

13 Temprabilità degli acciai

Distanze Jominy per vari tipi di acciai

Si riportano in **tabella 1** varie leghe suddivise a seconda dell'utilizzazione prevista (bonifica, cementazione, per molle); a ognuna corrisponde una determinata distanza Jominy.

Acciai da bonifica Martensite 50% Durezza HRC 42 ÷ 50		Acciai da cementazione Martensite 70% Durezza HRC 32 ÷ 35		Acciai per molle Martensite 80% Durezza HRC 50 ÷ 55	
Sigla UNI	Distanza Jominy (mm)	Sigla UNI	Distanza Jominy (mm)	Sigla UNI	Distanza Jominy (mm)
40 Cr 4	15	16 MnCr 5	8	50 Si 7	5
35 CrMn 5	25	20 MnCr 5	14	55 Si 5	9
25 CrMo 4	10	18 CrMo 4	8	52 SiCrNi 5	24
30 CrMo 4	12	12 NiCr 3	4	50 CrV 4	15
35 CrMo 4	20	16 NiCr 11	12		
40 CrMo 4	28	16 CrNi 4	10		
40 NiCrMo 2	18	20 CrNi 4	14		
38 NiCrMo 4	28	20 NiCrMo 2	7		
40 NiOrMo 7	70	18 NiOrMo 5	16		
30 NiCrMo 12	70	18 NiCrMo 7	10		
35 NiCrMo 15	70	16 NiCrMo 12	50		

Tabella 1

Distanze Jominy per varie leghe.

Comportamento alla tempra di acciai con uguale contenuto di carbonio

Vogliamo confrontare il comportamento alla tempra di acciai di uguale contenuto in carbonio (nell'es. $C = 0,45\%$) ma con elementi aggiunti in quantità diverse.

Infatti C 45 è un acciaio al carbonio (non possiede altri elementi in lega); l'acciaio 45 CrMoV 67 è un acciaio debolmente legato; l'acciaio X 45 NiCrMo 4 è un acciaio fortemente legato al nichel. Le composizioni dei tre acciai presi per esempio sono indicate nella **tabella 2**.

Come si vede dai diagrammi CCT sui quali sono disegnate le curve di raffreddamento al cuore e in superficie per un tondo di diametro 100 mm, le curve CCT si spostano verso destra all'aumentare degli elementi aggiunti, cosa che permette di utilizzare mezzi raffreddanti meno energetici; infatti, come si è già detto, la velocità critica v_s aumenta (**fig. 1**). Mezzi raffreddanti meno energici inducono nel pezzo tensioni minori e avvicinano l'andamento delle curve di raffreddamento al cuore e in superficie.

Curve a U e diametro critico

Se costruiamo un diagramma come quello in **figura 2**, che porta in ascissa le distanze dall'asse di un tondo di acciaio e in ordinata le durezze nei punti corrispondenti, si hanno curve caratteristiche, che per il loro andamento sono chiamate curve a U (**figg. 2a e b**). Infatti, come si è visto, al centro si otterranno durezze minori che in superficie e le differenze saranno tanto più grandi quanto più energico è il mezzo raffreddante e quanto più bassa è la temprabilità dell'acciaio.

