2 Uso degli strumenti di misura e di controllo

▶ Gli strumenti di misura e di controllo sono mezzi ausiliari indispensabili per eseguire un lavoro secondo le norme stabilite nel disegno o quelle di lavorazione. Prima di iniziare il lavoro occorre, dunque, assicurarsi che gli strumenti scelti siano appropriati al **grado di precisione** richiesto.

Così, se l'approssimazione è di 1/10, basta un calibro decimale o al massimo ventesimale; se è dell'ordine di un millimetro basta la riga millimetrata (detta metrica).

Non è opportuno, ad esempio, controllare la quota di un pezzo grezzo con il micrometro, sia perché i pezzi grezzi hanno una tolleranza molto ampia, sia perché si rovinerebbe lo strumento.

È pertanto necessario usare sempre degli strumenti che permettano di eseguire le misurazioni in base alle tolleranze richieste e con la dovuta approssimazione.

OSSERVAZIONE Le misure di precisione e i controlli devono essere eseguiti alla temperatura costante di 20 °C.

Per esempio, temperature più alte, o strumenti riscaldati, dal calore di una mano accaldata, portano a deviazioni della misura (TABELLA **1**). Se verifichiamo la misurazione con un blocchetto di riscontro (i campioni materiali a più alta precisione) di 25 mm, avremo un risultato diverso, ad esempio, 25,002 mm. Le misure effettuate in queste condizioni riporteranno tutte una deviazione (errore) dal valore vero (del campione di riscontro). In questo caso tale deviazione o errore, di tipo **sistematico**, è dovuto a una deformazione dello strumento.

Classe di precisione	Scostamento in μm per lunghezza nominale di 10 mm	Tolleranza in μm di parallelismo	Impiego
00	± 0,06	0,05	Straordinario o nei laboratori scientifici
0	± 0,12	0,10	Strumenti blocchetti
1	± 0,20	0,16	Normale nei controlli
2	± 0,45	0,30	Normale sulle macchine utensili
K	± 0,20 (v. cl. 1)	0,05 (v. cl. 00)	Taratura di altri blocchetti di classe inferiore

TABELLA **1**. Precisione dei blocchetti piani paralleli.

6 Curve di Abbott

▶ In alcuni casi è importante sapere anche la larghezza delle asperità e dei solchi e la loro densità, specie per la valutazione della percentuale di materiale portante.

A questo proposito sono utili le curve di Abbott, che considerano la quantità di materiale a diversi livelli (FIGURA **12**): alla fascia alta dei picchi (R_{pk}), a quella intermedia(R_k) e a quella dei solchi o valli (R_{vk}).

Nell'esempio è rappresentata la quantità di materiale portante che raggiunge il 92% a una profondità di 2 μm dal picco più alto. A 0,5 μm dal picco più alto la quantità di materiale portante (in FIGURA **12** l'area del rettangolo tagliata dalla linea orizzontale) è solo del 25%.

Per quanto riguarda l'ampiezza dei solchi, può essere valutata visivamente o con appositi spessorimetri.

I moderni rugosimetri forniscono, oltre ai grafici amplificati del profilo e i vari parametri della rugosità, anche il **diagramma di Abbott** e la **portanza** t_p a varie profondità, P_i (FIGURA **13**).

Lunghezza del profilo portante ℓ_t

Indicando con p (FIGURA **14**) la distanza tra la *linea di riferimento* (linea media dei cinque picchi più alti o linea di riferimento superiore) e la *linea di misura* (linea di livello) si definisce la lunghezza del profilo portante ℓ_t, come risultante della somma dei vari tratti intersecanti il profilo.

Il simbolo della lunghezza del profilo portante deve comprendere anche

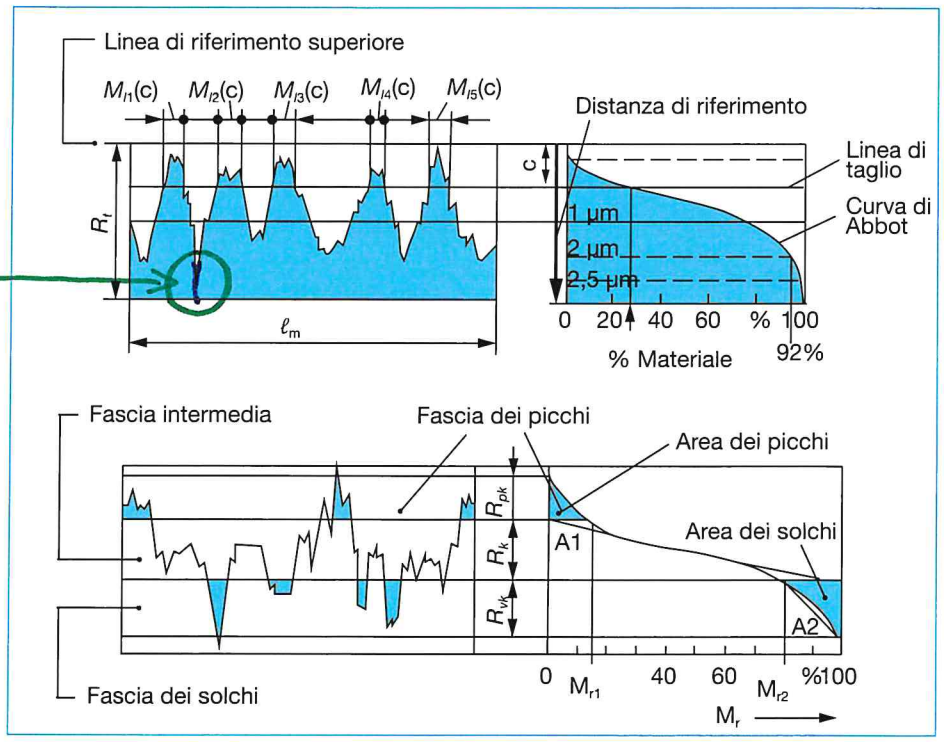


FIGURA **12**. Distribuzione del materiale su tre fasce.

il valore di p. Esempio: ℓ_{t50} =... ha il significato di lunghezza del profilo portante misurata a 50 μm dalla linea di riferimento.

Nella figura $\ell_t = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3$
dove ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 sono i tratti della rugosità intersecati dalla linea di livello.

Portanza (*t*)

L'ascissa della curva di Abbott indica in sostanza la portanza **in percentuale**, ossia il rapporto tra la lunghezza del profilo portante ℓ_t e la lunghezza di valutazione ℓ_m:

$$t = 100 \frac{\ell_t}{\ell_m}$$

Il simbolo della portanza deve comprendere anche il valore di p. Ad esempio: $t_{60} \geq 50$ significa che la portanza deve essere rilevata con $p = 60$ μm e deve essere maggiore o uguale al 50%.

▶ Le curve di Abbott soddisfano l'esigenza di conoscere la portanza delle superfici, ad esempio di cuscinetti di strisciamento, per valutarne il funzionamento, se le superfici che hanno lo stesso valore numerico di R_a hanno resistenza diversa rispetto alla fatica, se la loro durata è minore a causa di problemi di usura o se hanno comportamenti diversi rispetto alla lubrificazione o alla verniciatura.

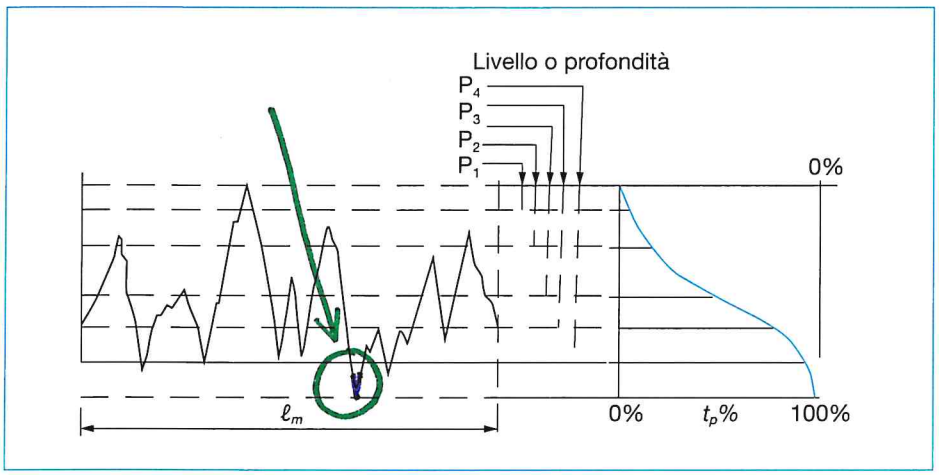


FIGURA **13**. Curva di Abbott per l'analisi di una superficie portante.

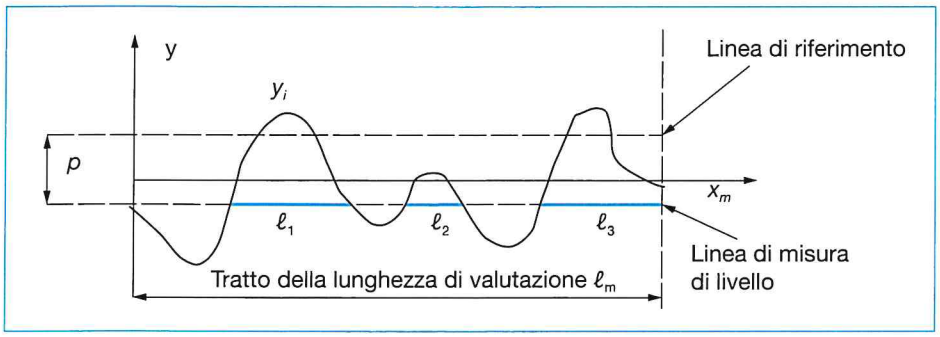


FIGURA **14**. Lunghezza del profilo portante.

Avevamo già visto che variazioni di rugosità possono modificare i valori di **tolleranza** di due elementi di una coppia cinematica. Tra i criteri di assegnazione della rugosità negli accoppiamenti con tolleranze strette albero/foro, si deve tener conto dell'effetto usura delle due superfici o delle variazioni superficiali causate dal montaggio a caldo.

8 Sistema di filtraggio

Dalla FIGURA **18** possiamo notare quanto cambino rugosità e ondulazione di un profilo al variare del tratto ℓ_r, detto cut-off. Si comprende quindi l'importanza della scelta del cut-off giusto, in relazione alla superficie da esaminare, se si vogliono avere informazioni sulla rugosità e sullo stato della superficie.

▶ Il sistema di filtraggio separa le varie componenti del profilo.

Se si esplora un tratto di superficie di lunghezza ℓ_r diverso ~~da ℓ_r~~, si ricava soltanto l'informazione della tessitura primaria (rugosità) e si elimina l'effetto della tessitura secondaria (ondulazione) e quello dell'errore di forma.

Diversamente si ricavano insieme sia le irregolarità di tessitura primaria sia quelle di tessitura secondaria, oppure esplorando una lunghezza diversa, si prendono in considerazione tutti e tre i tipi di errori. In FIGURA **19** è riportato un esempio di filtraggio (ISO 16610). L'**errore di forma** può essere eliminato (si sottrae il profilo 5) e si ha soltanto la **rugosità** (6) oppure si può avere la **deviazione** (5) senza la rugosità e gli effetti di bordo indesiderati.

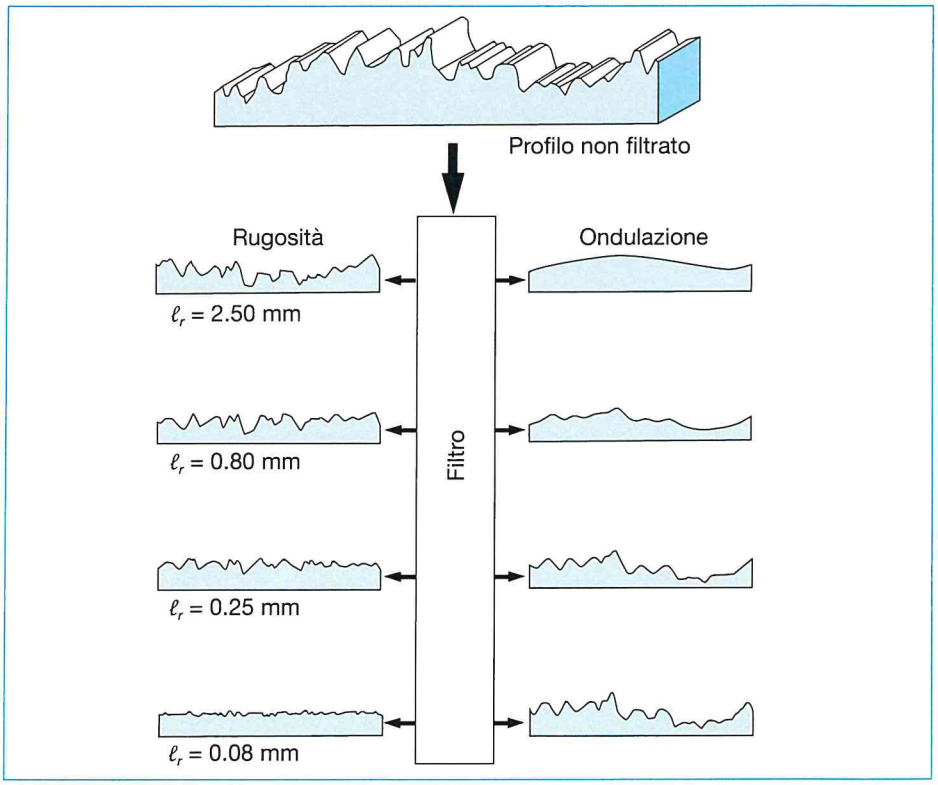


FIGURA **18**. Sistema di filtraggio.

Nella FIGURA **8** si vede come cambia anche l'angolo di inclinazione dell'elica.

Per le *leghe leggere* a truciolo lungo l'elica è più ritorta, mentre per il *bronzo* e l'ottone, che tendono a formare trucioli spezzettati, così come per acciai molto legati e ghise dure, l'elica ha un angolo ε minore.

Punte con angolo φ grande sono robuste, ma hanno una minore capacità di smaltimento del calore, dato che il tagliente è più corto.

1.2 Parametri di taglio

Se consideriamo l'asportazione di un solo tagliente, come nelle FIGURE **9** e **10**, dove l'avanzamento è $f/2$ e la profondità di passata a_p coincide con $d/2$, l'area del truciolo asportata **da un solo tagliente** è:

$$A = f \cdot \frac{d}{4} \text{ [mm}^2\text{]}$$

Infatti: $A = b \cdot h = a_p \cdot \frac{f}{2} = \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{2} = f \cdot \frac{d}{4}$

L'area del truciolo asportata ad ogni giro da entrambi i taglienti è

$$2 \cdot A = f \cdot \frac{d}{2} \text{ [mm}^2\text{]}$$

La forza di taglio è $F_c = k_s \cdot A$ [N] (FIGURA **11**) dove:

- k_s [MPa] è lo sforzo per unità di superficie per asportare il materiale;
- $k_s = (4{,}8 \div 6) \cdot R_m$ [N/mm^2] per l'acciaio e i materiali non ferrosi;
- $k_s = (4{,}2 \div 5) \cdot R_m$ [N/mm^2] per le ghise.

Essendo $F_c = k_s \cdot A = k_s \cdot (f \cdot \frac{d}{4})$, grandi forature richiedono un'elevata forza di taglio. È perciò conveniente eseguire una o più preforature con punte più piccole, anche per evitare deviazioni dell'utensile.

H v_c

La velocità di taglio è $v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$ [m/min]

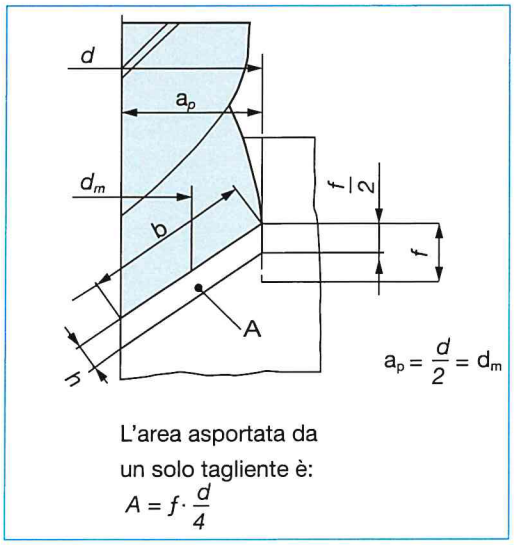


FIGURA **9**. Grandezze di truciolatura.

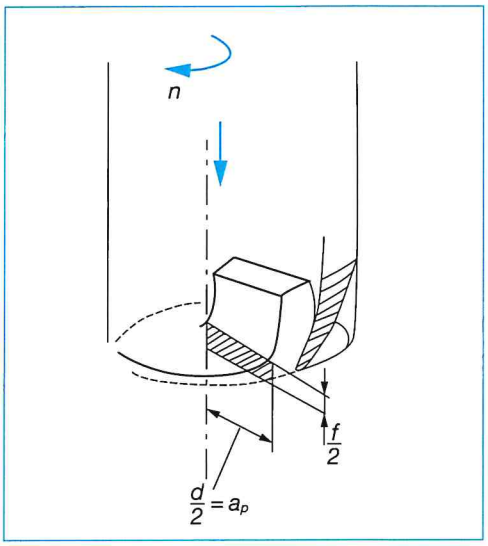


FIGURA **10**. Asportazione con un solo tagliente.

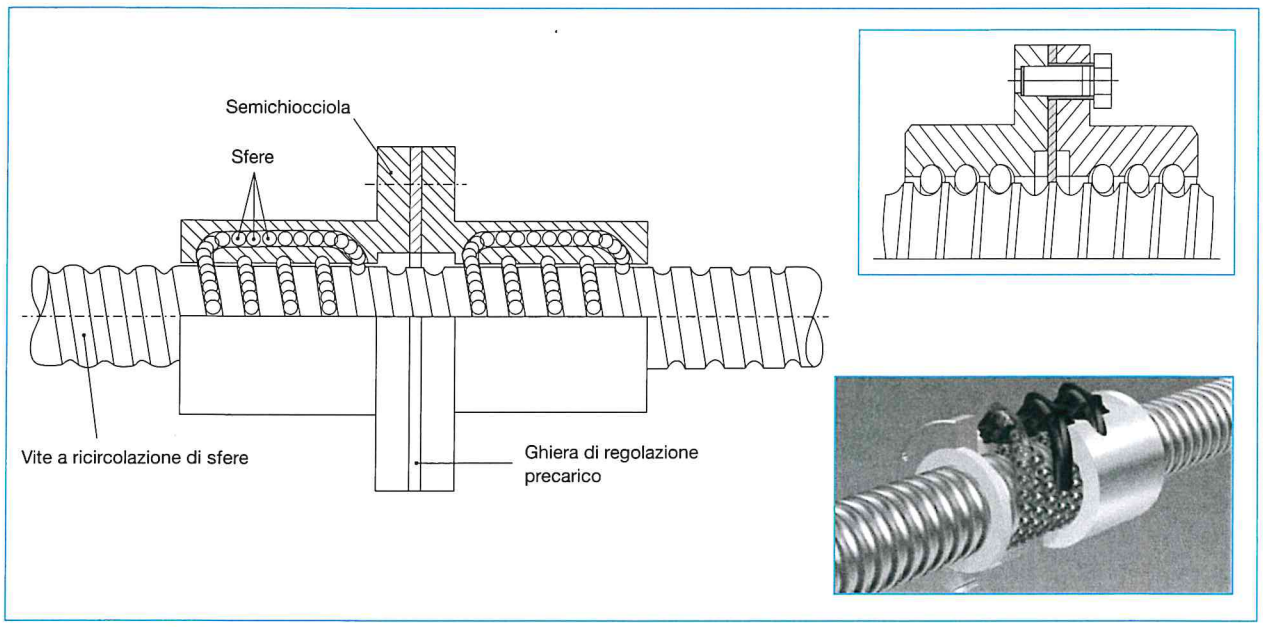


FIGURA 9. ~~Tavola porta-pezzo~~ Vite a ricircolazione di sfere a doppio corpo precaricato per tavola porta-pezzo.

