

A. Tiziani, P. Ferro

MATERIALI METALLICI

I Trattamenti Termici

A.A. 2008/2009

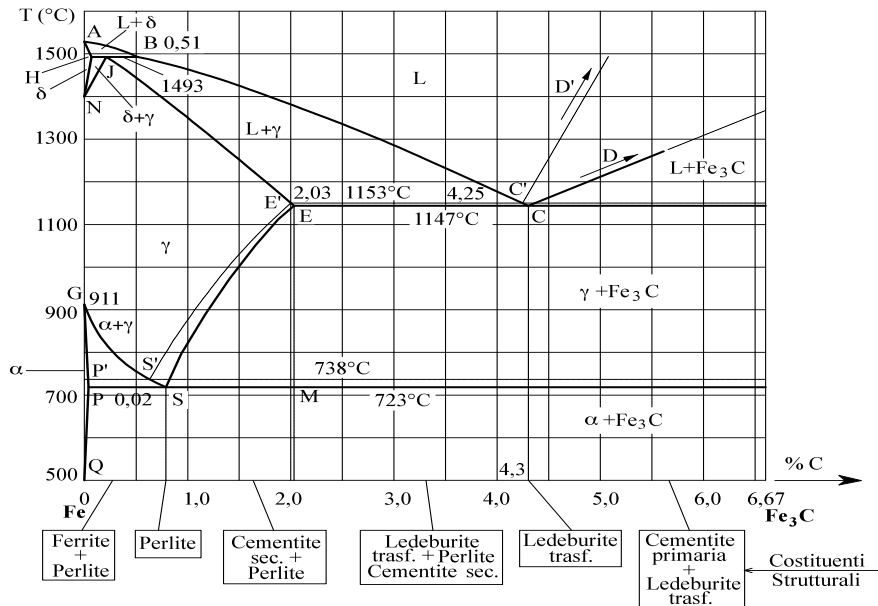
2° Anno Ingegneria Gestionale - Nuovo Ordinamento

1

- Le curve di Bain
- Trasformazioni isoterme
- Trasformazione martensitica
- Trasformazioni anisoterme
- Classificazione dei trattamenti termici degli acciai
- Correlazioni
trattamenti termici - microstruttura - proprietà
- Rassegna dei trattamenti termici di interesse applicativo:
Ricottura, Normalizzazione, Tempra, Distensione

2

Il diagramma Fe-C



3

Si comincia a parlare di velocità di raffreddamento

Meglio...la velocità dei cicli termici cioè la velocità di raff. e quella di riscaldamento...la durata delle permanenze alle varie temperature

In poche parole del **fattore TEMPO**

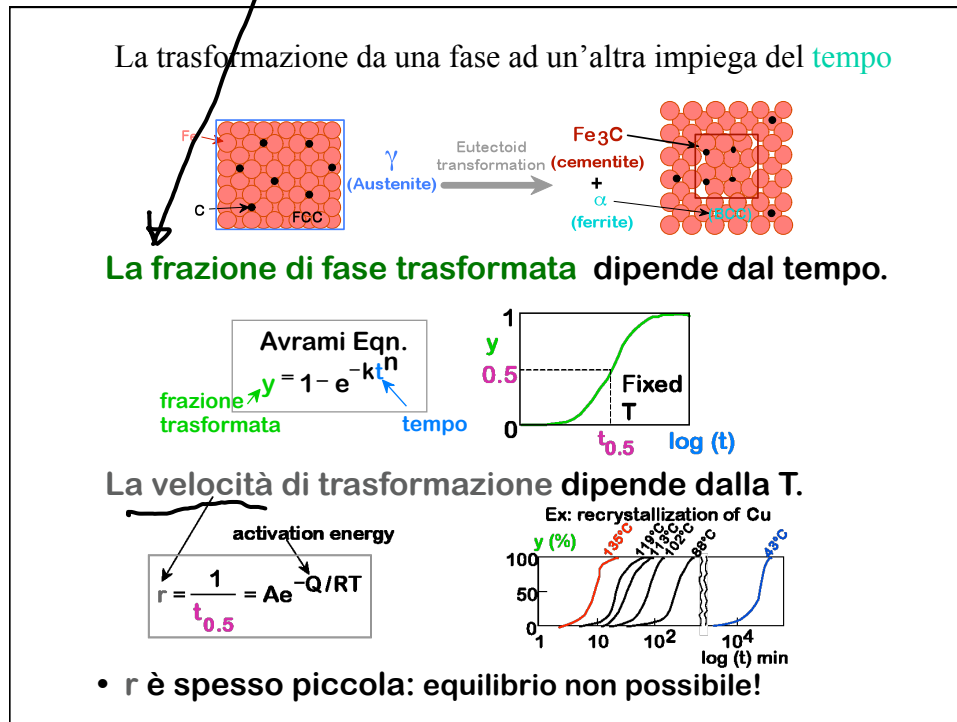
Durante il riscaldamento o raffreddamento si hanno:

1. Variazione discontinue di microstruttura (ferro puro)
2. Variazioni graduali di microstruttura (acciai)

Questi fenomeni implicano **diffusione** e quindi l'effetto non solo della **temperatura** ma anche del **tempo**

4

Avrami: descrive come i solidi si trasformano, mantenendo T costante



$$Y = Y(t)$$

$$V = V(T)$$

medi che
si formano
x unità
di tempo

Qualche parola sulla diffusione

La diffusione è tanto più **veloce** quanto **più alta è la T** (cioè il contenuto di energia degli atomi)

La velocità di diffusione aumenta **in modo iperbolico** con l'aumentare della temperatura

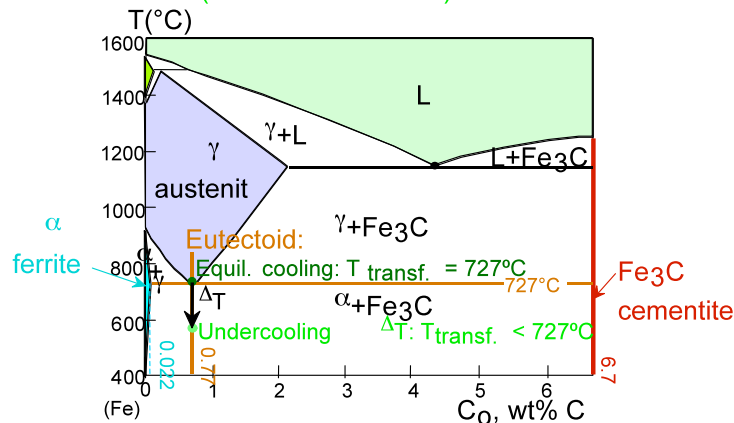
Le modificazioni strutturali e la velocità di raffreddamento

All'aumentare della velocità di raffreddamento **aumenta l'isteresi** (SOTTORAFFREDDAMENTO) **per la minore velocità di diffusione**

Negli acciai il fenomeno è più marcato rispetto al ferro puro per i più complessi movimenti diffusivi.

Trasformazioni & sottoraffreddamento

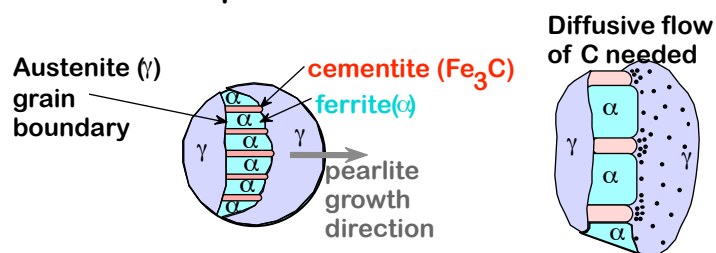
- Trasf. **Eutettoidica** (sistema Fe-C):
 $\gamma \Rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
 0.77wt% 0.022wt% 6.7wt%C
- Si può farla avvenire a:
 ...727°C (raffreddando lentamente)
 ...sotto 727°C ("sottoraffreddando!")



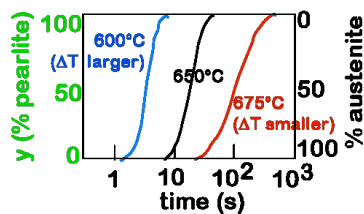
7

Trasformazione eutettoidica $\sim \Delta T$

- crescita della perlite dall'austenite:



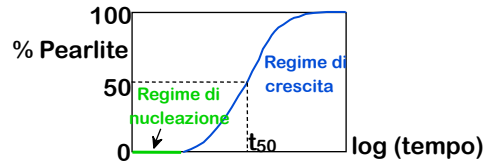
- la velocità di reazione aumenta con ΔT .



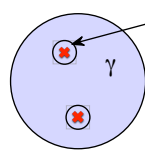
8

Nucleazione e crescita

- la velocità di reazione è il risultato della nucleazione e crescita dei cristalli.



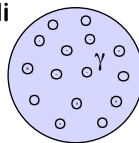
- Esempi:



T appena sotto T_E

Vel nucleazione bassa

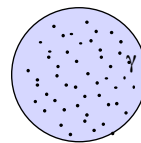
Velocità di crescita alta



T moderatamente sotto T_E

Vel nucleazione media

Velocità di crescita media

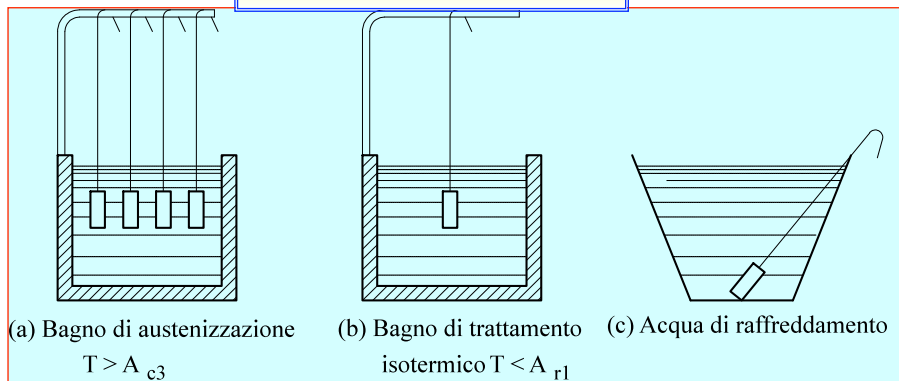


T sotto T_E

Vel nucleazione alta

Velocità di crescita bassa

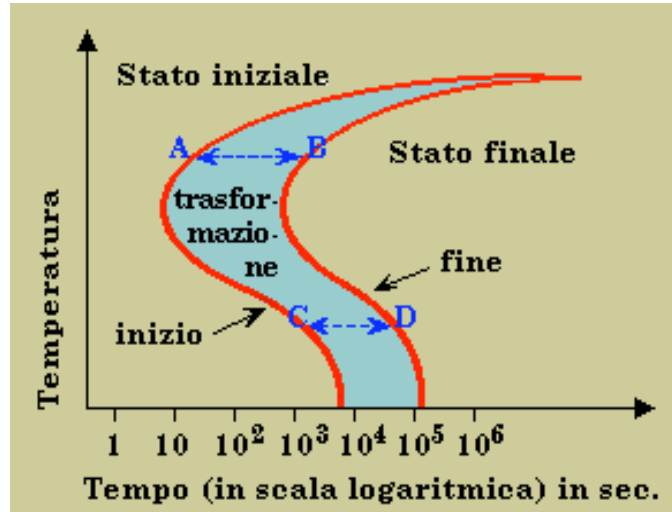
Trasformazioni isoterme



Indagine
microstrutturale: t_i , t_f

Curve di inizio
e fine trasformazione

Trasformazioni isoterme



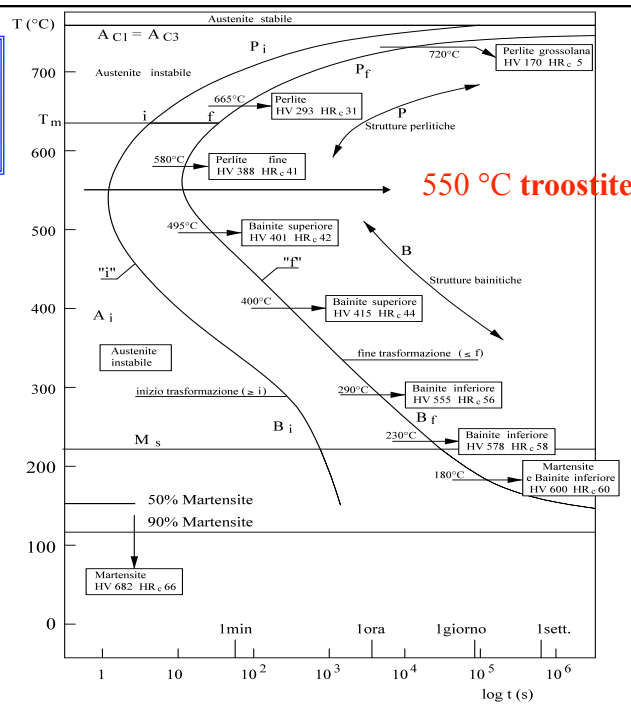
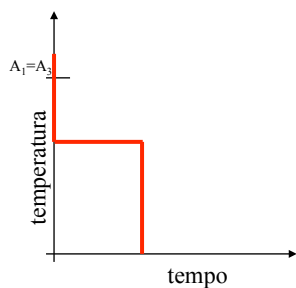
INCUBAZIONE = NUCLEAZIONE (dipende dal sottoraffreddamento e dalla dimensione del grano)

11

Trasformazioni isoterme

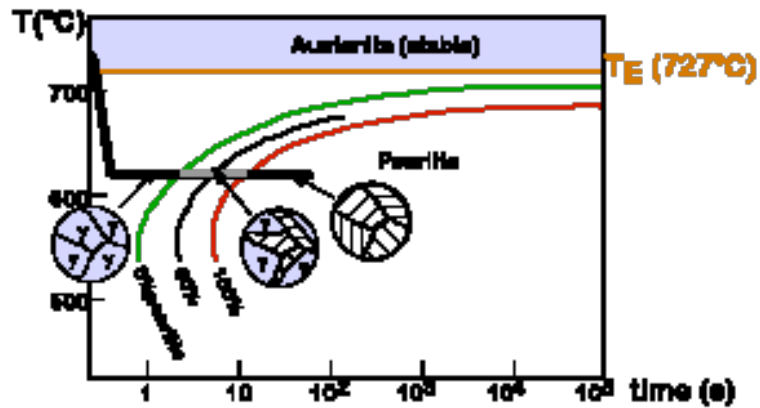
Curve di Bain (TTT)

Acciaio eutettoidico (0.8% C)



ES: sistema Fe-C

- Composizione eutettoidica, $C_0 = 0.8 \text{ wt\%C}$
- permanenza a $T > 727^\circ\text{C}$
- raffreddamento rapido a 625°C e permanenza a quella T.