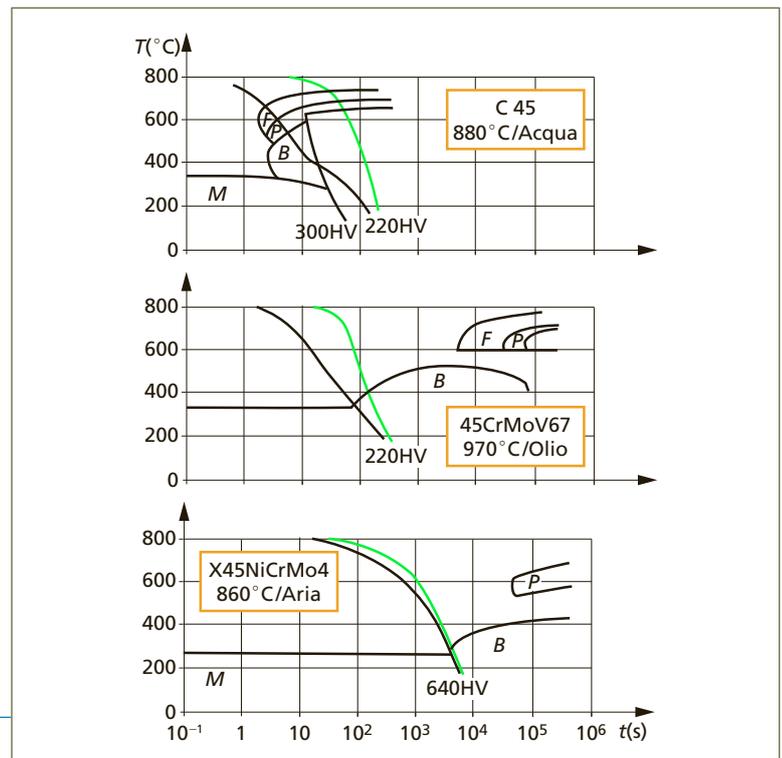
Figura 1

Confronto del comportamento alla tempra di tre acciai con pari tenore di carbonio.

Tabella 2

Composizione dei tre acciai citati.

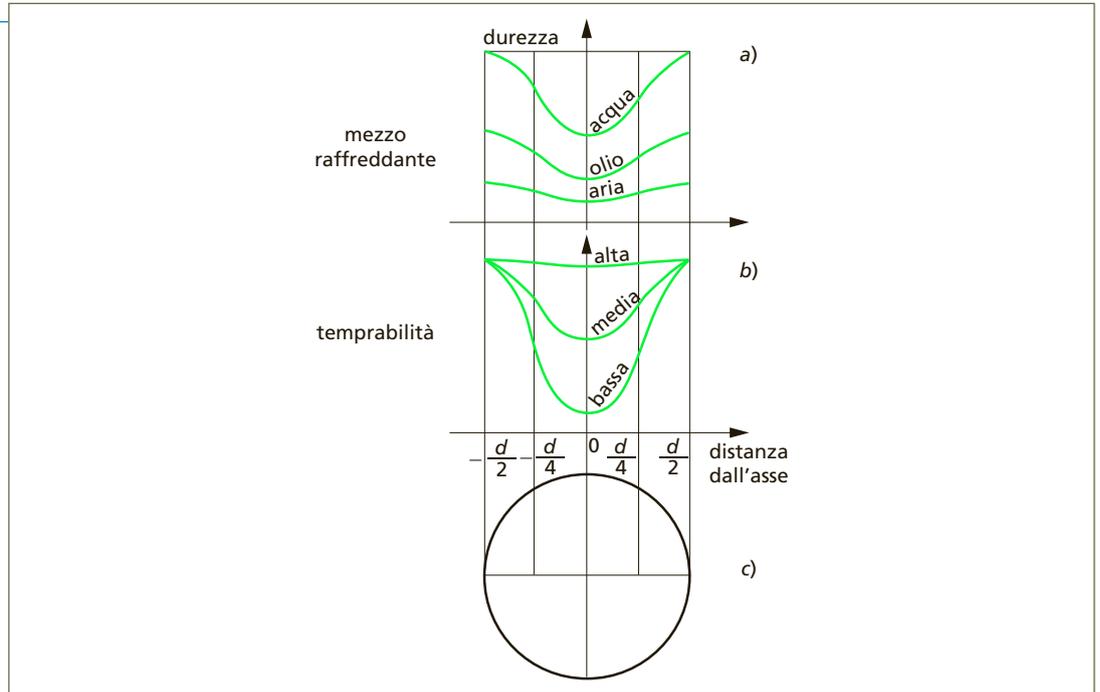
Sigla	% C	% Cr	% Ni	% Mo	% V
C 45	0,45	—	—	—	—
45 CrMoV 67	0,45	1,45	—	0,75	0,30
X 45 NiCrMo 4	0,45	1,35	4,05	0,25	—



Si definisce diametro critico il diametro massimo di un tondo in acciaio che al cuore possenga la struttura martensitica stabilita a seconda della utilizzazione prevista (per es. 50% di martensite per gli acciai da bonifica) (fig. 2c).