Le moderne fresatrici a controllo numerico a circuito chiuso (retroazionato) permettono il recupero dei giochi della trasmissione misurando direttamente la posizione dell'asse della tavola porta-pezzo mediante l'uso di encoder a righe ottiche.
Nella fresatura in concordanza la **durata** dell'utensile è però **minore**. I denti della fresa *scontrano ripetutamente* il pezzo e vi entrano a spessore massimo. Questa fresatura *non è quindi attuabile* se il pezzo è molto duro.

Fresatura in discordanza

▶ Nella fresatura *in discordanza* i denti della fresa non urtano il pezzo, ma entrano in contatto a spessore nullo e affondano progressivamente.

Pertanto, quando i pezzi non sono teneri o hanno una zona superficiale incrudita da altre passate, la fresatura in discordanza è più **favorevole**. La **vita** dell'utensile è **maggiore**, anche se il dorso del tagliente strusciando, prima di penetrare nel materiale, si usura di più. Naturalmente il pezzo deve essere rigidamente bloccato alla tavola portapezzo e la fresatrice deve possedere una sufficiente stabilità e robustezza, per evitare vibrazioni al distacco del truciolo.

Fresatura di contornatura

Lavorazioni di contornatura possono causare deviazioni dalle tolleranze dimensionali e di forma dovuti alla flessione della fresa a codolo o dell'attacco al mandrino, tanto maggiori quanto più elevate sono le forze di taglio e quanto maggiore è la profondità di passata. Le deformazioni si sommano a quelle di eventuali parti del pezzo sporgenti più sottili o a forme angolari interessate dalla lavorazione. La fresatura può portare ad errori angolari, di planarità e di parallelismo.

super-rapido HSS (TABELLA **3**), tenaci e resistenti fino a 600 °C, rivestite con TiN e TiCN, possono lavorare fino a 70 m/min per una durata T = 60 min per fresature di acciai non legati del gruppo P1÷3 con 125÷170HB e dai 10 ai 200 m/min, con durate dell'utensile inferiori ai 30÷40 min. Mentre le **frese con inserti in metallo duro** (in PCBN rivestito, codice F40M in TABELLA **2**), sensibili agli urti e resistenti fino a 900 °C, possono lavorare con v_c = 85÷170 m/min ed oltre, anche gli acciai a maggiore durezza del gruppo M8÷11 con 200HB fino a 330HB (FIGURA **15**).

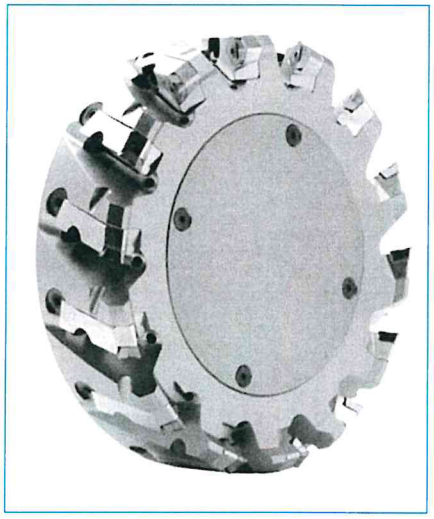


FIGURA **15**. Fresa frontale.

Fresa e numero dei denti

▶ Il numero di denti dipende dalla fresa scelta che, a sua volta, dipende dalle dimensioni della superficie del pezzo da lavorare.

Avanzamento

La scelta dell'avanzamento deve tener conto del *tipo di lavorazione*.

Se si scelgono avanzamenti **minori** si avrà una minore *produttività* ed una minore *vita* dell'utensile, a causa del maggior tempo di contatto tra i denti della fresa e il materiale. Se invece vogliamo eseguire una *sgrossatura* con

Materiali	Resistenza R_m [N/mm²]	HB	v_c [m/min]		Avanzamento a dente f_z [mm]					
					FC~~F~~ (frese ~~cilindriche frontali~~) a codolo con d ≤				FD (fr. a disco) a taglio	
			non riv.	rivestiti	6	12	20	40	~~WSR~~ frontale	~~TSR~~ periferico
Acciai da costruzione non legati	< 700	< 200	43	70	0,002...0,017	0,013...0,11	0,025...0,16	0,04...0,16	0,06...0,13	0,04...0,13
Acciai da costruzione non legati e legati	≤ 800	≤ 240	32	52						
Acciai da costruzione non legati e legati; acc. da cementazione e da bonifica; acc. resistenti al calore	> 800 ...1200	> 240 ...380	24	40						
Acciai bonificati e acciai inox	> 1200	> 380	17	27						
Ghise	-	≤ 150	24	40						
	-	> 150	17	27						
Leghe di Al per getti < 6% Si	-	-	90	180	0,003...0,025	0,025...0,09	0,04...0,14	0,06...0,23	0,11...0,18	0,10...0,15
Leghe di Al per getti > 6% Si	-	-	55	95						
Leghe di Al per def. Pl.	-	-	270	800						
Leghe Cu-Sn	-	-	55	90	0,002...0,019	0,019...0,12	0,035...0,2	0,06...0,2	0,08...0,18	0,5...0,16
Leghe Cu-Zn	-	-	70	110						

TABELLA **3**. Velocità di taglio per frese in acciaio rapido e per una durata T = 60 min e avanzamenti per dente.

Materiale	Forza specifica di taglio K_c (N/mm^2) per lo spessore del truciolo h (mm)								
	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
* S235JR	3850	3555	3245	3195	3040	2930	2840	2765	2705
E295	5635	4990	4705	4235	3930	3710	3535	3400	3285
C45E	4760	4210	3975	3475	3320	3130	2985	2870	2770
16MnCr5	5950	5265	4965	4470	4150	3915	3735	3585	3465
42CrMo4	7080	6265	5915	5320	4940	4660	4445	4270	4125
** GJL-150	2315	2100	2005	1840	1730	1650	1590	1540	1500

* S235JR: acciaio da carpenteria metallica con tensione di snervamento 235 N/mm^2 e resilienza non inferiore a 27J.
** GJL 150 è una ghisa grigia lamellare con R_m = 150 N/mm^2 (minimo).

TABELLA **4**. Valori consigliati della forza specifica di taglio k_c.

La **potenza di avanzamento** P_f può ritenersi pari al 15% di quella di taglio:
$P_f = 0{,}15 \cdot P_c$ [kW]

La potenza totale vale: $P_{tot} = P_c + P_f = 1{,}15 \cdot P_c$ [kW]

Fissato il rendimento globale della macchina pari a $\eta = 0{,}7 \div 0{,}8$ si ricava la **potenza disponibile**: $P_d = P_{tot}/\eta$ [kW]

Tempo macchina

Il tempo macchina si calcola con $t_m = (C + e)/v_f$ [min], $\frac{C+e}{v_f}$
dove C = corsa della tavola portapezzo [mm] ed e = avancorsa + post-corsa $\cong 4 \div 6$ mm.

Nella **fresatura periferica** (FIGURA **17**): $C = \ell + b$ [mm]

$$b = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - p\right)^2} \rightarrow b = \sqrt{p \cdot (D - p)}$$

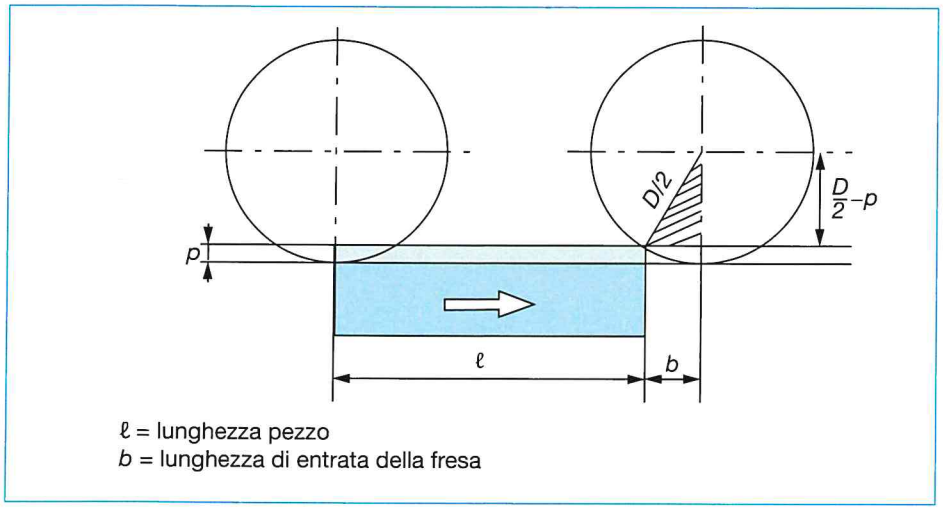
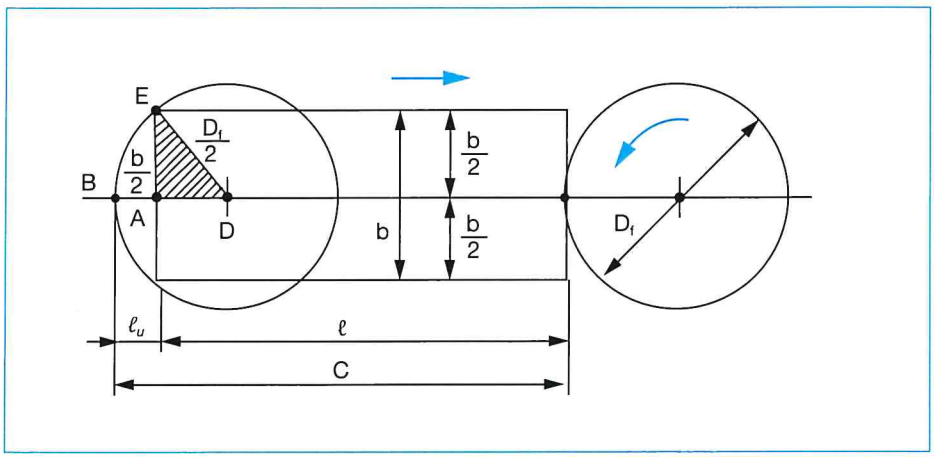


FIGURA **17**. Fresatura periferica.

FIGURA **18**. Fresatura con fresa frontale il cui asse si trova sul piano di simmetria del pezzo da fresare.



Nella **fresatura frontale**, se la fresa è posta come in FIGURA **18**, si ha $C = \ell + \ell_u$ [mm], dove ℓ_u = tratto sporgente della fresa a fine corsa, necessario per completare la fresatura del pezzo.

$$\ell_u = BA = BD - AD = \left(\frac{D_f}{2}\right) - AD, \text{ ed essendo } AD = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}$$

$$\text{si ricava } \ell_u = \frac{D_f}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \frac{1}{2}\cdot\left(D_f - \sqrt{D_f^2 - b^2}\right)$$

Basterà quindi sostituire il valore trovato di ℓ_u nella relazione: $t_m = \dfrac{\ell + \ell_u}{v_f}$

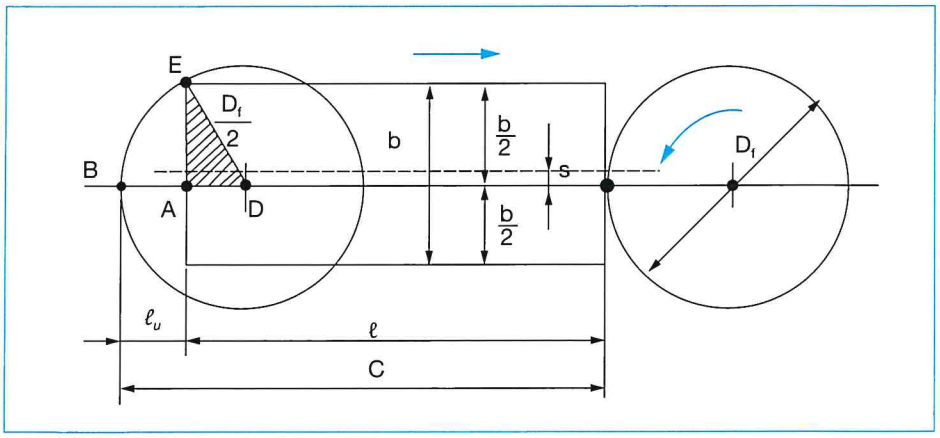
Se l'asse della fresa è spostato rispetto all'asse di simmetria del pezzo, come in FIGURA **19**, si ha: $C = \ell + \ell_u$, dove $\ell_u = BA = BD - AD = \dfrac{D_f}{2} - AD$

Dal triangolo rettangolo DAE si ricava $AD = \sqrt{\left(\dfrac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\dfrac{b}{2} + s\right)^2}$ essendo

b = larghezza del pezzo e s = distanza tra l'asse di simmetria del pezzo e l'asse della fresa percorso durante la fresatura.

Sostituendo AD, trovato nella $\ell_u = \dfrac{D_f}{2} - AD$ e ℓ_u nella $C = \ell + \ell_u$, si trova: $t_m = C/v_f$.

FIGURA **19**. Fresatura con fresa frontale il cui asse si trova spostato rispetto al piano di simmetria del pezzo da fresare.



Essendo:

$$\frac{D}{2} - p = \frac{D}{2}\cos\varphi$$

$$\cos\varphi = \left(\frac{D}{2} - p\right)\cdot\frac{2}{D} = 1 - \frac{2p}{D}$$

e:

$$\sin\varphi = \sqrt{1-\cos^2\varphi} = \sqrt{1-\left(1-\frac{2p}{D}\right)^2} = 2\sqrt{\frac{p}{D} - \frac{p^2}{D^2}}$$

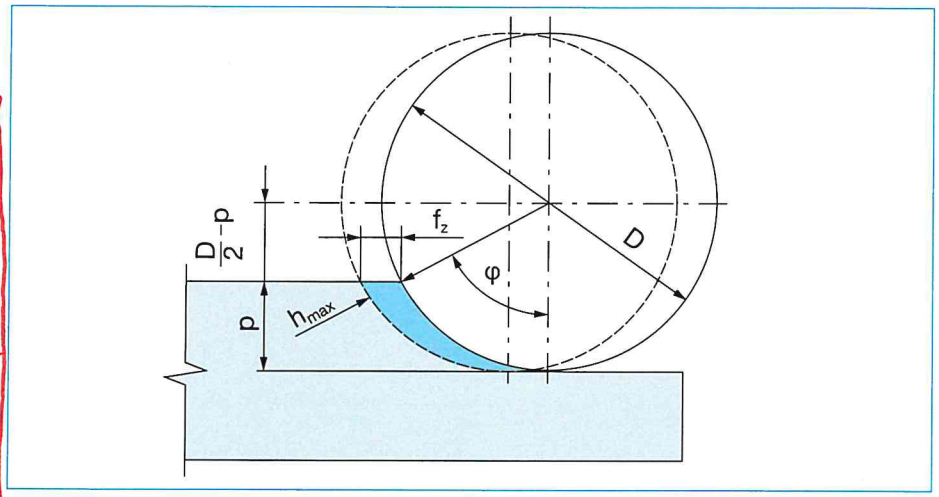


FIGURA **21**. Fresatura periferica.

$$\sin\varphi = \sqrt{1-\cos^2\varphi} = 2\cdot\sqrt{\left(\frac{p}{D}\right)\cdot\left(1-\frac{p}{D}\right)} = 2\cdot\sqrt{\frac{p}{D}-\left(\frac{p}{D}\right)^2}$$

trascurando il termine $(p/D)^2$ si ha:

$$h_{max} = 2\cdot f_z\sqrt{\frac{p}{D}}\ [\text{mm}] \text{ o } h_{max} = \frac{2\cdot v_f}{n\cdot z}\sqrt{\frac{p}{D}}\ [\text{mm}]$$

essendo $v_f = n\cdot z\cdot f_z$ [mm/min] la velocità di avanzamento.

Sezione del truciolo nella fresatura frontale

Come mostra la FIGURA **22**, la forma del truciolo non è più a virgola come nella fresatura periferica, ma pressoché costante e si ha $A = p\cdot f_z$ [mm^2]. Nella sgrossatura e per materiali teneri la massima profondità di passata è $p_{max} = 6$ mm, mentre nella finitura $p_{max} = 1$ mm.

$$\sin\frac{\varphi}{2} = \frac{b}{D}$$ (FIGURA **23**).

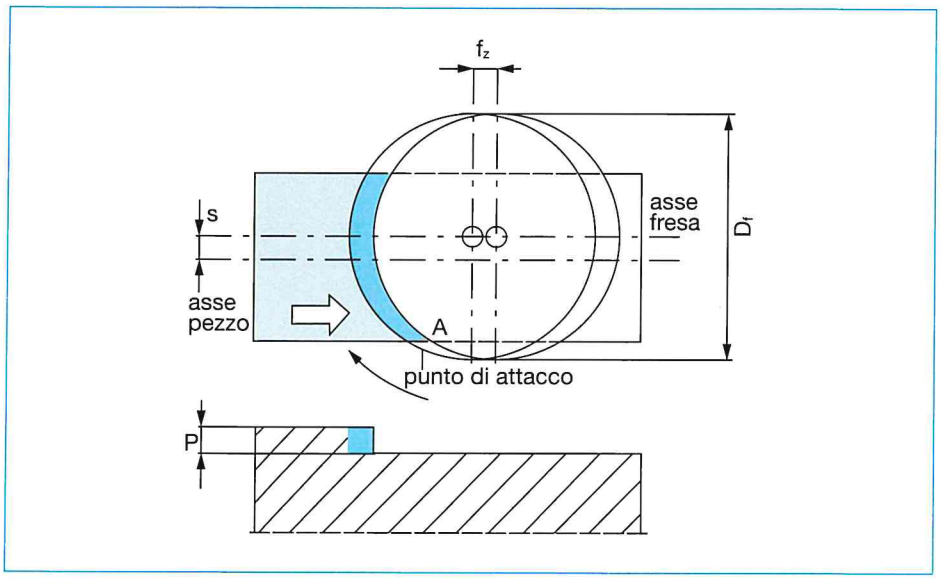
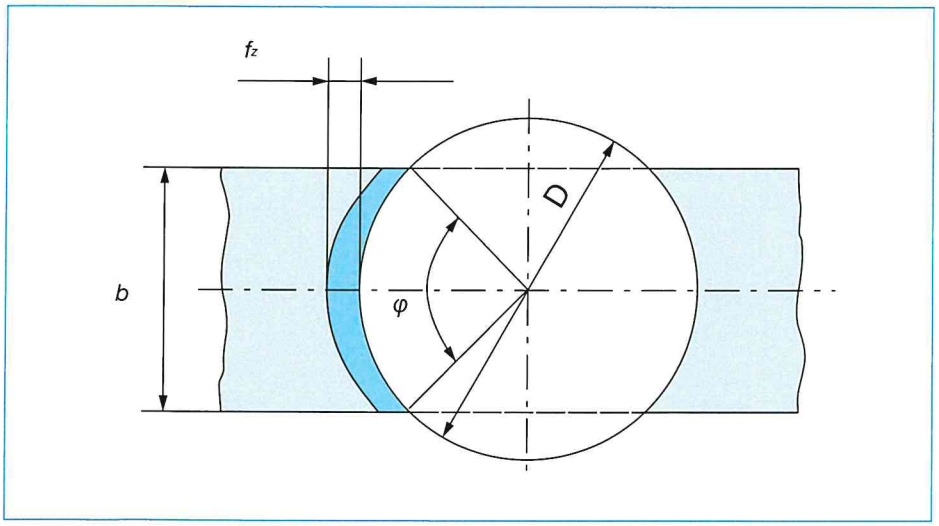


FIGURA **22**. Formazione del truciolo con frese frontali.



