Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
A.A. 2019-2020

Corso di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale

Corso di Chimica e Tecnologia dei Materiali

Modulo 2: Tecnologia dei Materiali

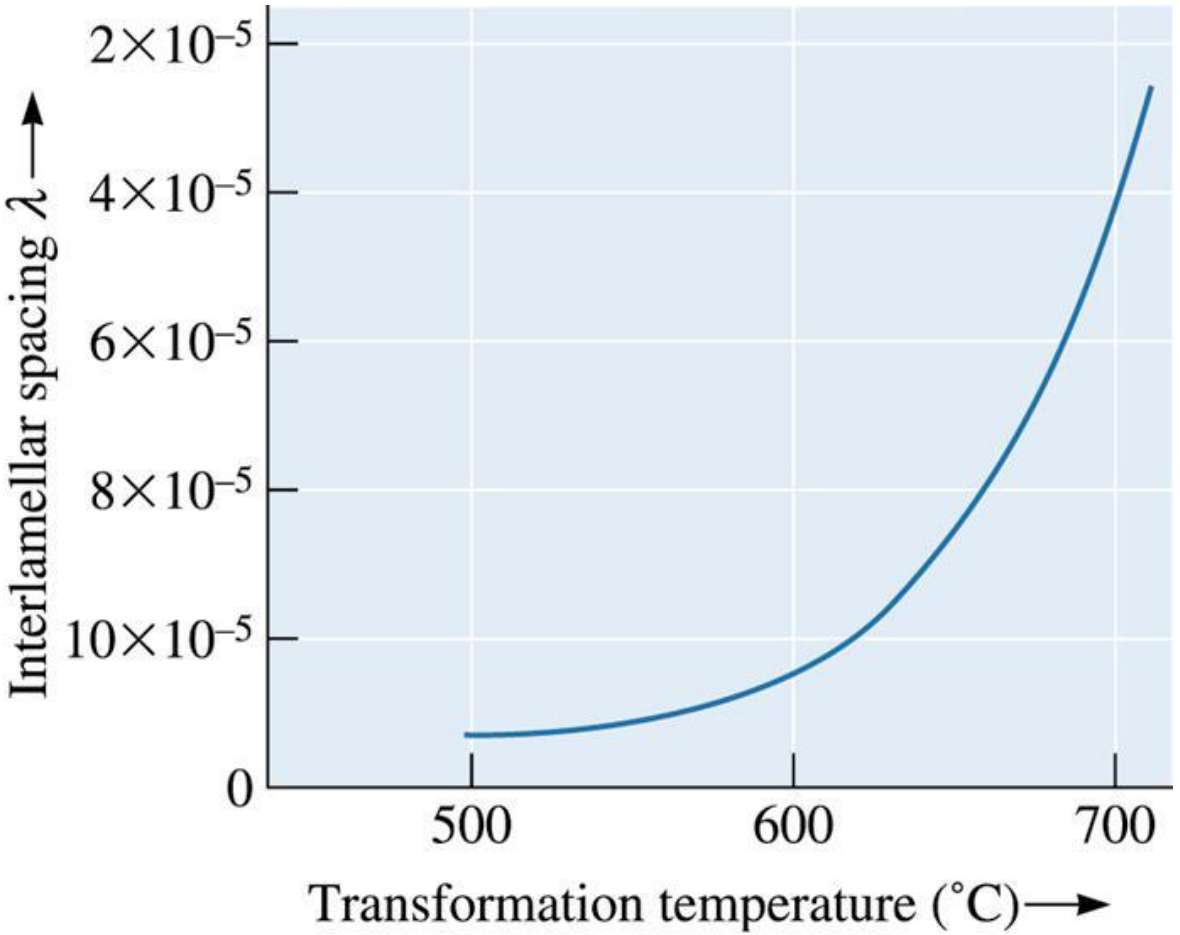
- Lezione 8: Leghe ferrose e trattamenti termici -

Barbara Codan

bcodan@units.it

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

Controllo dello spazio interlamellare mediante la temperatura di trasformazione dell'austenite

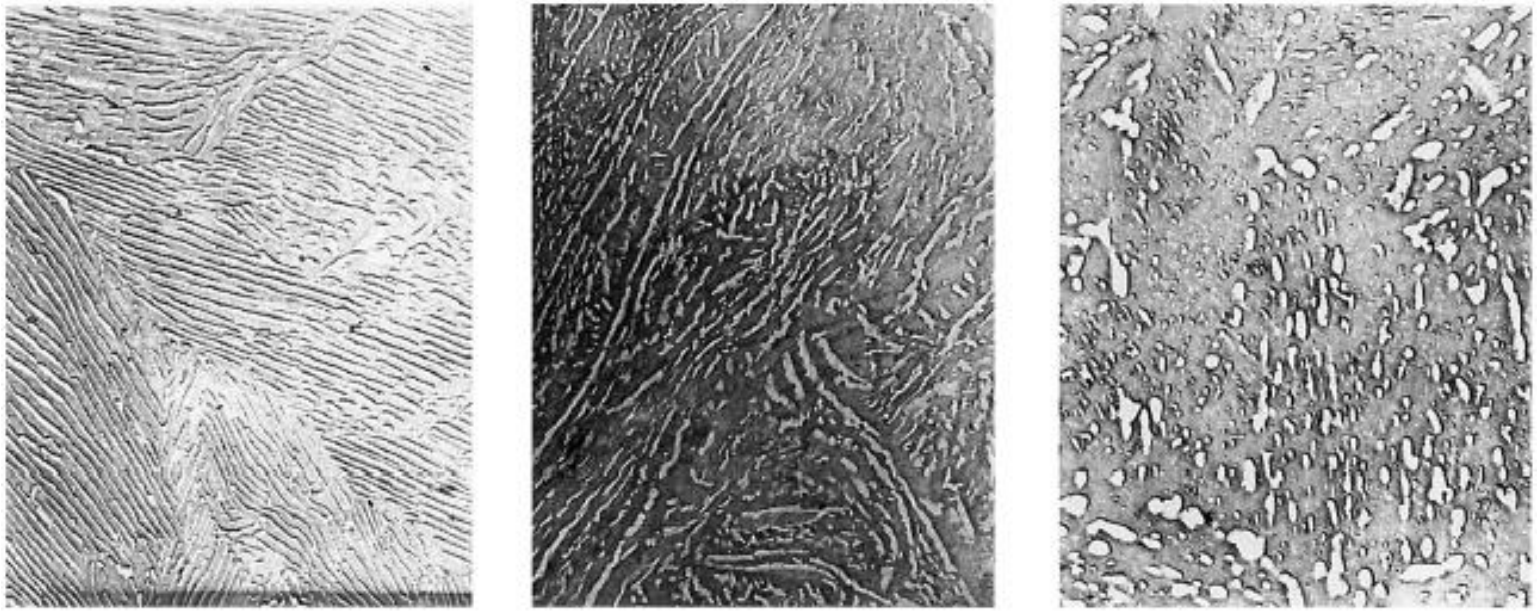


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Effetto della temperatura di trasformazione dell'austenite sulla spaziatura interlamellare della perlite.

Importanti microstrutture negli acciai

Perlite, bainite e martensite sono talvolta difficili da distinguere, ma hanno origine completamente diversa.



(a) **Perlite**

(b) **Bainite**

(c) **Martensite**

Micrografie elettroniche che illustrano le differenze nelle dimensioni e nella forma della cementite tra questi tre microcostituenti (x 7500).

(*From* The Making, Shaping, and Treating of Steel, *10th Ed. Courtesy of the Association of Iron and Steel Engineers*.)

Trattamenti termici

I trattamenti termici vengono effettuati per modificare alcune proprietà meccaniche e tecnologiche dei materiali, tra cui:

- Durezza
- Resistenza
- Tenacità
- Lavorabilità
- Malleabilità

Con i trattamenti termici vengono modificate:

- Composizione chimica
- Microstruttura

Trattamenti termici

Per trattamento termico si intende il **ciclo termico** di riscaldamento effettuato in predeterminate condizioni e temperature a cui devono seguire raffreddamenti, più o meno lenti, con lo scopo di fare assumere ad un metallo o ad una lega metallica (solitamente acciaio) quelle strutture cristalline che conferiscono determinate caratteristiche meccaniche e/o tecnologiche.

Diagramma di stato → strutture di equilibrio

+ tempo (velocità di variazione della temperatura)

Strutture metastabili (assenti nel diagramma di stato)

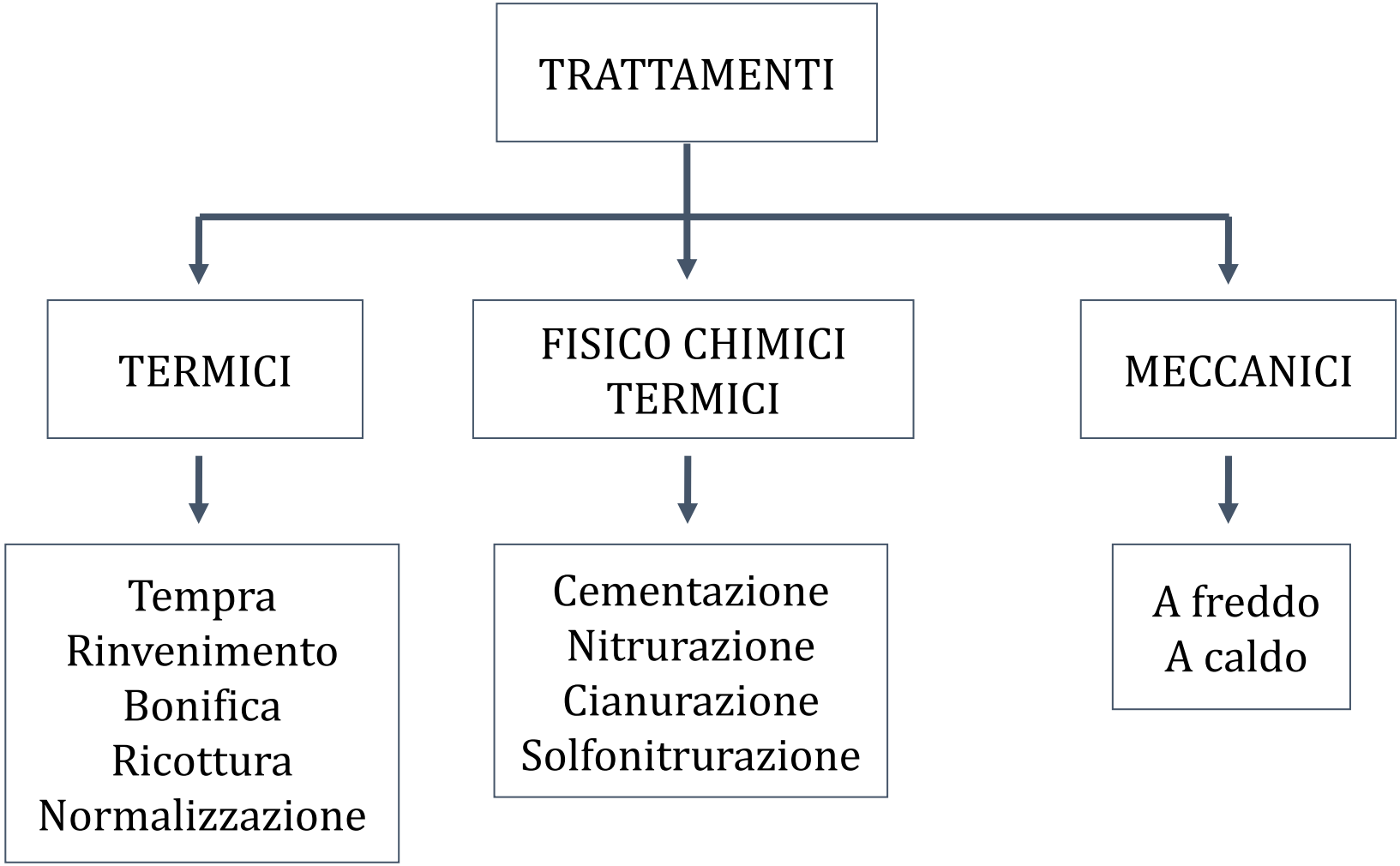
Trattamenti termici

I trattamenti termici degli acciai possono essere suddivisi in due categorie a seconda che si abbia transizione di fase o meno:

1. **trattamenti termici con transizioni di fase**: sono trattamenti in cui si opera al di sopra della temperatura eutettoidica tra questi:
   - ricottura (semplice o isoterma)
   - normalizzazione
   - tempra

2. **trattamenti termici senza transizioni di fase**: sono trattamenti in cui si opera al di sotto della temperatura eutettoidica tra questi: ricottura di addolcimento
   - rinvenimento
   - distensione

Trattamenti termici



Trattamenti termici

Ecco un elenco dei principali trattamenti termici a cui può essere sottoposto un metallo o una lega:

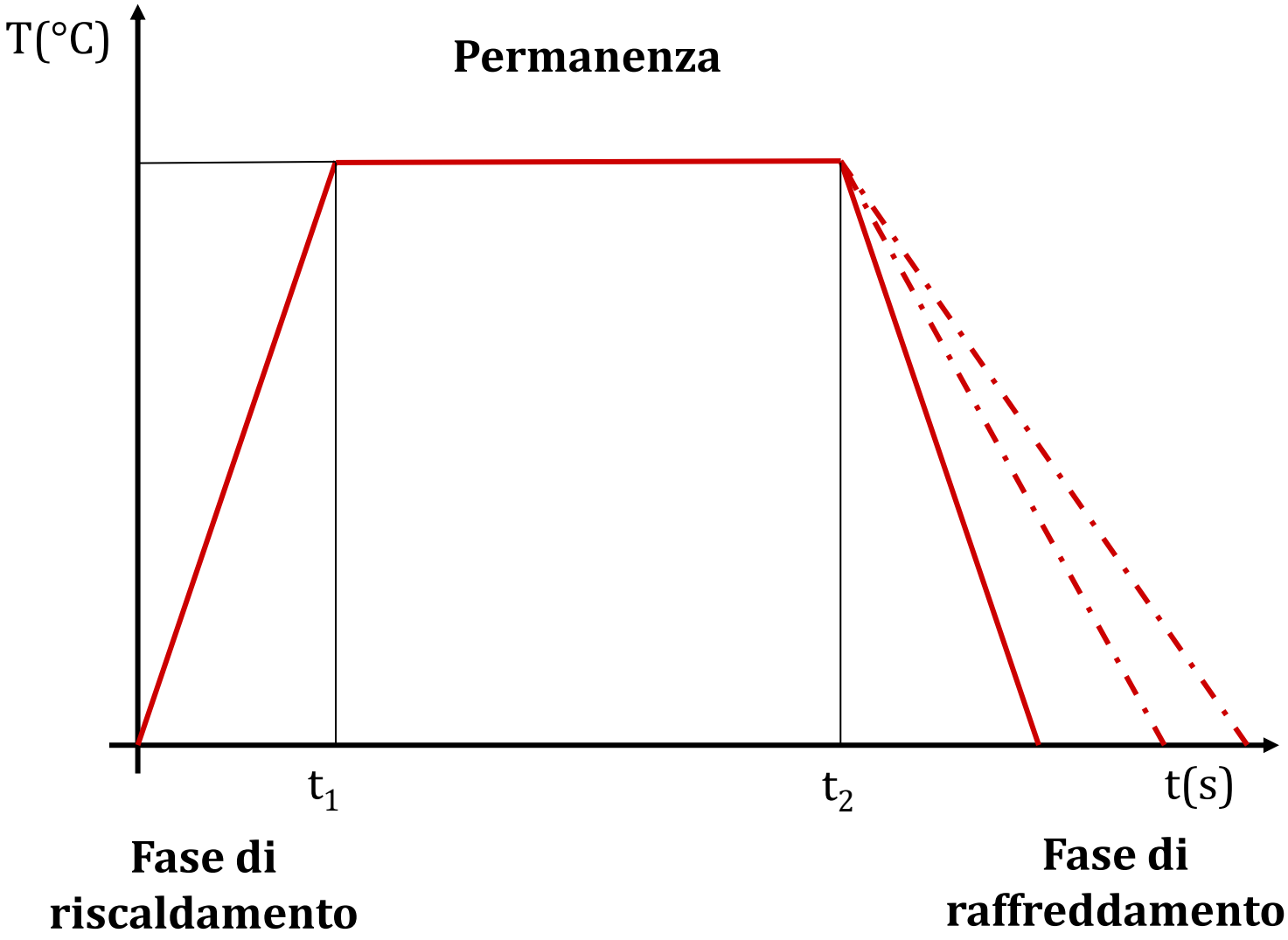
- **Normalizzazione**
- **Ricottura**
  - Ricottura completa
  - Ricottura di lavorabilità
  - Ricottura di globulizzazione
  - Ricottura di ricristallizzazione
  - Ricottura isotermica:
- **Tempra**
  - Tempra diretta
  - Tempra interrotta
  - Tempra scalare martensitica
  - Tempra isoterma bainitica
- **Rinvenimento**
- **Distensione**
- **Bonifica**
  - Bonifica isotermica
- **Solubilizzazione**

Trattamenti termici

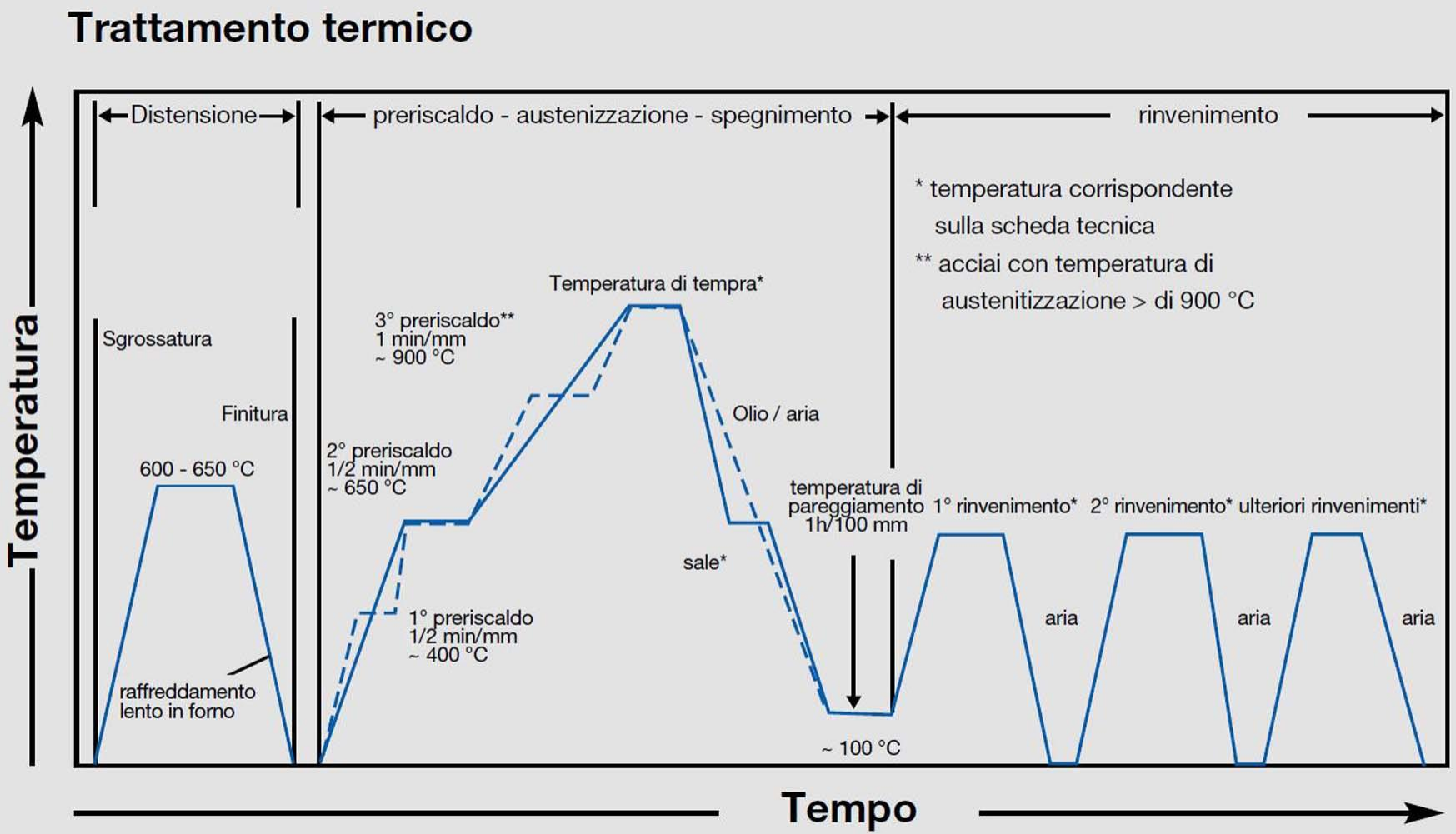
Fase di riscaldamento	Con forni di diverso tipo o con sistemi di induzione elettromagnetica. Il riscaldamento deve essere lento per evitare cricche e distorsioni.
Permanenza alla temperatura di trattamento	Il pezzo viene mantenuto alla temperatura di riscaldamento per un tempo sufficiente a uniformare la temperatura in tutte le sue parti. Il tempo dipende dalla massa del pezzo.
Fase di raffreddamento	Il pezzo viene riportato alla temperatura ambiente con velocità variabili in funzione del tipo di trattamento e del materiale da trattare. Il raffreddamento può essere eseguito in forno, in aria, in acqua, in bagno di sali, ecc. Il raffreddamento è una fase critica, una velocità troppo elevata può dar origine a cricche e rotture.

Il trattamento può avvenire in atmosfera controllata, sotto vuoto, ecc.

Trattamenti termici

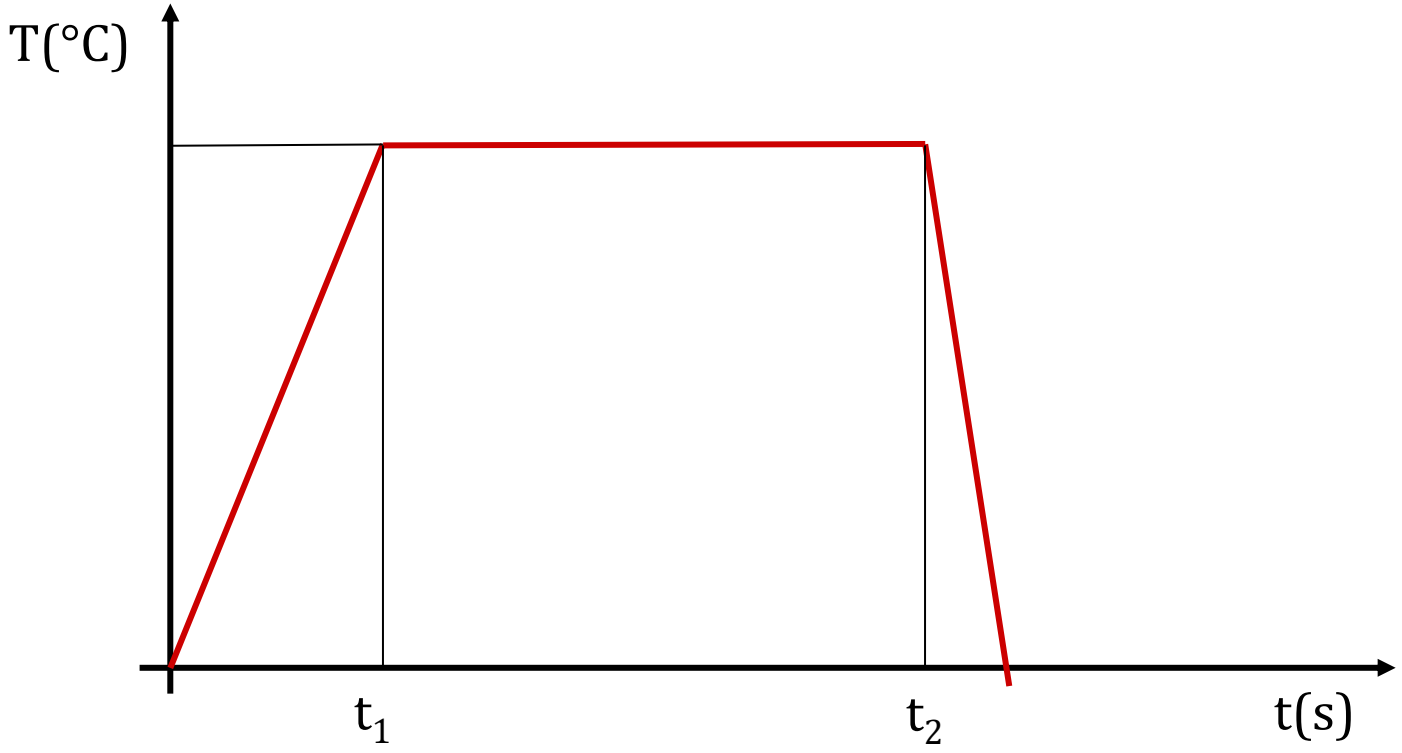


Trattamenti termici



Tempra

1) Riscaldamento
2) Permanenza alla temperatura di tempra
3) **Raffreddamento rapido** del pezzo per immersione in un fluido acqua o olio



Tempra

Effetti:

Aumento della durezza

Aumento della resistenza a rottura e a trazione

Diminuzione della resilienza e della lavorabilità

Diminuzione dell'allungamento percentuale

Tabella 4.7 Modificazioni apportate dal trattamento di tempra negli acciai dolci e semiduri

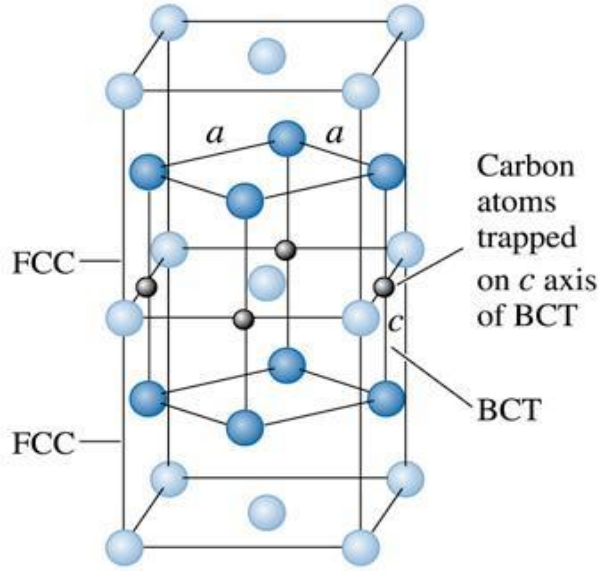
Tipo di acciaio	Stato	R (kg/mm²)	HB	A%	K (kg/mm²)
Acciaio dolce (C da 0.10 a 0.14%)	Naturale	37	108	38	32
	Temprato all'acqua	50	146	32	34
Acciaio semiduro (C da 0.4 a 0.5%)	Naturale	65	190	18	11
	Temprato all'acqua	190	560	2	1

R = Resistenza a trazione
HB = Durezza Brinell
A% = Allungamento percentuale
K = Resilienza

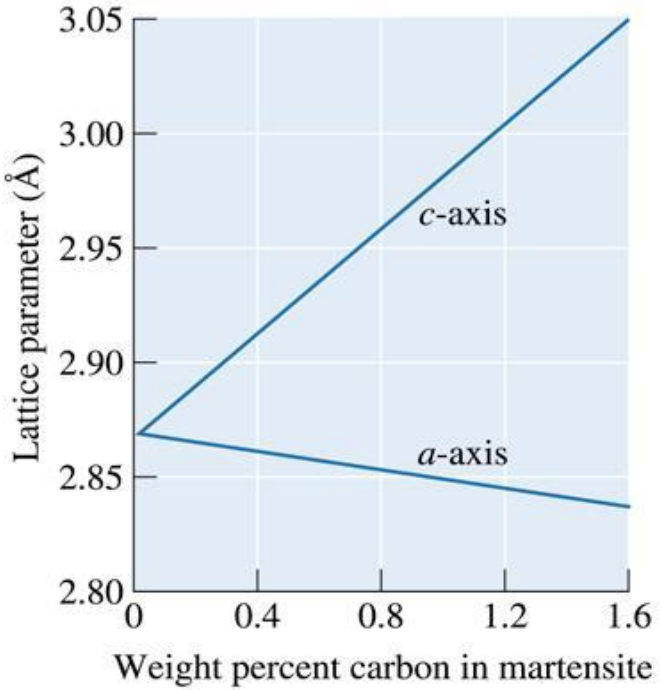
La trasformazione martensitica e la tempra

- **Martensite**: fase metastabile che si forma nell'acciaio e altri materiali da una trasformazione atermica e senza diffusione. Presenta una struttura caratterizzata da un'alta densità di dislocazioni, elevato stato tensionale residuo bassa tenacità
- **Trasformazione displasiva**: trasformazione di fase che avviene attraverso piccoli spostamenti di atomi o ioni e senza diffusione. Come la trasformazione atermica o martensitica.
- **Rinvenimento**: trattamento termico a bassa temperatura utilizzato per ridurre la durezza del martensite consentendo al martensite di iniziare a decomporsi nelle fasi di equilibrio.

Struttura cristallina della martensite (tetragonale a corpo centrato)



(a)

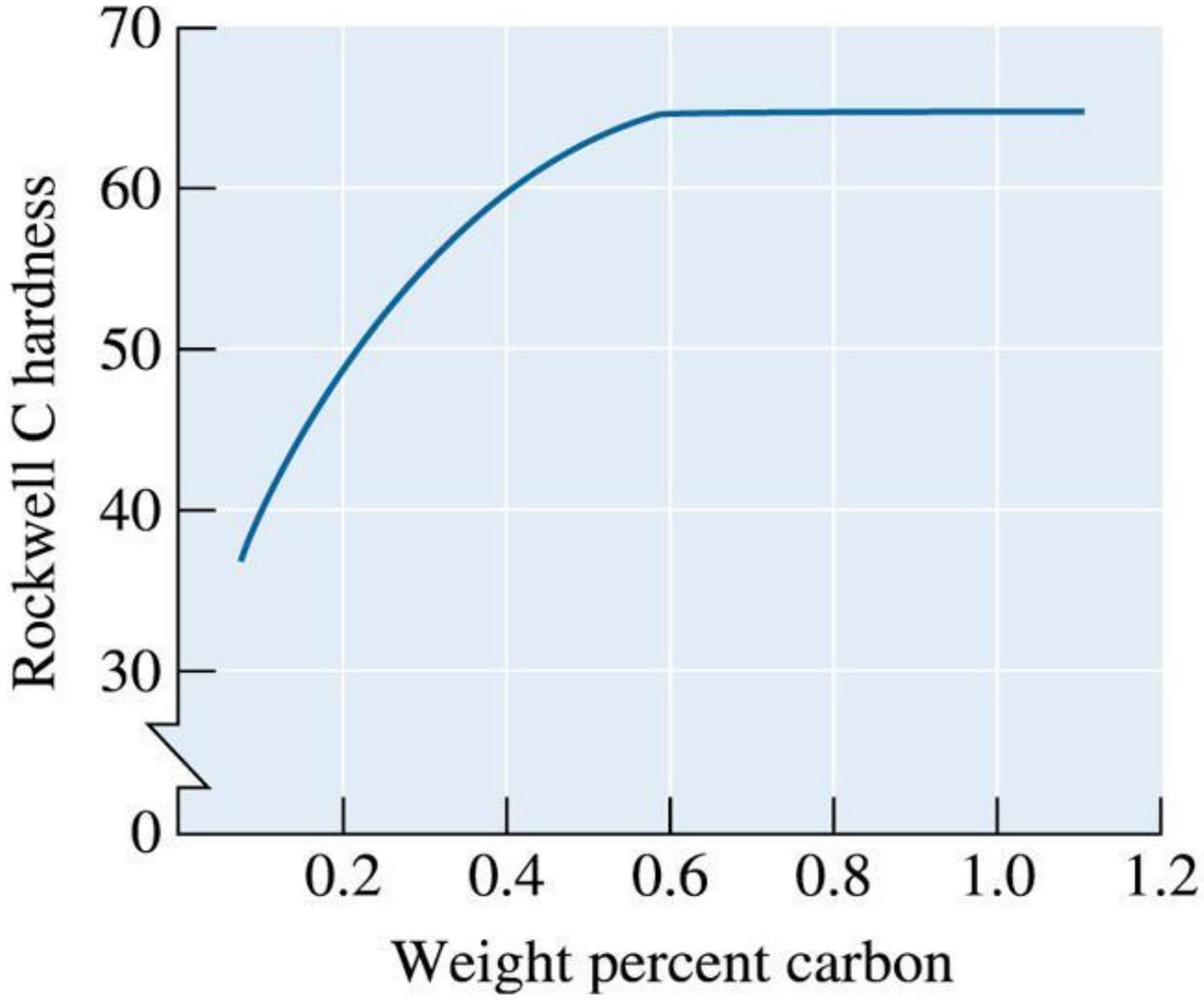


(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

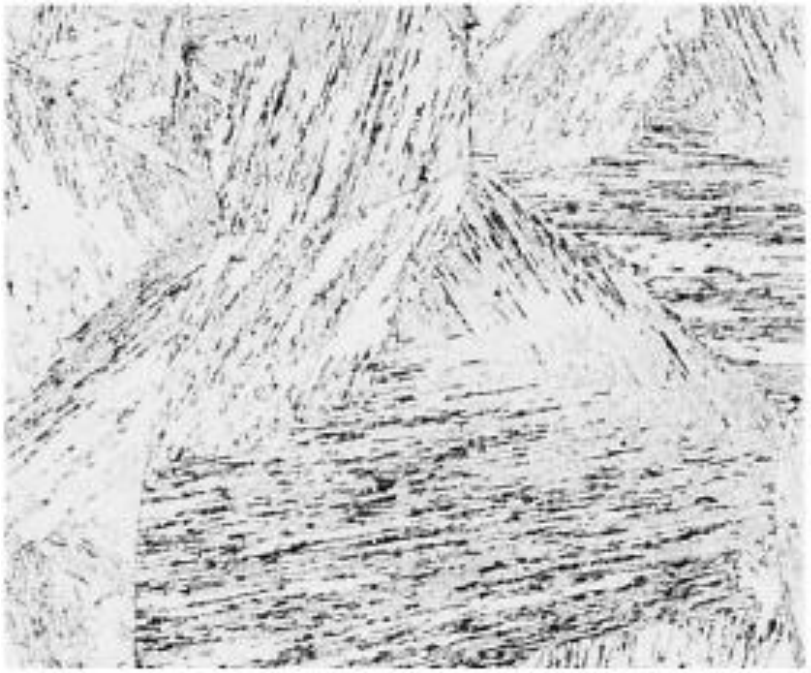
La cella unitaria della martensite BCT (Body Centered Tethragonal) è correlata alla cella unitaria dell'austenite FCC.

All'aumentare della percentuale di carbonio, un numero maggiore di siti interstiziali viene riempito dagli atomi di carbonio e la struttura tetragonale della martensite diventa più pronunciata.



L'effetto del contenuto di carbonio sulla durezza della martensite negli acciai.

Esempi di microstrutture martensitiche



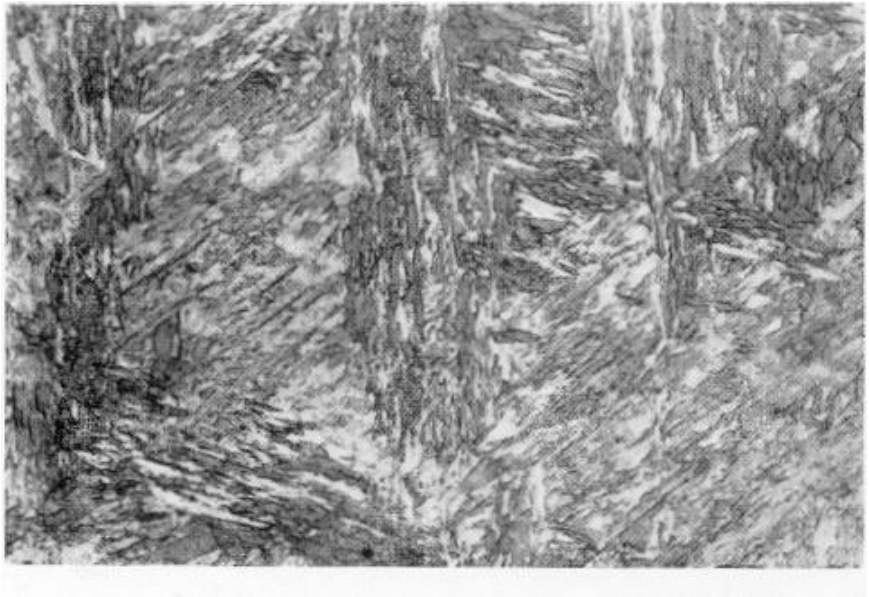
(a)

Martensite a listelli in acciaio a basso tenore di carbonio (x 80).