Figura 2

Curve a U e diametro critico.

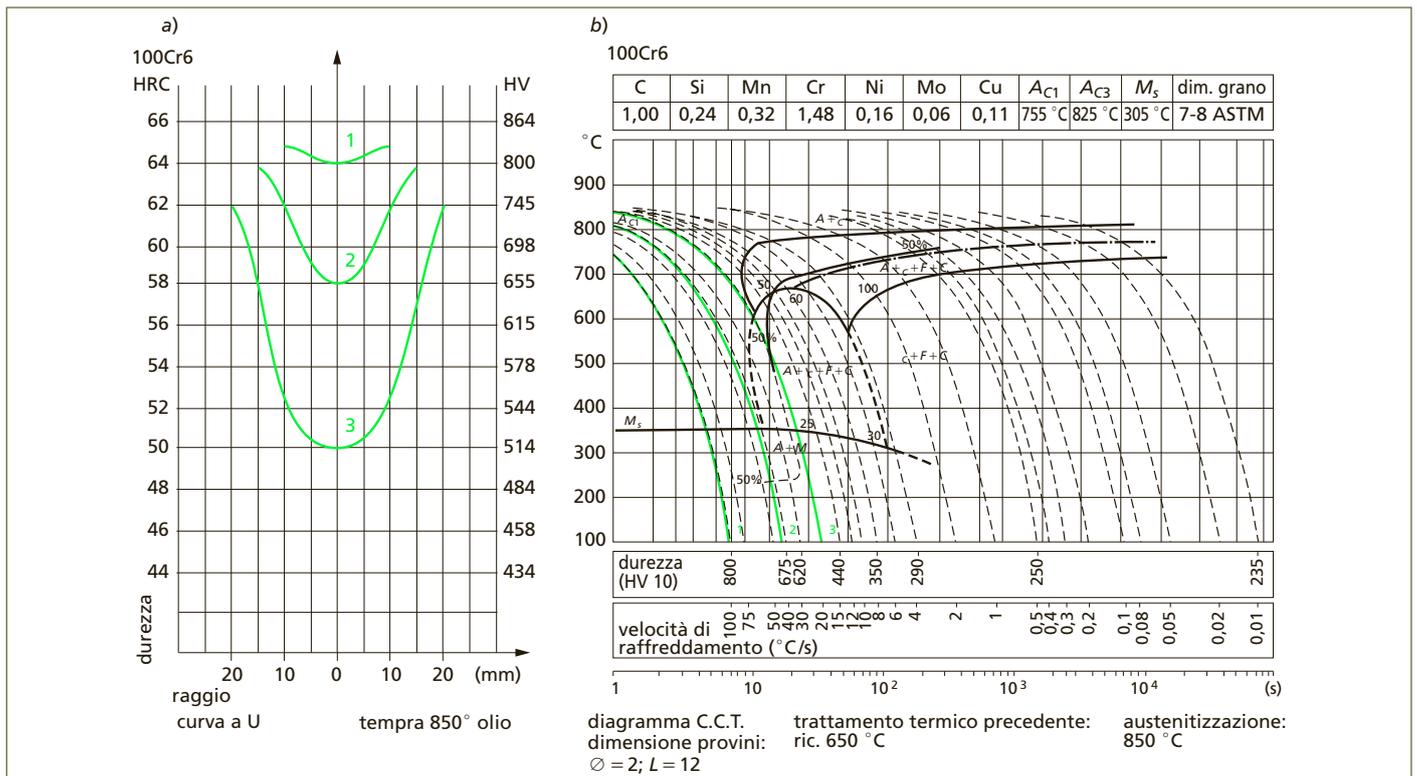


Esempio reale di curve a U per un acciaio ipereutettoide

Vediamo un esempio di curve a U per l'acciaio ipereutettoide 100 Cr 6 (acciaio per cuscinetti). Sul diagramma in figura 3a sono tracciate tre curve a U, rispettivamente per un tondo di 20, 30 e 40 mm di diametro, temperato in olio a partire dalla temperatura di 850 °C. Sul diametro di 40 mm al cuore siamo a una percentuale di martensite inferiore al 50%, come si può vedere sul diagramma CCT in figura 3b, nel quale sono tracciate le curve di raffreddamento per il cuore dei tre toni considerati.

Figura 3

a) Curve a U e b) di raffreddamento per l'acciaio 100 Cr 6.



Relazione tra distanze Jominy e diametri massimi dei tondi in acciaio temprato

Tra le distanze Jominy e i diametri massimi di tondi temprati esiste una relazione diretta che è un funzione solo del tipo di mezzo raffreddante utilizzato.

Questa corrispondenza può essere data direttamente dalle case produttrici degli acciai e riportata sul diagramma della prova Jominy, come nell'esempio in **figura 4**, oppure la si ricostruisce utilizzando opportune curve, dette curve di Lamont.

