

INGEGNERIA MECCANICA

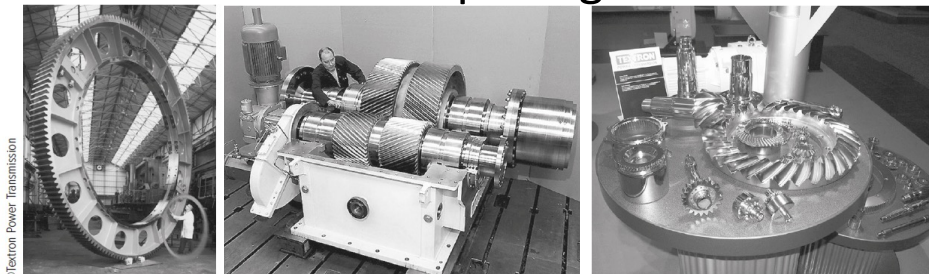
CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

MATERIALI METALLICI

INGEGNERIA MECCANICA - CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Leghe Ingegneristiche

- I **metalli puri** o quasi puri non sono utili per la maggior parte delle applicazioni ingegneristiche (ad eccezione delle applicazioni elettriche)
- Nella maggior parte delle applicazioni, specialmente quelle strutturali, vengono utilizzate leghe metalliche
- Le leghe sono costituite da una combinazione di metalli e talvolta di non metalli.
- Le **leghe** sono classificate in due gruppi principali: 1- leghe **ferrose** e 2- leghe **non ferrose**
- Le leghe ferrose contengono ferro come ingrediente principale (il 90% della produzione mondiale di tutti i metalli riguarda le leghe ferrose)
- Le leghe non ferrose contengono poco o niente ferro
- Tutti gli acciai sono leghe ferrose
- Il titanio e leghe di alluminio sono esempi di leghe non ferrose.



Costo dei Metalli

- I metalli sono selezionati per le applicazioni in base alle proprietà e al costo relativo

Tabella 8.1 Prezzi indicativi (\$/kg) di alcuni metalli nel mese di maggio 2001*

Acciaio**	0.12	Nichel	1.24
Alluminio	0.30	Stagno	1.04
Rame	0.34	Titanio***	1.75
Magnesio	1.49	Oro	1408.79
Zinco	0.20	Argento	23.59
Piombo	0.10		

* I prezzi possono variare nel tempo.

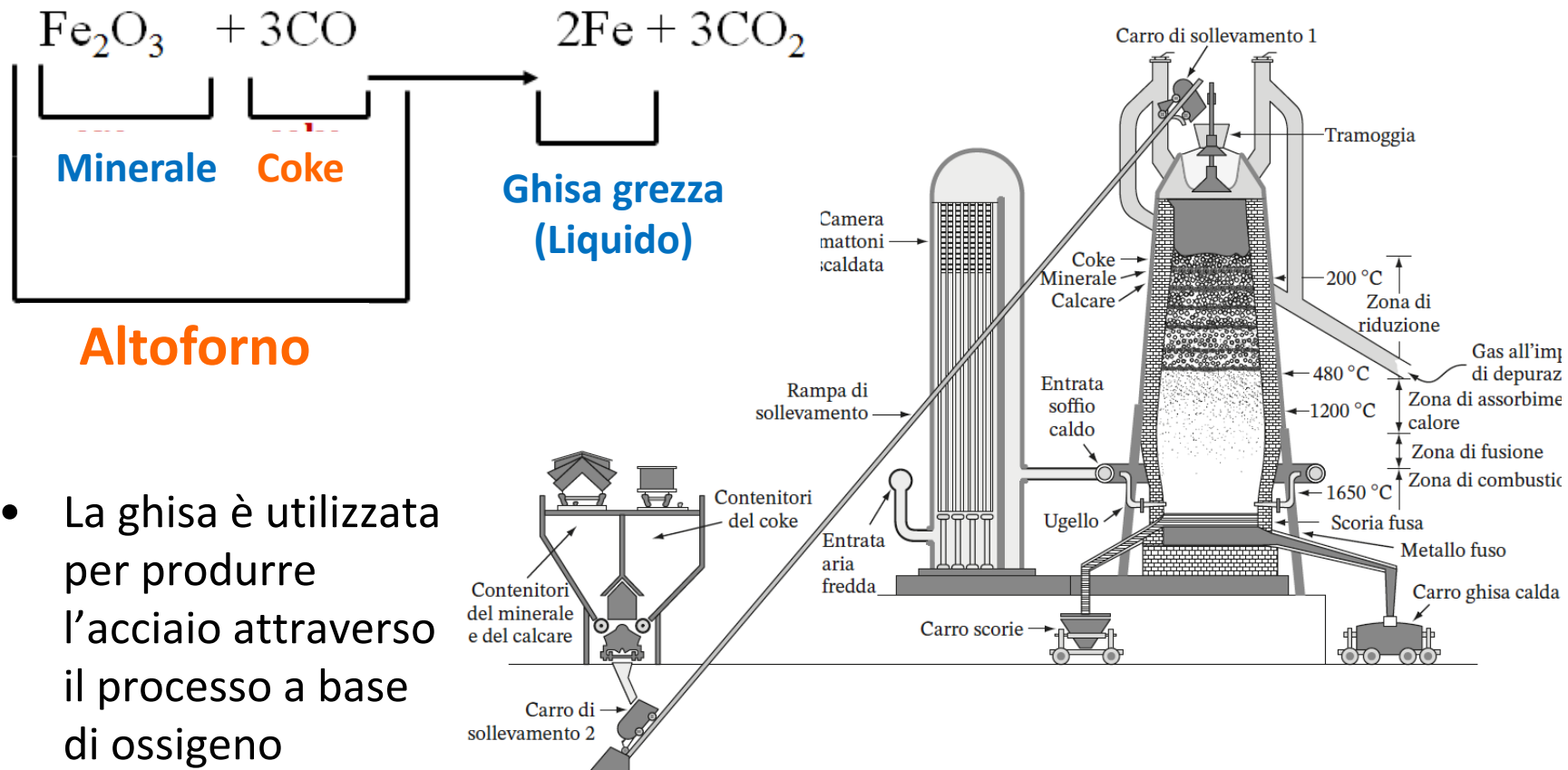
** Lamiera di acciaio al solo carbonio laminata a caldo.

*** Spugna di titanio. Prezzi per grandi quantità.

Argomento di discussione in classe: Se un titanio e un acciaio lega sono ugualmente adatti per le vostre applicazioni strutturali, quali altri fattori prendereste in considerazione nella selezione del vostro metallo?

Produzione della Ghisa e dell'Acciaio

- Il minerale di ferro (ossido di ferro) è mescolato con il coke all'interno di un altoforno per produrre ghisa



Produzione dell'Acciaio – Processo con Ossigeno

- La ghisa grezza e il 30% di rottame di acciaio viene caricata in una fornace con rivestimento refrattario nel quale è inserita una lancia per ossigeno
 - L'ossigeno reagisce con il bagno liquido per formare ossido di ferro
 - $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$
 - Vengono aggiunti **addensanti di scorie**
 - Il contenuto di carbonio e di altre impurità si abbassa / è controllato
 - Si **cola continuamente** l'acciaio fuso e si **formano lingotti** oppure direttamente le **forme desiderate**
 - Metà dell'acciaio viene prodotto riciclando acciaio già utilizzato (auto da demolire o vecchi elettrodomestici)

