. In condizioni di prova differenti il simbolo HV viene accompagnato da un pedice che indica rispettivamente i **valori di carico (in Kgf)** e il **tempo di permanenza** della forza applicata.

Es. **HV_{30/20}**

La **superficie del pezzo** su cui viene fatta la prova, date le dimensioni irrisorie dell'impronta lasciate dal durometro Vickers, deve essere **liscia e levigata; piana o curva con raggio di curvatura non inferiore ai 5 mm**.

2.2. Procedura della prova

La prova con durometro Vickers deve essere effettuata secondo le seguenti fasi:

Fase 1: scelta del carico (standard per gli acciai 30Kgf);

Fase 2: taratura della macchina,

Fase 3: applicazione del carico sul provino

Fase 4: misura della diagonale dell'impronta;

Fase 5: calcolo della superficie dell'impronta;

Fase 6: calcolo del valore di durezza

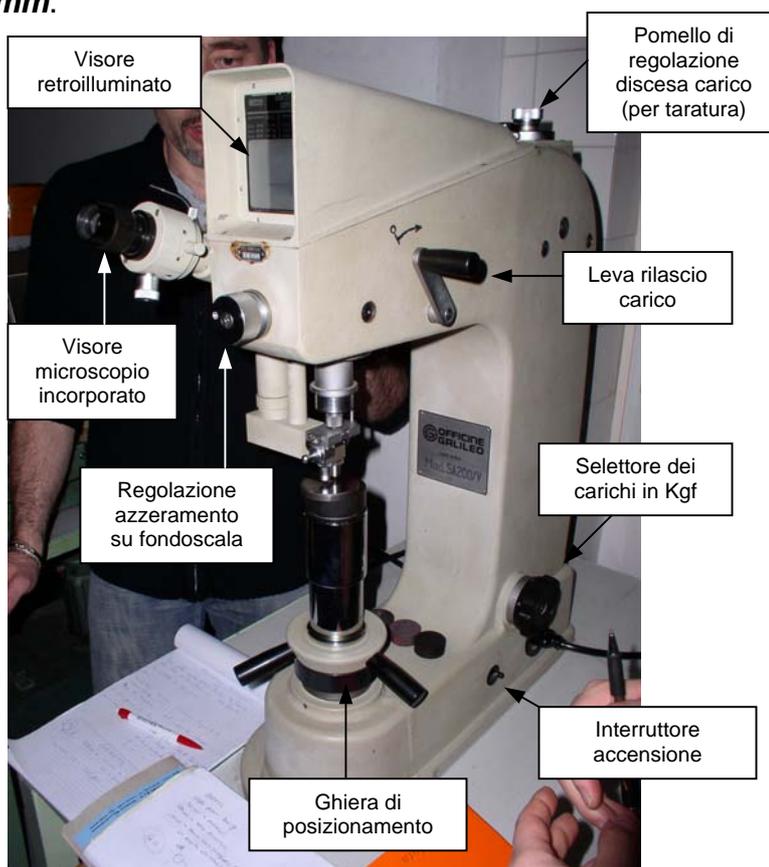
Fase 7: rappresentazione del risultato.

2.3. Descrizione della prova

Fase 1: Nella tabella seguente sono racchiusi i parametri scelti (secondo norma UNI):

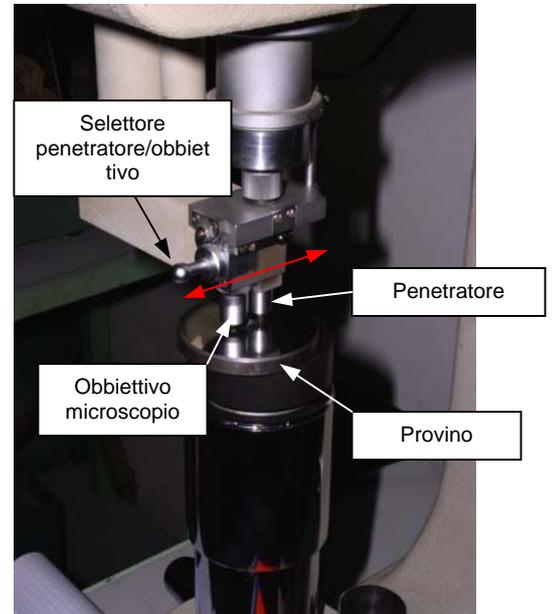
F (N)	T (s) per il carico	T (s) di mantenimento	Temperature
294	~10	~15	Non rilevata

Il carico **F** viene selezionato mediante un selettore posizionato alla base della macchina.



Fase 2: la taratura della macchina viene effettuata eseguendo almeno tre prove su un provino di durezza HV nota e considerata la media dei valori riscontrati si confronta con il valore noto. Nell'eventualità di una discrepanza si agisce sul pomello di regolazione della velocità di discesa del carico o si varia il tempo di permanenza del carico sempre restando nei tempi richiesti dalla UNI.

Fase 3: (selezionare il penetratore) dopo aver preventivamente posizionato il provino mediante la ghiera di posizionamento è possibile applicare il carico. La pressione di precarico del pezzo sul penetratore viene raggiunta quando il fondoscala della scala mobile sul visualizzatore retroilluminato si posiziona sulla linea di riferimento (fissa). La regolazione precisa si effettua mediante il pomello frontale sotto il visore. (verificare sempre di selezionare opportunamente il penetratore o l'obiettivo a seconda dell'operazione da svolgere).



Fase 4: trascorso il tempo necessario di permanenza del carico si effettua mediante il microscopio incorporato la lettura della misura della diagonale dell'impronta sul pezzo.

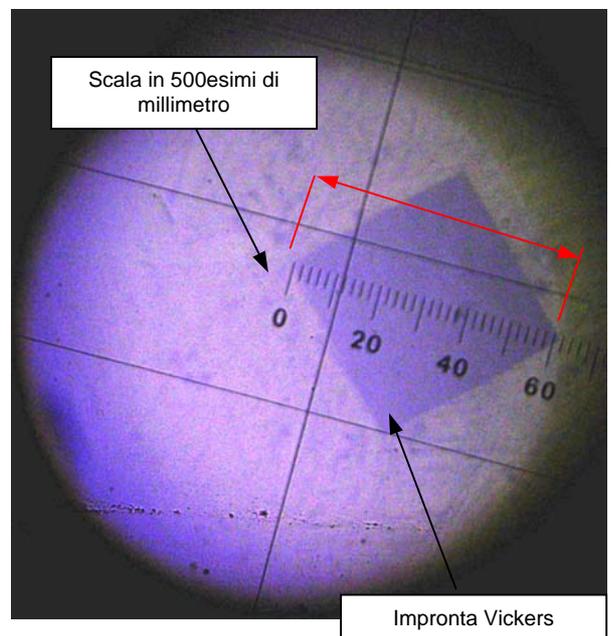
Fase 5: (selezionare l'obiettivo) La lettura dell'impronta viene effettuata dal visore del microscopio dopo aver posizionato l'obiettivo sull'impronta. Il quadrante presenta una scala che deve essere opportunamente posizionata mediante gli appositi pomelli sull'impronta in modo da poter effettuare una lettura coerente della diagonale. (vedi foto).

La scala graduata, rappresentata da divisioni in 500esimi, fornisce un valore che deve essere successivamente convertito in mm mediante una semplice proporzione:

$$1 \text{ divisione} = 0,005 \text{ mm}$$

quindi: **valore in 500esimi x 0,005 = d in mm.**

Nella lettura in foto il valore in 500esimi rilevato è 62 (500esimi di millimetro) che corrispondono a 0,31mm.



Fase 6: per ricavare il valore della durezza HV si può applicare la formula precedentemente citata oppure usare delle tabelle dove vengono indicati i valori HV in riferimento alle condizioni di prova e del valore dimensionale della diagonale dell'impronta.

Per l'impronta con diagonale di 0,31 mm si avrà:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{294}{0,31^2} = 578,5$$

578 HV_{30/20}

Fase 7: le norme UNI hanno stabilito che la durezza Vickers deve essere così rappresentata:

valore della durezza – simbolo HV – indice carico – indice tempo mantenimento

Es.

500 HV_{30/20} = durezza Vickers di 500 con carico di prova 30 Kgf (294 N) applicato per 20 s.

La prova di durezza Vickers è stata effettuata su un provino usato per determinare la curva di temprabilità mediante prova Jominy. I valori HV rilevati potranno essere letti nella sezione riguardante la prova di temprabilità Jominy.

3. Prova di durezza Rockwell

Il metodo Rockwell mantiene il criterio adottato dalle altre prove ovvero si mettono in opposizione il materiale e un penetratore che viene caricato e spinto perpendicolarmente sulla superficie del provino.

La differenza sostanziale sta nel fatto che ora la durezza non viene valutata in riferimento alla superficie dell'impronta bensì dalla profondità di penetrazione.

Il durometro Rockwell ha la possibilità di essere armato con diversi tipi di penetratori ognuno dei quali lavora con carichi specifici.

La scelta dell'adozione di questo o quel penetratore ricade nella valutazione del materiale da esaminare in particolare:

- con il metodo HRB si misura la durezza di materiali "teneri": sino alla durezza massima HB=200. Per questi materiali il valore della durezza HRB va da 20 a 100;
- con il metodo HRC si misura la durezza di materiali relativamente duri: per una durezza HB>200. Per questi materiali il valore numerico di HRC va da 20 a 70.

Penetratore e forze di carico per la prova Rockwell

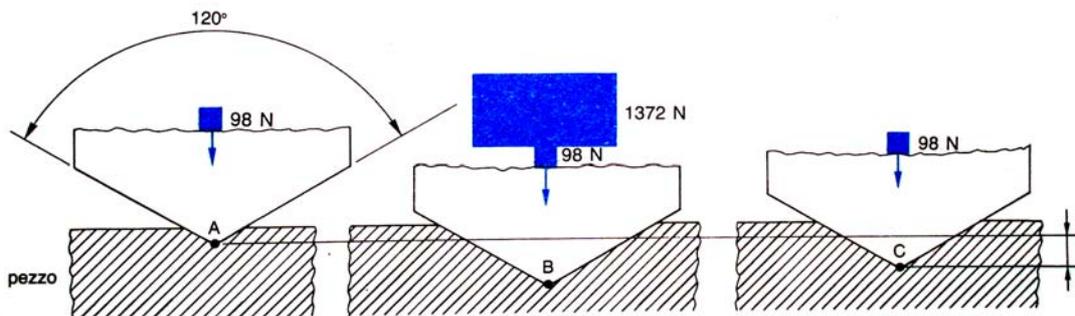
Scala Rockwell	Penetratore	Forze (N)			
		F ₀ precarico (N)	F ₁ carico eff. (N)	Carico tot. (F ₀ +F ₁) (N)	F ₀ finale (N)
HRB	Sfera acciaio Ø=1/16"	98±2	889±4	980±6	98±2
HRC	Cono di diamante con angolo di apertura =120°	98±2	1372±7	1470±9	98±2

Il valore della durezza ricavata mediante il durometro Rockwell vengono date dalle seguenti relazioni:

$$HRB = 130 - e$$

$$HRC = 100 - e$$

Dove *e* rappresenta la distanza dei punti A e C ed esprime l'accrescimento permanente dell'impronta imputabile all'applicazione del carico di prova come visibile in figura (rilevata automaticamente dalla macchina con tolleranza di ±0.001mm corrispondenti a ±0.5 HRC):



La differenza di profondità esistente fra i punti B e C rappresenta il ritorno elastico del materiale.

3.1. Generalità

La prova di durezza Rockwell viene eseguita secondo la procedura di seguito descritta:

1. Scelta del campo della durezza HRB o HRC in riferimento al materiale;
2. Caricare la macchina con i pesi occorrenti al raggiungimento del carico necessario;
3. Taratura della macchina;
4. Posizionamento e applicazione pre-carico (F_0 98 N);
5. Applicazione del carico;
6. Completata la discesa del carico si attendono circa 20 – 30 secondi, trascorsi i quali si rilascia il carico F_1 riportando la leva alla posizione originale;
7. Lettura del valore dell'indice sul quadrante dell'indicatore a comparatore che ci da la durezza rilevata.

3.2. Descrizione della procedura seguita durante la prova

Fase 1: Scelta del campo della durezza HRB o HRC.

La scelta del metodo da adottare, essendo vincolata dal materiale in esame, e avendo riscontrato in questo una durezza HB > 200, ricade sul metodo **HRC**.

Fase 2: Caricamento della macchina con i pesi necessari

Per il raggiungimento del carico di prova occorre posizionare nell'apposita sede (la macchina in uso non possiede un commutatore per il carico in automatico) i pesi necessari manualmente.

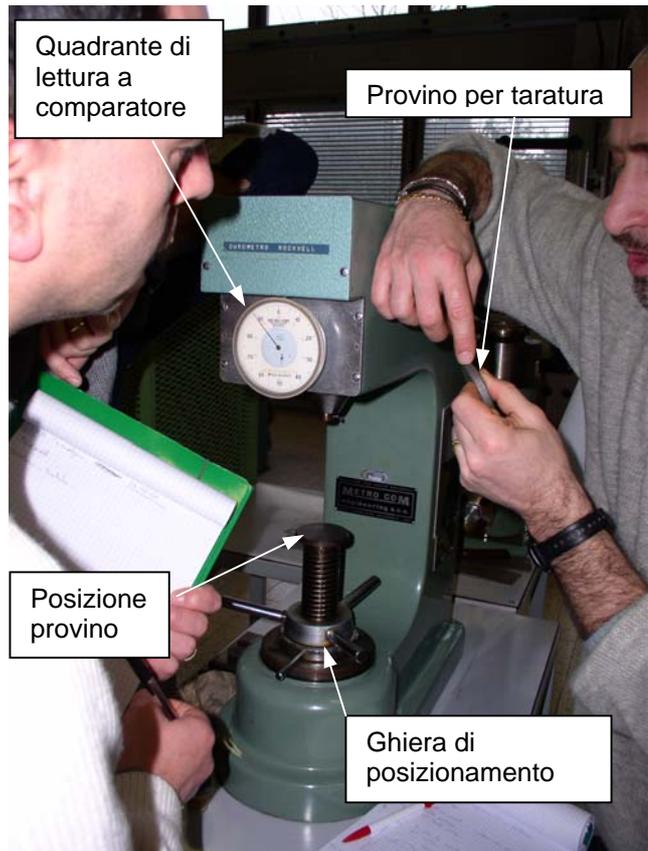
I blocchi da aggiungere sono punzonati progressivamente, quelli da posizionare sul supporto si possono individuare mediante la lettura di tabelle apposte sulla macchina. (vedi figura).



Fase 3: Taratura della macchina

La taratura si effettua eseguendo delle misurazioni su un provino con durezza HRC nota, nel nostro caso abbiamo usato un provino con HRC $61 \pm 0,5$.

Se il valore riscontrato dalla macchina non corrisponde al valore noto bisogna agire sul rubinetto che regola la velocità di applicazione del carico. Ripetere la procedura fino all'effettivo riscontro con il valore di durezza di riferimento.

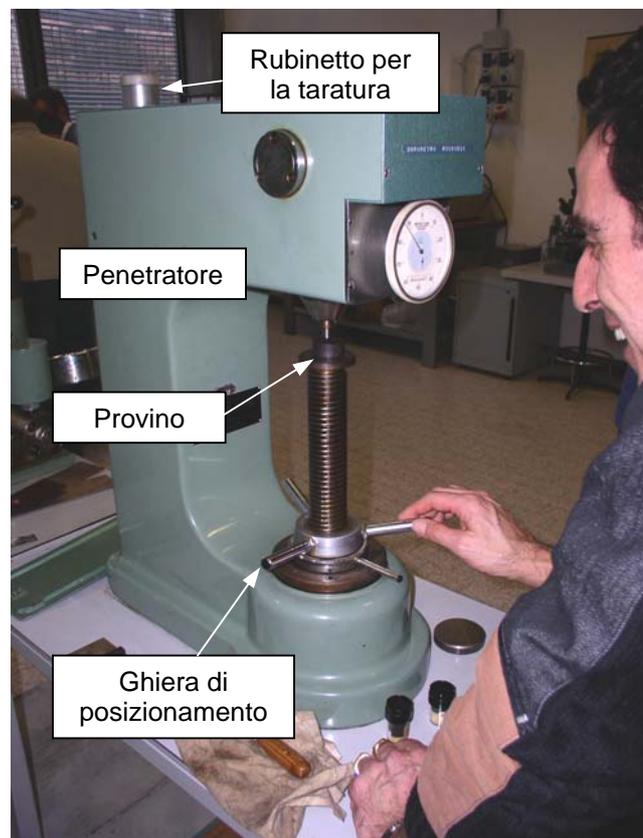


Fase 4: Posizionamento e applicazione pre-carico:

Preso il provino lo abbiamo appoggiarlo sul penetratore ad eseguire una pressione mediante la ghiera di posizionamento fino a che l'indice dell'indicatore a comparatore indicasse 0 e il pallino rosso di riscontro. In questo modo siamo sicuri di aver eseguito una pressione corrispondente al pre-carico necessario (98 N);

Fase 5: Applicazione del carico:

Ruotando la leva che sblocca la discesa del carico. L'applicazione della forza viene effettuata automaticamente dalla macchina con una discesa controllata e applicata in un tempo variabile regolabile mediante un "rubinetto";



Fase 6: Rilascio del carico principale

Trascorsi circa 30 secondi si procede al rilascio del carico principale $F = 1372 \text{ N}$

Fase 7: si procede ora alla lettura del valore di durezza HRC individuato dall'indice sul quadrante a comparatore.

A questo punto è opportuno ripetere per alcune volte la prova. Nel nostro caso, nel rispetto delle direttive che normano la procedura (UNI), abbiamo ripetuto la prova per tre volte per ogni provino e considerato valido il valore medio.

I risultati sono visibili in tabella:

Materiale C 60	HRC			
	n. 1	n. 2	n. 3	Med.
Non trattato	22	20	21	21
Temprato	38	39	37	39
Ricotto	12	19	12	14

4. Considerazioni sui risultati

I vari metodi di determinazione della durezza hanno vantaggi e svantaggi.

1. Metodo Brinell

Pregi:

- Questo metodo è quello che risente meno della finitura della superficie del pezzo da testare.

Difetti:

- Quando la durezza del materiale supera il valore $HB = 450$ la sfera comincia a deformarsi, pertanto la prova non offre più garanzie.
- L'impronta lasciata dalla prova Brinell è abbastanza grande; ciò può costituire, in alcuni casi, un punto di innesco per la rottura.
- La valutazione dell'impronta è lasciata alle capacità e all'esperienza dell'operatore.

2. Metodo Vickers

Pregi:

- questa prova non ha limiti di applicabilità, può essere usata su tutti i tipi di materiali più o meno duri.
- L'impronta è molto piccola e raramente costituisce problemi.
- Il penetratore Vickers è unico e va bene per qualsiasi forza da applicare.

Difetti:

- per eseguire correttamente la prova, la superficie del pezzo da testare deve essere preparata in modo adeguato.

3. Metodo Rockwell

Pregi:

- Il metodo è molto rapido.
- Permette di valutare materiali molto diversi dal punto di vista della durezza.
- Può essere usato molto facilmente in officina grazie alla possibilità di avere misure dirette sul quadrante.