13

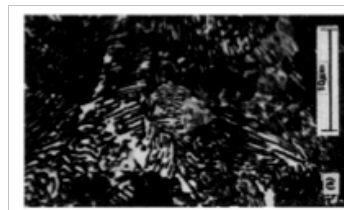
Morfologia della Perlite

Due casi:

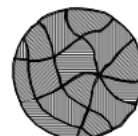
- T_{trasf} appena sotto T_E
--Alta T: diffusione veloce
--**perlite grossolana.**
- T_{trasf} ben sotto T_E
--bassa T: diffusione lenta
--**Perlite fine.**



10 μm

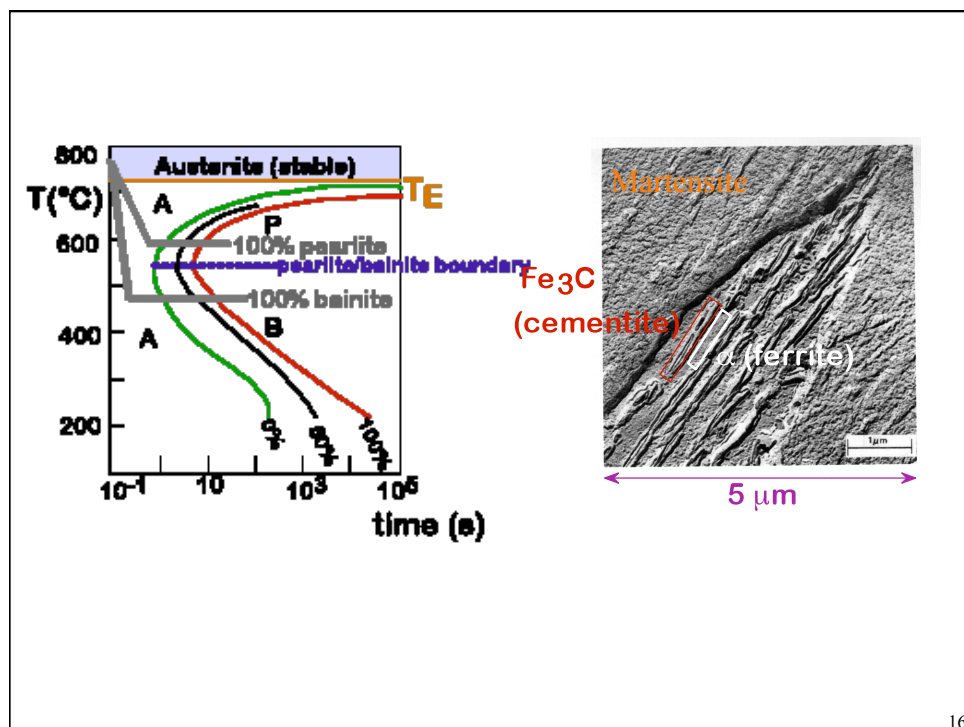
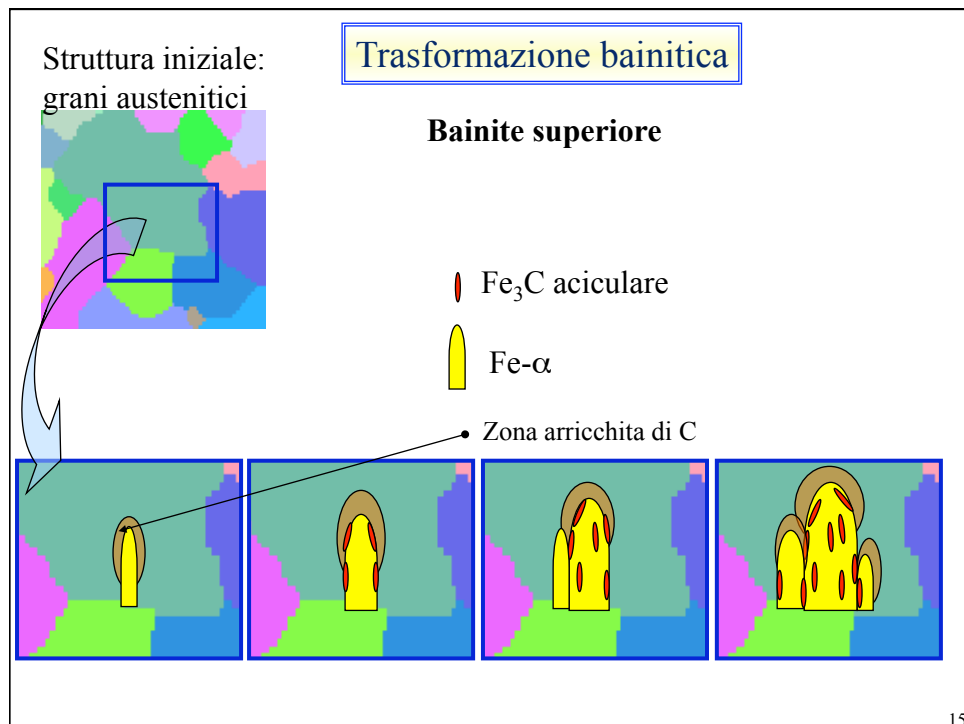


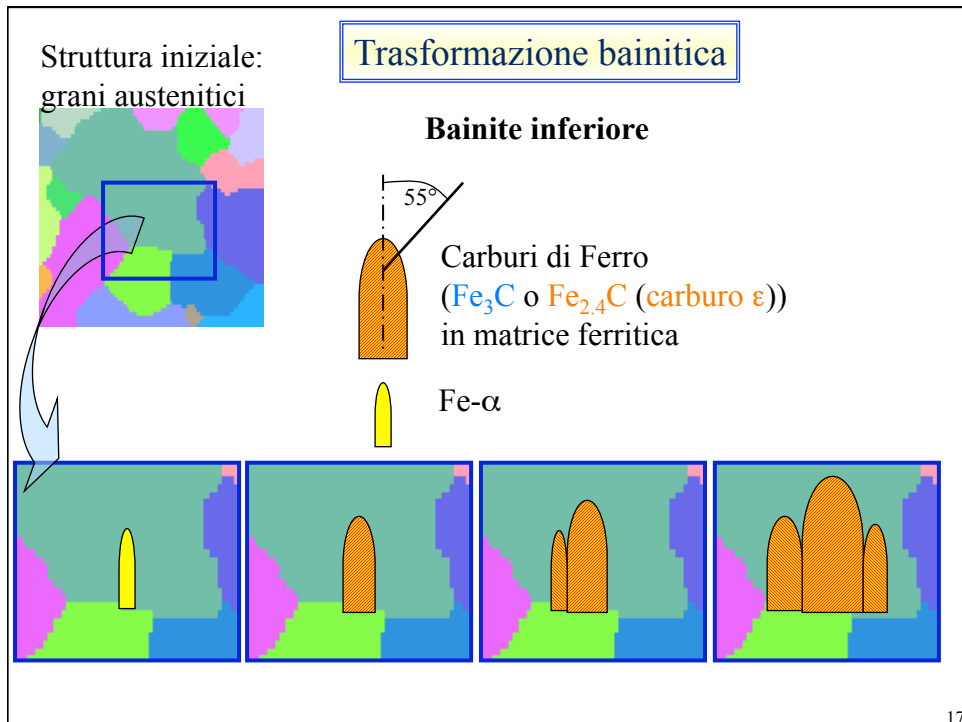
- bassi ΔT



- alti ΔT

14

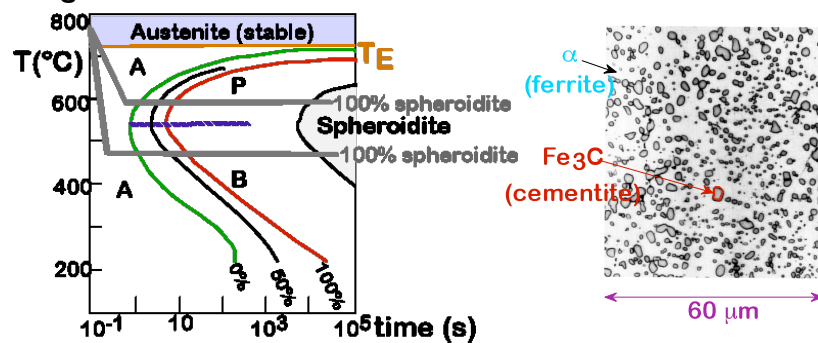




Altri prodotti: sistema Fe-C (1)

- **Sferoidite:**
 - cristalli α con Fe_3C sferici
 - controllata dalla diffusione.
 - riscaldamento della bainite e della perlite per lunghi tempi
 - riduzione della superficie di interfaccia (driving force)

- Diagramma di trasf. isotermico

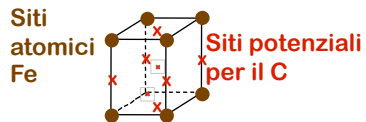


18

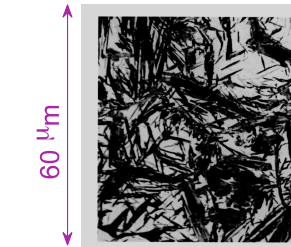
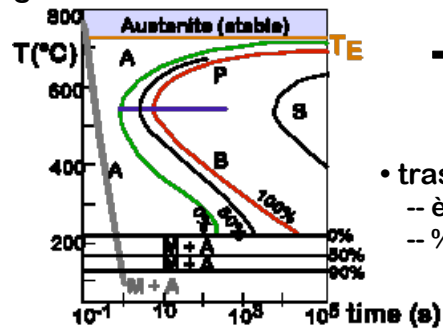
Altri prodotti: sistema Fe-C (2)

- **Martensite:**

-- γ (FCC) a Martensite (BCT)



- **Diagramma di trasf. isotermo**



— aghi di Martensite
— Austenite

- **trasformazione da γ a M...**

-- è rapida!

-- % trasf. dipende solo da T.

19

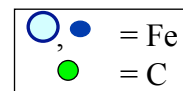
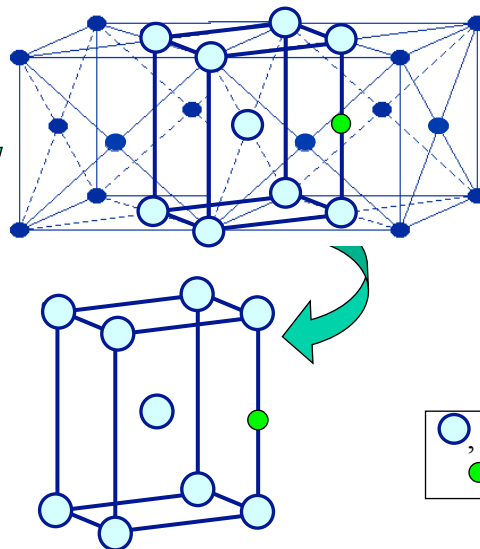


Struttura iniziale:
austenite

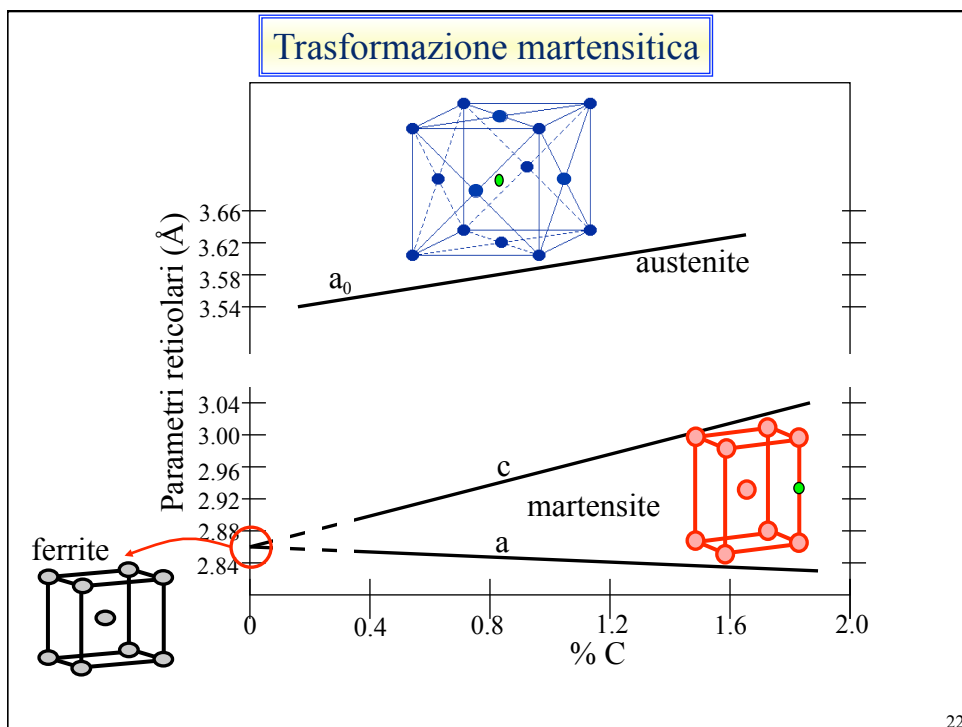
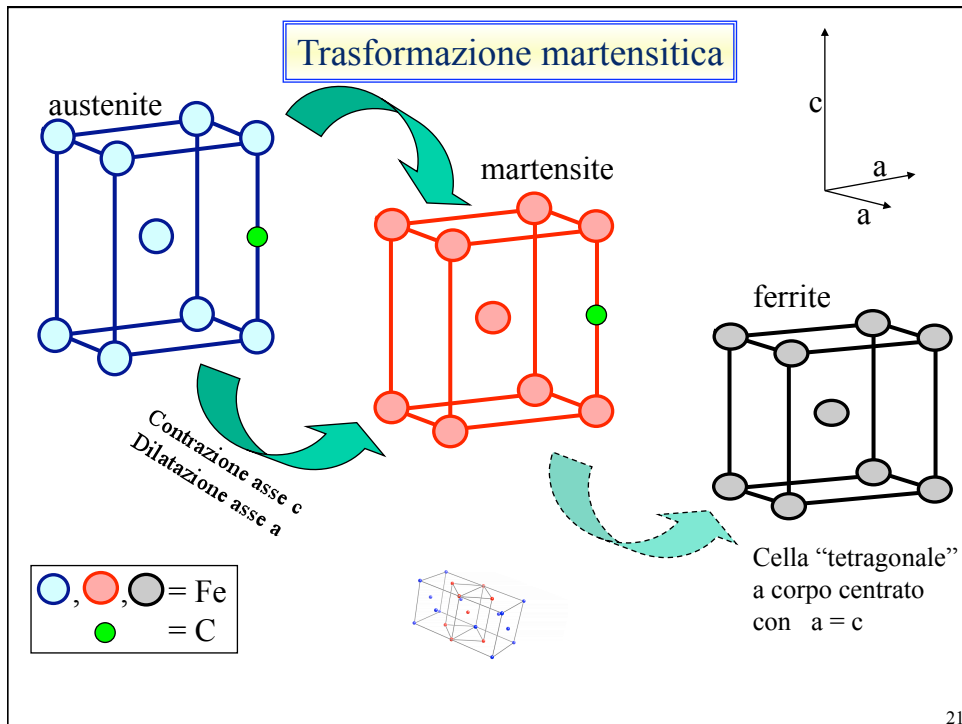


L'austenite
"contiene"
una struttura
tetragonale
a corpo centrato

Trasformazione martensitica

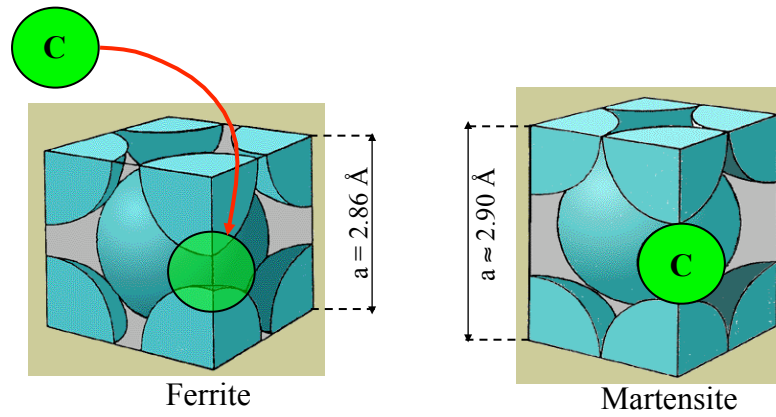


20



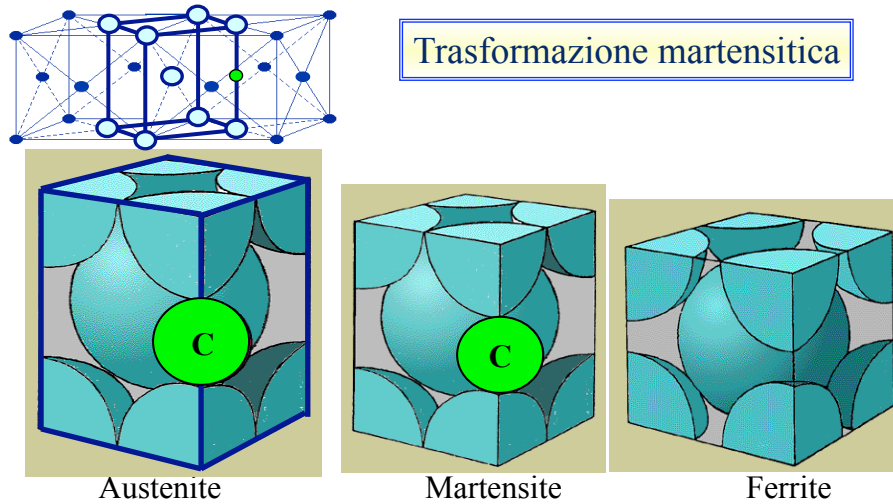
Trasformazione martensitica

(Fe-0.4%C)