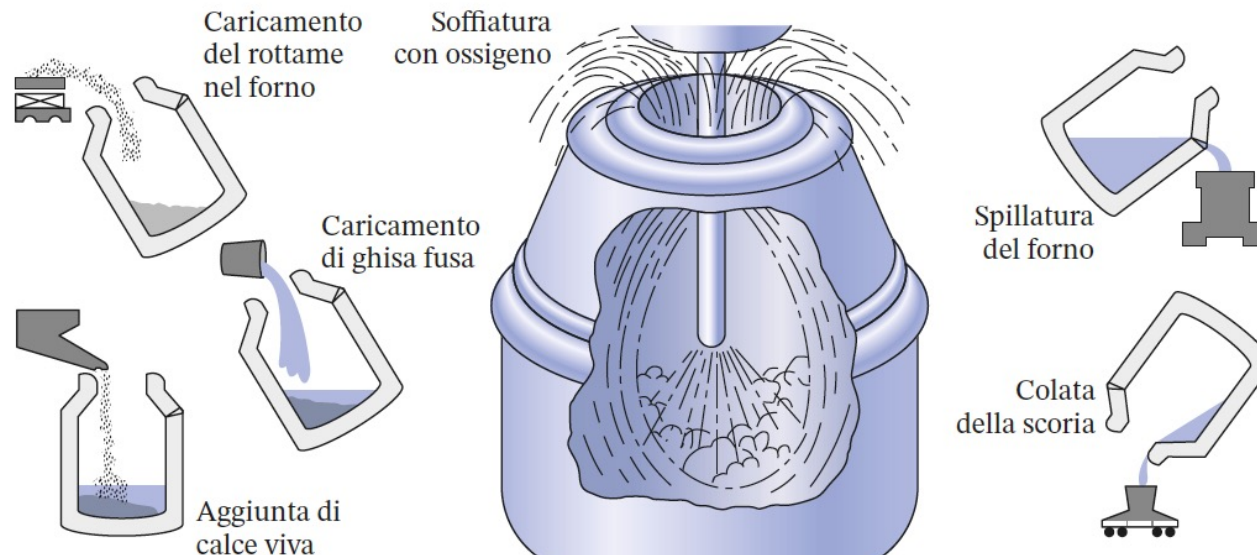
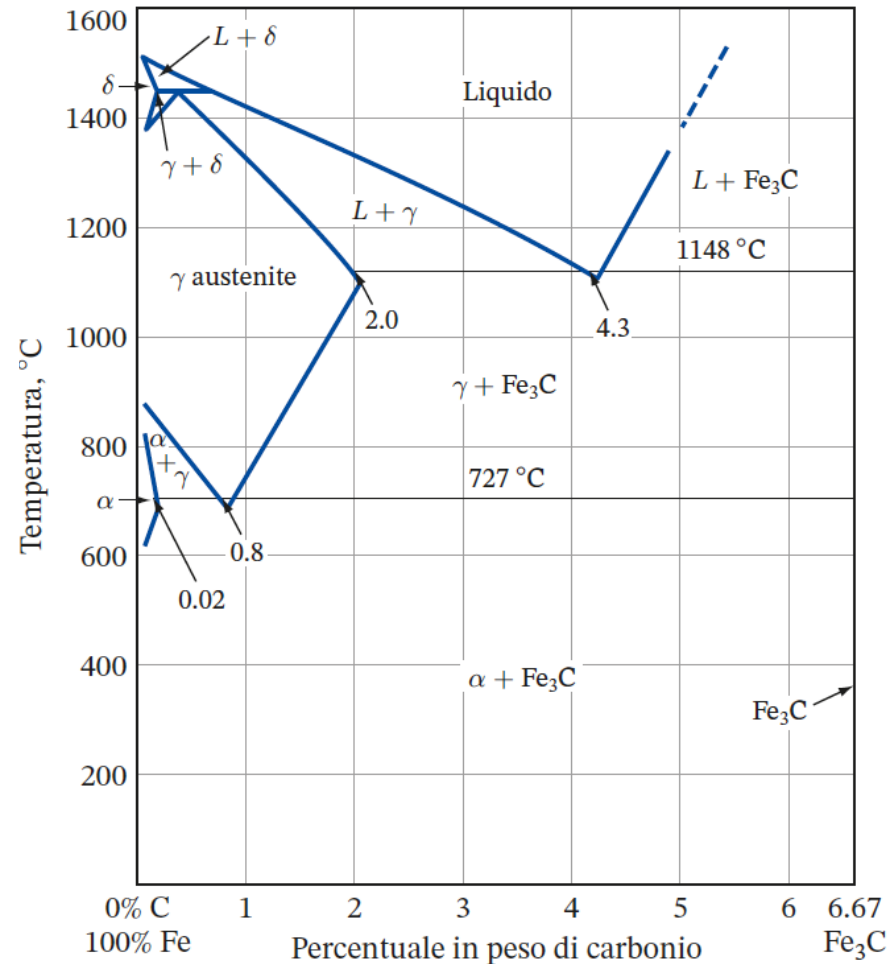


Diagramma di Stato Binario Ferro-Carbonio



Acciai al carbonio contengono da 0.03% a 1.2% C; da 0.25 a 1% Mn e minori quantità di altre impurità

Ferrite α : solubilità molto bassa del carbonio. Massima solubilità: 0.02 % a 727 °C e 0.005% a 0 °C

Austenite γ : la solubilità di C è 2.08% a 1147 °C e 0.8% a 0 °C

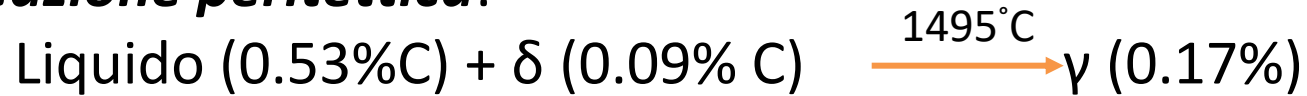
Ferrite δ : resiste sopra 1394 °C e sotto la fusione (valore limite)

Cementite, Fe_3C : composto intermetallico; 6.67% C e 93.3% Fe

α , γ , δ sono tutte soluzioni solide interstiziali del carbonio nel ferro nelle strutture CCC (α), FCC (γ)
CCC (δ), rispettivamente

Reazioni Invarianti nel Diagramma Fe – Fe₃C

Reazione peritettica:



Reazione eutettica:



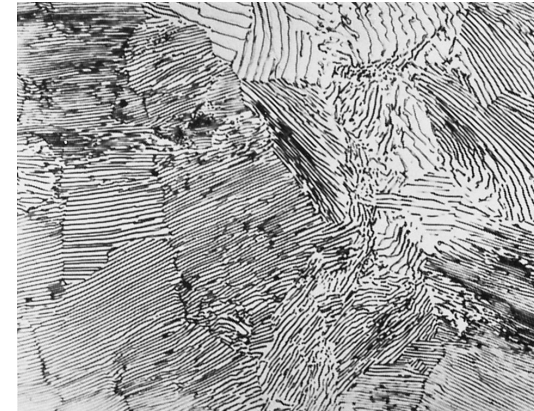
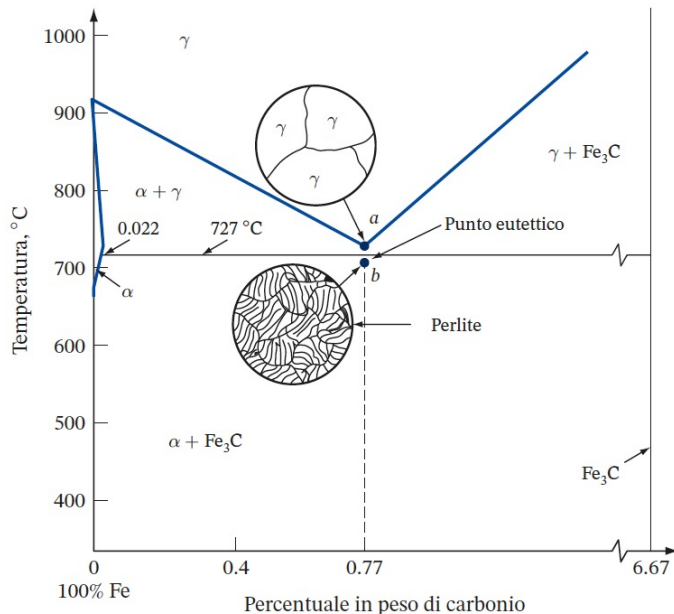
Reazione eutettoidica:



Raffreddamento Lento degli Acciai al Carbonio - 1

Un acciaio contenente 0.77% C è detto acciaio al carbonio **eutettoidico**

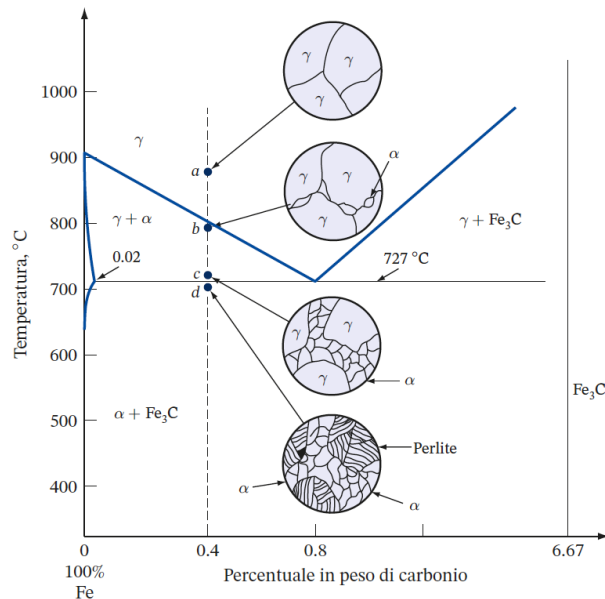
Se l'acciaio eutettoidico è riscaldato poco sopra 727 °C e mantenuto a questa temperatura per un tempo sufficiente, la struttura diventerà **austenite** omogenea, γ . Il processo è detto è **autenitizzazione**



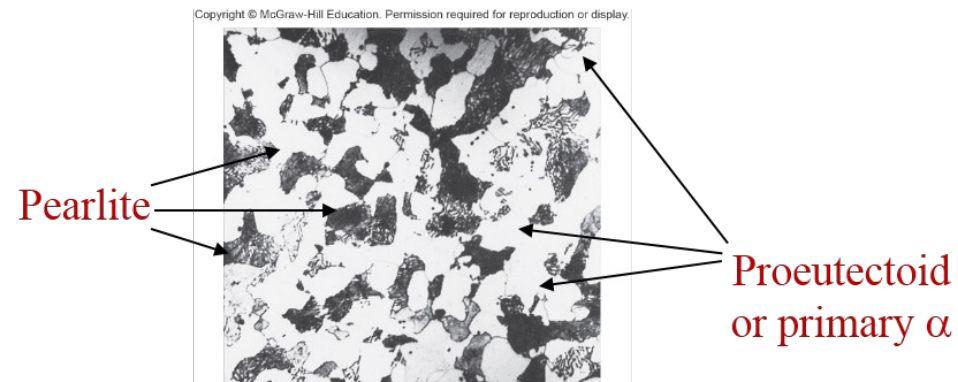
- Se raffreddato sotto la temperatura eutettoidica, si forma una microstruttura lamellare di ferrite α (chiara) e cementite (Fe_3C) detta **perlite**

Raffreddamento Lento degli Acciai al Carbonio - 2

- Un acciaio contenente più di 0.02% e meno di 0.77% di C è detto acciaio al carbonio **ipoeutettoidico**
- Se un campione di acciaio al carbonio con 0.4% C (ipoeutettoidico) è autenitizzato (riscaldato sopra il punto *a*) e poi raffreddato lentamente fino al punto *b*, si forma α **proeutettoidica** (o α primaria)



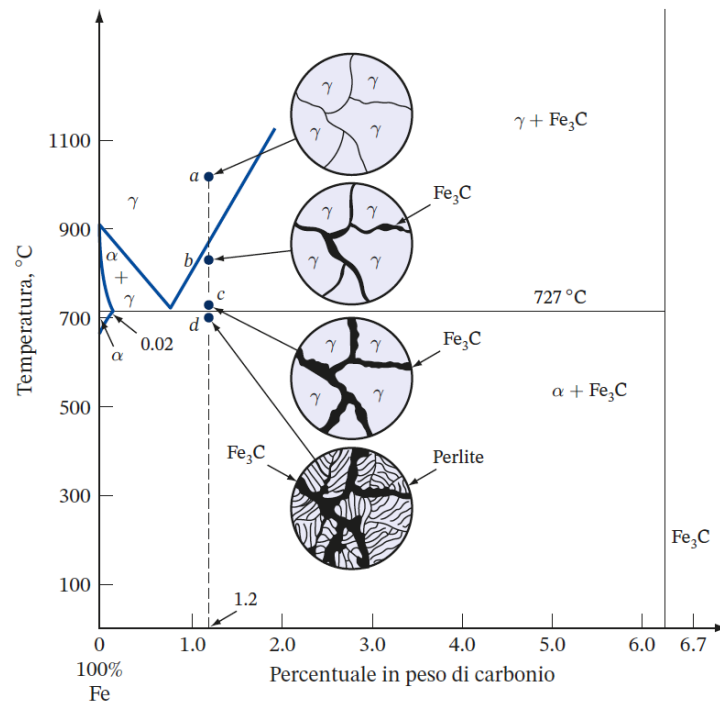
Un ulteriore raffreddamento al punto *d* produce perlite che consiste in eutettoide α e cementite, Fe_3C .



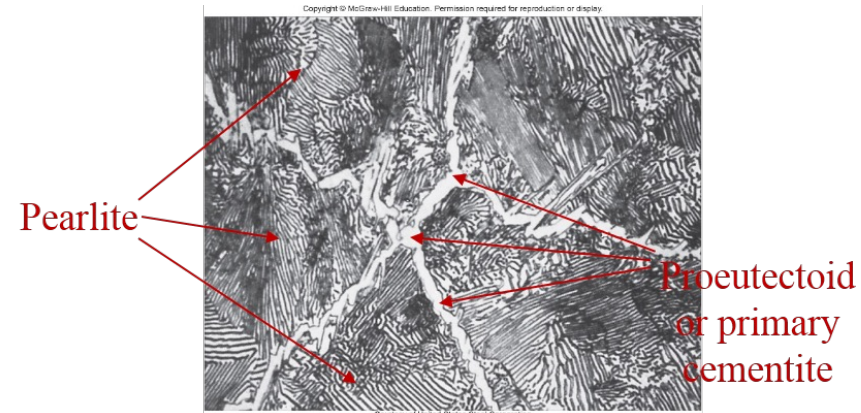
Raffreddamento Lento degli Acciai al Carbonio - 3

Un acciaio contenente più di 0.77% è detto **acciaio al carbonio ipereutettoidico**

Se un campione di acciaio al carbonio con 1.2% C (ipereutettoidico) è autenitizzato (riscaldato sopra il punto *a*) e poi raffreddato lentamente fino al punto *b*, si forma cementite **proeutettoidica** (o **cementite primaria**)

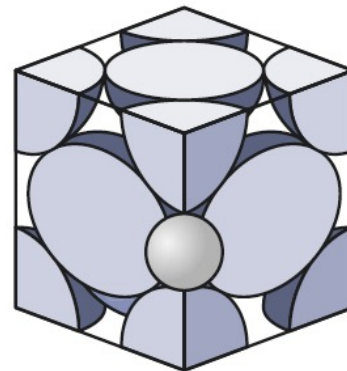


Un ulteriore raffreddamento al punto *d* produce perlite che consiste in eutettoide α e cementite eutettoidica, Fe_3C .