Dalla FIGURA 23:

$\frac{D}{2} \sin\varphi = \frac{b}{2}$

per cui:

$\sin\varphi = \frac{b}{D}$

FIGURA **23**. Angolo di contatti nella fresatura frontale.

Volume di truciolo asportato

Il volume minimo di truciolo asportato è dato da $Q = p \cdot b \cdot v_f$ [mm^3/min] ossia:

$Q = (p \cdot b \cdot v_f)/1000$ [cm^3/min].

La **quantità di truciolo** asportato, quindi, non è influenzata dall'incremento della velocità di taglio, ma dalla velocità di *avanzamento* e dalla *sezione* del truciolo.

OSSERVAZIONE La **sezione di truciolo**, asportato durante la fresatura frontale, è favorevolmente costante ed è quindi in grado di sottrarre una maggiore quantità di *calore* rispetto alla fresatura periferica.

ESEMPIO 1

Si deve lavorare un pezzo largo 120 x 100 mm di acciaio C45 con una testina a fresare e fresa frontale a inserti in metallo duro (D = 200; z = 12). La velocità di taglio consigliata e l'avanzamento a dente sono stati ricavati dalle tabelle dei costruttori: v_c = 300 m/min e f_z = 0,1 mm.
Determinare n, f, v_f e φ.
Con una p = 4 mm quant'è il volume di truciolo asportato? Che valore ha l'angolo di contatto?

Soluzione

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot D} = \frac{300 \text{ m/min}}{\pi \cdot 0{,}2 \text{ m}} = 477 \text{ g/min}$$

$f = f_z \cdot z = 0{,}1 \cdot 12 = 0{,}8$ mm.
$v_f = f \cdot n = 0{,}8$ mm $\cdot$ 477 giri/min = 381 mm/min
Il *volume asportato* $Q = (p \cdot b \cdot v_f)/1000 = (4 \cdot 100 \cdot 381)/1000 = 152{,}4$ cm^3/min.
Essendo $\sin\frac{\varphi}{2} = \frac{b}{D} = \frac{100}{200} = 0{,}5$ mm; φ (angolo di contatto) = 60°.

Rettifica con mola ad azione tangenziale

▶ La rettifica di ampie superfici piane con mola ad azione tangenziale è la più *vantaggiosa* ed economicamente conveniente. Specialmente se si scelgono grosse mole a disco e se si lavora con un più grande avanzamento trasversale (FIGURA **16**).

Nella rettifica con mola tangenziale il contatto con il pezzo è corto, specie se la profondità di passata è limitata (come a sinistra in FIGURA **16**) e se si lavora con mole larghe.

Anche l'usura è minore. Infatti, tanto più la mola è larga, quanti più grani lavorano contemporaneamente e si ripartiscono lo sforzo di asportazione, tanto minore è l'usura.

OSSERVAZIONE D'altra parte non è vantaggioso asportare grossi spessori di soprametallo, oltre i 5÷6 mm, con tante piccole passate come nella rettifica mostrata in FIGURA **17a**, perché così la mola si scontra ripetutamente con lo spigolo del pezzo e si usura rapidamente. Questa lavorazione è ancora più svantaggiosa, quanto più ridotto è l'avanzamento *f* trasversale (FIGURA **16**).

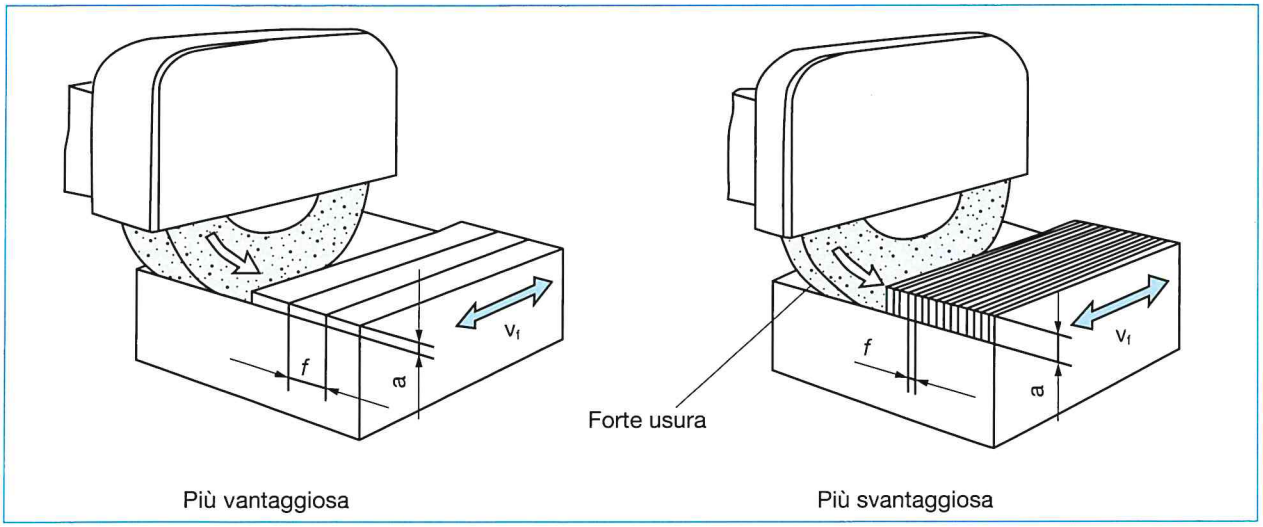


FIGURA **16**. Confronto tra una mola larga e una stretta e tra grande e piccolo avanzamento nella rettifica di una superficie piana.

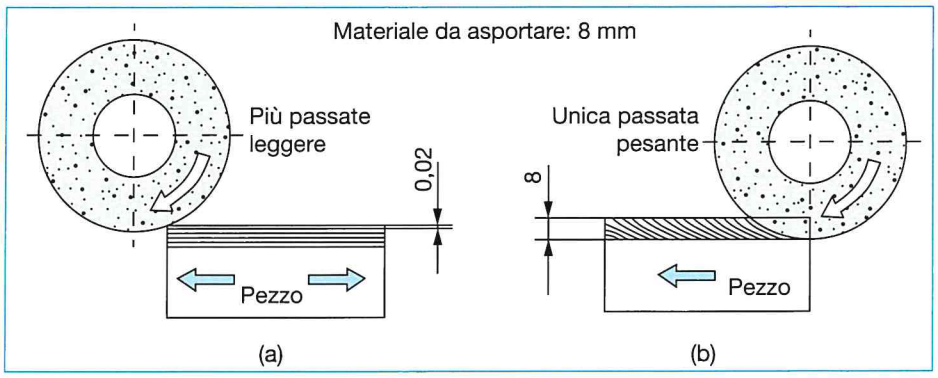


FIGURA **17**. Più passate: (a) lavorazione pendolare svantaggiosa; (b) una sola passata profonda: lavorazione vantaggiosa. Rettifica con mole larga quanto il pezzo.

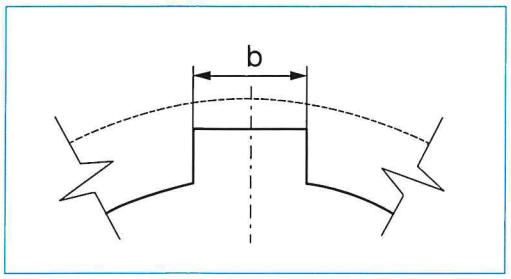


FIGURA **10**. Esempio di cava per linguetta.

Parametri tecnologici

La potenza di taglio si calcola con la solita relazione:

$$P_c = \frac{F_c v_c}{60000} \text{ [kW]}$$

$P_m = P_c/\eta$ [kW] essendo $\eta = 0{,}7 \div 0{,}8$.

Dove la *forza di taglio* vale:

$F_c = \sigma_s \cdot i \cdot z_p \cdot b$, essendo:

σ_s = carico specifico di strappamento unitario del materiale da brocciare;

i = incremento radiale medio tra due denti consecutivi (ossia profondità di taglio/dente, indicato nelle tabelle aziendali in base al materiale del pezzo e al tipo di lavorazione);

z_p = numero denti contemporaneamente in presa;

b = larghezza denti in presa (FIGURA **10**).

La brocciatura può essere eseguita sui materiali più diversi dalla plastica alle leghe non ferrose e agli acciai. Con brocce progettate appositamente riducendo gli incrementi radiali fino a 0,001÷0,002 mm/dente e riducendo anche la velocità di taglio, si riescono a lavorare acciai inox con resistenze oltre i 700 N/mm^2, ma generalmente non superiori ai 1200 N/mm^2.

ESEMPIO 1

Sia da eseguire la brocciatura di una cava di larghezza b = 24 mm in acciaio legato. La lunghezza del taglio sia 25 mm. Si deve stimare il carico.

$F_c = \sigma_s \cdot i \cdot z_p \cdot b$ [N]

σ_s = 1000 N/mm^2

i = 0,05 mm per acciai legati e per scanalature

Soluzione

$z_p = L/p$, dove $p = 1{,}5 \cdot \sqrt{25} = 7{,}5$ mm → $z_p = 25/7{,}5 = 3{,}4 \rightarrow 4$

e dunque $F_c = 1000 \cdot 0{,}05 \cdot 4 \cdot 24 = 4800$ N

Conviene assumere un carico di sicurezza moltiplicando il carico stimato per un fattore 1,5÷1,8.

Carico di sicurezza = 8,6 kN.

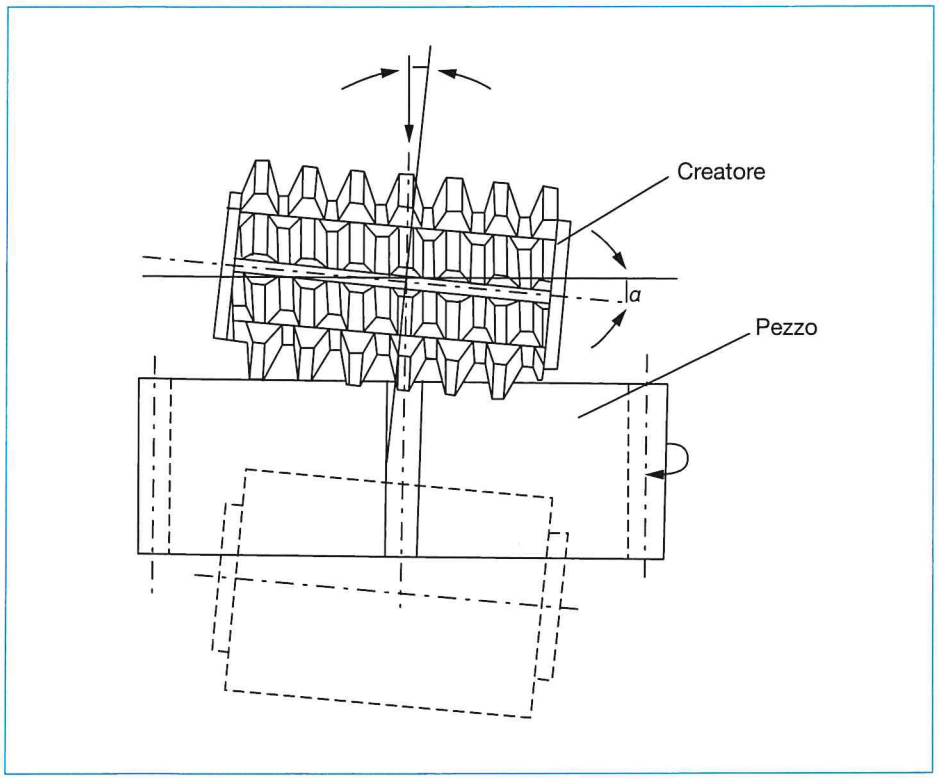


FIGURA **13**. Generazione di ruota dentata con creatore.

L'inclinazione è necessaria anche per la generazione di ruote dentate a denti diritti. **L'angolo di postazione** α (FIGURA **13**) deve essere:

$\tan \alpha = \dfrac{p}{\pi \cdot d}$ o $\tan \alpha = \dfrac{m}{d}$, essendo m il **modulo della dentatura** e d il diametro del creatore.

Indicando con n_r e n_c il numero di giri della ruota da dentare e del creatore, per il taglio delle ruote dentate a denti diritti si deve avere la relazione:

$\dfrac{n_r}{n_c} = \dfrac{1}{z}$ essendo z = numero di denti della ruota da costruire (se il creatore ha un solo principio).

Materiali

▶ Di solito sono costruiti interamente in **acciaio rapido o super-rapido**, ma esistono anche creatori a inserti in metallo duro, che sono comunque costosi e si usano solo per produzioni di grandi **serie**.

Macchine per dentatrici a creatore

▶ Le dentatrici a creatore (FIGURA **14**) sono costituite essenzialmente da un basamento recante due montanti verticali, su uno dei quali è presente una piattaforma girevole che sostiene il pezzo in lavorazione. Sull'altro invece è disposto il mandrino porta utensile orientabile.

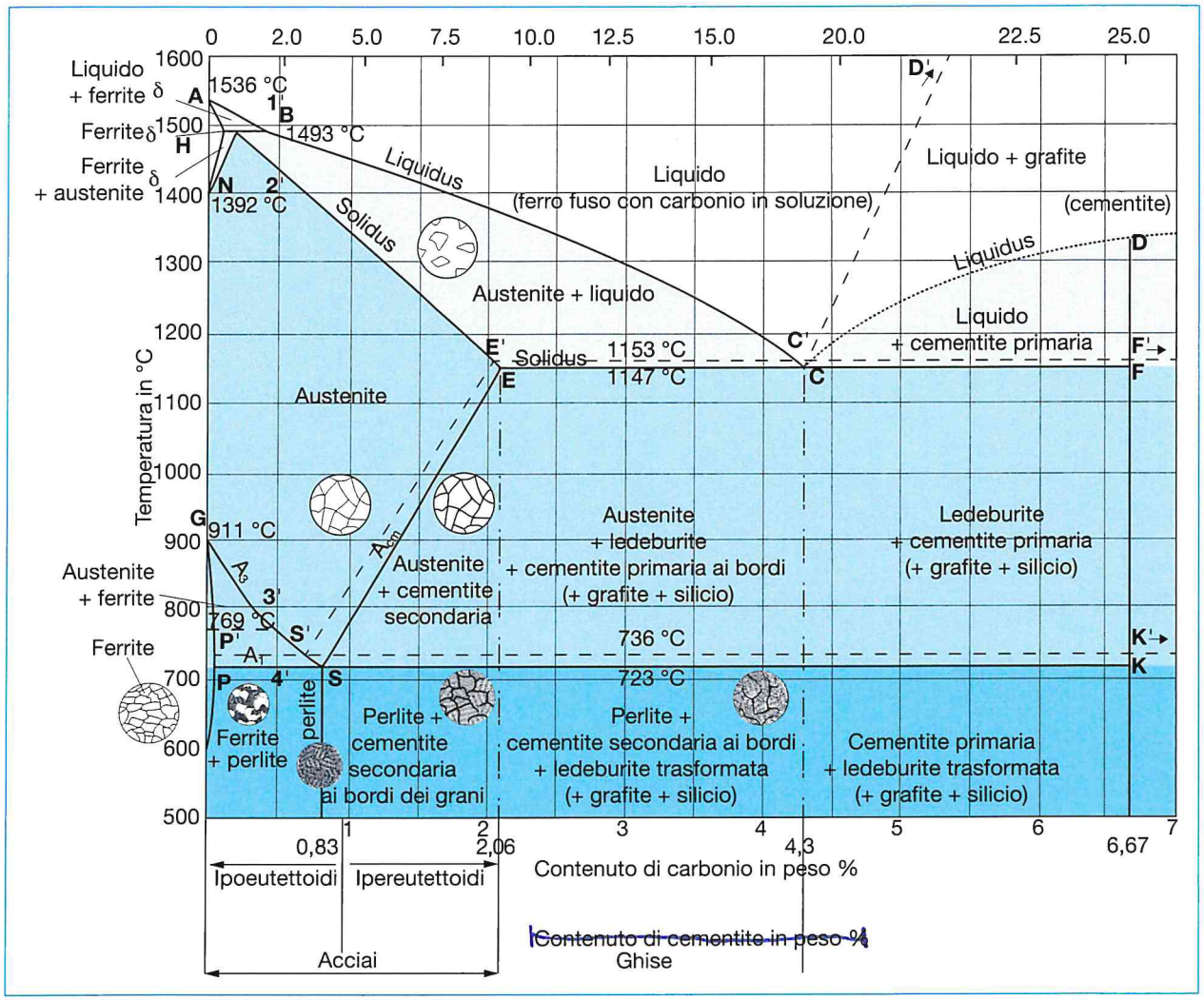


FIGURA **11**. Diagramma Ferro-Carbonio.

Si è così costruito il diagramma delle leghe di acciaio e delle ghise in base alle strutture esaminate alle diverse percentuali di carbonio e alle diverse temperature, come mostrato in FIGURA **11**. Questo diagramma è detto **Ferro-Carbonio**.

FIGURA **8**. Ferro con 0,8% di carbonio.

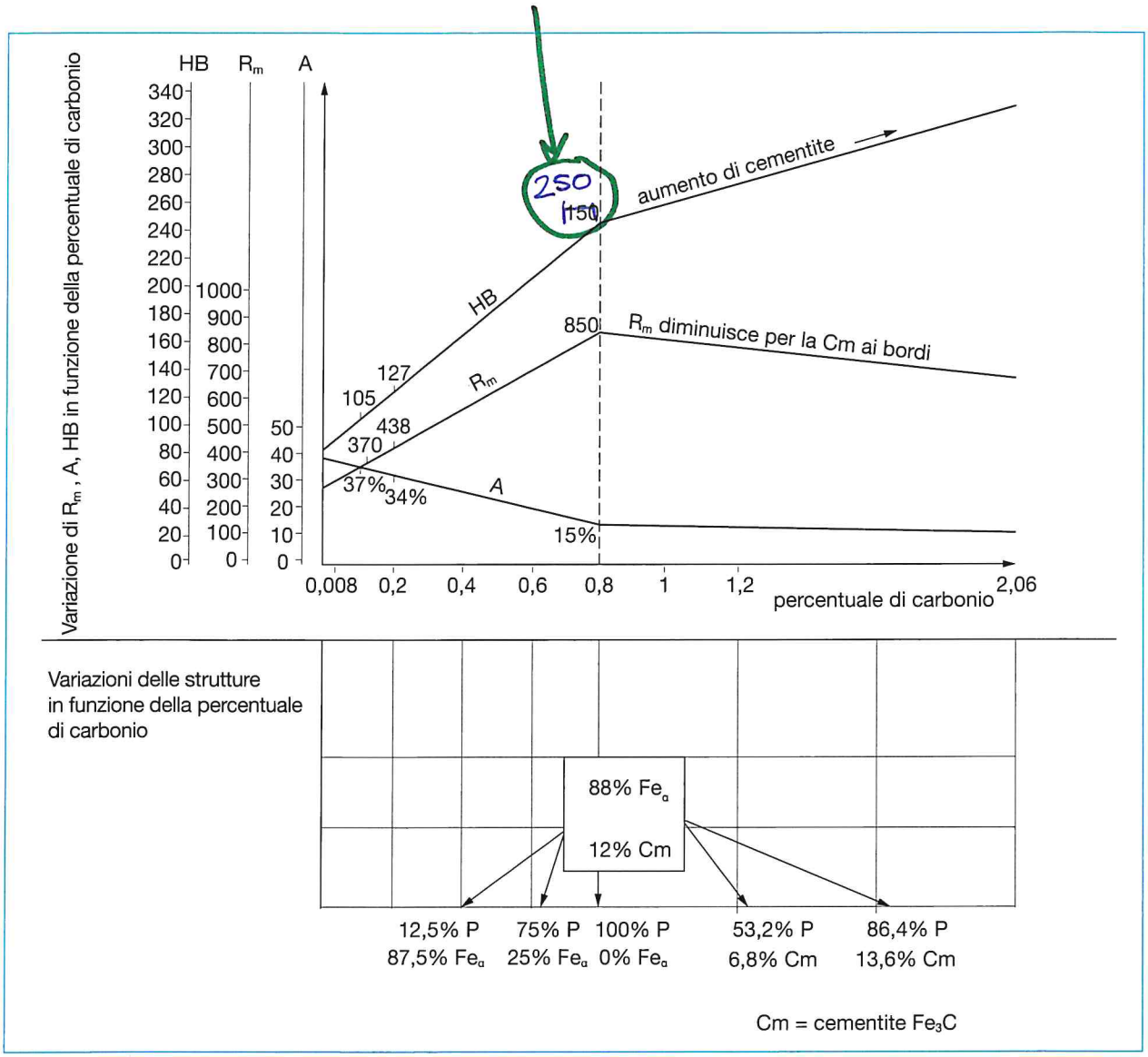


FIGURA **2**. Variazioni delle strutture in funzione della percentuale di carbonio.