(b)

Martensite a piastra in acciaio ad alto tenore di carbonio (x 400).

Esempi di microstrutture martensitiche

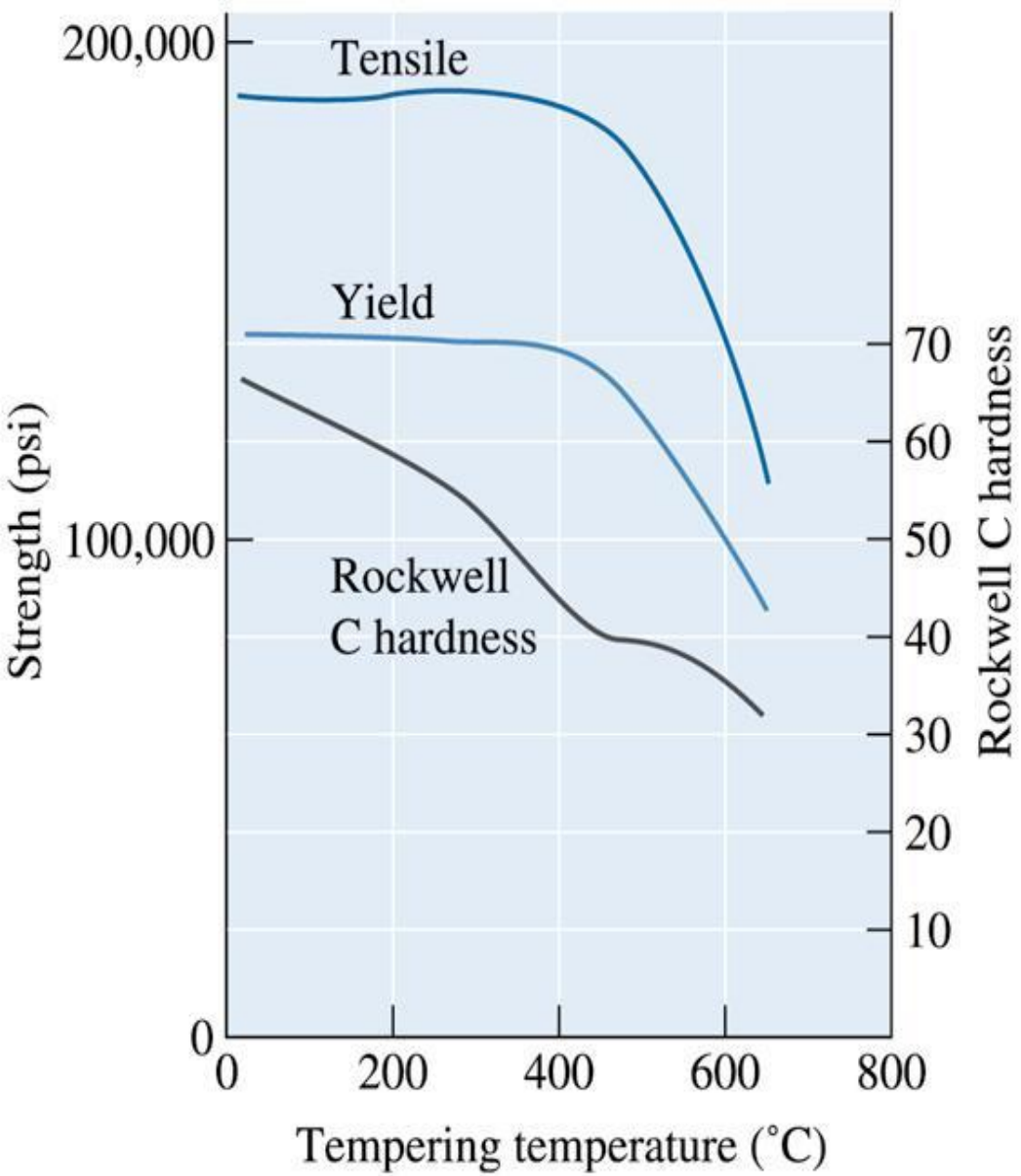


Martensite in acciaio ipoeuttettoidico.

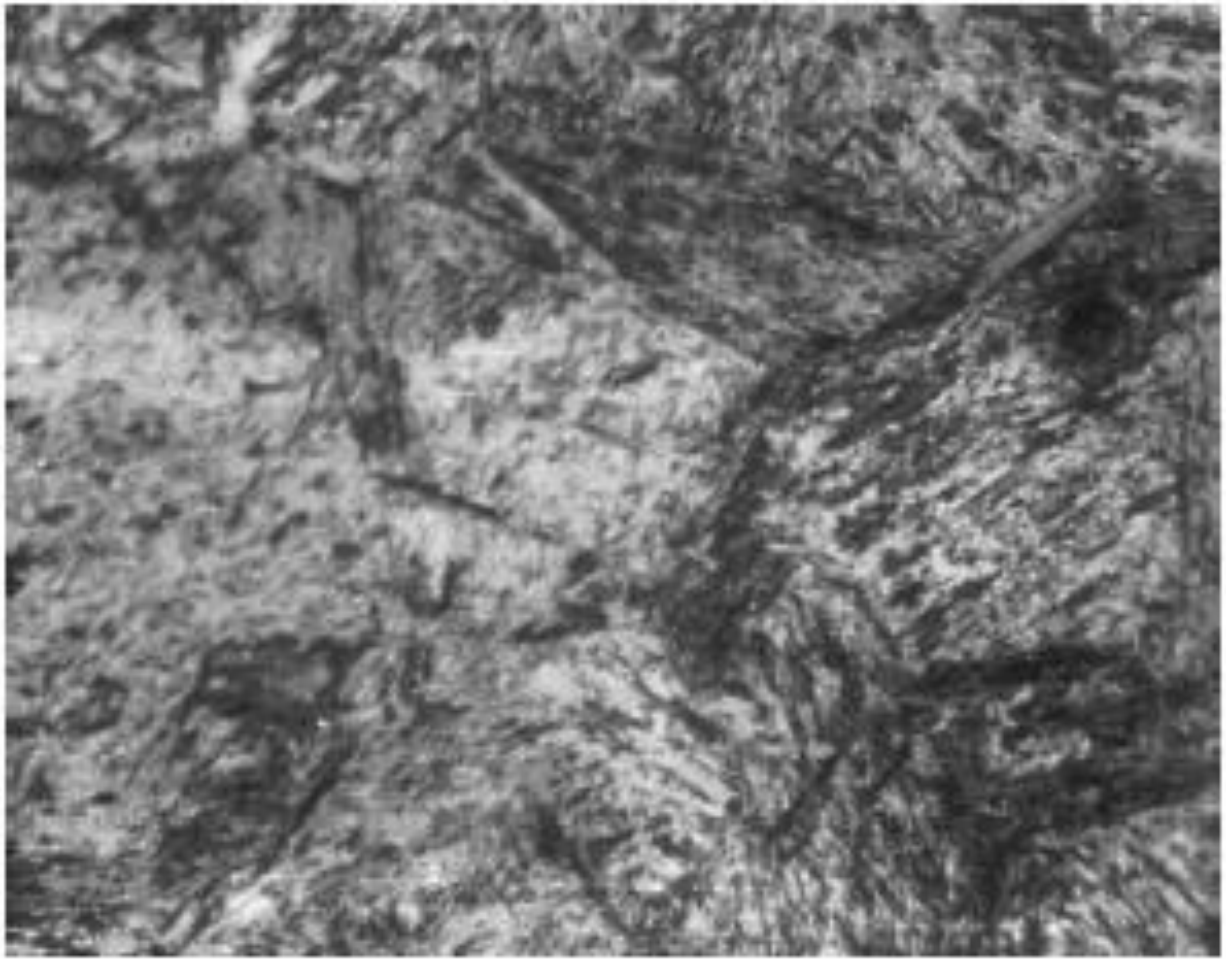
Martensite in acciaio iperuttettoidico.

Effetto della temperatura di tempra

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



Effetto della temperatura di rinvenimento sulle proprietà dell'acciaio eutettoide.



Martensite temprata (× 500).

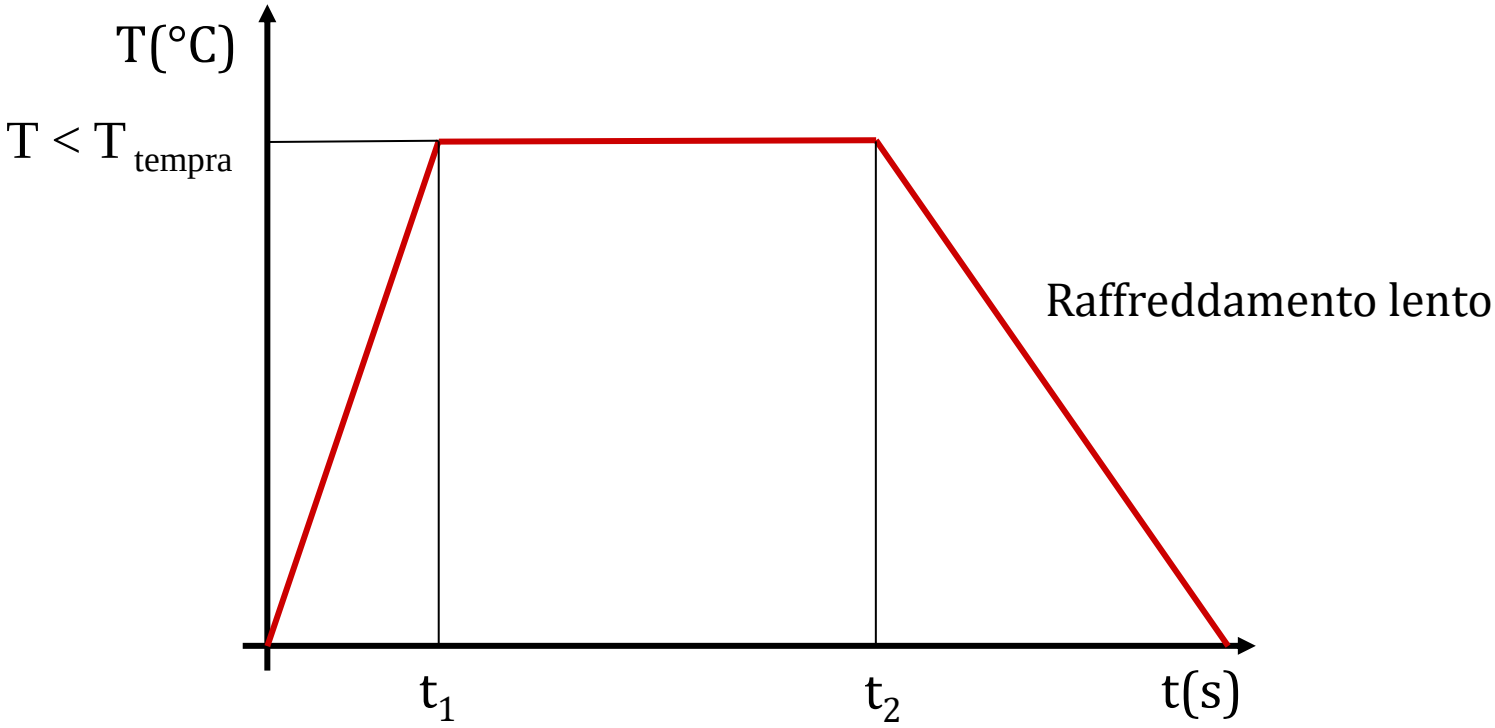
(*From* ASM Handbook, *Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International Materials Park, OH 44073*.)

Rinvenimento

1) Riscaldamento ad una temperatura inferiore a quella di tempra
2) Permanenza alla temperatura di riscaldo
3) **Raffreddamento lento**

Effetti:

- limitare gli effetti della tempra
- aumento della durezza ridotto ma aumentando la tenacità

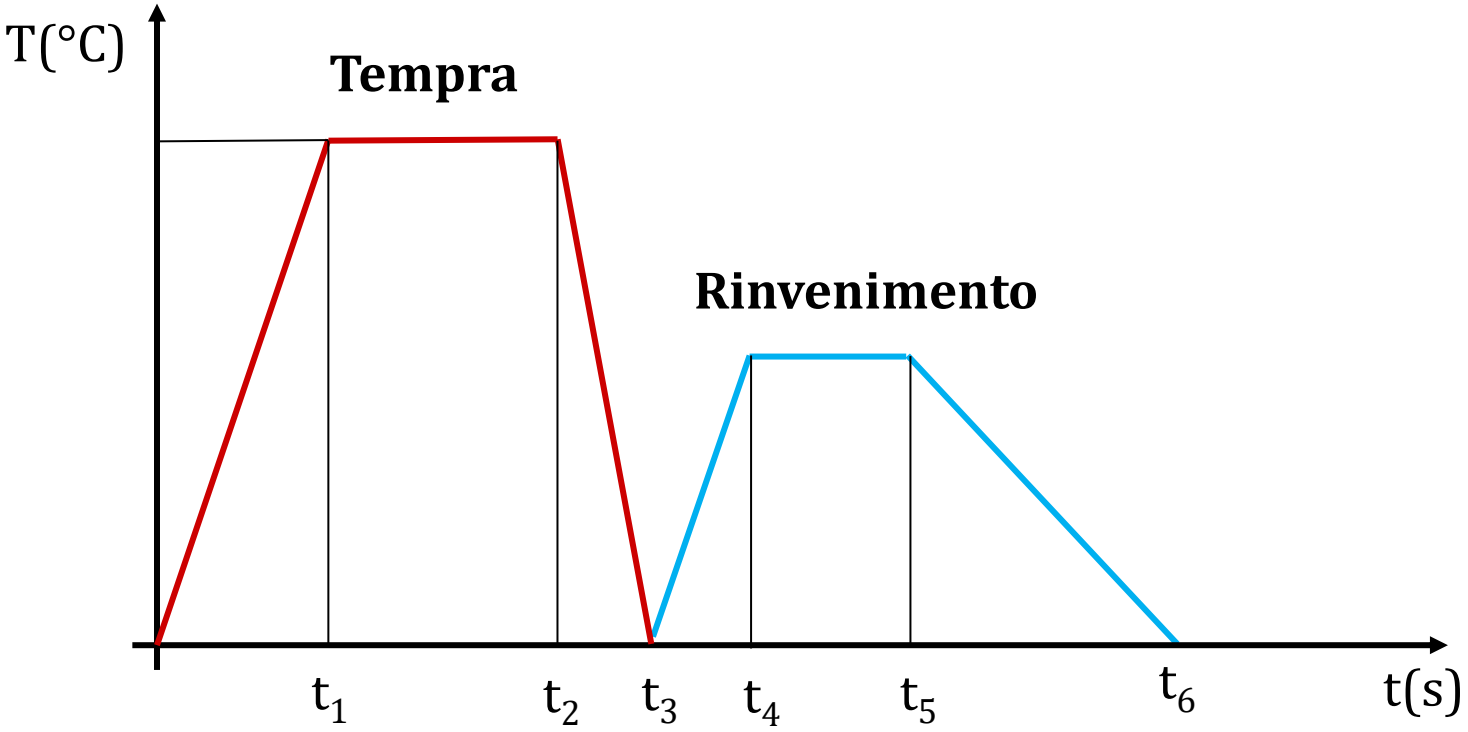


Bonifica

BONIFICA= TEMPRA + RINVENIMENTO

Effetti:
Un buon compromesso tra l'aumento della durezza e della resistenza con il mantenimento di una buona resilienza

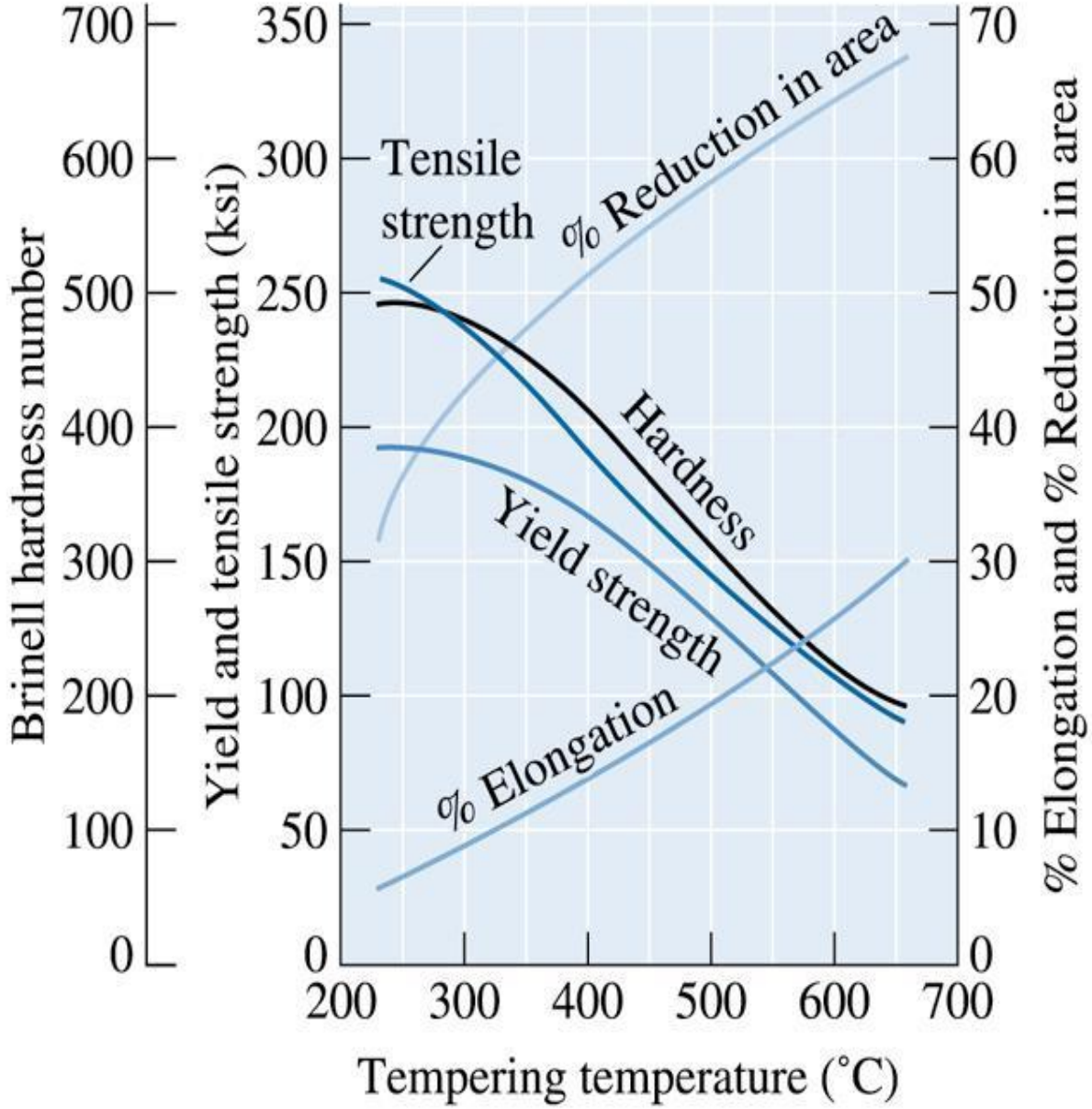
Ciclo termico complessivo



Trattamenti di tempra e rinvenimento

- **Austenite** trattenuta: austenite che non è in grado di trasformarsi in martensite durante la tempra a causa dell'espansione del volume associata alla reazione.
- **Martensite rinvenuta**: i microcomponenti di ferrite e cementite si forma quando la martensite viene rinvenuta.
- **Cricche da tempra**: cricche o crepe che si formano sulla superficie di un acciaio durante la tempra a causa delle tensioni residue di trazione prodotte della variazione di volume che accompagna la trasformazione da austenite a martensite.
- **Marquenching**: in siderurgia, trattamento termico degli acciai consistente in una tempra isotermica in due tempi, nel quale l'acciaio viene trasformato da austenite in martensite evitando le tensioni interne che si hanno con la tempra ordinaria: l'acciaio viene portato a temperatura di completa austenitizzazione, quindi immerso in un bagno di sali fusi, in modo che si raffreddi uniformemente e rapidamente fino a una temperatura di poco superiore a quella alla quale l'austenite si trasforma in martensite, per essere poi estratto dal bagno salino e ulteriormente raffreddato in olio.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

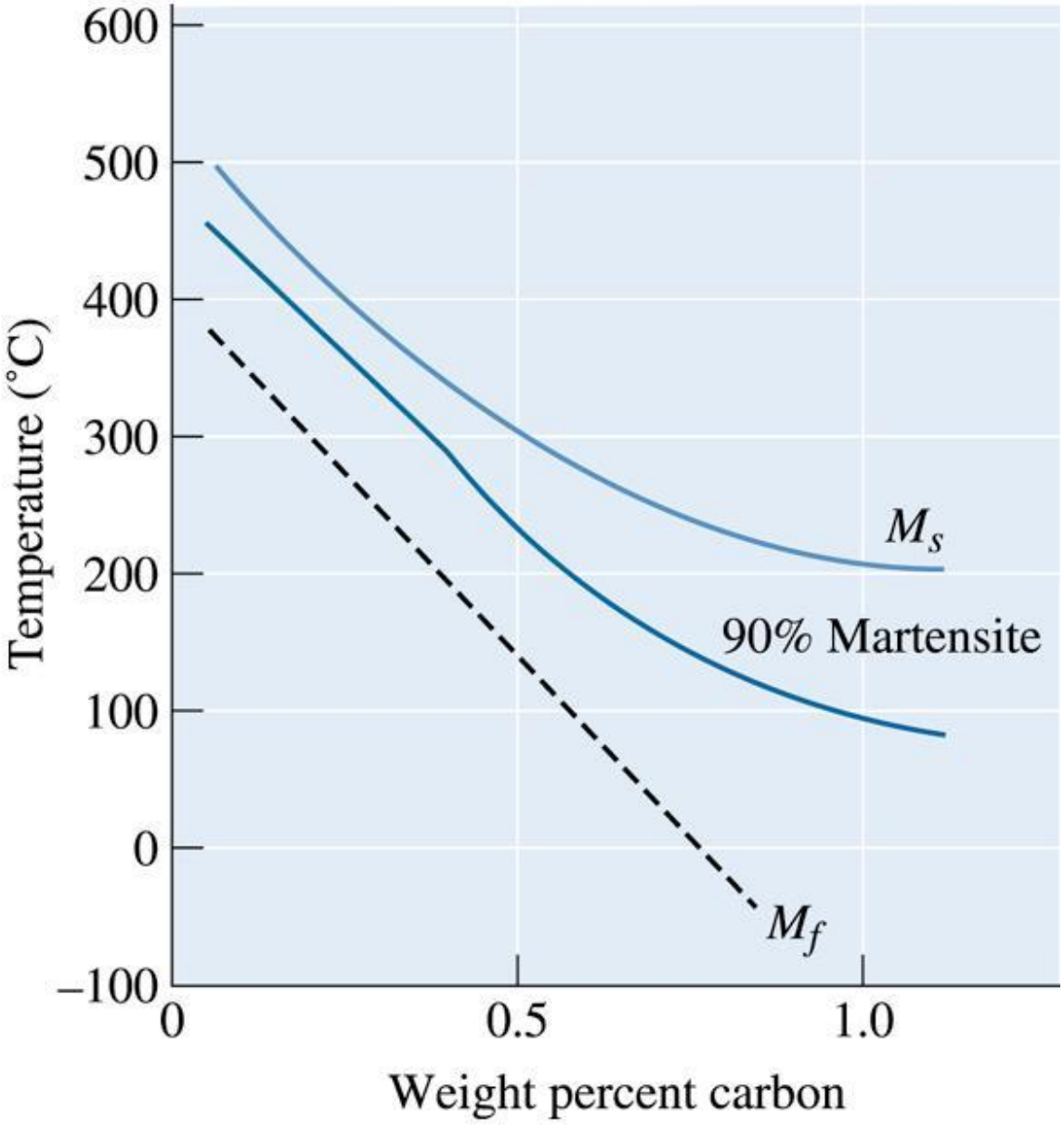


The effect of tempering temperature on the mechanical properties of a 1050 steel.

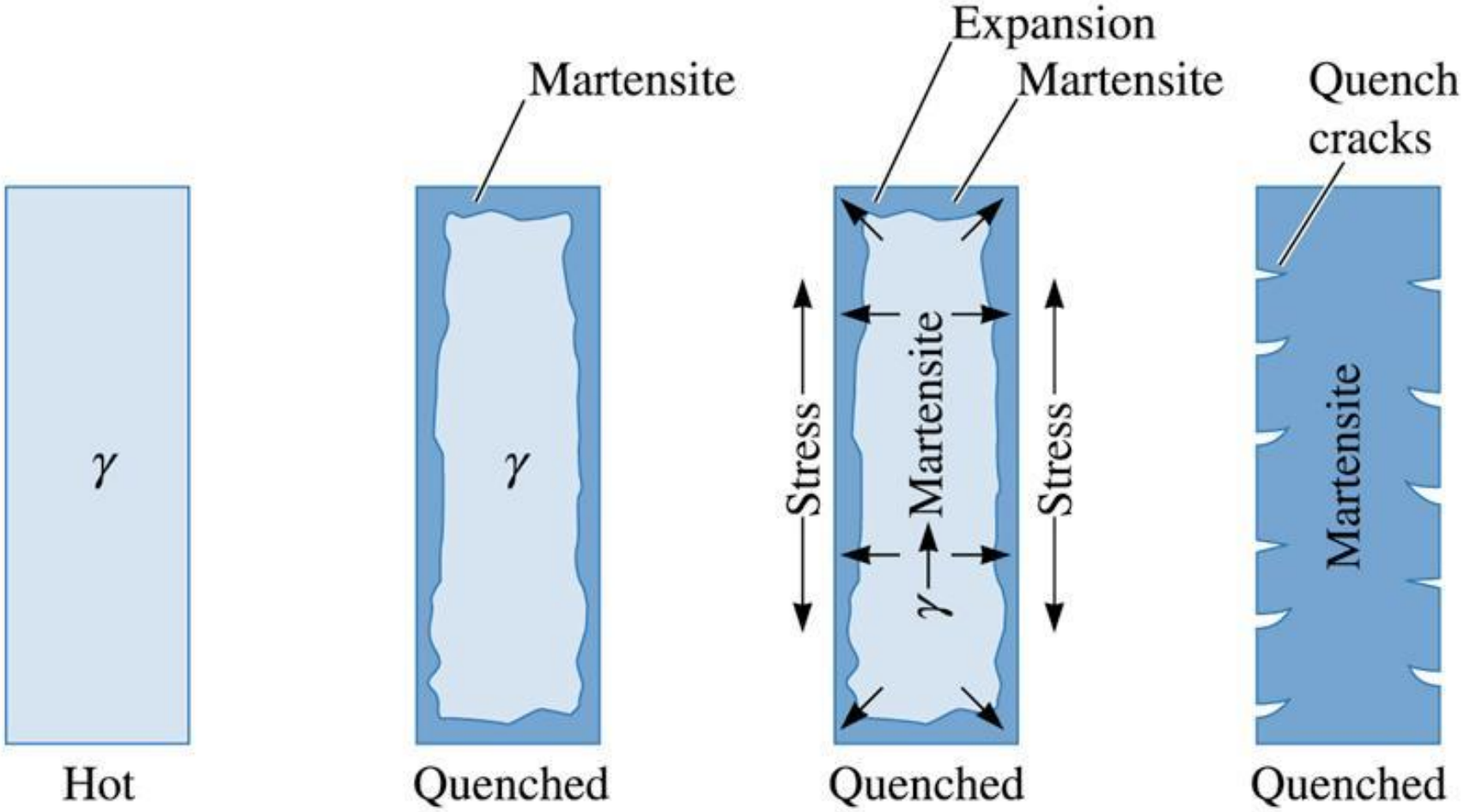
Austenite trattenuta (bianco) intrapolata tra gli aghi di martensite (nero) (× 1000).

(*From* ASM Handbook, *Vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073*.)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



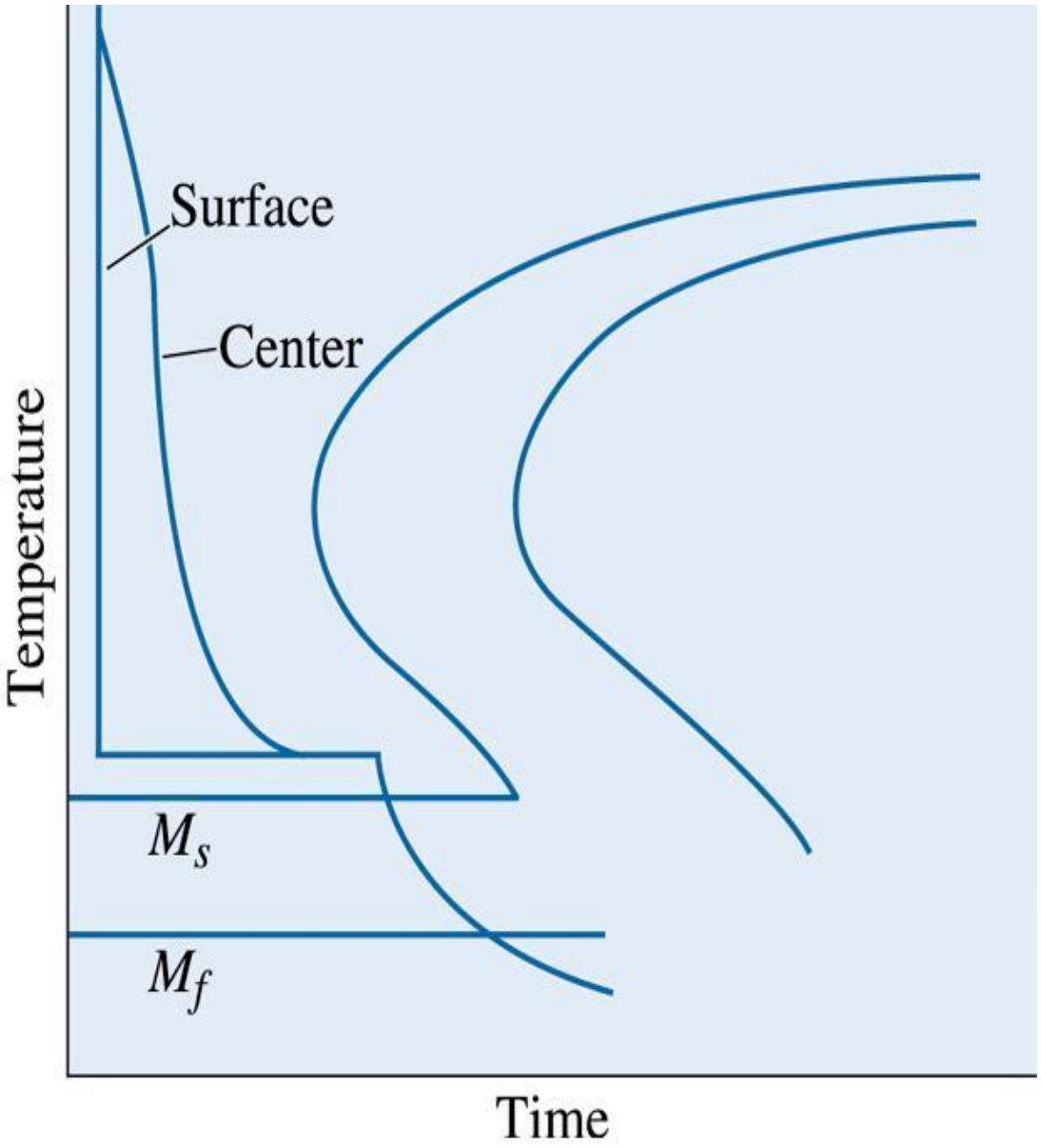
L'aumento del carbonio riduce le temperature M_s e M_f negli acciai al carbonio.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Formazione di cricche di tempra causate da sollecitazioni residue prodotte durante la tempra. La figura illustra lo sviluppo di stress mentre l'austenite si trasforma in martensite durante il raffreddamento.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



Il trattamento termico di marquenching realizzato per ridurre le sollecitazioni residue e il cracking della tempra.

Semplici trattamenti termici

- **Processo di ricottura**: eliminazione del lavoro a freddo, ovvero trattamento termico a bassa temperatura utilizzato per eliminare completamente o parte dell'effetto della lavorazione a freddo negli acciai.
- **Ricottura e normalizzazione**: entrambi sono un rafforzamento della dispersione
- **Ricottura**: trattamento termico utilizzato per produrre una perlite grossolana nell'acciaio mediante austenitizzazione, quindi raffreddamento nel forno.
- **Normalizzazione**: semplice trattamento termico ottenuto mediante austenitizzazione e raffreddamento ad aria per produrre una struttura perlitica fine.
- **Sferoidizzazione**: miglioramento della lavorabilità
- **Sferoidite**: microcostituente contenente particelle grossolane di cementite sferoidale in una matrice di ferrite, che consente eccellenti caratteristiche di lavorazione in acciai ad alto tenore di carbonio.

Ricottura

1) Riscaldamento ad **una temperatura superiore a quella di austenizzazione**
2) Permanenza alla temperatura di riscaldo
3) **Raffreddamento lento**

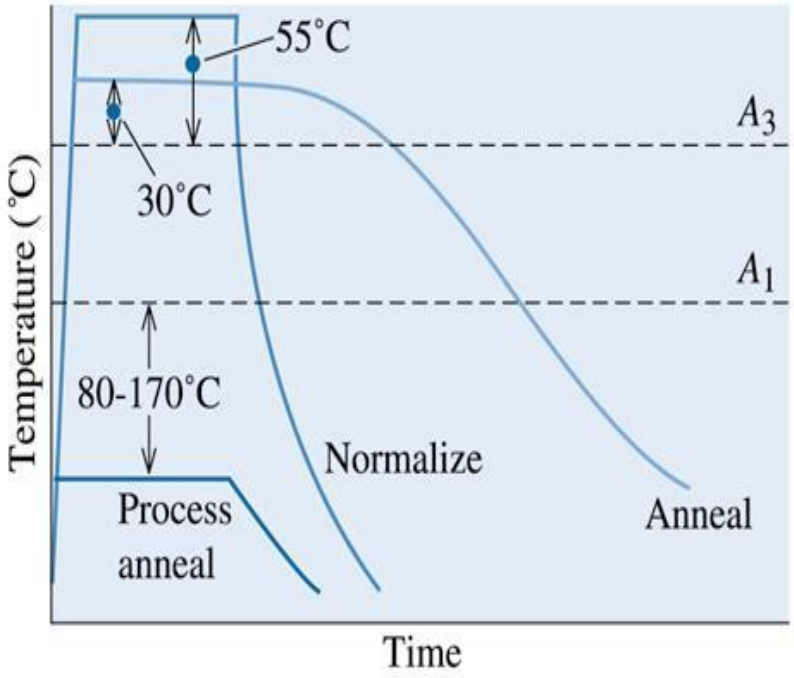
Deve conseguire uno o più dei seguenti obiettivi:

- equilibrio chimico: riduzione della segregazione minore;
- equilibrio strutturale: trasformazione delle fasi metastabili;
- equilibrio meccanico: riduzione delle tensioni residue interne, incrudimento compreso.