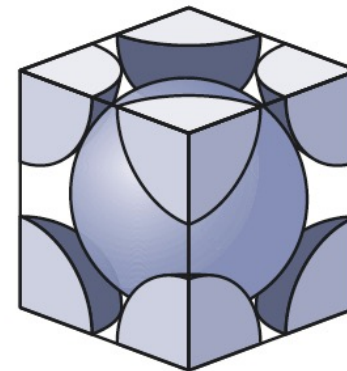


Trattamenti termici degli acciai al carbonio

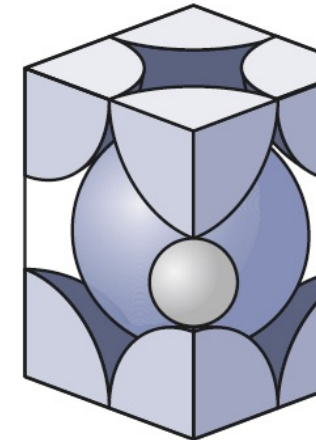
- Riscaldando le leghe di acciaio verso la regione γ (austenizzazione) possono essere assorbiti più atomi di C dal reticolo CFC (figura in basso a sinistra)



(a)



(b)

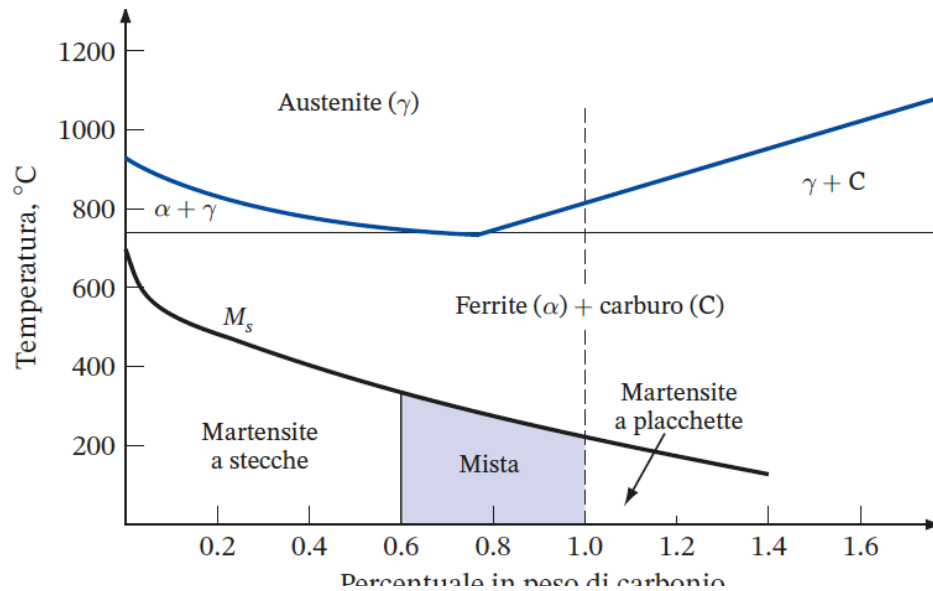


(c)

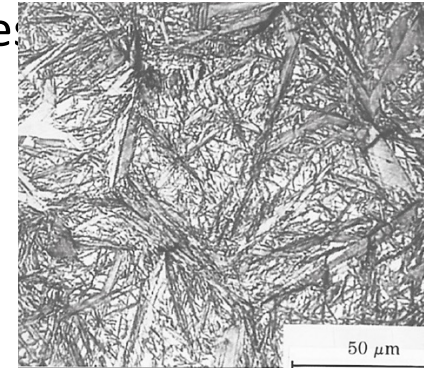
- Questo, seguito da raffreddamento della lega a diverse velocità, produce leghe con diverse proprietà meccaniche
- Se dopo austenizzazione, la lega è raffreddata molto velocemente o temprata, si forma la **martensite**
- La martensite è una fase metastabile costituita da una soluzione solida interstiziale sovrassatura di C nel ferro CCC o CCC tetragonale (figura in basso a destra)
- Un'ampia quantità di carbonio rimane intrappolata nella microstruttura martensitica a causa del raffreddamento rapido

Microstruttura della Martensite - 1

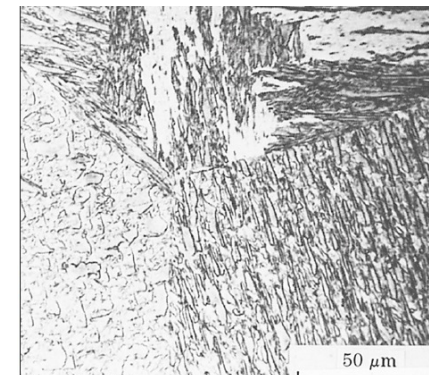
- Se la lega di acciaio contiene meno di 0.6% C, la martensite risultante sarà costituita da domini ad aghetti di diverso orientamento chiamata **martensite aciculare**
- Se la lega di acciaio contiene più di 1.0% C, la martensite risultante sarà costituita da una struttura fine con precipitati geminati chiamata **martensite a placchette**
- Tra 0.6% e 1.0% C, la martensite risultante sarà **mista**



Tipo
aciculare

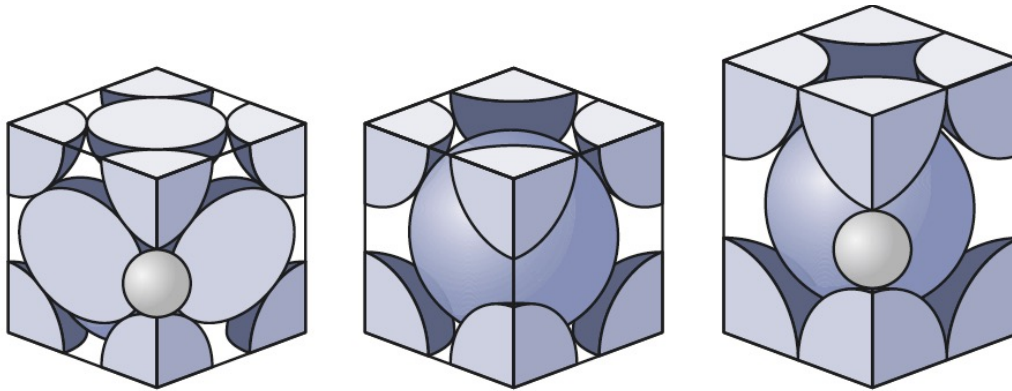


Tipo a
placchette

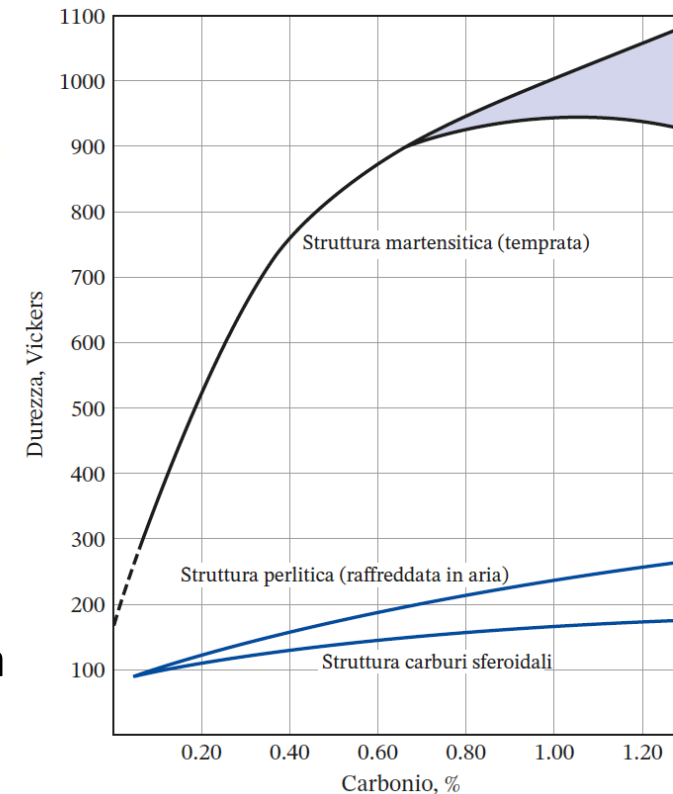


Martensite - 2

- Dopo il raffreddamento veloce, la trasformazione da austenite a martensite è **senza fenomeni diffusivi** – non c'è tempo per la diffusione
- Nessuna variazione nelle posizioni relative degli atomi di carbonio dopo la trasformazione