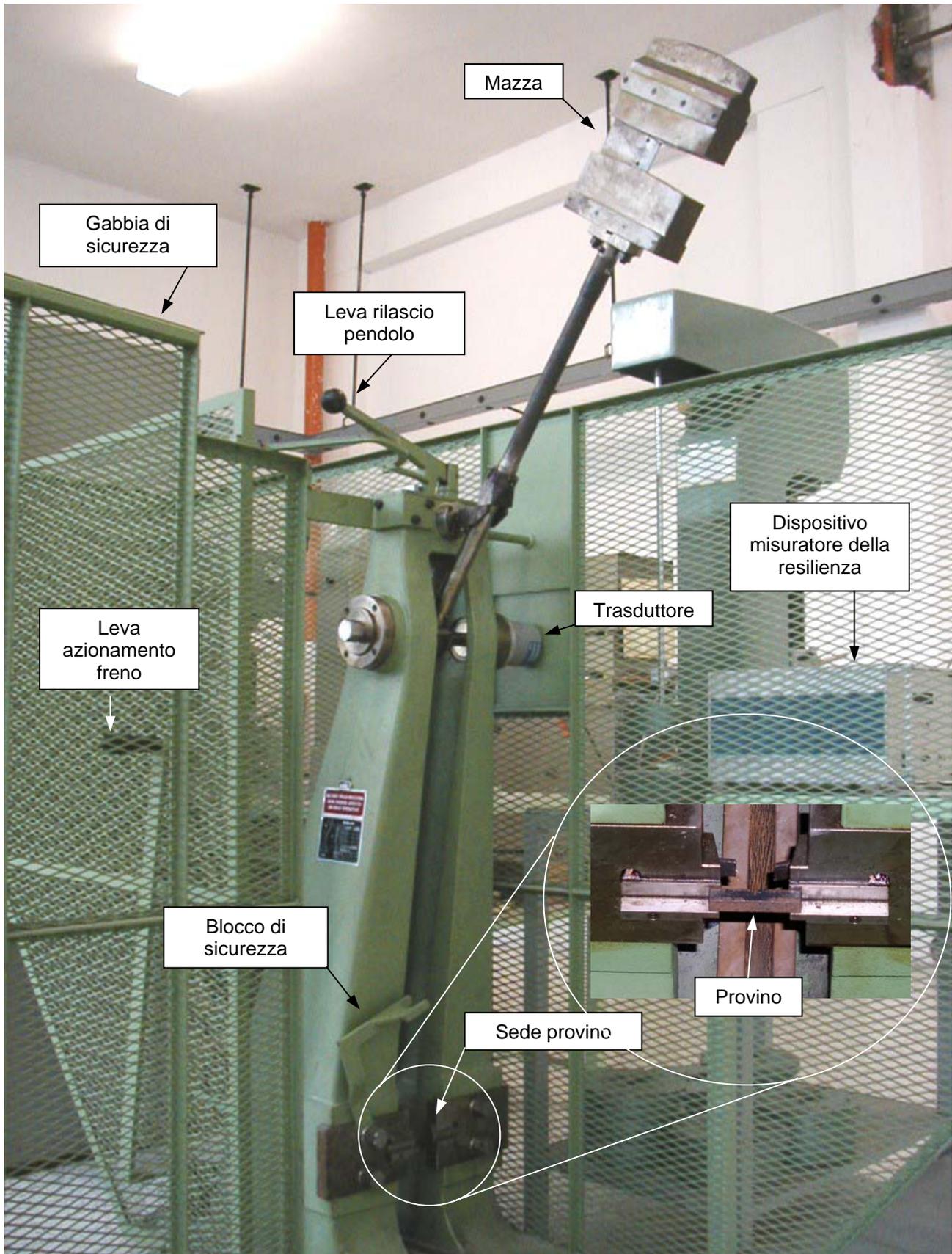
Difetti:

- per la prova occorre preparare adeguatamente la superficie del pezzo in esame prima di eseguire la prova.

PROVA DI RESILIENZA

1. Macchina di prova per misurare la resilienza_____	3
2. Provette unificate _____	5
3. Procedura della prova di resilienza con pendolo di Charpy_____	7
4. Descrizione della procedura seguita durante la prova_____	7
5. Considerazioni _____	10
6. Approfondimenti_____	10

PROVA DI RESILIENZA



Pendolo di Charpy

Generalità (UNI EN 10045-1)

La resilienza è una proprietà molto importante; essa deve essere elevata per tutti gli organi di macchine soggetti a urti. La misura si effettua su piccoli campioni del materiale da esaminare che con la prova vengono distrutti.

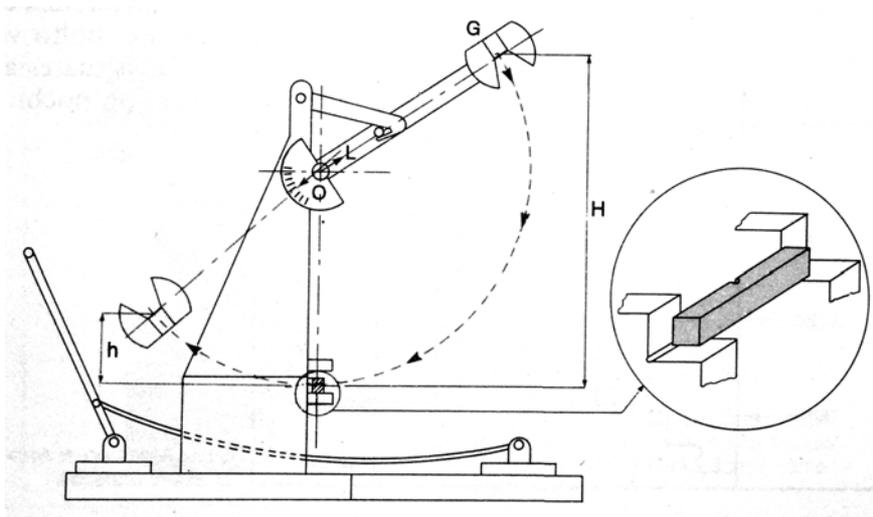
Un materiale avente scarsa resilienza si definisce fragile. Tale caratteristica solitamente è accompagnata da una elevata durezza.

Da quanto si evince dalla premessa la prova di resilienza fa parte della famiglia delle prove **dinamiche distruttive** ovvero che prevedono l'applicazione della forza in modo "violento", determinando la rottura del provino in esame.

1. Macchina di prova per misurare la resilienza

La misura della resilienza viene effettuata con il pendolo di Charpy qui di seguito schematizzata ed è composta da:

- un'incastellatura con basamento;
- pendolo ed asta con mazza;
- appoggi per la provetta;
- dispositivo misuratore della resilienza.



sempre in riferimento allo schema la prova avviene nel modo seguente:

Fase 1: taratura della macchina (la procedura di taratura verrà descritta più avanti);

Fase 2: la mazza viene posta con il suo baricentro **G**, esattamente a metà del suo tagliente (punto di impatto con la provetta), all'altezza **H** (rispetto alla quota minima a cui può abbassarsi); in questa posizione la mazza possiede un'energia potenziale iniziale (al punto di partenza) E_{pi} che è, per i pendoli "normali", di 300 J (± 10 J).

L'energia E_{pi} è data da:

$$E_{pi} = m \cdot g \cdot H \quad (J)$$

dove:

m = massa della mazza e dell'asta (in Kg);

g = accelerazione di gravità (in m/s^2);

H = altezza di caduta della mazza (in m).

Fase 3: la mazza, una volta sganciata scende rapidamente trasformando la sua energia potenziale iniziale in energia cinetica (E_c); giunta nel punto più basso della corsa ($E_{pi} = 0$ e $E_c = \max$), la mazza colpisce e rompe la provetta e risale dall'altra parte fino all'altezza h . A questo punto la mazza possiede ancora l'energia potenziale residua E_{pr} :

$$E_{pr} = m \cdot g \cdot h \quad (J)$$

Fase 4: la differenza di energia $E_{pi} - E_{pr}$, evidentemente è stata assorbita nella rottura della provetta. Tenute presenti le precedenti relazioni la differenza di energia L_a è data da:

$$L_a = E_{pi} - E_{pr} = m \cdot g \cdot H - m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot (H - h) = P \cdot (H - h)$$

dove P è la forza esercitata della mazza (in N).

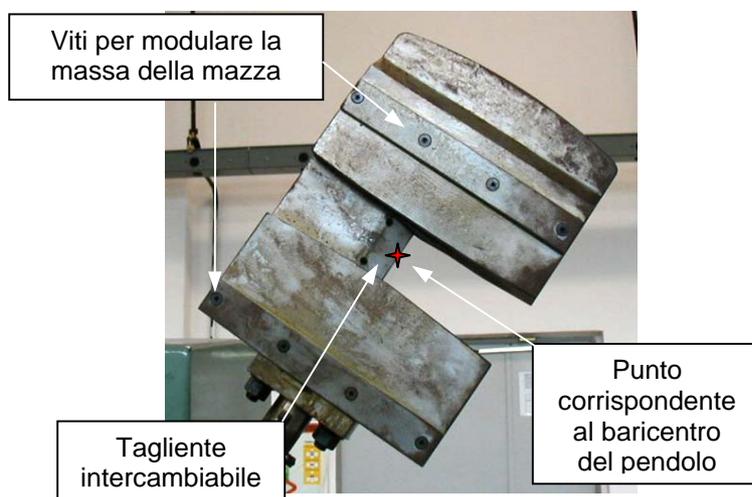
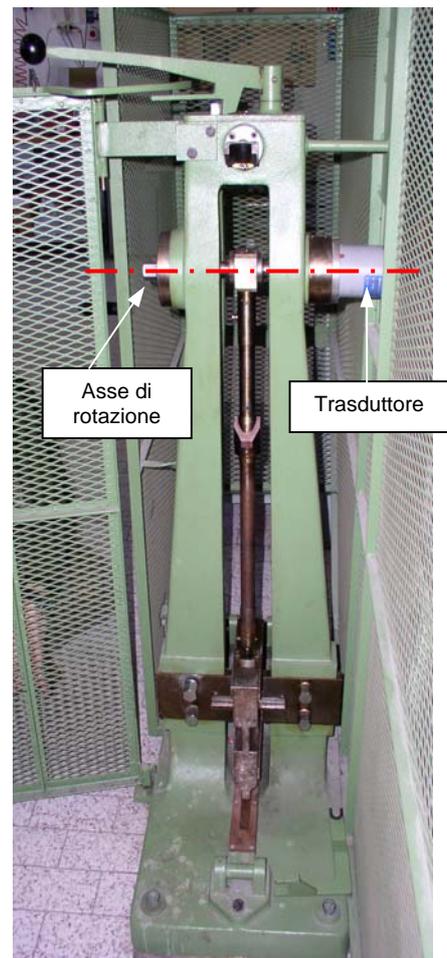
I pendoli di Charpy sono provvisti di sistemi di misurazione dell'angolo di risalita del pendolo, grazie al quale è possibile, mediante delle scale su cui scorrono indici o display digitali, avere la misura della resilienza direttamente in J.

Nel nostro caso il pendolo a nostra disposizione ha collegato, sul perno di rotazione del pendolo, un trasduttore in grado di rivelare la rotazione del pendolo stesso intorno all'asse di rotazione. Questa misura viene inviata, mediante un collegamento diretto, ad un elaboratore che, attraverso un display, ci da direttamente il valore della resilienza in J.

Per effettuare prove "particolari" dove è richiesta una minore energia disponibile è possibile variare la massa del pendolo, aggiungendo o togliendo moduli alla mazza stessa o cambiando la mazza.

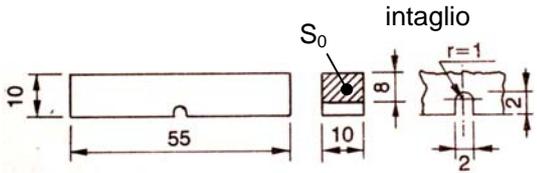
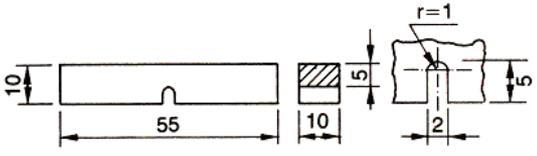
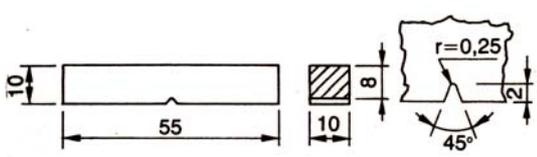
Il pendolo a nostra disposizione, togliendo delle masse aggiunte, può essere sfruttato sia con i canonici 300 J che con 150 J.

N.B.: l'aggiunta o la sottrazione di masse alla mazza è studiata in modo tale da non cambiare la posizioni del baricentro che si deve trovare sempre al centro del tagliente ovvero sul punto esatto d'impatto con il provino.

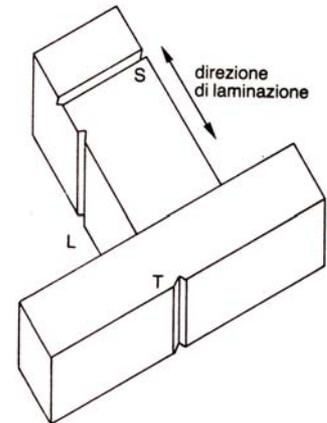


2. Provette unificate

Le norme UNI prevedono l'impiego di tre tipologie di provette come riportato in tabella:

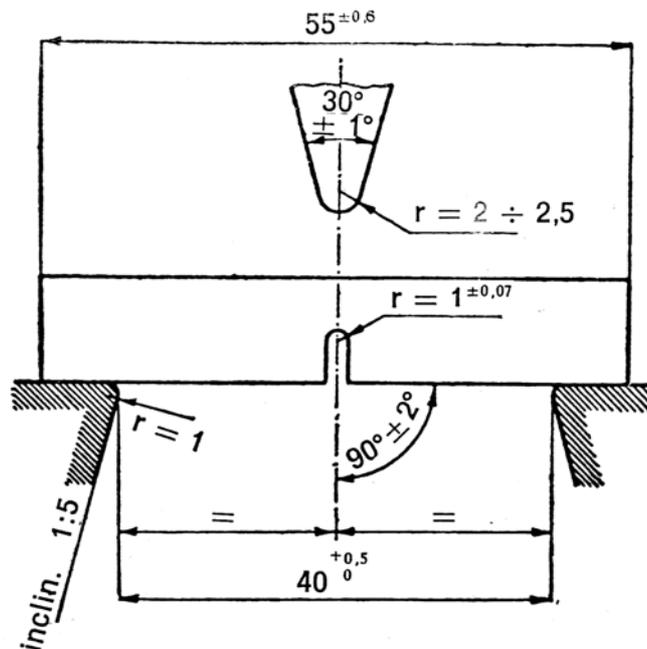
Tipo di provetta	Forma e dimensione della provetta	Simbolo e unità di misura	Condiz. di prova	Note
Masnager (UNI 3212)	<ul style="list-style-type: none"> Per i materiali non ferrosi  <p>sezione resistente : $0,8 \times 1 = 0,8 \text{ cm}^2$</p>	<p>K L_a/S_0 (J/cm²)</p>	Normali	<p>Per i materiali non ferrosi aventi bassa resilienza deve essere:</p> <ul style="list-style-type: none"> energia disponibile: $70 \pm 2 \text{ J}$ temperatura: $20 \pm 5 \text{ °C}$
	<p>sezione resistente : $0,8 \times 1 = 0,8 \text{ cm}^2$</p>	<p>$K_{100/50}$ L_a/S_0 (J/cm²)</p>	Particolari	<p>In condizioni di prova particolari il simbolo K è seguito da un pedice che precisa:</p> <ul style="list-style-type: none"> l'energia disponibili (es. 100 J); la temperatura di prova (es. -50 °C).
Charpy (UNI 4431)	<ul style="list-style-type: none"> Per l'acciaio  <p>(con intaglio a "U" oppure a "buco di chiave")</p> <p>sezione resistente: $0,5 \times 1 = 0,5 \text{ cm}^2$</p>	<p>KU L_a (J)</p>	Normali	<p>Il simbolo KU definisce le condizioni normali di prova che sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> energia disponibile: 300 J; provetta con intaglio a U o a buco di chiave (prof. 5 mm); temperatura ambiente: $23 \pm 5 \text{ °C}$.
	<p>Velocità della mazza all'impatto in condizioni normali di prova = $4,5 \div 7 \text{ (m/s)}$</p>	<p>$KU_{200/3/0}$ L_a (J)</p>	Particolari	<p>In condizioni di prova particolari il simbolo KU è seguito da un pedice che precisa:</p> <ul style="list-style-type: none"> l'energia disponibili (es. 200 J); la profondità intaglio (es. 3 mm); la temperatura di prova (es. 0 °C).
Intaglio a V (UNI 4713)	<ul style="list-style-type: none"> Per materiali ferrosi  <p>sezione resistente : $0,8 \times 1 = 0,8 \text{ cm}^2$</p>	<p>KV L_a (J)</p>	Normali	<p>Il simbolo KV definisce le condizioni normali di prova che sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> energia disponibile: 300 J; temperatura ambiente: $23 \pm 5 \text{ °C}$.
	<p>Velocità della mazza all'impatto in condizioni normali di prova = $5 \div 5,5 \text{ (m/s)}$</p>	<p>$KV_{100/0}$ L_a (J)</p>	Particolari	<p>In condizioni di prova particolari il simbolo KV è seguito da un pedice che precisa:</p> <ul style="list-style-type: none"> l'energia disponibili (es. 100 J); la temperatura di prova (es. 0 °C).

Un ulteriore accorgimento previsto dalle norme UNI (EU 18) è quello di dover indicare come è stata ricavata la provetta rispetto alla direzione della laminazione del materiale dato che questo influisce sulla prova di resilienza.



In mancanza di indicazioni significa che la provetta è stata ricavata in direzione perpendicolare alla direzione di laminazione: in tal caso la resilienza sarà minima.

La mazza del pendolo deve colpire la provetta nella mezziera della parte opposta dell'intaglio come indicati in figura: pertanto la rottura avviene per urto-flessione e con un solo colpo.



Disegno schematico della provetta Charpy disposta sul supporto del pendolo immediatamente prima dell'impatto. Nello stesso modo vengono rotte le provette Mesnager e con intaglio a V.

Particolare cura si deve avere nella realizzazione dell'intaglio che, anche se la norma UNI non prevede che sia eseguito con particolare lavorazione, deve essere effettuato in modo che non appaiano striature longitudinali sul fondo dell'intaglio visibili a occhio nudo. Di solito l'intaglio viene eseguito mediante fresatura oppure foratura e completamento con sega.

L'intaglio sulla provetta ha lo scopo di:

- evitare il semplice piegamento o deformazioni che darebbero risultati di prova incerti;
- far avvenire la rottura sicuramente in una determinata sezione della provetta.

3. Procedura della prova di resilienza con pendolo di Charpy

1. preparazione dei provini e scelta del metodo in riferimento alle direttive UNI;
2. verifica della taratura della macchina;
3. armare la macchina;
4. disposizione della provetta sugli appoggi;
5. chiusura della protezione;
6. esecuzione della prova;
7. lettura diretta del **lavoro di rottura**;
8. esame della frattura.

4. Descrizione della procedura seguita durante la prova

Fase 1: preparazione dei provini e scelta del metodo in riferimento alle direttive UNI

La nostra prova è stata eseguita sui seguenti provini:

n. provini	Materiale	Tipo provetta	Intaglio provetta
2	C 40 grezzo di laminatura	Charpy UNI 4431	Ad U da 5 (mm) perp. alla laminaz.
1	C 40 ricotto	Charpy UNI 4431	Ad U da 5 (mm) perp. alla laminaz
2	C 40 temprato in olio	Charpy UNI 4431	Ad U da 5 (mm) perp. alla laminaz

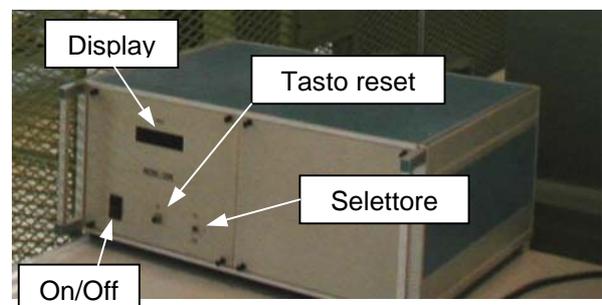
Condizioni della prova:

Peso mazza	Altezza della mazza sul piano di riferimento	Energia disponibile	Temperatura	Velocità della mazza all'impatto
205,74 (N)	1,5344 (m)	315,69 (J)	Ambiente	5,5 (m/s)

Fase 2: verifica della taratura della macchina

In riferimento alle condizioni di prova è opportuno eseguire una taratura. Questa viene eseguita facendo fare un ciclo a vuoto alla mazza seguendo la seguente procedura:

1. si accende il dispositivo di rivelazione della resilienza e si seleziona il corretto valore dell'energia disponibile (300 J) (vedi figura);
2. si arma la macchina portando la mazza in posizione di partenza.
3. si chiude la gabbia di protezione
4. si resetta il display con l'apposito tasto di reset
5. controllare che non si possano presentare condizioni di pericolo



6. si sblocca il pendolo mediante l'apposita leva di rilascio
7. fatta percorrere tutta la corsa al pendolo, fermare l'oscillazione della mazza mediante la leva del freno.
8. leggere sul display il valore dato, se diverso da zero, azzerare con il tasto reset e ripetere la procedura dal punto 2. fino alla visualizzazione di tre 0 sul display.
9. a questo punto la macchina è tarata correttamente per lo svolgimento delle prove.