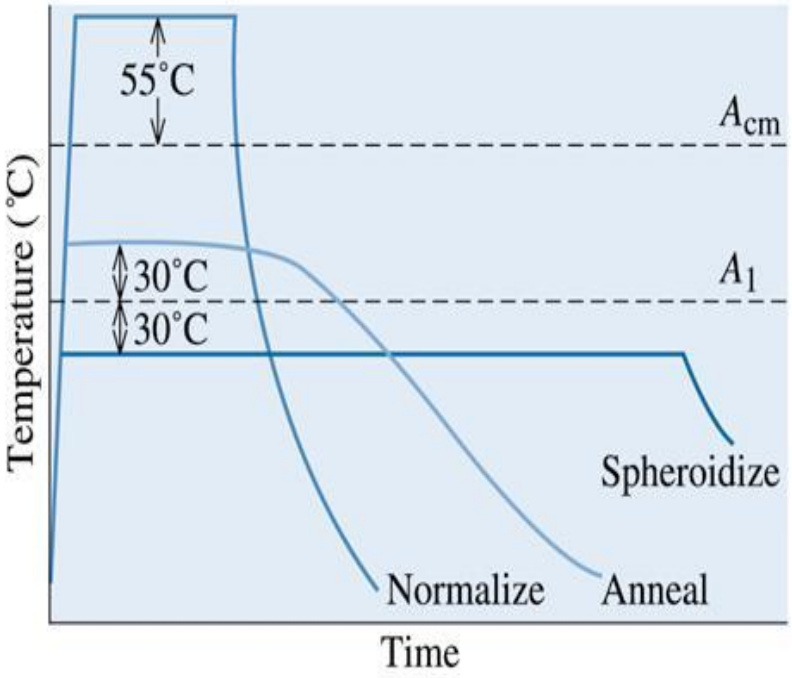
Effetti:

Ha lo scopo di sopprimere gli effetti di precedenti trattamenti termici e ripristinare la struttura interna normale

Trattamenti termici

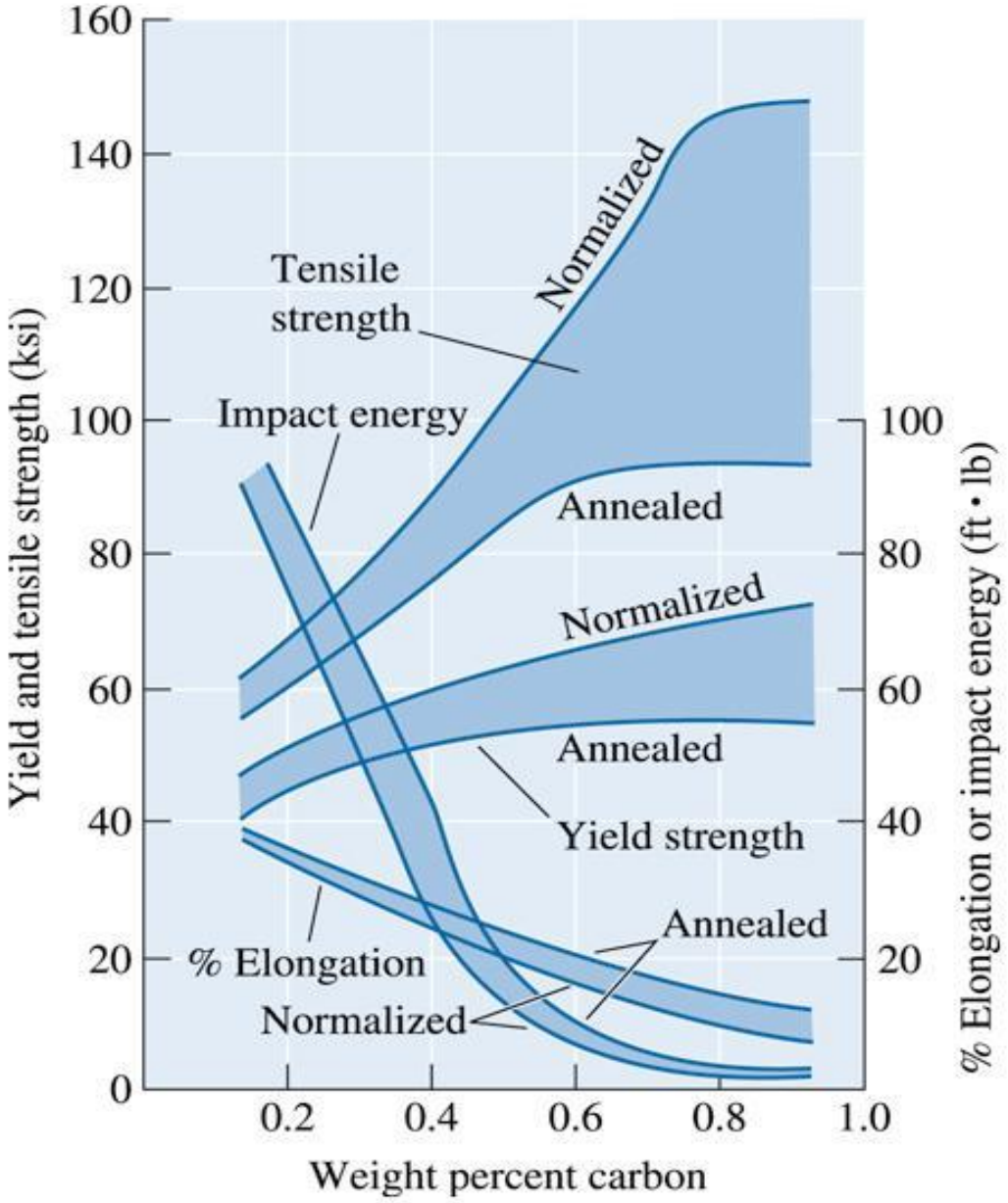


(a) Hypoeutectoid

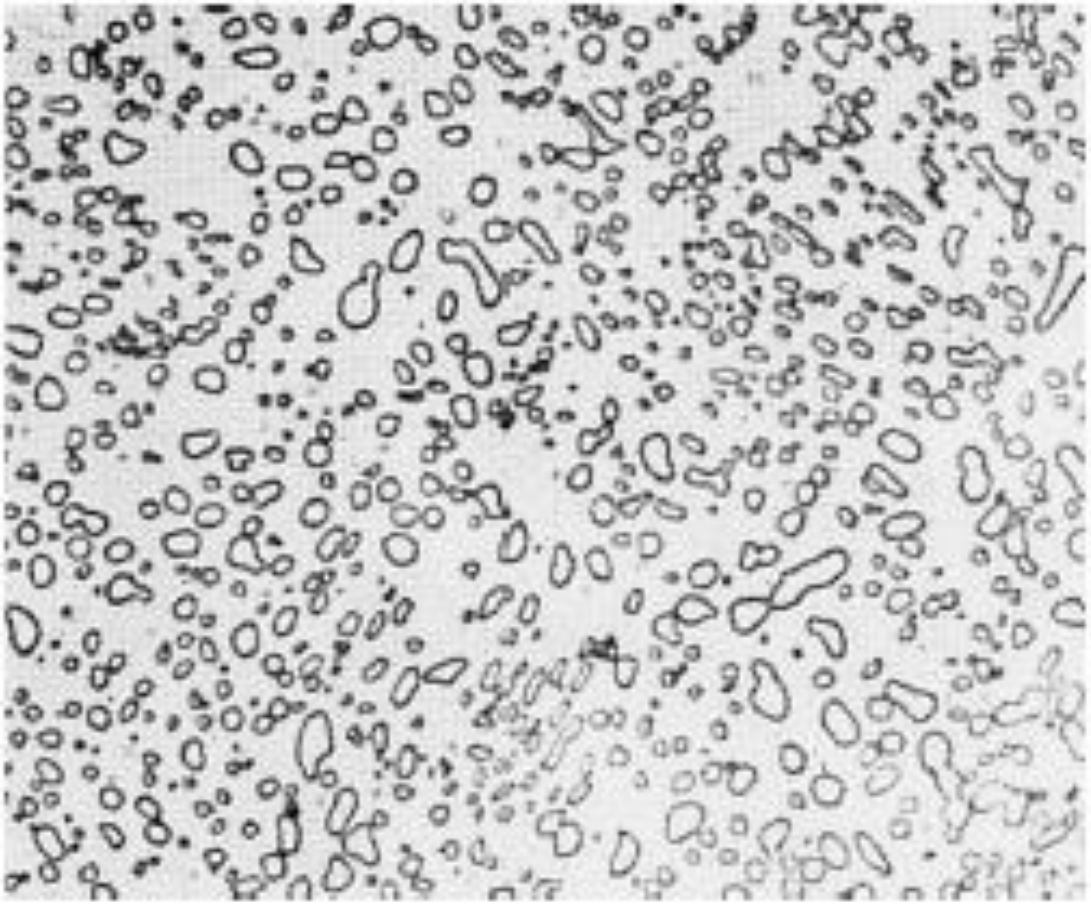


(b) Hypereutectoid

Trattamenti termici



L'effetto del carbonio e del trattamento termico sulle proprietà degli acciai al carbonio.



La microstruttura della sferoidite, con particelle di Fe_3C disperse in una matrice di ferrite (× 850).

(*From* ASM Handbook, *Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073*.)

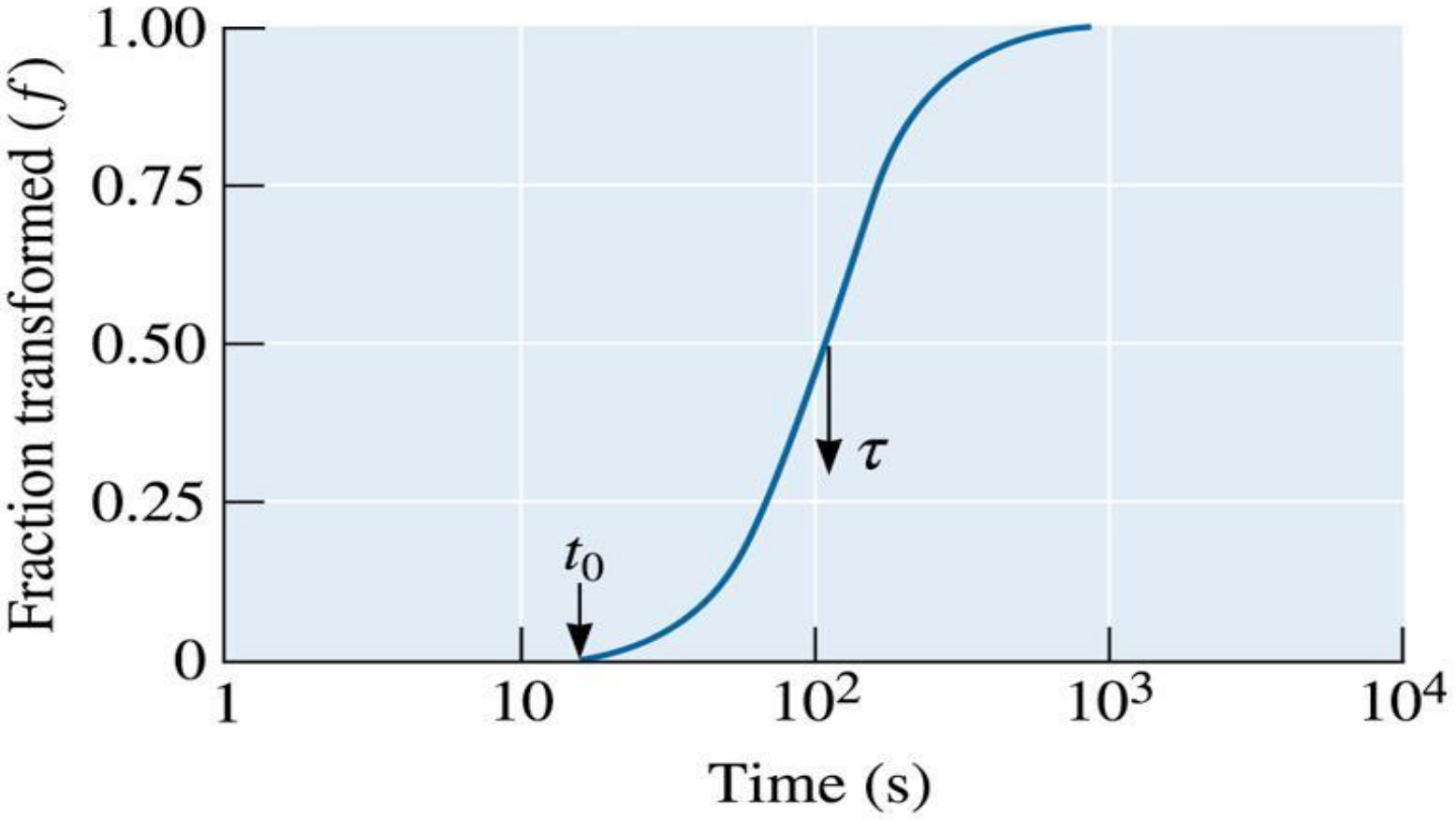
Normalizzazione

1) Riscaldamento ad una temperatura superiore a quella di tempra
2) Permanenza alla temperatura di riscaldo
3) Raffreddamento in aria calma

Effetti:

Si ripristina la struttura interna omogenea, si eliminano le tensioni interne dovute a precedenti lavorazioni (laminazione, saldatura, ecc) e si predispone il materiale alle successive lavorazioni o trattamenti.

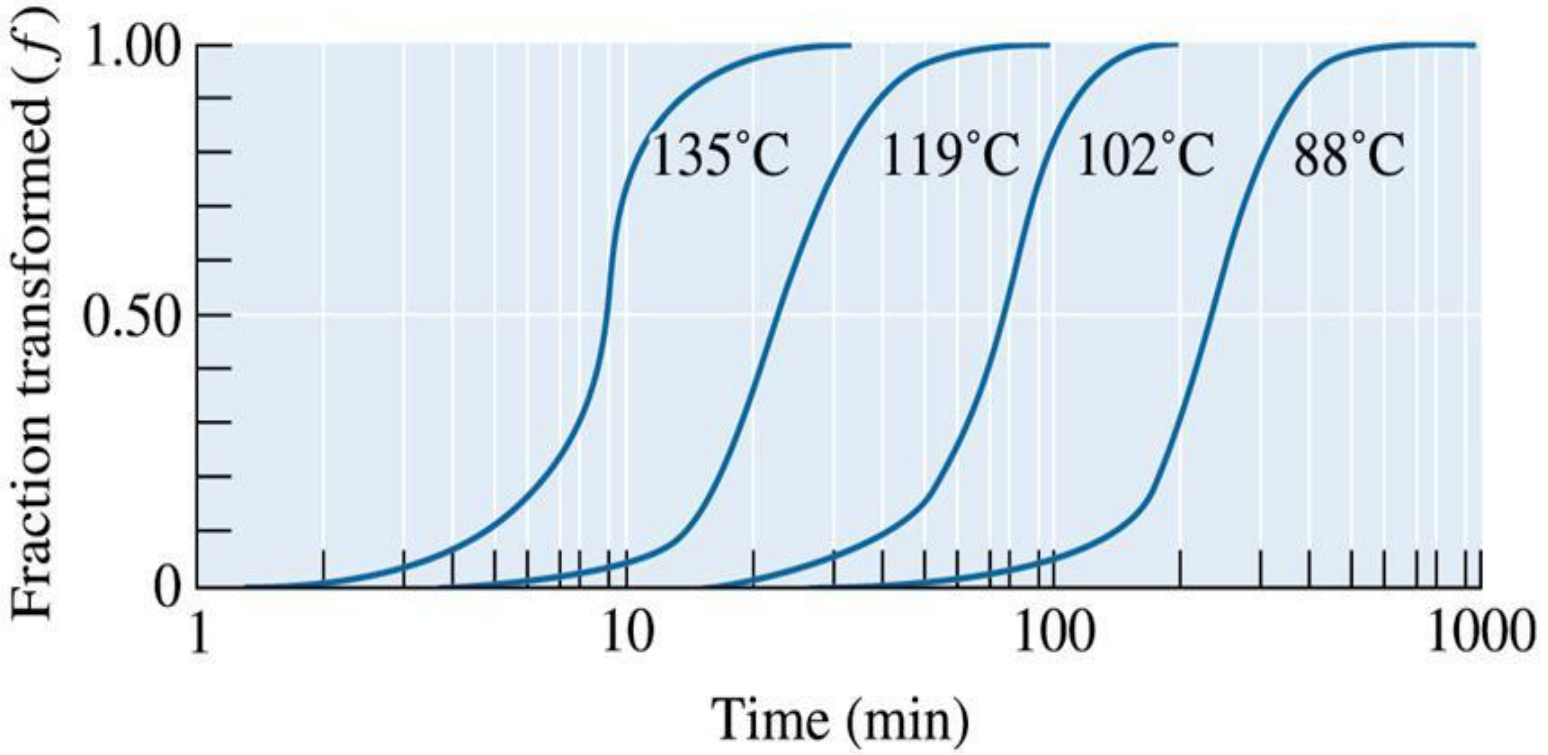
Trasformazione in funzione del tempo
(curve sigmoidali)



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

La curva sigmoidale mostra la velocità di trasformazione del ferro FCC a temperatura costante. Sono indicati il tempo di incubazione t_0 e il tempo τ per la trasformazione del 50%.

Trasformazione in funzione del tempo - Effetto della temperatura -

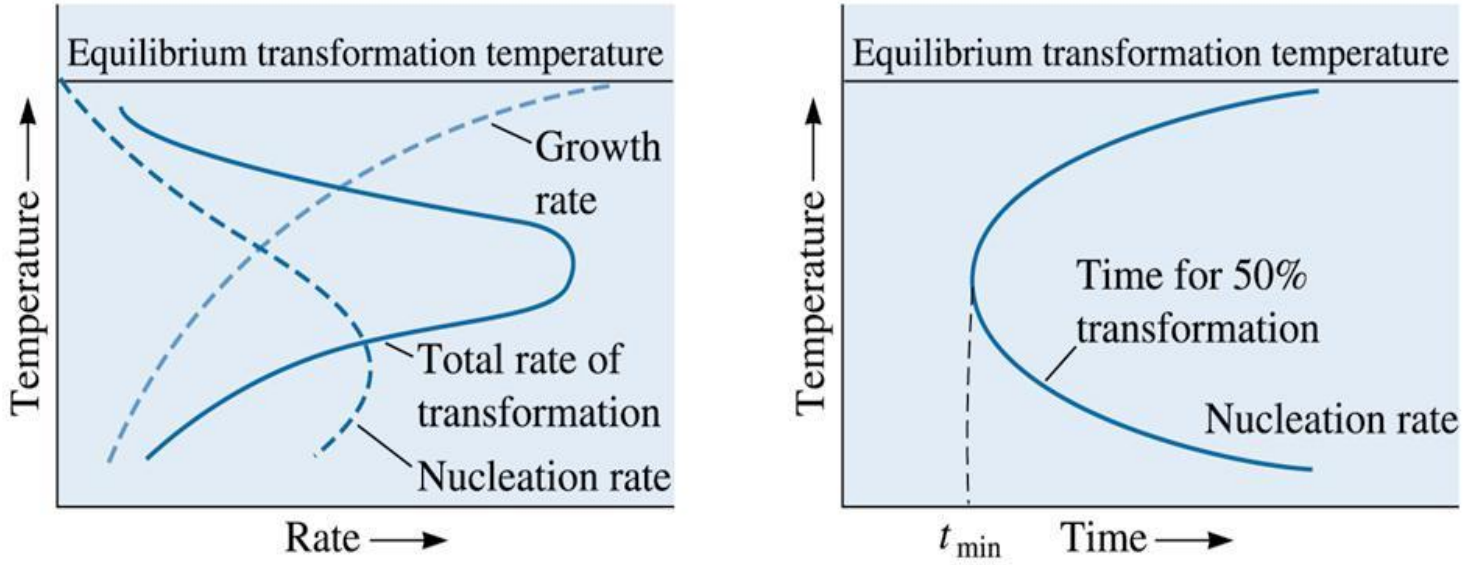


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

L'effetto della temperatura sulla trasformazione: ricristallizzazione del rame lavorato a freddo.

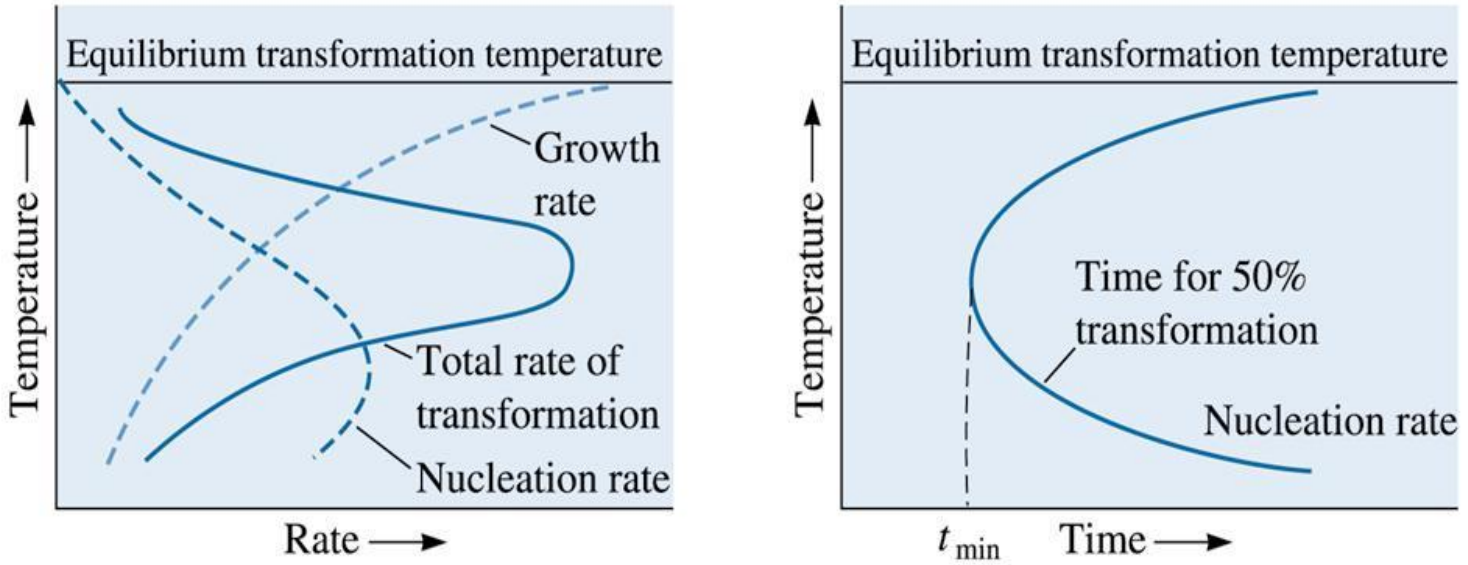
Trasformazione in funzione del tempo - Effetto della temperatura –

Gli stessi dati della slide precedente possono venir rappresentati come **tasso di trasformazione in funzione della temperatura** oppure come **percentuale di trasformazione in funzione del tempo** (ovvero curve TTT). Notare l'andamento non monotono, con la presenza di un «naso», ovvero un massimo di velocità di trasformazione.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Trasformazione in funzione del tempo - Effetto della temperatura –



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

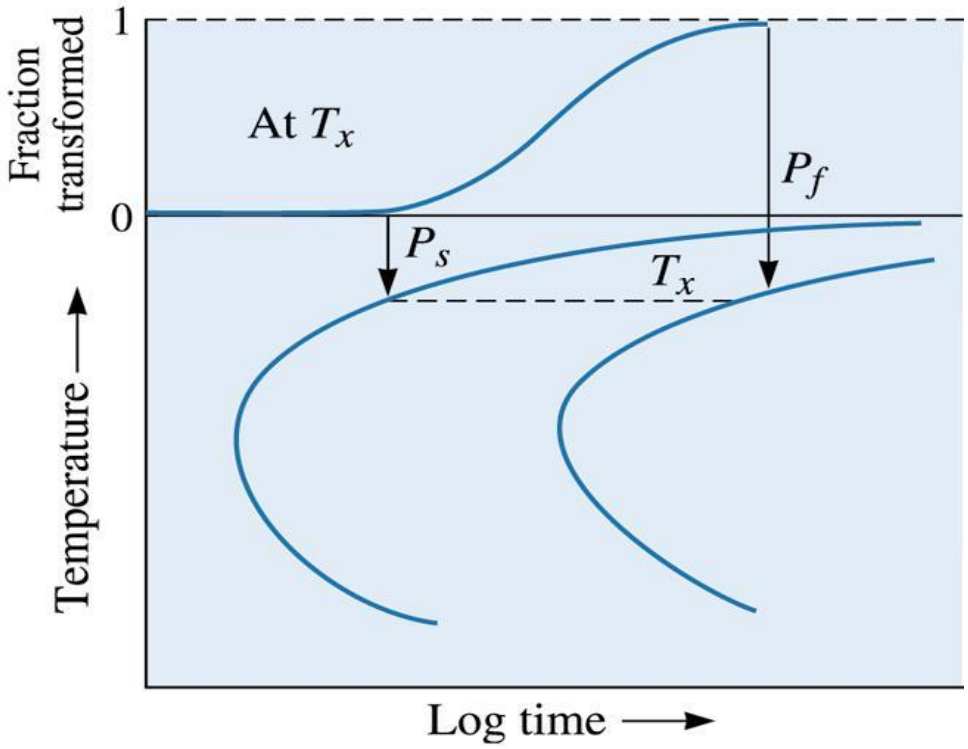
(a) (b)

L'effetto della temperatura sulla velocità di una trasformazione di fase è il prodotto del tasso di crescita e dei contributi del tasso di nucleazione, fornendo un tasso di trasformazione massimo a una temperatura critica.

Di conseguenza, c'è un tempo minimo (t_{min}) richiesto per la trasformazione, dato dalla "curva a C".

Costruzione delle curve TTT dalle curve sigmoidali

Curve TTT: Tempo-Temperatura-Trasformazione

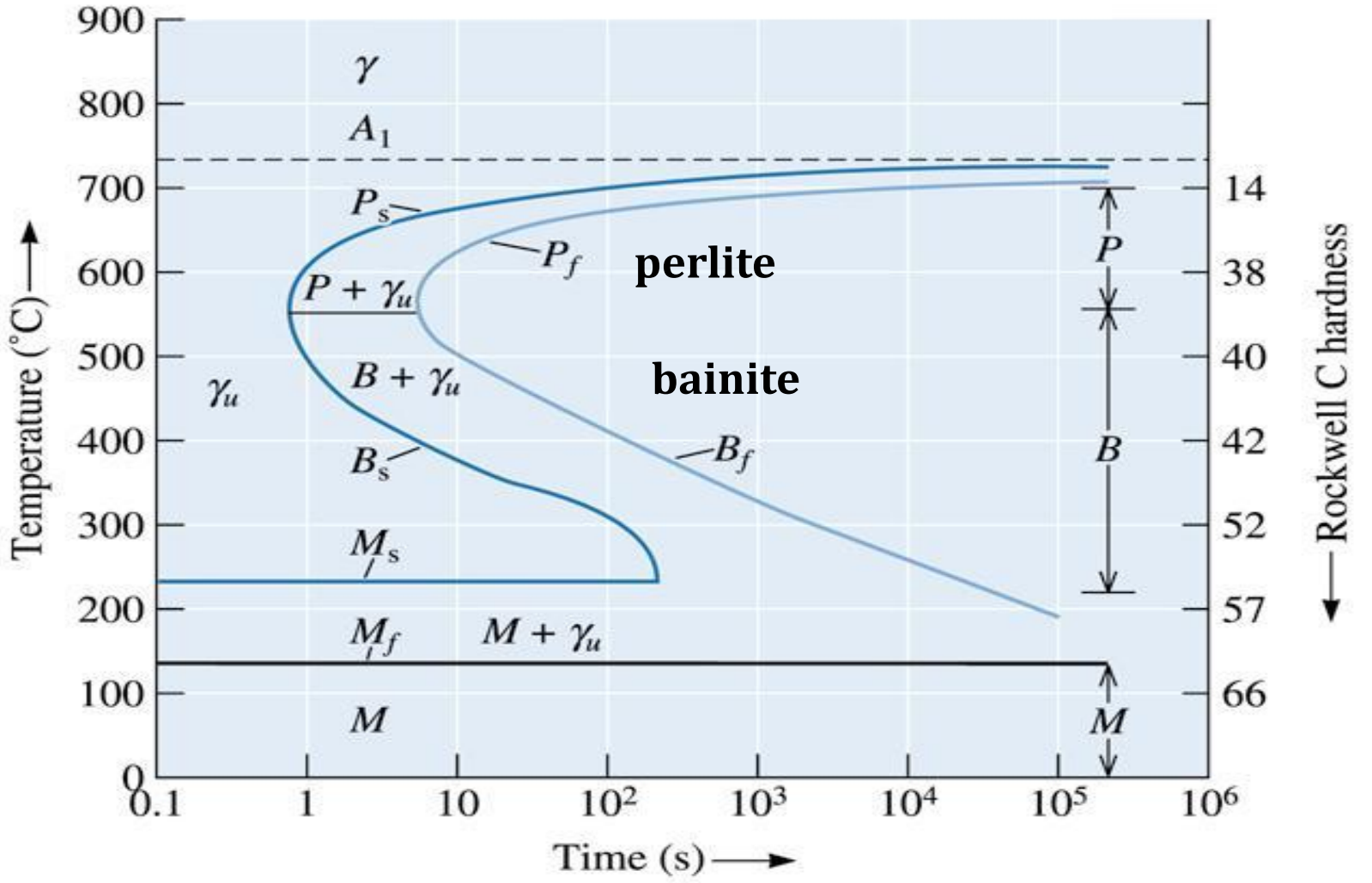


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

La curva sigmoidale è correlata ai tempi di inizio e fine sul diagramma TTT per l'acciaio. In questo caso, l'austenite si sta trasformando in perlite.

Curve TTT

esempio per un acciaio eutettoide



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il diagramma Tempo-Temperatura-Trasformazione(TTT) per un acciaio eutettoide.

Curve TTT

esempio per un acciaio eutettoide

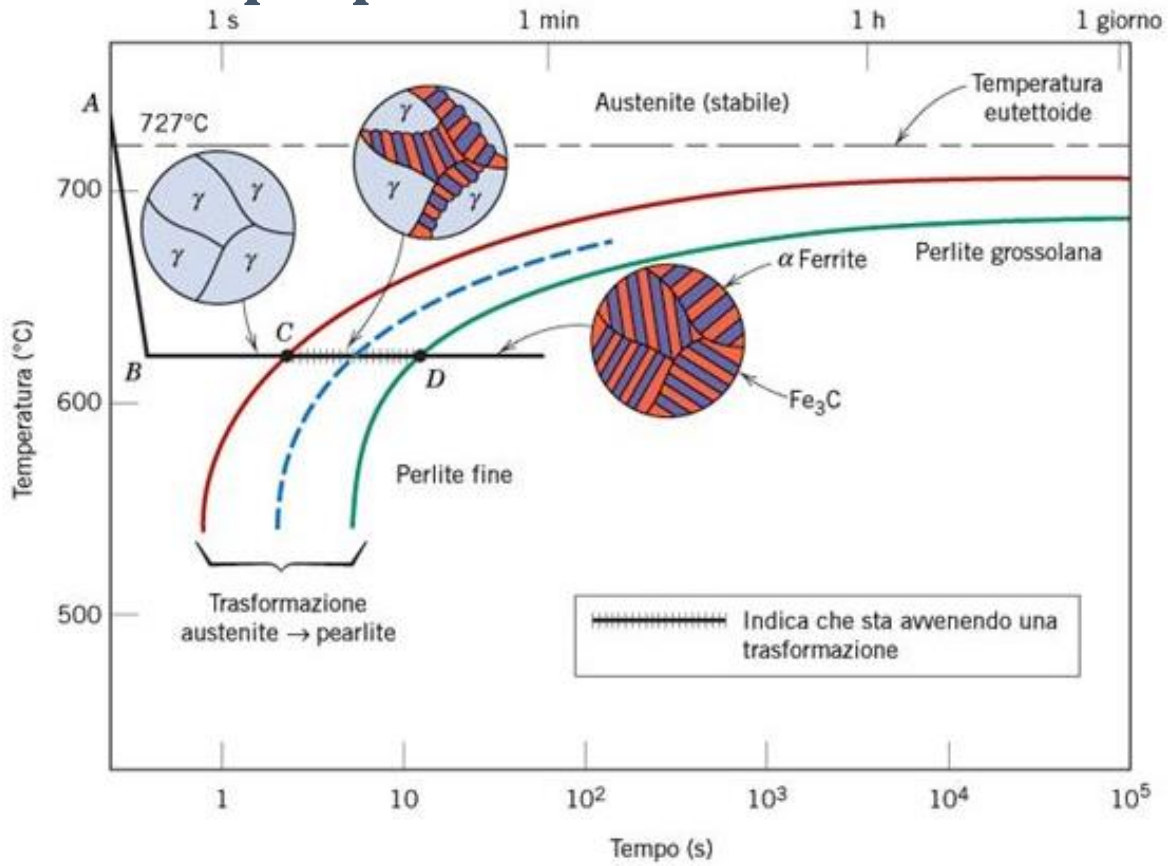


Diagramma di trasformazione isoterma per una lega ferro-carbonio eutettoide, con sovrapposta la curva relativa ad un trattamento isotermico (ABCD). Vengono riportate le microstrutture prime, durante, e dopo la trasformazione austenite-perlite.