23

Trasformazione martensitica



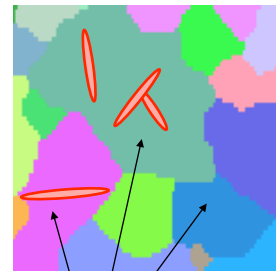
Martensite:

soluzione solida sovrassatura del Carbonio nella Ferrite,
originata per raffreddamento rapido (tempra) dell'austenite

24

Trasformazione martensitica

- La martensite **nuclea all'interno del grano** austenitico
- La **trasformazione** avviene in maniera praticamente **istantanea** ($\approx 10^{-7}$ s) **indipendentemente dalla temperatura** (**trasformazione atermica**)
- La trasformazione è **a-diffusionale**
- **Composizione chimica** della martensite **coincidente** con quella dell'**austenite**
- Martensite come soluzione solida sovrassatura del Carbonio nella Ferrite



Grani austenitici

 = martensite

25

Trasformazione martensitica



*Martensite +
austenite residua.*

26

OSSERVAZIONE

A bassissime temperature i **carburi nella bainite inferiore** sono così **fini da non potersi risolvere** con il microscopio ottico e da non poter quindi distinguere una struttura bainitica da una martensitica **entrambe aciculari**

Principale differenza fra le due strutture:
(diffusione, scatto)

27

Cosa succede tra Ms e Mf?....

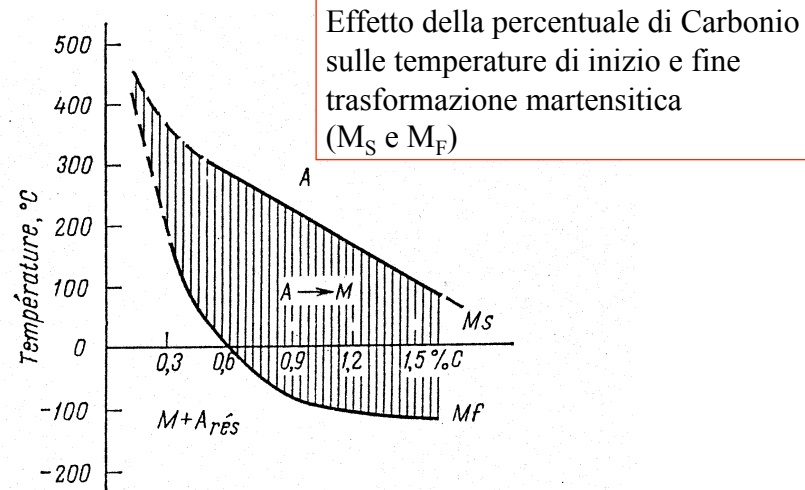
Ms e Mf variano notevolmente con la composizione dell'acciaio

Negli acciai in cui Mf è al di sotto della temperatura ambiente, è possibile il trattamento di **ipertempra** che consente l'ottenimento di austenite residua a temperatura ambiente

Il trattamento di **rifrigerazione**, talvolta a T notevolmente inferiori a 0 °C viene eseguito **per eliminare l'austenite residua** quando la sua presenza risulta particolarmente dannosa (**acciai da cementazione**)

28

Trasformazione martensitica



29

Trasformazione martensitica

Effetto della composizione sulla temperatura di inizio trasformazione martensitica

$$M_S (^{\circ}\text{C}) = 539 - 423 \cdot \%C - 30.4 \cdot \%Mn - 17.7 \cdot \%Ni - 12.1 \cdot \%Cr - 7.5 \cdot \%Mo$$

30

OSS: AUSTENITE RESIDUA

L'austenite residua è un costituente temibile negli acciai cementati: la sua presenza non è rara negli acciai cementati e temprati, specie negli acciai da cementazione ad alto tenore di lega (es Ni): l'austenite residua conferisce scarsa resistenza all'usura e degrada la resistenza a fatica.

31

Oss:

1. Ogni tipo di acciaio ha la sua curva TTT caratteristica
2. Negli acciai più complessi (legati) la forma è più complicata (due nasi)
3. A rigore le curve TTT non potrebbero essere utilizzate in pratica!

32

1. Bassa velocità di raffreddamento o bassi sottoraffreddamenti:

- Migrazione degli atomi di Fe ($\gamma \rightarrow \alpha$)
- Migrazione del carbonio ($\rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$)

Si ottiene perlite tanto più fine quanto più è alta la velocità di raffreddamento (**perlite grossolana, troostite**)

2. Velocità di raffreddamento intermedie o sottoraffreddamenti medi :

- **Non avviene** la diffusione degli atomi di **ferro**: la trasf ($\gamma \rightarrow \alpha$) avviene con un meccanismo a scatto
- Migrazione del carbonio ($\rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$) avviene in ammassi sempre più fini non risolvibili al microscopio ordinario

La struttura che ne deriva si chiama **BAINITE**

33

3. Elevata velocità di raffreddamento o sottoraffreddamenti elevati:

- Non c'è migrazione degli atomi di Fe
- Non c'è migrazione del carbonio

La trasformazione avviene senza diffusione ma con **movimento a scatto** degli atomi. Gli atomi di carbonio rimangono imprigionati nel reticolo α distorcendolo: forma **TETRAGONALE (parallelepipedo retto a sezione quadrata) = MARTENSITE**

La martensite

È il costituente più duro e fragile dell'acciaio (fino a **63-64 RC**)
(dovuta alla distorsione data dalla presenza abusiva del carbonio)

La durezza aumenterà quindi con il tenore di C (però solo fino allo 0.5%)

E' una soluzione solida sovrasatura (**martensite α**)

34

La martensite

Si presenta sotto **forma aciculare** (aghi formanti angoli di 60°)

Sottoposta a $125-160^\circ\text{C}$ (rinvenimento) il reticolo ritorna cubico a corpo centrato e senza carbonio che precipita sotto forma di finissimi carburi = martensite rinvenuta (o **martensite β**)

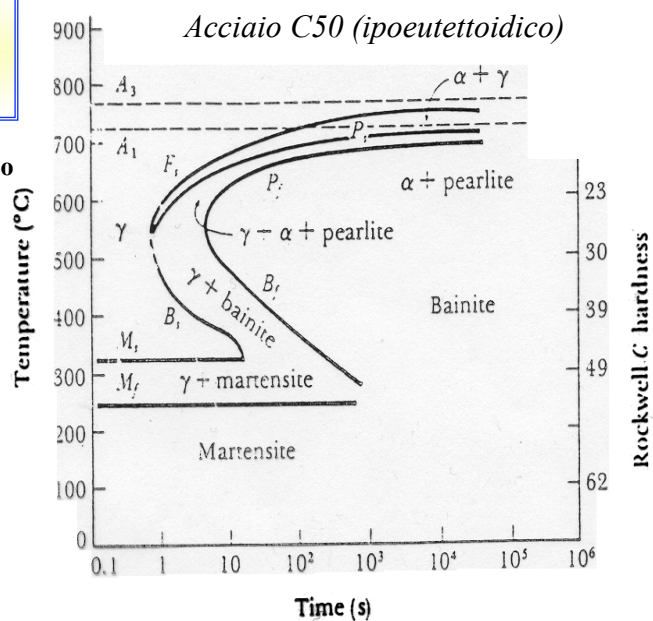
35

Trasformazioni isoterme Curve di Bain (TTT)

Acciaio ipoeutettoidico ($C < 0.8\%$)

Oss: per elevati
sottoraffreddamenti viene
soppressa la
trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha$
prevista dal diagramma
Fe-C

Si formerà solo perlite
che non ha però
composizione eutettoidica
(le lamelle di ferrite
avranno uno spessore
maggiore che non nella
perlite eutettoidica)



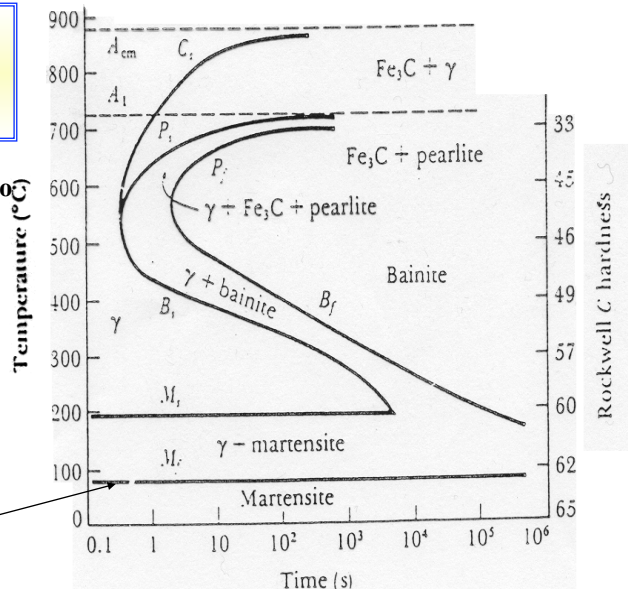
36

Trasformazioni isoterme

Curve di Bain (TTT)

Acciaio iperutetoidico
($C > 0.8\%$)

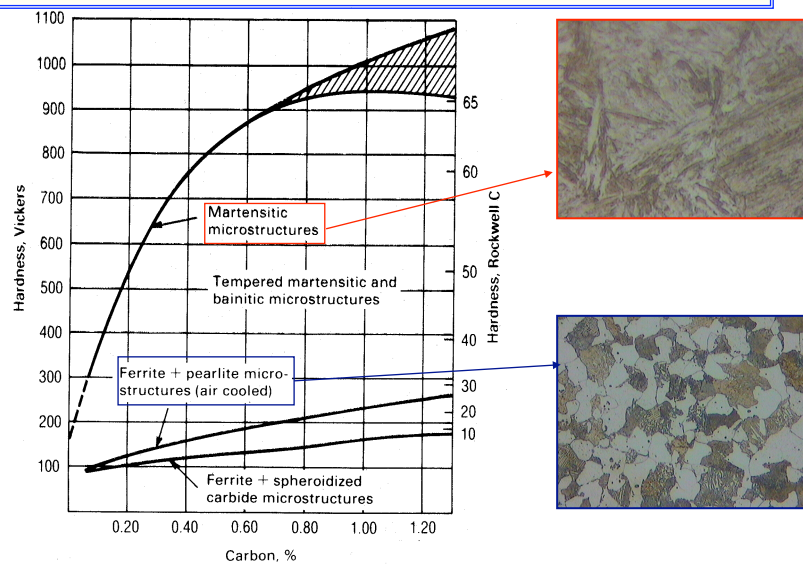
ERRORE



Acciaio C110 (iperutetoidico).

37

Correlazioni composizione-microstruttura-proprietà



38

TTT

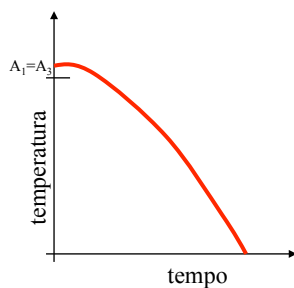
1. Elementi in lega= tutti **tranne il cobalto** spostano a destra le curve (**effetto sinergico**) (le curve diventano più complesse, 2 nasi, **Ausforming**)
2. Grana grossa = sposta a destra le curve
3. Composizione disomogenea = sposta a sinistra le curve
4. Temperatura di austenitizzazione alta = scioglie più carburi degli elementi in lega (es Cr), **aumenta le dimensioni del grano e il grado di omogeneità** e quindi **sposta le curve a destra**