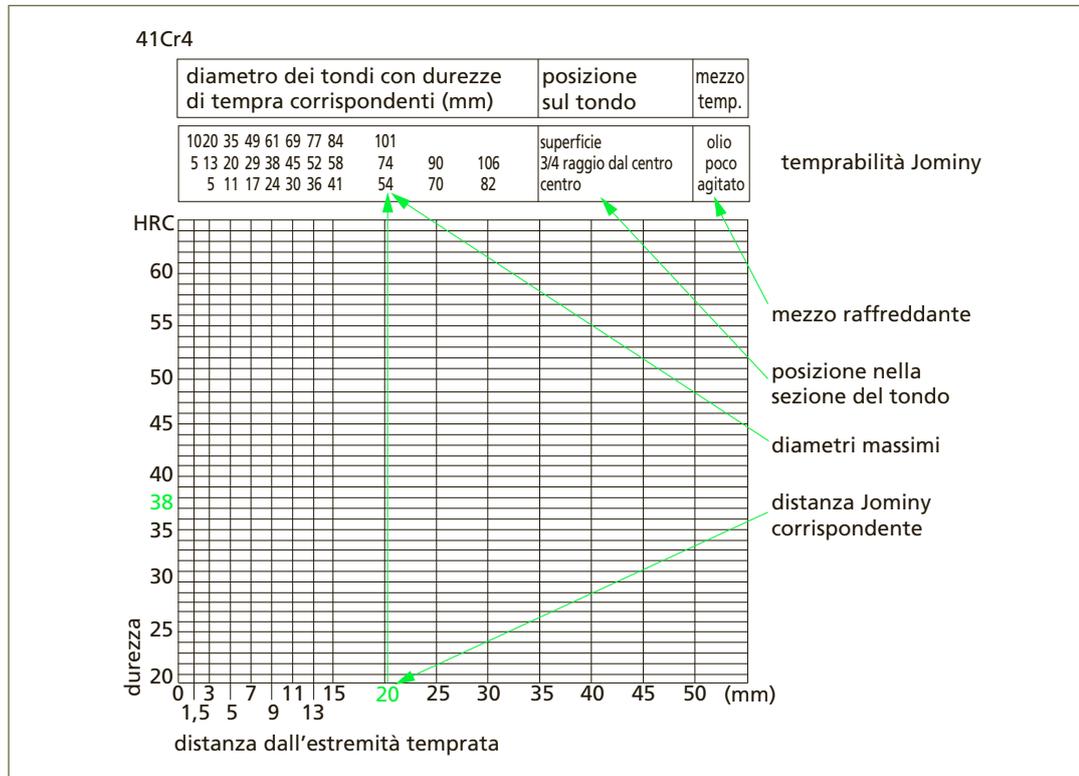


Figura 4

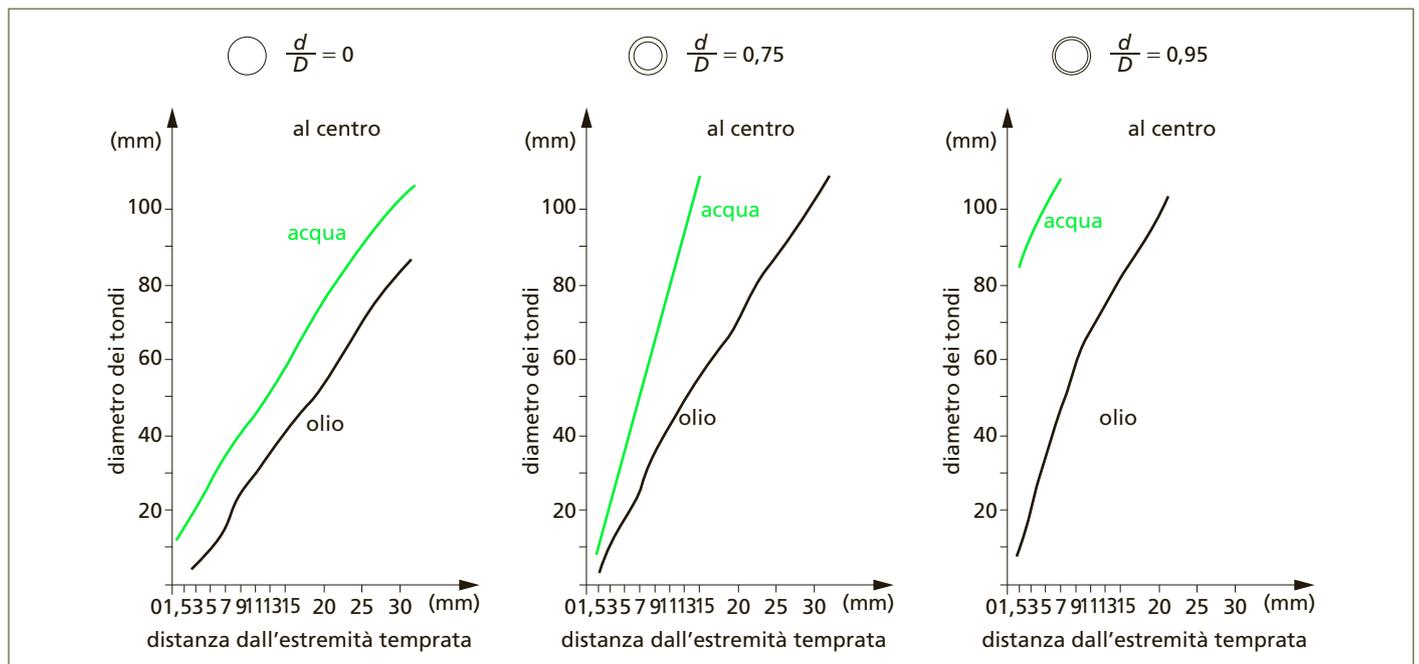
Relazione tra distanza Jominy e diametro massimo dei tondi temprati.

Curve di Lamont

Le curve di Lamont, come quelle in **figura 5**, danno, per vari tipi di mezzi raffreddanti e per le varie posizioni sulla sezione del tondo, il diametro corrispondente a una determinata distanza della prova Jominy.

Figura 5

Curve di Lamont.



Esempio di costruzione delle curve a U di un acciaio utilizzando le curve di Lamont e la curva Jominy

Dalle curve di Lamont e dalla curva Jominy di un acciaio è possibile – senza effettuare lunghe prove sperimentali – tracciare le corrispondenti curve a U.

Infatti, basta riportare le curve di Lamont per un dato raffreddamento (in figura tempra in olio) sul diagramma della temprabilità Jominy, come nell'esempio in **figura 6a** (acciaio 41 Cr 4).