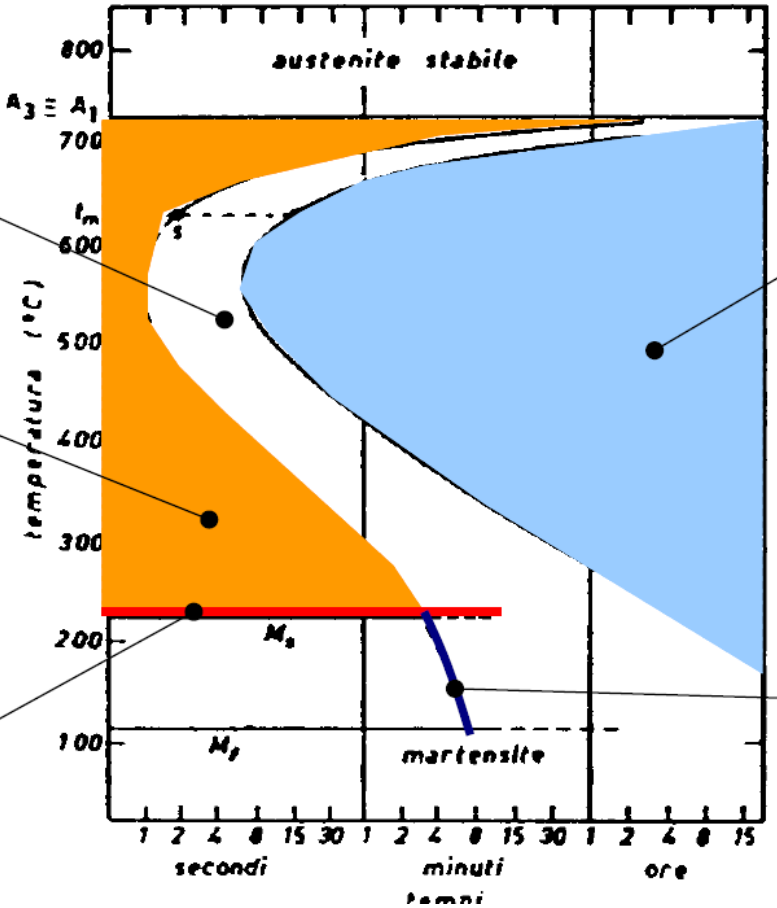
(da H. Boyer (Editor), Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, American Society of Metals, 1977, p. 28)

Curve TTT

II Campo
Trasformazione di (A)
nelle strutture finali

I Campo
Austenite instabile (A)

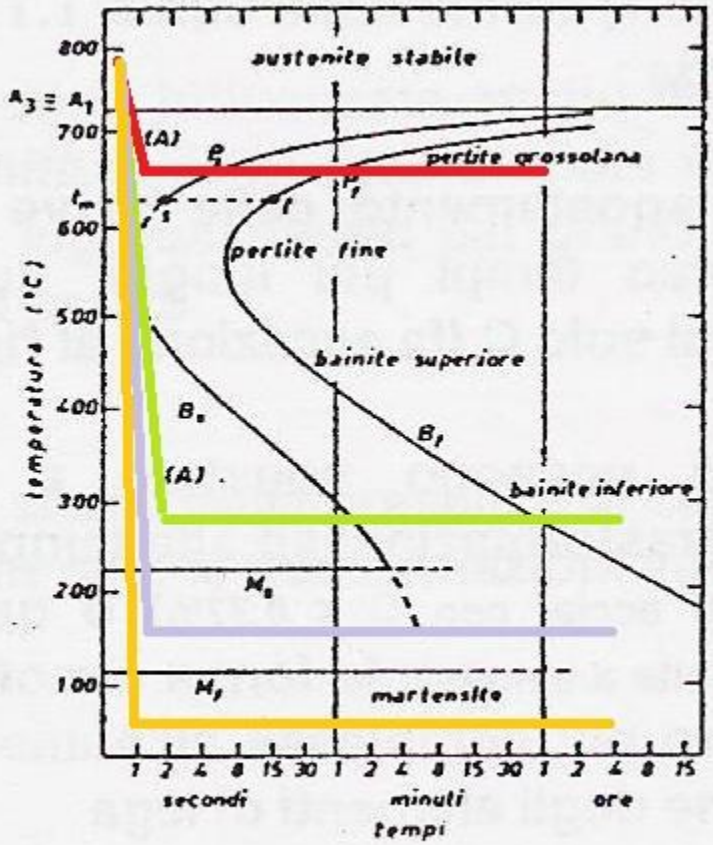
Trasformazione **non isoterma** (A) →M



III Campo
Strutture trasformate

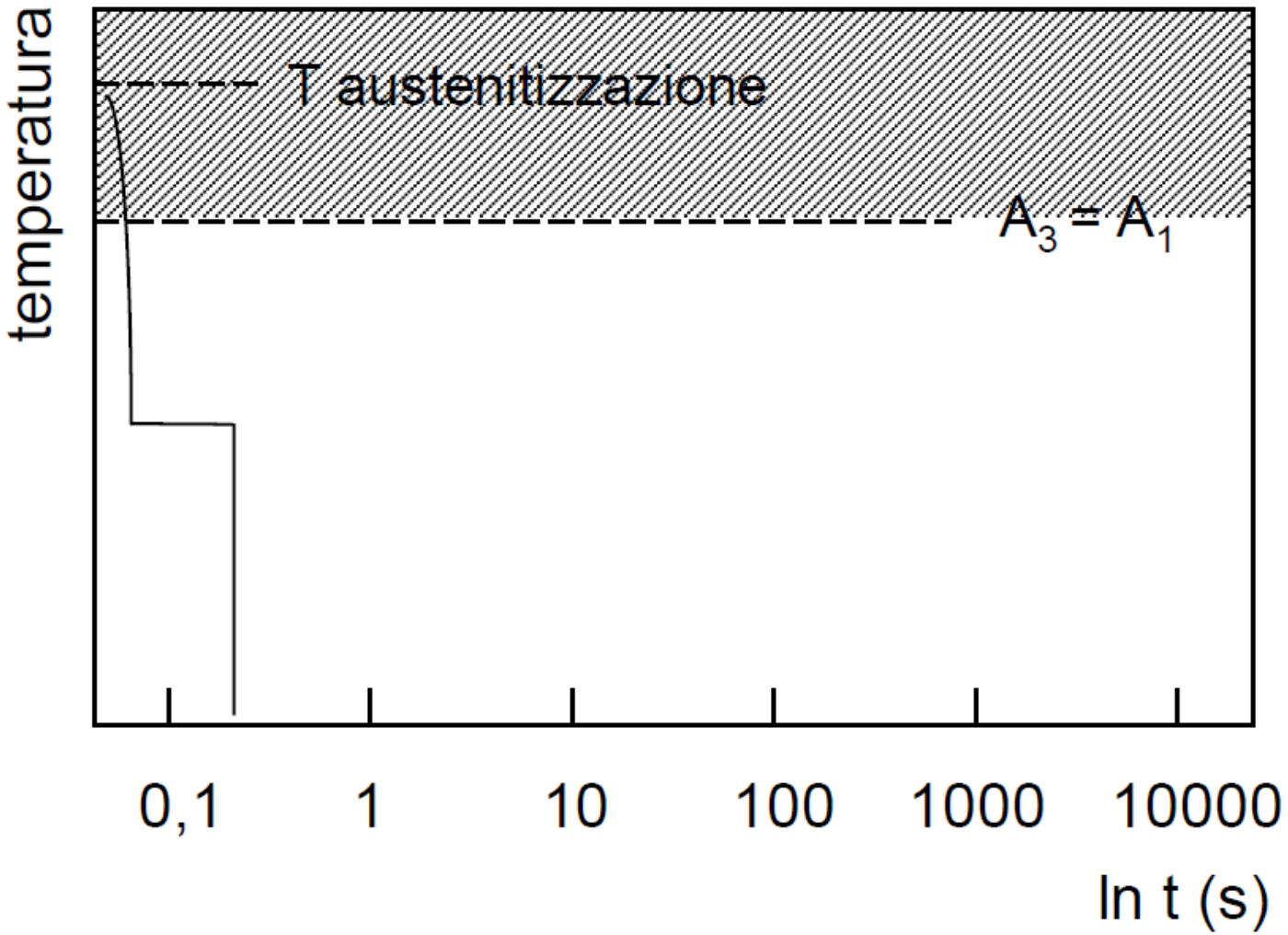
Inizio trasformazione
$(A)_{res}$ →B

Curve TTT

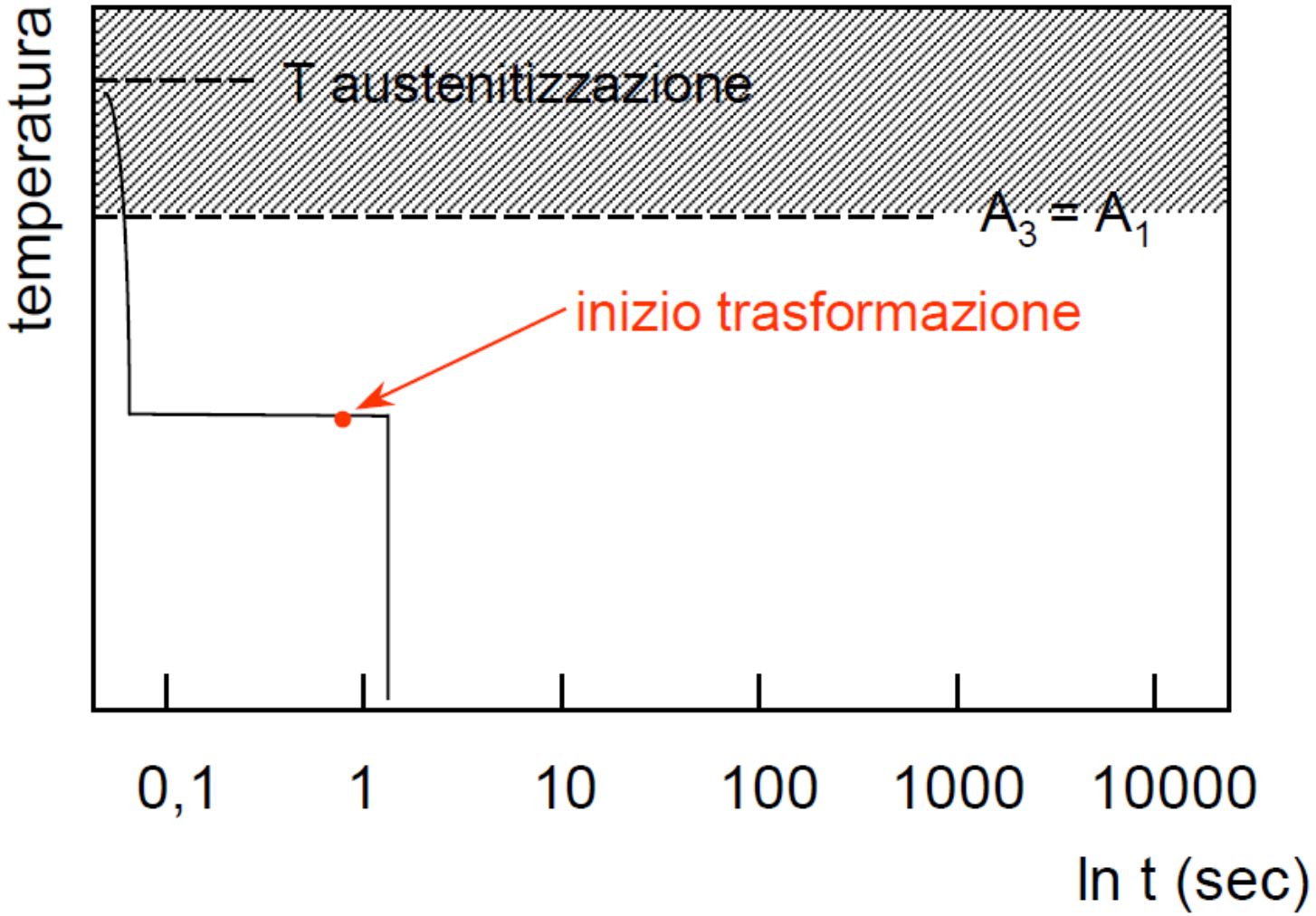


Forma definitiva della curva di Bain per un acciaio eutettoidico

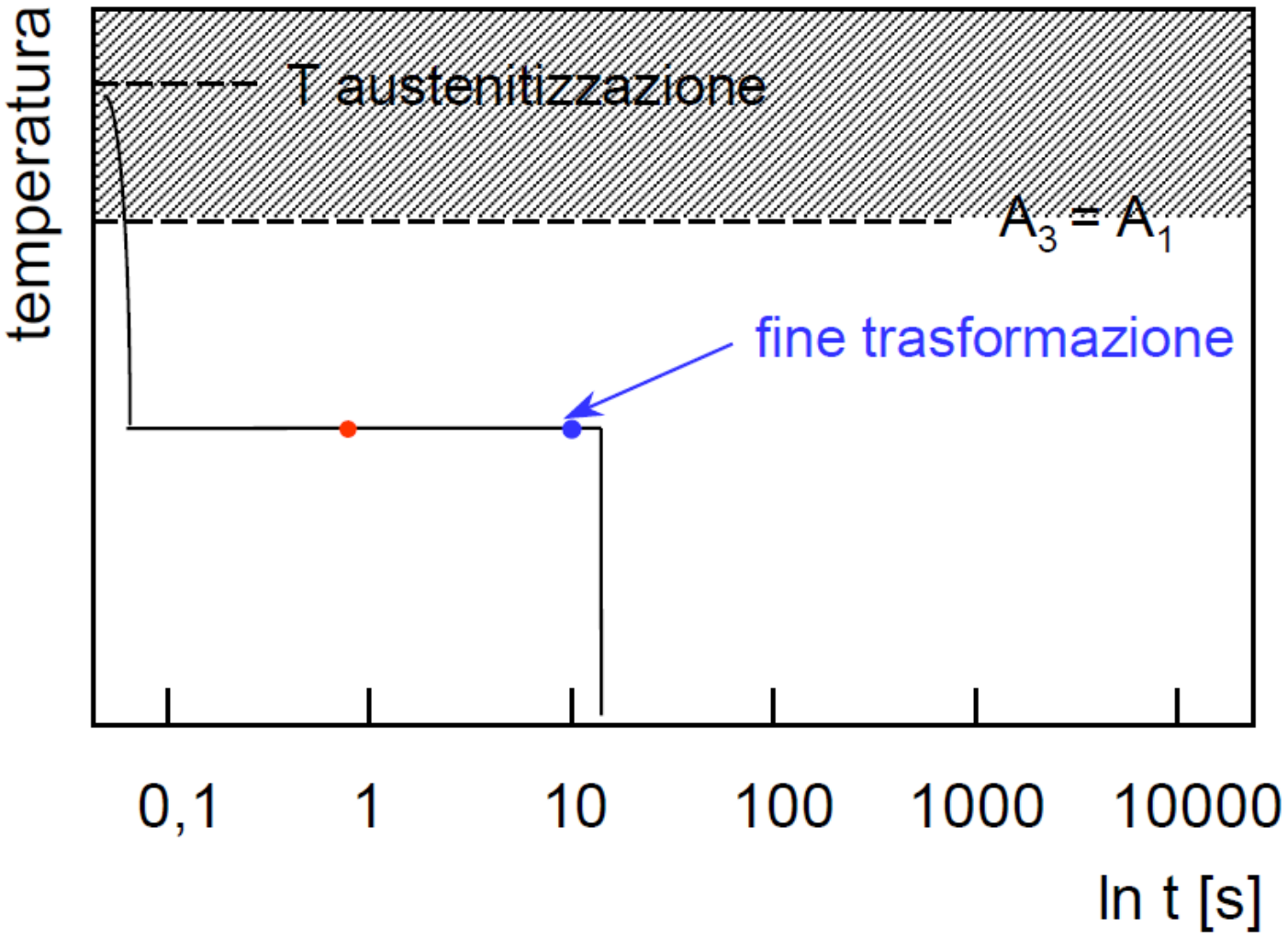
Curve TTT


temperatura
T austenitizzazione
$A_3 = A_1$
0,1
1
10
100
1000
10000
ln t (s)

Curve TTT


temperatura
T austenitizzazione
$A_3 = A_1$
inizio trasformazione
0,1
1
10
100
1000
10000
ln t (sec)

Curve TTT


temperatura
T austenitizzazione
$A_3 = A_1$
fine trasformazione
0,1
1
10
100
1000
10000
ln t [s]

Esempi di diagrammi TTT per composizioni non eutettoidi

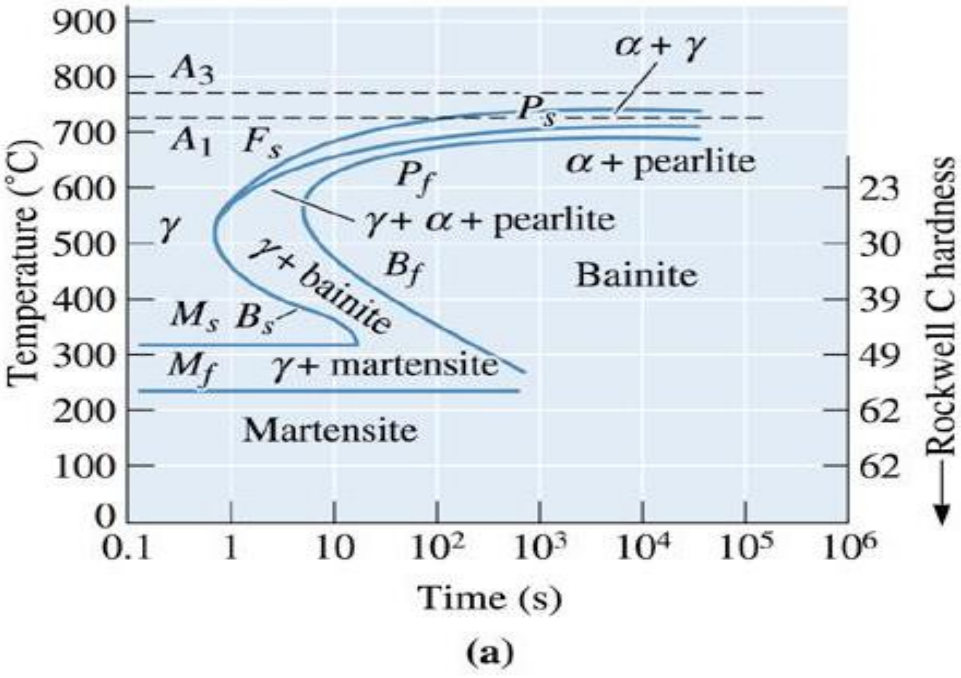


Diagramma TTT per un acciaio 1050.

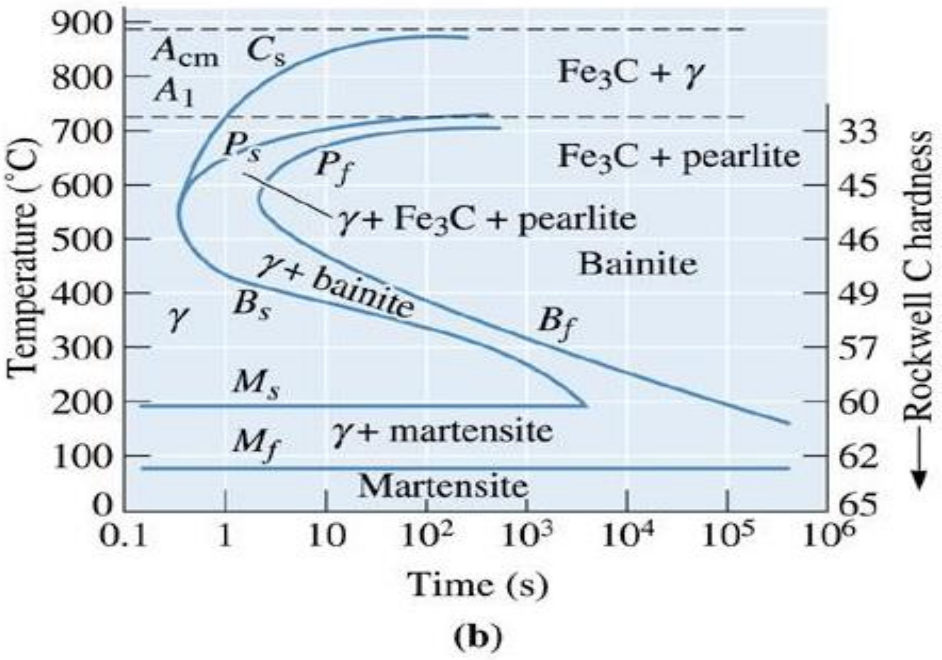
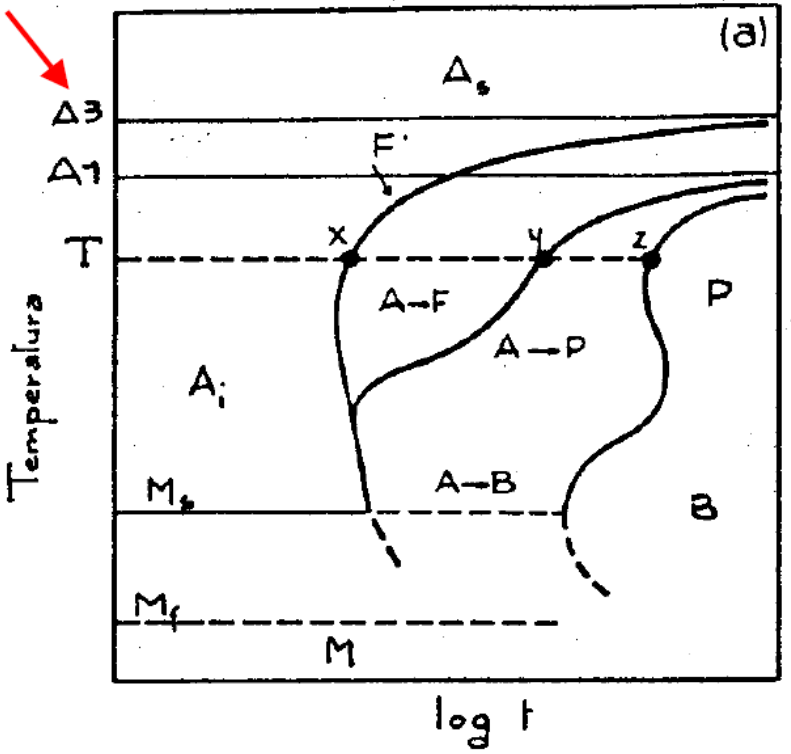
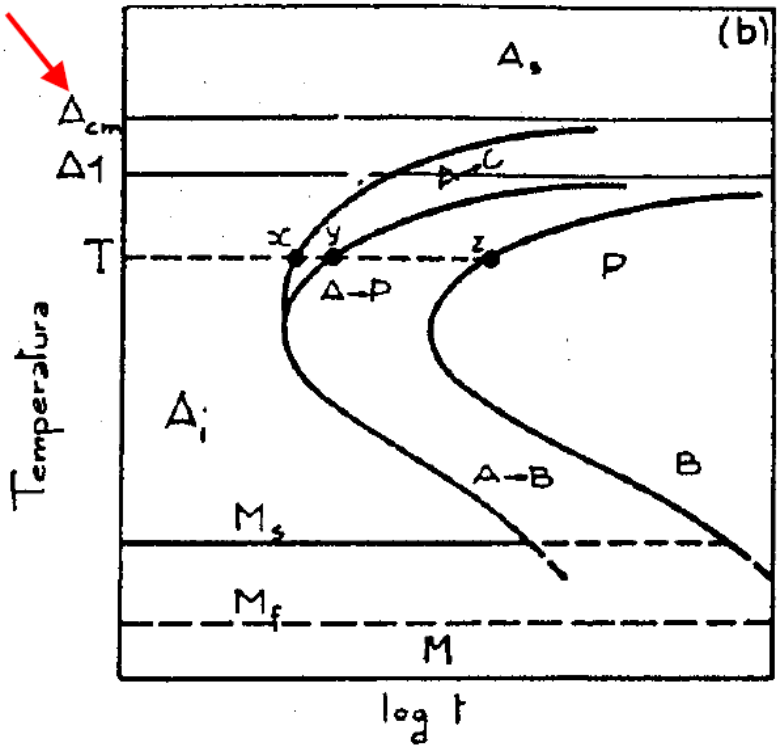


Diagramma TTT per un acciaio 10110.

Esempi di diagrammi TTT per composizioni non eutettoidi

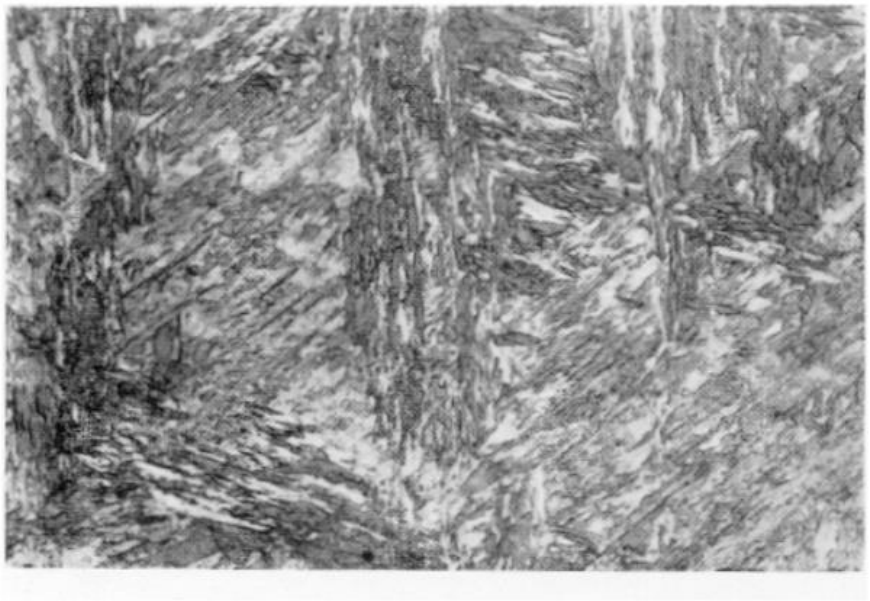


Curve di Bain per un acciaio ipoeutettoidico.



Curve di Bain per un acciaio ipereutettoidico.

Esempi di diagrammi TTT per composizioni non eutettoidi

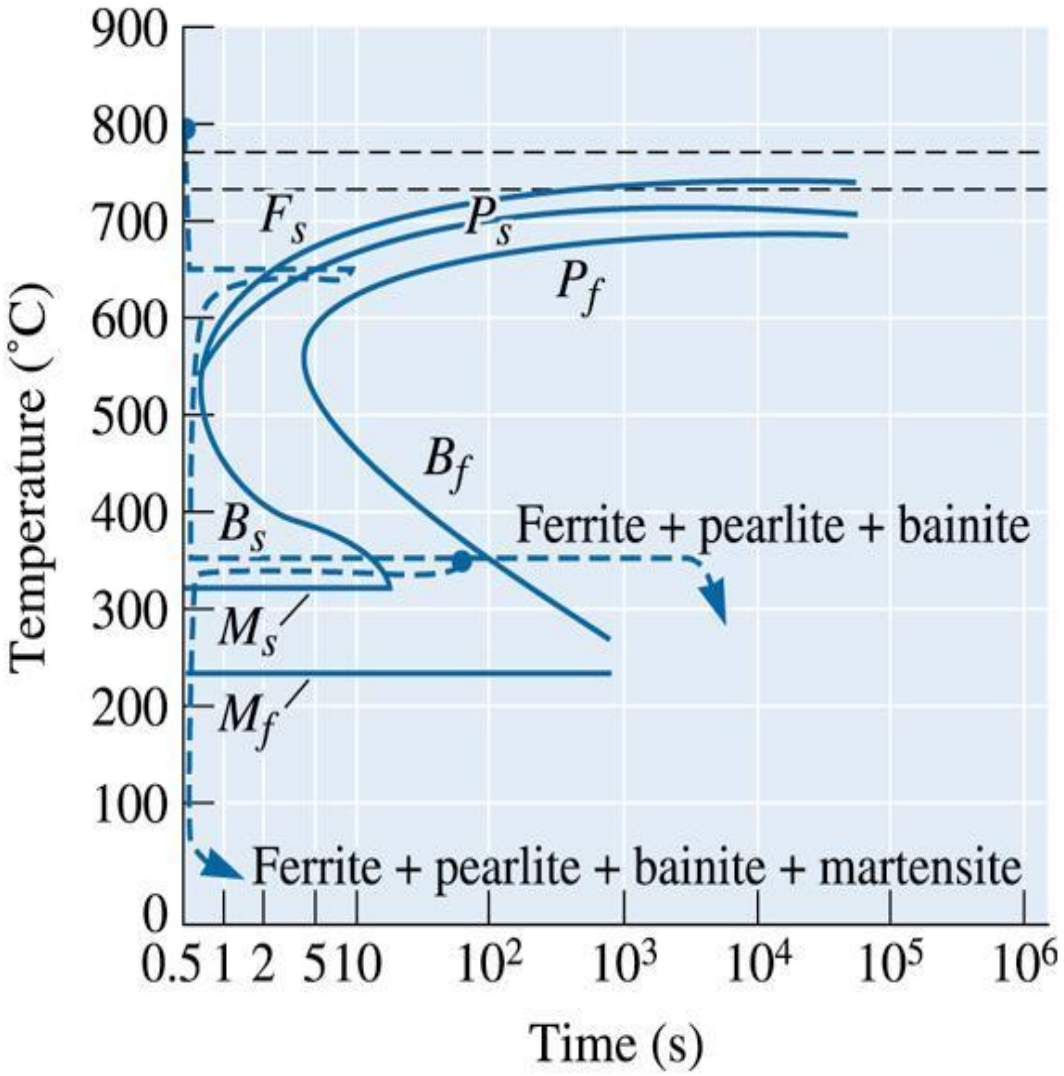


Martensite in acciaio ipoeutettoidico

Martensite in acciaio ipereutettoidico

Esempi di trattamenti termici complessi per ottenere microstrutture complesse

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



Produzione di complicate strutture, interrompendo il trattamento termico isotermico di un acciaio 1050.

Lamelle scure di bainite circondate da martensite (chiara), ottenute interrompendo il processo di trasformazione isotermica. (× 1500).
(ASM Handbook, *Vol. 9 Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073*.)

Influenza degli elementi di lega nei diagrammi TTT

Sia la posizione sia la forma delle curve TTT sono influenzate dagli **elementi di lega**:

- spostamenti delle curve di inizio e di fine trasformazione verso tempi più lunghi, quindi verso destra, rispetto agli acciai al solo C (fa eccezione il Co)

Anche le temperatura M_s e M_f subiscono variazioni:

- tutti gli elementi di lega, tranne il Co, spostano verso il basso M_s e M_f

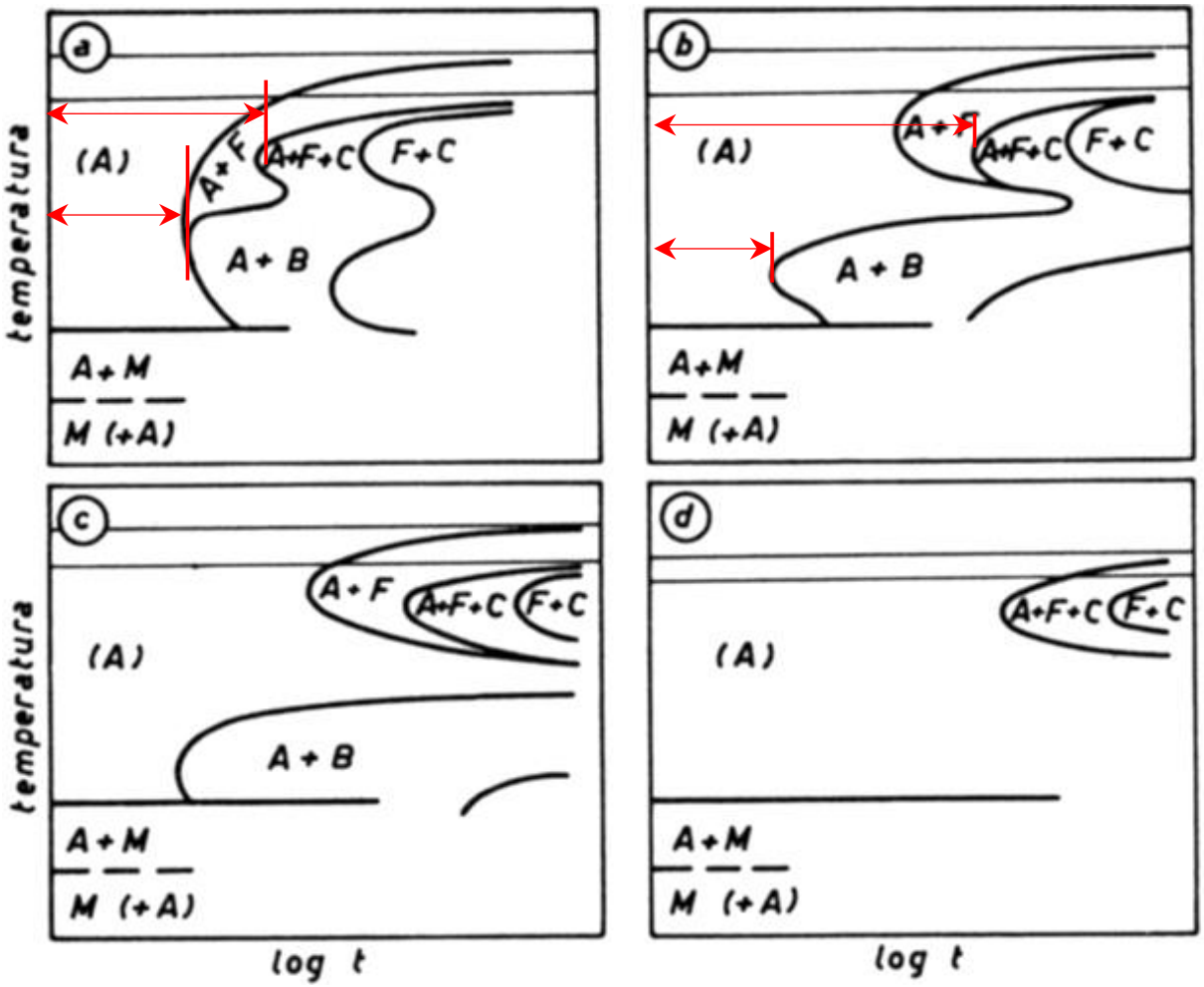
Questo può causare la presenza di austenite a temperatura ambiente.

Influenza degli elementi di lega nei diagrammi TTT

Cr, Mo

Acciai da bonifica (↑ elementi in lega)

notevole stabilità dell'austenite in campo temperature intermedie

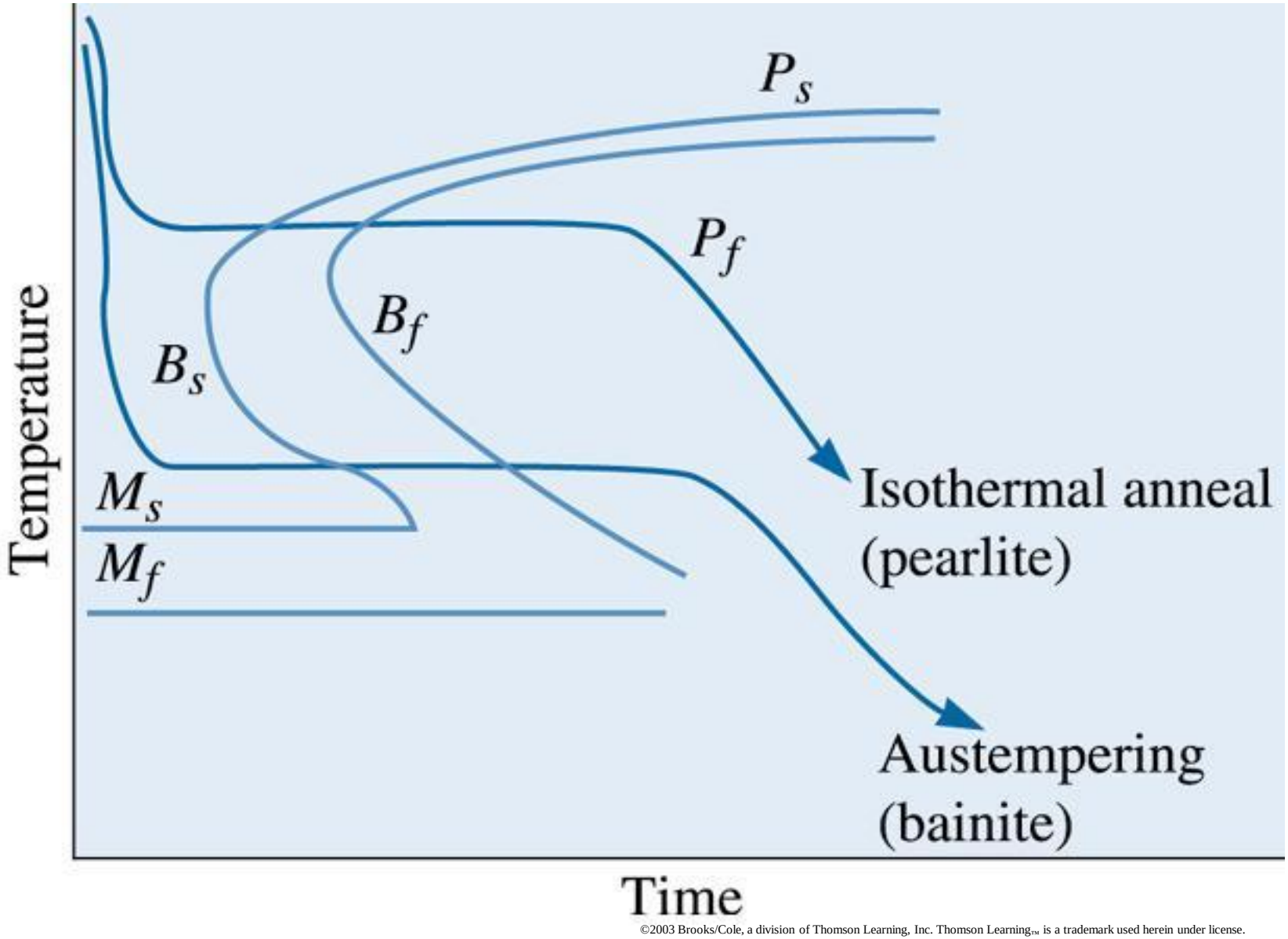


Acciai inox martensitici

trasformazione finita solo in campo martensitico

Trattamenti termici isotermi

- **Austempering**: detta anche tempra bainitica, trattamento termico isotermico mediante il quale l'austenite si trasforma in bainite. In breve, la sosta nel bagno termale, ad una temperatura poco superiore a M_s (temperatura di inizio trasformazione della martensite), porta alla completa trasformazione dell'austenite in bainite inferiore, ottenendo un materiale più tenace, meno tensionato e senza necessità di rinvenimento.
- **Ricottura isotermica**: trattamento termico di un acciaio mediante austenitizzazione, raffreddamento rapido a una temperatura tra A1 e il naso della curva TTT e mantenimento fino a quando l'austenite si trasforma in perlite.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

I trattamenti termici di austempering e ricottura isotermica in un acciaio 1080.

Bainite

Soluzione solida ferro α + aghi di carburo (forma aciculare).

A differenza della martensite, ci sono ancora le strutture di equilibrio.

La diffusione degli atomi di C è ancora possibile, ma i carburi che si formano sono sempre più fini, non visibili al microscopio ottico. A differenza della perlite non ha aspetto lamellare : Fe_3C presente sottoforma di particelle isolate in matrice α.