La taratura si rende sempre necessaria perché questa annulla ogni tipo di errore di rilevazione dovuti ad attriti, vibrazioni ecc.

Fase 3: armare la macchina

Per armare la macchina è necessario aprire la gabbia e manualmente portare la mazza in posizione di partenza (visibile nella foto iniziale).

Un sistema di sicurezza garantisce che, fintanto che la gabbia rimane aperta, sia impossibile azionare la leva di rilascio.

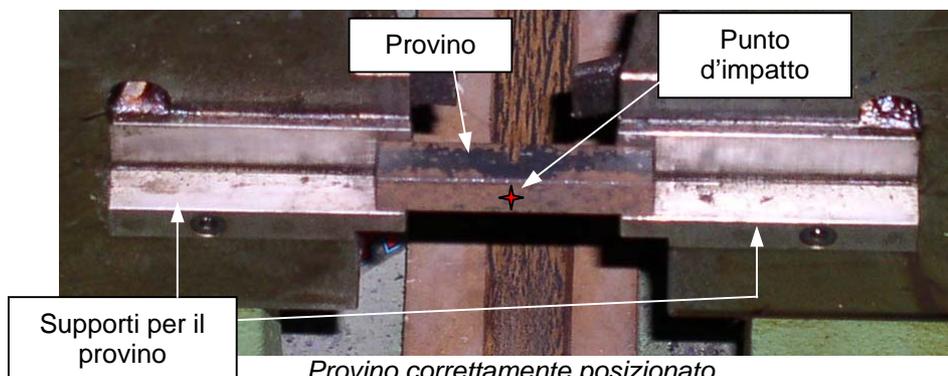
Fase 4: disposizione della provetta sugli appoggi

Il posizionamento del provino riveste una notevole importanza, questo deve essere posizionato correttamente con l'intaglio opposto al punto di impatto e perfettamente al centro degli appoggi perfettamente aderente ad essi.

Tale operazione viene eseguita, mediante l'ausilio di una mascherina di posizionamento (vedi foto)



Mascherina



Fase 5: chiusura della protezione

Chiudere la gabbia di protezione che evita di posizionarsi nelle vicinanze del raggio di azione del pendolo.

Dopo aver chiuso, e prima di rilasciare la mazza, assicurarsi che non ci siano altre situazioni di rischio, comunque avvertire chi è nelle vicinanze di allontanarsi per motivi precauzionali, anche perché i pezzi del provino potrebbero facilmente essere espulsi, dopo la rottura, all'esterno della gabbia.

Fase 6: esecuzione della prova

A questo punto si sgancia il pendolo mediante l'apposita leva che è ora libero di prendere velocità e arrivare ad impattare violentemente con il provino posizionato proprio sul punto più basso del percorso del baricentro della mazza. In questo punto la velocità della mazza è massima, risulta che tutta l'energia potenziale si è trasformata in energia cinetica.

Ora una parte dell'energia sarà assorbita dal provino per rompersi l'altra parte verrà sfruttata dalla mazza per continuare il suo movimento oscillatorio che gli permetterà di risalire dalla parte opposta.

Quando il pendolo inizierà a ridiscendere verso il lato di partenza la prova è si può dire finita e si può azionare il freno per bloccare l'oscillazione della mazza.

Fase 7: lettura diretta del lavoro di rottura

Ora non resta che leggere direttamente il valore KU in J sul display del rilevatore di resilienza, il quale, mediante un microprocessore, esegue tutti i calcoli per noi.

Fase 8: esame della frattura

Recuperati i due pezzi del provino si esamina la frattura.

Qui di seguito riportiamo le foto dei provini rotti e il relativo valore di resilienza riscontrato:

Materiale	Resilienza KU (J)	Tipo rottura	Foto	
1. C 40 grezzo di laminatura	15,4	Rottura tenace (per scorrimento)		
2. C 40 grezzo di laminatura	18,1	Rottura tenace (per scorrimento)		
1. C 40 ricotto	15,6	Rottura tenace (per scorrimento)		
1. C 40 temprato	3,7	Rottura fragile (per decoesione)		
2. C 40 temprato	4,9	Rottura fragile (per decoesione)		

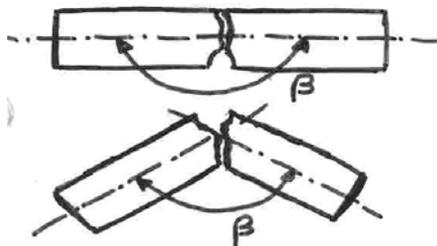
5. Considerazioni

Le rotture che si possono manifestare nella sollecitazione dinamica possono essere:

Tipo rottura	Descrizione
Tenaci quando avvengono per scorrimento	<ul style="list-style-type: none"> • la tensione prevalente è quella tangenziale • la frattura ha un aspetto fibroso • il lavoro è speso per provocare la deformazione plastica che cresce progressivamente fino a causare la rottura.
Fragili quando avvengono per decozione	<ul style="list-style-type: none"> • avviene senza previa deformazione permanente apprezzabile; • la tensione prevalente è quella normale ai piani di slittamento; • la frattura ha un aspetto granulare a lucentezza cristallina • all'innesco segue, senza ulteriori deformazioni, la rottura.

La determinazione del tipo di rottura viene stabilita mediante l'analisi dei lembi dei due provini.

Avvicinandoli come per ricomporre il provino, si va a constatare l'entità della deformazione; più è piccolo l'angolo sotteso fra i due lembi più il materiale risulta tenace e viceversa.



Un altro parametro da prendere in considerazione è l'aspetto della sezione di rottura che assume aspetti differenti come spiegato nella tabella qui sopra.

6. Approfondimenti

Per avere ulteriori dati da poter utilizzare per studiare meglio questo materiale, abbiamo eseguito sulle provette stesse, dopo la prova di resilienza, la prova di durezza Brinell. Nella seguente tabella riassumiamo i risultati ottenuti sia per la prova di resilienza che di durezza HBS per i materiali in esame.

n.	Materiale	Durezza HBS	Resilienza HU ₃₁₆ (J) media	Foto impronta prova di durezza
1	C 40 grezzo di laminatura	230	16,8	
2	C 40 ricotto	206	15,6	
3	C 40 temprato	368	4,3	

PROVE NON DISTRUTTIVE

1. Esame con liquidi penetranti	2
1.1. Generalità	2
1.2. Fasi del metodo.	2
1.3. Esercitazione	5
1.4. Uso di penetranti fluorescenti	5
2. Esame magnetoscopico	6
2.1. Generalità. Principio di funzionamento	6
2.2. Magnetizzazione del pezzo in esame	6
2.3. Tipo di corrente elettrica utilizzata	8
2.4. Polveri magnetiche	9
2.5. Esercitazione	9
3. Esame metallografico	10
3.1. Il microscopio metallografico	10
3.2. Illuminazione di un microscopio	12
3.3. Preparazione del campione	13
3.4. Reattivi d'attacco per materiali ferrosi.	16
3.5. Applicazione della fotografia nell'indagine metallografica	17
3.6. Analisi metallografica	18
3.6.1. Esempi di metallografia	18

1. Esame con liquidi penetranti

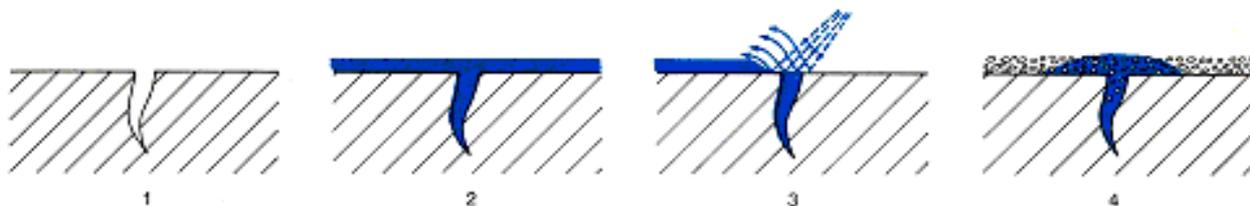
1.1. Generalità

Questo metodo rientra nel campo degli esami non distruttivi, è uno dei più diffusi per la sua semplicità ed economicità. Il metodo permette di mettere in evidenza cricche superficiali o, in generale, difetti affioranti alla superficie di pezzi metallici e non metallici purché non eccessivamente porosi, ma non possono essere evidenziati difetti all'interno dei pezzi oppure superficiali ma che non lasciano passare il liquido utilizzato.



Bombolette spray necessarie per effettuare una prova con liquidi penetranti.

1.2. Fasi del metodo.



1. preparazione della superficie
2. applicazione del liquido penetrante
3. lavaggio
4. sviluppo e osservazione.

Fase 1: preparazione della superficie

Dai difetti superficiali si devono togliere quelle sostanze di cui possono essere riempiti: grasso, scorie, lubrificanti, ecc. Questa operazione di "pulitura superficiale" viene effettuato con: soluzioni saponate, trielina, ecc., anche con bombolette spray contenenti sgrassanti appositi. Talvolta si usa anche il lavaggio con ultrasuoni.



Fase 2: applicazione del liquido penetrante:

il liquido penetrante, generalmente rosso, viene cosparso sulla superficie del pezzo in esame in uno dei seguenti modi:

- immersione del pezzo nel liquido;
- a spruzzo con pistole ad aria compressa o mediante bombolette spray;
- con pennello imbevuto di liquido.

La penetrazione del liquido è legata ad alcune caratteristiche fisiche del liquido stesso:

- viscosità
- massa volumica
- bassa tensione superficiale

Il liquido penetrante deve agire sul particolare da testare per circa 3÷5 min. in modo da garantire l'effetto del liquido stesso.



Applicazione penetrante rosso con bomboletta sry



Provetta ricoperta con liquido penetrante

Fase 3: lavaggio

L'operazione serve per togliere il liquido in eccesso tranne quello penetrato nelle fessure sulla superficie del pezzo. Il lavaggio si effettua con acqua o liquidi organici in base alla natura del liquido penetrante adottato. Prima di passare alla prossima fase va ricordato di asciugare accuratamente il pezzo con uno straccio o con aria calda.



Asportazione liquido in eccesso mediante lavaggio con acqua.



Asciugatura

Fase 4: sviluppo

Il liquido rimasto nelle fessure viene risucchiato da una polvere bianca (talco) che viene cosparsa uniformemente sulla superficie in esame. La polvere, applicata mediante bombolette spray, si impregna del liquido penetrante rosso ancora presente nelle fessure, il difetto viene così evidenziato in modo proporzionale all'entità del difetto stesso.

La colorazione bianca della polvere aumenta il contrasto con il liquido colorato, con il risultato di renderlo più visibile.



Applicazione rilevatore



Osservazione

Fase 5: osservazione

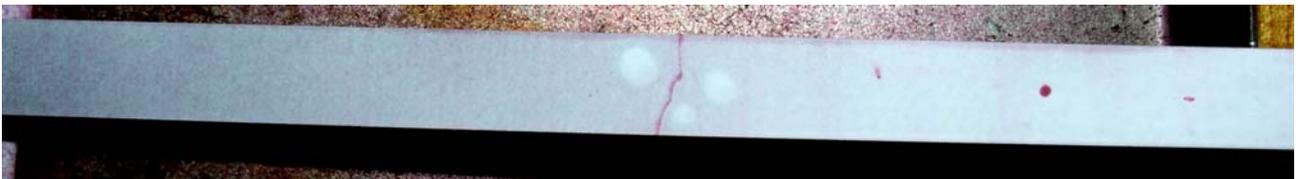
È questa la fase più delicata perché richiede da parte dell'operatore una notevole esperienza e capacità in quanto oltre a vedere il difetto deve anche interpretarlo e valutarne la gravità.

N.B. Questa operazione va effettuata non prima che siano trascorsi dai 15 ai 30 secondi dall'applicazione del rilevatore.

1.3. Esercitazione

Esame di una barretta 10x10 mm in acciaio C 40 appositamente temprata in acqua per provocare delle cricche sul materiale stesso.

Come visibile dalle immagini si possono facilmente notare diverse cricche superficiali che sono state provocate dal brusco raffreddamento disposte sia longitudinalmente che trasversalmente la provetta.



1.4. Uso di penetranti fluorescenti

Invece del liquido penetrante colorato si possono usare anche dei penetranti fluorescenti di colore verde smeraldo o giallo-verde. Questi liquidi sfruttano il fenomeno della fluorescenza che si può definire come quella proprietà posseduta da alcune sostanze di diventare luminose quando vengono investite da un fascio di luce ultravioletta (lunghezza d'onda 315÷380 nm) non visibile all'occhio umano.

2. Esame magnetoscopico

2.1. Generalità. Principio di funzionamento

L'esame magnetoscopico i principi elettromagnetici e pertanto può essere usato solo su materiali ferromagnetici.

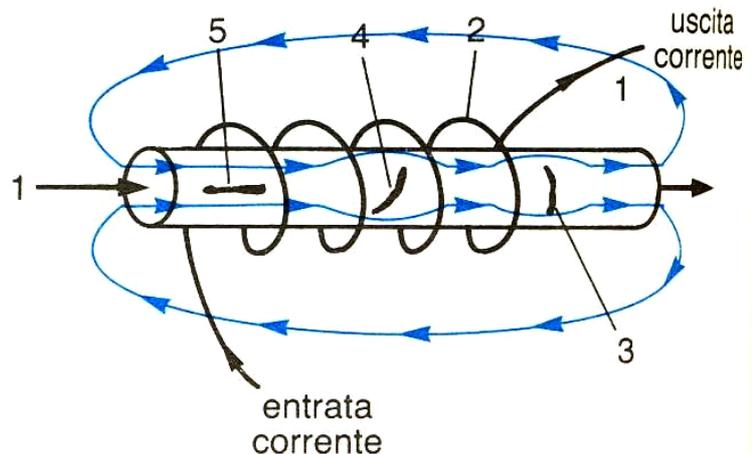
Il principio si basa sulla possibilità di rilevare i difetti superficiali e subsuperficiali di un pezzo dopo che questo viene fatto attraversare da un campo magnetico. Il campo magnetico viene disperso nei punti di non omogeneità del materiale sia esse cricche, soffiature od inclusioni.

- Un difetto è tanto più facilmente rilevabile quanto più esso è disposto trasversalmente alle linee di forza e vicino alla superficie del pezzo.
- La natura del difetto non ha alcuna importanza; tutto ciò che interrompe la continuità del pezzo dà luogo a deviazione delle linee di forza.
- Per il rilevamento del difetto le linee di forza devono fuoriuscire dal pezzo; pertanto difetti piccoli e molto interni non sono più rilevabili.

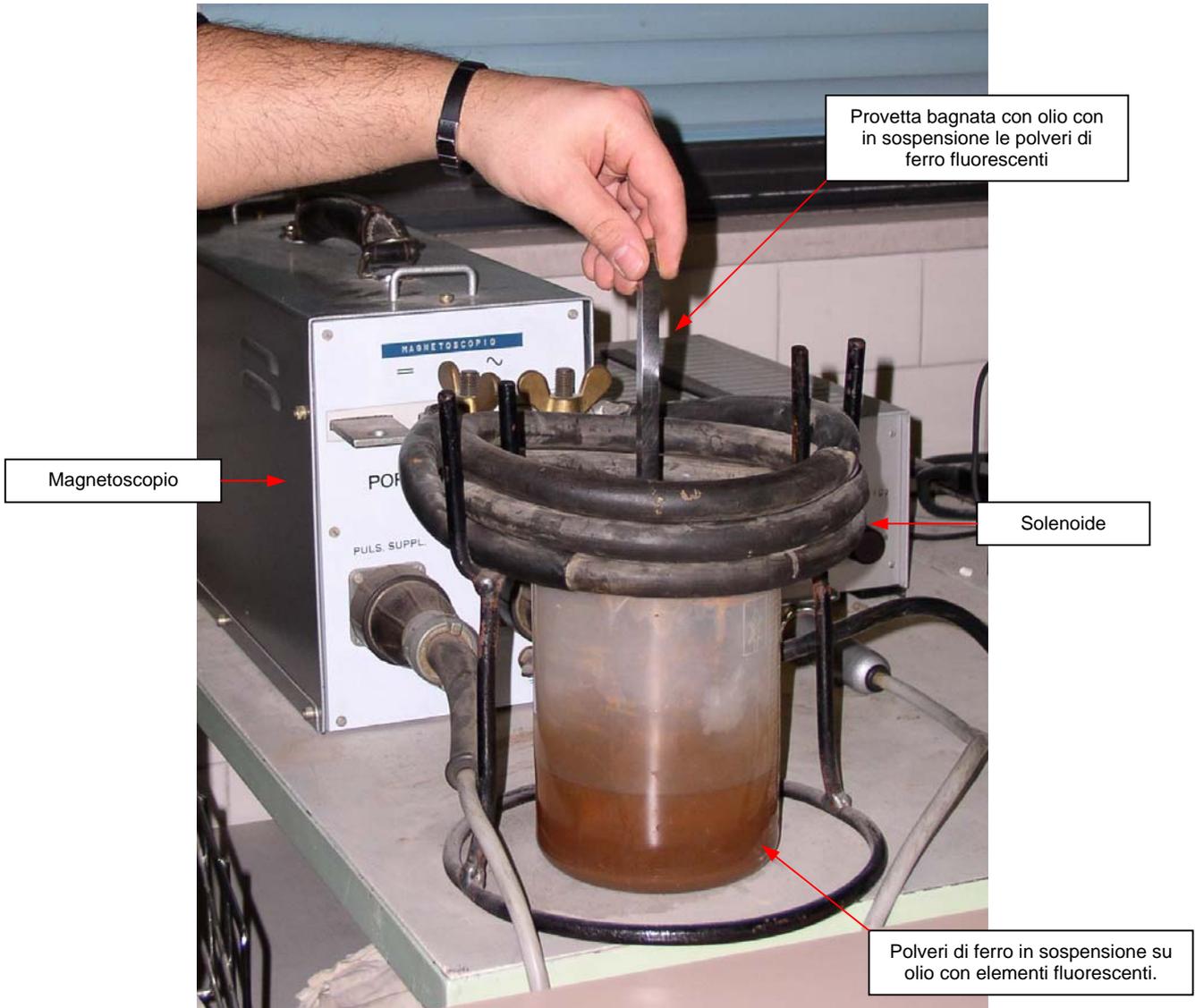
2.2. Magnetizzazione del pezzo in esame

Poiché i difetti possono formare un qualunque angolo rispetto all'asse longitudinale del pezzo risulta necessario produrre due tipi di magnetizzazione.

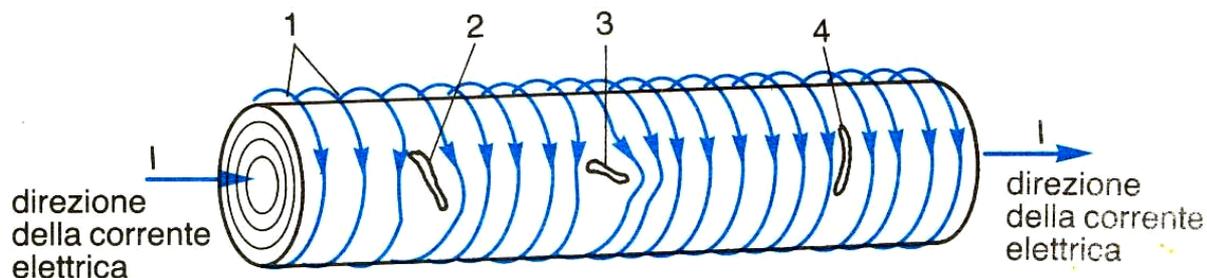
Magnetizzazione longitudinale: il pezzo è attraversato da linee di flusso entranti ed uscenti longitudinalmente al pezzo dopo essere immerso in un campo magnetico creato da un solenoide attraversato da corrente elettrica come in figura.