FIGURA **3**. Ghisa a matrice perlitica e con lamelle più grosse di grafite (500 x).

Questa distorsione delle celle, da cubiche a tetragonali, porta alla *distorsione dei piani atomici cristallini fino alla distorsione dei grani*, che assumono una forma *aghiforme*. La struttura viene detta **martensite** (FIGURA **4**). Nel diagramma Fe-C questa non si riscontra, perché è un diagramma di *equilibrio* ottenuto con una velocità di raffreddamento molto lenta. Naturalmente, non si può ottenere una struttura martensitica se l'acciaio non ha **più dello 0,2% di carbonio** (FIGURA **5**).

Inoltre il grafico di FIGURA 5 mostra che un

~~**OSSERVAZIONE**~~ Un acciaio, per esempio, con 0,4% di C ha una durezza molto più elevata (**60 HRC**) se la sua struttura si è completamente trasformata in martensite. Con solo il 50% di C, ha una durezza decisamente inferiore (**45 HRC**) (FIGURA **5**). Da 0,2 a 0,8% di C: quanto più alto è il contenuto di **carbonio**, tanto più **duro** diventa l'acciaio (FIGURA **5**).

FIGURA **4**. Microstruttura della martensite.

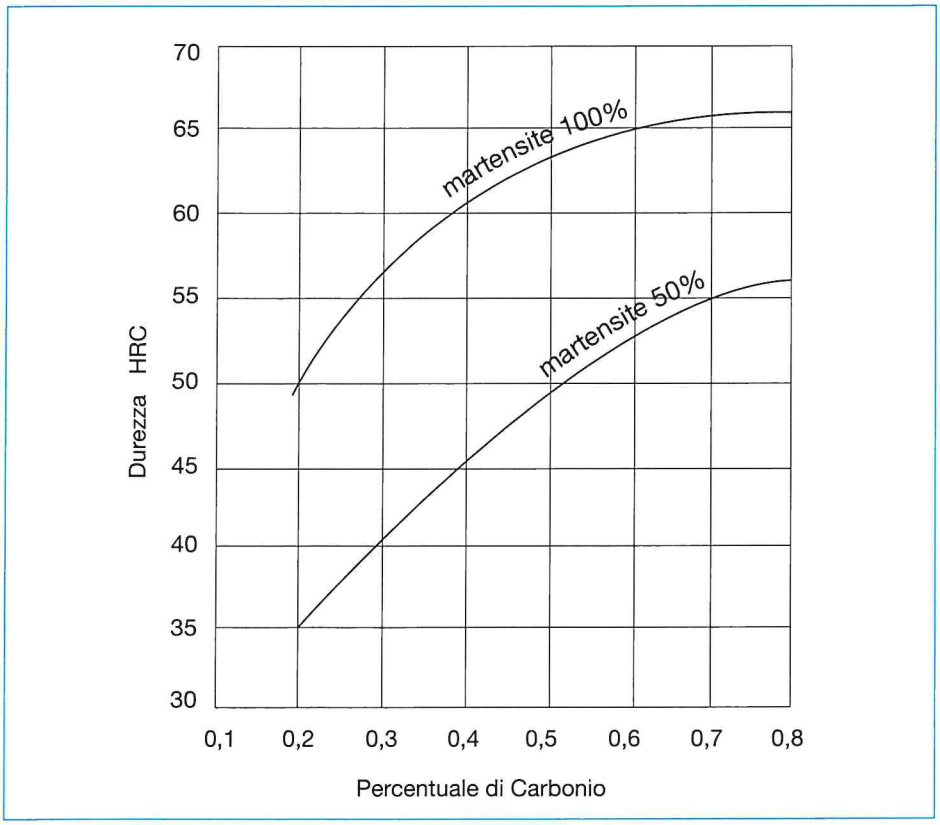


FIGURA **5**. Aumento della durezza in rapporto all'aumento della percentuale di C nell'acciaio e alla percentuale di trasformazione in struttura martensitica.

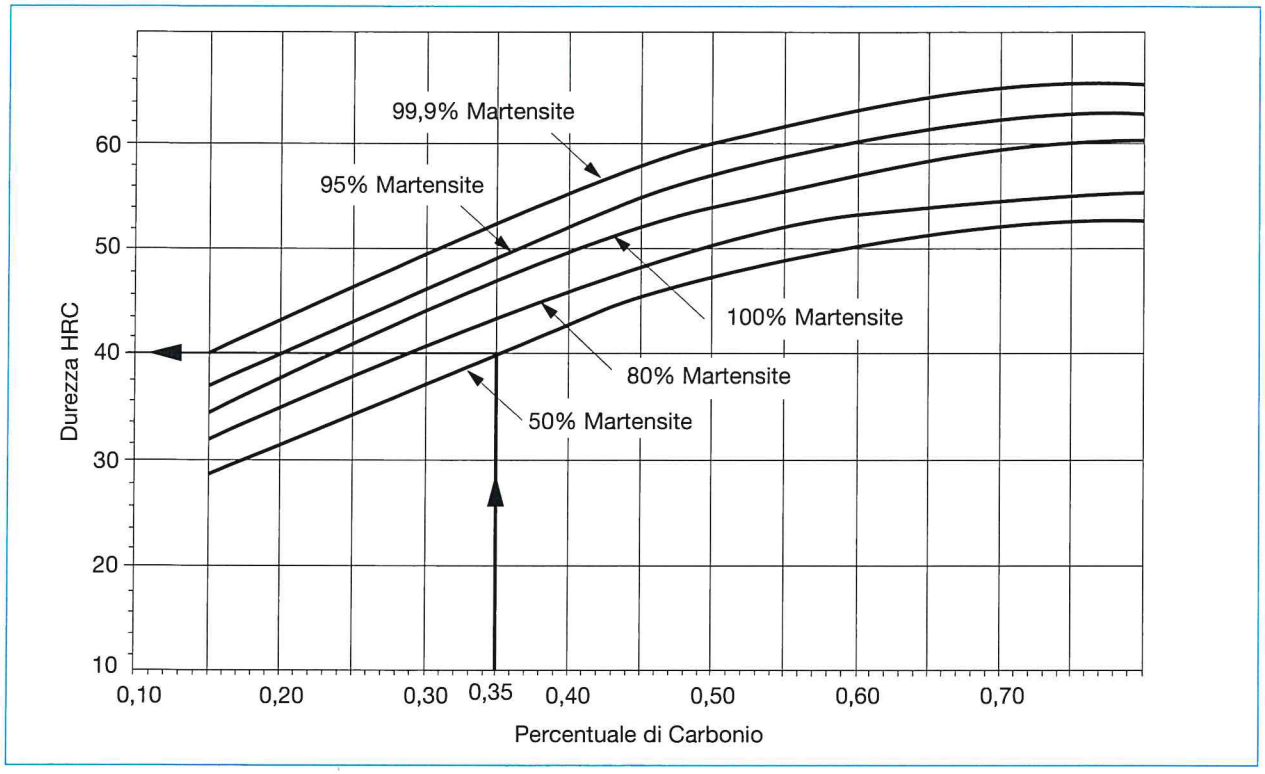


FIGURA **24**. Individuazione della durezza media (40 HRC) con struttura martensitica pari al 50% per l'acciaio 35CrMo4 (con 0,35%C).

mo al 50%. In FIGURA **23**, il cuore non ha preso la tempra, ma si è indurita solo la zona superficiale, con una crosta dura di $\frac{D-d}{2}$ mm.

È possibile, quindi, definire **diametro critico del tondo** D_c, quel diametro massimo oltre il quale la struttura al cuore non è più martensitica per il 50% (FIGURA **22**).

La FIGURA **21** mostra come è possibile determinare il diametro esterno D di un tondo di acciaio 35CrMo4. Ad esempio, per una durezza 40 HRC, ricavata dal diagramma in FIGURA **24**, si determina la distanza Jominy di 20 mm. Il diametro interno del tondo $d = 54$ mm (al centro), $d = 74$ mm a 3/4 dal centro e il diametro esterno $D = 101$ mm sono i diametri del tondo con una temprabilità corrispondente.

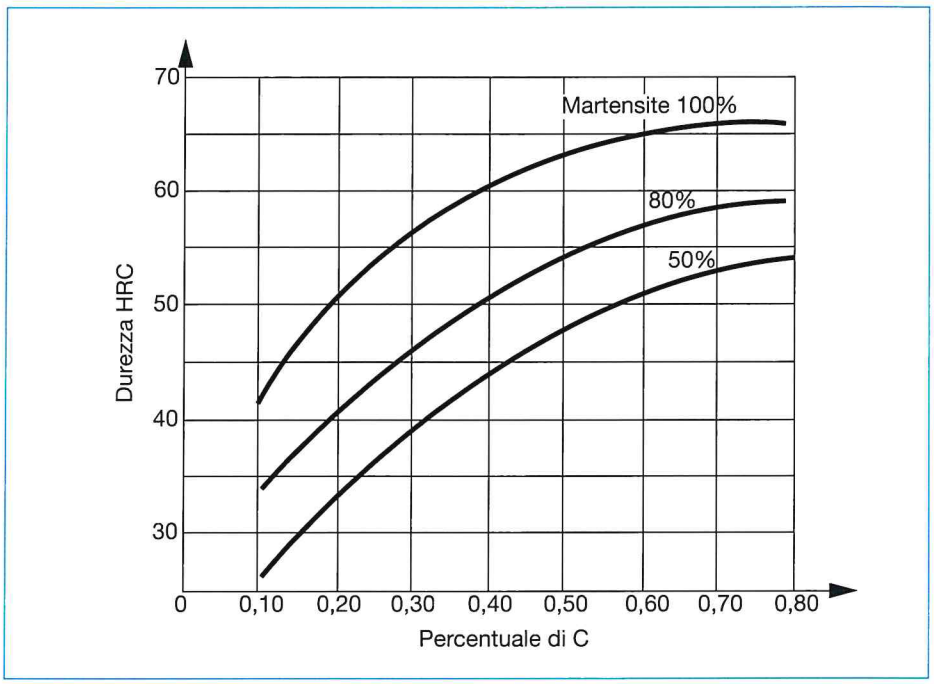
Come si ricava dal grafico in FIGURA **21**, la stessa durezza di 40 HRC è possibile riscontrarla:

- in una barra con diametro di 101 mm, eseguendo la prova di durezza in superficie;
- in una barra con diametro di 74 mm, eseguendo la prova di durezza a ¼ dalla superficie;
- in un barra con diametro di 54 mm, eseguendo la prova di durezza in centro.

La **temprabilità** di un acciaio dipende da:

- composizione chimica dell'acciaio;
- dimensione del grano austenitico.

FIGURA **25**. Aumento della durezza degli acciai con l'aumento della percentuale di C e di martensite.



Influenza del carbonio sulla temprabilità

Il diagramma di FIGURA **25** mostra come la durezza degli acciai aumenta sia con la percentuale di carbonio sia con la percentuale di martensite.

▶ Gli **acciai non legati al carbonio** SONO MENO temprabili degli acciai legati. Pezzi grossi in acciaio al solo carbonio non sono temprabili. Solo la zona superficiale è martensitica, ma *non il cuore*.

In particolare gli acciai dolci con C < 0,2% non hanno sufficiente carbonio per formare martensite e quindi non sono temprabili (FIGURA **25**).

Acciai con media percentuale di carbonio possono essere temprati fino al cuore solo se il pezzo è di piccole dimensioni e il mezzo di raffreddamento è il più drastico: l'acqua.

Influenza degli elementi di lega sulla temprabilità

Gli acciai legati con Cr, W, Mn, Ni, ecc. si temprano anche con velocità di raffreddamento più lente, perché l'aggiunta di questi elementi abbassa la velocità critica martensitica. Per gli **acciai molto legati**, come ad esempio l'acciaio X45NiCrMo4, basta anche **l'aria**. Tra gli elementi di lega, è il Mn che in particolare abbassa maggiormente la velocità critica.

▶ Pezzi grossi sono temprabili solo se in acciaio legato.

▶ Gli acciai alto-legati e gli acciai rapidi per utensili sono temprabili con una velocità di raffreddamento più lenta. In questo caso, il mezzo di raffreddamento utilizzato è l'aria.

2.1 Tempra superficiale a induzione

▶ Barre, lame, forbici, guide di bancali, perni e alberi vengono scaldati, per effetto Joule, dalla circolazione superficiale di correnti indotte mediante una bobina a corrente alternata.

Effetto pelle

A causa dell'effetto pelle della corrente alternata, lo spessore dello strato riscaldato dipende dalla:

- frequenza della corrente;
- conducibilità del materiale.

I generatori usati sono a bassa frequenza (inferiore a 5 kHz), media frequenza (da 5 kHz a 30 kHz) e alta frequenza (200 kHz).

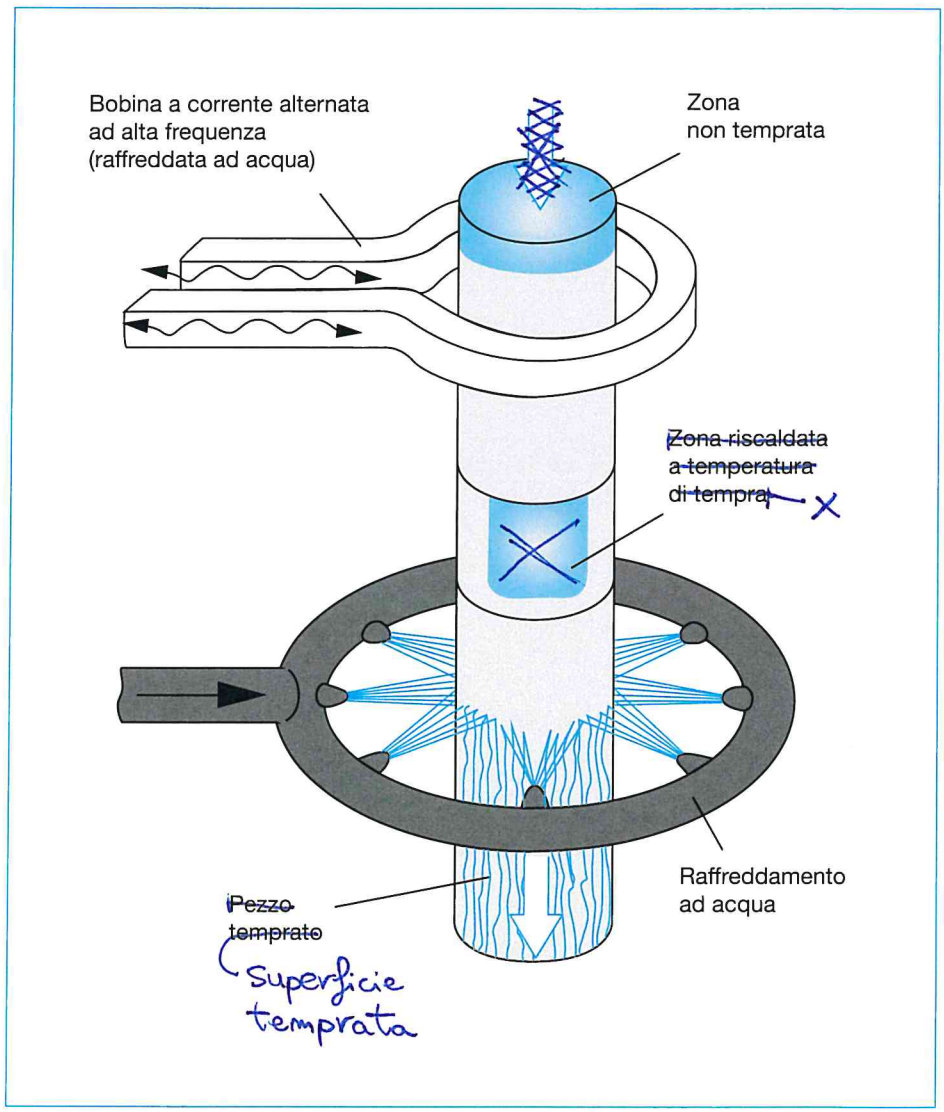


FIGURA **35**. Schema della tempra a induzione.

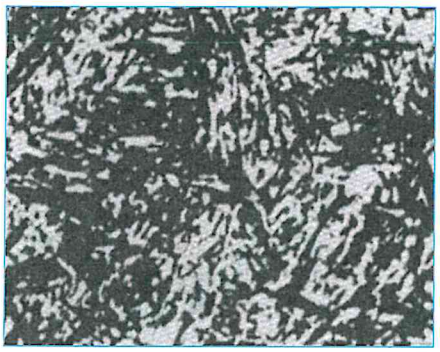


FIGURA **1**. Struttura dell'acciaio C45E rinvenuto a 150 °C, dopo tempra (500x).

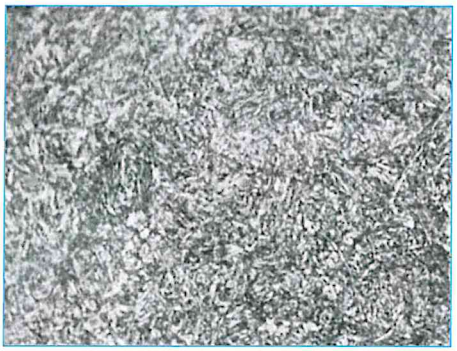


FIGURA **2**. Struttura rinvenuta a 400 °C dell'acciaio C45E, dopo tempra. La martensite ha iniziato a decomporsi in aghi di ferrite (chiara) e cementite (scura), finemente distribuiti (500x).