Nell'intervallo [500°C - m_s=230°C] la trasformazione isoterma di un acciaio eutettoidico:

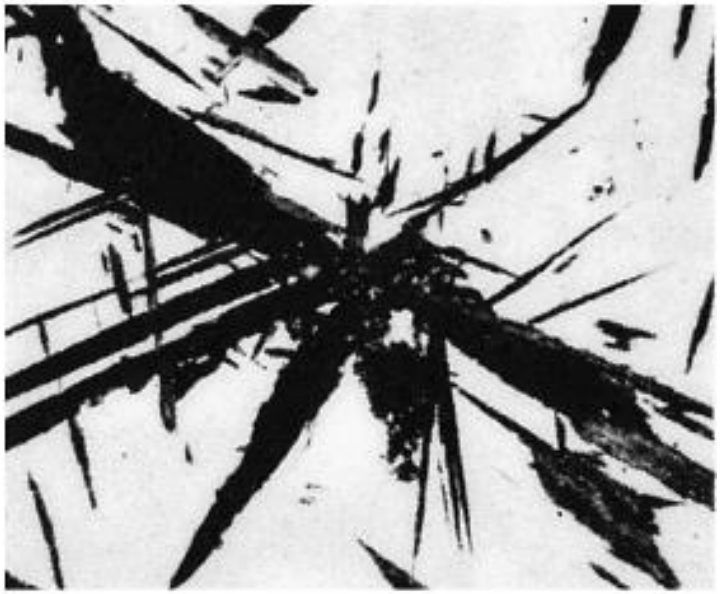
austenite → bainite (superiore o inferiore)

trasformazione bainitica: nucleazione + accrescimento

Esempi di microstrutture bainitiche

(a)

Bainite superiore (x 600)

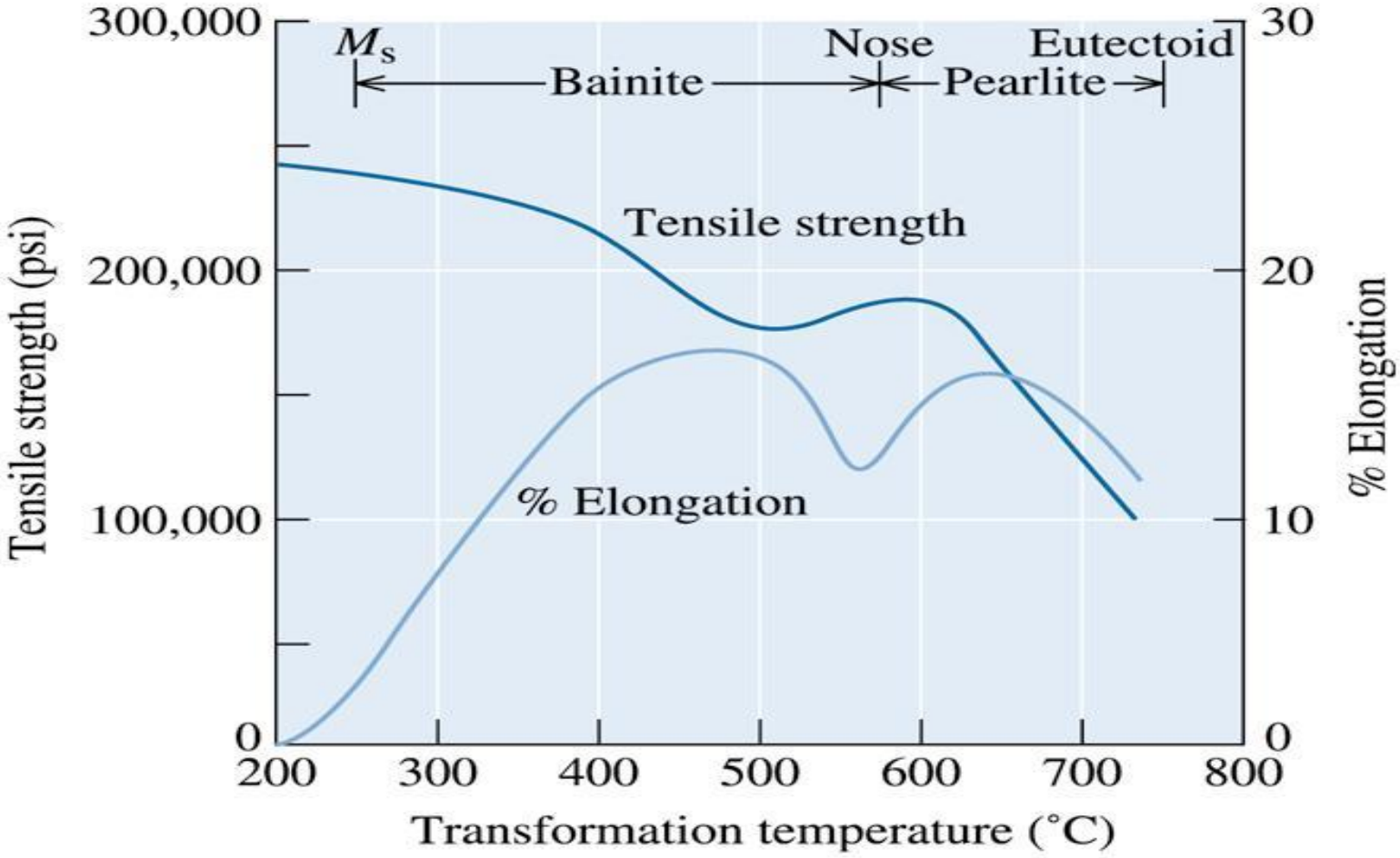


(b)

Bainite inferiore (x 400)

From ASM Handbook, *Vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073*.

Effetto della temperatura di trasformazione sulle proprietà



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

L'effetto della temperatura di trasformazione sulle proprietà di un acciaio eutettoide.

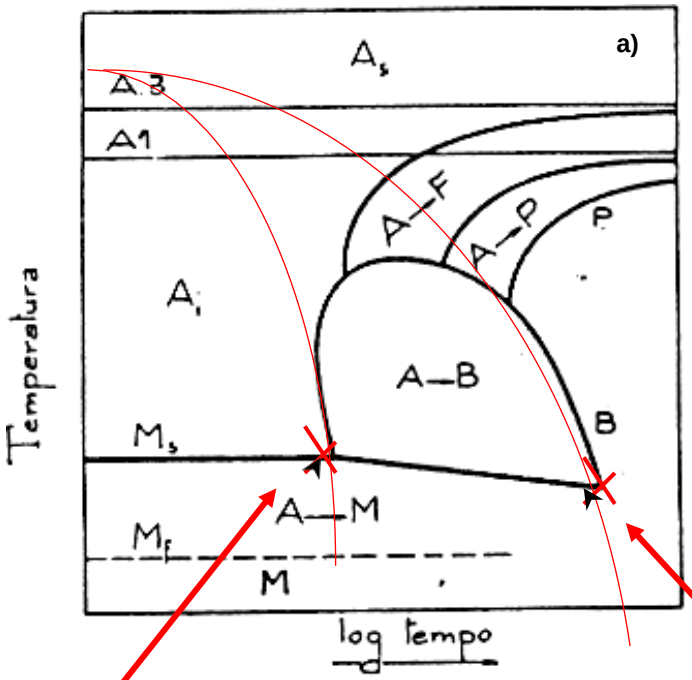
Curve di trasformazione anisoterma

Curve di trasformazione anisoterma dell'austenite
Curve CCT (Continuous Cooling Curves)

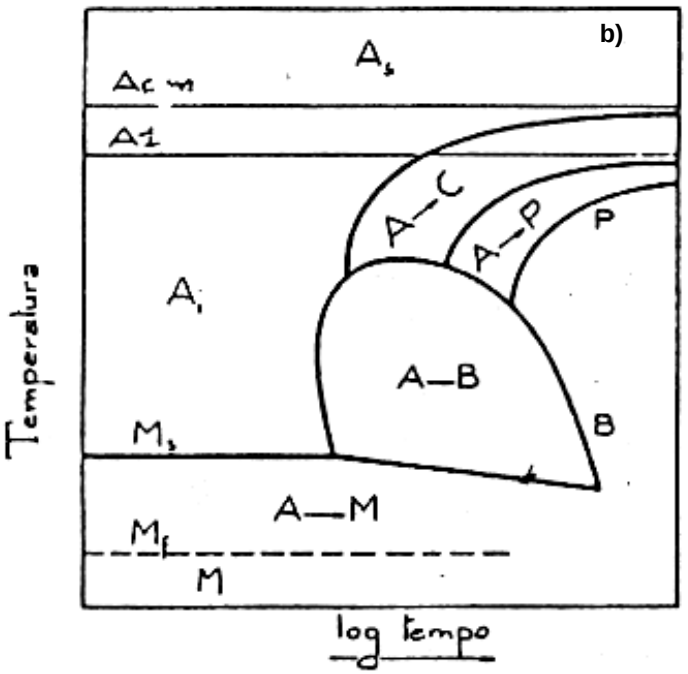
Nella pratica industriale i trattamenti termici eseguiti sono contraddistinti da leggi di raffreddamento continue.

La maggiore o minore severità della legge di raffreddamento produce per l'acciaio riscaldato a $T>T_{austenitizzazione}$ diverse strutture a $T_{ambiente}$.

Curve di trasformazione anisoterma



Acciaio ipoeutettoidico



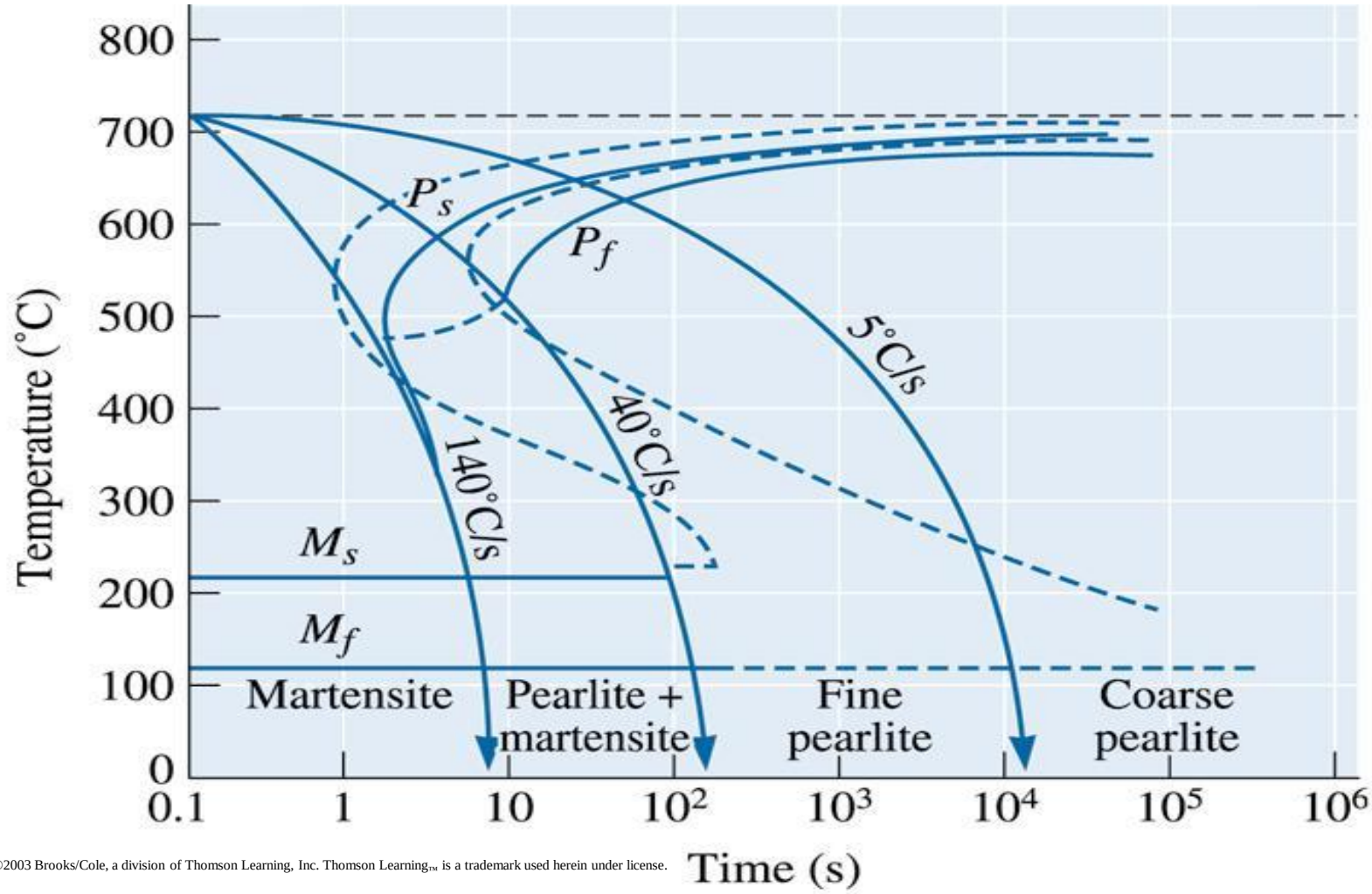
Acciaio ipereutettoidico

Vs = velocità critica superiore
velocità minima di raffreddamento tale per cui a temperatura ambiente si ha **solo** struttura martensitica

Vi = velocità critica inferiore
velocità massima di raffreddamento tale per cui a temperatura ambiente **non si ha** struttura martensitica

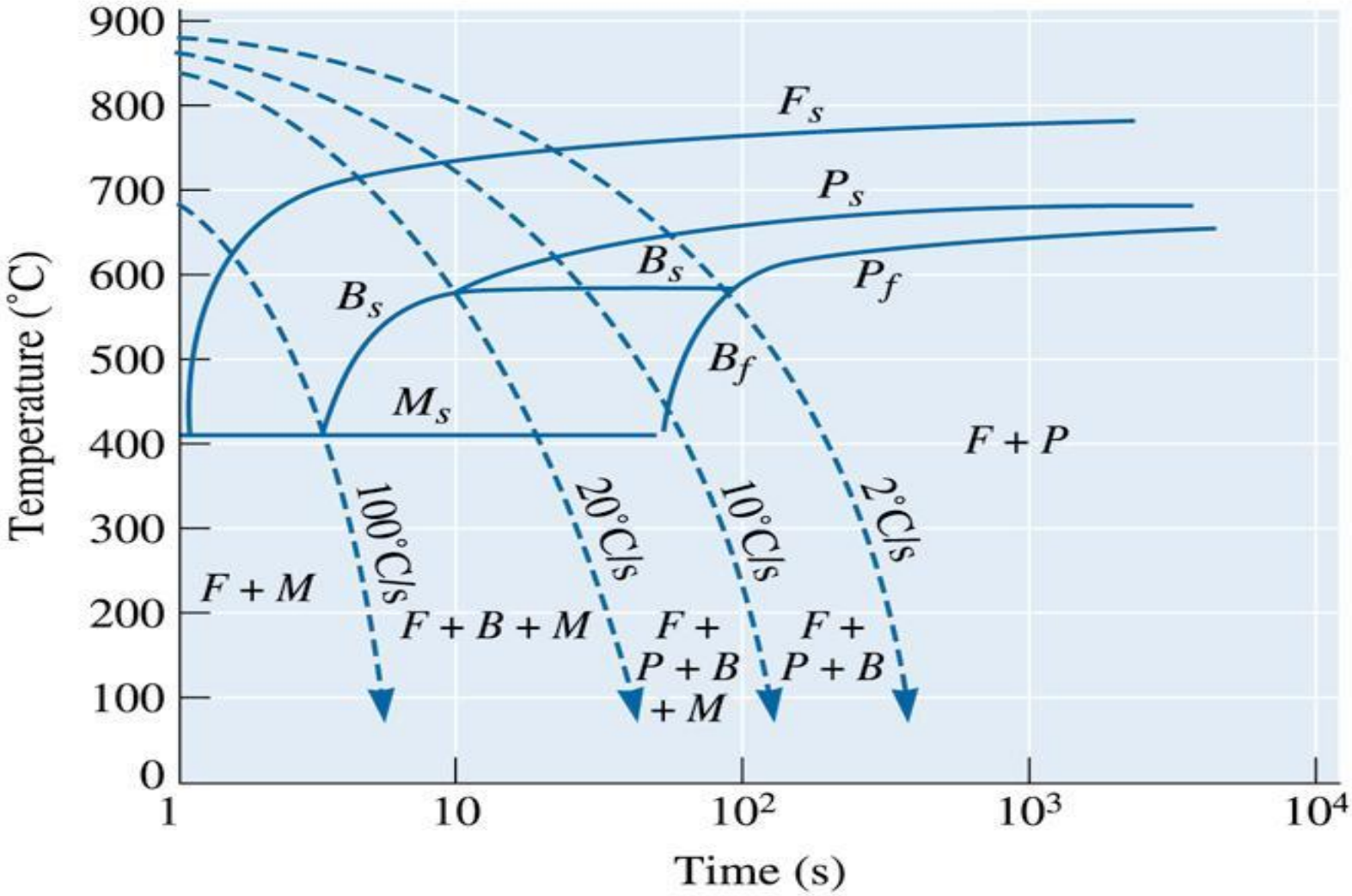
Diagrammi CCT

Continuous Cooling Transformation



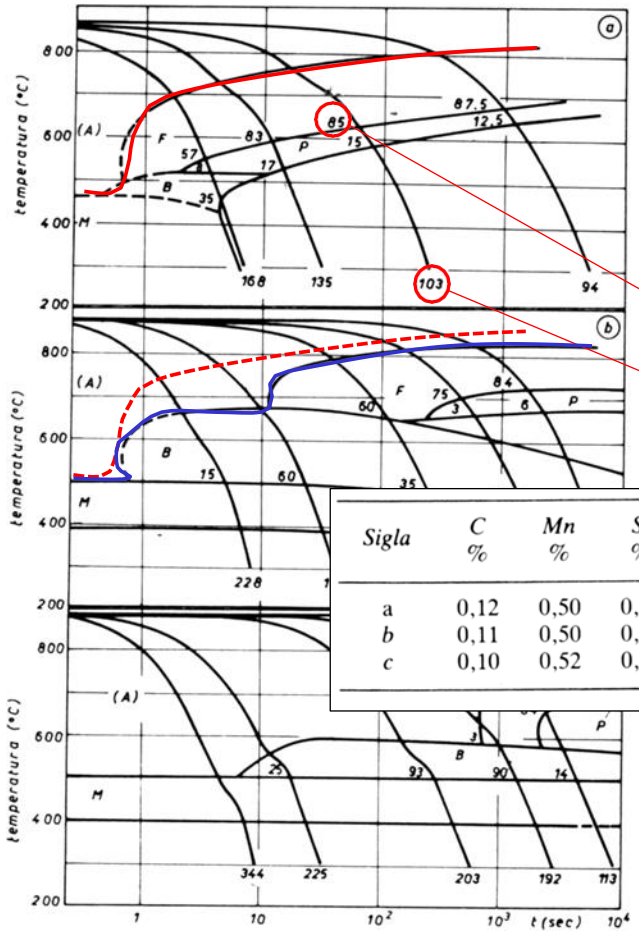
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il diagramma CCT (linee continue) per un acciaio 1080 rispetto al diagramma TTT (linee tratteggiate).



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Diagramma CCT per un acciaio basso legato con 0,2%C.



Processo produttivo: laminazione a caldo

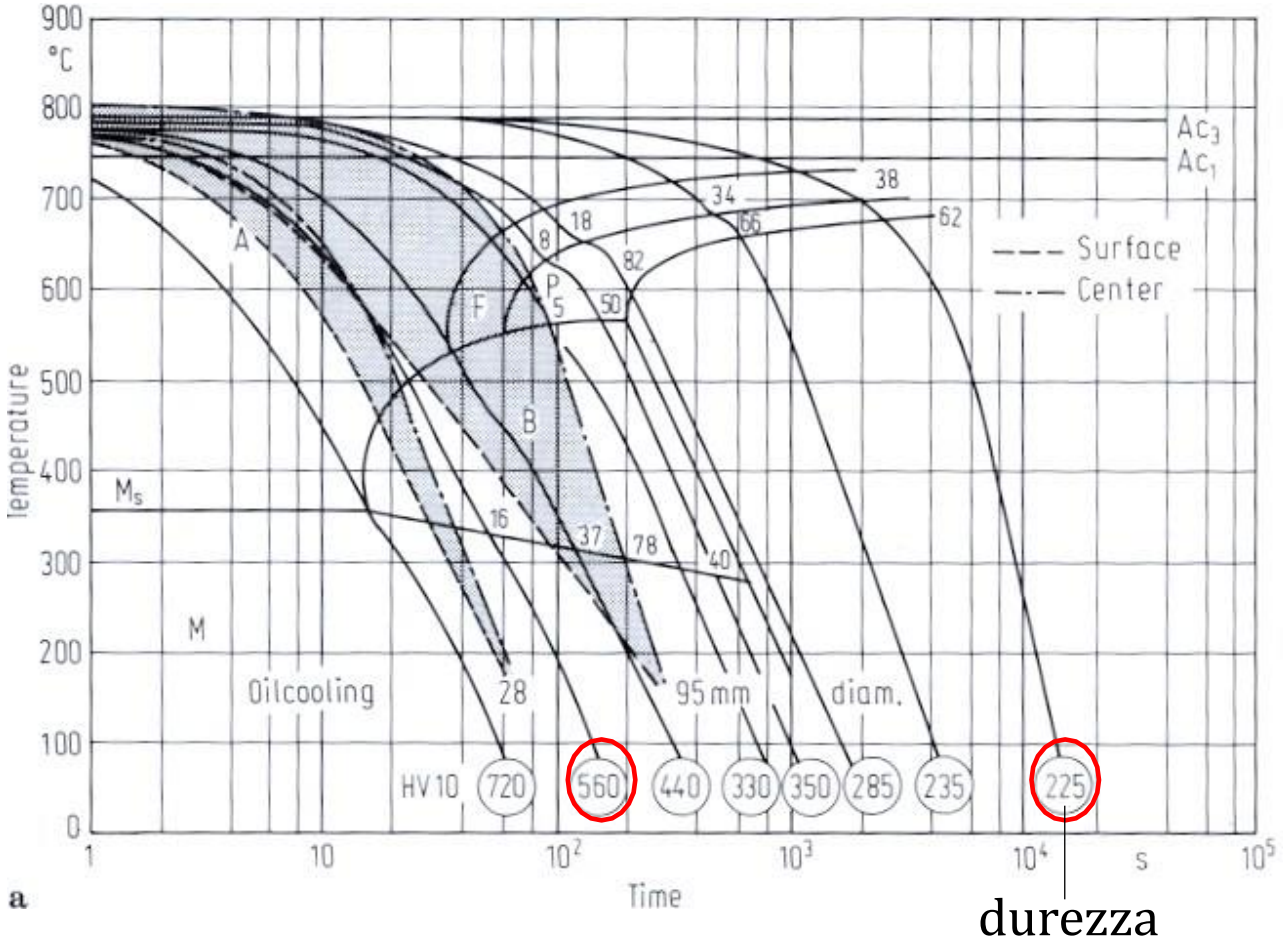
$T_{austenitizzazione}$= 920 °C Stessa dimensione del grano

% (A) trasformata

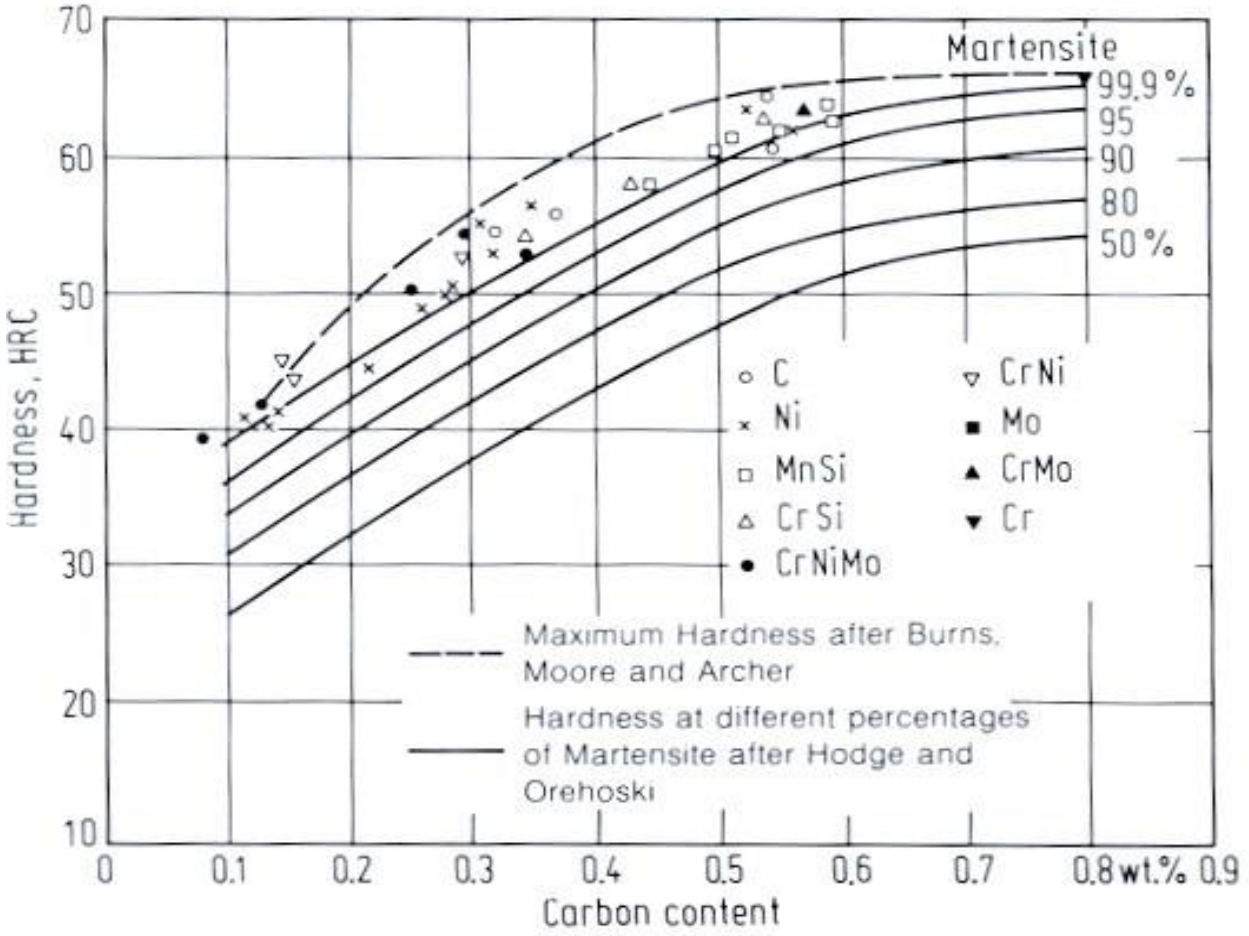
Durezza HB

Sigla	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Mo %	N %	Al %	B %
a	0,12	0,50	0,16	0,010	0,004	tr.	0,0005	—	—
b	0,11	0,50	0,22	0,007	0,002	0,56	0,002	0,003	—
c	0,10	0,52	0,21	0,005	0,002	0,55	0,0007	0,050	0,006

Caso reale curva CCT



Proprietà meccaniche in funzione della microstruttura

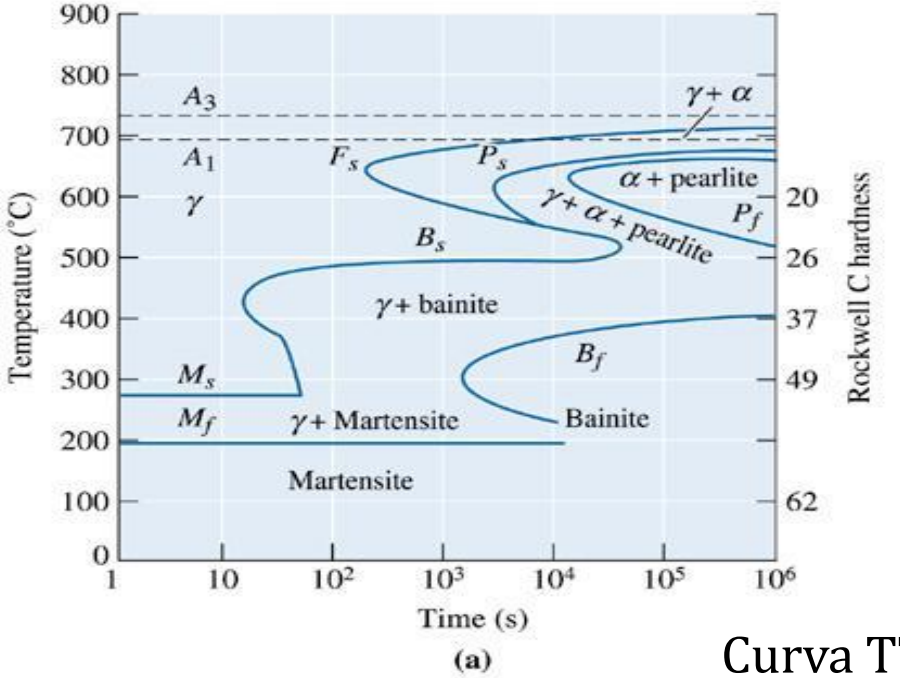


Durezza HRC funzione della % di C e della % di martensite

Effetto degli elementi di lega

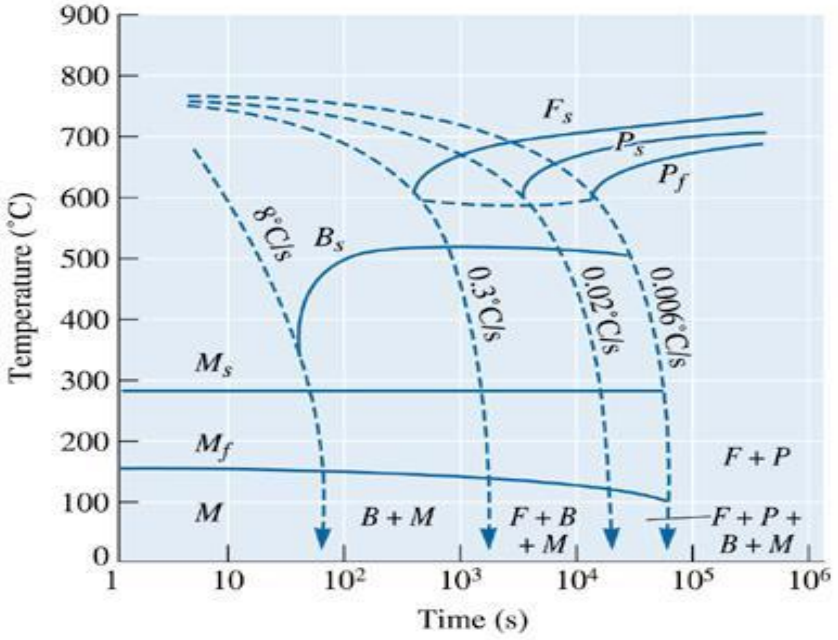
- **Temprabilità**: gli acciai legati hanno un'alta capacità di tempra.
- **Effetto sulla stabilità di fase**: quando si aggiungono elementi di lega all'acciaio, la stabilità binaria Fe-Fe_3C viene influenzata e il diagramma di fase viene modificato.
- **Forma del diagramma TTT**
- **Ausforming**: aus(tenitic) + (de)form trattamento termomeccanico in cui l'austenite viene deformata plasticamente al di sotto della temperatura A1, quindi viene trasformata in bainite o martensite.
- **Rinvenimento**: gli elementi di lega riducono il tasso di rinvenimento rispetto a quello di un acciaio al carbonio.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



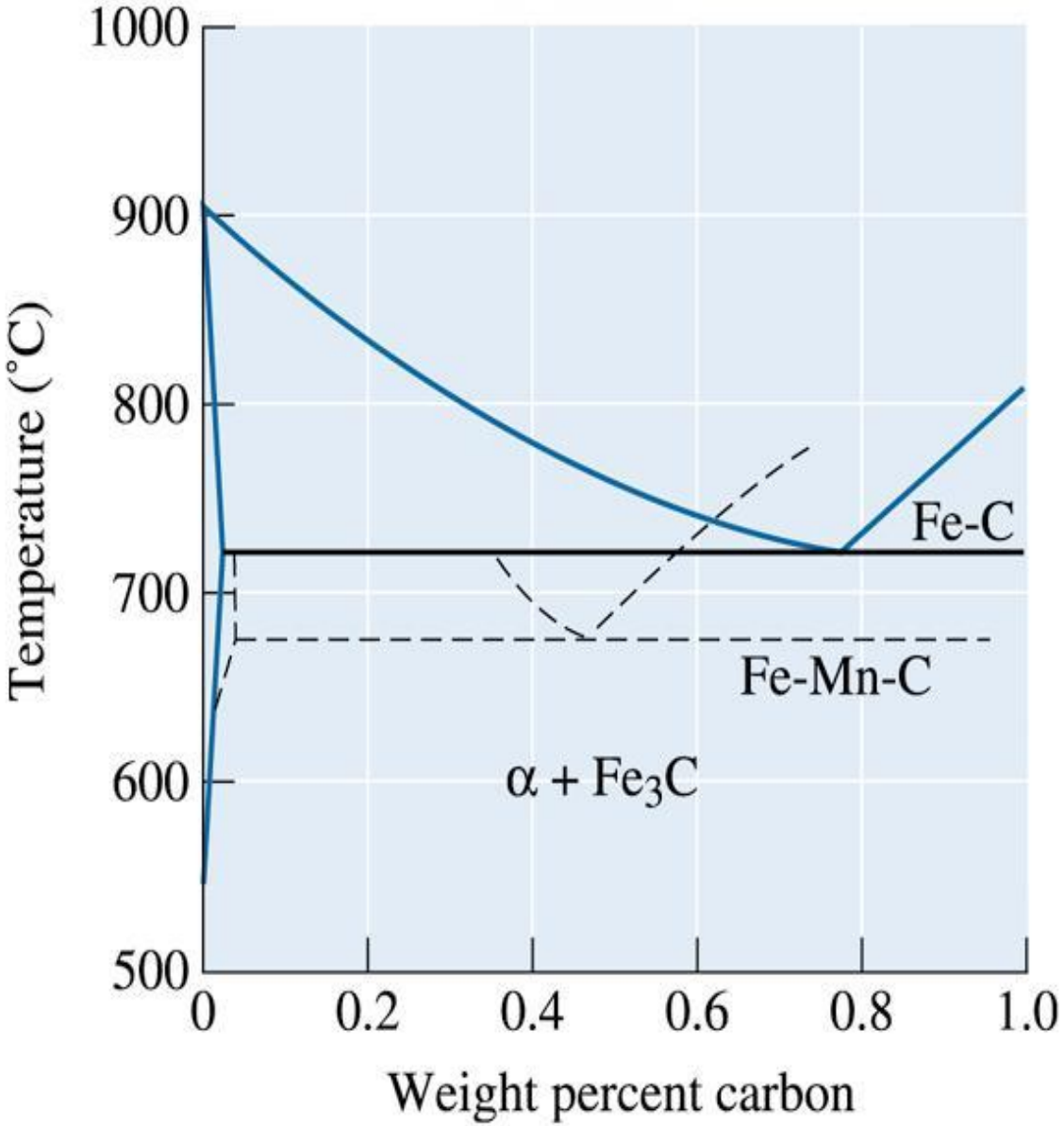
(a)

Curva TTT (a) e CCT (b) per un acciaio 4340.