39

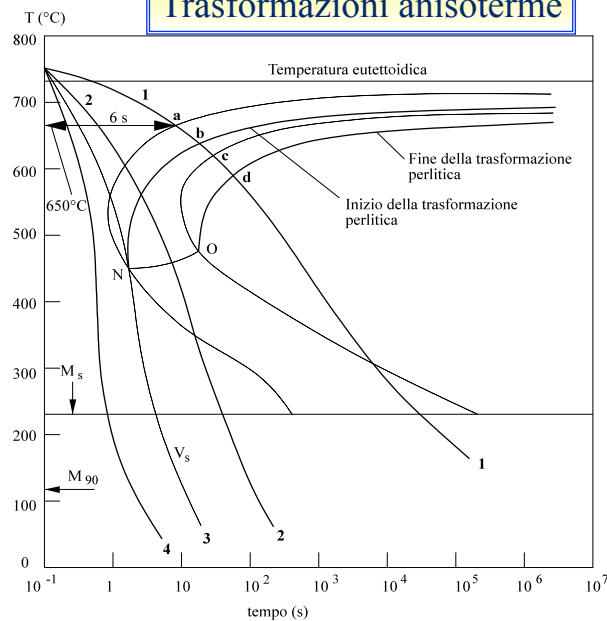
CURVE CCC

Continuous Cooling Curves

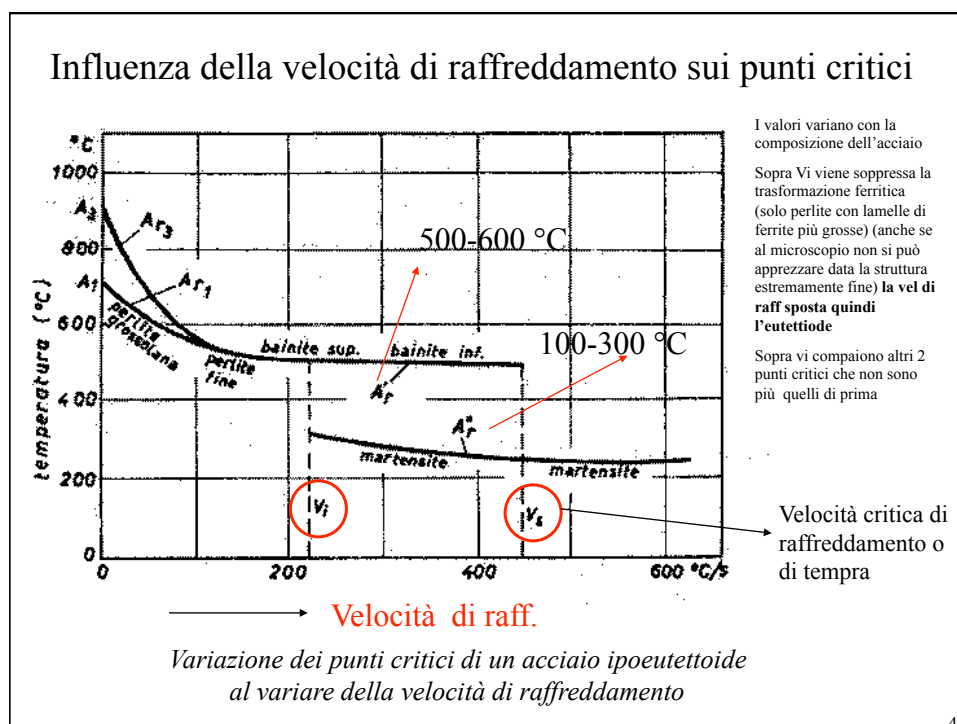
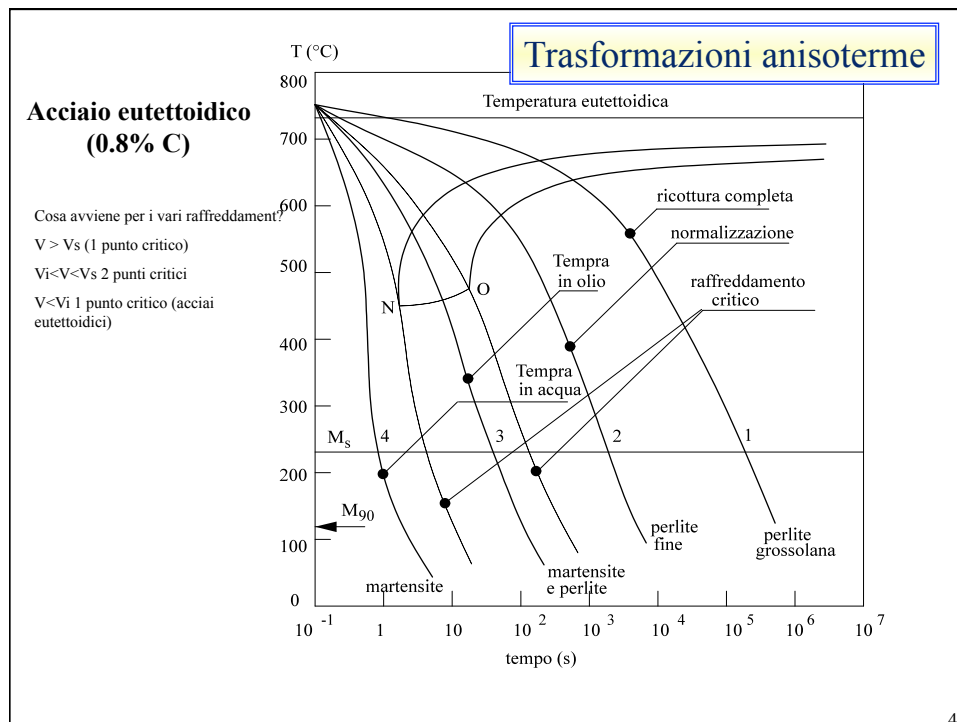
Acciaio eutettoidico (0.8% C)



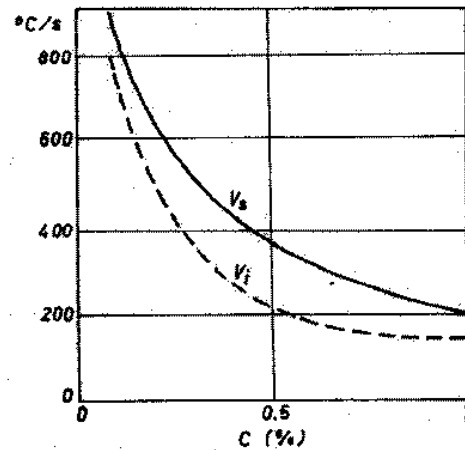
Trasformazioni anisoterme



40



Trattamenti termici



*Andamento delle velocità critiche
al variare della percentuale di carbonio*

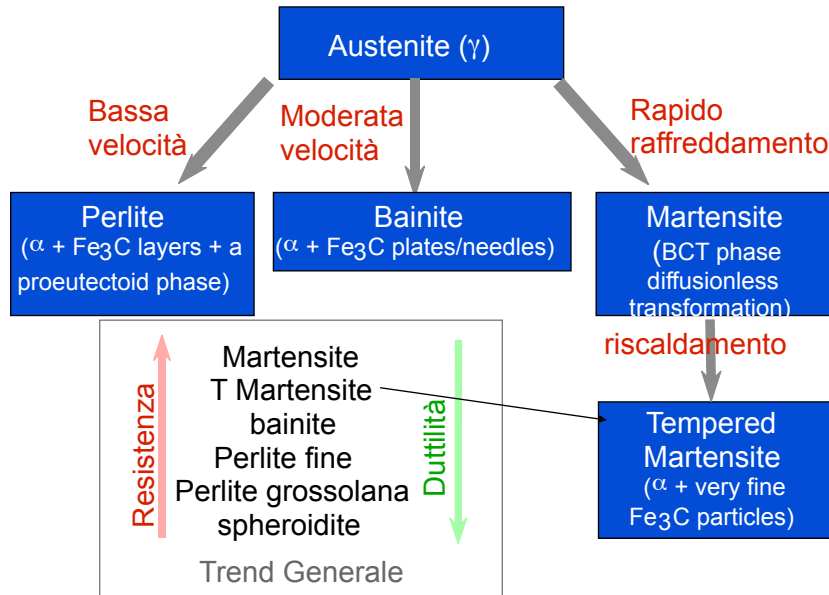
43

All'aumentare della velocità di raffreddamento la perlite è sempre più fine!

La presenza di elementi speciali nell'acciaio (es Cr, Ni, Mo..) oltre a spostare i punti critici, può influire sensibilmente sui processi di diffusione...la struttura che si forma dipenderà non solo dalla velocità di raffreddamento ma anche dalla composizione dell'acciaio (curve CCC)

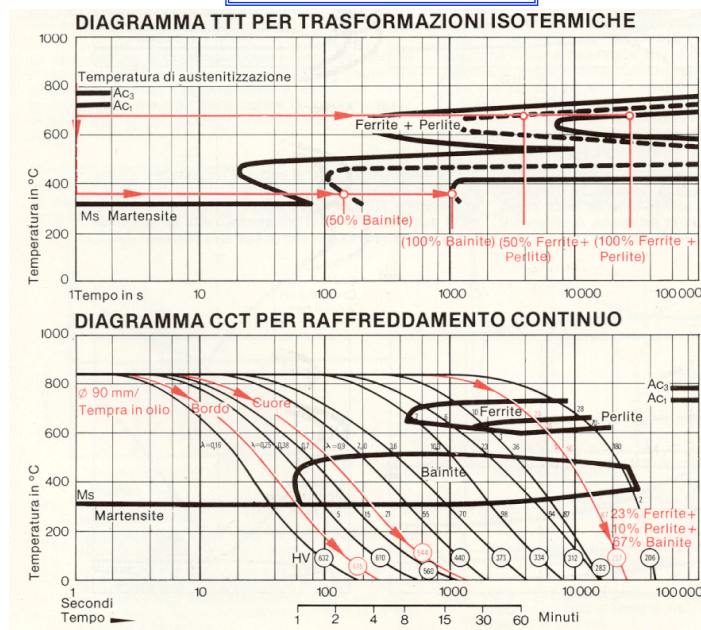
44

Sommario:



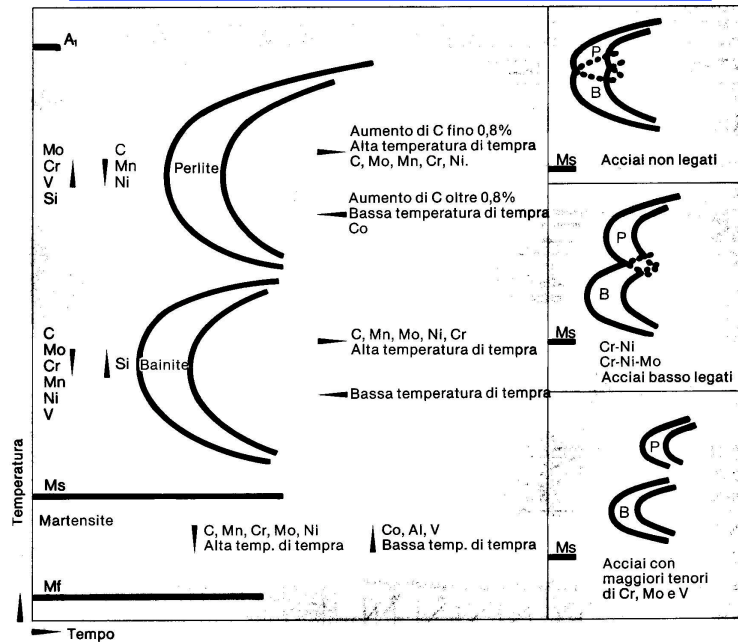
45

Curve TTT e CCT



46

Fattori di influenza su curve TTT e CCT

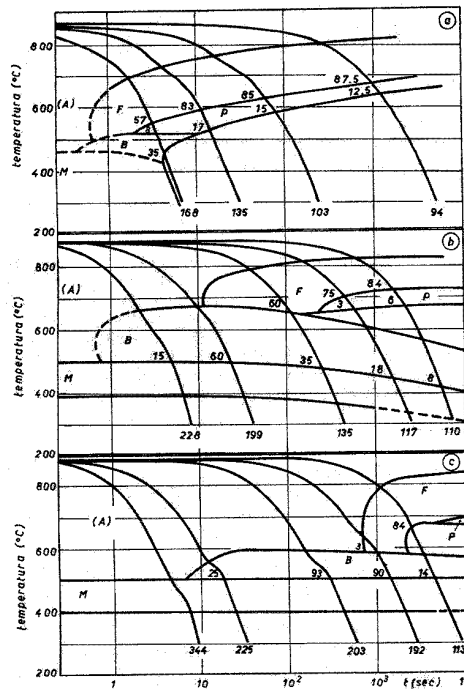


47

C = 0.12% Mn = 0.50% Si = 0.16%
S = 0.010% P = 0.004% Mo = --
N = 0.0005% Al = -- B = --

C = 0.11% Mn = 0.50% Si = 0.22%
S = 0.007% P = 0.002% Mo = 0.56%
N = 0.002% Al = 0.003% B = --

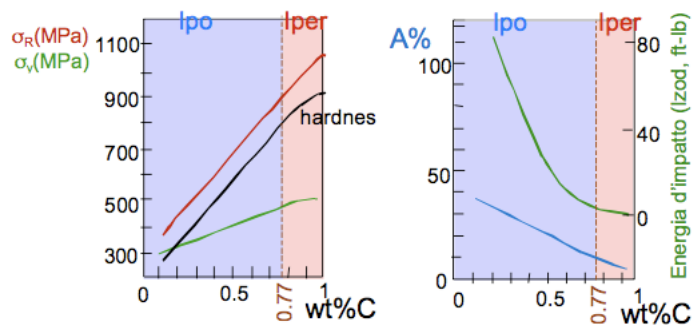
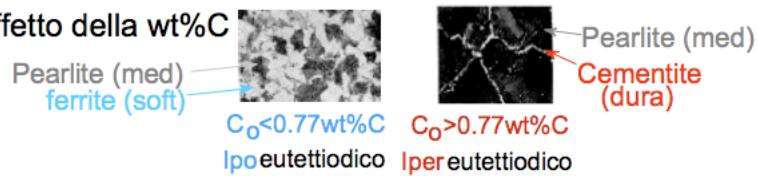
C = 0.10% Mn = 0.52% Si = 0.21%
S = 0.005% P = 0.002% Mo = 0.55%
N = 0.0007% Al = 0.050% B = 0.006%



48

Proprietà meccaniche: sistema Fe-C (1)

- Effetto della wt%C

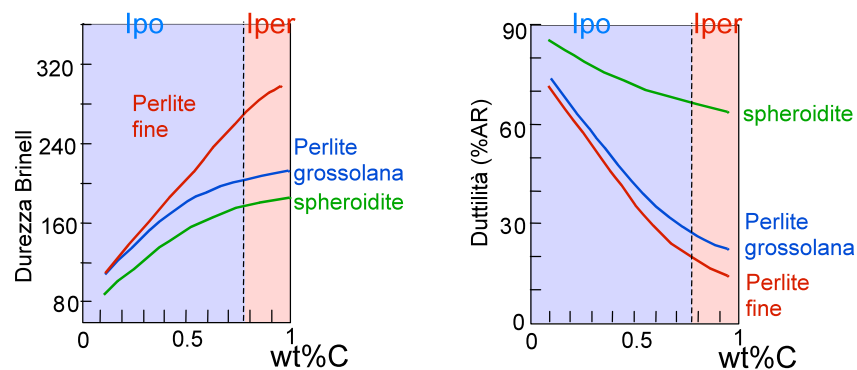


- Più wt%C: σ_R e σ_y aumentano , A% diminuisce.

49

Proprietà meccaniche: sistema Fe-C (2)

- perlite fine, grossolana e sferoidale

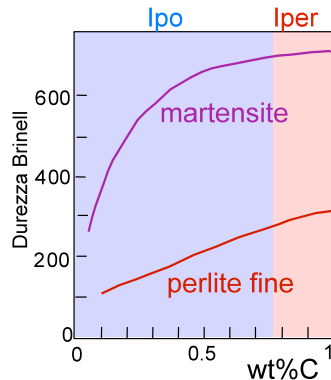


- Durezza : fine > grossolana > sferoidale
- %AR: fine < grossolana < sferoidale

50

Proprietà meccaniche: sistema Fe-C (3)

- **Perlite fine vs Martensite:**



- **Durezza: Perlite fine << martensite.**

51

Trattamenti termici

“Operazione o successione di operazioni mediante le quali una lega o un metallo vengono assoggettati, al di sotto del punto o dell’intervallo di fusione, in ambiente di natura determinata, ad uno o più cicli termici, nell’intento di impartire loro determinate proprietà”

Si intende quindi la modificazione della struttura (e quindi delle proprietà) di una lega, ottenute per **riscaldamento ad una T definita**, per un **mantenimento a questa T**, seguito da un **raffreddamento a velocità imposta**.

Solo attraverso tali trattamenti è possibile ottenere le **caratteristiche volute** in un acciaio di una determinata composizione.

52

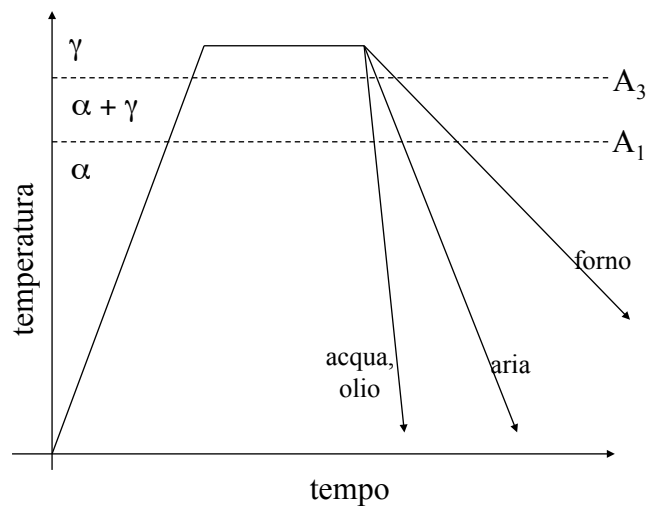
Trattamenti termici

CLASSIFICAZIONE

1. Riscaldamento a **T superiore ad Ac3** (ricottura, normalizzazione, tempra)
2. Riscaldamento a **T inferiore ad Ac1** (ricottura di addolcimento, rinvenimento..)
3. Per ottenere **risultati particolari** (ricottura di globulizzazione, tempra superficiale, tempra degli acciai austenitici)
4. **Trattamenti termomeccanici** (laminazione controllata, ausforming..)
5. **Trattamenti termochimici** di diffusione
6. Tempra di soluzione delle leghe Al-Cu (**invecchiamento**)

53

Trattamenti termici



54

Ricottura

Consiste nel riscaldamento di un acciaio al di sopra delle **temperature di trasformazione di fase A3** e ad un **successivo raffreddamento lento** sufficiente per determinare nella massa metallica le trasformazioni volute.