1. linee di flusso
2. solenoide
3. cricca rilevabile facilmente
4. cricca rilevabile meno facilmente
5. cricca non rilevabile



Magnetizzazione circonferenziale: il pezzo viene attraversato da un flusso magnetico che si chiude dentro il pezzo stesso seguendo il contorno. Tale flusso si genera facendo passare una corrente elettrica lungo il pezzo stesso, il passaggio di corrente elettrica genera un campo magnetico indotto proporzionale all'intensità di corrente perpendicolare al flusso della corrente stessa.



1. linee di forza (perpendicolari alla corrente elettrica)
2. cricca inclinata rispetto alle linee di flusso difficilmente rilevabile
3. cricca trasversale alle linee di flusso facilmente rilevabile
4. cricca parallela alle linee di flusso non rilevabile

La profondità massima alla quale il difetto è rilevabile dipende dall'entità e dalla forma del difetto stesso. Questa profondità d'indagine dipende oltre che dalla dimensione e dalle caratteristiche elettriche e magnetiche del pezzo in esame, dalla intensità e dal tipo di corrente di magnetizzazione.

2.3. Tipo di corrente elettrica utilizzata

Corrente continua: correnti erogate da batterie, accumulatori, dinamo, correnti raddrizzate.

Corrente raddrizzata: a semionda e ad onda intera. Molto usata nei magnetoscopi.

Corrente alternata: corrente prelevata dalla rete pubblica interponendo un trasformatore per ottenere l'intensità voluta.

Valori della corrente alternata e raddrizzata in funzione della barre per l'esame magnetoscopico.		
Diametro della barra	Corrente alternata (A)	Corrente raddrizzata (A)
13	300	430
20	500	700
25	500	750
32	625	900
38	750	1100
50	1000	1400
75	1500	2200
150	3000	4500

2.4. Polveri magnetiche

Le polveri magnetiche sono costituite da ossidi di ferro in polvere. Si possono distinguere due tipi fondamentali:

- polveri magnetiche secche: si possono usare solo su superfici asciutte e perfettamente sgrassate;
- polveri magnetiche diluite in un liquido: sono molto sensibili e quindi più usate, sono costituite dalle stesse polveri secche ma trasportate da un liquido (olio o acqua). Ottimi risultati danno le polveri fluorescenti diluite in acqua visibili con luce ultravioletta.

2.5. Esercitazione

L'esperienza che si è potuta effettuare in laboratorio si è svolta sulla stessa provetta dove si era effettuata la prova con liquidi penetranti.

Il tipo di magnetoscopio a disposizione è del tipo universale grazie al quale è possibile effettuare l'esame sia a campo trasversale sia longitudinale. La prova effettuata ha previsto il posizionamento della provetta all'interno di un solenoide con il flusso magnetico che percorre il pezzo longitudinalmente.

Le polveri magnetiche usate sono di tipo fluorescente e diluite in olio.

Le fasi previste per l'esecuzione della prova sono le seguenti:

- **Fase 1:** preparazione della superficie
- **Fase 2:** applicazione delle polveri magnetiche fluorescenti diluite in olio
- **Fase 3:** posizionamento nella sinusoide del magnetoscopio
- **Fase 4:** applicazione campo magnetico
- **Fase 5:** osservazione mediante lampada ultravioletta in ambiente oscurato.

Dalle immagini si possono riscontrare delle cricche visibili solo dopo aver posto il pezzo sotto una lampada a luce nera (ultravioletta).

Si possono riscontrare anche le cricche aperte in superficie già visibili mediante l'esame con i liquidi penetranti.



3. Esame metallografico

L'analisi metallografica viene eseguita sulla superficie dei materiali allo scopo di riconoscere difetti, impurezze o, più in generale, le caratteristiche strutturali delle leghe metalliche stesse.

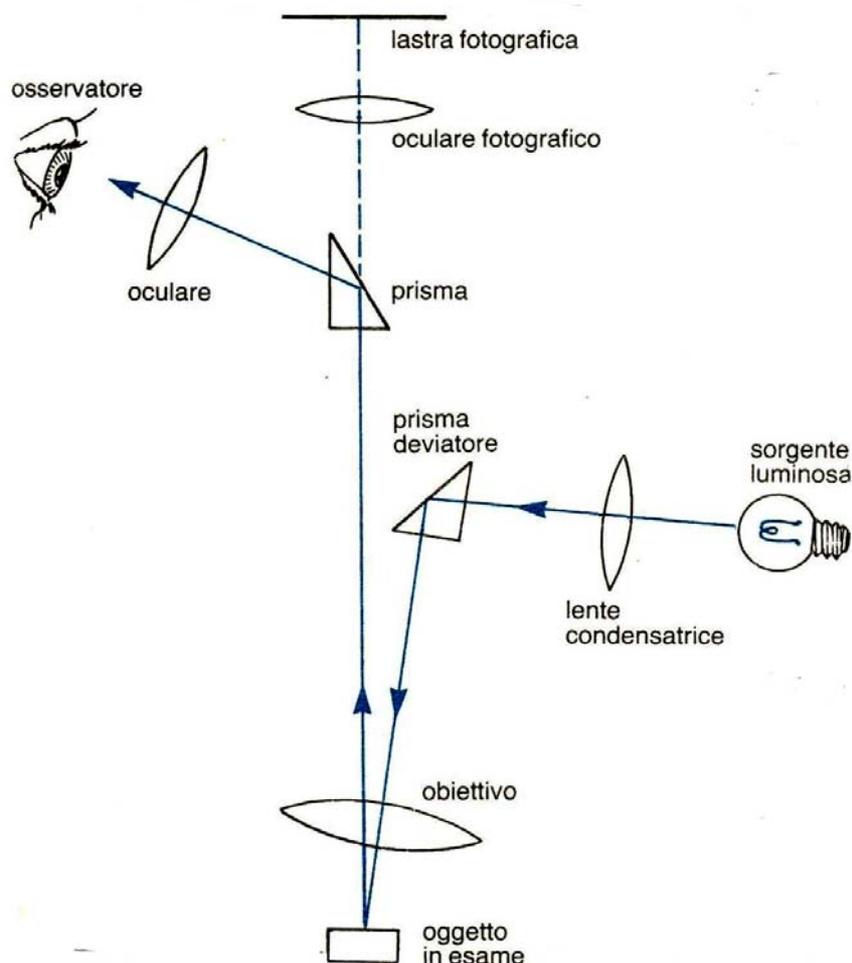
L'analisi metallografica si divide in:

- **microscopia:** quando l'osservazione viene eseguita con ingrandimenti superiori a 50x;
- **macroscopia:** quando l'osservazione viene eseguita con ingrandimenti inferiori a 50x.

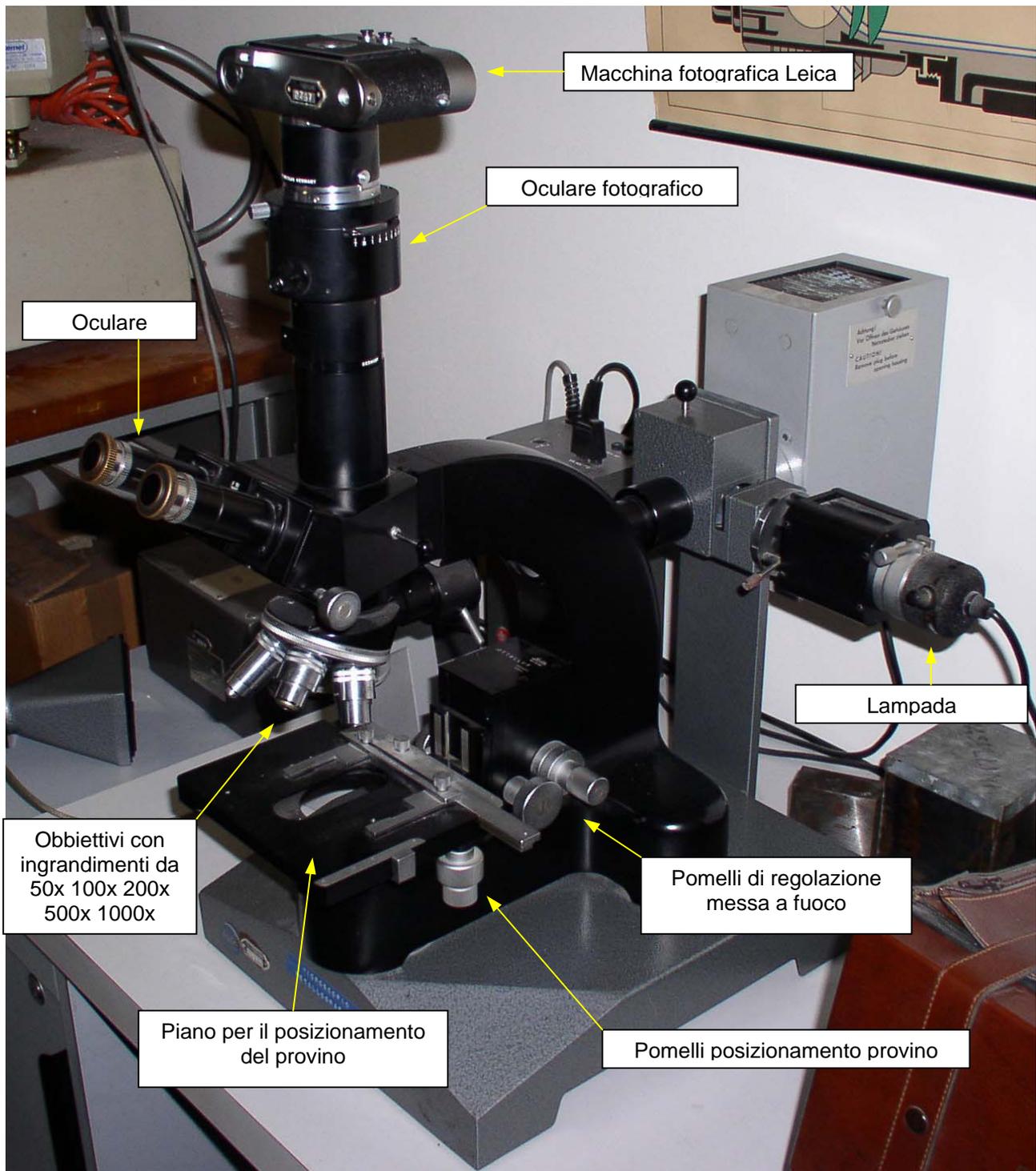
3.1. Il microscopio metallografico

L'obiettivo del microscopio fornisce di un oggetto un'immagine ingrandita con un numero di particolari tanto maggiore quanto più elevata è la potenza di risoluzione dell'obiettivo stesso. L'oculare non fa altro che ingrandire i particolari già forniti dall'obiettivo senza aggiungerne degli altri. La qualità quindi di un'immagine microscopica dipende esclusivamente dall'obiettivo.

Schema ottico semplificato del microscopio metallografico.



MICROSCOPIO METALLOGRAFICO



3.2. Illuminazione di un microscopio

Aumentando gli ingrandimenti di un microscopio bisogna aumentare anche l'illuminazione. Il sistema di illuminazione può essere per:

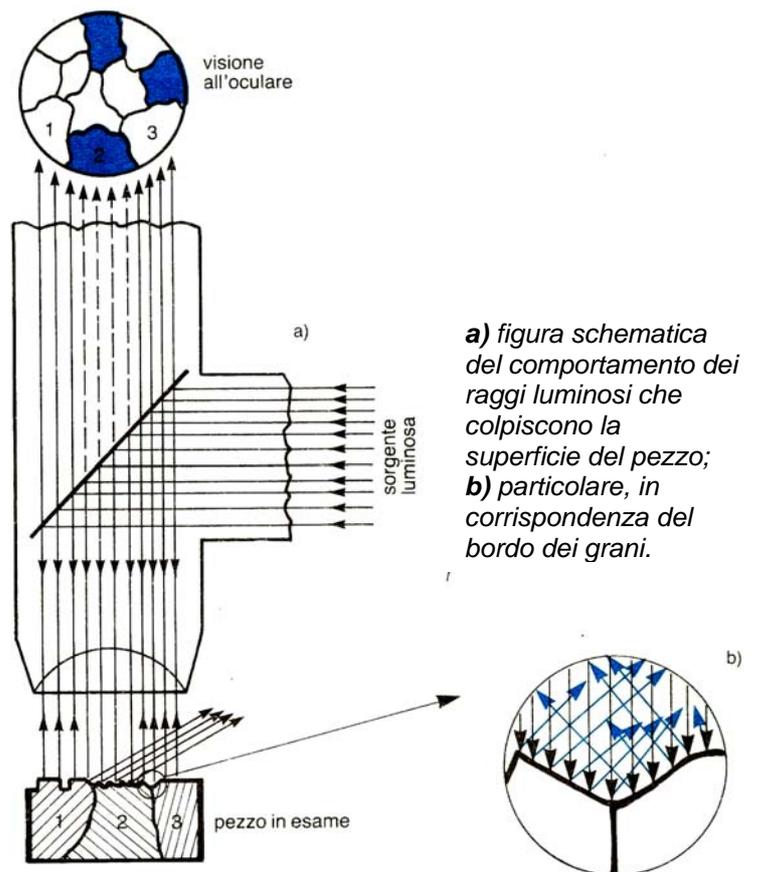
- **trasparenza:** microscopio da laboratorio (vetrini). La luce attraversa i vetrini in cui sono posizionate le sostanze traslucide da esaminare.
- **riflessione:** metodo necessario per esaminare elementi opachi che non permettono il passaggio di luce attraverso il loro corpo.

Le leghe metalliche da esaminare sono opache alla luce e pertanto non possono essere esaminate per trasparenza, ma per riflesso secondo il disegno precedente.

Un fascio di luce proveniente dalla sorgente luminosa attraversa la lente condensatrice e viene deviato dal prisma verso la lanette obiettivo e da quest'ultima raggiunge la superficie del pezzo in esame. La luce riflessa dalla superficie del pezzo viene deviata dal prisma all'oculare ed in fine all'osservatore.

Nella figura a lato è riportato lo schema del percorso dei raggi luminosi nel microscopio metallografico. La visione dei grani non dipende da una differente composizione chimica, ma dal loro diverso orientamento, dopo che sono stati corrosi da un acido (vedi più avanti). I grani la cui superficie è orientata in modo da inviare all'oculare tutta la luce incidente, appaiono chiari, mentre, al contrario, se la superficie del grano è disposta in modo da non inviare all'oculare alcun raggio luminoso esso appare scuro.

In particolare vengono molto corrosi i contorni dei grani e, per questo motivo, i raggi incidenti sui contorni non vengono riflessi sull'oculare ma deviati secondo le più diverse direzioni, dando origine ad una linea scura che evidenzia il grano stesso. Altre volte alcune parti del grano resistono all'attacco chimico e restano in rilievo dando luogo ad ombre proiettate ben visibili al microscopio.



a) figura schematica del comportamento dei raggi luminosi che colpiscono la superficie del pezzo; **b)** particolare, in corrispondenza del bordo dei grani.

3.3. Preparazione del campione

Le operazioni di prelievo e preparazione di un campione, da esaminare al microscopio devono essere accurate e sono le seguenti:

- **Fase 1:** troncatura
- **Fase 2:** eventuale inglobamento
- **Fase 3:** smerigliatura
- **Fase 4:** lucidatura
- **Fase 5:** attacco acido

Fase 1: Troncatura

La troncatura consiste nel prelevare un piccolo campione del pezzo da esaminare, evitando riscaldamenti e deformazioni.

Si utilizzano apposite troncatrici a dischi abrasivi facendo largo uso di liquidi refrigeranti o in alternativa seghetti a mano. Per materiali molto fragili è possibile scagliare il materiale con un martello.

Le dimensioni del campione dovrebbero avere una superficie di $3 \div 5 \text{ cm}^2$ e un'altezza sufficiente per essere facilmente manovrato nelle successive operazioni di smerigliatura e lucidatura.

Fase 2: inglobamento

I campioni molto piccoli vengono incastonati in un blocco di resine plastiche o polimerizzanti. Questa operazione può essere eseguita principalmente in 2 modi:

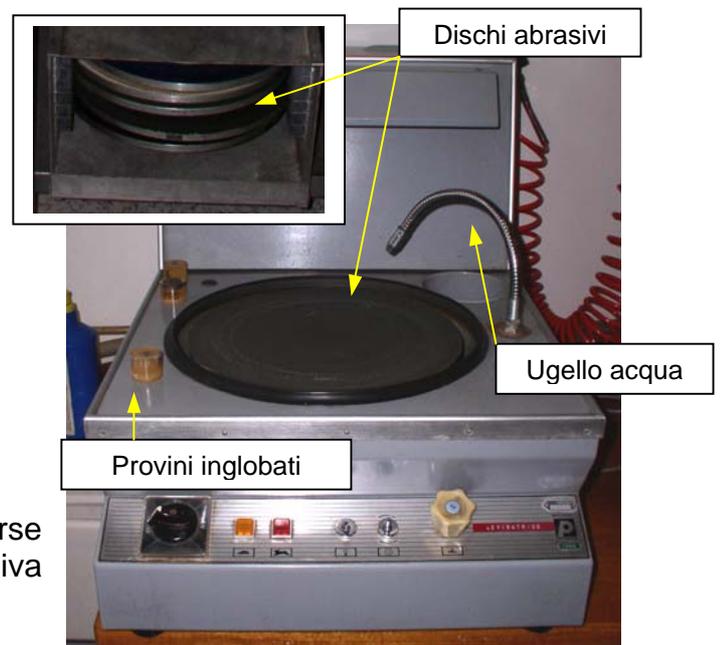
- **inglobamento a caldo:** necessita di presse. L'operatore deve sistemare il campione nello stampo e riempirlo con la resina ed eseguire la pressatura (50kN) per circa tre minuti. Il campione è pronto per essere lavorato.
- **inglobamento a freddo:** sistema molto diffuso perché non necessita di macchinari per eseguire la pressatura. Le resine che si utilizzano sono composte da due sostanze una in polvere e una liquida che vengono mescolate e poi colate su appositi stampi in cui viene alloggiato il provino da inglobare, dopo pochi minuti la resina solidifica e si può estrarre dallo stampo per poi passare alle lavorazioni successive.

Fase 3: smerigliatura

L'operazione di smerigliatura ha lo scopo di far scomparire le irregolarità superficiali dei campioni che dovranno essere esaminati al microscopio metallografico.

L'operazione di smerigliatura può essere fatta a mano o a macchina, a secco oppure in umido. In ogni caso avviene in più fasi su carta abrasiva sempre più fine. Passando dalla carta abrasiva alla successiva bisogna:

- ruotare il provino di 90°
- non passare ad una carta abrasiva successiva prima che non siano scomparse tutte le rigature prodotte dalla carta abrasiva precedente.



In figura è riportato l'apparecchio usato nelle esercitazioni per eseguire la smerigliatura mediante l'uso di dischi con carte abrasive e la lucidatura mediante l'uso di dischi con feltro e paste abrasive diamantate.