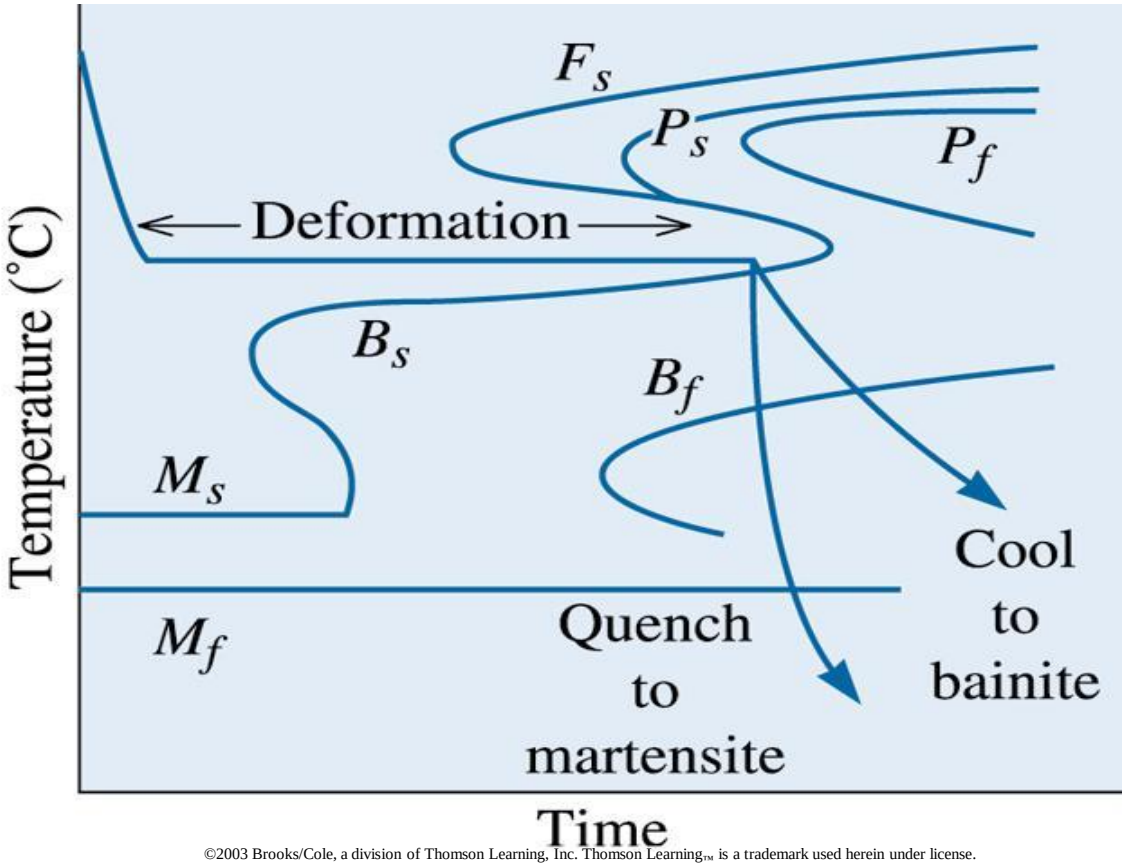
(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



L'effetto del 6% di manganese sugli intervalli di stabilità delle fasi nella porzione eutettoide del diagramma delle fasi Fe-Fe_3C.

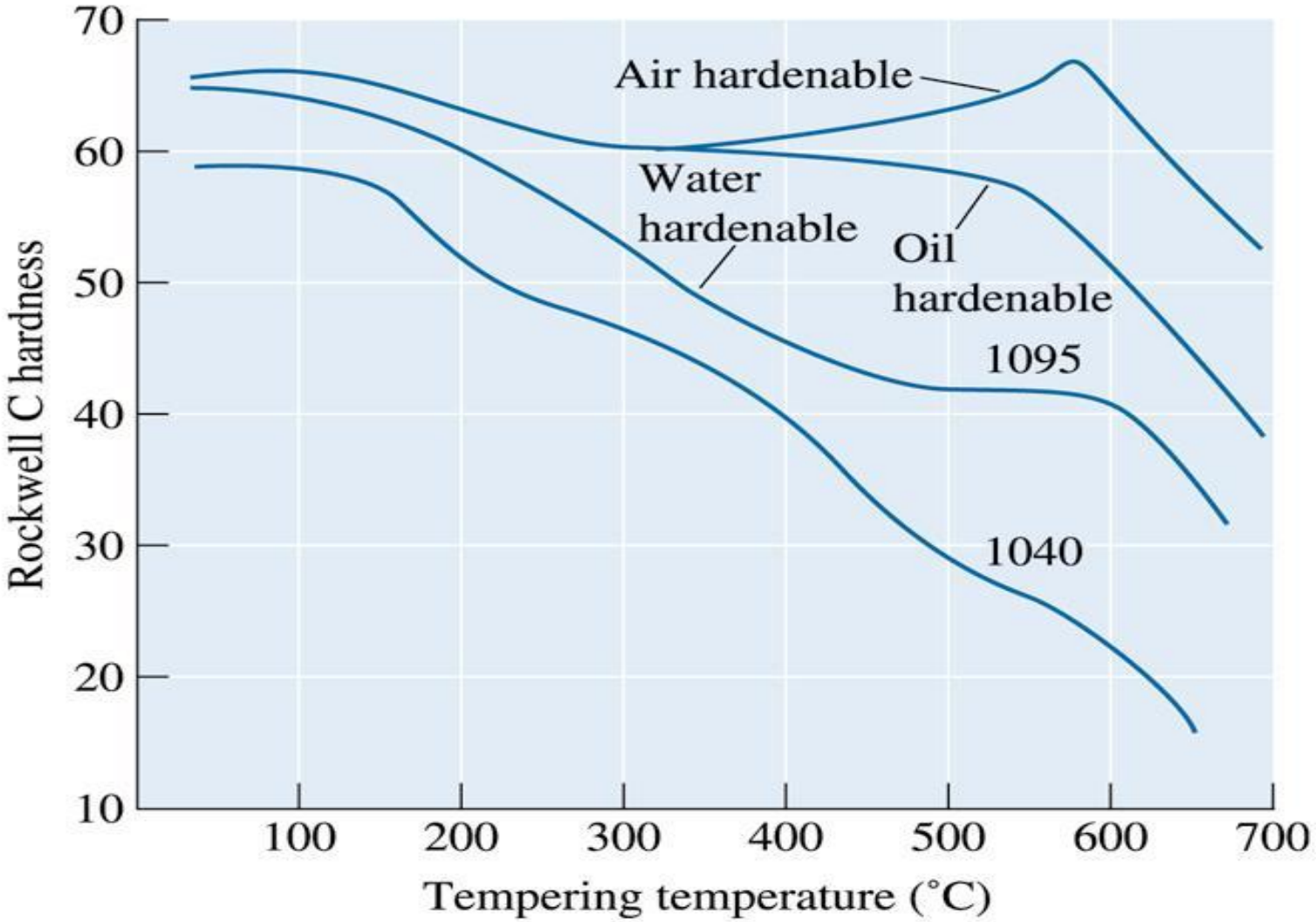
Ausforming



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Quando gli elementi in lega introducono una regione di alloggiamento nel diagramma TTT, l'acciaio può subire un trattamento di **ausforming**, ovvero una lavorazione meccanica eseguita nel campo della trasformazione dell'austenite metastabile e successivo raffreddamento.

Le opzioni sono molteplici dal campo A+F al di sopra di Ar1, a quello F+P, alle trasformazioni a freddo nel campo bainitico (indicata in fig. 13.14) e martensitico. Quest'ultimo TTM prende il nome di ausforming e può prevedere un successivo trattamento di rinvenimento.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

L'effetto di elementi leganti sulle fasi formate durante la tempra degli acciai. L'acciaio temprabile all'aria mostra un picco di indurimento secondario.

Trattamenti meccanici

Consistono in azioni di deformazione permanente dei materiali mediante applicazione di sforzi meccanici.

Agiscono deformando la struttura interna omogeneizzandola ed evitando possibili fessure e cavità interne.

A FREDDO:

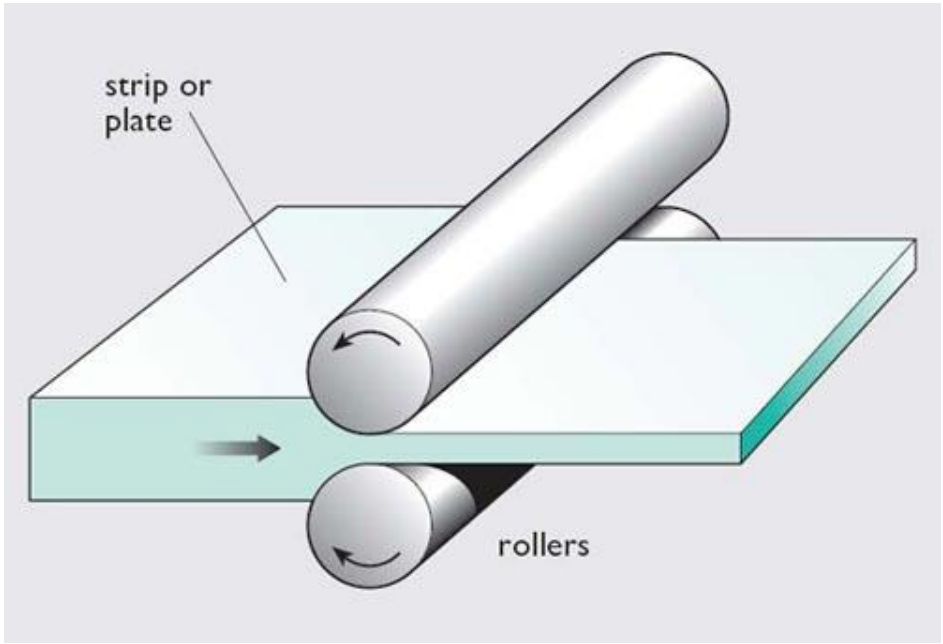
Laminazione,
Trafilatura
Martellatura

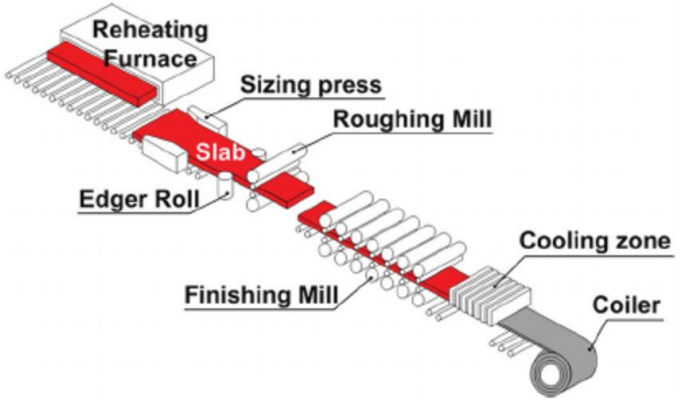
A CALDO:

Estrusione
Forgia
Stampaggio a caldo

Lavorazione a freddo e caldo

Laminazione (rolling)

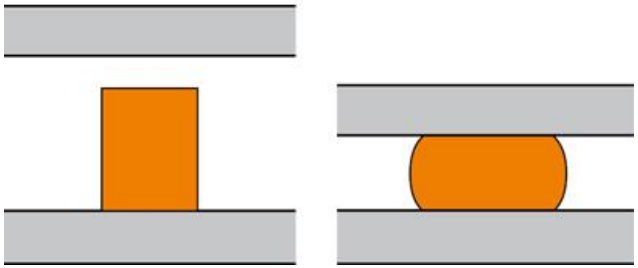




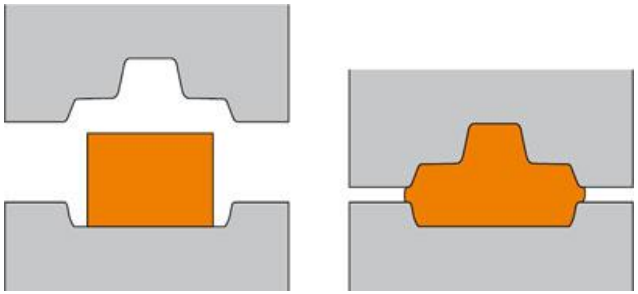
Lavorazione a freddo e caldo

Forgiatura (forging)

A stampo aperto

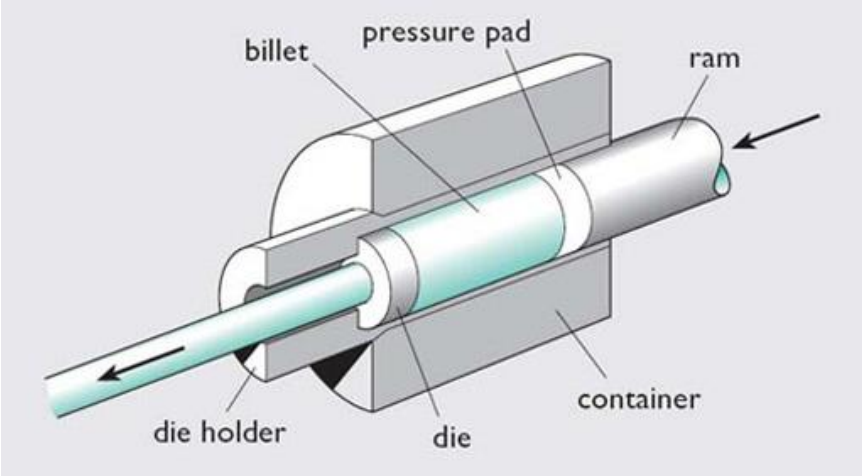


A stampo chiuso



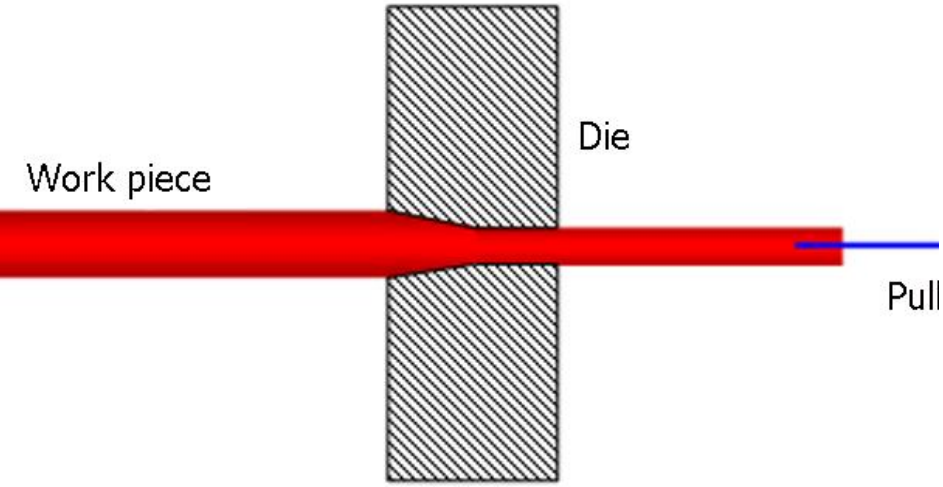
Lavorazione a freddo e caldo

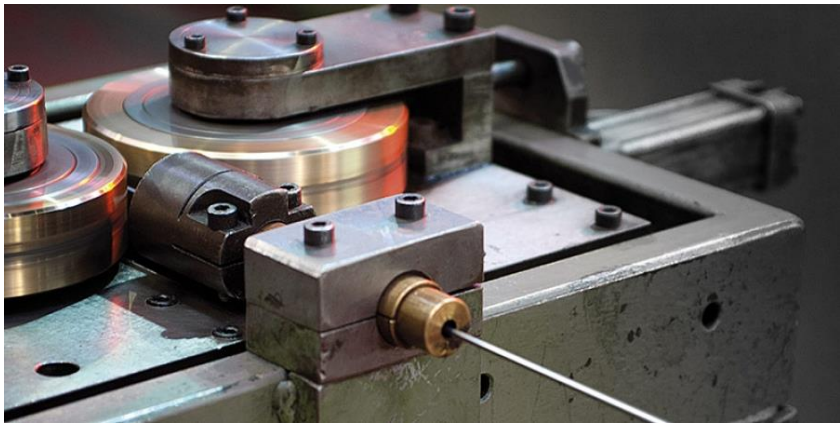
Estrusione (extrusion)



Lavorazione a freddo e caldo

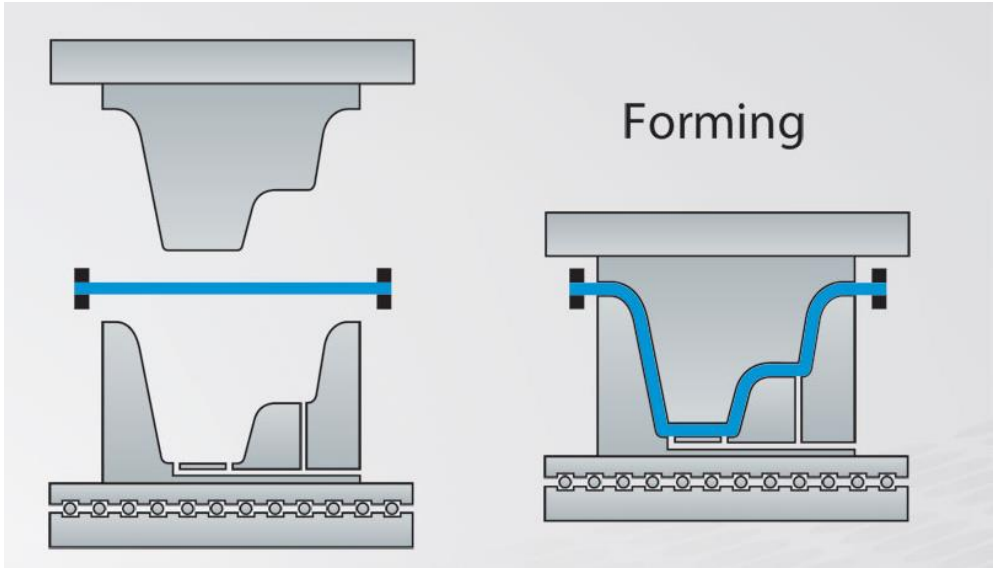
Trafilatura (drawing)

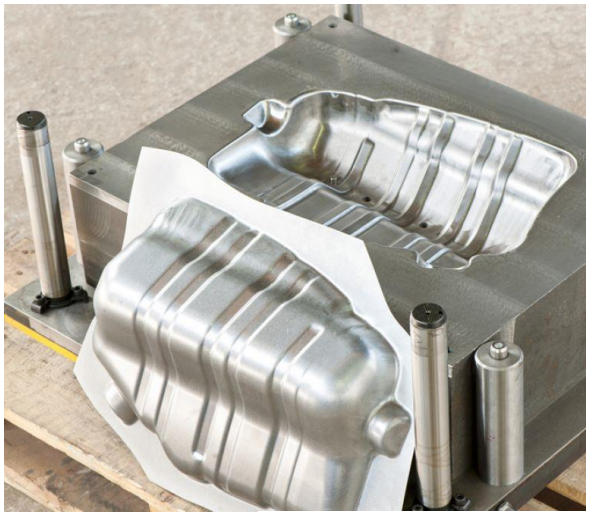




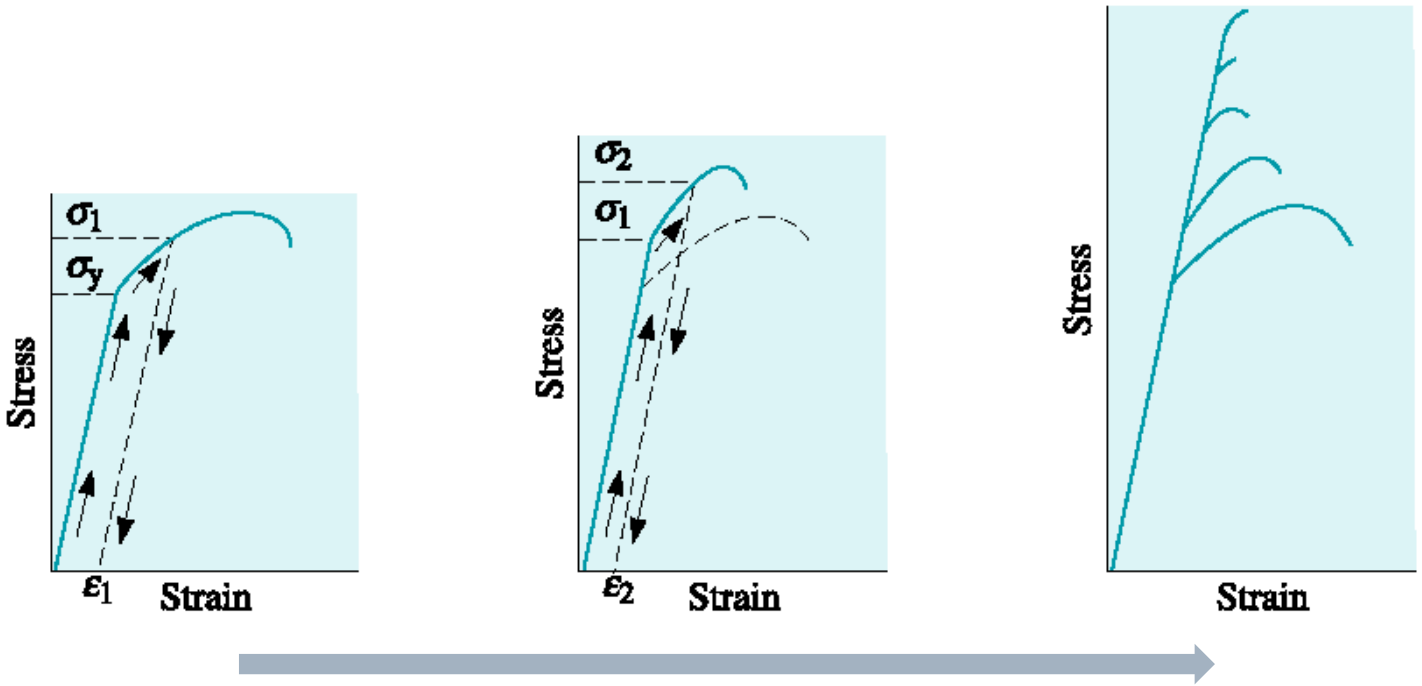
Lavorazione a freddo e caldo

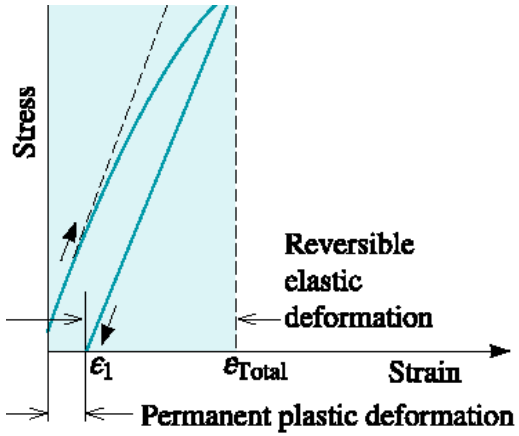
Stampaggio (Stamping, forming)





Lavorazione a freddo - Incrudimento





Lavorazione a freddo - Incrudimento

$$\sigma = K\epsilon^n$$

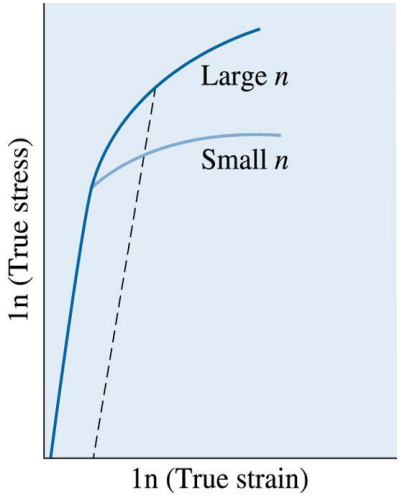


TABLE 7-1 ■ ***Strain-hardening exponents and strength coefficients of typical metals and alloys***

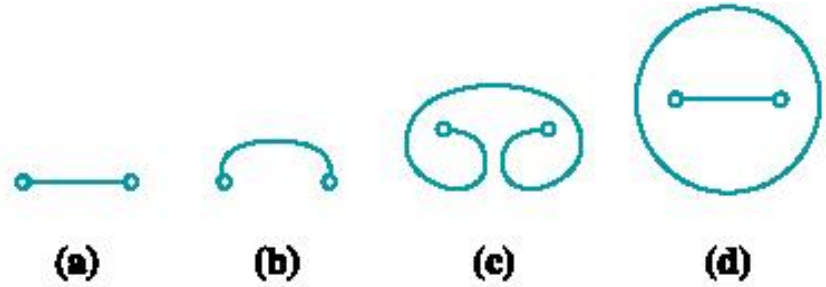
Metal	Crystal Structure	*n*	K (psi)
Titanium	HCP	0.05	175,000
Annealed alloy steel	BCC	0.15	93,000
Quenched and tempered medium-carbon steel	BCC	0.10	228,000
Molybdenum	BCC	0.13	105,000
Copper	FCC	0.54	46,000
Cu-30% Zn	FCC	0.50	130,000
Austenitic stainless steel	FCC	0.52	220,000

Adapted from G. Dieter, Mechanical Metallurgy, *McGraw-Hill, 1961, and other sources.*

Meccanismi di rafforzamento per deformazione

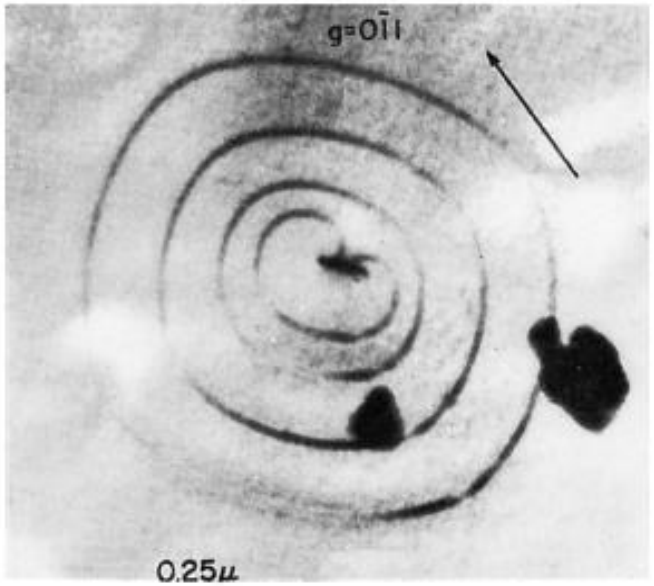
- **Sorgente di Frank-Read**: una dislocazione bloccata che, sotto uno stress applicato, produce ulteriori dislocazioni. Questo meccanismo è almeno in parte responsabile dell'indurimento della deformazione.
- **Termoplastici**: una classe di polimeri che consistono in molecole grandi e lunghe simili a spaghetti che si intrecciano (ad es. Polietilene, nylon, PET, ecc.).

Rafforzamento nei metalli: sorgenti di Frank-Read



La fonte Frank-Read può generare dislocazioni.

- Una dislocazione è imperniata alle estremità da difetti reticolari.
- Mentre la dislocazione continua a muoversi, la dislocazione si inchina, eventualmente piegandosi di nuovo su se stessa.
- Infine si forma il ciclo di dislocazione
- Viene creata una nuova dislocazione.

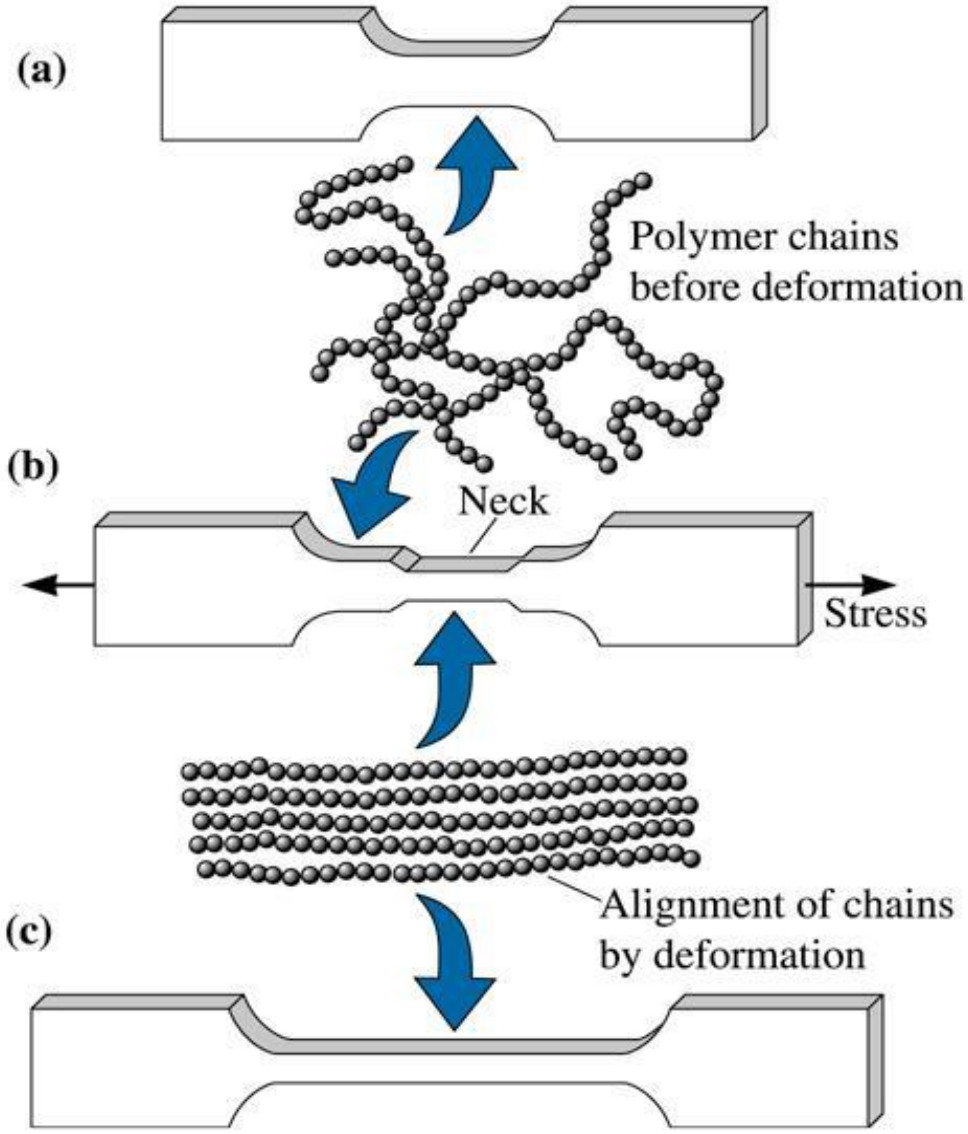


(e) Microfotografia elettronica di una fonte Frank-Read (330.000).

(Adapted from Brittain, J., "Climb Sources in Beta Prime-NiAl," Metallurgical Transactions, Vol. 6A, April 1975.)

Rafforzamento in materie plastiche: allineamento delle catene polimeriche

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

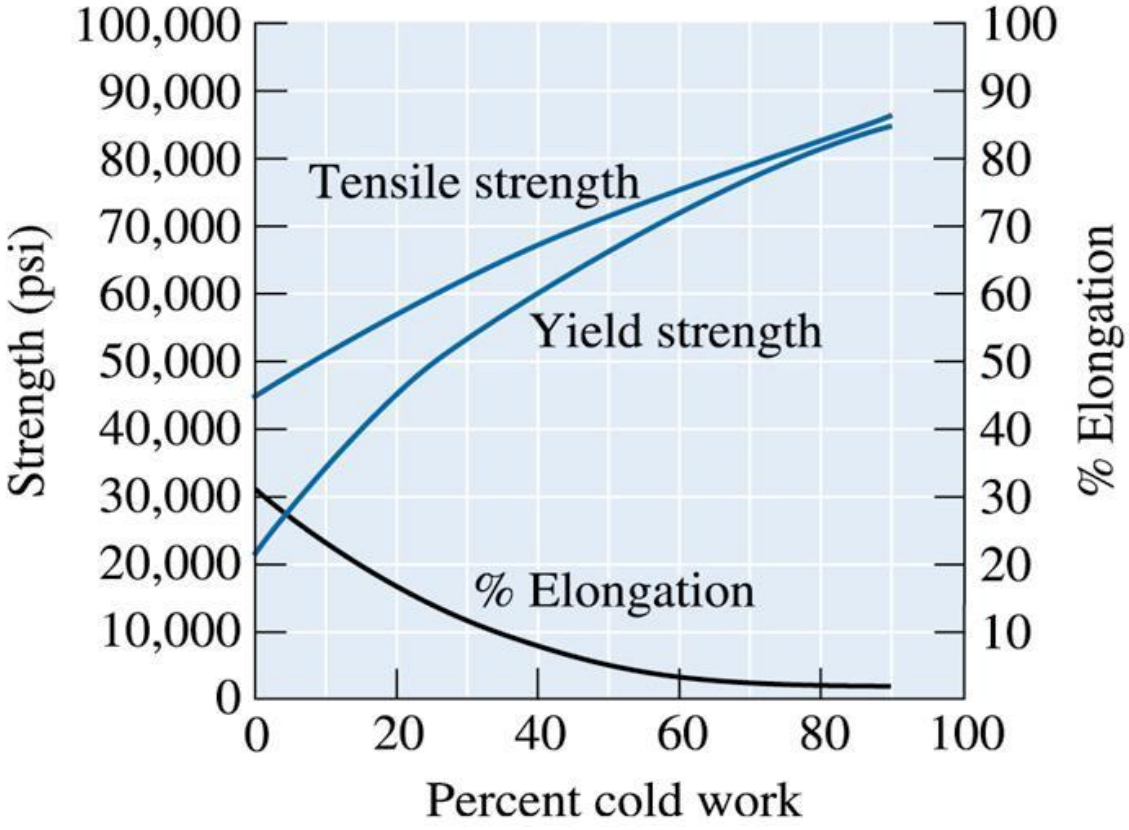


In un provino di trazione di polimero termoplastico non deformata.
Le catene polimeriche sono orientate in modo casuale.

Quando viene applicato uno stress, si sviluppa il collo quando le catene si allineano localmente. Il collo continua a crescere fino a quando le catene dell'intera lunghezza del calibro si sono allineate.

La resistenza del polimero è aumentata.

Influenza della percentuale di incrudimento sulle proprietà meccaniche



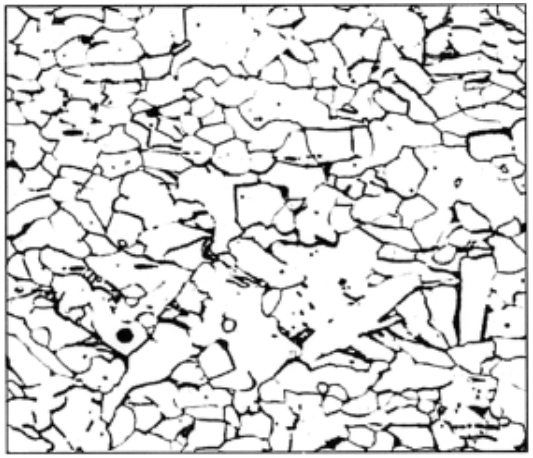
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

L'effetto della lavorazione a freddo sulle proprietà meccaniche del rame.

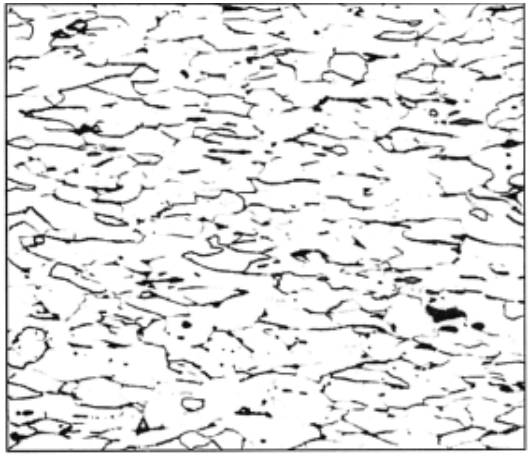
Microstrutture, rafforzamento per configurazione (texturing, stress residui)

- Trama a fibra, trama foglio
- Sollecitazioni residue, ricottura
- Vetro di ricottura, vetro temperato

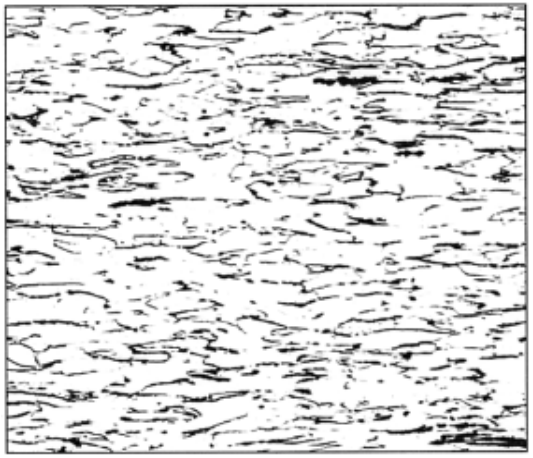
Texturing dovuto alla lavorazione a freddo



(a)



(b)



(c)

(d)

La struttura fibrosa del grano di un acciaio a basso tenore di carbonio prodotto dalla lavorazione a freddo:

a) 10% a freddo

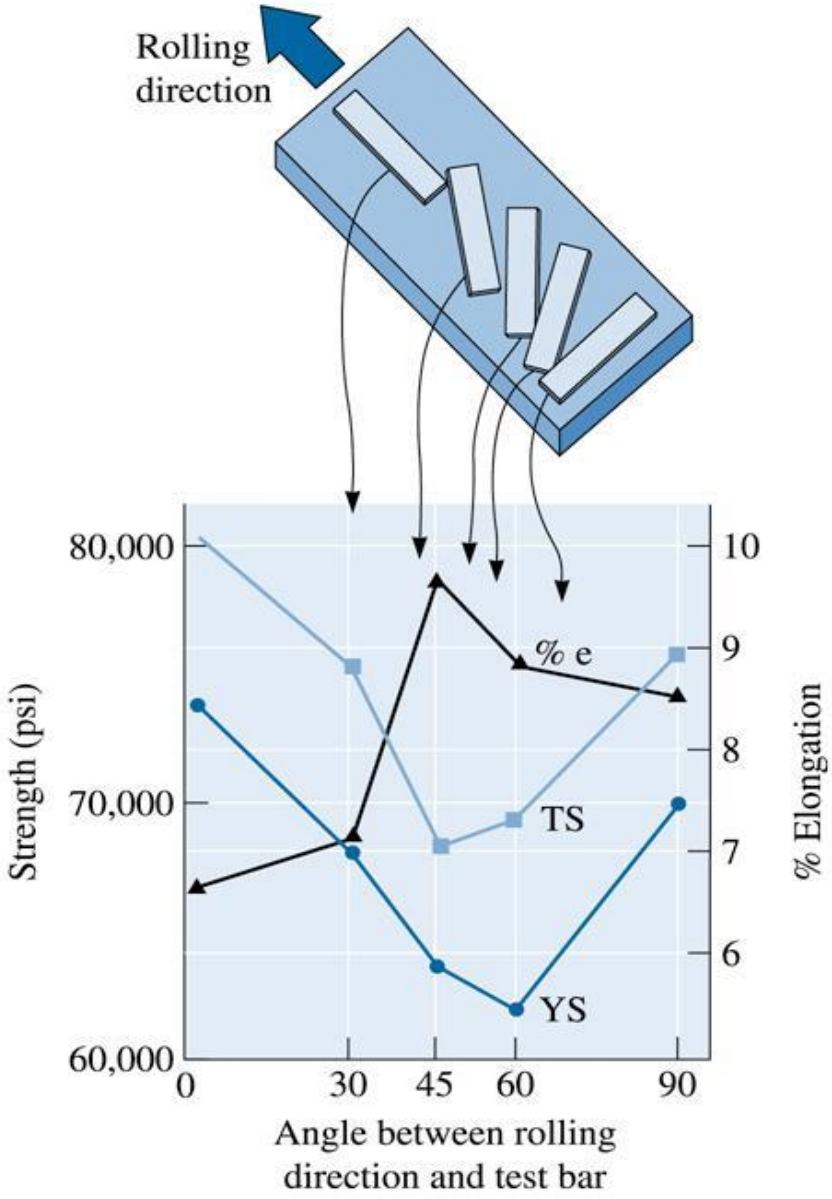
b) 30% a freddo

c) 60% a freddo

d) 90% a freddo (250).