- **Scopo** del trattamento: **addolcimento del materiale**. La durezza dell'acciaio si abbassa.
- si possono **variare le dimensioni della grana** cristallina
- **migliora l'omogeneità**
- **aumenta la lavorabilità**
- **elimina le tensioni interne**
- **elimina la struttura di solidificazione** (Windmanstatten)
- **elimina gli effetti della saldatura**, della **deformazione plastica**, di un **trattamento termico**.

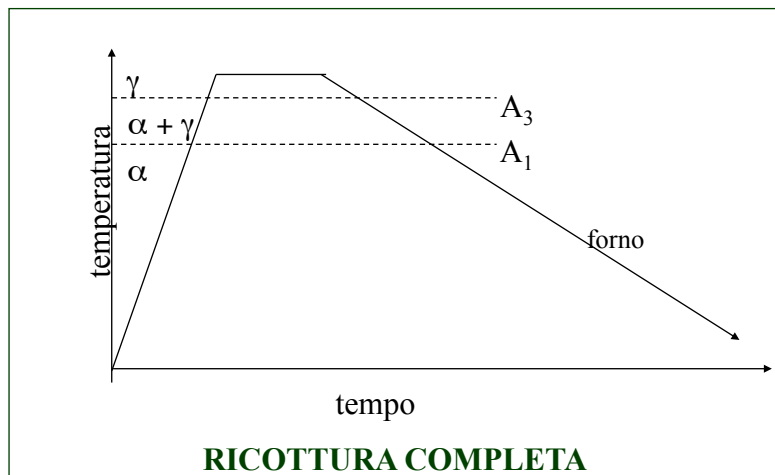
55

Ricottura completa

- Riscaldamento **100 °C/h**
- **temperatura 30-50 °C sopra AC3**
- Mantenimento al disopra dell'intervallo critico **per un tempo conveniente che dipende da:**
 - forma e dimensioni** del pezzo
 - conducibilità termica** del materiale da trattare
 - capacità termica** del forno
 - presenza di elementi o costituenti di lega** che ritardino o rendano più complessi i fenomeni di diffusione
 - tendenza all'ingrossamento del grano** (in generale **0,5-1 h** per ton di carica)
- Raffreddamento **30-100 °C/h per acciai legati**
- Raffreddamento **150-200 °C/h per acciai al C**
- **Sotto i 500 °C, raffreddamento in aria**

56

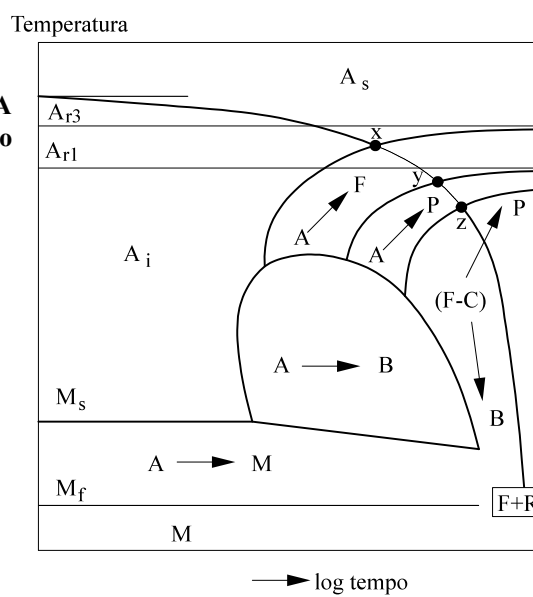
Ricottura completa



57

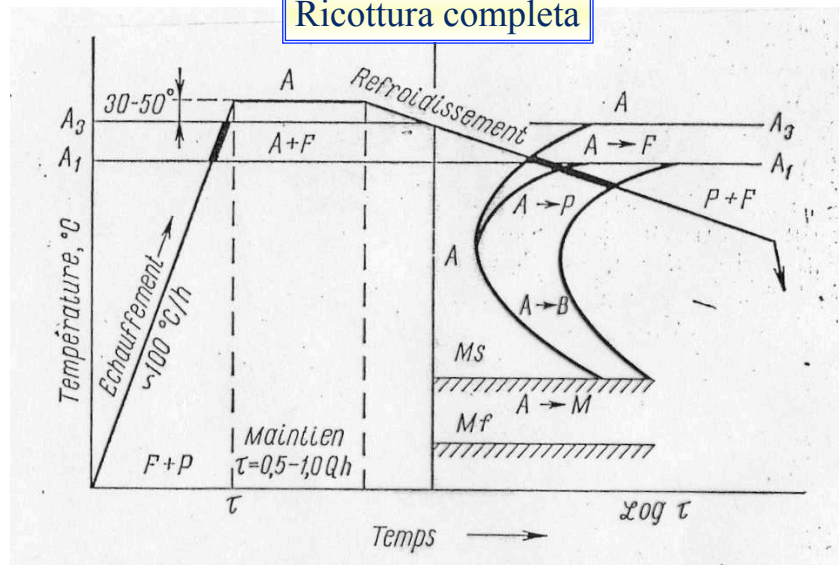
Ricottura completa

**RICOTTURA COMPLETA
di un Acciaio ipoeutetoidico**



58

Ricottura completa



Ricottura completa dell'acciaio ipoeutetico.

59

Ricottura completa

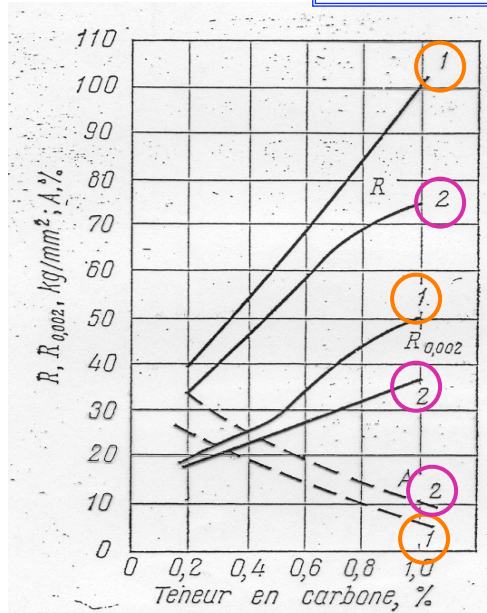
Con l'aumento della velocità di raffreddamento, la quantità di perlite e la sua dispersione aumentano, e diminuisce la quantità di ferrite.

Si applica soprattutto su pezzi laminati e forgiati e su getti e lingotti per ridurre la durezza e rendere più facile la spellatura prima della laminazione.

La Figura seguente mostra l'influenza della ricottura completa sulle proprietà meccaniche di un acciaio laminato con tenore di carbonio variabile.

60

Ricottura completa



Influenza della ricottura sulle proprietà meccaniche dell'acciaio laminato in funzione del tenore di carbonio.

- 1 - prima della laminazione,
2 - dopo ricottura completa.

61

Problemi della ricottura completa

1. Poco economica ($T \gg A_{c3}$)
2. Notevole perdita di tempo e impiego di mezzi
3. Struttura grossolana

(oss: come misuro il grano austenitico? ...prova di McQuaid-Ehn, cementazione 8 ore a 900 °C e raffreddamento lento)

Per diminuire i tempi si esegue una ricottura isotermica!!!

62

Ricottura isoterma

Riscaldamento *ad una temperatura*

- superiore ad **Ac3** per gli acciai ipoeutetoidici
- superiore ad **Ac1** o **Acm** per gli acciai ipereutetoidici

e permanenza a tale temperatura

per un tempo sufficiente ad ottenere, nelle zone interessate, l'equilibrio strutturale.

Raffreddamento *più o meno rapido*,

ad una temperatura leggermente inferiore ad A1,

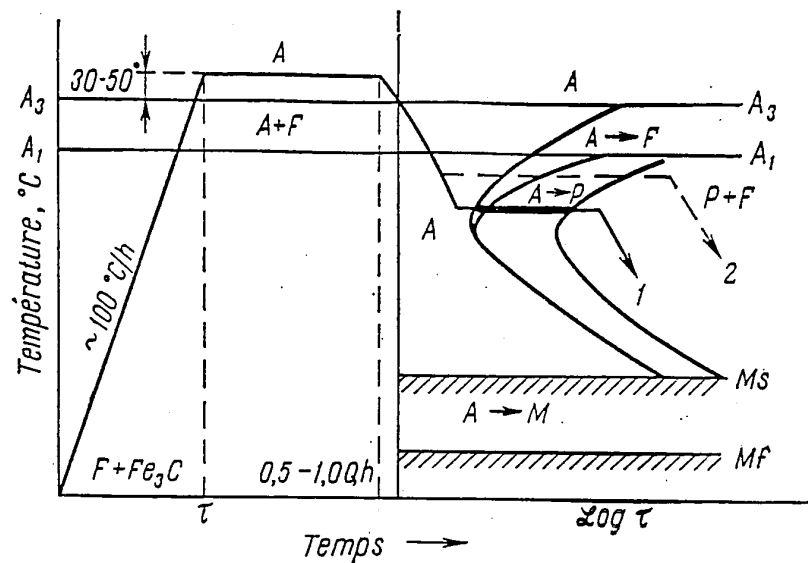
permanenza a tale T per il tempo necessario

a realizzare la completa trasformazione dell'Austenite

*in una struttura costituita da un aggregato, relativamente dolce, di ferrite e carburi, seguita da un **ulteriore raffreddamento (in aria)**, a velocità più o meno rapida, fino a temperatura ambiente.*

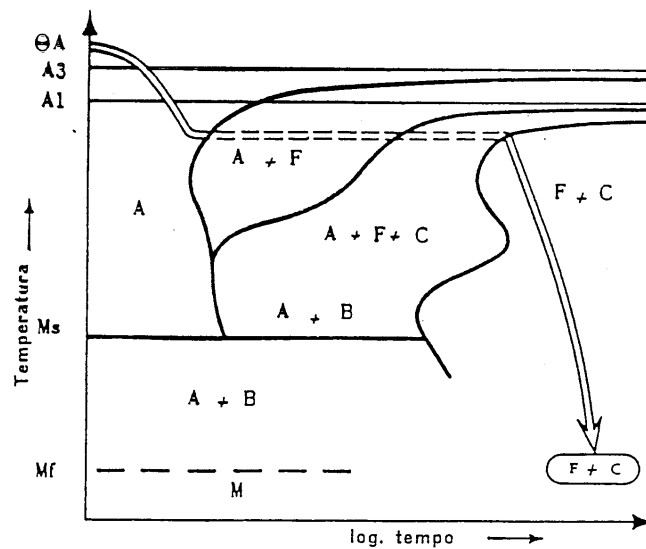
63

Ricottura isoterma



64

Ricottura isoterma



65

Ricottura isoterma

Viene utilizzata essenzialmente per avere un **tempo di trattamento inferiore** rispetto alla ricottura completa e conviene in particolare su pezzi laminati e forgiati di dimensioni abbastanza piccole.

Se per esempio la durata di ricottura generalmente utilizzata per **piccoli profilati di acciaio rapido** è di **30 h**, quella di Ricottura Isoterma realizzata dopo laminazione, con utilizzazione del calore del metallo non ancora raffreddato, si riduce a circa **8-10 h**.

66

Ricottura incompleta

*Si distingue da quella completa per il fatto che l'acciaio viene portato ad una temperatura più bassa, ovvero **un po' superiore ad Ac1**. Per gli acciai ipoeutetoidici, questa ricottura viene utilizzata per sopprimere le tensioni interne e **migliorare la lavorabilità**.*

In questo caso la ricristallizzazione dell'acciaio non si produce che parzialmente in seguito alla trasformazione perlite ==> austenite .
La ferrite in eccesso non subisce ricristallizzazione.

67

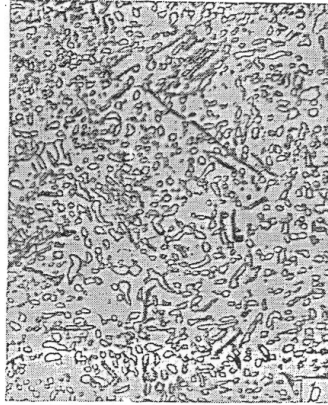
Ricottura incompleta

Il **vantaggio** di tale trattamento consiste nella possibilità di **diminuire l'ossidazione superficiale**. Tale trattamento per gli acciai ipo non può essere utilizzato se non quando la lavorazione a caldo è stata eseguita in maniera conveniente senza aver apportato ingrossamento del grano o in presenza di struttura di Windmanstätten.

Per gli acciai iper la ricottura incompleta rimpiazza generalmente la ricottura completa. Il riscaldamento al di sopra di Ac1 assume praticamente una ricristallizzazione completa. Ciò che interessa in maniera notevole è che tale ricottura non cambia la forma globulare della perlite, ma anzi **contribuisce alla trasformazione della perlite lamellare in globulare (aumento della lavorabilità)**.

68

Ricottura di coalescenza o di sferoidizzazione

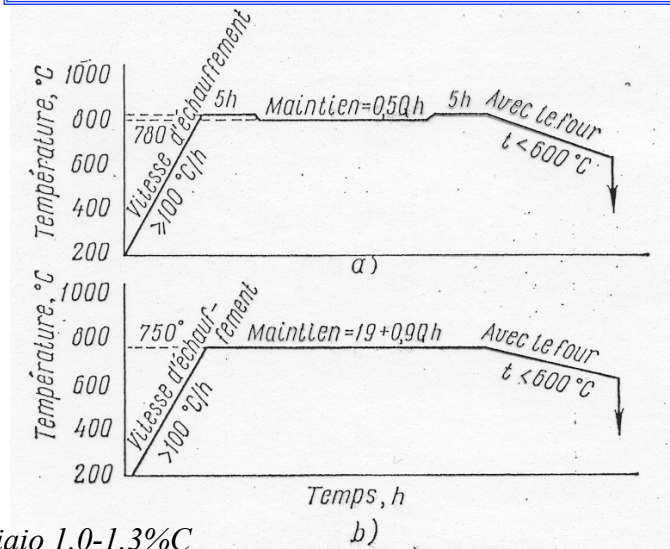


Micrografie della perlite lamellare (a)
e globulare (b). [600x]

È tipico per gli acciai da cuscinetti che debbono essere lavorati alle macchine automatiche: i globuli di cementite dispersi nella matrice ferritica facilitano notevolmente la rottura del truciolo

69

Ricottura di coalescenza o di sferoidizzazione



a) acciaio 1,0-1,3%C

b) acciaio 0,7-0,9 %C

70

Ricottura di coalescenza o di sferoidizzazione

Scopi : migliore lavorabilità e buona tenacità,
migliore deformabilità plastica a freddo.

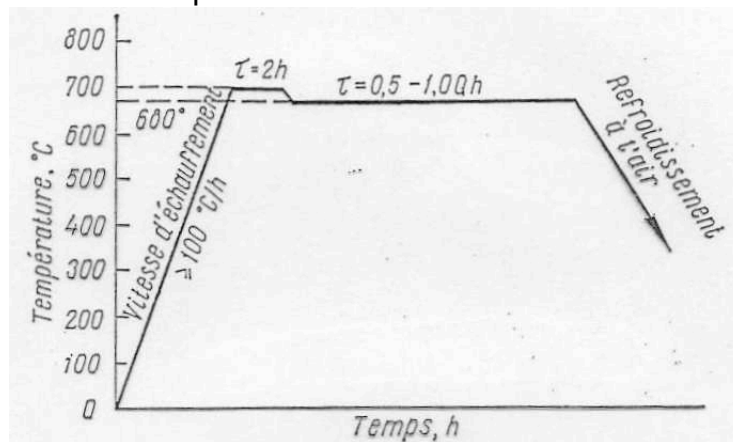
Struttura della perlite	HB	R (MPa)	A (%)	Z (%)
lamellare	228	820	15	30
globulare	163	630	20	40

71

Ricottura di addolcimento o rinvenimento ad alta T

Ricottura di Lavorabilità

Riscaldamento ad una temperatura di poco inferiore ad A_{c1} ,
Permanenza a tale temperatura per un tempo conveniente
Raffreddamento piuttosto lento.