OSSERVAZIONE Questo riscaldamento di distensione a bassa temperatura non provoca la trasformazione della struttura e quindi la durezza dell'acciaio diminuisce poco (FIGURA **1**);

- il rinvenimento a 150÷200 °C può servire a completare la **trasformazione dell'austenite residua**, dopo la tempra, in *martensite*;
- a temperatura più alta, per esempio a 400 °C, nel caso dell'acciaio C45E (FIGURA **2**), la **martensite rinvenuta**, con durezza 41 HRC, ha celle elementari cubiche a corpo centrato α e all'interno di alcune di queste un atomo di C;
- gli acciai legati al Cr, Mn, Cr-Mn, Cr-Ni devono **evitare un rinvenimento tra i 300 e 400 °C** perché manifestano il fenomeno della **fragilità al rinvenimento** (FIGURA **3**). Questi acciai devono perciò essere rinvenuti tra i 500 e 600 °C e poi raffreddati rapidamente in acqua o olio, oppure rinvenuti a temperature inferiori a 300 °C. Il diagramma di FIGURA **3** evidenzia *l'intervallo critico* tra i 300 e i 400 °C per un acciaio speciale 18NiCrMo5. Nel grafico l'allungamento percentuale A_5 ~~indica che~~ è relativ alla provetta normale con la lunghezza del tratto utile ~~della provetta normale~~ è $L_0 = 5 \cdot d$ (viene più spesso indicato con A);

OSSERVAZIONE L'aggiunta di circa 0,1% di Mo *riduce la fragilità di rinvenimento*, dovuta all'arrichimento di carburi o di micro-elementi inquinanti;

- un rinvenimento a una temperatura più alta, *poco sopra* 500 °C (FIGURA **4**) dà luogo a precipitazione di carburi diminuendo di poco la durezza dell'acciaio C45E (**33 HRC**). Questa struttura molto fine e uniforme viene detta **sorbite**. È molto usata negli acciai da costruzione per le sue buone proprietà di resistenza meccanica e tenacità: fino a R_m = 1000 N/mm^2 per gli acciai al carbonio, e 1400 N/mm^2 per gli acciai legati;
- con una temperatura *fino a 700 °C* si genera una struttura che si avvicina alla perlite globulare e, di conseguenza, avviene un aumento della *tena-*

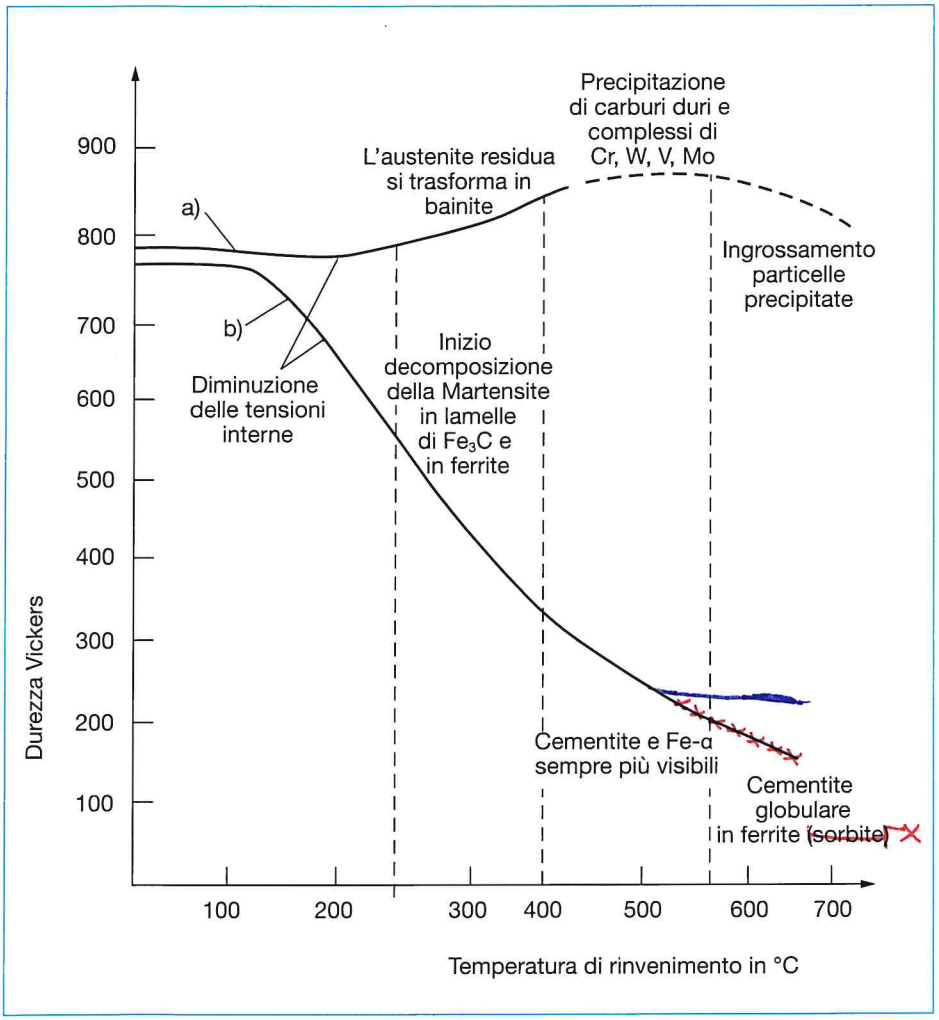


FIGURA **3**. Curve della durezza in funzione della temperatura di rinvenimento, (a) acciaio altolegato da utensili (acciaio rapido), (b) acciaio C40.

Indurimento secondario da precipitazione

(FIGURA **1**, curva 2 e 3) e (FIGURA **3**, curva *a*)

▶ È detto secondario perché quello primario è l'indurimento da trasformazione in martensite.

Si manifesta dopo 1÷2 ore alle temperature di rinvenimento di 500÷580 °C e raffreddando poi in aria calma. È un effetto voluto negli acciai rapidi per utensili, i cosiddetti HS (*High Speed*), causato da una fitta dispersione finissima di particelle dure (carburi complessi di Cr, W, V e Mo), che precipitano all'interno dei cristalli misti ostacolando la traslazione delle dislocazioni. Naturalmente tutto questo non può avvenire negli acciai non legati. La FIGURA **3**, curva *b*, illustra come il *rinvenimento* dell'acciaio C40 alle basse temperature provoca la diminuzione delle tensioni interne e all'inizio mantiene la stessa durezza acquisita con la tempra. A temperature di rinvenimento più alte la martensite comincia a rilasciare sempre più particelle di carburi di ferro dalle sue celle martensitiche e non si verifica un indurimento, ma anzi una diminuzione della durezza.

1 Cosa si intende per precipitazione?

2 Quali effetti vantaggiosi o svantaggiosi si possono ottenere dal processo di precipitazione? Descriverne i motivi.

3 Con l'acciaio al carbonio si può ottenere un indurimento da precipitazione? Per quale motivo?

4 Perché la precipitazione di particelle di composti intermetallici tramite un raffreddamento lento è da evitare anche se porta a un indurimento della lega?

5 A che cosa si riferiscono le curve 1, 2 e 3 del grafico (FIGURA **A**)? Spiegare il motivo della variazione della durezza nei tre casi.

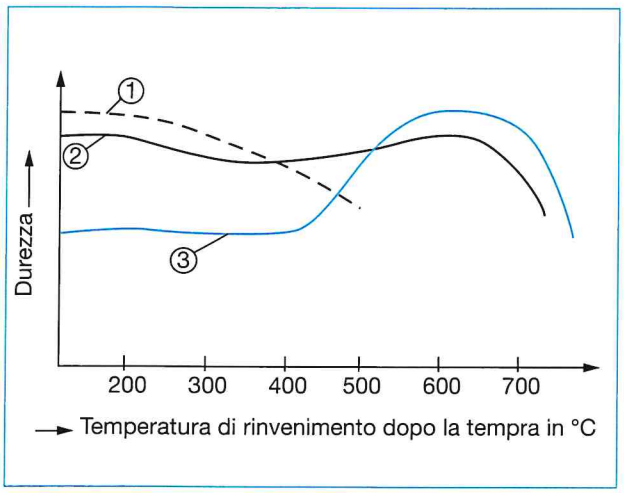


FIGURA **A**

6 Che cosa è necessario fare per evitare la fragilità da rinvenimento e in quali materiali questo fenomeno si manifesta?

7 Illustrare il procedimento di bonifica (tempra di solubilizzazione e di indurimento da precipitazione).

8 A quali materiali si riferiscono le due curve nel grafico (FIGURA **B**)? Descrivere quello che avviene alle varie temperature di rinvenimento.

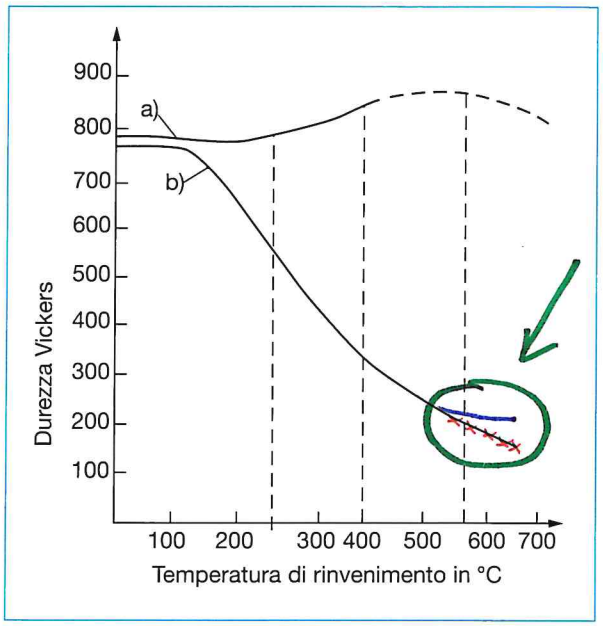


FIGURA **B**

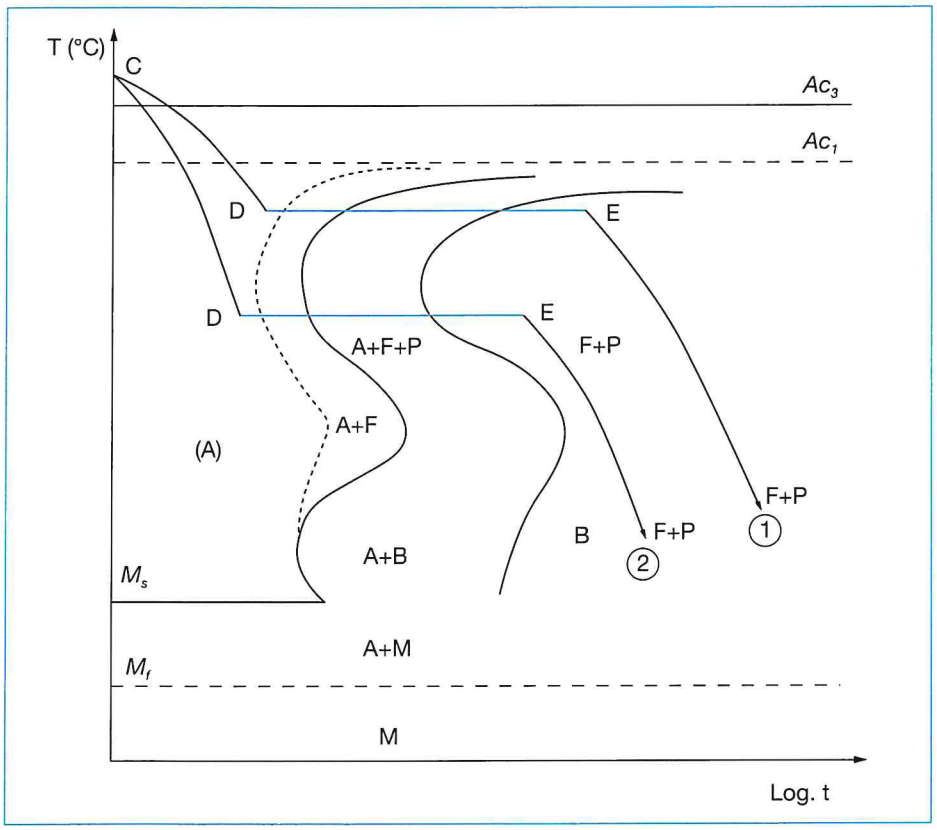


FIGURA **13**. Ricotture isotermiche.

Ricottura isotermica

▶ La struttura finale, e quindi le proprietà dell'acciaio ricotto isotermicamente, non differiscono dalla ricottura completa, ma la durata è minore e di conseguenza il vantaggio è economico (FIGURA **13**).

Con la ricottura isotermica a una temperatura più alta (curva 1, ricottura isotermica sferoidale, FIGURA **13**), si può globulizzare le lamelle della cementite e ottenere una struttura perlitica, ma occorre un tempo più lungo. Lo scopo è di assicurare, per esempio a pesanti pezzi destinati alla lavorazione per stampaggio, una buona lavorabilità e una capacità di resistenza meccanica e resilienza su tutta la sezione.

Procedimento

- Riscaldamento lento (AB) alla temperatura di austenizzazione, sopra la linea critica Ac_3 (FIGURA **14**).
- Permanenza a questa temperatura fino all'austenizzazione (BC).
- Raffreddamento molto rapido (CD) fino a una temperatura di poco inferiore ad A_{r1} (curva 1, FIGURA **13** o FIGURA **14**) più in basso (curva 2, FIGURA **13**) a seconda degli scopi prefissati.
- Permanenza a questa temperatura T_{iso} sino alla completa trasformazione isotermica (DE) dell'austenite in ferrite + perlite (o perlite + cementite se acciaio ipertettoide o semplicemente perlite ~~su~~ se acciaio eutettoide).
- Raffreddamento finale in aria (EF).

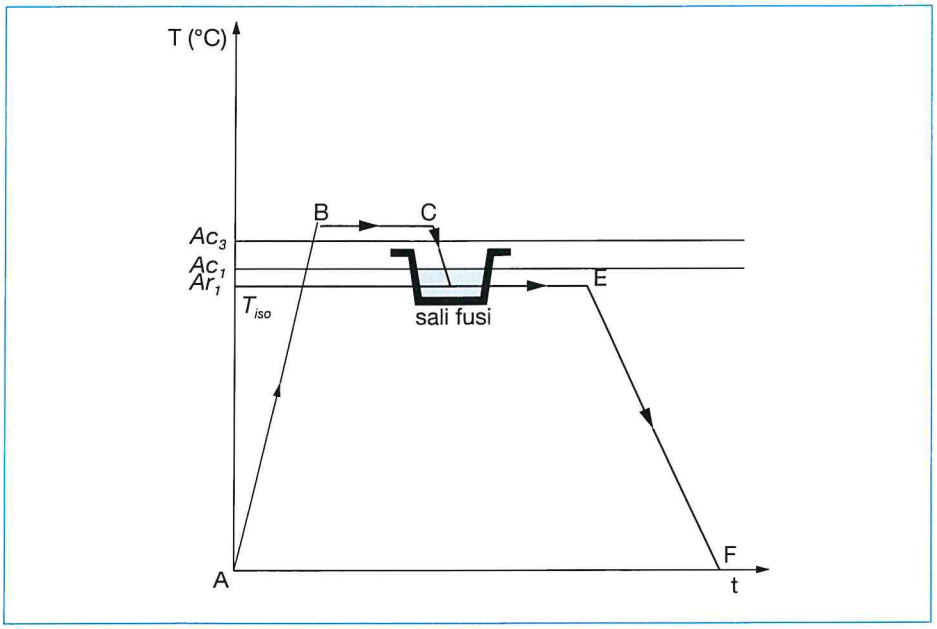


FIGURA **14**. Ciclo termico di ricottura isotermica di un acciaio ipoeutettoide.

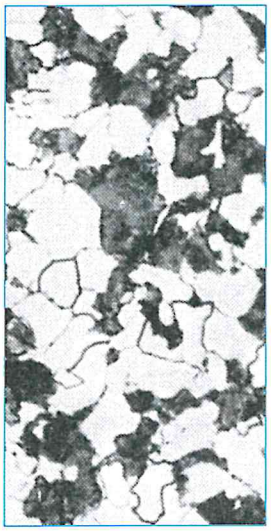


FIGURA **15**. Struttura finale dell'acciaio 25CrMo4, dopo la trasformazione a 675 °C (150 HV).

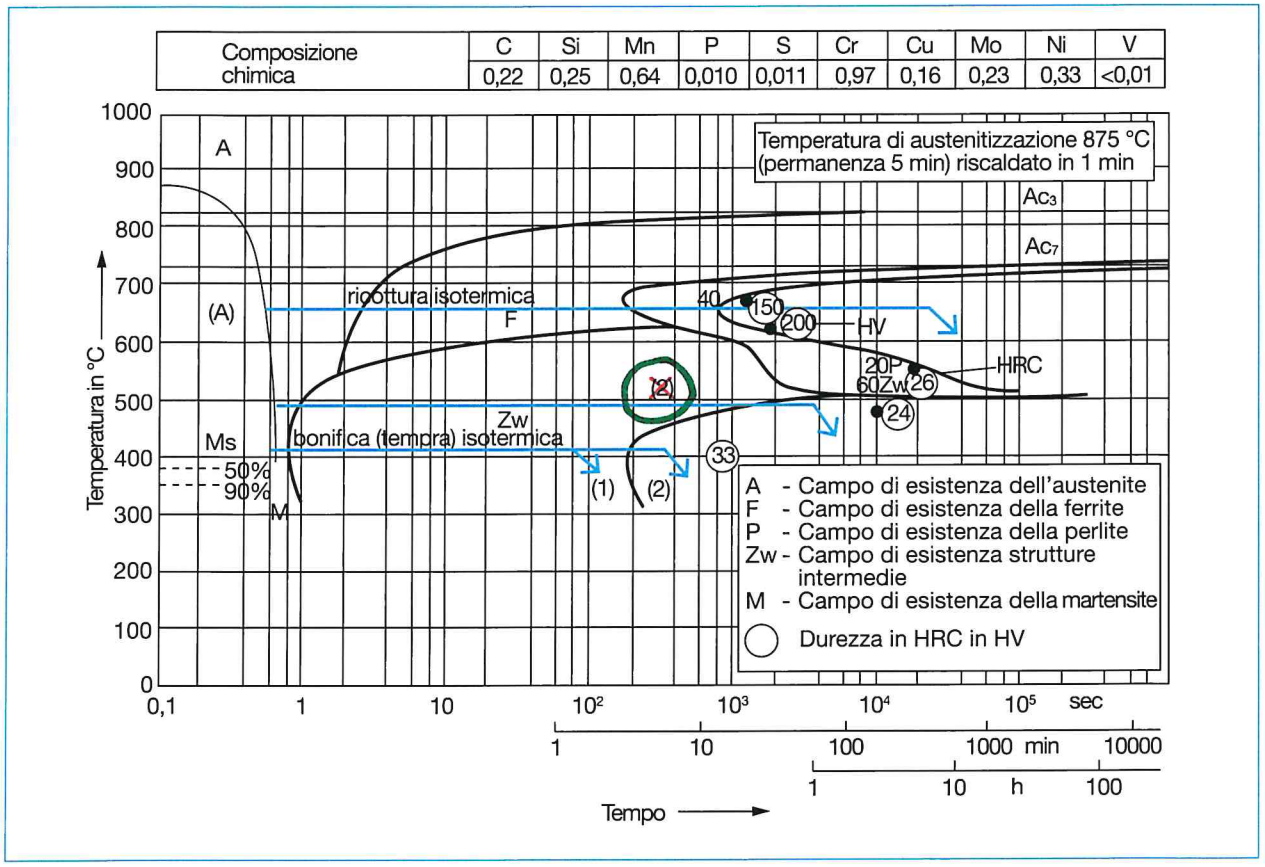


FIGURA **16**. Diagramma TTT dell'acciaio 25CrMo4.

La FIGURA **15** mostra la struttura finale dell'acciaio 25 CrMo4 (60% di F e 40% di P), ottenuta con la trasformazione a 675 °C (curva 1, FIGURA **13**).

Il diagramma in FIGURA **16** mostra le curve di Bain di questo acciaio e le linee isotermiche relative alla ricottura e alla tempra o bonifica isotermica.

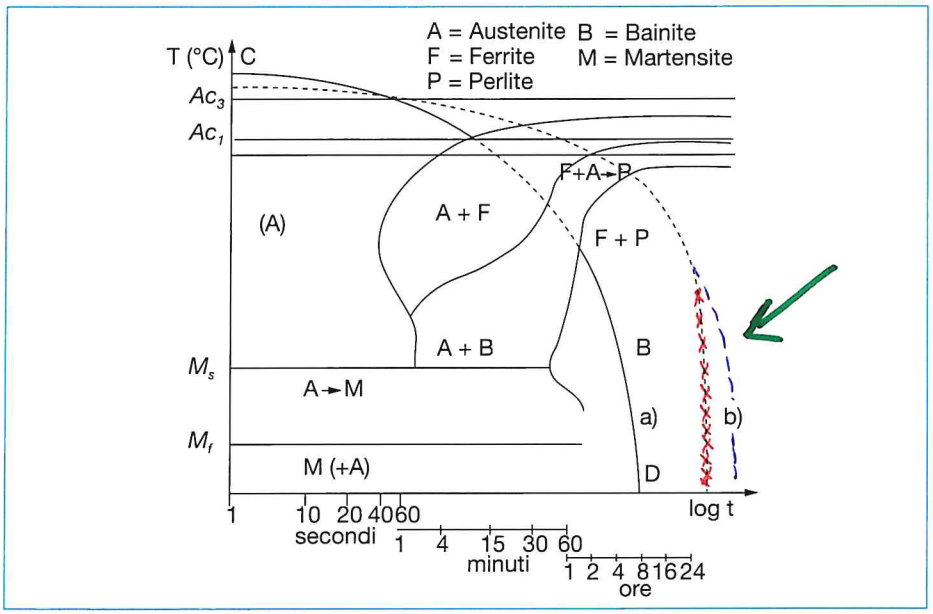


FIGURA **23**. Diagramma TRC di un acciaio ipoeutettoide sottoposto a ricottura di normalizzazione.