(Source: From ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073. Used with permission.)

Effetto del texturing sulle proprietà meccaniche

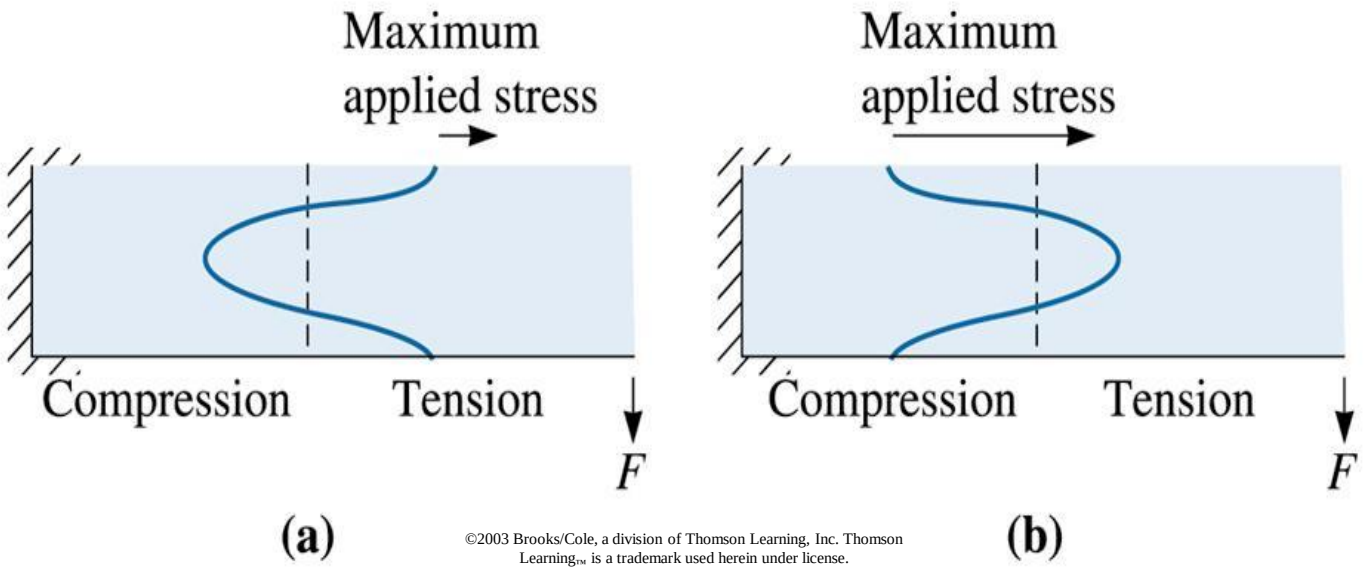


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Comportamento anisotropico in un materiale laminato di alluminio-litio utilizzato in applicazioni aerospaziali. Lo schema mette in relazione la posizione delle barre di trazione con le proprietà meccaniche che si ottengono.

Stress residui

Le lavorazioni a freddo comportano la presenza nel manufatto di sforzi residui. Questi possono avere un effetto negativo o benefico, a seconda della configurazione degli sforzi stessi e del carico (si veda esempio sotto)



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

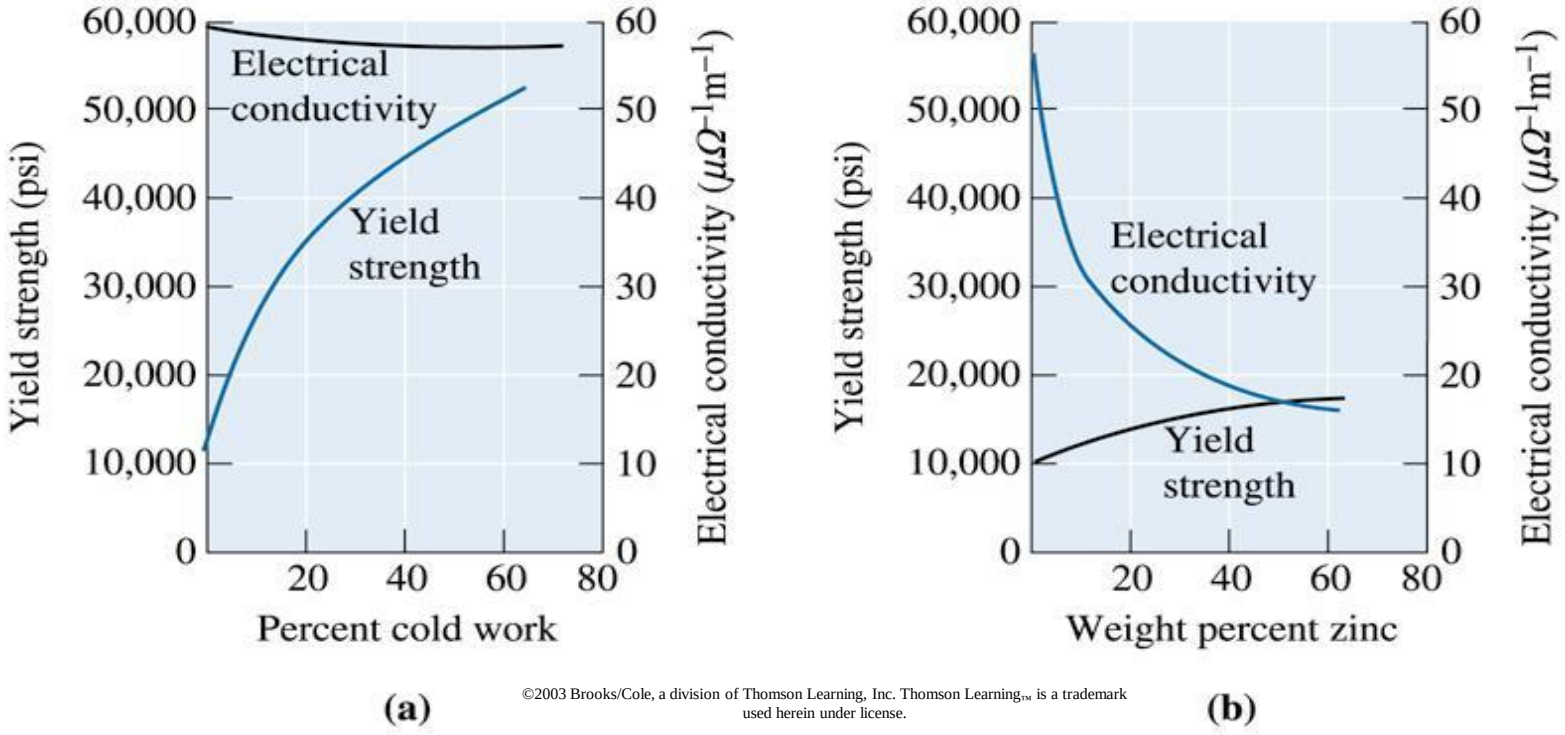
Le sollecitazioni residue di compressione possono essere dannose o benefiche.

Una forza di flessione applica uno sforzo di trazione sulla parte superiore della trave. Poiché nella parte superiore sono già presenti sollecitazioni residue di trazione, le caratteristiche di carico sono scarse.

La parte superiore contiene sollecitazioni residue di compressione. In questo caso, le caratteristiche di carico sono molto buone.

Caratteristiche della lavorazione a freddo

La lavorazione a freddo ha importanti conseguenze sulle proprietà meccaniche ma trascurabili su altre proprietà come la conducibilità elettrica. Viceversa altri processi possono avere effetti opposti.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

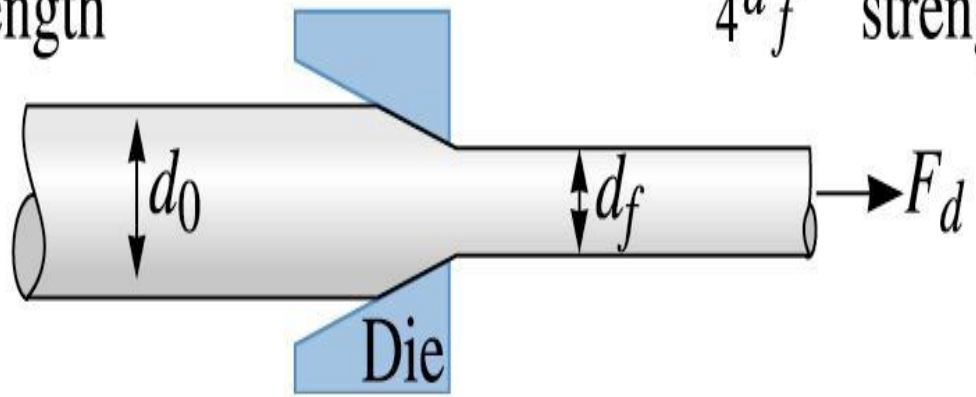
Confronto tra il rafforzamento del rame mediante (a) lavorazione a freddo e (b) creazione di una lega con zinco. Si noti che la lavorazione a freddo produce un maggiore rinforzo, ma ha scarso effetto sulla conducibilità elettrica.

Incrudimento: l'esempio della trafilatura

Senza incrudimento la trafilatura non potrebbe funzionare perché il filo tirato si spezzerebbe.

$$\text{Stress} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_0^2} > \text{Original yield strength}$$

$$\text{Stress} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_f^2} < \text{Final yield strength}$$



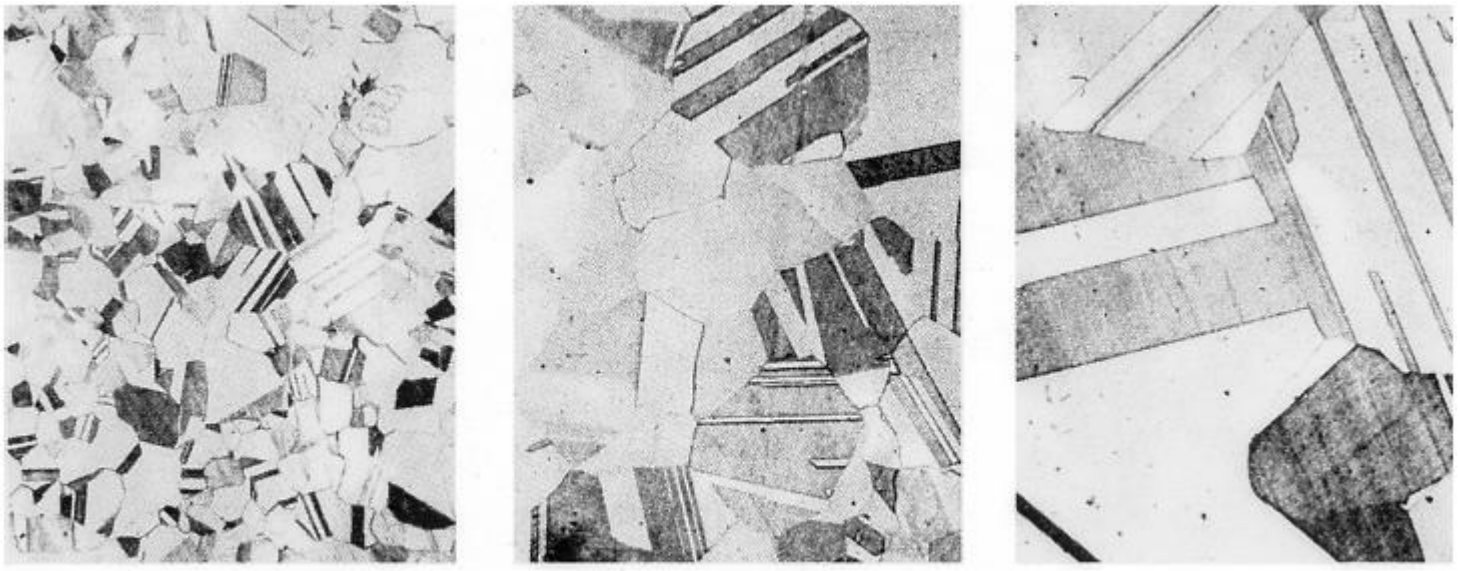
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il processo di trafilatura. La forza F_d agisce sia sul diametro originale sia su quello finale. Lo stress prodotto sul filo all'uscita è maggiore di quello dell'originale. Se il filo non si fosse indurito durante la trafilatura, il filo all'uscita si sarebbe rotto prima che il filo originale fosse passato attraverso la matrice.

Trattamenti termici

- **Recupero**: trattamento termico di ricottura a bassa temperatura progettato per eliminare le sollecitazioni residue introdotte durante la deformazione senza ridurre la resistenza del materiale lavorato a freddo.
- **Ricristallizzazione**: trattamento termico di ricottura a media temperatura progettato per eliminare tutti gli effetti dell'indurimento prodotto durante la lavorazione a freddo.
- **Crescita del grano**: movimento dei confini del grano per diffusione al fine di ridurre la quantità dell'area del bordo del grano.

Osservazione dei processi di ricristallizzazione e crescita dei grani

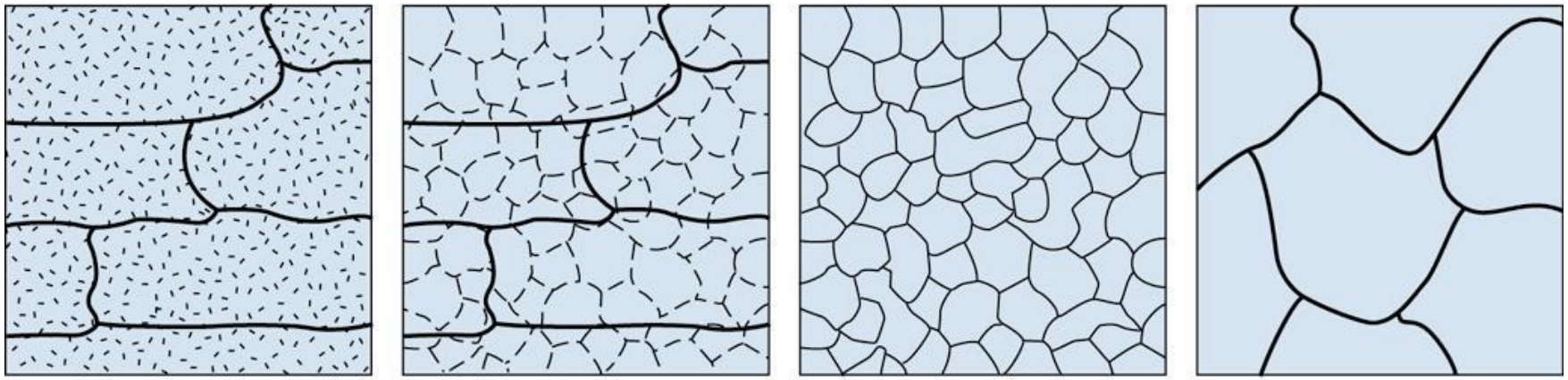


(a) (b) (c)

Micrografie che mostrano l'effetto della temperatura di ricottura sulla dimensione del grano in ottone. I confini gemelli possono anche essere osservati nelle strutture. (a) Ricotto a 400° C, (b) Ricotto a 650°C e (c) Ricotto a 800°C (x75).

(Adapted from Brick, R. and Phillips, A., The Structure and Properties of Alloys, 1949: McGraw-Hill.)

Recovery, ricristallizzazione e crescita dei grani in metalli lavorati a freddo

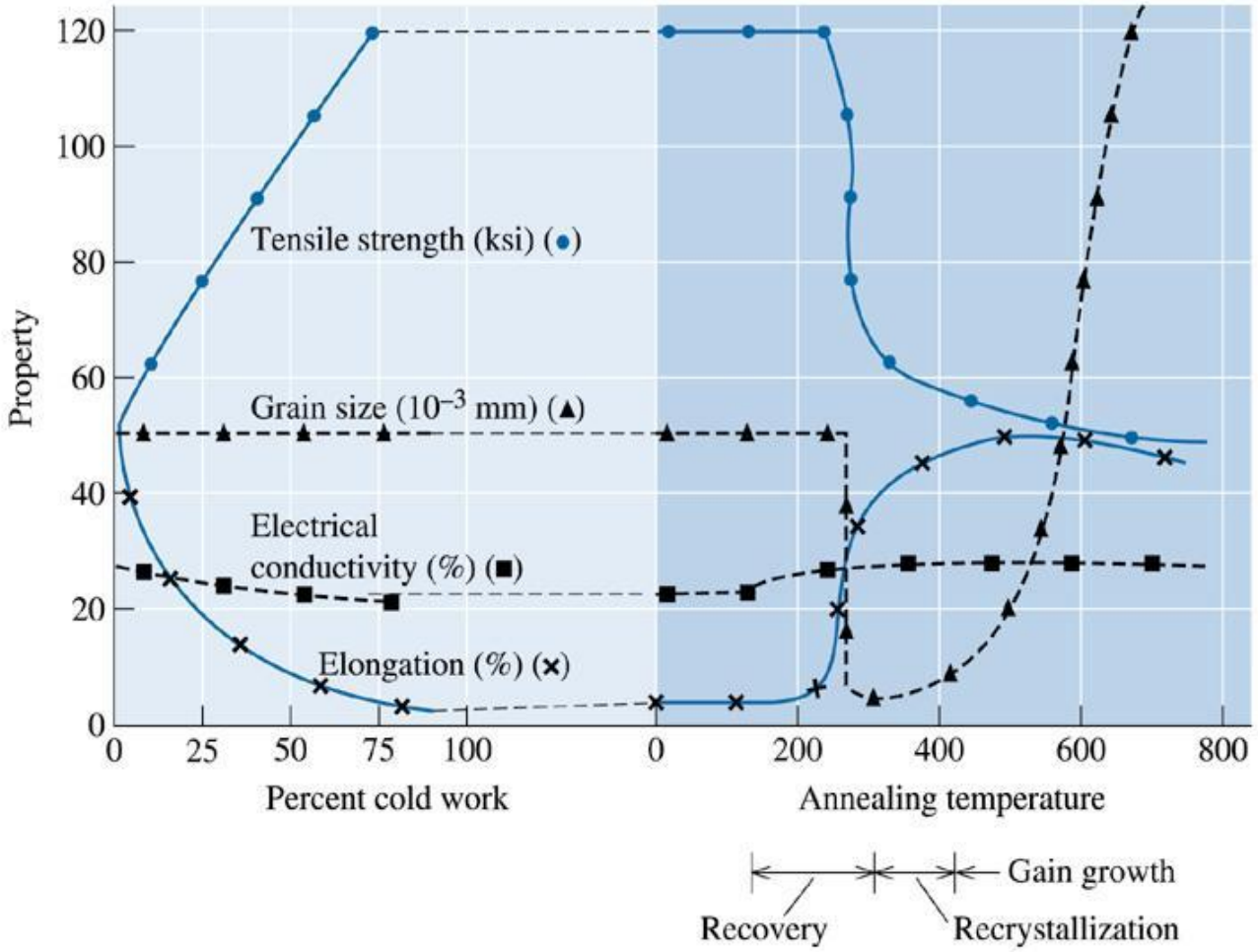


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

L'effetto della temperatura di ricottura sulla microstruttura dei metalli lavorati a freddo.

Lavorato a freddo | Dopo il recupero | Dopo la ricristallizzazione | Dopo la crescita del grano

Effetto di incrudimento e trattamenti termici sulle proprietà

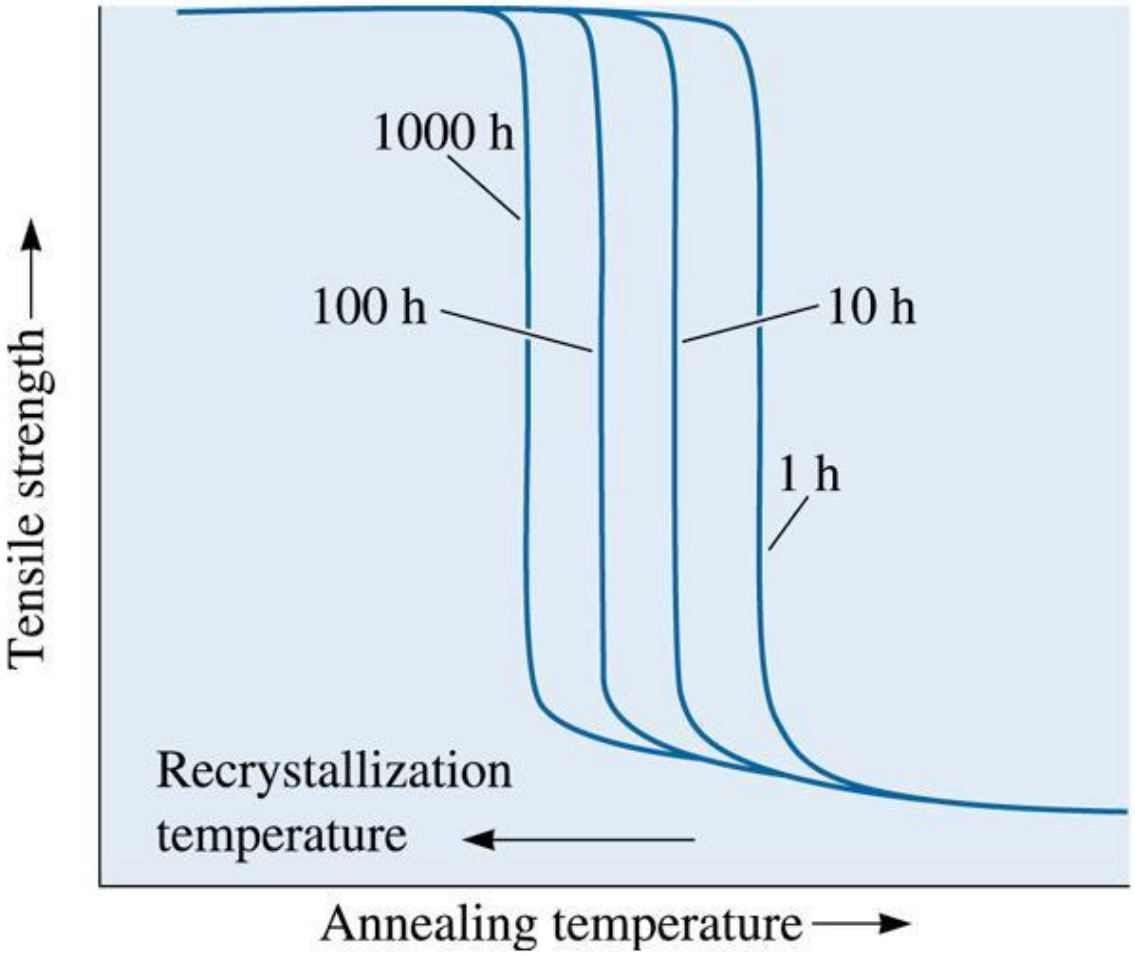


Effetto del lavoro a freddo sulle proprietà di una lega Cu-35% Zn e l'effetto della temperatura di ricottura sulle proprietà della stessa lega lavorata a freddo 75%.

Controllo della ricottura

Lavorazione a caldo: termine usato per indicare la **lavorazione di materiali metallici in un intervallo di temperatura** compreso tra quelli che definiscono la lavorazione a freddo e a caldo (di solito una temperatura compresa **tra 0,3 e 0,6 della temperatura di fusione** espressa in K).

Effetto del tempo sui processi di ricristallizzazione



Tempi di ricottura più lunghi riducono la temperatura di ricristallizzazione.
Si noti che la temperatura di ricristallizzazione non è una temperatura fissa.

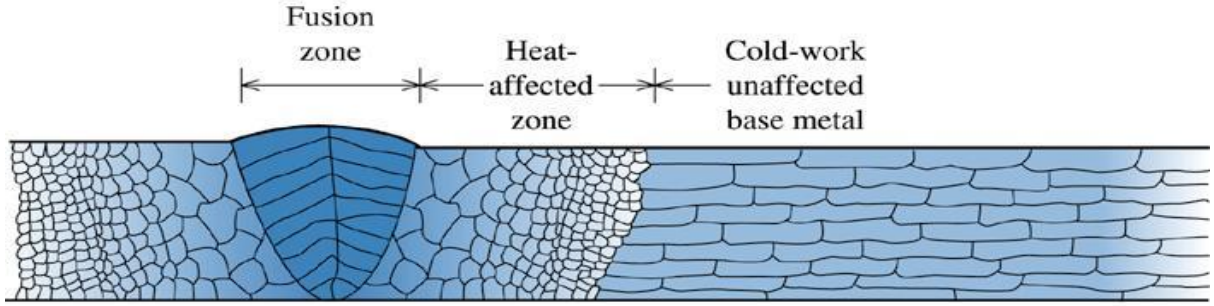
TABLE 7-4 ■ *Typical recrystallization temperatures for selected metals*

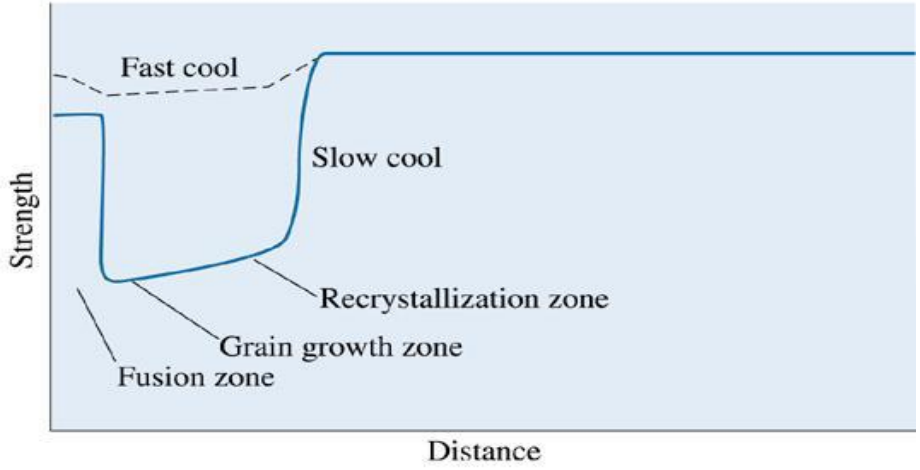
Metal	Melting Temperature (°C)	Recrystallization Temperature (°C)
Sn	232	−4
Pb	327	−4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Source: Adapted from Structure and Properties of Engineering Materials, *by R. Brick, A. Pense, and R. Gordon, 1977. Copyright © 1977 The McGraw-Hill Companies. Adapted by permission.)*

Saldature

Nei processi di saldatura, di fatto il metallo è soggetto a **trattamenti termici**, e pertanto subisce **delle trasformazioni microstrutturali** importanti, che devono essere note e ingegnerizzate per evitare cedimenti indesiderati e assicurare la performance richiesta.





©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

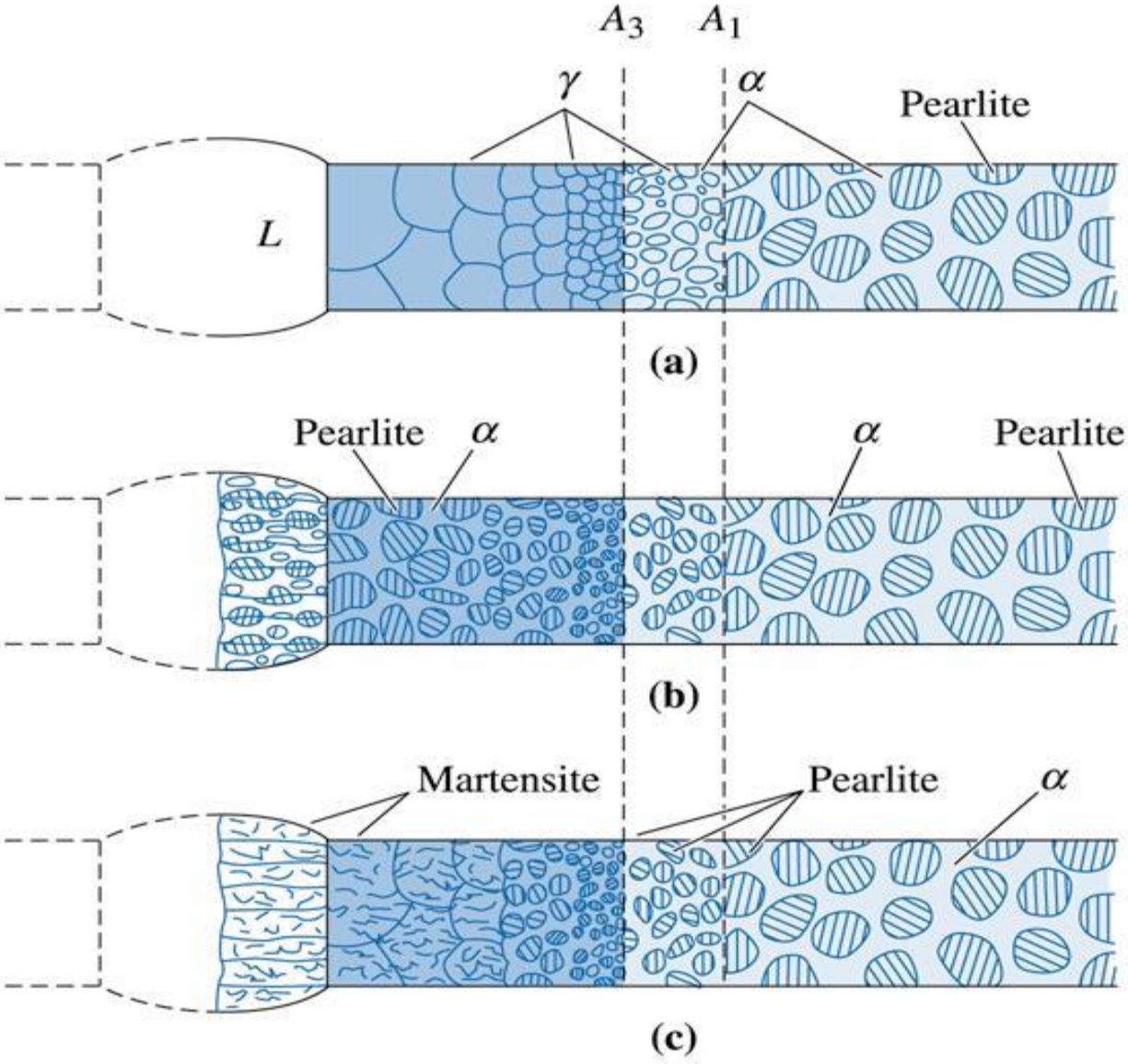
La struttura e le proprietà che circondano una saldatura per fusione in un metallo lavorato a freddo.

Nota: sul diagramma è indicato solo il lato destro della zona interessata dal calore.

Si noti la perdita di forza causata dalla ricristallizzazione e dalla crescita del grano nella zona interessata dal calore.

Saldabilità degli acciai

Sviluppo della zona interessata dal calore in una saldatura.



Struttura alla massima temperatura

Struttura dopo il raffreddamento in un acciaio a bassa temprabilità

Struttura dopo il raffreddamento in un acciaio ad alta temprabilità.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Lavorazione a caldo

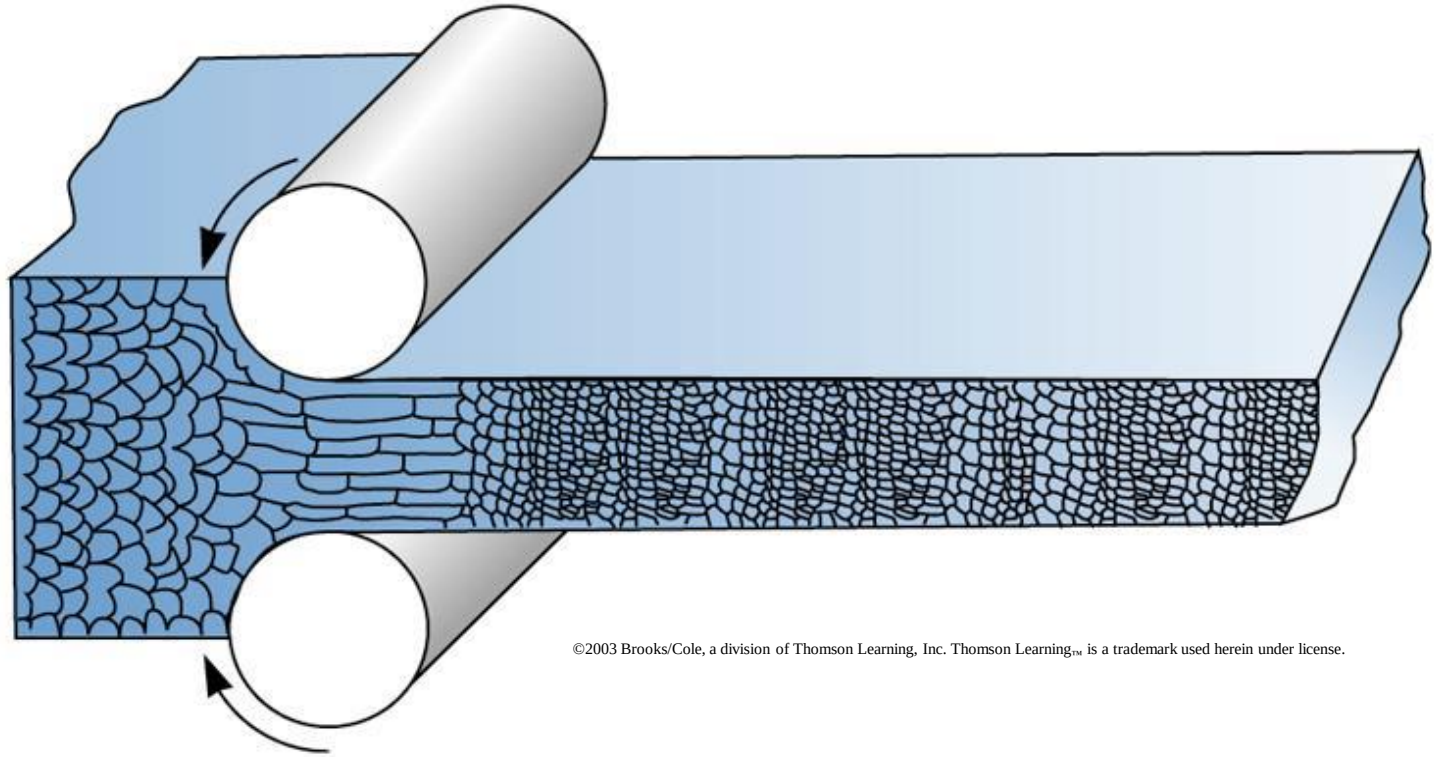
La lavorazione a caldo è definita come la contemporanea applicazione delle deformazioni desiderate e di temperature tali da determinare modificazioni microstrutturali.