Ricottura di addolcimento degli acciai da costruzione.

72

Ricottura di addolcimento o rinvenimento ad alta T

Ricottura di Lavorabilità

E' applicata agli acciai al carbonio **quando è prevista una lavorazione plastica o imbutitura a freddo**, o stiramento.

Per gli acciai fortemente legati, è l'unico trattamento che permette di diminuire la loro durezza.

Scopo di tale trattamento è rendere il materiale più facilmente lavorabile a freddo ed eliminare eventuali tensioni interne.

73

Ricottura di omogeneizzazione o di diffusione

Si applica ai lingotti in acciaio legato ed ai grossi pezzi di fonderia per diminuire le segregazioni ed uniformare la composizione chimica.

Il riscaldamento deve essere spinto a **1100-1200 °C**.

Le temperature elevate portano alla **formazione di scaglia** e quindi perdite in metallo.

Per tale motivo il riscaldamento si effettua ad elevate velocità ed il **tempo viene mantenuto al minimo**.

Il tempo varia da 8 a 16 h in relazione alla composizione ed al peso della carica.

Fino ad 800-850 °C i lingotti vengono raffreddati in forno per tempi compresi tra 6 e 8 h e quindi raffreddati in aria.

Dopo l'omogeneizzazione, il lingotto subisce una ricottura completa o una normalizzazione per correggere la struttura.

74

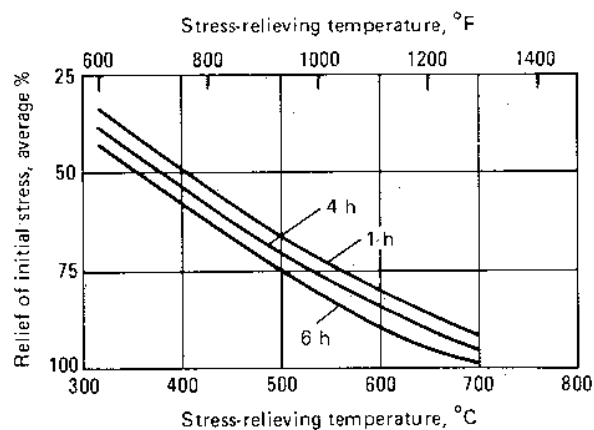
Distensione

Consiste in un riscaldamento ad una temperatura notevolmente al disotto di Ac1 e permanenza a tale T per un tempo conveniente.

Questo trattamento **riduce** sensibilmente **le tensioni residue** interne **indotte dalla tempra** o da **precedenti incrudimenti a freddo**, mantenendo la tenacità senza tuttavia degradare in modo sensibile le caratteristiche di durezza.

75

Distensione



Correlazione tra tempi e temperature del trattamento di distensione ed entità del rilassamento delle tensioni

76

Normalizzazione

*Riscaldamento ad una T superiore ad Ac_3 ,
per gli acciai ipo
e ad Ac_1 o Ac_m per gli iper,
permanenza a tale temperatura per un T sufficiente
a realizzare la trasformazione $\alpha \rightarrow \gamma$.
Raffreddamento con velocità che non deve superare, in ogni
caso, quella critica di trasformazione.*

Il raffreddamento in genere si effettua in aria calma.

77

Normalizzazione

Un raffreddamento accelerato all'aria
conduce alla decomposizione dell'austenite alle temperature
più basse

ed **aumenta** così la dispersione del miscuglio ferrite +
cementite (AFFINAMENTO DEL GRANO)
e la **quantità di perlite**.

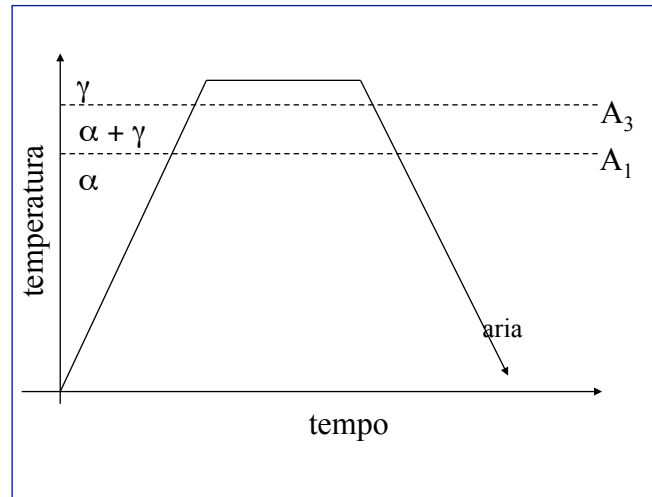
Si ottiene in tal modo una **maggiore durezza**
rispetto ad un acciaio ricotto ed inoltre
l'affinazione del grano migliora la tenacità.

CORREGGERE

La temperatura di normalizzazione
varia ugualmente in funzione della composizione dell'acciaio.

78

Normalizzazione



79

Normalizzazione

Durezza di acciai al carbonio allo stato ricotto e normalizzato

	HB ricotto	HB normalizzato
Ferro	80-100	90-100
Acciaio a basso C	125	140
Acciaio a medio C	160	190
Acciaio ad alto C	185	230

80

Tempra

Si comprendono trattamenti termici eseguiti con cicli diversi che hanno in comune essenzialmente

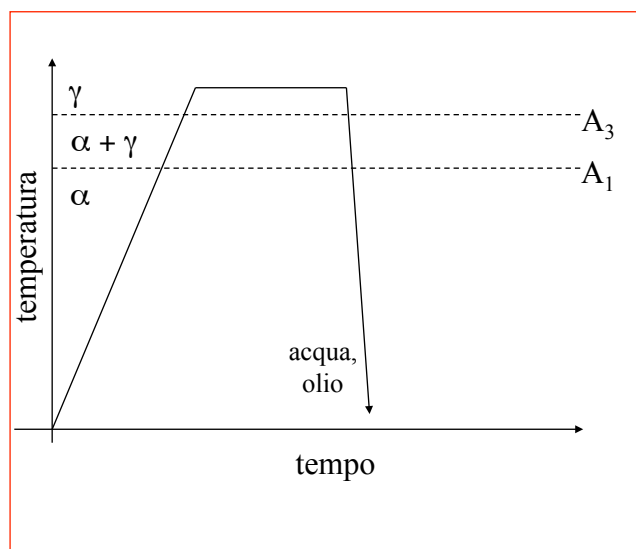
un **riscaldamento a T superiore ad A_{c3}** per gli acciai **ipo** e **A_{c1} - e A_{cm} - per gli iper** ;

permanenza a tale T per un tempo sufficiente ad ottenere nelle zone interessate l'omogeneità e l'equilibrio strutturale; successivo **raffreddamento con una velocità superiore a quella critica** di tempra fino ad un campo di T prossimo ad M_s .

Le modalità di raffreddamento nel suddetto campo o al di sotto di esso, diverse secondo gli scopi ed i requisiti che si desiderano ottenere, caratterizzano i singoli trattamenti di tempra.

81

Tempra

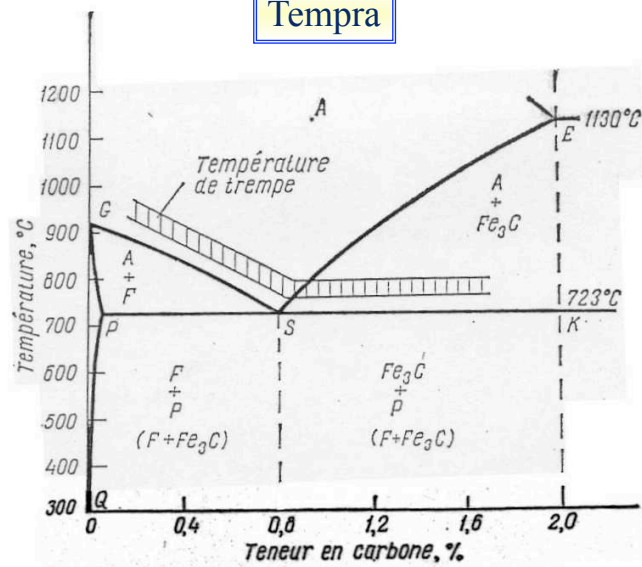


Condizioni necessarie:

1. Struttura austenitica di partenza
2. $V > V_s$
3. $M_f > T_{amb}$

82

Tempra



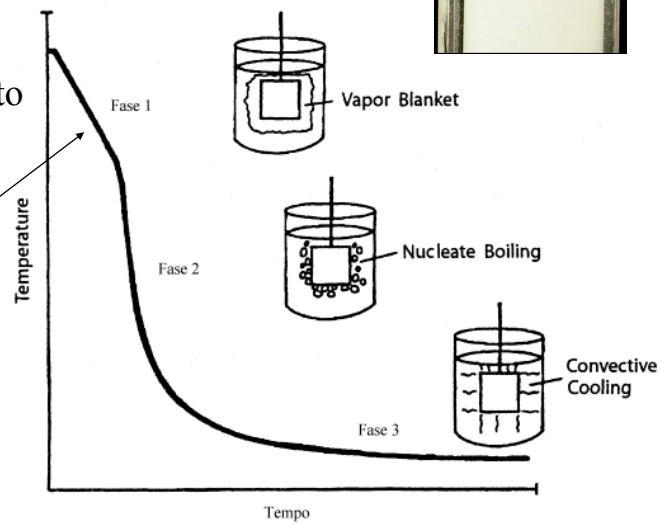
Parte del diagramma di equilibrio ferro - cementite.

83

Tempra

Tempra:
meccanismi
di raffreddamento

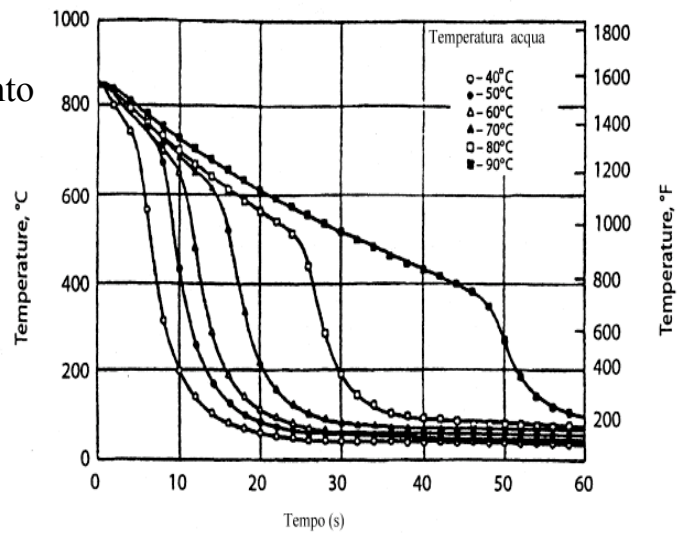
Fase più critica,
dipende dalla
temperatura del
bagno di tempra



84

Tempra

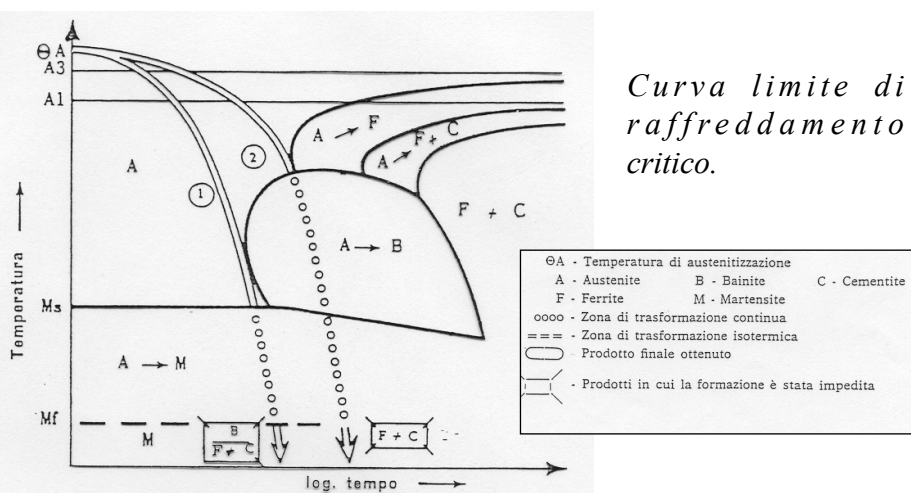
Tempra:
meccanismi
di raffreddamento



85

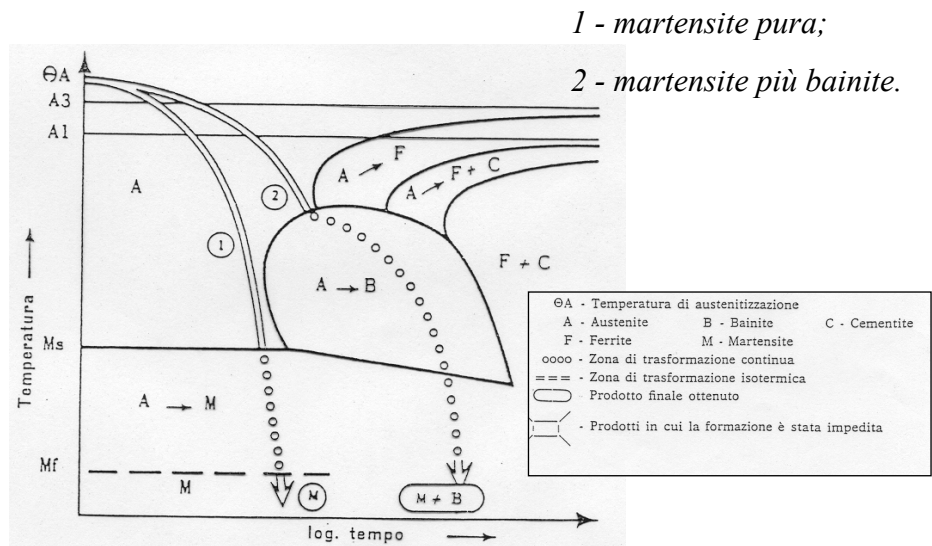
Tempra

*Curva limite di
raffreddamento
critico.*



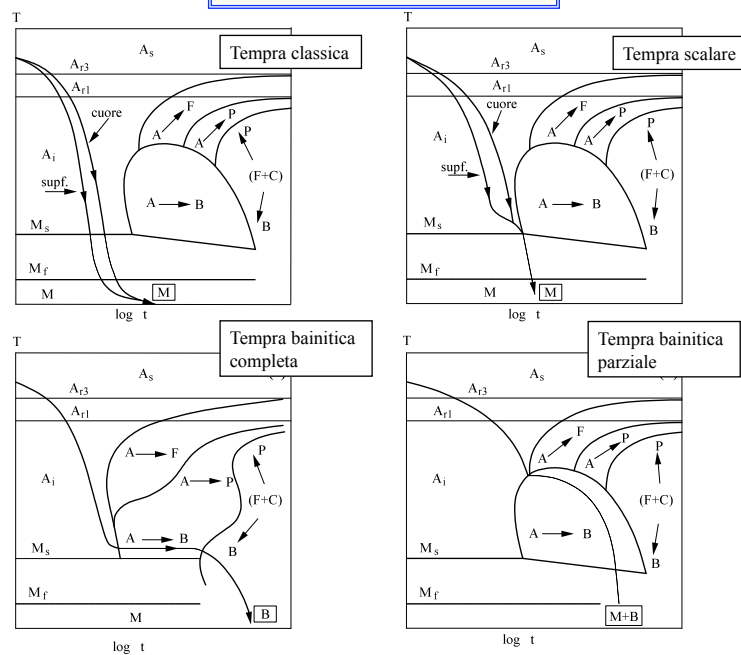
86

Tempra



87

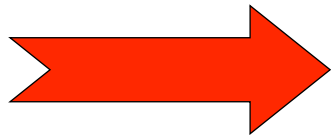
Trattamenti di tempra



88

Tempra classica o diretta

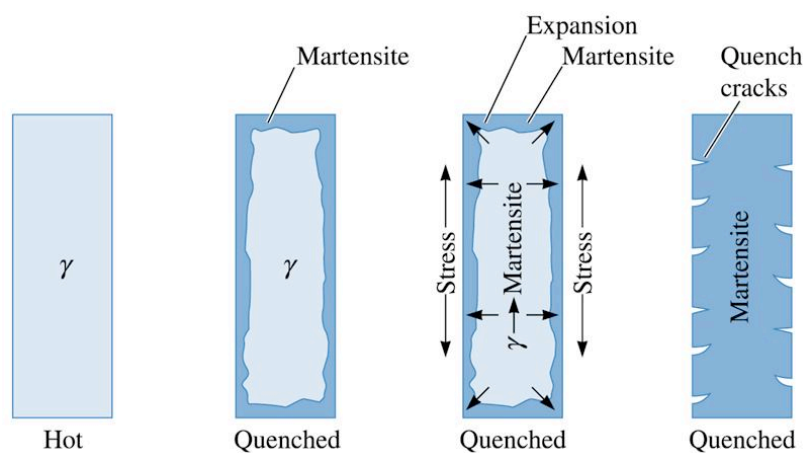
Il trattamento termico caratterizzato da un **riscaldamento a T superiore Ac_3** per gli **acciai ipo** e ad **Ac_1 o A_{cm}** per gli **acciai iper**; permanenza a tale T per un tempo sufficiente ad ottenere l'equilibrio strutturale; **raffreddamento**, lento per particolari acciai legati fino ad Ar_3 e quindi, **fino a T ambiente con velocità superiore a quella critica** in modo da ottenere una struttura martensitica.