4.3 Tempra diretta

La FIGURA **24** mostra il diagramma TRC del precedente acciaio ipoeutettoide. La curva dal punto C (poco sopra Ac_3) al punto D (temperatura ambiente) indica **il raffreddamento della tempra diretta**, più veloce della linea di raffreddamento (1), che rappresenta invece il raffreddamento a *velocità critica*, tangente al campo di esistenza della bainite. Raffreddamenti più lenti della curva (1) non danno più luogo direttamente alla martensite, poiché non sono più trattamenti di tempra, e la struttura finale contiene, oltre alla martensite anche la bainite, in percentuale dipendente dalla velocità di raffreddamento.

▶ La curva (2) è alla velocità critica inferiore. Anche con questo raffreddamento la struttura finale non sarà più solo martensitica.

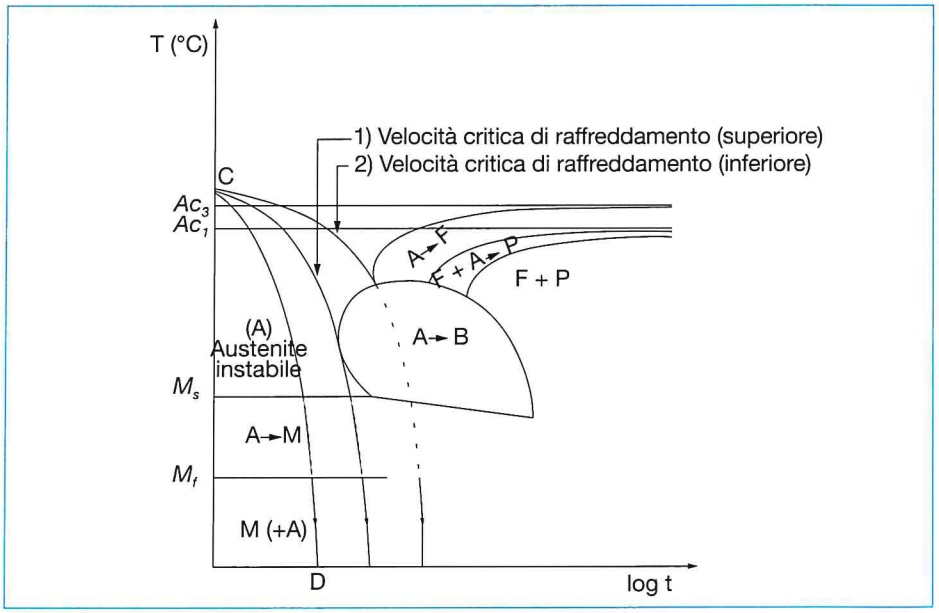


FIGURA **24**. Diagramma TRC di un acciaio ipoeutettoide sottoposto a tempra diretta.

Gli acciai da cementazione **non legati**, come C10 o C16, vengono temprati in acqua e impiegati per pezzi di piccole dimensioni e meno sollecitati, come perni e boccole.

Gli acciai **legati**, come 12NiCr3, 16NiCrMo2, vengono temprati in olio o in un bagno termico di sali fusi e impiegati per organi più sollecitati, come alberi e ingranaggi.

I diversi raffreddamenti di tempra, che seguono la cementazione, differiscono a seconda della temprabilità dell'acciaio per evitare che la diversità di struttura tra il cuore e la superficie provochi le cricche di tempra.

Si deve evitare anche che una **temperatura** troppo alta, così come una struttura a **grani grossi**, allo scopo di accelerare il processo di diffusione, porti a un eccesso di carbonio e alla formazione di strati ipereutettoidi, con conseguente maggiore fragilità, per la deposizione di cementite ai bordi dei grani. Anche per questo gli acciai da cementazione a **grani fini** sono **i più idonei alla cementazione**, dato il loro non eccessivo assorbimento di carbonio. Inoltre l'inevitabile ingrossamento dei grani, conseguenza della lunga permanenza alle alte temperature, necessarie per la cementazione, rimane comunque entro limiti tollerati.

OSSERVAZIONE Gli acciai da cementazione legati con Cr e Mo formano con il C carburi duri e ciò aumenta ancora di più la resistenza all'usura del pezzo cementato.

Spessore efficace e spessore totale cementato

Il diagramma in FIGURA **7** mostra la dipendenza della profondità di cementazione, e quindi della misura dello *spessore efficace* e dello *spessore totale*, dall'andamento della durezza.

Mostra anche la percentuale di carbonio alle varie profondità fino alla misura ultima, che indica lo **spessore totale** (massimo) cementato, oltre il quale non c'è stata alcuna diffusione di carbonio e quindi neanche una differenza di durezza tra prima e dopo il trattamento.

La curva individua anche lo **spessore efficace**, ossia lo spessore utile indurito, che coincide, per convenzione, alla profondità temprata, ad esempio pari a 0,6 mm circa, alla quale corrisponde il valore convenzionale minimo di durezza pari a **550 HV 1**. Vickers

La durezza è rilevata su una sezione trasversale di un provino cementato (FIGURA **8**) con misure effettuate (a) in profondità a gradini, (b) su un piano inclinato rispetto alla superficie, scavato con una mola.

SPESSORE EFFICACE
La prova di durezza Vickers eseguita con una forza applicata di 1 kgf = 9,807 N si indica con il valore trovato seguito da HV 1.

Classi di cementazione

La TABELLA **1**, come da norme UNI 5381, mostra la classificazione della cementazione in funzione dello **spessore efficace indurito**, ossia quello spessore che con la modalità di misurazione indicata assume il valore convenzionale di 550 HV 1.

Le classi di cementazione, ossia la misura dello spessore cementato, sono scelte in base alle dimensioni del pezzo e alle condizioni di impiego e devono essere riportate sui disegni.

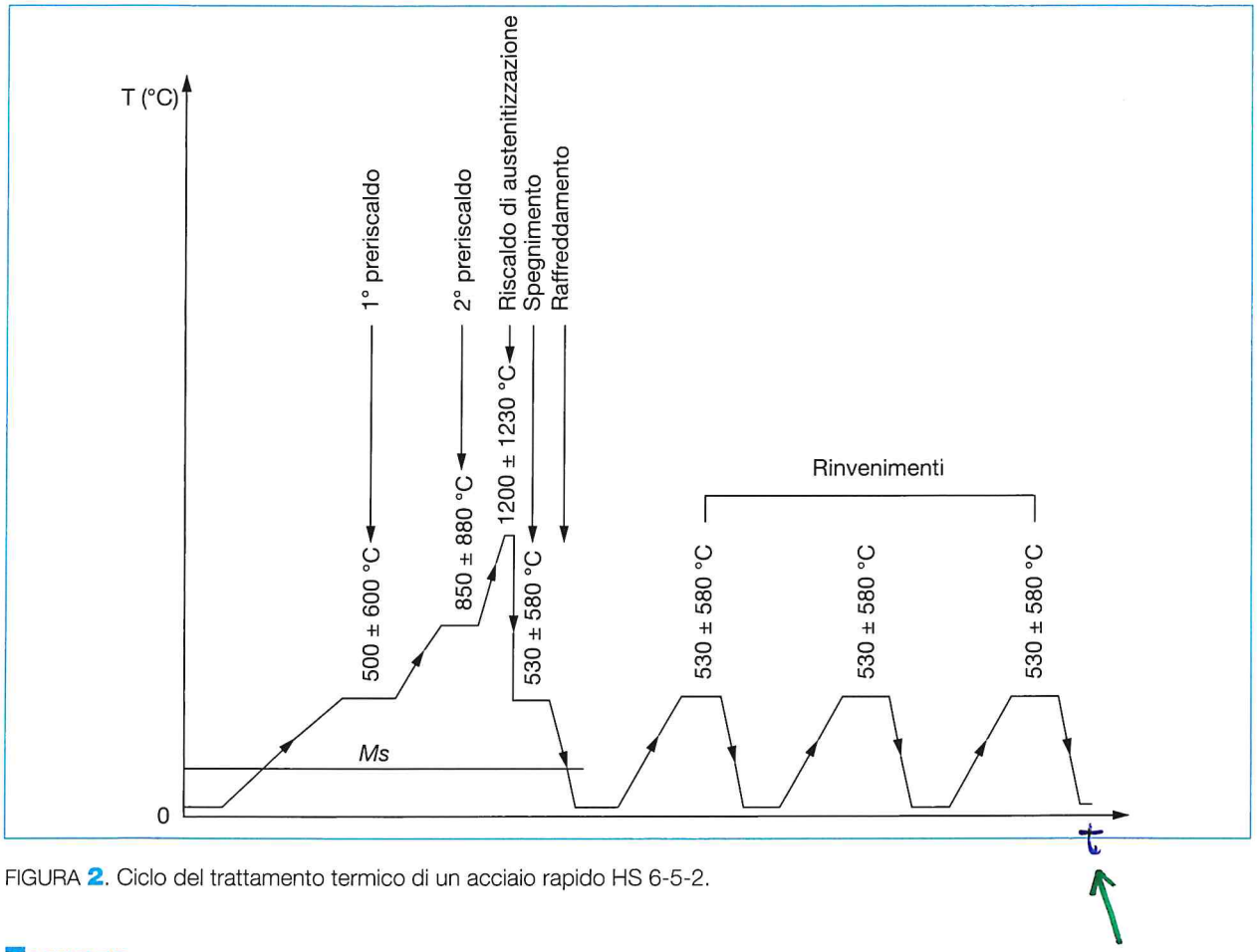


FIGURA **2**. Ciclo del trattamento termico di un acciaio rapido HS 6-5-2.

Tempra

A causa della bassa conducibilità termica degli acciai rapidi sono necessari due preriscaldi per uniformare la temperatura in tutti i punti del pezzo:

- *1° preriscaldo*: salita lenta fino a 500÷600 °C;
- *2° preriscaldo*: a 850÷880 °C;
- *riscaldo* in bagno di sali, per la **solubilizzazione dei carburi nel Fe-γ (austenite)**, a temperatura compresa nell'intervallo 1200÷1230 °C con permanenza a regime lo stretto necessario (80÷150 sec). Se è richiesta una maggiore tenacità, si tempra dalla temperatura più bassa;
- *spegnimento* in olio o bagno di sale a 530÷580 °C per uniformare la temperatura;
- *raffreddamento finale* in aria per la trasformazione in martensite e non dare tempo ai carburi di precipitare.

La struttura che si è formata è costituita da martensite e un po'di austenite residua.

Rinvenimento/i

Da eseguirsi immediatamente, per evitare cricche, dopo la tempra nell'intervallo 530÷580 °C, secondo le esigenze di durezza.

La micrografia in FIGURA **3** mostra la struttura estremamente omogenea dell'acciaio rapido temprato e rinvenuto a 550 °C (1° rinvenimento). I carburi complessi, più visibili rispetto alla FIGURA **1** per l'ingrandimento a 500x, sono distribuiti uniformemente nella matrice **martensitica**.

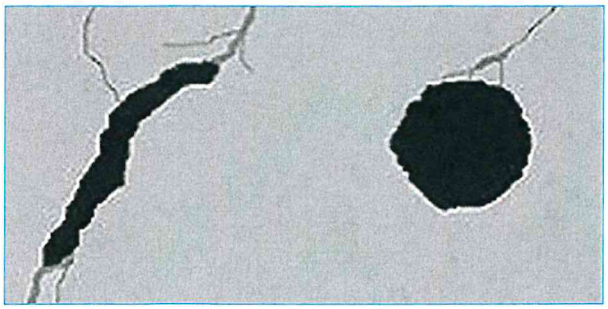


FIGURA **13**. a) Innesco e propagazione di una cricca con la grafite lamellare; b) arresto della cricca con la grafite sferoidale.

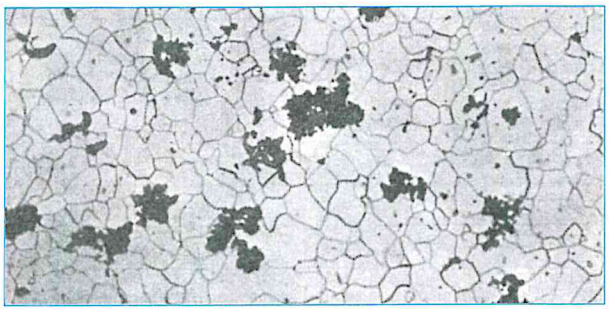


FIGURA **14**. Ghisa malleabile a cuore nero a matrice ferritica [200 x].

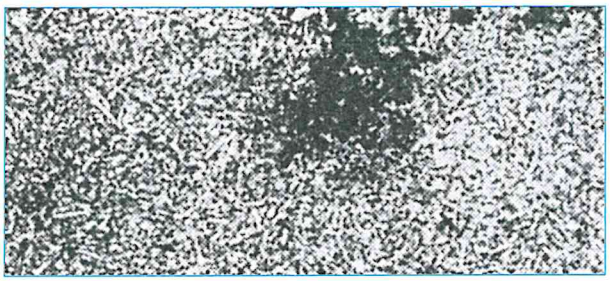


FIGURA **15**. GJMB a matrice perlitica [100 x].

Si può anche ottenere ~~ghiri~~ ghisa malleabile a cuore nero e matrice *perlitica* se si esegue, dopo la ricottura a 960÷1000 °C e un raffreddamento in olio o in aria mossa, con rinvenimento a circa 600 °C per le ghise GJMB-700-2 e a 700 °C per le GJMB-450-6, meno resistenti e più malleabili.

Il carbonio grafitico a flocculi esercita un'azione di arresto per le cricche (FIGURA **13b**), a differenza della grafite lamellare che ne favorisce la propagazione (FIGURA **13a**).

In FIGURA **14** e FIGURA **15** sono mostrate le micrografie di due ghise malleabili a cuore nero (GJMB) per la presenza del carbonio grafitico (2,5÷2,7% di C).

La struttura risultante perlitica delle ghise GJMB è uniforme su tutta la sezione del pezzo e quindi anche le caratteristiche del getto sono indifferenti allo spessore, a differenza delle ghise GJMW che sono a decarburazione crescente avvicinandosi alla superficie (FIGURE **8**, **9** e **10**).

L'indicazione della resistenza e della malleabilità per queste ghise a cuore bianco si riferisce a spessori > 5 mm.

OSSERVAZIONE La ghisa EN-GJMW-350-4, ad esempio, ha $R_m = 350$ MPa ed A% = 4 riferito a uno spessore > 5 mm, fino a 7 mm, o a un diametro di 12 mm.

Il confronto tra le due ghise è mostrato in FIGURA **16**. Le ghise GJMW aumentano la resistenza con l'aumentare dello spessore del getto e con l'aumento del tenore di carbonio.

▶ Le ghise GJMB non manifestano variazioni di proprietà con l'aumento dello spessore.

QUESITI

1 Come si ottiene la ghisa grigia?

2 In particolare, come si ottiene la ghisa grigia sferoidale?

3 Che differenza c'è tra la ricottura di lavorabilità e quella di normalizzazione?

4 Quali ghise sono particolarmente indicate per la tempra superficiale?

5 Come si ottiene la ghisa bianca? Per cosa è stata usata come materiale di partenza?

6 Spiegare, aiutandoti con un disegno, il trattamento termico delle GJMW, specificando le variazioni strutturali durante il processo.

7 Le GJMB hanno dei vantaggi o degli svantaggi su quelle GJMW? Quali?

8 La ghisa sferoidale ha dei vantaggi o degli svantaggi rispetto a quella lamellare? Quali e perché?

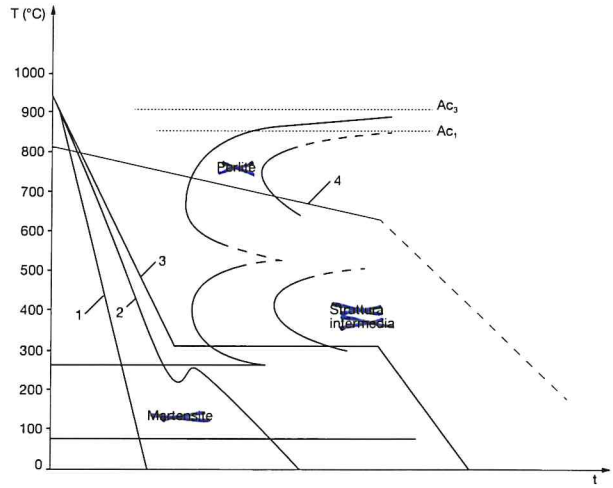
9 È preferibile temprare le ghise legate piuttosto che le ghise comuni? Per quale motivo?

10 Come si può evitare la formazione di austenite residua nella struttura martensitica dei getti temprati?

11 Quali sono i vantaggi della tempra interrotta e della tempra bainitica? In che cosa consistono?

12 Come si fa a ridurre la fragilità e la durezza della ghisa bianca e quali strutture si possono ottenere?

13 Osservare ~~di nuovo~~ la figura ~~8~~ e specificare di quali trattamenti si tratta, come sono stati eseguiti e quali sono le strutture risultanti.



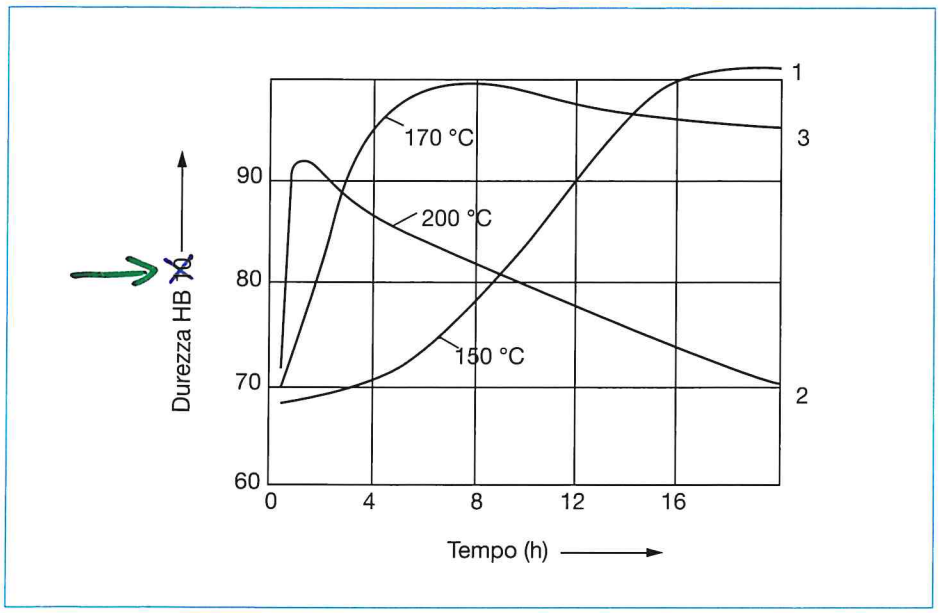


FIGURA **3**. Grafico durezze/tempo e curve di riscaldamento per invecchiamento artificiale della lega G-AlSiMg.

▶ Il grafico mostra il variare della durezza a temperature diverse e dimostra che per ogni materiale esiste una temperatura di riscaldamento "ideale".