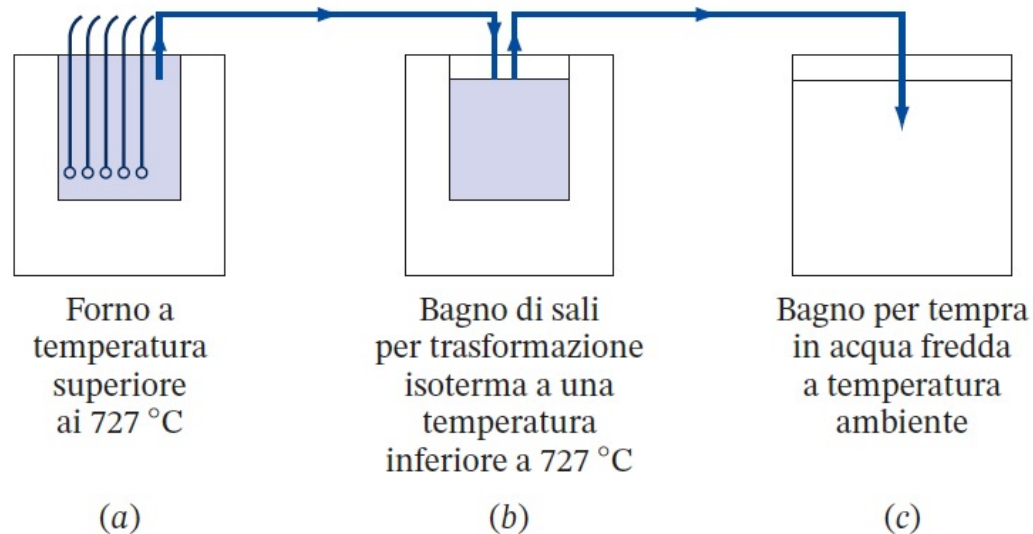


- La martensite è **più resistente e dura** della perlite
- con lo stesso contenuto di carbonio
- Queste proprietà sono migliorate aumentando il contenuto di carbonio
- La maggiore resistenza meccanica è dovuta all'alta **concentrazione di dislocazioni** e al **rafforzamento per soluzione solida interstiziale**



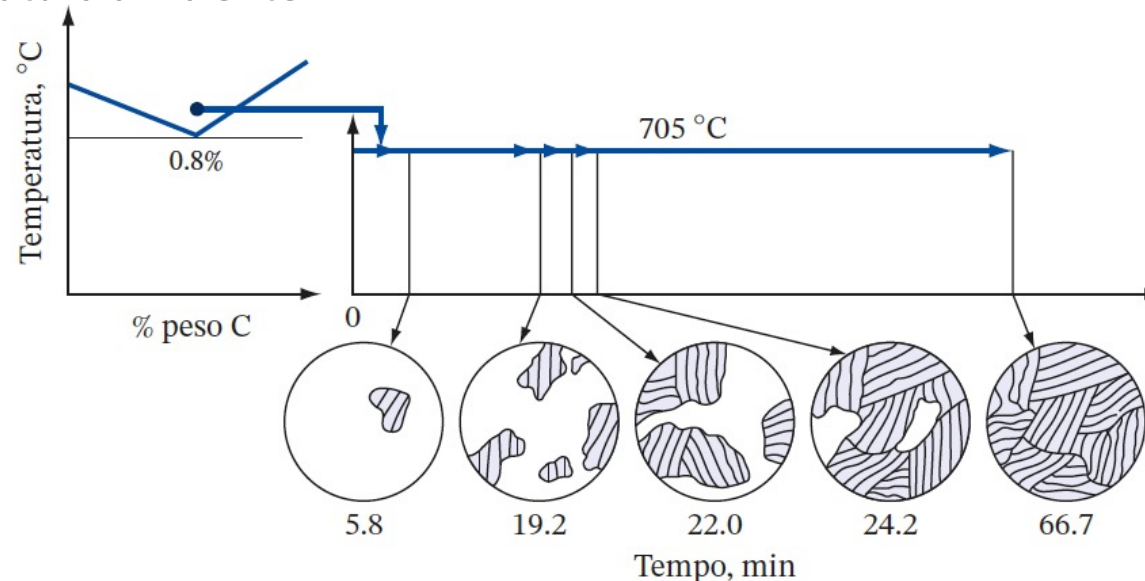
Decomposizione Isotermica dell'Austenite - 1

- Gli esperimenti di **decomposizione isotermica** sono usati per studiare i cambiamenti microstrutturali nell'acciaio eutettoidico
- I campioni di acciaio vengono dapprima austenitizzati, poi raffreddati rapidamente ad una temperatura specifica inferiore alla temperatura eutettoidica in un bagno di sale
- Infine, i campioni vengono raffreddati velocemente in acqua a vari intervalli di tempo
- Viene poi analizzata la microstruttura di ogni campione



Decomposizione Isotermica dell'Austenite - 2

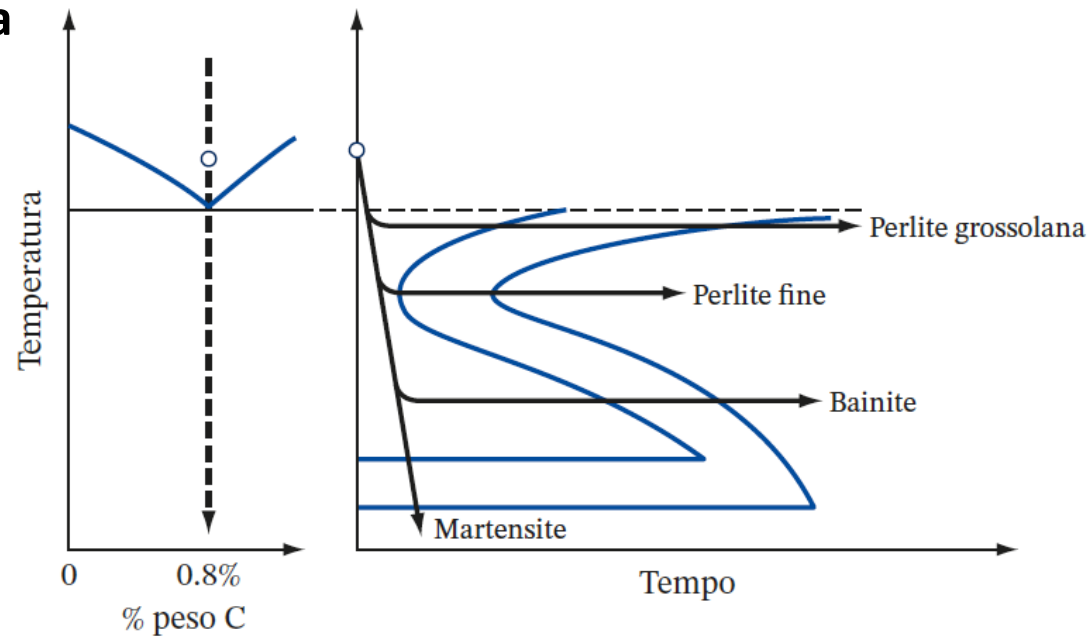
- Le variazioni microstrutturali durante la **decomposizione isotermica** dell'acciaio al carbonio puro eutettoidico sono illustrate di seguito
- I campioni vengono **temprati a caldo** a 705 °C in un bagno di sale e **mantenuti a tale temperatura per vari intervalli di tempo** e successivamente **temprati a temperatura ambiente**



- Si noti che, dopo 5.8 minuti a 705 °C, la perlite grossolana appare nel campione austenitico e dopo 66.7 minuti tutta l'austenite si è trasformata in perlite