Cricche di tempra

89

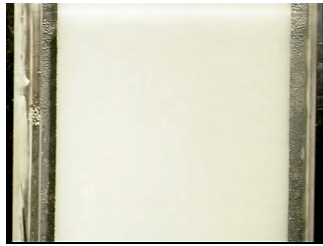
Tempra classica o diretta



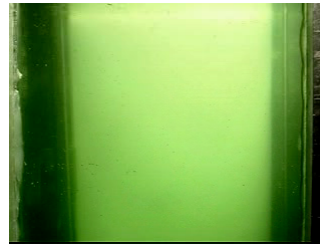
90

Tempra classica o diretta

Distorsioni



Tempra in acqua



Tempra in soluzione
polimerica

91

Tempra termale o scalare (marquenching)

Il trattamento termico caratterizzato da un riscaldamento a T superiore Ac_3 per gli acciai ipo e ad Ac_1 o A_{cm} per gli acciai iper; permanenza a tale T per un tempo sufficiente ad ottenere l'equilibrio strutturale; raffreddamento, lento per particolari acciai legati fino ad Ar_3 e quindi, fino a T prossima ad M_s con velocità superiore a quella critica; permanenza a tale T fino a realizzare una certa uniformità di T , ma non da provocare l'inizio della trasformazione dell'austenite e quindi raffreddamento rapido fino a T ambiente.

Lo **scopo** è di ottenere una struttura martensitica che conferisce al materiale particolari caratteristiche di durezza, **riducendo il pericolo di distorsioni o di cricche di tempra** negli acciai particolarmente sensibili a tali fenomeni.

92

Tempra bainitica o isotermica o intermedia

Riscaldamento di austenitizzazione;
raffreddamento sufficientemente rapido per evitare un inizio di trasformazione nel campo perlitico; nel campo bainitico si possono avere:

- a) permanenza a temperatura costante fino a completa trasformazione dell'austenite e quindi raffreddamento fino a T ambiente (**isotermica**)
- b) permanenza a temperatura costante fino alla parziale trasformazione dell'austenite e quindi raffreddamento fino a T ambiente per ottenere una certa quantità di martensite (**intermedia**)
- c) Un rallentamento del raffreddamento e successivamente, quando la trasformazione intermedia sia sufficientemente progredita, un raffreddamento fino a T ambiente (**intermedia**)

93

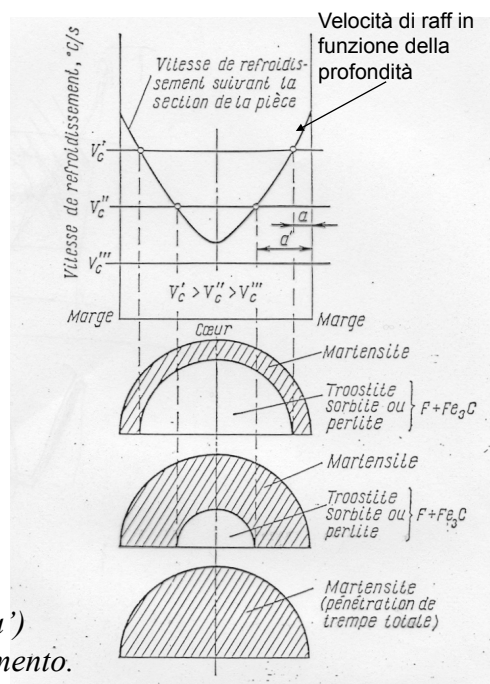
Temprabilità

E' la **attitudine di un acciaio ad avere una struttura martensitica** e quindi accrescere la sua durezza (che è essenzialmente **dipendente dal tenore di C**) a seguito della tempra.

La temprabilità si esprime mediante la profondità cui arriva l'indurimento o la Penetrazione di tempra:

comprende l'attitudine ad avere un determinato strato a struttura martensitica ed è determinata dalla **velocità critica di raffreddamento**.

*Relazione tra la profondità di tempra (a e a') e la velocità **critica** di raffreddamento.*



94

Temprabilità

Penetrazione di tempra:

E' l'attitudine di un acciaio ad avere un determinato strato a struttura martensitica.

E' determinata dalla velocità critica di raffreddamento.

La migliore tenacità si ottiene con la bonifica (sorbite)

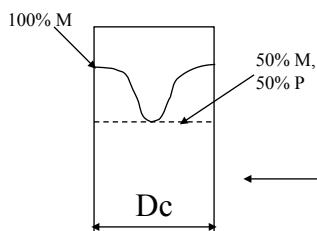
La profondità dello strato temprato

è considerata generalmente come la distanza dalla superficie della zona con 50% di martensite e 50 % di perlite o altro e viene facilmente identificata da uno studio micrografico o dalla durezza.

Una tempra al 100% spesso non è possibile e neanche consigliabile (distorsioni e rotture) (temprabilità e saldabilità)

95

Profondità di tempra
(50% martensite)
dipende da:



Composizione chimica (OSS:

oltre lo 0.8% di C la cementite
rimasta spostata a sinistra le CCC)

Dimensione del grano

austenitico (grano grosso sposta
a destra le CCC, però aumenta la
susceptibilità alle cricche di tempra)

Drasticità del bagno di tempra ($H=\alpha/K$)

Diametro del provino (Curve a U, definizione di Diametro critico)

96

La **soluzione più semplice** per ottenere una elevata penetrazione di tempra è l'utilizzo di **acciai legati**, ma è anche la **soluzione più costosa**

La scelta del mezzo di tempra è condizionata dalle dimensioni e forma del pezzo!!!

Es: pezzo semplice (cilindro) e piccolo = acciaio al C e mezzo drastico (acqua)

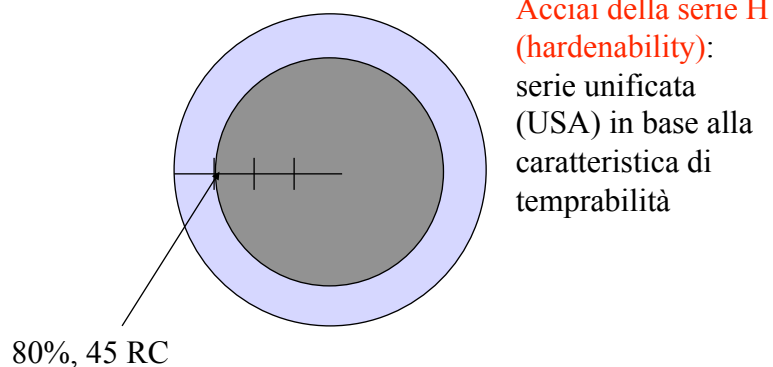
Pezzo complicato e piccolo = raffredd in olio o in aria

Pezzo di notevoli dimensioni e forma semplice = acciai poco costosi, tempra in acqua

Pezzo di notevoli dimensioni e forma complessa = acciai legati

97

Si può considerare efficiente dal punto di vista della bonifica una tempra che provochi nell'interno di un pezzo cilindrico (a $\frac{1}{4}$ del raggio) una trasformazione dell'austenite in 80% di martensite (corrispondente a una durezza RC 45 (0.38-0.42% C))



98

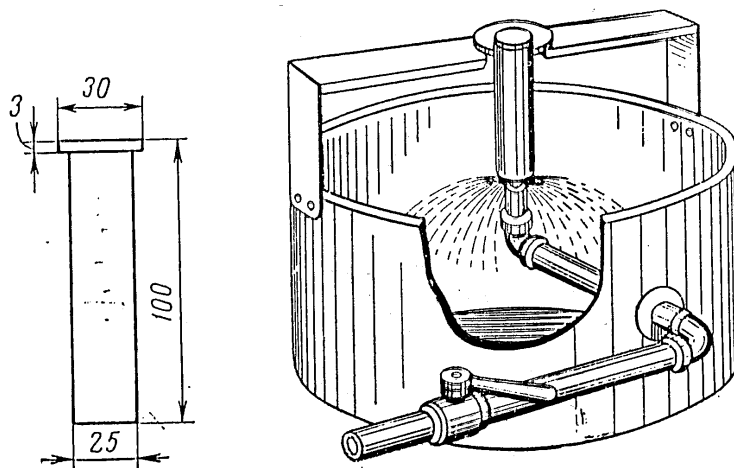
Temprabilità - Prova Jominy

Prove di temprabilità: si eseguivano inizialmente partendo da tondi di diverso diametro dello stesso acciaio e temprandoli in uno stesso liquido.

Ora universalmente è stata riconosciuta la **prova Jominy** per raffreddamento frontale. Questa prova consiste nel **raffreddare**, mediante un getto di acqua, **l'estremità di un tondo dell'acciaio** da esaminare **portato alla T di tempra**, e **misurare**, poi, a raffreddamento avvenuto, **la variazione di durezza dall'estremità raffreddata all'altro estremo**.

99

Temprabilità - Prova Jominy



Prova Jominy: provino e schema di impianto.

100

Temprabilità - Prova Jominy

Effettuato il raffreddamento, il provino viene **rettificato lungo due generatrici opposte**, per una profondità di 0,4 mm e sulle parti rettificate, ad una distanza di circa **1,5 mm** l'una dall'altra partendo dall'estremità raffreddata, si determina la durezza HRC.

I valori della durezza si riportano in un **diagramma** che ha per coordinate la distanza dalla parete raffreddata e i valori di durezza.

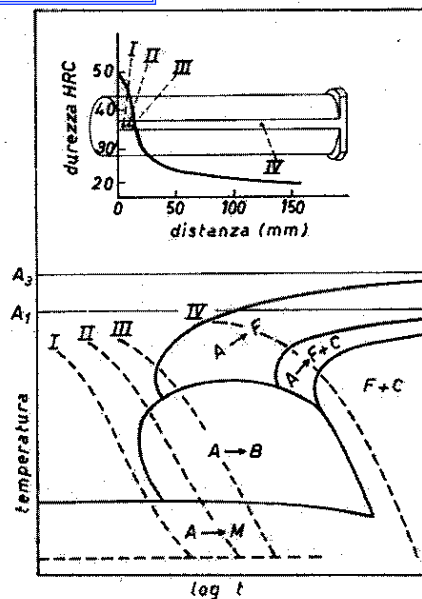
Esiste una correlazione tra la Jominy e le curve TTT o CCT.

101

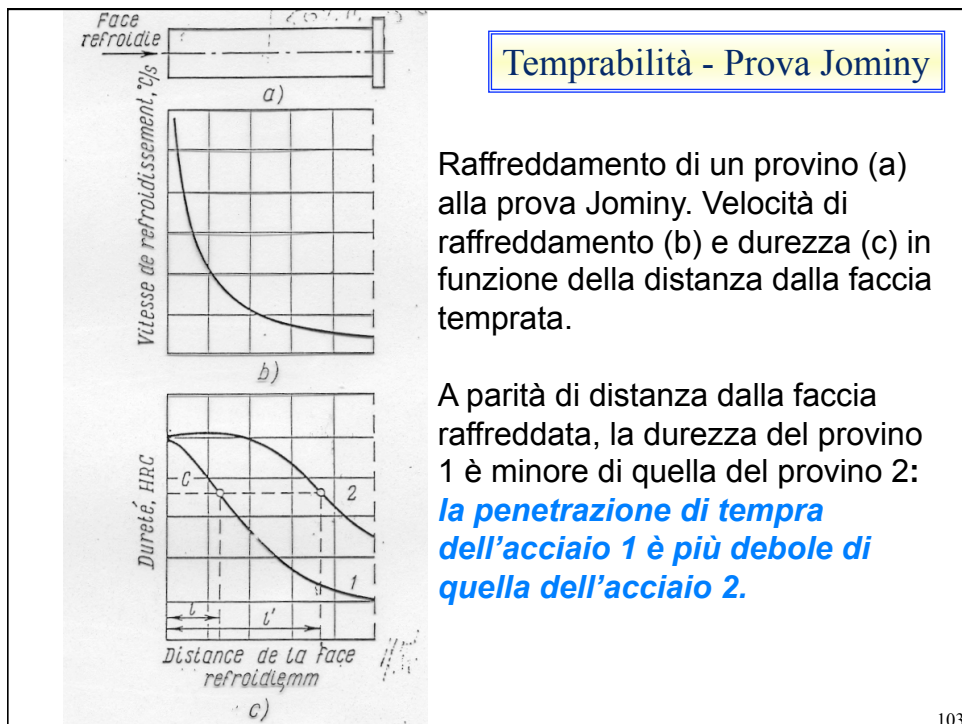
Temprabilità - Prova Jominy

*Correlazione
tra le durezze
ottenute nella prova Jominy
e le traiettorie
di raffreddamento
sovrapposte
al diagramma CCT*

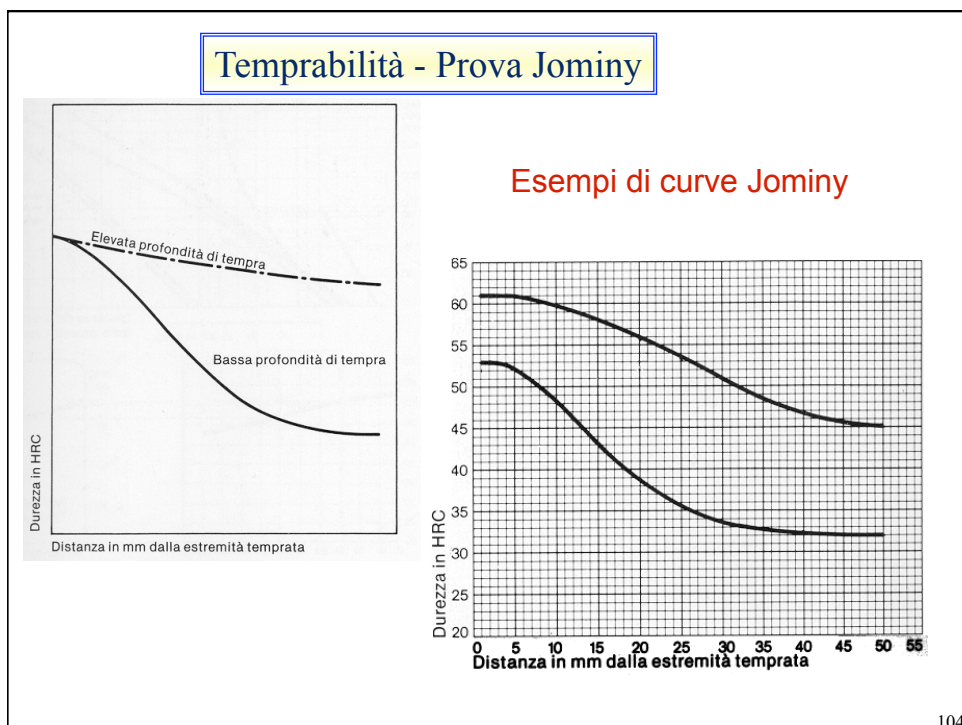
Il punto di flesso della
curva indica un 50% di
Martensite