Ad esempio, per la lega AlSiMg, la **curva 3** del riscaldo a 170 °C raggiunge quasi la durezza della **curva 1** del riscaldo a 150 °C, dopo 8 ore anzichè dopo 20 ore. Un riscaldo a 170 °C è quindi molto più conveniente di uno a 150 °C. Se si riscalda a temperatura più alta 200 °C, la **curva 2** mostra una caduta repentina della durezza dopo circa 1 ora, dovuta ad una precipitazione grossolana che rompe la coesione della materia.

La temperatura di 200 °C è troppo alta per la lega leggera AlSiMg.

Il grafico dimostra anche che la lega AlSiMg (ma vale pure per le altre leghe leggere invecchiate artificialmente) non è resistente al calore. Un impiego a temperature più alte di 170 °C comporta una diminuzione della durezza.

OSSERVAZIONE Recentemente si è scoperto che l'aggiunta di litio migliora la resistenza al calore di queste leghe e ciò ha incrementato la loro applicazione. Ad esempio, nel settore delle auto nord-europee, dal 1978 ad oggi, si è avuto un incremento del suo impiego di quasi il 20%.

2.2 Ricotture

▶ Con gli stessi criteri adottati per gli acciai si può eseguire il trattamento di ricottura delle leghe non ferrose.

INVECCHIAMENTO DEGLI ACCIAI

Anche gli acciai dolci sono soggetti all'invecchiamento. In questo caso, per lo più indesiderato, in quanto provoca, oltre ad un indurimento, anche infragilimento. Elementi, come il carbonio e l'azoto, che si trovano in soluzione interstiziale nella matrice ferritica degli acciai, con un raffreddamento, dopo lavorazioni di deformazione plastica, precipitano e migrano verso i bordi dei grani. Qui si legano agli atomi di ferro formando carburi e nitruri di ferro (Fe_4N), rendendo più difficoltosa la deformazione plastica e perdendo tenacità. Effetti analoghi si hanno dopo il drastico raffreddamento di tempra. A temperatura ambiente particelle interstiziali si trovano, in situazione instabile di sovrasaturazione, e ciò determina la loro precipitazione, che può essere favorita da un leggero riscaldamento.

1 Che cosa comporta l'invecchiamento delle leghe leggere e per quale motivo si esegue?

2 Che cosa succede se non si esegue correttamente il trattamento di invecchiamento artificiale?

3 Come si esegue la ricottura di solubilità? Che scopo ha?

4 Da cosa dipende l'indurimento di una lega non ferrosa?

5 Che scopo ha la ricottura di una lega leggera?

6 Che differenza c'è tra un raffreddamento lento e uno veloce dopo la solubilizzazione?

7 L'indurimento per precipitazione è uno dei metodi utilizzati per migliorare le proprietà meccaniche di un metallo. Per quali materiali è un meccanismo particolarmente efficace?

8 La struttura cristallina, al di sopra della temperatura critica di saturazione, appare al microscopio metallografico come quella a temperatura ambiente ottenuta con un raffreddamento lento o veloce? Per quale motivo?

9 Le particelle di soluto precipitate hanno effetti diversi a seconda se sono interne ai grani metallici o se sono ai bordi degli stessi? Spiegarne il motivo?

10 Schematizzare il trattamento di bonifica di una lega induribile per precipitazione con a fianco il suo diagramma di equilibrio a cui fare riferimento per rilevare le temperature del trattamento stesso

11 Si possono indurire le leghe leggere solo con la bonifica o anche in modo diverso? Quale?

12 Quali informazioni utili si ricavano dal diagramma riportato in figura? E per quale materiale?

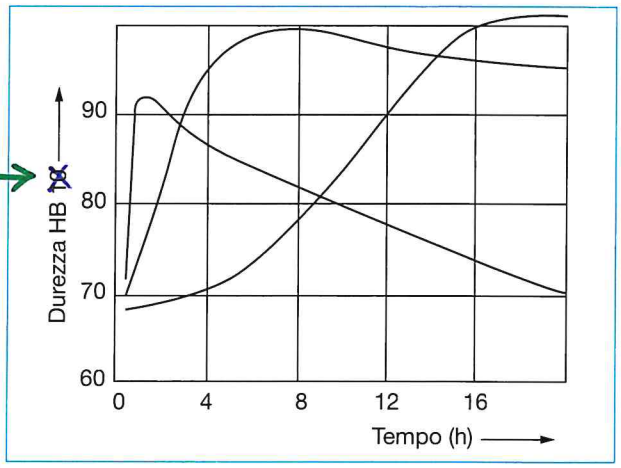


FIGURA **A**

Il soffio magnetico, che non si genera se la corrente è alternata, non è desiderabile in quanto il materiale di base non fonde a sufficienza e il flusso della scoria non viene più controllato. La conseguenza è un'unione imperfetta con all'interno residui di scoria, scarsa forma del giunto e cattiva saldatura.

Metodi di prevenzione infortuni

- *Irradiazione dell'arco elettrico*
  Usare filtri di protezione (scudo o occhiali protettivi); coprire tutte le parti del corpo.
- *Corrente elettrica*
  Indossare guanti protettivi, non calzare scarpe chiodate, non stringere sotto le ascelle il portaelettrodi o il cavo, non saldare a torso nudo.
- *Danni da esplosioni*
  I serbatoi per stoccaggio o trasporto di gas o liquidi infiammabili devono essere opportunamente vuotati, puliti, controllati e considerati idonei per la saldatura e anche le tubazioni si devono controllare con appositi apparecchi per assicurare l'assenza di gas pericolosi e inodori.
- *Spruzzi di scintille*
  Indossare grembiuli, guanti, bracciali protettivi di cuoio e scarpe robuste; nella saldatura sopratesta portare un copricapo.
- *Spruzzi di scintille*
  Allontanare gli oggetti infiammabili.
- *Danni da fuoco*
  Allontanare gli oggetti infiammabili.
- *Spruzzi di particelle di scorie*
  Nel rimuovere le scorie con l'apposito martello, portare occhiali di protezione assolutamente antiappannanti.
- *Scarsità d'aria in locali stretti e in serbatoi*
  Fare arrivare continuamente aria fresca; non insufflare mai ossigeno puro.

Elettrodi

Per ogni tipo di saldatura si usano gli elettrodi adatti. Questi sono bacchette metalliche di solito rivestite, preferibilmente, con uno strato di materiale organico e minerale. In questo caso si parla di elettrodi rivestiti.

Sono costituiti da un'anima metallica e dal rivestimento che, fondendo, ricopre l'estremità dell'elettrodo, il quale fonde a sua volta (FIGURE **30** e **31**).

Il bagno di fusione viene così ricoperto da questo materiale protettivo, che solidificando forma la scoria. Questa successivamente deve essere rimossa. Gli elettrodi si scelgono, oltre che in base al tipo di saldatura o di riporto, anche in base allo spessore e al materiale del pezzo. Essendo conduttori elettrici, fondono e forniscono il materiale d'apporto, che costituisce il bagno di fusione tra i lembi da unire e poi, solidificando, il cordone di saldatura.

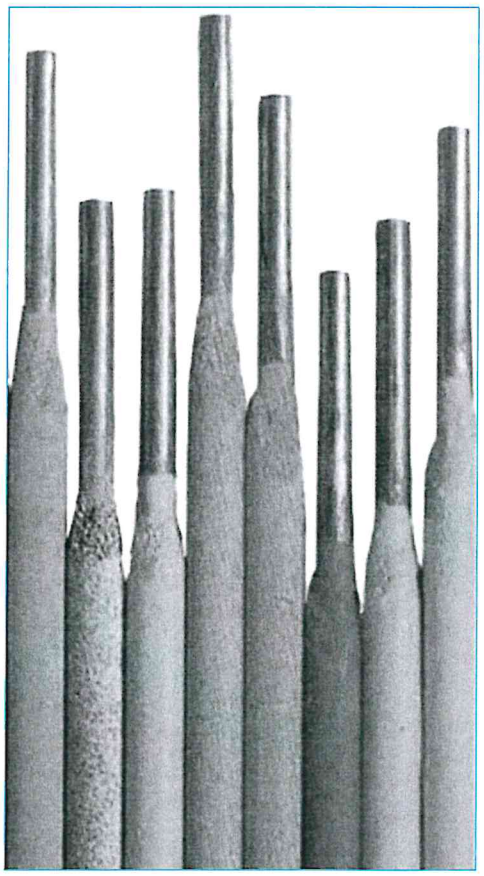


FIGURA **30**. Elettrodi rivestiti.

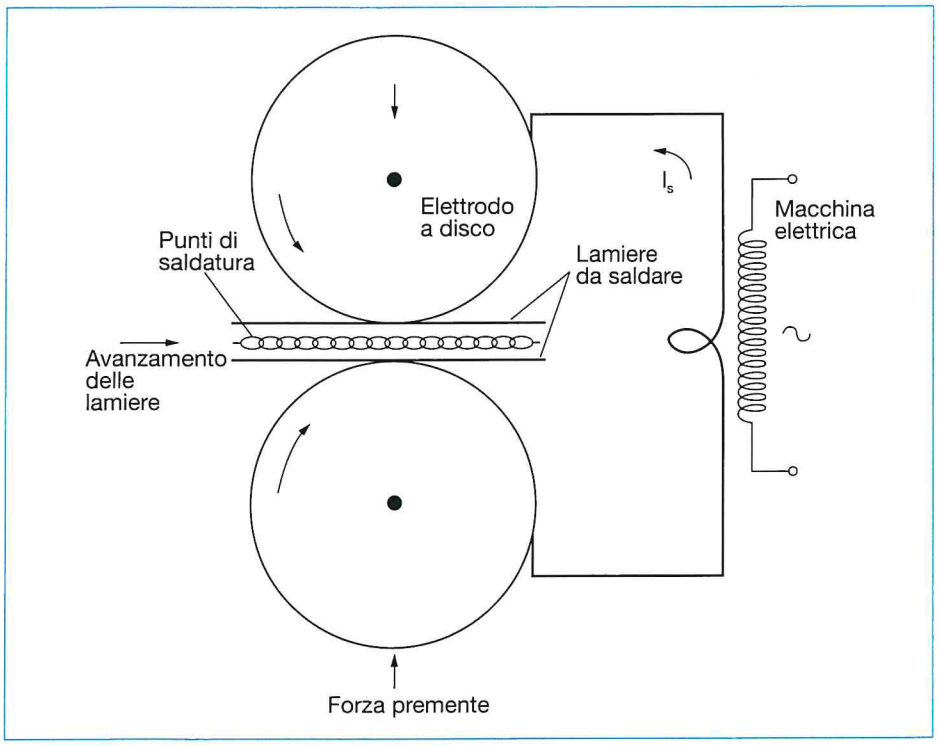


FIGURA **59**. Schema del procedimento di saldatura a rulli.

2.10 Saldatura di testa per scintillio

▶ A differenza delle precedenti saldature a resistenza, le due barre vengono accostate, ma non compresse (FIGURA **60**).

Nella fase di **scintillio**, al passaggio di corrente, si formano tanti piccoli archi elettrici tra le asperità delle due facce a contatto che provocano – data la fortissima corrente – l'espulsione di goccioline incandescenti, lo scintillio, di metallo e di tutte le impurità presenti; mentre sulle due facce si forma un velo fuso e pastoso. La fase successiva è quella della **compressione**. A questo punto, la corrente viene interrotta e le due barre vengono premute l'una contro l'altra in modo da schiacciare ed espellere le parti fuse.

Il processo di saldatura si conclude con un rigonfiamento tutto intorno, mentre la saldatura forma una struttura unica. Con la rimozione del rigonfiamento, quello che si ottiene è un corpo unico, realizzato in modo rapido ed efficiente, senza aver utilizzato materiale d'apporto.

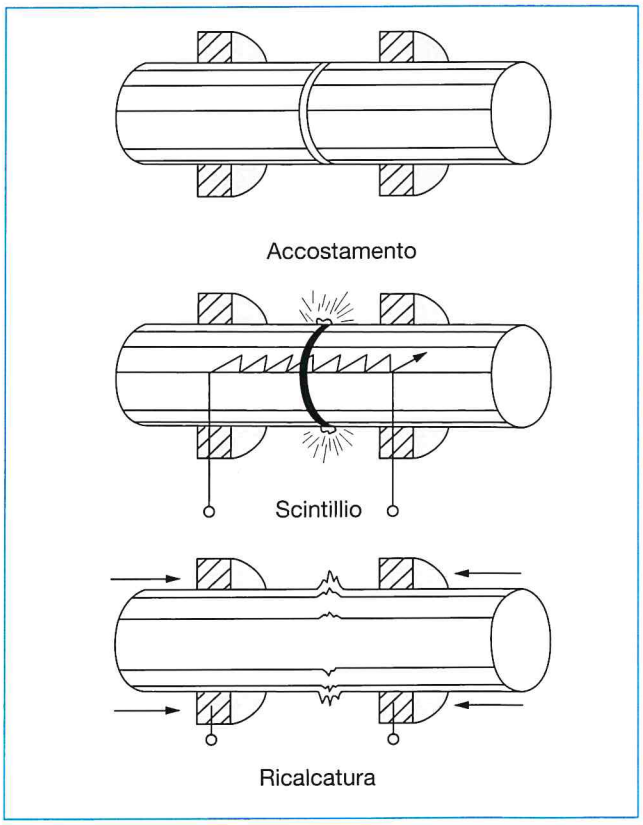


FIGURA **60**. Schema delle fasi di saldatura elettrica di testa per scintillio.

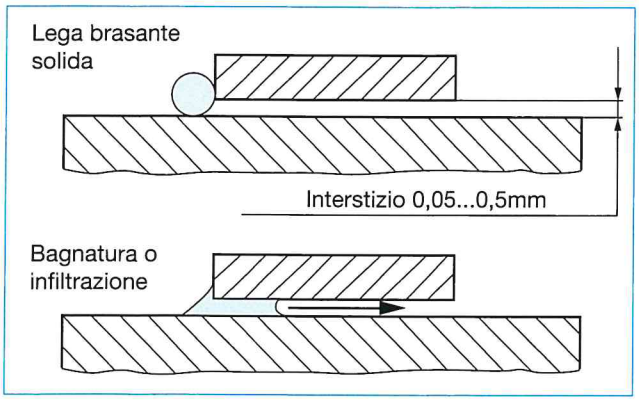


FIGURA **68**. Effetto capillare della lega brasante durante la fusione.

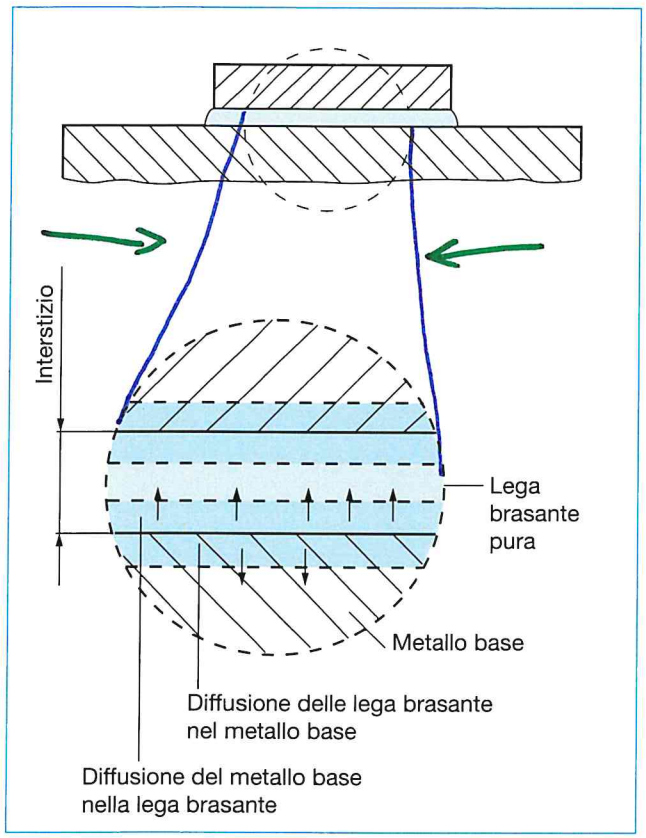


FIGURA **69**. Compenetrazione a livello atomico tra metallo base e lega brasante.

La brasatura sfrutta il fenomeno della bagnabilità e capillarità del materiale d'apporto, che permette al metallo d'apporto fuso di espandersi sulla superficie del metallo base (FIGURE **68** e **69**).

OSSERVAZIONE A differenza della saldobrasatura, facendo uso di metalli con temperature di fusione più bassi, è possibile sfruttare il fenomeno dell'infiltrazione capillare. Questo fa sì che il liquido penetri all'interno del giunto.

Fasi della brasatura

- Pulizia accurata delle due superfici da unire;
- accostamento dei due pezzi, lasciando un interstizio di solo qualche centesimo di millimetro;
- fusione del metallo d'apporto e riscaldamento dei giunti da collegare;
- il metallo d'apporto si infiltra nella piccola fessura per effetto capillare;
- la lega brasante si diffonde e penetra nella struttura del metallo di base. Ne scioglie uno strato, formando una lega localizzata di transizione a composizione variabile, per la progressiva compenetrazione atomica;
- la solidificazione realizza la giunzione.

Per avere un buon effetto capillare è necessario che:

- la fessura sia compresa tra 0,05 e 0,5 mm. Non di più, altrimenti la pressione capillare non è sufficiente a spingere la lega e riempire lo spazio tra le due superfici;
- la temperatura della lega brasante sia compresa nell'intervallo di fusione della stessa. Se è inferiore al punto di fusione minimo non è garantita la bagnabilità, mentre una temperatura di lavoro superiore al punto di fusione massimo potrebbe causare indesiderate deformazioni dei pezzi, per il loro eccessivo riscaldamento, o portare alla bruciatura della lega stessa.

Tutto deve essere a norma di legge e delle indicazioni contenute nei manuali delle apparecchiature per le procedure d'uso e manutenzione.

Effetti sul corpo umano

Se il corpo umano viene a contatto con parti metalliche sotto tensione o con conduttori scoperti e spine difettose, oppure con due conduttori, le conseguenze possono essere gravi.

9 Normativa antincendio

La FIGURA **6** raccoglie i cartelli (in rosso con i pittogrammi in bianco) per le attrezzature antincendio.

Anche l'ultima legge *milleproroghe* recepisce la normativa antincendio relativa alla messa in atto delle regole tecniche e agli adeguamenti strutturali e impiantistici, quali la realizzazione di scale protette, adeguamento delle vie d'esodo per la lunghezza dei percorsi, costruzione di scale esterne, compartimentazione dei corridoi, posti fissi di mezzi di estinzione e unità di pronto impiego. Le uscite dei luoghi di lavoro devono essere ampie, sempre illuminate, con maniglie antipanico, mentre gli arredi non devono essere infiammabili, così come i materiali suscettibili di reagire pericolosamente tra loro devono essere stoccati in locali sufficientemente aerati, distanziati e isolati gli uni dagli altri.

Procedura di pronto intervento

In generale, deve essere approntata una procedura di pronto intervento assieme ai vigili del fuoco, l'individuazione dei luoghi di possibili inneschi di incendio e i criteri atti a prevenirli.

Vige l'obbligo di controllo periodico e la manutenzione dei mezzi antincendio, così come l'istituzione di un servizio interno di sicurezza permanente.

FIGURA **6**. Forma quadrata o rettangolare, colore rosso e bianco: cartelli per le attrezzature antincendio.

L'area sottesa dalla curva rappresenta la totalità dei valori del campione. L'intervallo $-s$ e $+s$ contiene il 68,27% di tutti i valori. Nell'ambito industriale tutti i valori (il 99,994%) devono trovarsi all'interno del campo di tolleranza prestabilito.

1.2 Esercizio 2

Determinare i parametri R e s del campione rappresentato in TABELLA 2.