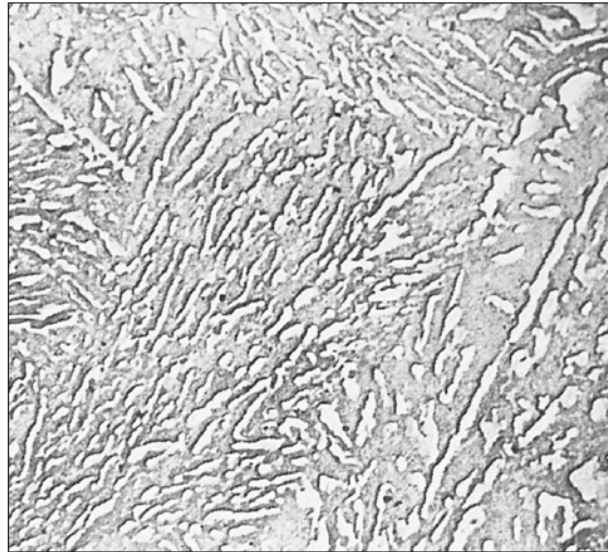
Decomposizione Isotermica dell'Austenite - 3

- Se il processo di decomposizione isotermica viene ripetuto mediante raffreddamento a temperature progressivamente più basse, può essere ottenuto un **diagramma di trasformazione isotermica (IT)**; le **linee grigio chiaro a forma di S** nella figura
- La **prima curva a forma di S** indica il tempo necessario per l'**inizio** della trasformazione dell'austenite e la **seconda curva** indica il tempo necessario per **completarla**
- Raffreddamento veloce a caldo a diverse temperature, rappresentate dalle linee rosse, determina diverse microstrutture, comprese **perlite grossolana, perlite fine, bainite e martensite**

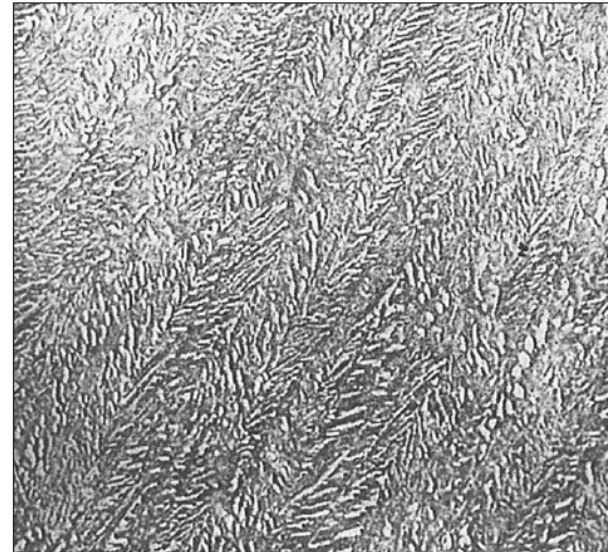


Decomposizione Isotermica dell'Austenite - 4

- Se la temperatura di raffreddamento veloce è compresa tra 550 °C e 250 °C, si forma una struttura intermedia detta **bainite**
- La bainite contiene una struttura eutettoidica non lamellare di ferrite α e cementite
- **Bainite superiore** → tra 550 °C e 350 °C
- **Bainite inferiore** → tra 350 °C e 250 °C



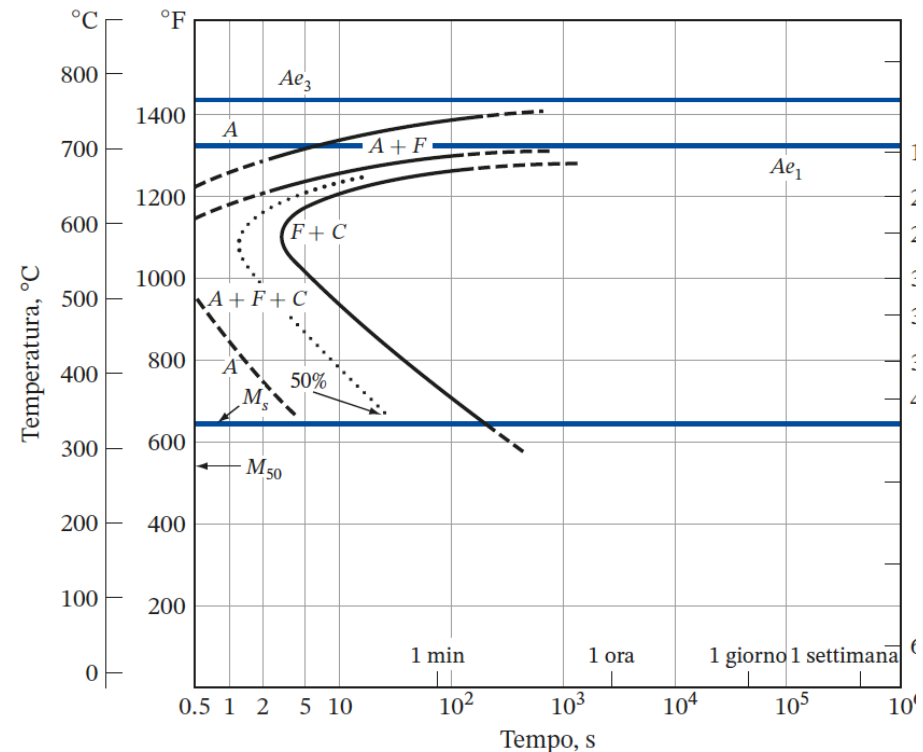
Bainite superiore



Bainite inferiore

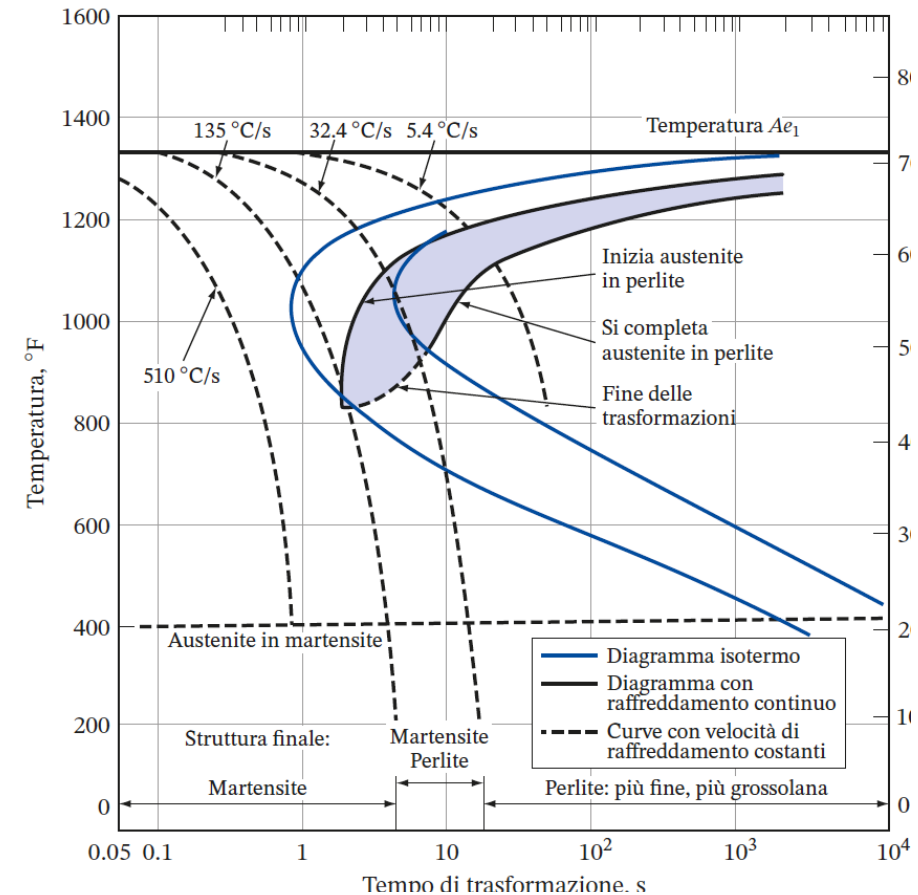
Diagrammi TT per Acciai Non Eutettoidici

- Le curve 'S' dei diagrammi TT dell'acciaio non eutettoidico sono **spostate verso sinistra** (si veda l'acciaio ipoeutettoidico in figura – 0.47% C)
- Si noti che la curva di inizio trasformazione è **discontinua**
- Non è possibile temprare l'acciaio dalla regione austenitica per produrre una struttura 100% martensitica
- La linea di trasformazione indicata in figura dalla linea nera superiore, indica l'inizio e la formazione della ferrite proeutettoidica
- I diagrammi TT sono usati solo per comprendere il processo di trasformazione; **nell'industria, la trasformazione isoterma o i trattamenti termici non si usano**