102



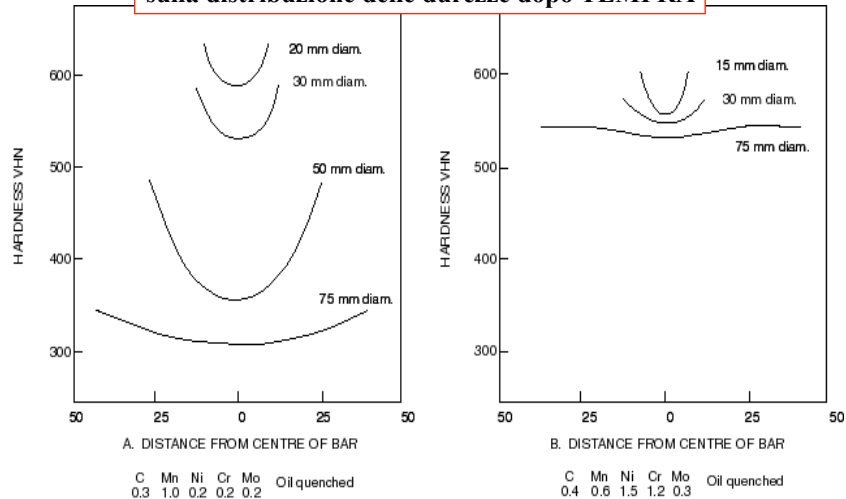
103



104

Temprabilità

Effetto delle dimensioni e della composizione sulla distribuzione delle durezza dopo TEMPRA



105

A che serve in pratica la prova Jominy?

Confronto fra acciai diversi....ma il progettista che date le dimensioni del pezzo vuole scegliere l'acciaio che abbia tempra a cuore come fa?

Un acciaio con temprabilità insufficiente ha scarse caratteristiche.

Un acciaio con temprabilità troppo alta ha problemi di deformabilità criccabilità.....e costo!!!!

Presupposti

1. Nella prova Jominy si realizzano **tutte le velocità di raffreddamento** riscontrabili nella pratica
2. La **velocità di raffreddamento** in un punto è il **solo fattore che ne determina la struttura** in quel punto

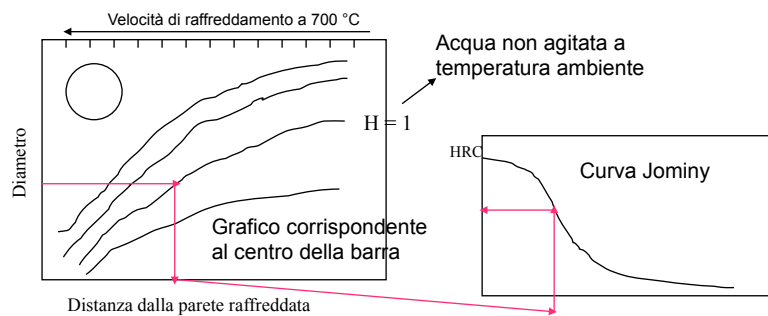
106

Si stabiliscono le velocità di raffreddamento nei vari punti della generatrice del provino Jominy

Si misurano le velocità di raffreddamento a varie distanze e al variare del diametro dei tondi

Quale velocità di raffreddamento?

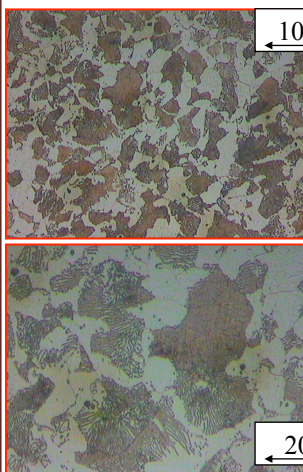
Convenzionalmente la velocità a 704 °C



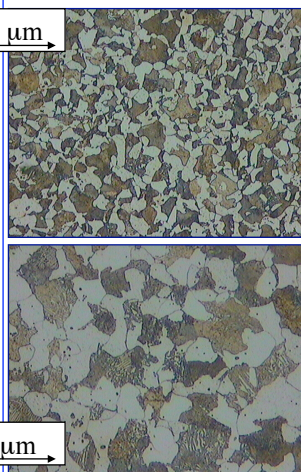
107

Trattamenti termici: Esempi di microstrutture

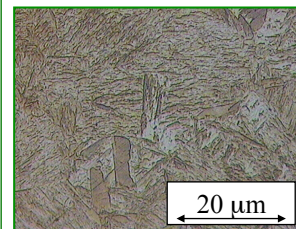
Ricottura



Normalizzazione



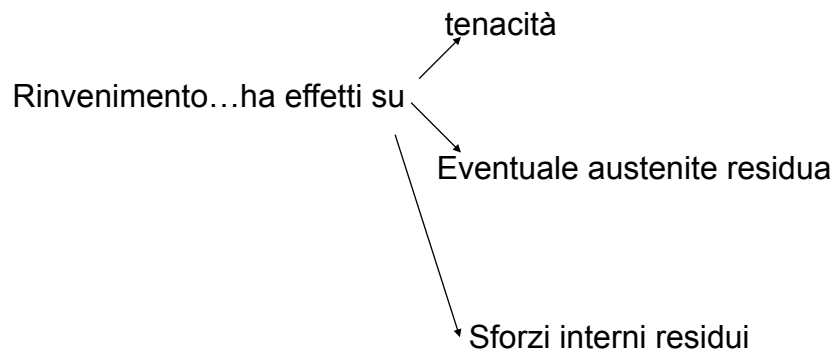
Tempra



108

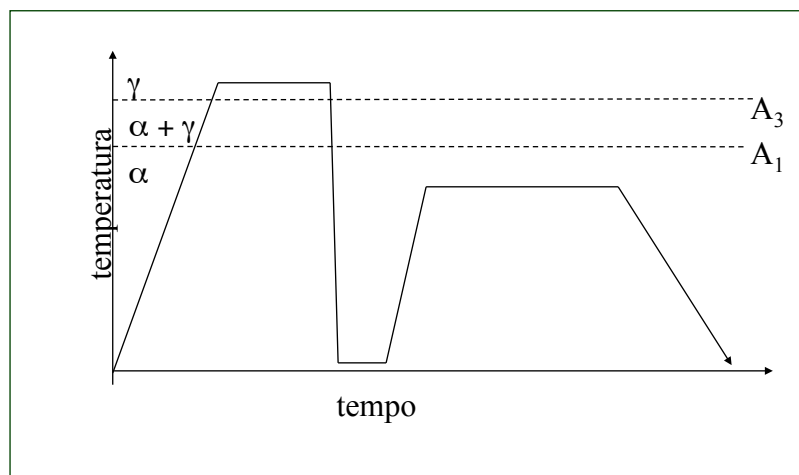
Bonifica = tempra + rinvenimento

La martensite è dura e resistente...**ma è fragile!**

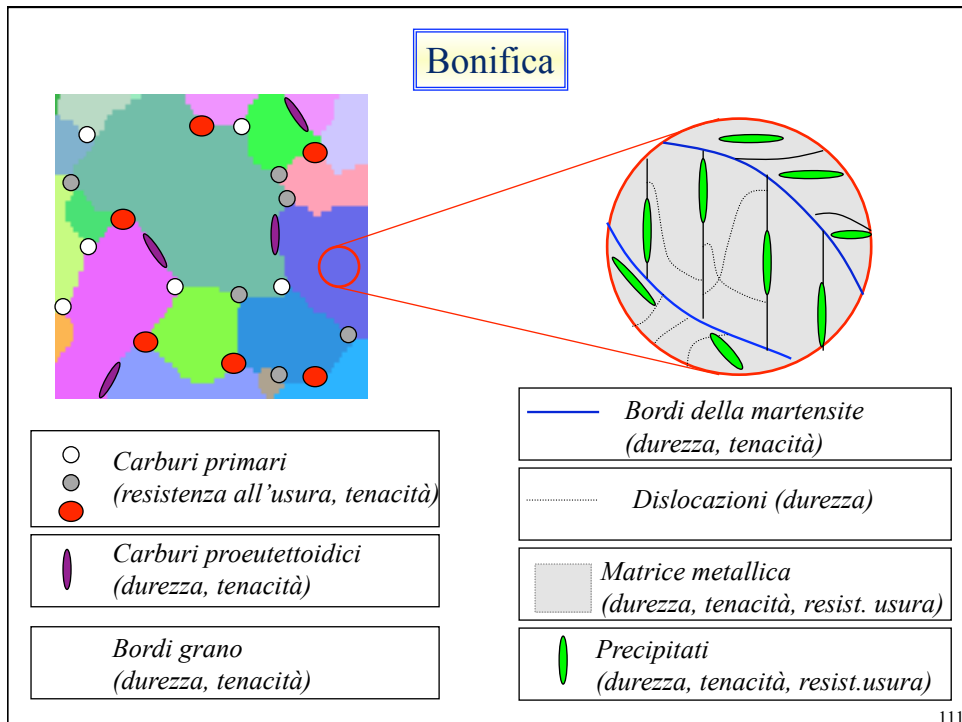


109

Bonifica = tempra + rinvenimento



110



Primo stadio (100 – 250 °C).

Martensite → Martensite + carburi (diminuzione di durezza e tensioni)

Secondo stadio (fino a 300 °C).

Austenite residua → bainite (aumento di durezza)

Terzo stadio (300 – 400 °C).

Martensite + carburi → ferrite + cementite lamellare (diminuzione di durezza, aumento di duttilità)

Quarto stadio (450 – 600 °C).

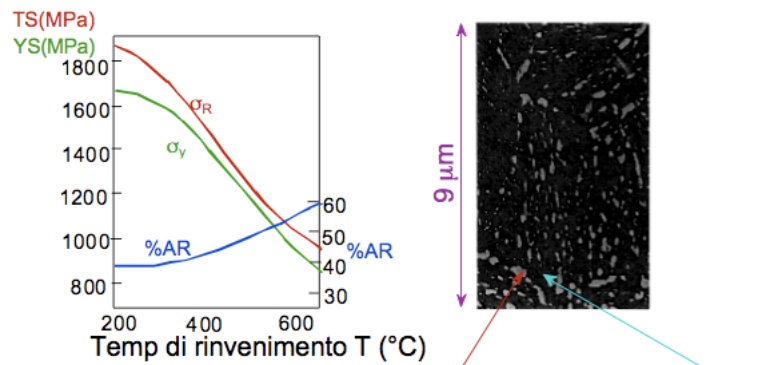
Sferoidizzazione della cementite (**sorbite**)

Quinto stadio (300 – 600 °C).

Durezza secondaria (acciai legati=acciai rapidi)

Martensite Rinvenuta

- si riduce la fragilità della martensite,
- si riducono gli stress residui causati dalla tempra.

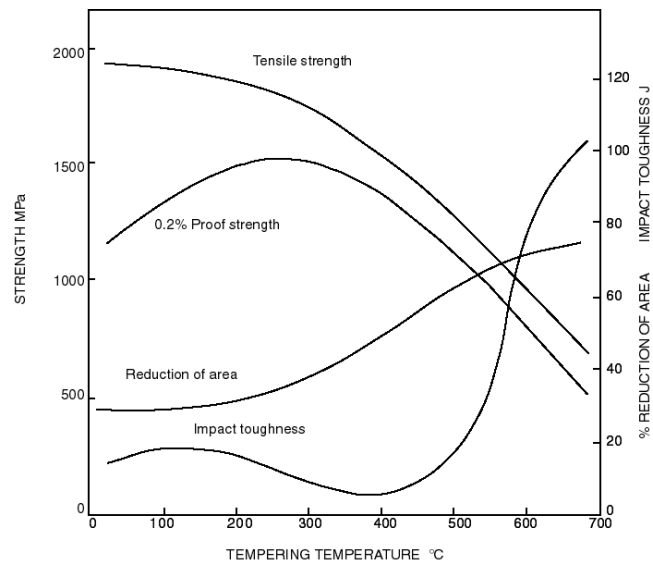


- Produce finissime **particelle di Fe_3C** circondate da α .
- Diminuisce σ_R , σ_y ma aumenta la duttilità

113

Bonifica

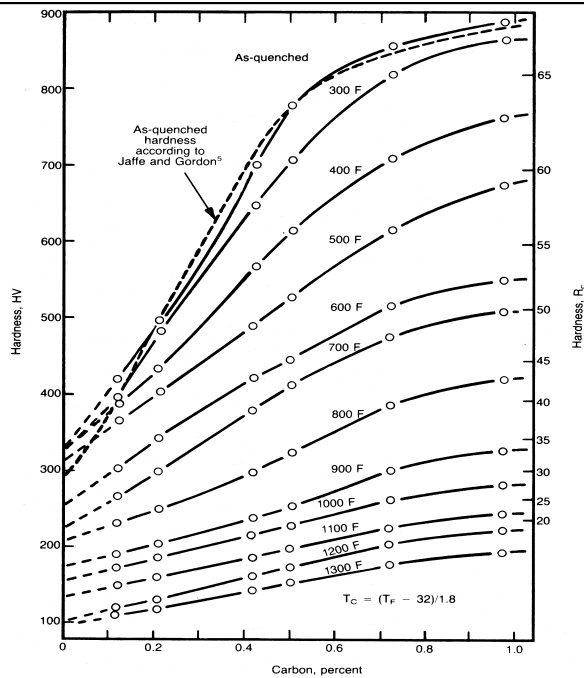
Effetto della temperatura di rinvenimento sulle caratteristiche meccaniche di un acciaio allo 0.4% di C



114

Bonifica

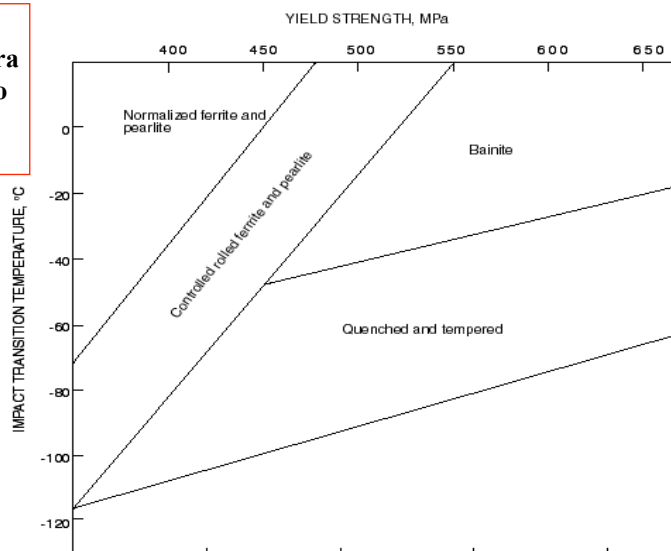
Effetto
della temperatura
di rinvenimento
e della composizione
sulle caratteristiche
meccaniche
di acciai al C



115

Bonifica

Effetto
della microstruttura
sul comportamento
meccanico
di acciai HSLA



116