Fase 4: lucidatura

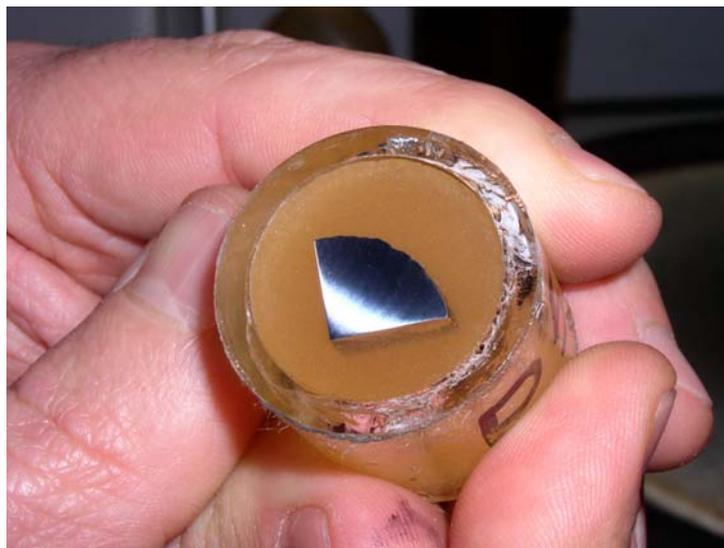
La lucidatura è l'operazione finale che rende speculare la superficie del campione. La lucidatura meccanica viene effettuata tenendo la superficie del campione aderente a un disco rotante di feltro sul quale viene spalata polvere abrasiva in sospensione su olio. Gli abrasivi sono di finezza e finezza variabile in funzione del campione. La polvere di diamante è indubbiamente l'abrasivo più efficace e permette lavorazioni rapide e su materiali di qualsiasi durezza. La polvere di diamante è utilizzata impastandola con olio di paraffina e spalmandola sul feltro. È in commercio contenuta in apposite siringhe che meglio consentono il dosaggio e con varie finezze.



Operazione di smerigliatura con disco abrasivo lubrificato con acqua.



Operazione di lucidatura con disco in feltro e pasta abrasiva.



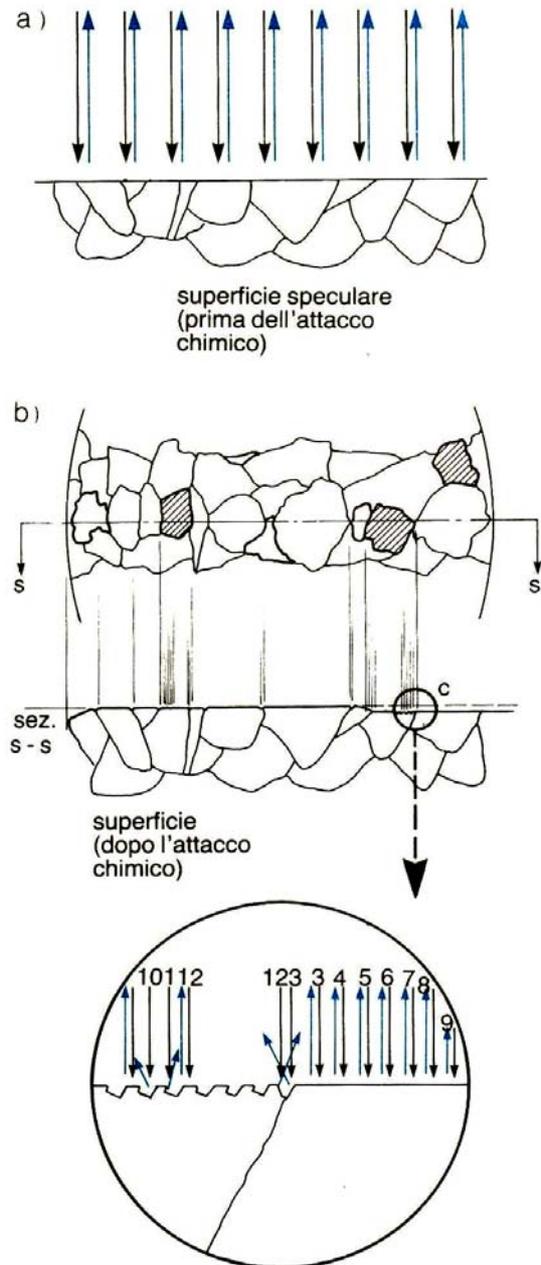
Provino inglobato in resina con superficie lucidata a specchio

Fase 5: attacco acido

La superficie lucida del campione è un'insieme di tanti cristalli che costituiscono altrettanti piccoli specchi orientati nello stesso modo. Se il campione viene sottoposto al microscopio, la sua superficie speculare è investita da un fascio luminoso che i singoli cristalli riflettono interamente verso l'osservatore. All'oculare perverrà dunque un'immagine uniforme e molto lucente che non permetterà all'operatore di distinguere alcun particolare. Per rendere visibili i grani bisogna effettuare sulla superficie del provino un attacco acido che mettono in evidenza i bordi dei grani e le diverse strutture della lega metallica.

Per effettuare l'attacco per mezzo di un reattivo chimico si deve:

- scegliere il reattivo più idoneo;
- cospargere sulla superficie del campione il reattivo chimico prescelto (lasciando cadere una goccia oppure immergendo il campione nel reattivo acido);
- tenere il reattivo chimico sulla superficie per il tempo previsto;
- lavare il campione con acqua;
- immergere il campione in alcool;
- asciugare il campione con aria calda;
- pulire (eventualmente) con cotone idrofilo la superficie da esaminare;
- osservare al microscopio con il numero di ingrandimenti più idoneo.



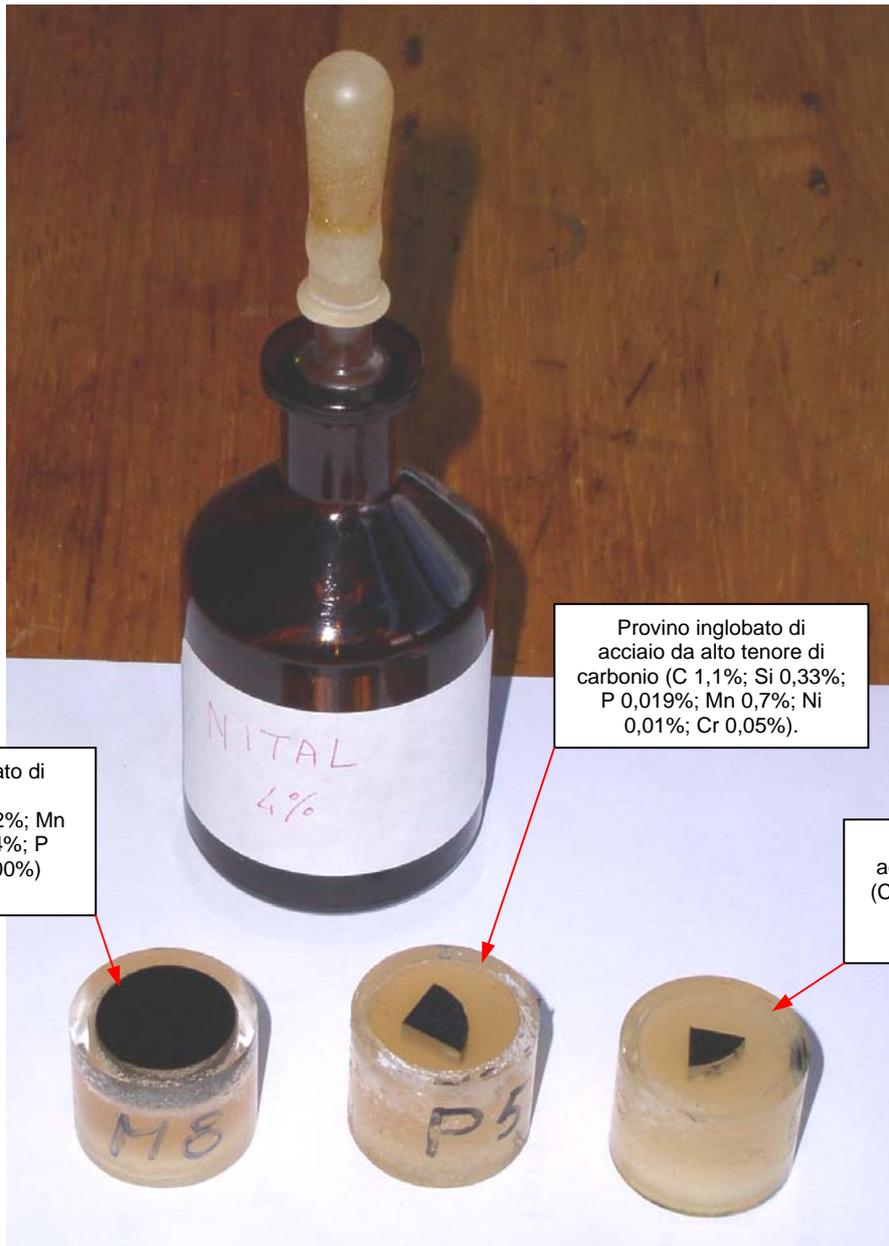
Tra i reattivi più usati si ricorda:

- Nital;
- Picral.

Sezione della superficie del campione: prima (a) e dopo l'attacco acido (b)

3.4. Reattivi d'attacco per materiali ferrosi.

Nome reattivo	Composizione	Note	Uso
acido nitrico 2%	acido nitrico conc.: 2 cm ³ alcol etilico (o amilico): 98 cm	Attacco breve: da 10 s a 1 min. Per acciai rapidi: 10 min.	Per acciai al carbonio temprati e rinvenuti e per acciai nitrurati: mette in evidenza i contorni dei grani
acido nitrico 5% (Nital)	acido nitrico: 5 cm ³ alcol etilico (o amilico): 95 cm ³	Per evitare l'annerimento dei campioni, questi, dopo l'attacco, devono essere lavati in alcool e quindi prontamente asciugati, preferibilmente con getto di aria	Mette in evidenza la perlite, la sorbite e i margini dei grani, sia negli acciai che nelle ghise. La cementite libera rimane inattaccata, ma i contorni dei carburi vengono messi in evidenza
acido picrico (Picral)	soluzione al 4% in alcool etilico	Si usa freddo, strofinando la superficie. Durata d'attacco da 10 s a qualche minuto	Per acciai dolci: mette in evidenza i carburi dei grani di ferrite, specie per strutture fini e confuse, mentre negli acciai temprati colora in bruno la martensite. Raccomandato per acciai speciali
acido picrico	soluzione satura di acido picrico in alcool etilico	A volte si ottengono migliori risultati facendo precedere l'attacco con acido nitrico a 15 % in alcool	Colora la perlite e la sorbite, impartisce inoltre colorazioni diverse alla martensite mentre la troostite si colora in nero
acido cloridrico	HCl conc.: 1 cm ³ acqua: 100 cm	Si può diluire con 500 cm ³ di acqua distillata e far passare una debole corrente elettrica	Per acciai temprati
picrato sodico	acido picrico: 2 g idrato sodico: 25 g acqua: 100 g	Si sciogliono 25 g di idrato sodico in 60-70 cm ³ d'acqua, si aggiungono 2 g d'acido picrico e si scalda fino a dissoluzione portando poi a 100 cm ³ con acqua. La soluzione deve essere sempre alcalina. Si usa bollente. Durata d'attacco: 5-10 min.	La cementite e gli altri carburi vengono anneriti. Negli acciai al tungsteno i tungsturi (Fe ₂ W) e il carburo di ferro e tungsteno rimangono inalterati. Quando lo spessore delle lamelle di cementite è inferiore a 0,001 mm la soluzione di picrato sodico non ha più azione, la perlite fine resta incolore (Le Chatelier). Si usa anche per mettere in evidenza la struttura dendritica degli acciai fusi al 12% Mn.



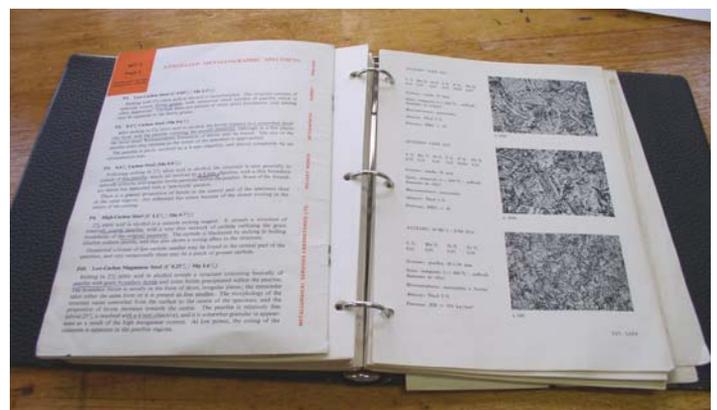
Provino inglobato di Ghisa
(C 3,54%; Si 0,42%; Mn 0,50%; S 0,024%; P 0,012%; Cr 1,00%)

Provino inglobato di acciaio da alto tenore di carbonio (C 1,1%; Si 0,33%; P 0,019%; Mn 0,7%; Ni 0,01%; Cr 0,05%).

Provino inglobato di acciaio: acciaio nichel cromo (C 0,4%; Si 0,32%; S 0,038%; P 0,014%; Mn 0,55%; Ni 2,4%, Cr 0,7%)

3.5. Applicazione della fotografia nell'indagine metallografica

Gli esami metallografici richiedono spesso una documentazione fotografica; a tale scopo i moderni microscopi metallografici sono dotati di una completa attrezzatura per ottenere delle microfotografie. Queste ultime saranno poi confrontate con le immagini di atlanti metallografici in cui sono riportate foto di analisi metallografiche con caratteristiche note dei materiali. Dalla comparazione si possono dedurre considerazioni sul materiale che si sta esaminando.



3.6. Analisi metallografica

3.6.1. Esempi di metallografia

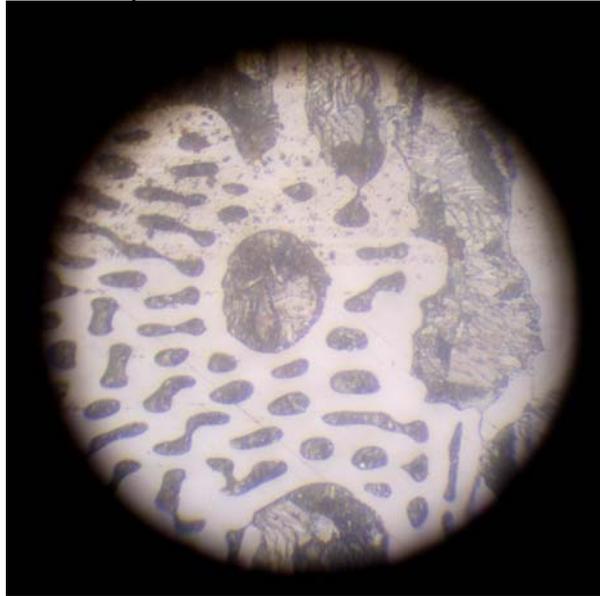
Materiale: Ghisa (C 3,54%; Si 0,42%; Mn 0,50%; S 0,024%; P 0,012%; Cr 1,00%)

Perlite più ledeburite eutettica con prevalenza di ledeburite.

Ingrandimenti: 200x

Attacco acido: Nital 4% per 30 sec.

Eutettico: Ledeburite+Cementite primaria e austenite



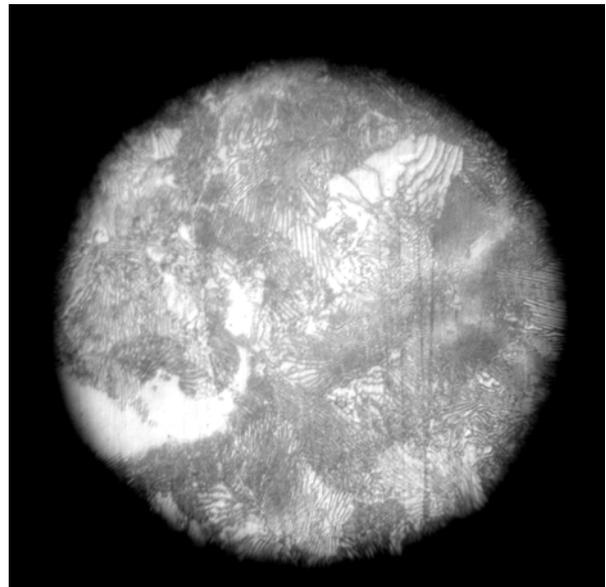
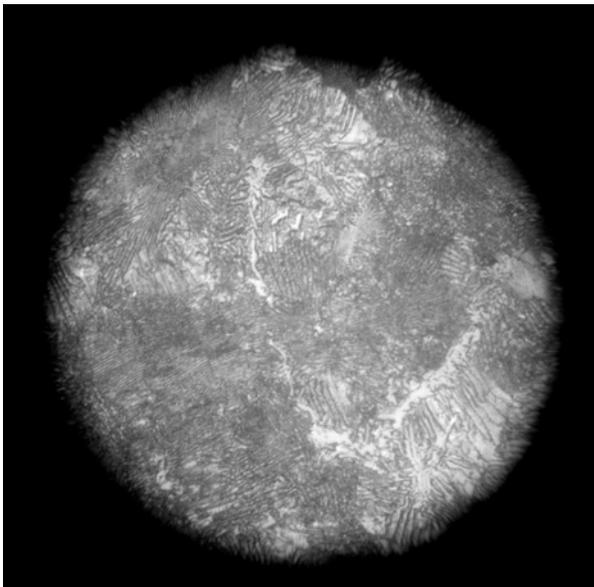
Materiale: acciaio da alto tenore di carbonio (C 1,1%; Si 0,33%; P 0,019%; Mn 0,7%; Ni 0,01%; Cr 0,05%).

Si nota una struttura di perlite relativamente grezza con una rete di carburo delineante i confini dei grani dell'austenite originale.

Ingrandimenti: 500x

200x

attacco acido: Nital 4% per 25 sec.

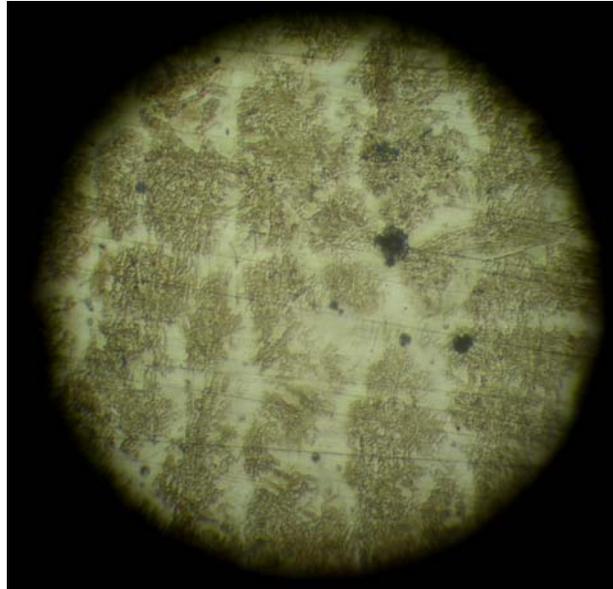


Materiale: acciaio nichel cromo (C 0,4%; Si 0,32%; S 0,038%; P 0,014%; Mn 0,55%; Ni 2,4%, Cr 0,7%) temprato in olio.

La struttura consiste in martensite (marrone) e bainite (bianca).

ingrandimenti: 200x

attacco acido: Nital 4% per 45 sec.



TRATTAMENTI TERMICI DEGLI ACCIAI

1. La ricottura	2
1.1. Generalità	2
1.2. Ricottura completa	3
1.3. Esercitazione	3
1.3.1. Analisi chimica	3
1.3.2. Considerazioni e preparazione alla prova	4
1.3.3. Gli effetti ottenuti	4
1.4. Ricottura di normalizzazione	5
2. La tempra	7
2.1. Generalità	7
2.2. Tempra diretta	8
2.3. Cause degli insuccessi delle tempre degli acciai	10
3. Misura della temprabilità	11
3.1. Prova Jominy	11
3.2. Considerazioni	15
3.3. Bande di temprabilità e indicazioni dei risultati della prova Jominy	16
3.4. ESERCITAZIONE	17
3.4.1. Prova Jominy UNI 3150	17
3.4.2. Risultati su grafico (realizzati con Excel)	17
3.4.3. Conclusioni	18
4. Rinvenimento Generalità	19
5. Bonifica	20
6. Cementazioni	21
6.1. Carboementazione	21
6.2. Acciai da Carboementazione	22
6.3. Gruppi di acciai da carboementazione unificati. Composizione chimica	22
6.4. Classi di cementazione e valori dello spessore efficace dello stato cementato	22
7. Nitrurazione	23
7.1. Effetti del trattamento termico di nitrurazione	23
7.2. Acciai da nitrurazione	23
7.3. Classificazione degli spessori nitrurati	23

Trattamenti termici degli acciai

Per trattamento termico (da ora in avanti indicato con t.t.) di un acciaio si intende un ciclo termico costituito da:

- riscaldamento;
- mantenimento;
- raffreddamento.