Valori	x_i	Frequenza	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(x_i - \bar{x})^2 \cdot n_i$
x_1	63	1	-13 ~~+10~~	169	169
x_2	66	2	-10 ~~+13~~	100	200
x_3	68	3	-8	64	192
x_4	78	5	2	4	20
x_5	86	3	10	100	300
x_6	93	1	17	289	289
Totale					1170

TABELLA 2. Calcolo dello scarto standard s.

Soluzione. R = 30; s = 9,14

2 Tornitura

2.1 Esercizio 1

Deve essere finito un albero di acciaio dolce con un tornio che non lavora con una velocità di taglio v_c costante. Il diametro iniziale è $d = 40$ mm. Dalle tabelle a nostra disposizione troviamo la velocità di taglio massima orientativa, consigliata per un acciaio dolce di durezza 110 HB, usando un inserto in metallo duro rivestito: $v_c = 225$ m/min. Sia dell'80% lo sfruttamento dell'utensile, quindi $v_c = 0{,}8 \cdot 225 = 180$ m/min.

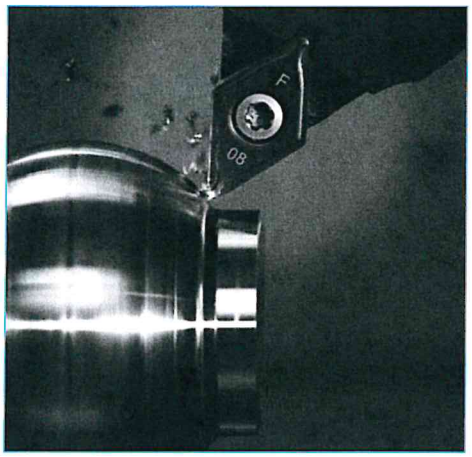


FIGURA 3. Tornitura.

Si può quindi calcolare il numero di giri da impartire al tornio:

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot d} = \frac{220 \cdot \frac{m}{min}}{\pi \cdot 0{,}075\ m} = 934\ g/min$$

Osservazioni e considerazioni finali

Dopo aver provato a lavorare con maggiori velocità di taglio è risultata una durata più ridotta, mentre con velocità minori non si sono riscontrati sensibili aumenti della durata del tagliente. La scelta operata è risultata quindi la più soddisfacente.

3 Foratura

Calcolo dell'area del truciolo asportata a ogni giro dell'utensile (FIGURA **6**). Lo spessore del truciolo h dipende dall'avanzamento f e dall'angolo dei taglienti φ. Dalla FIGURA **6**, essendo $f_z = f/2$ avanzamento per dente e per il triangolo rettangolo formato dall'angolo $\frac{\varphi}{2}$ tra f_z (ipotenusa) e h (base), si ha: $h = f_z \cdot \sin\frac{\varphi}{2}$;

essendo A l'area del truciolo asportata a ogni giro del tagliente si ha:

$A = \frac{d}{2} \cdot f_z$ e $A = h \cdot b = f_z \cdot \sin\frac{\varphi}{2} \cdot b$ quindi:

$\frac{d}{2} \cdot f_z = f_z \cdot \sin\frac{\varphi}{2} \cdot b$; da cui: $b = \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{\sin\frac{\varphi}{2}}$;

$A = h \cdot b$; sostituendo $A = \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{\sin\frac{\varphi}{2}} \cdot f_z \cdot \sin\frac{\varphi}{2} = \frac{d \cdot f_z}{2} = \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{2}$ da cui:

$A = \frac{d \cdot f}{4}\ mm^2$

L'area asportata ad ogni giro da entrambi i taglienti è:

$2 \cdot A = \frac{d \cdot f}{2}\ mm^2$

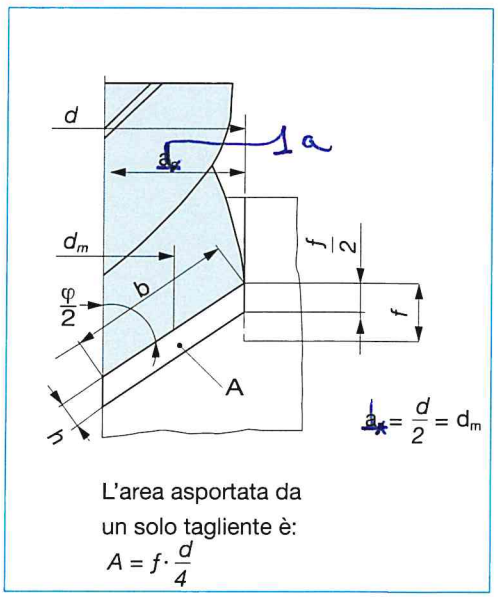


FIGURA **6**. Grandezze di truciolatura.

3.1 Esercizio 1

Sia da forare una piastra in lega di alluminio. Determinare la sezione A del truciolo, lo spessore h, la potenza di taglio P_c e la potenza del trapano (η=0,8).

SUGGERIMENTO Per leghe leggere l'angolo dei taglienti $\varphi = 130°$ e la forza specifica per materiali non ferrosi $K_s = [4{,}8 \div 6]\ R_m$. La resistenza delle leghe di alluminio varia da 95 N/mm^2 a oltre 190 N/mm^2 per le leghe AlMn, fino a 350 N/mm^2 per leghe in AlMg e fino a oltre 490 N/mm^2 per leghe tipo AlZn5Mg3Cu.

4 Fresatura frontale

La fresatura frontale liscia e migliora la superficie lavorata. Anche nella fresatura la scelta della velocità influenza la durata dell'utensile e dipende dal materiale e dai parametri di taglio. Si fa perciò uso delle numerose tabelle che ogni costruttore di utensile fornisce. Per la sgrossatura la scelta della profondità di passata dipende dalla potenza della macchina e dalla sua stabilità, mentre per la finitura $a_p = 0{,}2 \div 0{,}3$ mm. Il numero di giri si calcola con la solita formula, nota la v_c e il diametro della fresa. L'avanzamento f e la velocità di avanzamento v_f si ricavano invece dall'avanzamento f_z per dente, dal numero dei denti z e da n.

4.1 Esercizio 1

Si deve spianare dei lardoni di acciaio bonificato 36CrMn5 con una fresa a $z = 8$ taglienti e diametro $d = 125$ mm. Determinare i parametri di taglio.

Soluzione

Dalla TABELLA **3** (pagina 95 Capitolo 5 Fresatura), con un utensile in acciaio rapido rivestito risulta una $v_c = 40$ m/min. Supponiamo di avere a disposizione frese con inserti in metallo duro rivestiti. Dalle tabelle dei costruttori è consigliata la $v_c = 80$ m/min. Scegliamo quindi l'avanzamento per dente $f_z = 0{,}1$ mm per la fase con inserti in metallo duro rivestiti e calcoliamo

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot d} = \frac{80 \cdot \frac{\text{m}}{\text{min}}}{\pi \cdot 0{,}125 \text{ m}} = 203{,}7 \text{ g/min} = 204 \text{ g/min}$$

per la fresa adottata

L'avanzamento $f = f_z \cdot z = 0{,}1 \cdot 8 = 0{,}8$ mm

4.2 Esercizio 2

Deve essere fresata una superficie di larghezza $b = 55$ mm in acciaio legato 16 Mn Cr5 con $v_c = 80$ m/min e avanzamento a dente $f_z = 0{,}1$ mm. La profondità di passata per la sgrossatura $a_p = 5$ mm. Determinare h, A, F_c per ogni dente.

Soluzione

Data la larghezza $b = 55$ mm da fresare, ed essendo $b = 0{,}6 \cdot d$ si ha $d = b/0{,}6 = 91{,}6 = 100$ mm scegliamo una fresa con 6 denti e $d = 100$ mm.
Lo spessore del truciolo $h \approx f_z = 0{,}1$ mm
La sezione del truciolo $A = a_p \cdot f_z = 5 \cdot 0{,}1 = 0{,}5 \text{ mm}^2$
Dalla TABELLA **4** ricaviamo $k_c = 4965 \text{ N/mm}^2$ per $h = 0{,}1$; dalla tabella relativa ai coefficienti correttivi ricaviamo $C = 1{,}1$ per $v_c = 50 \div 80$ m/min ($C = = 1{,}0$ per $80 < v_c < 400$ m/min);
$F_c = k_c \cdot A \cdot C = 4965 \text{ N/mm}^2 \cdot 0{,}5 \text{ mm}^2 \cdot 1{,}1 = 2730$ N

solidificati e quindi: M_L = 33,3% di 11 kg = **3,67 kg**; M_S = **7,33 kg**;

Si poteva anche determinare graficamente:
scala a T_1: $\frac{11\,\text{kg}}{30\,\text{mm}}$ = ~~0,36~~ 0,366 kg/mm; ossia ~~0,36~~ 0,366 = 1 mm; da cui:
massa grani: 20 mm · ~~0,36~~ 0,366 kg/mm ≈ ~~7,2~~ 7,3 kg;
massa liquida: 10 mm · 0,366 kg/mm ≈ 3,66 kg;
massa totale della lega ≈ 11,00 kg;

b) Calcoliamo il contenuto in kg di carbonio nella massa liquida e in quella solida a T_1.
Dal grafico abbiamo calcolato precedentemente la massa liquida
$M_L \approx 3{,}6$ kg ~~M_L = 3,6 kg~~ a T_1 e la massa solida M_S = 7,2 kg a T_1. 7,3
Dal diagramma in FIGURA **8** ricaviamo che nella massa liquida: C = 1,5% da cui 3,6 kg · 1,5% ≈ 0,054 kg di carbonio.
Nella massa solida: C = 0,5%
da cui ~~7,2~~ 7,3 kg · 0,5%; ≈ 0,037 kg di carbonio.
Pertanto il contenuto di carbonio nella massa liquida a T_1 è pari a circa 0,054 kg e nella massa solida è circa 0,037 kg.
In totale ≈ 0,091 kg di carbonio (0,091 – 0,054 = 0,037 kg di C).

8 Diagramma strutturale

8.1 Esercizio 1

Determinare la quantità in percentuale di cementite (Cm) e ferrite (F) in una lega eutettoidica di acciaio a temperatura ambiente

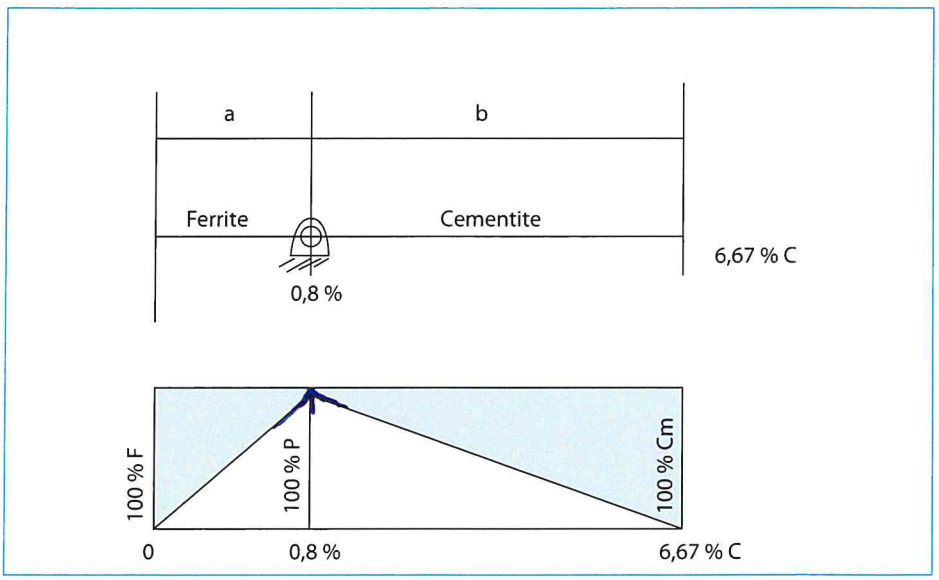


FIGURA **9**. Diagramma strutturale delle leghe Fe-C.

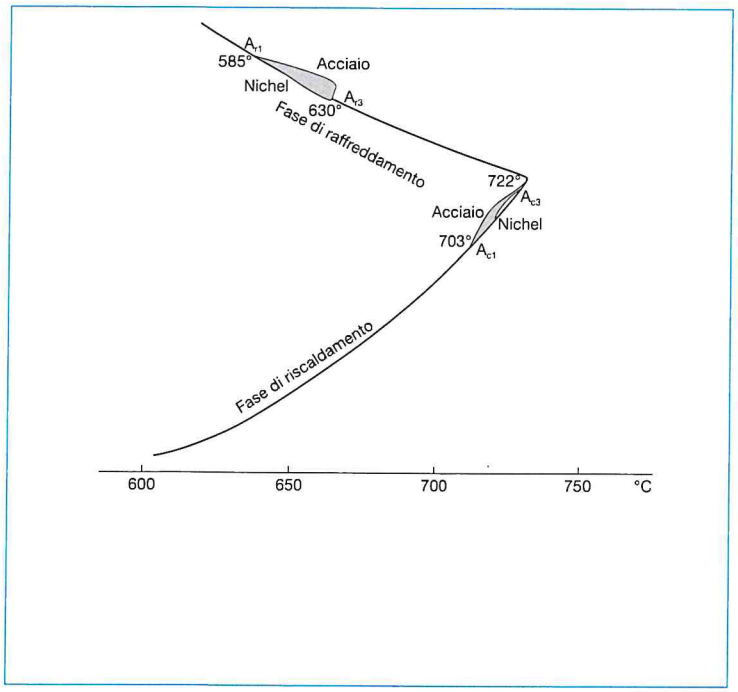


FIGURA **7**. Curve differenziali di riscaldamento e di raffreddamento di acciaio e nichel.

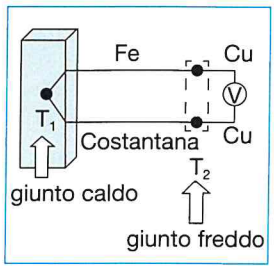
Procedimento

Si alza la temperatura del forno riscaldando i due pezzi. Il misuratore di temperatura 5 ci indica come sale la temperatura e il misuratore 4 resta immobile sullo zero e non segna alcun passaggio di corrente.

Ciò è dovuto al fatto che le due f.e.m. (generate dalle due **termocoppie** per l'innalzarsi della temperatura) sono uguali e contrarie, essendo uguali le temperature dei due pezzi. A 703 °C l'indice del misuratore differenziale 4 ha uno spostamento. La curva di riscaldamento dell'acciaio, tracciata dall'apparecchio, si discosta da quella del nichel, che invece continua ininterrottamente a salire (FIGURA **7**).

TERMOCOPPIE

Ai capi di un circuito formato da due conduttori diversi, sottoposti a due diverse temperature, si instaura una differenza di potenziale (vedi figura sottostante). L'effetto si manifesta anche con un solo tipo di metallo. In pratica se prendo un filo metallico avente due temperature differenti alle sue estremità, viene a formarsi una forza elettromotrice. Questo fenomeno, noto come effetto Seebeck, è sfruttato dalle termocoppie, che fungono quindi da sensori della temperatura.



Curve differenziali al riscaldamento e al raffreddamento

A 722 °C l'acciaio riprende a riscaldarsi regolarmente come il nichel. Dopo circa 5 minuti abbiamo spento il forno e comincia la fase di raffreddamento senza differenze per i due pezzi. A 630 °C la curva di raffreddamento dell'acciaio ha di nuovo un arresto, mentre quella del nichel continua la sua fase di raffreddamento regolarmente. A 585 °C l'acciaio riprende definitivamente a raffreddarsi in modo analogo al nichel.

Descrizione del fenomeno

A 703 °C l'indice del misuratore differenziale 4 ha uno spostamento, perché mentre la temperatura del nichel continua a salire, quella dell'acciaio comincia ad arrestarsi a seguito dell'inizio della sua trasformazione allotropica. Quando a 722 °C la trasformazione è finita, i due sensori non rilevano più differenze di temperatura e le due f.e.m. (forza elettromotrice) sono di nuovo uguali. L'indice del galvanometro differenziale 4 ritorna allo zero, perché non registra più alcuna differenza tra le temperature dei due pezzi. Al raffreddamento si ripete lo stesso fenomeno a temperature più basse.

Considerazioni

Le temperature trovate sono quelle *critiche*, che ci rivelano l'inizio e la fine della trasformazione allotropica dell'acciaio. Durante tale trasformazione infatti l'acciaio non continua a riscaldarsi come l'altro provino in nichel, perché utilizza l'apporto di calore come energia necessaria al cambiamento della sua struttura atomica. Le celle elementari da c.c.c. (cella cubica a corpo centrato) passano a c.f.c. (cella cubica a facce centrate) Al raffreddamento il Fe-γ passa a Fe-α rilasciando calore, calmierando in questo modo il suo raffreddamento. Da notare anche che la trasformazione allotropica al raffreddamento non avviene

alla stessa temperatura avvenuta al riscaldamento. Ciò è dovuto al ritardo (isteresi) per l'inerzia termodinamica al cambiamento da una condizione di equilibrio ad un'altra. Tale differenza diminuisce, tanto più la variazione di temperatura procede lentamente. Il pezzo campione (il nichel) non ha subito trasformazioni allotropiche in quanto metallo puro.

2.2 Prova Jominy

Effettuare la prova Jominy su una provetta di forma cilindrica e unificata del tipo normale (diametro 25 mm, lunghezza 100 mm), secondo la norma UNI 3150.

Apparecchiature e mezzi

- Disponibilità dell'apparecchio per la prova Jominy;
- forno e contenitore con limatura di ghisa e coperchio;
- supporto per le misurazioni della durezza;
- durometro;
- provetta (esempio: in zolfo acciaio da bonifica C60E, dove E sta a significare che il contenuto in S non può superare la quantità prescritta: 0,035%). La provetta deve essere di acciaio a bassa o media temprabilità. Se la provetta è di temprabilità molto elevata, prende la tempra al cuore, con provette con diametro di 19 mm, anche solo raffreddandosi all'aria e la prova non è praticabile. La provetta deve essere stata ricavata da un saggio con un sovrametallo di almeno 3 mm (dopo la lavorazione all'utensile la superficie non deve risultare decarburata) e deve essere stata sottoposta a ricottura di normalizzazione a 850÷900 °C per 30 min.

Procedimento

Si riscalda la provetta in un **forno a muffola** alla temperatura di tempra: 850÷900 °C. La temperatura più alta è per gli acciai da nitrurazione, come 42 CrAlMo7 o 38 CrAlMo 7. Permanenza a questa temperatura per 30 min. Si raffredda con il getto d'acqua. Si ricavano due superfici opposte e longitudinali asportando con la mola uno spessore di 0,4÷0,5 mm, evitando che si riscaldino, per non alterare la struttura cristallina. Su idoneo supporto si eseguono le misure di durezza HRC (o HV) su entrambi le superfici e si riportano i valori medi di queste misure su una scheda o modulo predisposto dalle norme UNI. La prima impronta deve essere a 1,5 mm dall'estremità raffreddata, la 2° a 1,5 mm dalla 1° e le successive a 2 mm fino a 15 mm dall'estremità raffreddata. Da qui ogni 5 mm. Unendo i vari punti ottenuti otteniamo la curva di temprabilità del nostro acciaio con in ascissa le distanze dall'estremità raffreddata ed in ordinata i valori delle durezze (FIGURA **8**).

FORNO A MUFFOLA
Come dice il nome, la camera interna è di materiale refrattario (come corindone, carborundum, ecc.). Il riscaldamento è effettuato mediante resistenze elettriche oppure, ad esempio, con pareti radianti a metano. A differenza dei forni a crogiolo, riempiti con un liquido (metallo, sale ecc.), i forni a muffola sono ad atmosfera controllata, per esempio, neutra con miscele di vari gas o semplicemente ad aria.

Considerazioni

La curva Jominy è la curva media, ovvero è ottenuta congiungendo le medie dei valori delle durezze misurate sulle due fascette opposte della provetta. Si