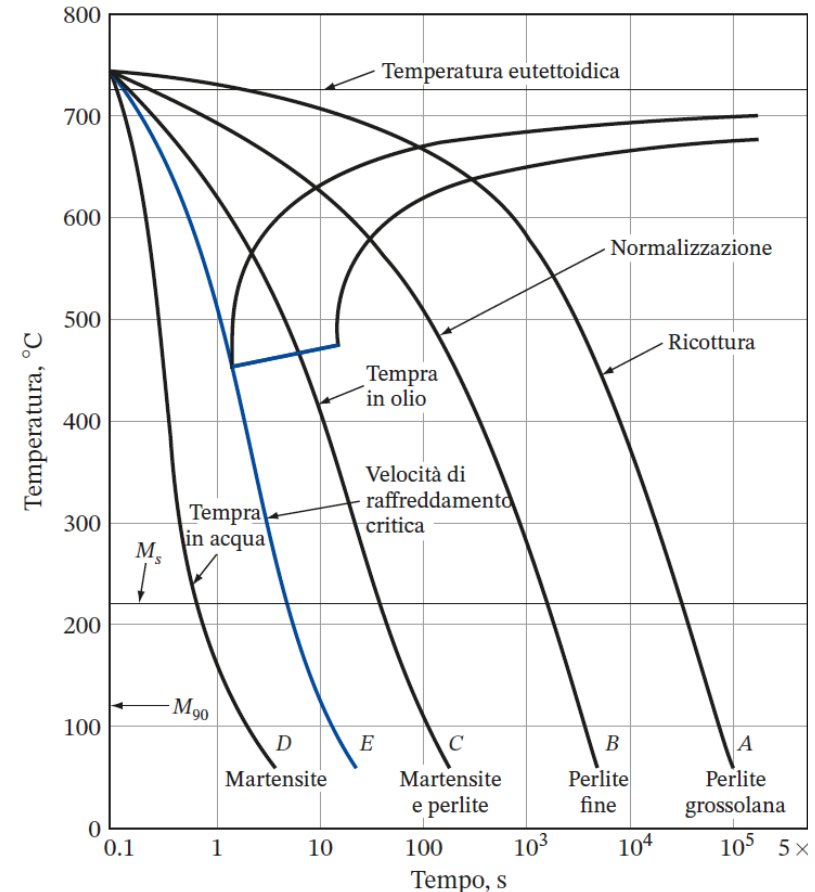
Diagrammi di Trasformazione con Raffreddamento Continuo - 1

- Nei trattamenti termici industriali, il **raffreddamento continuo** dallo stato austenitico a temperatura ambiente è svolto in un solo step
- Per l'acciaio al carbonio, la **trasformazione** da austenite ad altre fasi avviene in un **intervallo di temperature** (al contrario della trasformazione isoterma, TT)
- Si noti che le linee tratteggiate indicano il percorso di trasformazione a **diverse velocità di raffreddamento**
- La regione colorata indica la regione di trasformazione
- Si noti che le linee di inizio e di fine si spostano a destra rispetto a TT
- Non c'è il percorso di trasformazione della bainite



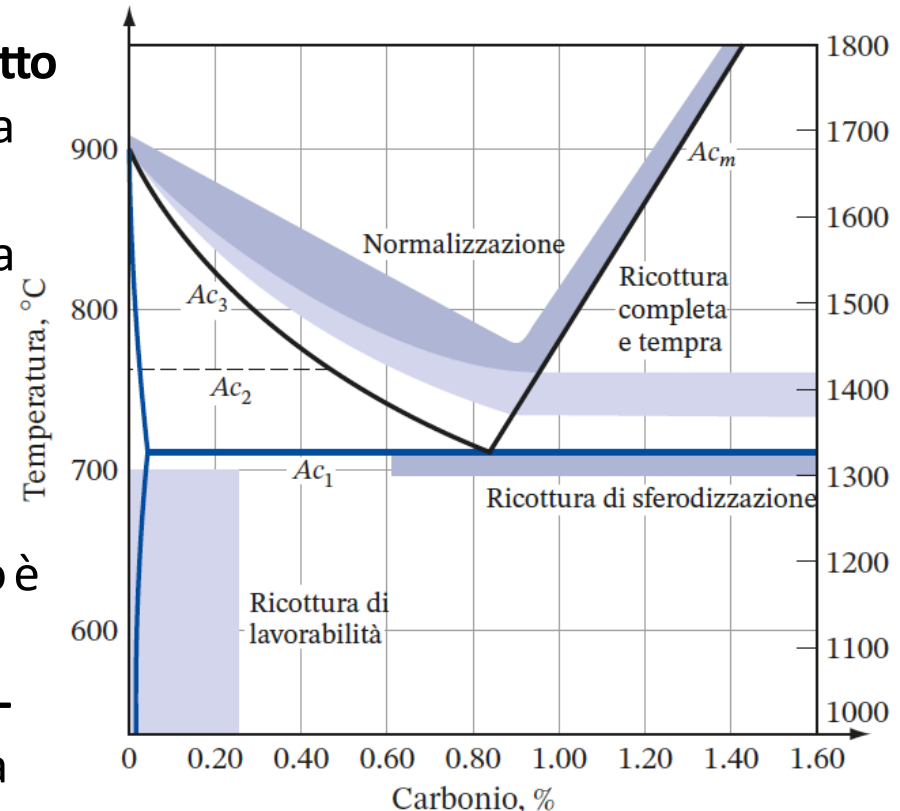
Diagrammi di Trasformazione con Raffreddamento Continuo - 2

- Nel raffreddamento continuo dell'acciaio eutettoide a diverse velocità di raffreddamento, si possono ottenere diverse microstrutture
- Il **raffreddamento in acqua** avviene con una velocità di raffreddamento veloce e porta a **100% martensite**
- Il percorso blu indica la velocità di raffreddamento critica e più bassa possibile per produrre 100% martensite
- Il **raffreddamento in olio** avviene con una velocità di raffreddamento minore e porta a struttura mista martensite e perlite
- Se i percorsi di raffreddamento più lenti non intersecano la linea rossa, non si produce martensite
- Queste basse velocità producono **perlite fine e grossolana**