In relazione al diametro del tondo considerato (in figura tondo da 50 e da 75 mm di diametro) si determina la distanza Jominy e sulla base di questa la durezza corrispondente.

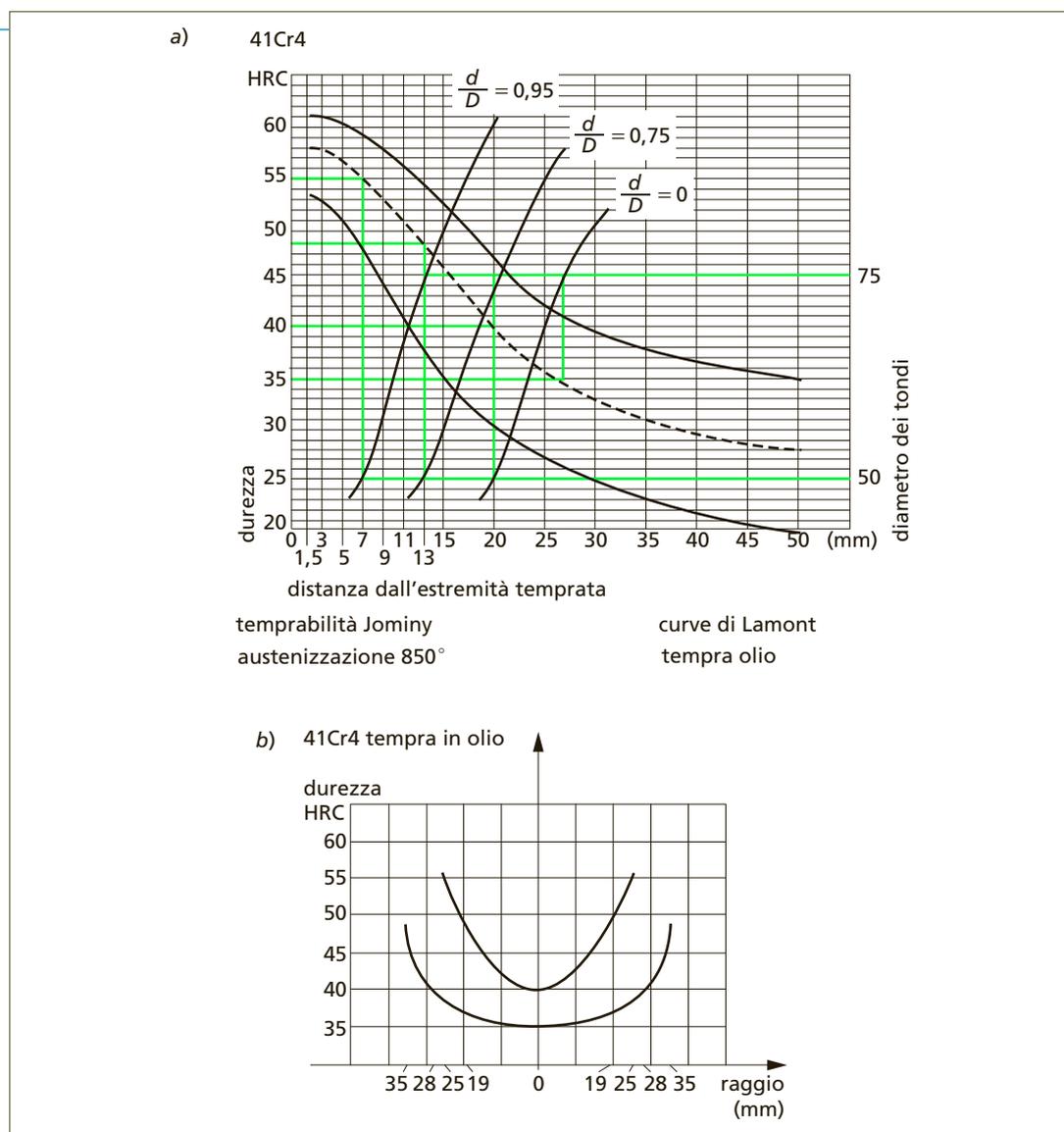
Infatti, se ci riferiamo al tondo da 50 mm, vediamo che un punto alla superficie ($d/D = 0,95$) ha una durezza equivalente al punto con distanza Jominy 7 mm dalla estremità temprata e che questo punto possiede per l'acciaio 41 Cr 4 una durezza di 55 HRC.