Caratteristiche della lavorazione a caldo:

- Riduzione del rafforzamento
- Eliminazione delle imperfezioni
- Comportamento anisotropo
- Finitura superficiale e precisione dimensionale

Lavorazione a caldo

I grani ricristallizzano immediatamente dopo la deformazione, dando luogo ad una microstruttura estremamente fine.

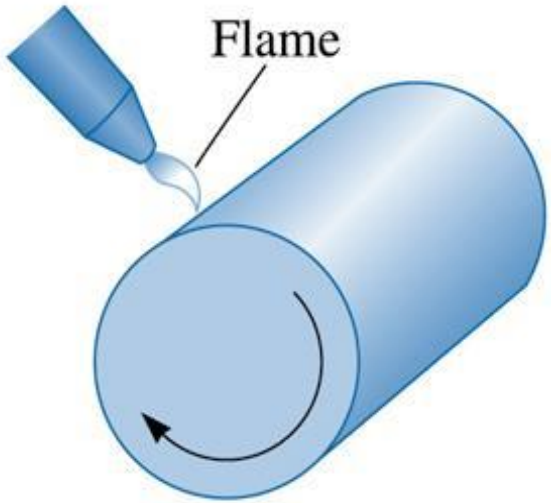

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Durante la lavorazione a caldo, i grani anisotropi allungati si ricristallizzano immediatamente. Se la temperatura di lavoro a caldo è adeguatamente controllata, la dimensione finale del grano lavorato a caldo può essere molto fine.

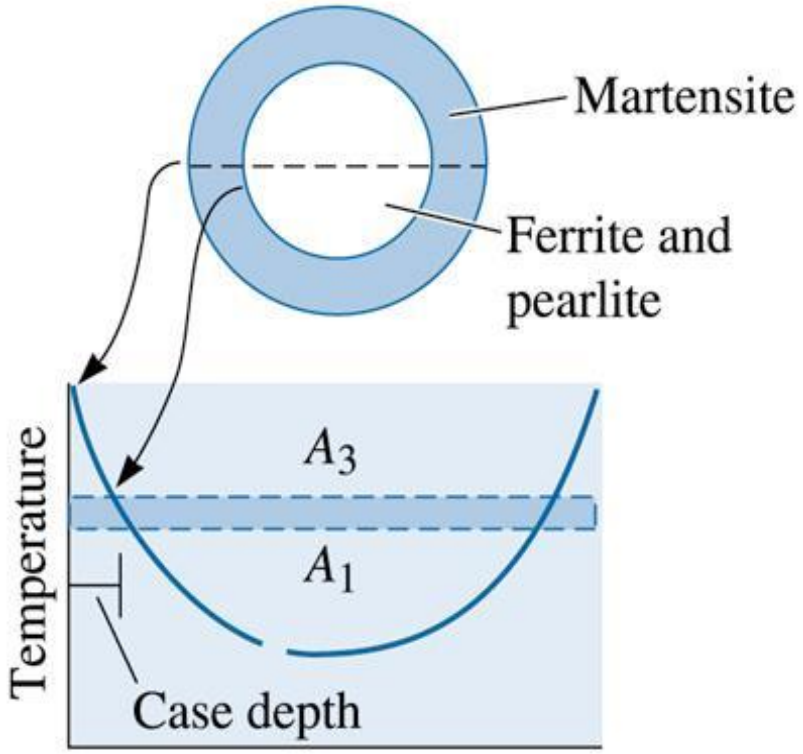
Trattamenti superficiali

- **Riscaldamento selettivo della superficie**: riscaldare rapidamente la superficie di un acciaio a medio carbonio al di sopra della temperatura A3 e quindi temprare l'acciaio.
- **Profondità dell'involucro**: la profondità sotto la superficie di un acciaio a cui si verifica la tempra mediante tempra superficiale e processi di carburazione.
- **Cementazione**: un gruppo di tecniche di tempra superficiale mediante le quali il carbonio si diffonde nell'acciaio.
- **Cianurazione**: indurimento della superficie dell'acciaio con carbonio e azoto ottenuti da un bagno di soluzione di cianuro liquido.
- **Carbonitrurazione**: indurimento della superficie dell'acciaio con carbonio e azoto ottenuti da una speciale atmosfera gassosa.

Riscaldamento selettivo



(a)



(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Tempra superficiale mediante riscaldamento localizzato.

Solo la superficie si riscalda al di sopra della temperatura A1 e viene temprata a martensite.

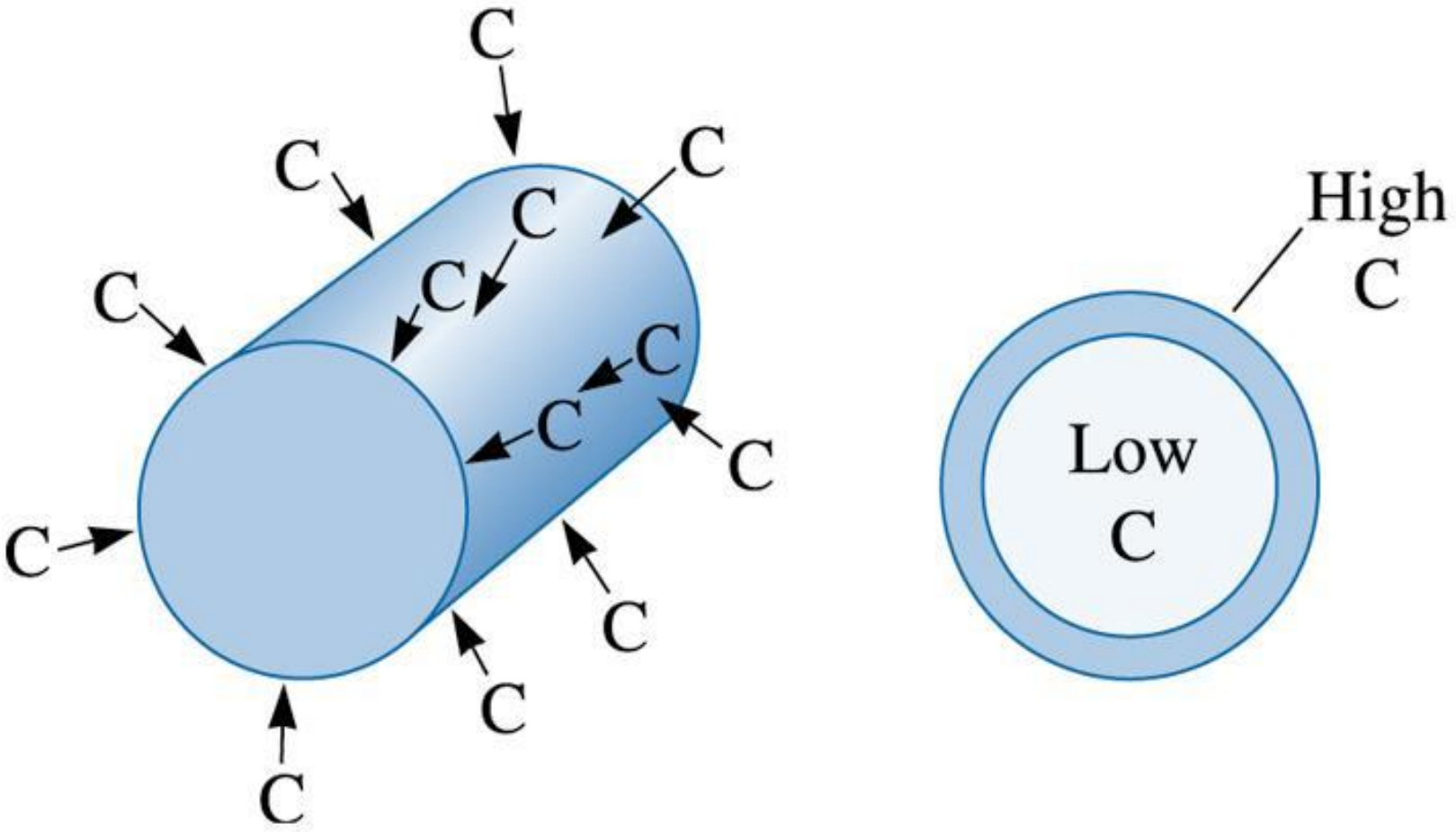
Cementazione

1) Riscaldamento ad una temperatura superiore rispetto quella di tempra, in un ambiente ricco di carbonio (cementi solidi, liquidi o gassosi)
2) Permanenza per il tempo necessario affinché il **carbonio** penetri, per diffusione, nella superficie del pezzo raggiungendo lo spessore richiesto (da pochi decimi fino a 1,5 mm).
3) Raffreddamento lento
4) Successiva fase di tempra

Effetti:

- Sulla **superficie** esterna si ottiene **elevata durezza, ottima resistenza all'usura, buona resistenza a fatica**
- Le **parti interne** conservano le caratteristiche di **tenacità**, **malleabilità** e **resilienza**.

L'alta temperatura raggiunta e la successiva tempra sono causa di ossidazione e deformazione del pezzo che richiede sempre una successiva lavorazione.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Cementazione di un acciaio a basso tenore di carbonio per produrre una superficie ad alto tenore di carbonio e resistente all'usura.

Nitrurazione

1) Riscaldamento ad una temperatura di circa 500°C
2) Per il tempo sufficientemente lungo da permettere all'**azoto** N di penetrare, per diffusione, nella superficie del pezzo per formare dei nitruri. La profondità di diffusione dell'azoto è di pochi decimi di millimetro
3) Raffreddamento

Effetti:

- sulla **superficie esterna** si ottiene una buona caratteristica di **durezza** e **resistenza all'usura**. Questi processi di indurimento superficiale vengono utilizzati per prevenire l'usura dei particolari soprattutto nel campo dello stampaggio e dell'estrusione.

La bassa temperatura raggiunta non richiede successive lavorazioni di finitura.

Cianurazione

1) Riscaldamento ad una temperatura di circa 800°C
2) 15 minuti di permanenza per permettere al **cianuro di potassio** (KCN) di penetrare. La profondità di diffusione è di pochi decine di ηm
3) Raffreddamento

Effetti:
Sulla **superficie esterna** si ottiene una buona caratteristica di **durezza** e **resistenza all'usura.**

Solfonitrurazione

1) Riscaldamento ad una temperatura di circa 800 °C
2) Permanenza di 10-15 minuti per diffondere nella superficie del pezzo **zolfo e azoto.** La profondità di diffusione pochi centesimi di millimetro
3) Raffreddamento

Effetti:
Si applica questo trattamento per aumentare la **durezza superficiale**, la **resistenza all'ossidazione** e le **proprietà autolubrificanti.**

Denominazioni e classificazione degli acciai

- **Denominazioni:** l'AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotive Engineers) forniscono sistemi di designazione per acciai che utilizzano un numero di quattro o cinque cifre.

- **Classificazioni**: gli acciai possono essere classificati in base alla loro composizione o al modo in cui sono stati processati.

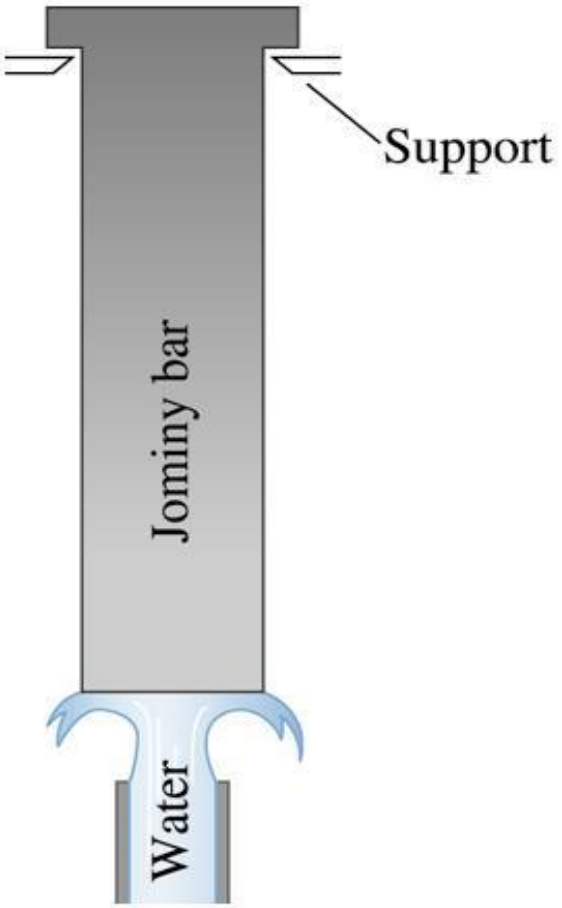
TABLE 12-1 ■ ***Compositions of selected AISI-SAE steels***

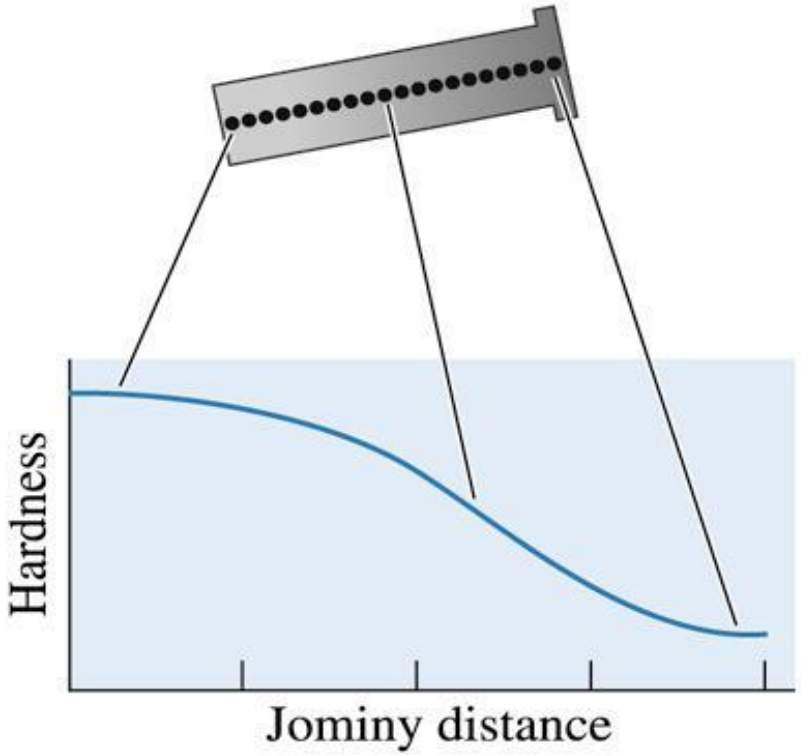
AISI-SAE Number	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Others
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.300% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% Y
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

Applicazione della temprabilità

- **Test Jominy**: il test utilizzato per valutare la temprabilità. Una barra di acciaio austenitizzata viene spenta ad una sola estremità, producendo così una gamma di velocità di raffreddamento lungo la barra.
- **Curve di temprabilità**: grafici che mostrano l'effetto della velocità di raffreddamento sulla durezza dell'acciaio bonificato.
- **Distanza Jominy**: la distanza dall'estremità estinta di una barra Jominy. La distanza Jominy è correlata alla velocità di raffreddamento.

Test Jominy

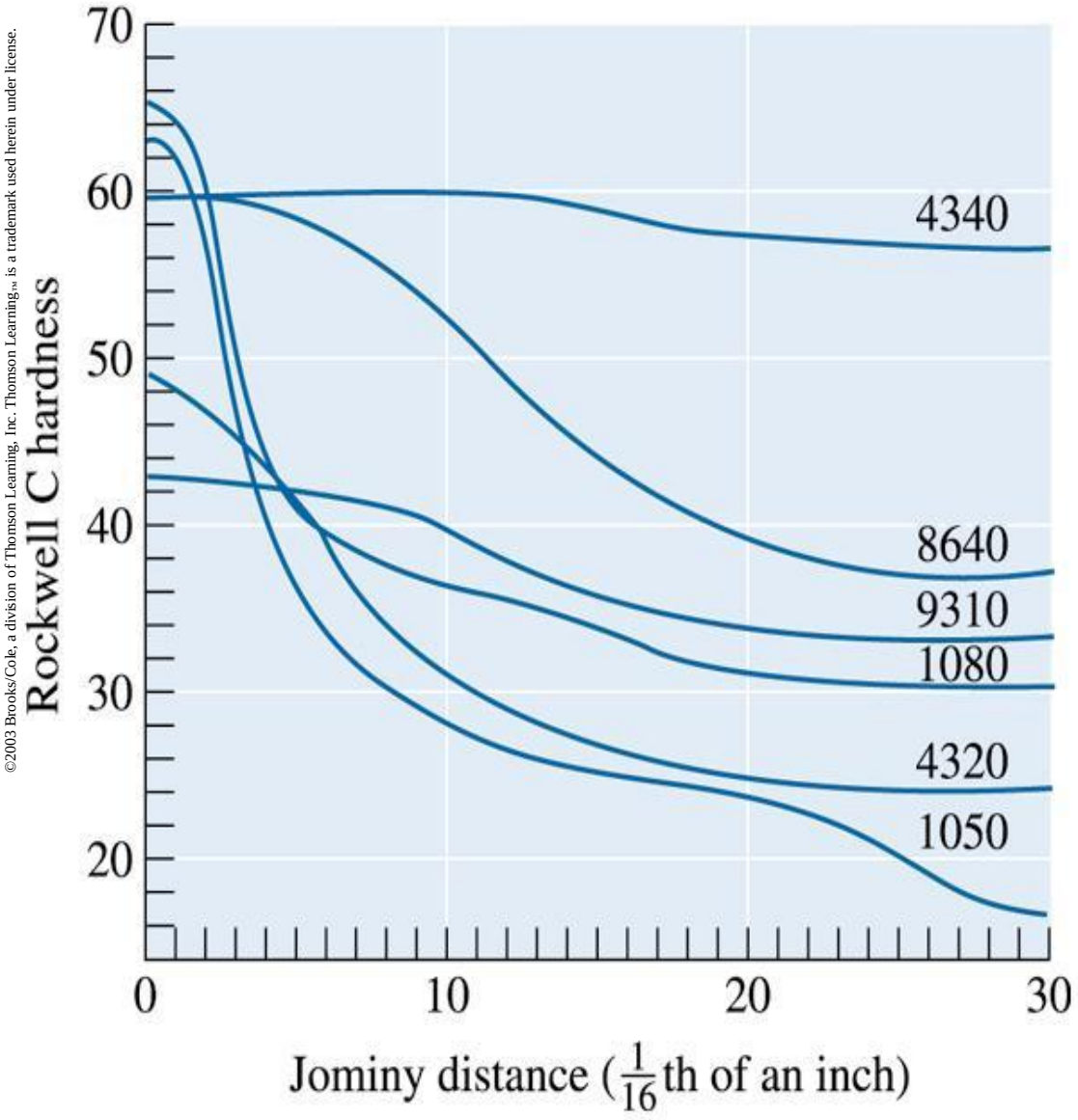




©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il set-up per il test Jominy utilizzato per determinare la temprabilità di un acciaio.

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



Le curve di temprabilità per diversi acciai.

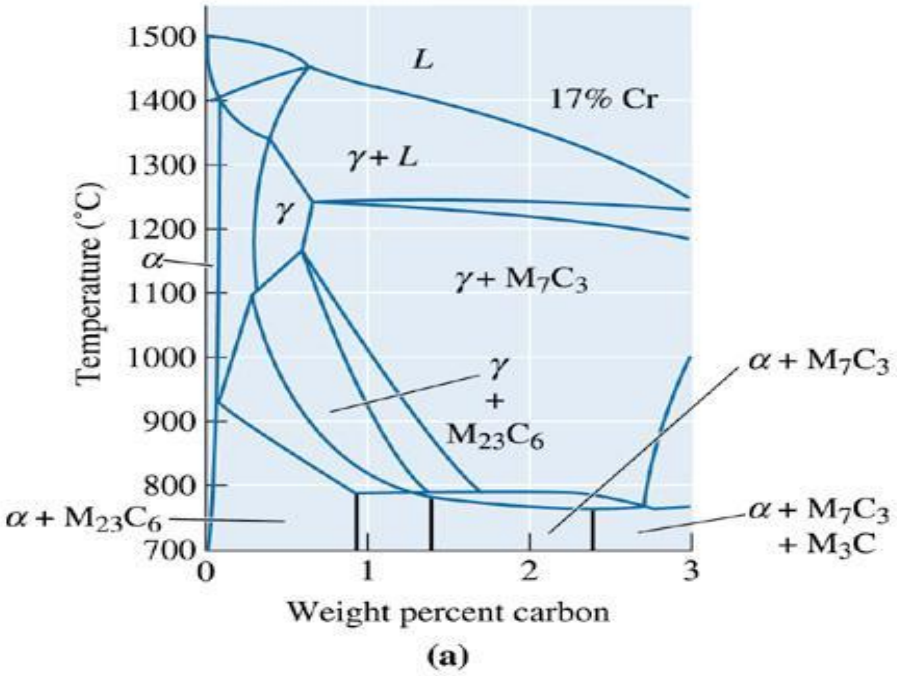
Acciai speciali

- **Acciai per utensili**: gruppo di acciai ad alto tenore di carbonio, che offrono combinazioni di elevata durezza, tenacità o resistenza a temperature elevate.
- **Picco di tempra secondario**: durezza insolitamente elevata in un acciaio temprato ad alta temperatura a causa della precipitazione dei carburi di lega.
- **Acciai bifase**: acciai speciali trattati per produrre martensite dispersa in una matrice di ferrite.
- **Acciai Maraging**: una classe speciale di acciai legati che ottengono elevate resistenze combinando reazioni martensitiche e indurenti.

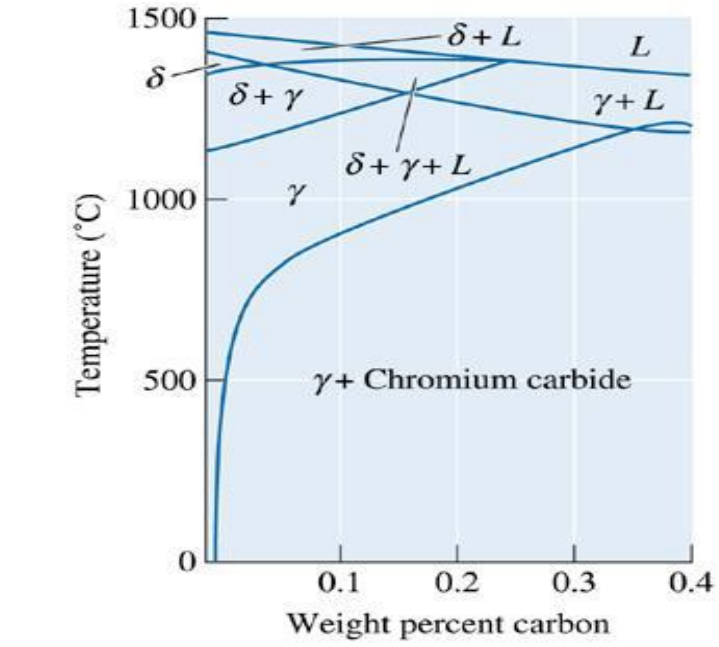
Acciai inossidabili

- **Acciai inossidabili**: gruppo di leghe ferrose che contengono almeno l'11% di Cr, offrendo una straordinaria resistenza alla corrosione.
- **Categorie di acciai inossidabili**:
  - Acciai inossidabili ferritici
  - Acciai inossidabili martensitici
  - Acciai inossidabili austenitici
  - Acciai da tempra per precipitazione (PH)
  - Acciai inossidabili duplex

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.



(a)



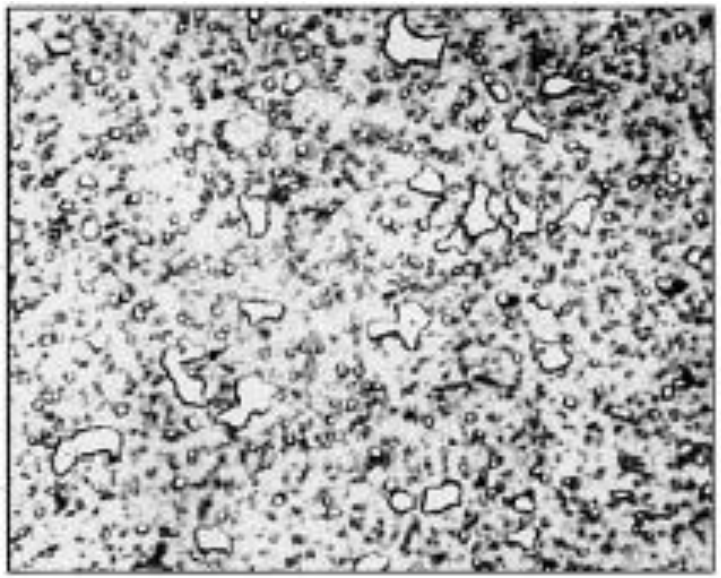
(b)

Effetto del 17% di cromo sul diagramma delle fasi ferro-carbonio. A basso contenuto di carbonio, la ferrite è stabile a tutte le temperature.

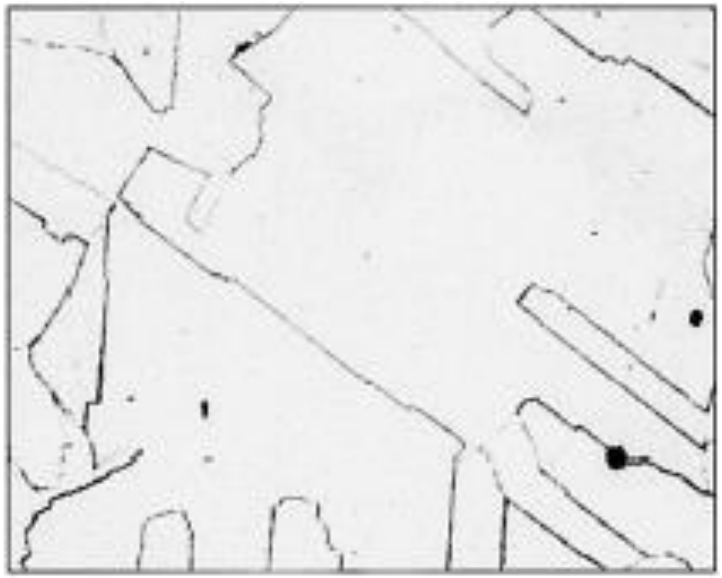
Una sezione del diagramma di fase ferro – cromo – nichel - carbonio con 18%Cr - 8%Ni costante. A basso contenuto di carbonio, l'austenite è stabile a temperatura ambiente.

TABLE 12-4 ■ *Typical compositions and properties of stainless steels*

Steel	% C	% Cr	% Ni	Others	Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	% Elongation	Condition
Austenitic:								
201	0.15	17	5	6.5% Mn	95,000	45,000	40	Annealed
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
					185,000	140,000	9	Cold-worked
304L	0.03	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
316	0.08	17	12	2.5% Mo	75,000	30,000	30	Annealed
321	0.08	18	10	0.4% Ti	85,000	35,000	55	Annealed
347	0.08	18	11	0.8% Nb	90,000	35,000	50	Annealed
Ferritic:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Annealed
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Annealed
Martensitic:								
416	0.15	13		0.6% Mo	180,000	140,000	18	Quenched and tempered
431	0.20	16	2		200,000	150,000	16	Quenched and tempered
440C	1.10	17		0.7% Mo	285,000	275,000	2	Quenched and tempered
Precipitation hardening:								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190,000	170,000	10	Age-hardened
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	240,000	230,000	6	Age-hardened



(a)



(b)

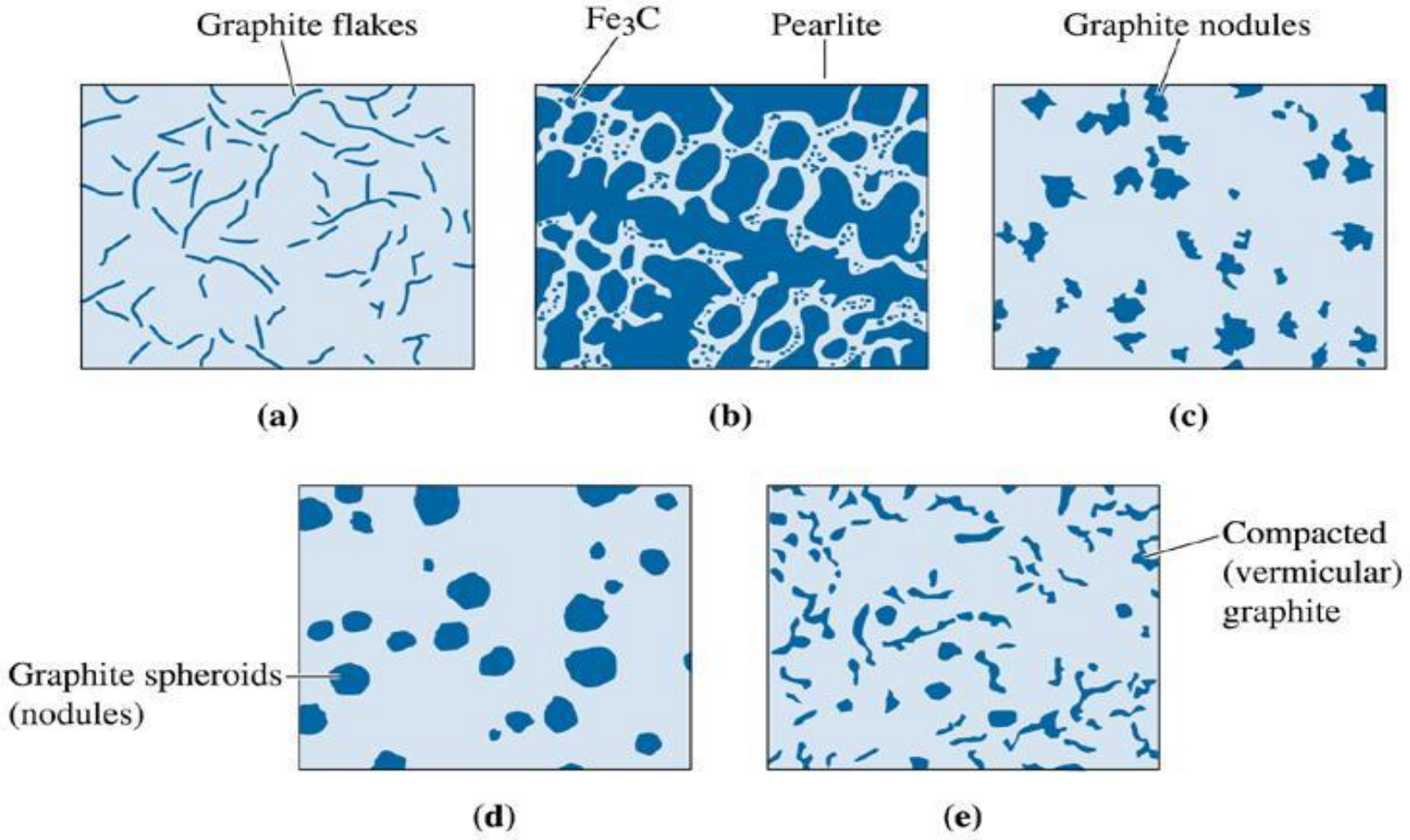
(*From* ASM Handbook, *Vols. 7 and 8, (1972, 1973), ASM International, Materials Park, OH 44073*.)

Acciaio inossidabile martensitico contenente grandi carburi primari e piccoli carburi formati durante la bonifica(× 350).

Acciaio inossidabile austenitico (× 500).

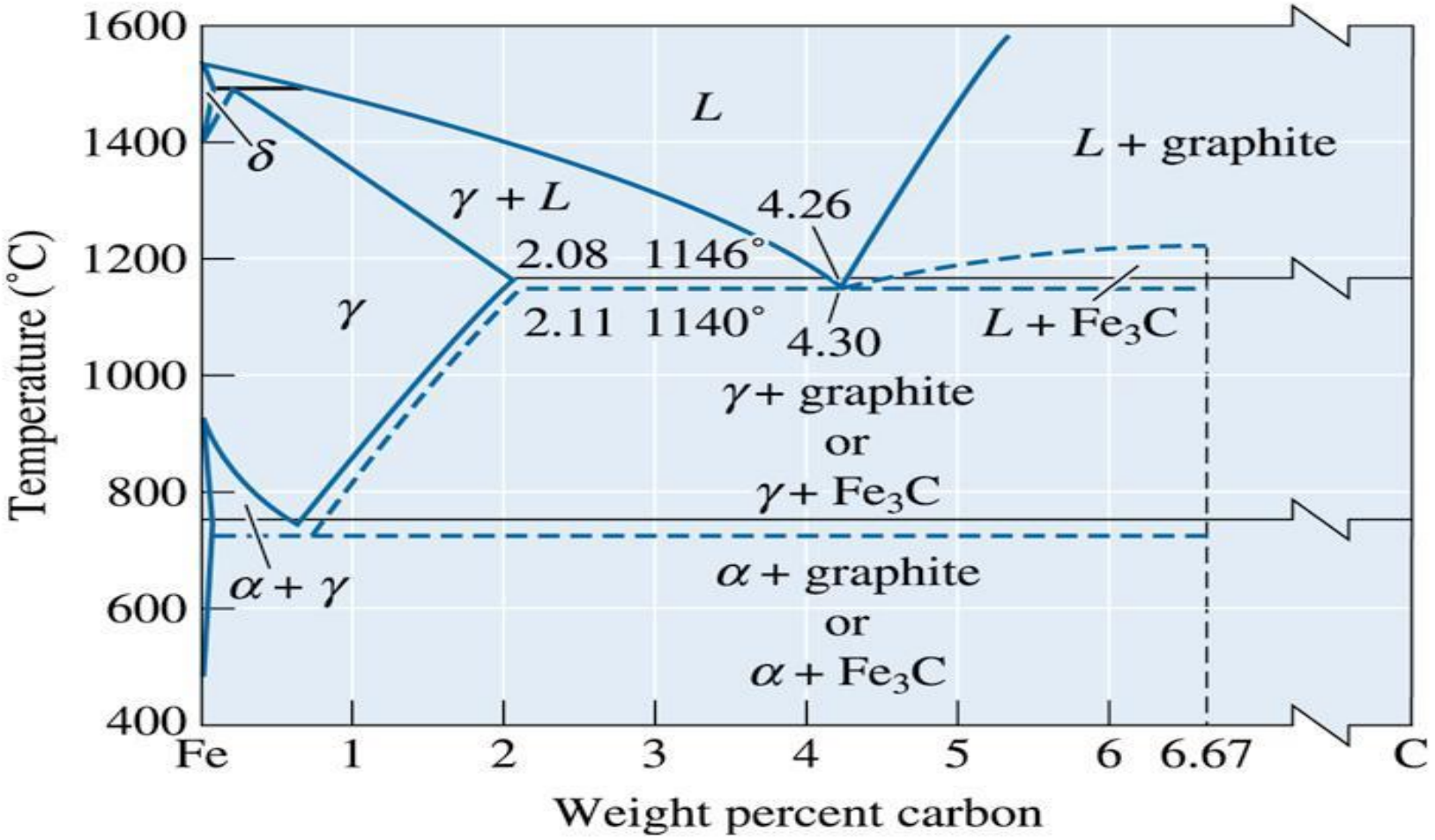
Ghise

- **Ghisa**: leghe ferrose contenenti carbonio sufficiente in modo che si verifichi la reazione eutettica durante la solidificazione.
- **Reazione eutettica ed eutettoide in ghisa**
- **Tipi di ghisa**:
  - Ghisa grigia
  - Ghisa bianca
  - Ghisa malleabile
  - Ghisa sferoidale o nodulare
  - Ghisa a grafite compatta



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Disegni schematici di cinque tipi di ghisa: (a) grigia, (b) bianca, (c) malleabile, (d) sferoidale o nodulare e (e) a grafite compatta.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il diagramma di fase Fe-C mostra la relazione tra gli equilibri ferro-grafite stabili (linee solide) e le reazioni metastabili ferro-cementite (linee tratteggiate).