Il t.t. va effettuato:

- in predeterminate condizioni;
- a determinate temperature;
- con determinati tempi.

Lo scopo dei trattamenti termici è quello di far assumere all'acciaio quelle strutture cristalline che gli conferiscono determinate proprietà meccaniche e/o tecnologiche.

Per effettuare un t.t. su un acciaio si richiede la conoscenza:

- delle dimensioni del pezzo da trattare;
- delle curve di Bain relative al materiale;
- in mancanza delle curve di Bain, la conoscenza dei punti critici

$$A_{C1}, A_{C3}, A_{C_{cm}}, A_{r_{cm}}, A_{r3}, A_{r1}, M_s, M_f$$

I t.t. devono essere effettuati in un ambiente protetto:

ambiente costituito da gas, come azoto, anidride carbonica, ecc.;

casce metalliche contenenti sabbia, graniglia, ecc. nelle quali vengono immersi i pezzi così protetti e separati dall'aria;

sottovuoto: la miglior atmosfera è... nessuna atmosfera!

Classificazione dei t.t.	1. Ricotture	2. Tempre
3. Rinvenimenti	4. Cementazioni	5. Altri t.t.

1. La ricottura.

1.1. Generalità.

Con la denominazione di ricottura si fa riferimento a quei t.t. che comprendono un riscaldamento a una temperatura non molto diversa da A_{C3} per un certo tempo a cui fa seguito un raffreddamento piuttosto lento che dà luogo alle strutture previste dal diagramma Fe – C.

Gli scopi della ricottura sono i seguenti:

- rendere più tenero il materiale;
- rendere più lavorabile alle macchine utensili;
- eliminare le tensioni interne;
- omogeneizzare la struttura interna.

Esistono vari tipi di ricottura:

- ricottura completa;
- ricottura di omogeneizzazione;
- ricottura di globulizzazione;
- ricottura di ricristallizzazione;
- ricottura isoterma;
- ricottura di normalizzazione.

Le ricotture che rivestono un ruolo di maggiore interesse sono:

1.2. Ricottura completa

La ricottura completa comprende le seguenti fasi:

- lento riscaldamento a una temperatura, in genere, di $20 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ sopra ad Ac_3 (= temperatura di austenizzazione);
- permanenza a tale temperatura per un tempo proporzionale alle dimensioni dei pezzi;
- raffreddamento che deve essere lento almeno sino ad una certa temperatura; successivamente può essere accelerato.

1.3. Esercitazione:

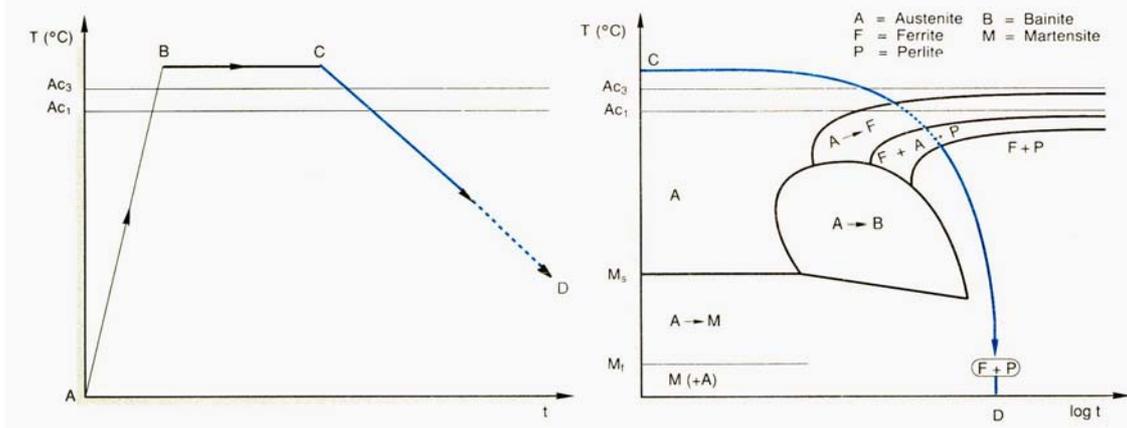
Ricottura completa di una provetta per eseguire una prova di trazione con le seguenti dimensioni:

$d_0=15 \text{ mm}$;
 diametro delle teste = 30 mm ;
 $L_0=75 \text{ mm}$;
 materiale: acciaio da cementazione.

1.3.1. Analisi chimica:

Qualità acciaio	C%	$M_n\%$	$C_r\%$	$N_i\%$	$M_o\%$
18 Ni Cr Mo 5	0,15 ÷ 0,21	0,60 ÷ 0,90	0,70 ÷ 1,00	1,20 ÷ 1,50	0,15 ÷ 0,25

Nella figura sotto viene rappresentato, in grafico generico, il ciclo termico di questo t.t.:



1.3.2. Considerazioni e preparazione alla prova:

Le fasi di ricottura si riferiscono a un acciaio del tipo ipoeutettoide ($C < 0,83\%$):

1. accensione per effettuare il preriscaldamento del forno a muffola dopo aver preventivamente impostato la temperatura;
2. il riscaldamento (segmento A – B) deve avvenire lentamente in modo da non creare differenze notevoli fra la superficie esterna e il cuore del pezzo;
3. la temperatura di austenizzazione è compresa fra Ac_1 e Ac_3 e vale, per questo materiale, $850^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$;
4. la temperatura di austenizzazione, affinché si verifichi l'austenizzazione di tutto il pezzo fino al cuore, deve essere mantenuta per circa 1h ogni $30 \div 50$ mm di spessore (segmento B – C). Tempo di permanenza previsto per il provino 30 min.;
5. il raffreddamento (segmento C – D) deve essere lento: asseconda del tipo di acciaio (circa $5 \div 50^{\circ}C/h$ (raffreddamento in forno); superato l'intervallo critico il raffreddamento può essere più veloce.



Doppio forno a muffola



Termostato con i due indici uno regolabile alla temperatura voluta, uno che dà la temperatura raggiunta.



Introduzione del pezzo



Struttura prevalente: perlite lamellare.

Durante il raffreddamento si ha:

- la completa separazione dell'austenite dall'austenite;
- successivamente al punto precedente formazione di una struttura perlitica a grana grossa a lamellare (fig. a lato).

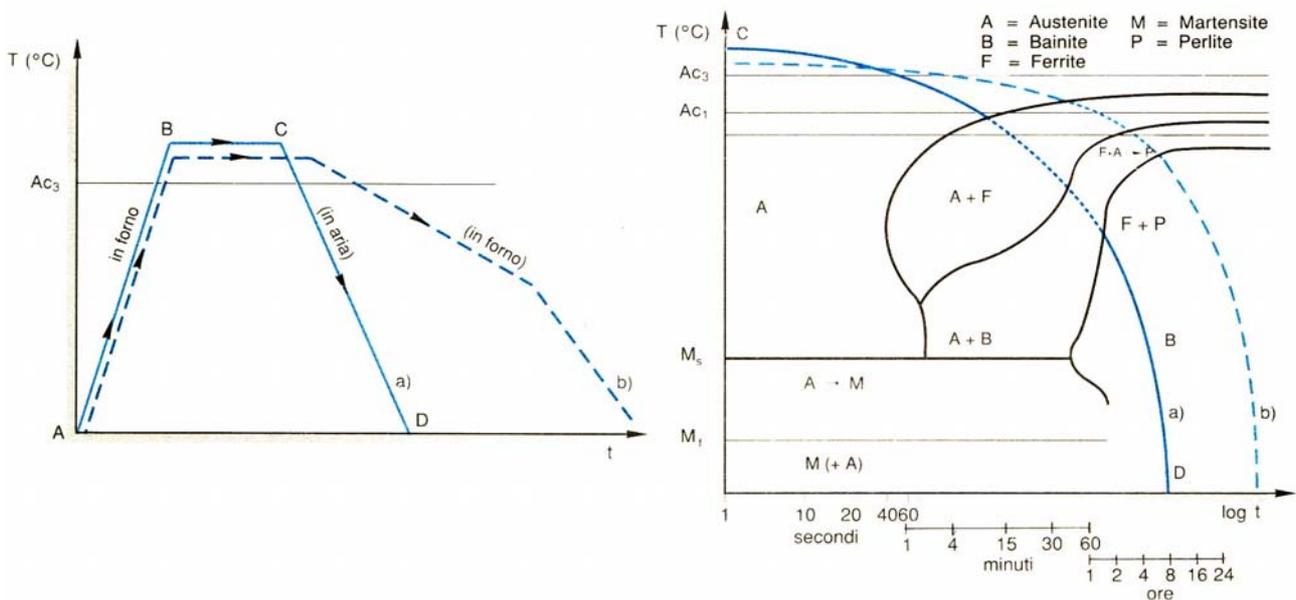
1.3.3. Gli effetti ottenuti:

- omogeneizzazione;
- maggior deformabilità a freddo (il materiale è più adatto per l'imbutitura, piegatura, trafilatura, estrusione, stampaggio, ecc.);
- discreta lavorabilità alle macchine utensili.

1.4. Ricottura di normalizzazione

La ricottura di normalizzazione o normalizzazione comprende le seguenti fasi:

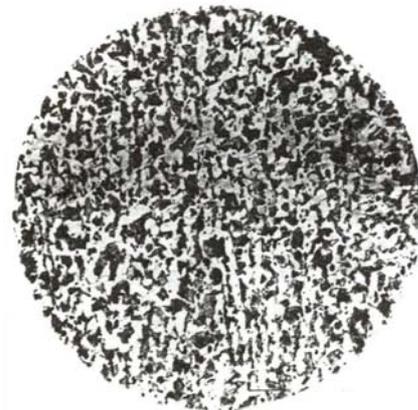
1. riscaldamento a una temperatura di $40 \div 80^\circ\text{C}$ sopra a Ac_3 per gli acciai ipoeutettoi e sopra Ac_1 (a volte sopra ad Ac_{cm}) per gli acciai ipereutettoi;
2. permanenza a tale temperatura per un tempo proporzionale alle dimensioni dei pezzi e sino a che si realizza la completa austenizzazione;
3. raffreddamento mediamente veloce (in aria) ma tale da non far cessare la formazione di ferrite (minore della velocità critica inferiore).



Ciclo termico di normalizzazione (a) e di ricottura completa (b) per un acciaio ipoeutettoide (a sinistra). Diagramma di Bain TRC di un acciaio ipoeutettoide. Curve di raffreddamento: di normalizzazione (a) e di ricottura completa (b)



a



b

Struttura di acciaio C35 (200x): a) ricotto; b) normalizzato.

La struttura ottenuta dopo normalizzazione si presenta in grani molto fini con lamelle di perlite molto sottili e ravvicinate con un netto aumento della durezza.

La normalizzazione viene eseguita quando si vuole rendere omogenea o fine una struttura anomala come per esempio:

- cristalli ingrossati per surriscaldamento;
- strutture fibrose (es. acciai laminati);
- in generale in tutti i pezzi meccanici ottenuti a caldo come getti, pezzi fucinati, pezzi saldati, pezzi stampati, o lavorati a caldo, ecc.

2. La tempra.

2.1. Generalità.

Dalle tabelle UNI:

“Sotto la denominazione generica di tempra si comprendono t.t. eseguiti con cicli diversi che hanno in comune essenzialmente:

- *un riscaldamento a temperatura superiore ad A_{c3} (per gli acciai ipoeutetoidi), ad A_{c1} e talvolta ad A_{cm} (per gli acciai ipereutetoidi);*
- *permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente per ottenere nelle zone interessate l'equilibrio strutturale (= austenizzazione);*
- *successivo raffreddamento con una velocità superiore alla velocità critica di tempra fino ad una temperatura prossima ad M_s ;*
- *le successive modalità di raffreddamento nel suddetto campo o al di sotto di esso, sono differenti a seconda degli scopi che si desiderano ottenere e caratterizzano i singoli trattamenti di tempra”.*

I forni per le tempre sono quasi tutti quelli utilizzati per le ricotture.

Lo scopo delle tempre (obbligatoriamente seguite da altri trattamenti termici) è quello di avere nell'acciaio una struttura più o meno martensitica che gli conferisce:

- maggior durezza;
- più elevato carico di rottura;
- più elevato carico al limite di elasticità;
- più elevata resistenza all'usura;
- più elevata resistenza alle sollecitazioni di fatica.

Questo avviene però a svantaggio di altre proprietà o caratteristiche, infatti si ottiene che:

- una diminuzione della resilienza;
- una diminuzione dell'allungamento percentuale alla rottura;
- una diminuzione della strizione;
- tensioni elevate all'interno dei pezzi;
- distorsione dei pezzi.

Si deve inoltre tener presente che l'elevata fragilità delle strutture ottenute con le varie tempre rende sconsigliabile l'impiego diretto dei pezzi; è, quindi, necessario far seguire un ulteriore t.t. come il rinvenimento che attenua la fragilità dei pezzi temprati.

Esistono vari tipi di tempra:

- tempra diretta;
- tempra scalare martensitica;
- tempra scalare bainitica;
- tempra con isteresi;
- tempra incompleta;
- tempra superficiale.

Andremo ad analizzare soltanto la più comune ovvero la tempra diretta.

2.2. Tempra diretta

La tempra diretta comprende le seguenti fasi:

- riscaldamento a una temperatura (= temperatura di tempra) di $20 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ superiore ad A_{c3} (per gli acciai ipoeutetoidi), ad A_{c1} e talvolta ad A_{cm} (per gli acciai ipereutetoidi);



Doppio forno a muffola con temperature differenziate per tempra e rinvenimento a 300°C .

- Permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente per ottenere l'equilibrio strutturale (cioè austenizzazione). Affinché avvenga la completa austenizzazione dell'acciaio: *1 ora ogni $30 \div 50 \text{ mm}$ di spessore del pezzo;*



Estrazione di una provetta per prova di trazione dopo permanenza a 850°C per circa 1 ora.

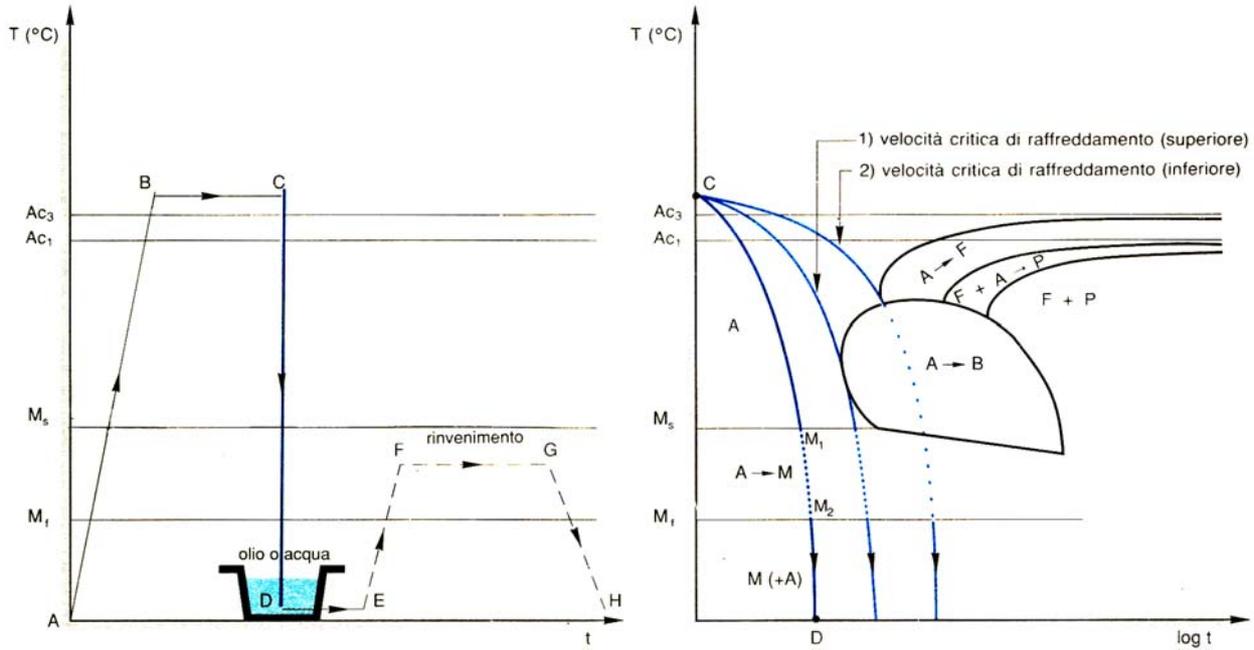
- Raffreddamento fino alla temperatura ambiente con velocità più elevata di quella critica, in modo da ottenere direttamente dall'austenite una struttura martensitica. È buona norma usare fra i refrigeranti (acqua, olio, ecc.) quello meno drastico.



Vasca di olio con pompa per la movimentazione.

Tempra diretta di un acciaio ipoeutettoide:

- ciclo termico (a sinistra);
- curva di raffreddamento sopra le curve di Bain TRC.



Struttura di due acciai temprati



a



b

Struttura martensitica di acciaio temprato (500x):
 a) acciaio C60 a 810°C in acqua (HRC = 61);
 b) acciaio con 1,04% di C in acqua.

2.3. Cause degli insuccessi delle tempre degli acciai

La tempra seguita da rinvenimento deve portare l'acciaio ad una ben determinata durezza. Se questa durezza non è raggiunta o se vi sono sui pezzi delle zone di minor durezza si pone il problema di ricercarne le cause che, in genere, sono le seguenti:

1. Decarburazione superficiale: se la decarburazione è notevole, può essere rilevata con una prova di durezza sulla superficie e una su uno strato sottostante;
2. Tempra incompleta: occorre, di solito, una elevata velocità di raffreddamento per avere la trasformazione dalla struttura martensitica alla struttura di tempra martensitica. È sufficiente la presenza di bolle di vapore, strati di ossido, ecc. sulla superficie del pezzo per avere un rallentamento del raffreddamento e non ottenere la trasformazione strutturale desiderata;
3. Temperatura di tempra troppo bassa: se, nessuna delle due precedenti cause risulta essere la causa delle anomalie riscontrate, non resta che pensare ad una temperatura insufficiente del forno.