Analogamente, sempre per lo stesso tondo, ma al cuore ($d/D = 0$), si avrà: distanza Jominy 20 mm e durezza corrispondente 40 HRC.

Si riportano i dati così ricavati sul grafico distanze dall'asse-durezze in **figura 6b**, costruendo per il tondo 50 mm la relativa curva a U.

Nella stessa maniera si opera per l'altro diametro (75 mm).

Figura 6
Costruzione della curva a U per l'acciaio 41 Cr 4.



Caratteristiche dei mezzi raffreddanti

Si riportano in **tabella 3** le velocità medie di raffreddamento ottenibili con vari mezzi di tempra nell'intervallo tra 720 e 550°C.

Le varie velocità sono espresse da un indice che fa riferimento alla velocità di raffreddamento dell'acqua a 20°C, considerata di valore 1.

Le condizioni di tempra sono: sfera di nichel-cromo da 4 mm di diametro, temprato da 860 °C (Wever).

Mezzo di tempra	Velocità di raffreddamento
Soluzione acquosa di cloruro di litio (10%)	2,07
Soluzione acquosa di cloruro sodico (10%)	1,96
Soluzione acquosa di carbonato sodico (10%)	1,38
Soluzione acquosa di acido solforico (10%)	1,22
Acqua a 0 °C	1,06
Acqua a 20 °C	1,00
Lega stagno-cadmio (30-70) a 180 °C	0,77
Acqua a 25 °C	0,72
Olio di semi di ravizzone	0,30
Olio P20	0,23
Olio 20.204	0,20
Acqua a 50 °C	0,17
Olio 14.530	0,14
Emulsione acquosa di olio (10%)	0,11
Acqua saponata	0,077
Tetracloruro di carbonio	0,055
Acqua a 75 °C	0,047
Acqua a 100 °C	0,044
Aria liquida	0,039
Aria	0,028
Vuoto	0,011

Tabella 3

Velocità media di raffreddamento di alcune sostanze.

Indice di severità di tempra (H) dei mezzi raffreddanti e curve di Grossmann

L'efficacia di un mezzo raffreddante si misura anche con l'indice H (severità di tempra), che si ricava confrontando le curve sperimentali che permettono la determinazione diretta del diametro critico con una serie di curve tipo (curve di Grossmann).

In **figura 7a** è illustrata in sezione una provetta cilindrica.

Se D è il diametro esterno della provetta e du è il diametro della parte non temprata (< 50% di martensite), il diametro critico D_{CR} corrisponde al rapporto:

$$\frac{du}{D} = 0.$$

In **figura 7b** è riprodotta una curva di tempra in olio per varie provette cilindriche. Come si può rilevare dal diagramma, per il rapporto:

$$\frac{du}{D} = 0$$

si ha:

$$D_{CR} = 32.$$

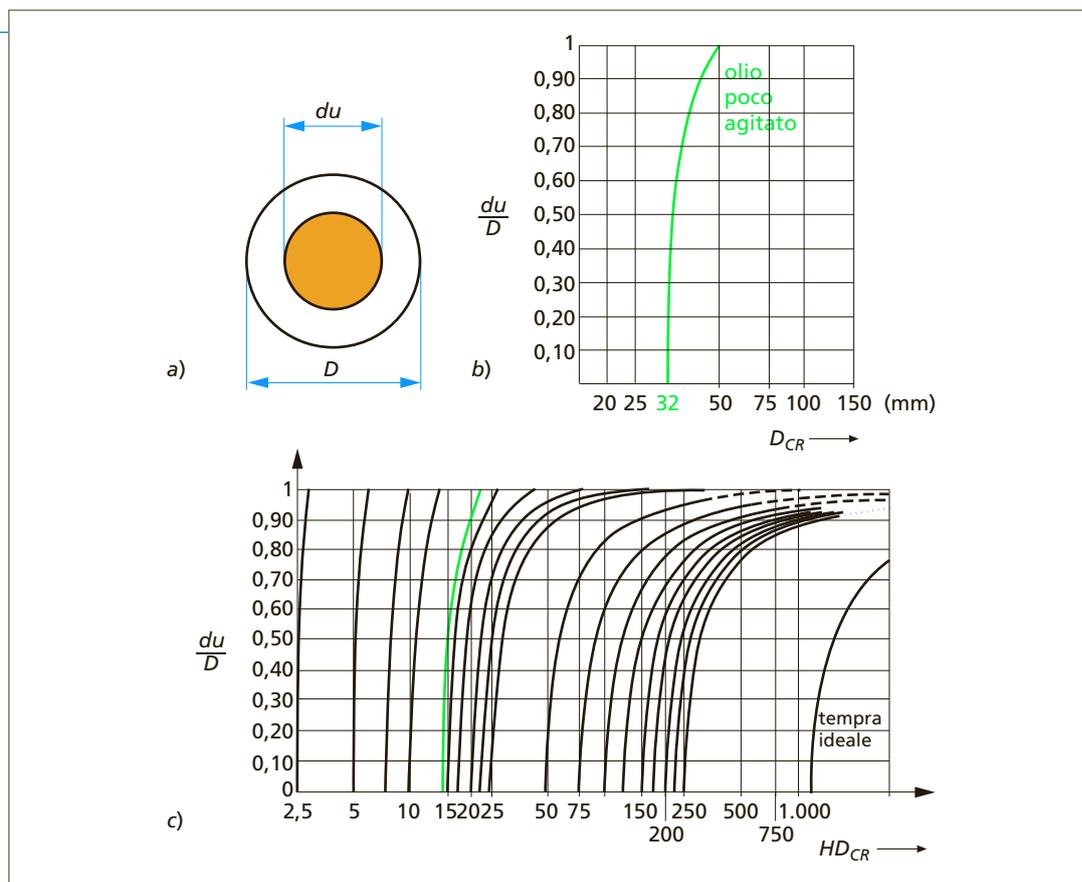
Confrontando la curva in **figura 7b** con le curve di Grossmann riprodotte in **figura 7c**, si sceglie fra queste curve quella che meglio si avvicina a quella sperimentale (nell'es. la curva di valore $H \cdot D_{CR} = 12,5$).

L'indice di severità di tempra dell'olio utilizzato sarà quindi:

$$H = \frac{H \cdot D_{CR}}{D_{CR}} = \frac{12,5}{32} \cong 0,39.$$

Figura 7

Indice di severità di tempra.



Indici di severità di tempra (H) di alcuni mezzi raffreddanti

Si riportano in **tabella 4** gli indici H di severità di tempra per alcuni dei più comuni mezzi raffreddanti.

Tabella 4

Indice di severità di tempra di alcune sostanze.

	Aria	Olio	Acqua	Soluzione di sale ($\approx 10\%$)
Senza circolazione del liquido e senza agitazione del pezzo	0,02	0,25 ÷ 0,30	0,9 ÷ 1,0	2
Leggera agitazione o circolazione		0,30 ÷ 0,35	1,0 ÷ 1,1	2 ÷ 2,2
Circolazione moderata		0,35 ÷ 0,40	1,2 ÷ 1,3	
Buona circolazione		0,40 ÷ 0,50	1,4 ÷ 1,5	
Energica circolazione	0,05	0,50 ÷ 0,80	1,6 ÷ 2,0	
Violenta circolazione		0,80 ÷ 1,10	4	5