3. Misura della temprabilità.

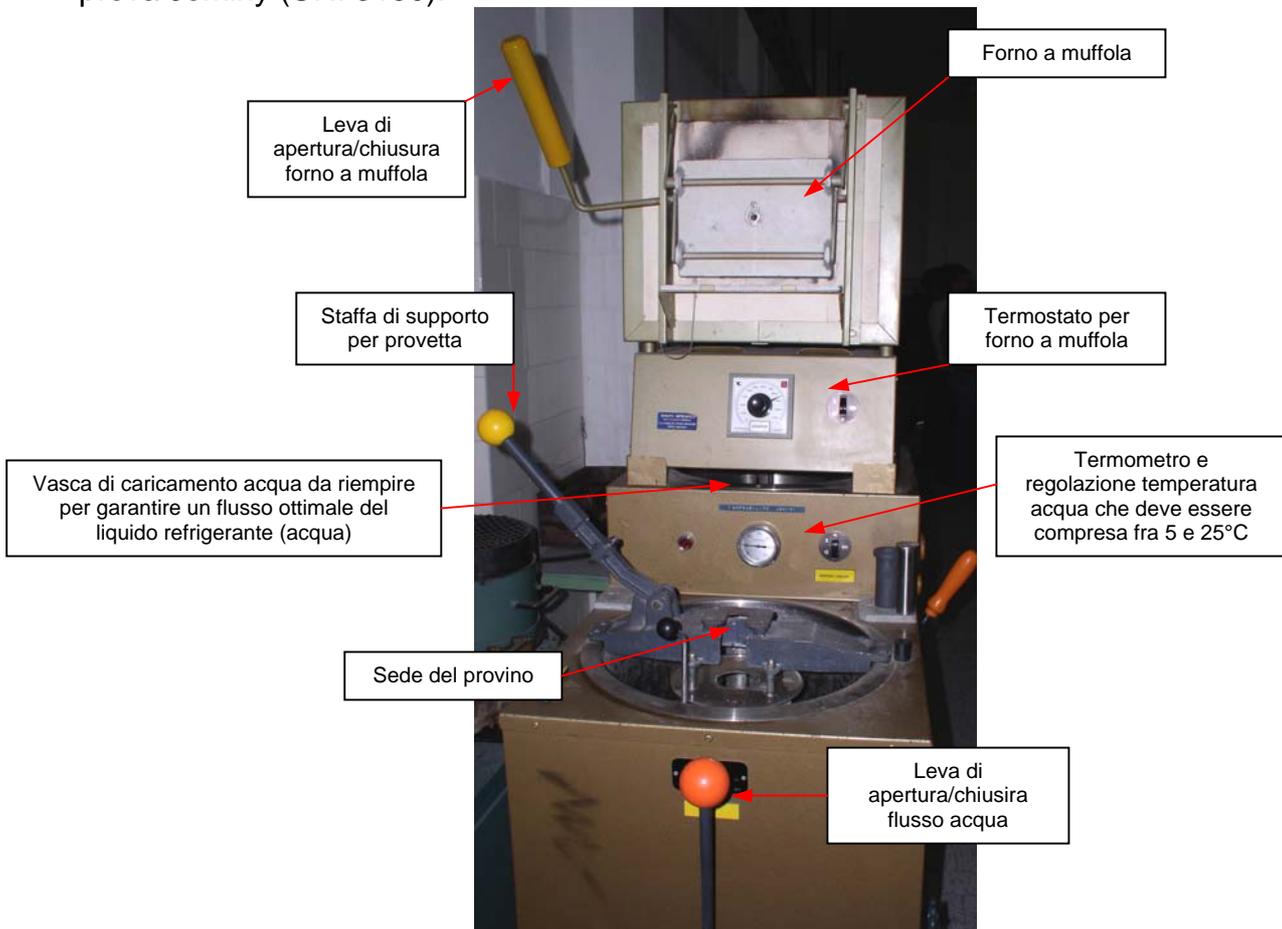
3.1. Prova Jominy

Si definisce temprabilità quella proprietà dell'acciaio che esprime la penetrazione della durezza quando esso viene raffreddato, di solito in modo veloce, dalla temperatura alla quale era stato austenizzato. La suddetta temperatura e la velocità di raffreddamento dipendono dalla natura e dalla percentuale degli elementi di alligazione nell'acciaio.

La temprabilità è in relazione con:

Durezza raggiunta	Un materiale è tanto più temprabile, quanto maggiore durezza acquista con la tempra.
Durezza in profondità	L'acciaio è tanto più temprabile quanto più in profondità si estende la durezza acquisita.
Formazione di martensite	La tempra di un acciaio è in relazione della formazione della martensite e la bontà del t.t., con le conseguenti proprietà meccaniche è legata alla percentuale di martensite che si è formata.
Posizione delle curve di Bain	Risulta evidente che la temprabilità di un acciaio è tanto maggiore quanto più spostate verso destra sono le curve di Bain (verso tempi più lunghi).

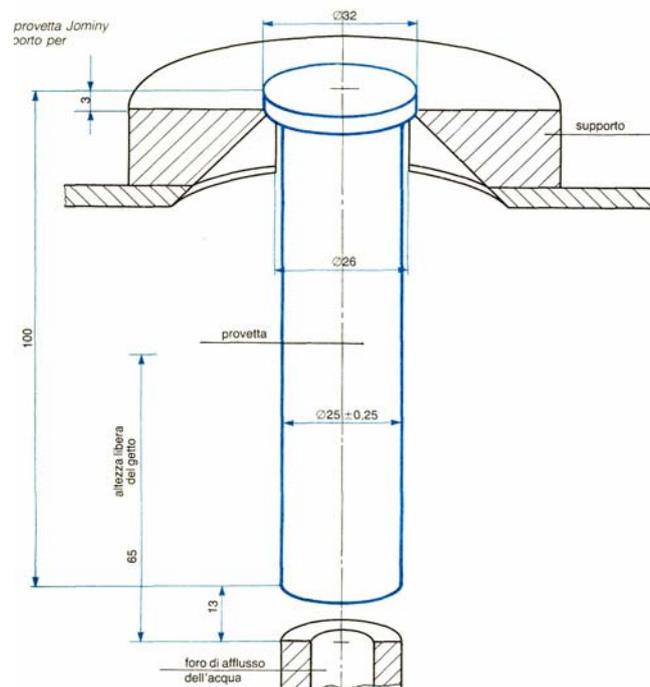
La prova più diffusa per la determinazione della temprabilità sugli acciai è senza dubbio la prova Jominy (UNI 3150).



Apparecchiatura per l'esecuzione della prova di temprabilità secondo il metodo Jominy

La prova si svolge secondo le fasi e modalità seguenti:

1. Prelievo di un saggio che sarà sottoposto alla ricottura di normalizzazione.
2. Il saggio deve avere un sovrametallo di almeno 3 mm (per garantire che la provetta finita non risulti decarburata in superficie).
3. Dal saggio deve essere ricavata una provetta con le caratteristiche dimensionali riportate a lato (provetta già posizionata sull'apposito supporto per la fase di raffreddamento).

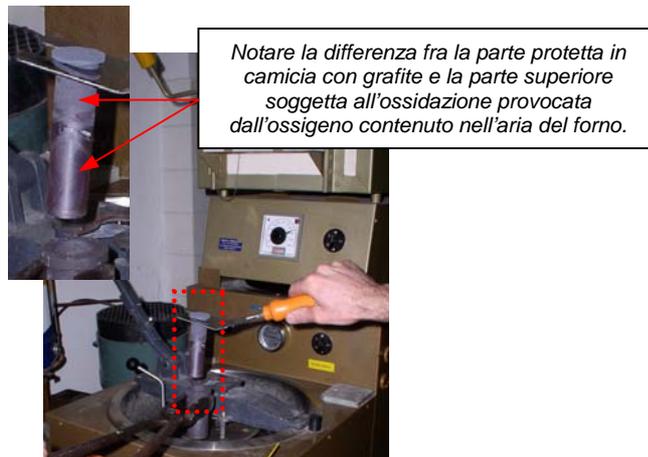


4. La provetta viene riscaldata in forno (a temperatura di austenizzazione) dopo essere stata posta in una camicia protettiva con sul fondo una pastiglia di grafite. A tale temperatura la provetta deve permanere per almeno 30 min.



La provetta viene inserita nel forno dopo essere stata posizionata nell'apposito contenitore protettivo

5. A riscaldamento ultimato, la provetta viene estratta dal suo contenitore, posta sull'apposito supporto e investita nella parte inferiore da un getto di acqua (altezza getto libero 65 mm) con temperatura compresa fra 5 e 25°C. Tale operazione (vedi norma) non deve superare 5 s. Essendo questo tempo molto breve è bene organizzarsi e preparare l'apparecchiatura in modo di agire nel tempo più breve possibile una volta estratta la provetta dal forno.



Momento dell'estrazione della provetta dalla camicia protettiva



Provetta in posizione colpita dal getto dell'acqua.

6. Dopo il raffreddamento, si ricavano sulla provetta due generatrici piane simmetriche mediante rettifica asportando 0,4 ÷ 0,5 mm di spessore.



Generatrice rettificata sulla quale verranno eseguite le prove di durezza.



Rettificatrice piana in azione sulla provetta Jominy

7. Sistemata la provetta su adatto supporto, si effettuano le misure di durezza HRC o HV. Le misure di durezza devono essere fatte su entrambe le superfici:

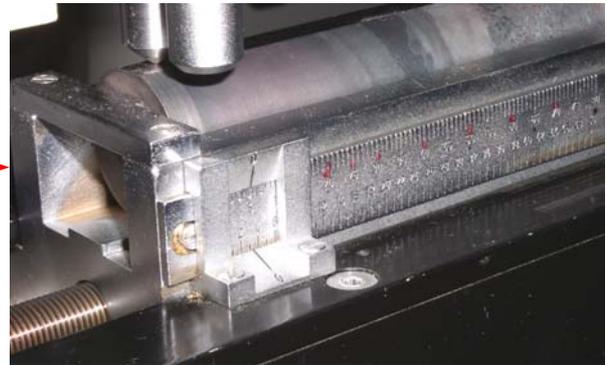
- La prima prova a 1.5 mm dall'estremità;
- la seconda a 1.5 mm dalla prima;
- le prove successive con intervalli di 2 mm fino a 15 mm totali dall'estremità; dopo i 15 mm intervalli da 5 mm o a piacere.



Provetta posizionata su apposita incudine per prova Jominy



Durometro Vickers con incudine per prova Jominy inserita sul porta provini.



Scala millimetrata per lo spostamento preciso della provetta per eseguire le varie prove di durezza distanziate secondo i criteri normalizzati.

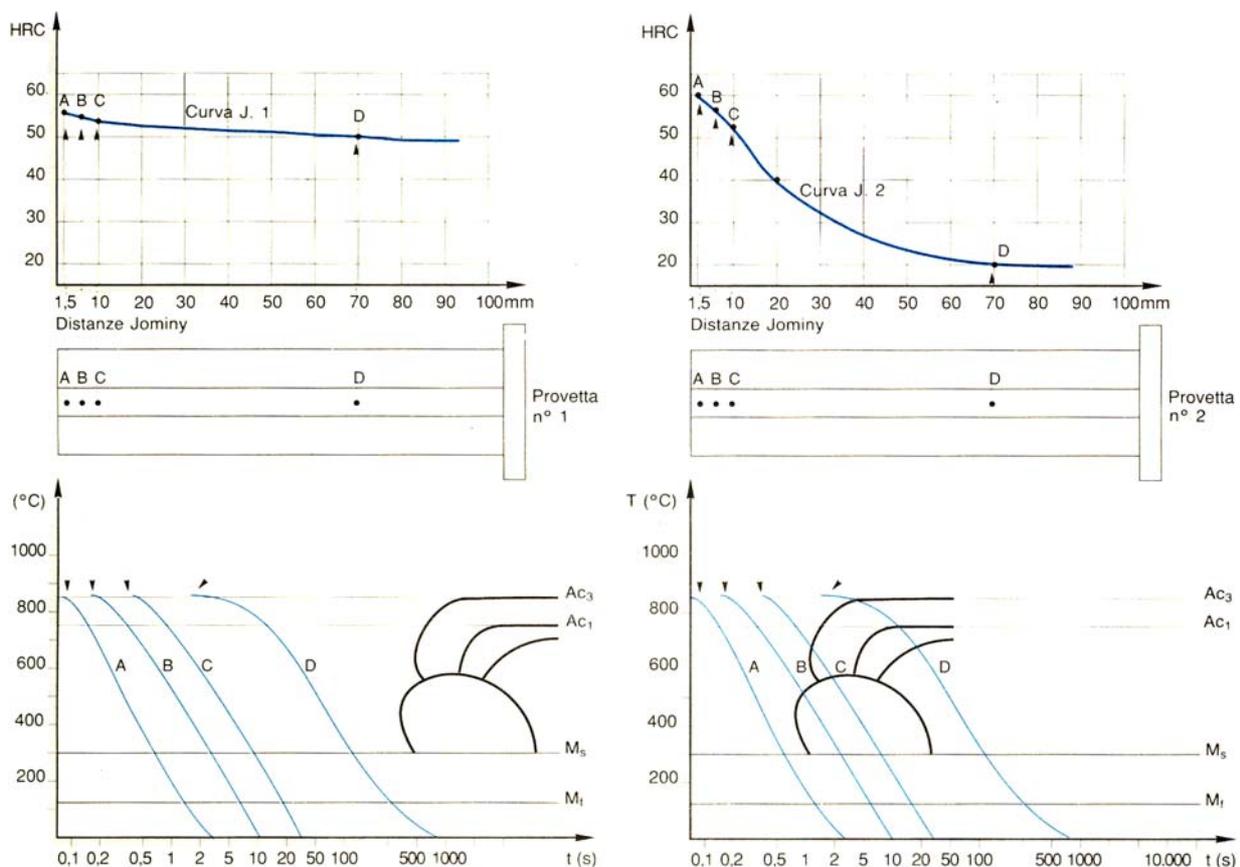
8. I valori di durezza così ottenuti vengono riportati su un grafico come previsto dalla norma UNI chiamato "curva di temprabilità".

Nella figura sotto sono riportate due curve di temprabilità Jominy:

- la **curva 1** è quella di un materiale che viene giudicato di elevata temprabilità;
- la **curva 2** è quella di un materiale di bassa temprabilità.

3.2. Considerazioni

1. la velocità di raffreddamento su tutte le provette si possono considerare pressoché uguali;
2. il raffreddamento all'estremità inferiore della provetta (dove arriva il getto d'acqua) è talmente veloce che la struttura ottenuta è sicuramente martensitica per qualsiasi tipo di acciaio;



Curva Jominy di una provetta molto temprabile (provetta n. 1) e curva Jominy di una provetta poco temprabile (provetta n. 2). Sulla parte inferiore sono tracciate in colore le curve delle velocità di raffreddamento di 4 punti (A,B,C,D,) delle provette e le posizioni delle curve di Bain.

Esaminiamo le due curve:

Curva 1: la curva indica che su tutta la provetta si sono riscontrati valori di durezza pressoché uguali e ciò significa uguali strutture; pertanto si può dire che non solo sull'estremità temprata, ma su tutta la provetta si è ottenuta una struttura del tipo martensitico. Ciò significa che le curve di Bain sono tutte a destra (cioè verso tempi più elevati) rispetto alle curve della velocità di raffreddamento: curve di Bain a destra significa temprabilità elevata.

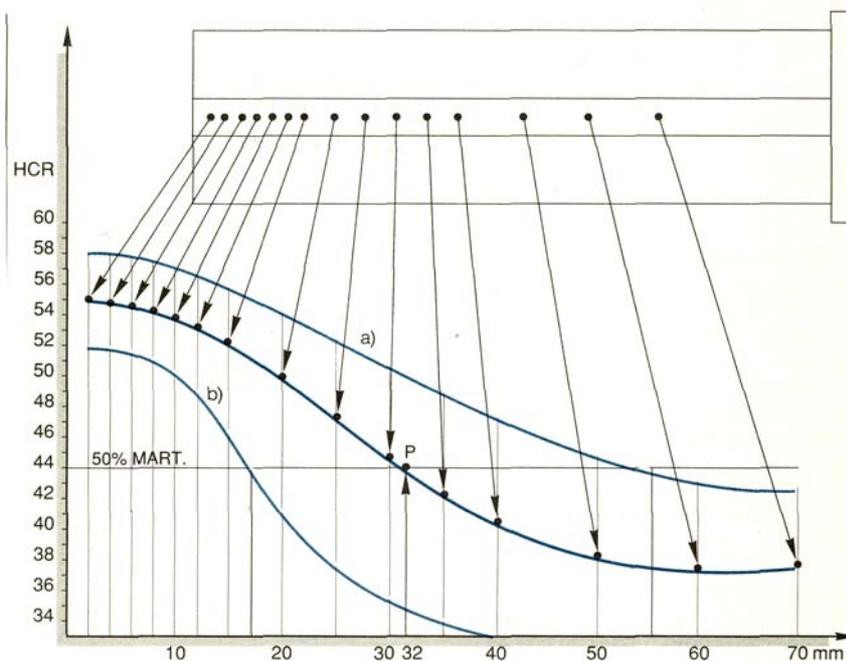
Curva 2: la curva indica dei valori di durezza elevata sull'estremità (temprata) e valori che si abbassano rapidamente a mano a mano che si va verso distanze Jominy maggiori. Pertanto solo sull'estremità temprata si ottiene martensite mentre allontanandosi anche di poco si ottengono strutture meno dure: cioè strutture perlitico - ferritiche a durezza via via sempre più basse. Ciò significa che le curve di Bain si trovano spostate a destra e sovrapposte alle curve di raffreddamento. Questo significa temprabilità bassa.

3.3. Bande di temprabilità e indicazioni dei risultati della prova Jominy

Colate diverse di uno stesso tipo di acciaio non possono dar luogo alla stessa curva Jominy: composizione chimica leggermente differente, presenza o meno di impurezze, situazioni di colata non sempre costanti e numerosi altri fattori fanno sì che le corrispondenti curve Jominy siano tra di loro leggermente diverse. Tracciate alcune decine di curve Jominy di un certo materiale si ottiene una fascia i cui limiti, superiore ed inferiore, sono le due curve che costituiscono la cosiddetta banda di temprabilità di quell'acciaio.

I risultati della prova Jominy possono essere espressi:

1. direttamente dalla curva Jominy dell'acciaio insieme alla banda di temprabilità come visibile in figura.



Curva Jominy ottenuta riportando i valori HRC misurati lungo una generatrice spianata dalla provetta. Le curve a) e b) costituiscono la banda di temprabilità.

2. Valori particolari della curva Jominy; valore di durezza ad una distanza particolare ad esempio: **J 42 10** significa che la durezza HRC di 42 è stata riscontrata alla distanza di 10 mm dall'estremità temprata.

Nel caso in cui le misure di durezza siano state rilevate secondo la scala Vickers l'indice di temprabilità deve sempre comprendere il simbolo HV;
 es.: **J HV 340/490-15** significa che la durezza Vickers è compresa fra 340 e 490 alla distanza di 15 mm dall'estremità temprata.

3.4. ESERCITAZIONE

3.4.1. Prova Jominy UNI 3150

Materiale: **39 Ni Cr Mo 3 UNI 7874**

Scopo della prova: esaminare il comportamento dell'acciaio ai trattamenti termici, verificando in particolare la penetrazione della durezza in profondità (variazione della durezza dalla superficie al cuore). Dalla prova si ricavano altresì indicazioni sull'attitudine dell'acciaio a subire un trattamento di indurimento.

Apparecchiature utilizzate: Forno elettrico a muffola con annesso dispositivo Jominy - Rettificatrice piana - Durometro.

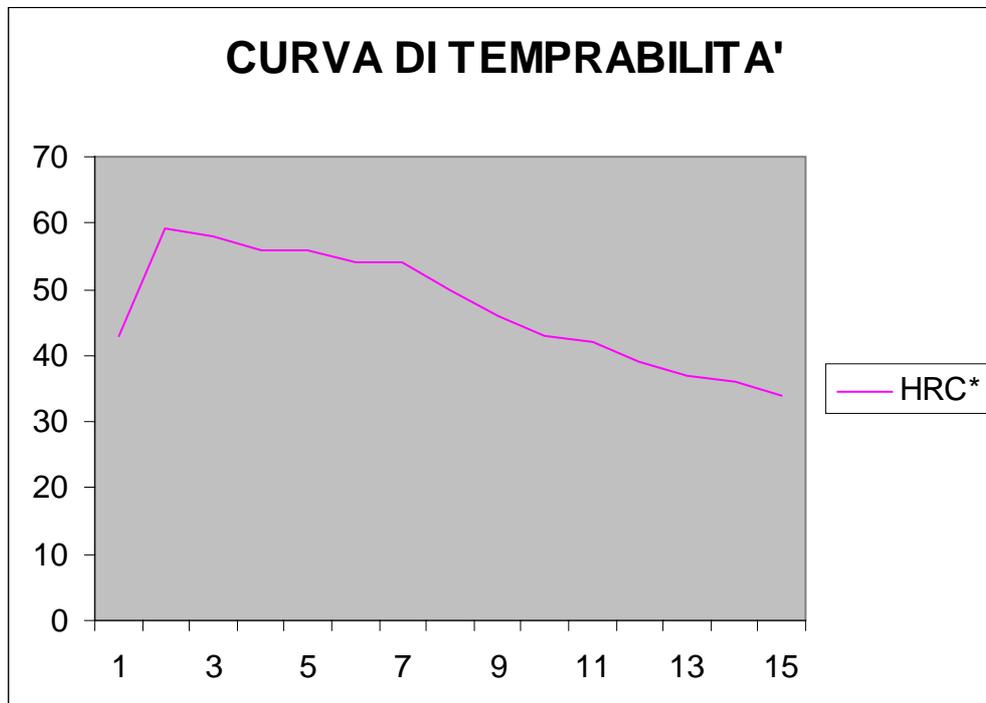
mm*	1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	55
HV	433	690	670	630	630	590	590	528	473	433	420	382	362	354	335
HRC**	43	59	58	56	56	54	54	50	46	43	42	39	37	36	34

*Distanza dall'estremità temprata della provetta in mm.

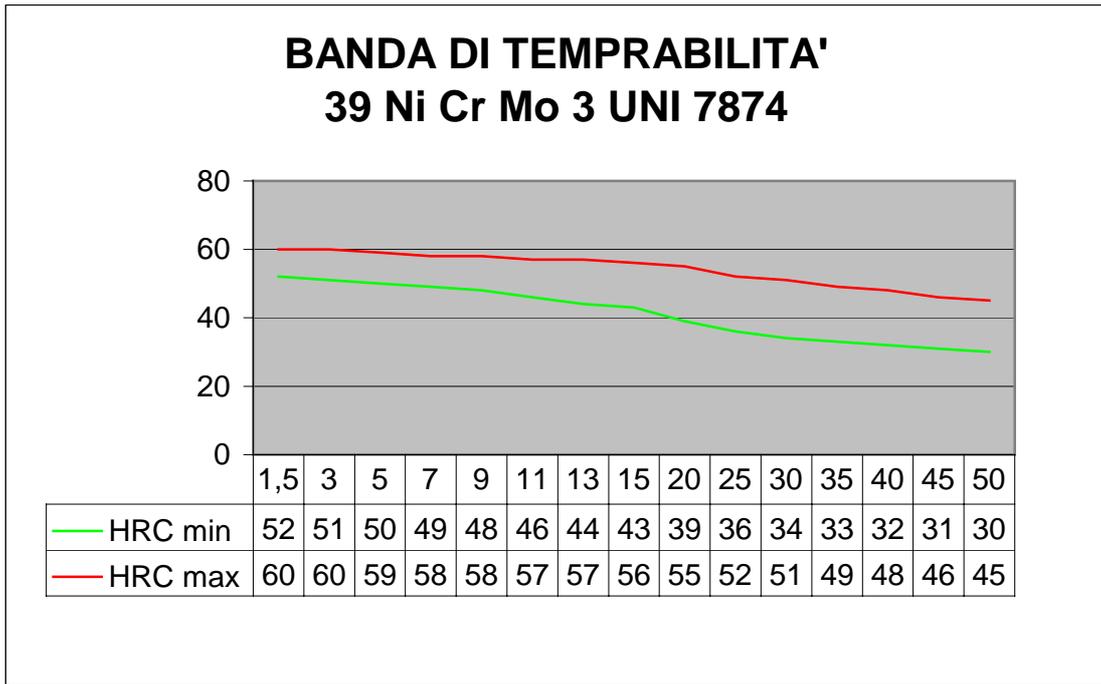
**i valori HRC sono stati ricavati mediante tabelle comparative dai valori HV.

N.B. E' stato necessario commutare i valori della durezza mediante tabelle per motivi pratici dato che quasi tutte le bande di temprabilità sono espresse in HRC.

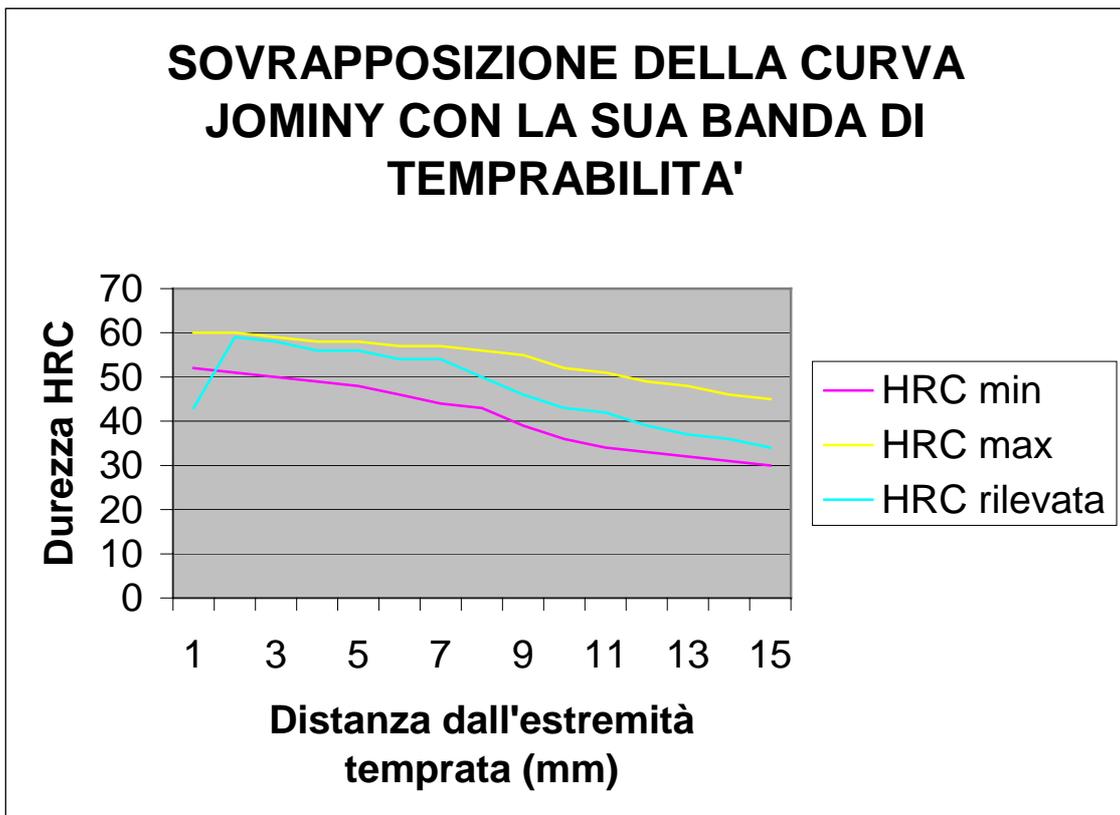
3.4.2. Risultati su grafico (realizzati con Excel)



Per una corretta interpretazione dei risultati occorre considerare quanto sotto indicato: i valori di durezza riscontrati all'estremità del provino risultano minori rispetto alle aspettative per effetto della possibile formazione di Austenite residua, inoltre la prima misura potrebbe essere stata influenzata da un cedimento del materiale.



Sovrapposizione della curva di temprabilità con la banda di temprabilità



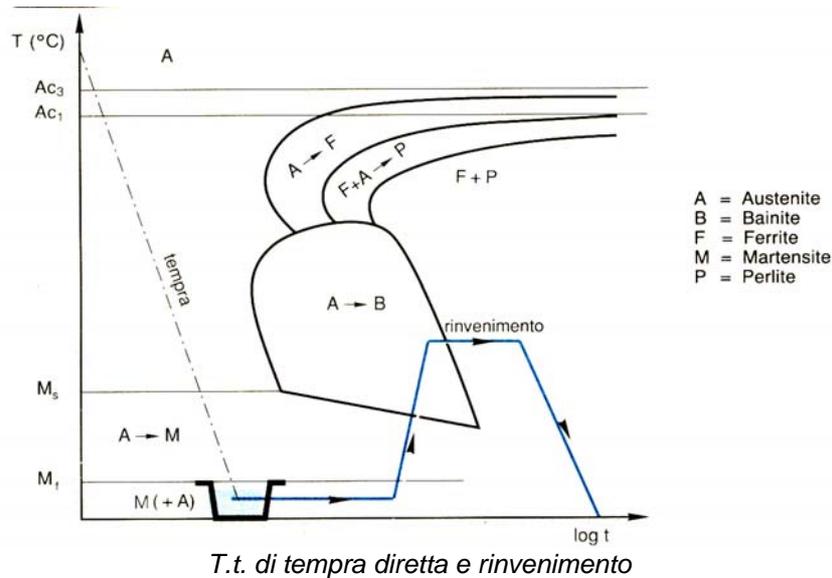
3.4.3. Conclusioni:

da quanto si può notare il materiale si è comportato in maniera ottima dato che la sua curva di temprabilità Jominy cade esattamente all'interno della sua banda di temprabilità. Il materiale in esame possiede sicuramente le caratteristiche volute al momento dell'acquisto.

4. Rinvenimento Generalità.

Il rinvenimento comprende le seguenti fasi:

- riscaldamento a temperatura che può essere bassa oppure relativamente alta ma comunque sempre inferiore ad Ac_3 ;
- permanenza alla suddetta temperatura per qualche ora (da 2 a 10 h);
- raffreddamento piuttosto veloce (in acqua o in olio) oppure a velocità qualsiasi (solitamente in aria) in base al tipo di materiale.



Nella figura sopra è disegnato in colore il ciclo termico del rinvenimento; dato che viene effettuato sempre dopo una tempra, è stato disegnato di seguito al ciclo di raffreddamento della più comune tra le tempre (tempra diretta).

Per le temperature di rinvenimento bisogna distinguere tre casi:

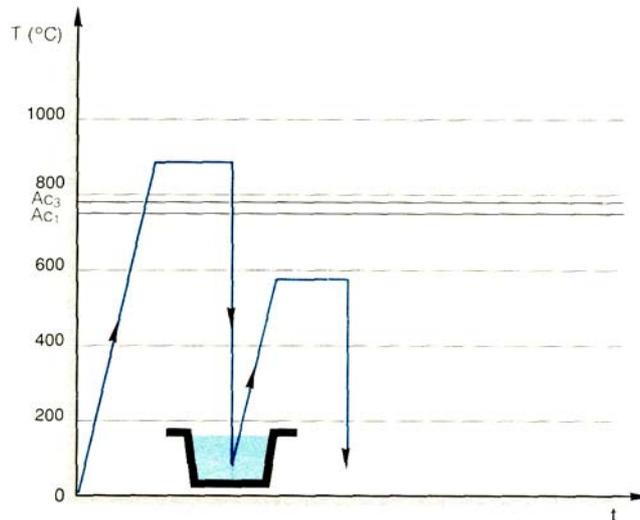
Temperatura di rinvenimento	Descrizione
1. 100 ÷ 200°C <i>Rinvenimento a bassa temperatura</i>	A queste temperature non cambia la struttura martensitica ottenuta con la tempra ma ne consegue: <ul style="list-style-type: none"> • riduzione della durezza; • riduzione notevole delle tensioni interne; • aumento notevole della resilienza.
2. 450 ÷ 650°C <i>Rinvenimento a temperatura relativamente alta</i>	La struttura martensitica si trasforma completamente e cambiano tutte le proprietà dell'acciaio. Questo rinvenimento associato alla tempra si definisce BONIFICA (vedi più avanti).
3. Fragilità al rinvenimento	Non è possibile effettuare un rinvenimento a temperature intermedie rispetto ai punti precedenti perché si otterrebbe la cosiddetta "fragilità di rinvenimento", fenomeno caratteristico di alcuni tipi di acciai. Questo fenomeno è meno evidente negli acciai al Ni, Cr, Mo, ecco perché se ne fa vasto impiego.

Le case produttrici di acciai nei loro cataloghi riportano le curve dell'andamento delle proprietà meccaniche dei vari acciai al variare della temperatura di rinvenimento. L'utilizzatore sceglie di conseguenza la temperatura di rinvenimento più idonea all'impiego desiderato.

5. Bonifica

Come si vede dal grafico, la bonifica può definirsi in breve:

una tempra seguita da rinvenimento a temperatura relativamente alta.



Il t.t. di bonifica comprende le seguenti fasi:

- riscaldamento alla temperatura di tempra e permanenza a questa temperatura per il tempo necessario fino alla completa trasformazione nella struttura austenitica;
- raffreddamento veloce, superiore alla velocità critica (= tempra);
- successivo ed immediato riscaldamento ad una temperatura inferiore ad A_{c1} : $450 \div 700^\circ\text{C}$;
- permanenza a questa temperatura per il tempo necessario alla trasformazione della martensite nella struttura denominata "sorbite";
- raffreddamento che, per gli acciai suscettibili alla fragilità al rinvenimento, deve essere rapido; per gli altri può essere qualsiasi.

Variando leggermente la temperatura di rinvenimento si ottengono strutture sorbitiche leggermente diverse; viene, di solito, scelta la temperatura di rinvenimento che dà luogo ad una sorbite in cui l'indice di qualità $Q = R_m \times A$ oppure $R_m \times KCU$ è massimo.

Gli acciai da bonifica comprendono:

- acciai con $C < 0,3\%$;
- acciai legati di solito con Cr, Mn, Ni, Mo, V.

6. Cementazioni

Generalità

Per cementazioni sono definiti quei t.t. mediante i quali si modifica più o meno profondamente la composizione di una lega ferrosa costituente un pezzo per diffusione di un elemento a partire dalla superficie.

La realizzazione di una cementazione su di un acciaio necessita delle seguenti condizioni:

1. la possibilità da parte dell'acciaio di assorbire un determinato elemento: ciò avviene solo se è austenizzato;
2. l'assorbimento deve avvenire regolando tempo e temperatura nella misura desiderata.

6.1. Carbo cementazione

La carbo cementazione è il t.t. di indurimento superficiale più diffuso.

Il processo di carbo cementazione (o, semplicemente, cementazione) è un t.t. che aumenta la percentuale di carbonio in uno strato superficiale dei pezzi di acciaio che, dopo un successivo trattamento termico, produce un'elevata durezza superficiale.

La carbo cementazione comprende le seguenti fasi:

- riscaldamento dei pezzi di acciaio dolce ad una temperatura di $900 \div 930^{\circ}\text{C}$ in un mezzo contenente carbonio allo stato atomico;
- permanenza a questa temperatura e ambiente per un tempo proporzionale allo spessore dello strato superficiale che si desidera carbo cementare;
- successivo t.t. di tempra che indurisce solo lo strato superficiale;
- rinvenimento a $130 \div 150^{\circ}\text{C}$ per attenuare le tensioni sorte nello strato superficiale martensitico dei pezzi.

Mezzi contenenti carbonio

Cementazione in cassetta: i pezzi vengono immersi in cassette riempite con una miscela, chiamata **miscela Caron**, costituita da:

- carbone di legna 85%;
- carbonato di bario (BaCO_3) 15%.

Carbo cementazione con cementi gassosi: i pezzi sono inseriti in forno contenente gas carburante. I gas possono essere di due tipi:

- a base di ossidi di carbonio (CO);
- a base di idrocarburi diversi come: metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) ecc.

Carbo cementazione con cementi liquidi: i pezzi vengono immersi in bagni di sali fusi contenente:

- cianuro di sodio (NaCN);
- cianuro di bario (Ba(CN)_2);
- cloruri di metalli alcalini: sodio, potassio, bario, calcio.

6.2. Acciai da Carbo cementazione

Gli acciai da carbo cementazione sono quelli legati a bassa percentuale di carbonio. La bassa percentuale di carbonio garantisce una buona resilienza al cuore dei pezzi (dato che all'interno non si temprano) e gli elementi di alligazione assicurano le migliori proprietà meccaniche.

6.3. Gruppi di acciai da carbo cementazione unificati. Composizione chimica.

Gruppo	Designazione	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %
acciai al carbonio	C 10	0,07÷0,12	0,3÷0,7	< 0,35		-	
	C 15	0,12÷0,18	0,3÷0,7	< 0,35			
acciai al cromo-nichel-manganese	15 CrNi 4	0,13÷0,18	0,7÷1,0	< 0,35	0,8÷1,1	0,8÷1,1	
	20 CrNi 4	0,18÷0,23	0,8÷1,1	< 0,35	0,9÷1,2	0,9÷1,2	
acciai al nichel-cromo	12 NiCr 3	0,09÷0,15	0,3÷0,6	< 0,35	0,4÷0,7	0,5÷0,8	
	15 NiCr 11	0,12÷0,18	0,3÷0,6	< 0,35	0,6÷0,9	2,5÷3,0	
	15 NiCrMo 2	0,13÷0,18	0,7÷0,9	<0,35	0,4÷0,6	0,4÷0,7	0,15÷0,25
acciai al nichel-cromo-molibdeno	20 NiCrMo 2	0,18÷0,23	0,7÷0,9	<0,35	0,4÷0,6	0,4÷0,7	0,15÷0,25
	18 NiCrMo 5	0,15÷0,21	0,6÷0,9	<0,35	0,7÷1,0	1,2÷1,5	0,15÷0,25
	18 NiCrMo 7	0,15÷0,21	0,4÷0,7	<0,35	0,4÷0,7	1,5÷1,8	0,20÷0,30
	16 NiCrMo 12	0,13÷0,19	0,4÷0,7	<0,35	0,8÷1,1	2,7÷3,2	0,30÷0,40

6.4. Classi di cementazione e valori dello spessore efficace dello stato cementato

Simbolo classe	Metodo di misura della durezza	Spessore efficace mm
Cm1	HV ₁₀	da 0,05 fino a 0,15
Cm2	HR 15-N	oltre 0,15 fino a 0,25
Cm3	HR 15-N	oltre 0,25 fino a 0,4
Cm5	HRC	oltre 0,4 fino a 0,6
Cm7	HRC	oltre 0,6 fino a 0,8
Cm9	HRC	oltre 0,8 fino a 1,1
Cm13	HRC	oltre 1,1 fino a 1,4
Cm15	HRC	oltre 1,4 fino a 1,7
Cm20	HRC	oltre 1,7 fino a 2,2

7. Nitrurazione

Il trattamento termico di nitrurazione consiste in un riscaldamento a $560 \div 590^{\circ}\text{C}$ dei pezzi di acciaio da trattare in forni contenenti azoto allo stato atomico; l'assorbimento superficiale di questo elemento provoca la formazione di azoturi o nitruri di ferro che impartiscono grande durezza.

Il processo di nitrurazione non è seguito da nessun t.t. e si applica ad acciai di determinate composizioni come indicati di seguito.

L'azoto (N) è, di solito, fornito dalla dissociazione dell'ammoniaca (2NH_3) che avviene spontaneamente a una temperatura di circa 500°C .

7.1. Effetti del trattamento termico di nitrurazione

La nitrurazione ha lo stesso scopo della carbocementazione: indurire le superfici mantenendo costanti le proprietà originali del nucleo dei pezzi. Gli acciai sui quali è effettuata sono però diversi: acciai bonificati con percentuale di carbonio variabile tra 0,3 e 0,5%.

Gli effetti della nitrurazione sono:

- durezza superficiale molto elevata (circa $\text{HRC}=70$), che si mantiene anche a temperature discretamente alte (fino a 500°C);
- aumento della resistenza all'usura;
- aumento della resistenza alla corrosione.

7.2. Acciai da nitrurazione.

Tipo di acciaio	C %	Cr %	Al %	Mo %	V %
30 Cr Mo 10	0,32	2,50	-	0,40	0,15
42 Cr Al Mo 7	0,42	1,70	0,40	0,25	-
38 Cr Al Mo 7	0,38	1,70	0,20	0,20	-
<i>Caratteristiche meccaniche minime allo stato bonificato.</i>					
	R_m (N/mm^2)	R_{eH} (N/mm^2)	A %	HV	
30 Cr Mo 10	$900 \div 1050$	750	14	600	
42 Cr Al Mo 7	$950 \div 1100$	800	14	900	
38 Cr Al Mo 7	$950 \div 1100$	700	14	1100	
Nota: la durezza HV deve intendersi allo stato nitrurato e con il carico di prove indicato nella tabella seguente.					

7.3. Classificazione degli spessori nitrurati

Spessore totale nitrurato (in mm)	Simbolo della classe	Prova di durezza Vickers da effettuare
$0,05 \div 0,15$	NS ₁	*
$0,15 \div 0,25$	NS ₂	HV _{1/15}
$0,25 \div 0,40$	NS ₃	HV _{1/15}
* Il carico di prova della durezza Vickers deve essere concordato.		

Bibliografia

“Corso di tecnologia meccanica” Vol. 2 – 3 Ed. Bruno Mondadori

Autore: Giuseppe Grosso;

“Complementi di tecnologia meccanica” Ed. Cappelli editore

Autori: A. Secciani, G. Villani

Immagini della dispensa:

“Corso di tecnologia meccanica” Vol. 2 – 3 Ed. Bruno Mondadori

Autore: Giuseppe Grosso;

Foto della dispensa:

Canzonetta Andrea: esercitazioni in laboratorio in occasione del Corso speciale abilitante per docenti ITP A.S. 2005/2006 presso ITIS Merloni di Fabriano, sotto la guida del'Ing. Ordonselli Renzo.