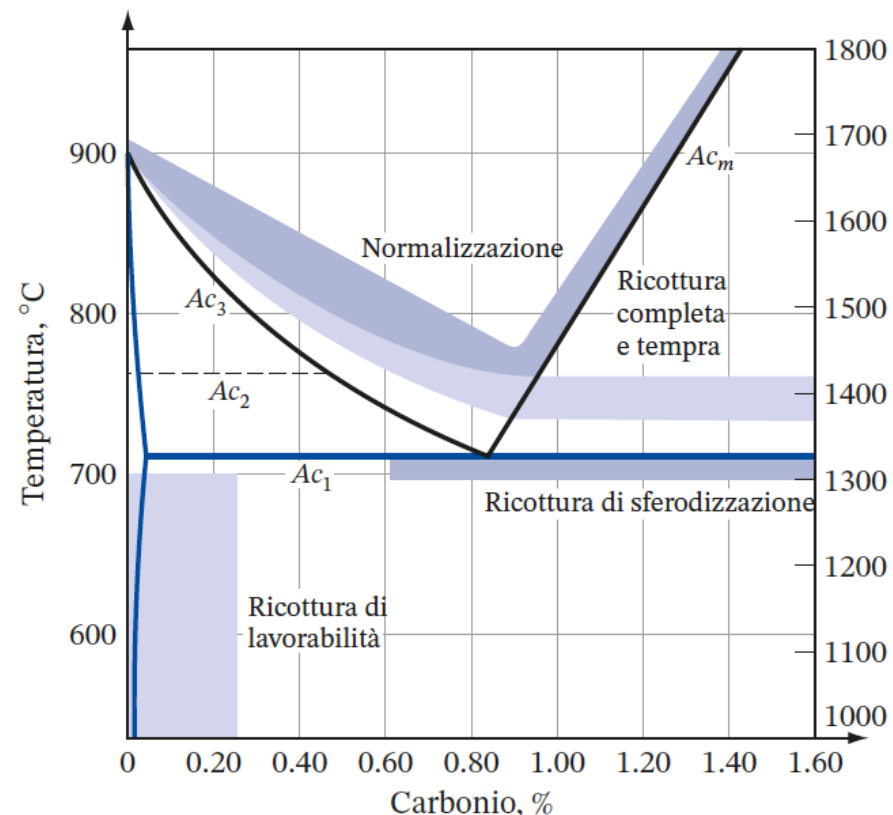
Ricottura e Normalizzazione - 1

- Un provino di acciaio al carbonio è **completamente ricotto** quando è riscaldato a temperature **40 °C sopra il confine austenite-ferrite**, mantenuto per un tempo necessario e **raffreddato lentamente** a temperatura ambiente
- Un provino di acciaio al carbonio è **ricotto (rilascio di stress)** quando è riscaldato a temperature **sotto la temperatura eutettoide e raffreddato lentamente** a temperatura ambiente
- Il processo di ricottura è normalmente applicato ad acciai ipereutettoidici
- Un provino di acciaio al carbonio è **completamente normalizzato** quando è riscaldato a temperature **40 °C sopra il confine austenite-ferrite e austenite-cementite e raffreddato lentamente** a temperatura ambiente



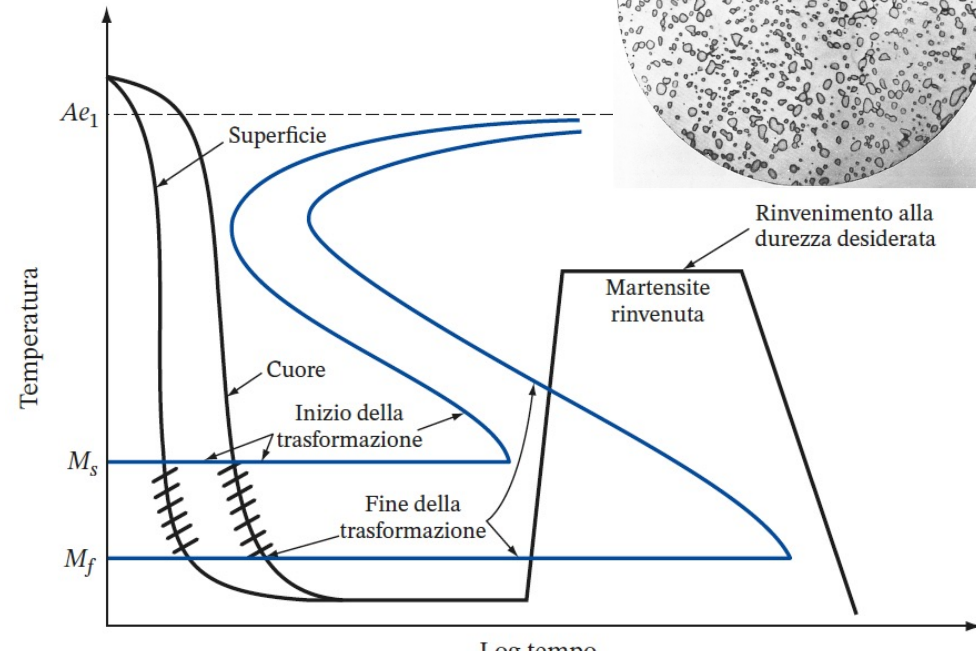
Ricottura e Normalizzazione - 2

- La **ricottura completa** **addolcisce** l'acciaio alla minore resistenza meccanica e fa crescere **grani grandi equiassici**. La microstruttura consiste perlopiù in ferrite proeutettica/cementite (dipende dal contenuto di carbonio) e perlite
- La **ricottura elimina gli sforzi interni residui** mediante movimento delle dislocazioni
- La normalizzazione diminuisce la struttura dei grani, produce un acciaio più resistente confrontato con quello totalmente ricotto e determina una composizione più uniforme. La microstruttura consiste di ferrite proeutetoidica e perlite



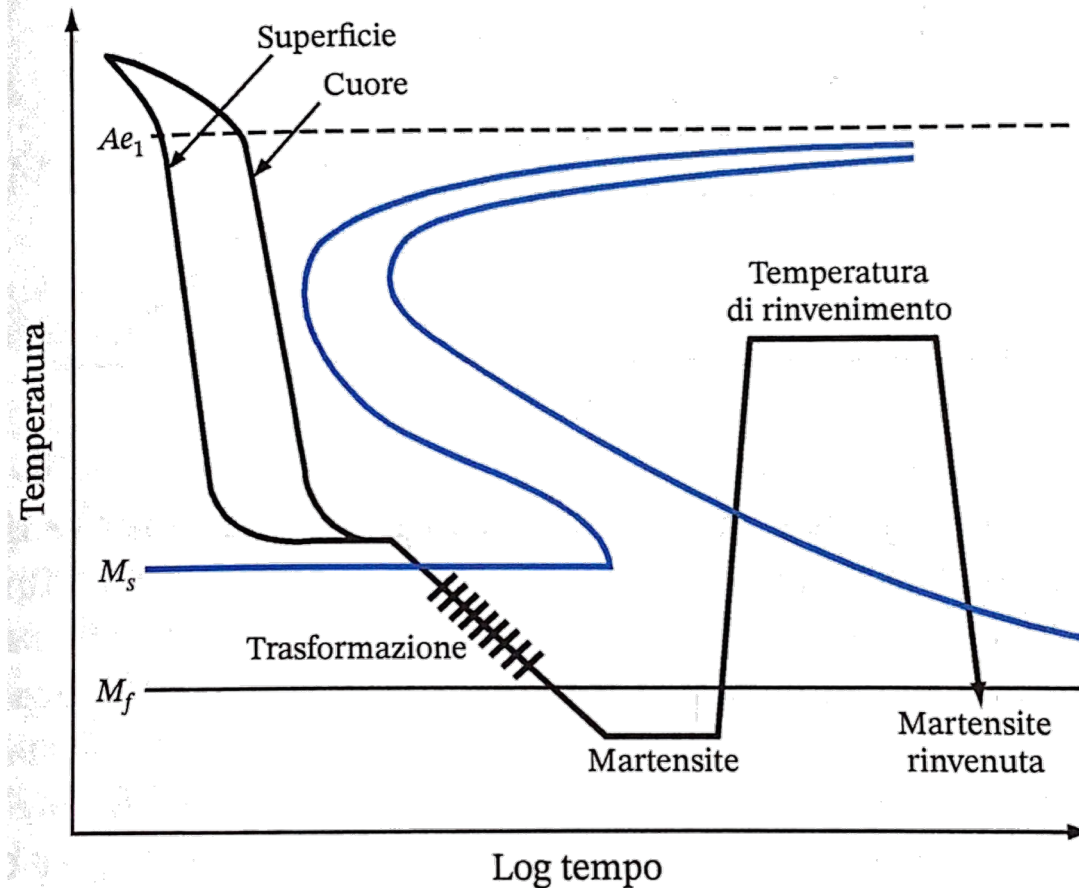
Rinvenimento degli Acciai al Carbonio

- Il raffreddamento (*quenching*) di un acciaio al carbonio autenitizzato porta alla formazione di un acciaio martensitico **resistente, ma fragile**
- La **duttilità** di un acciaio martensitico può essere **aumentata** mediante un trattamento termico detto **tempra**
- Dopo il raffreddamento, **la martensite formata viene riscaldata a temperature sotto l'eutettoide** per un certo tempo
- La linea nera in figura mostra la temperatura di tempra
- La temperatura di tempra influenza resistenza meccanica, duttilità e microstruttura dell'acciaio
- Per esempio, la tempra tra 400 e 700 °C determina una microstruttura a sferiti



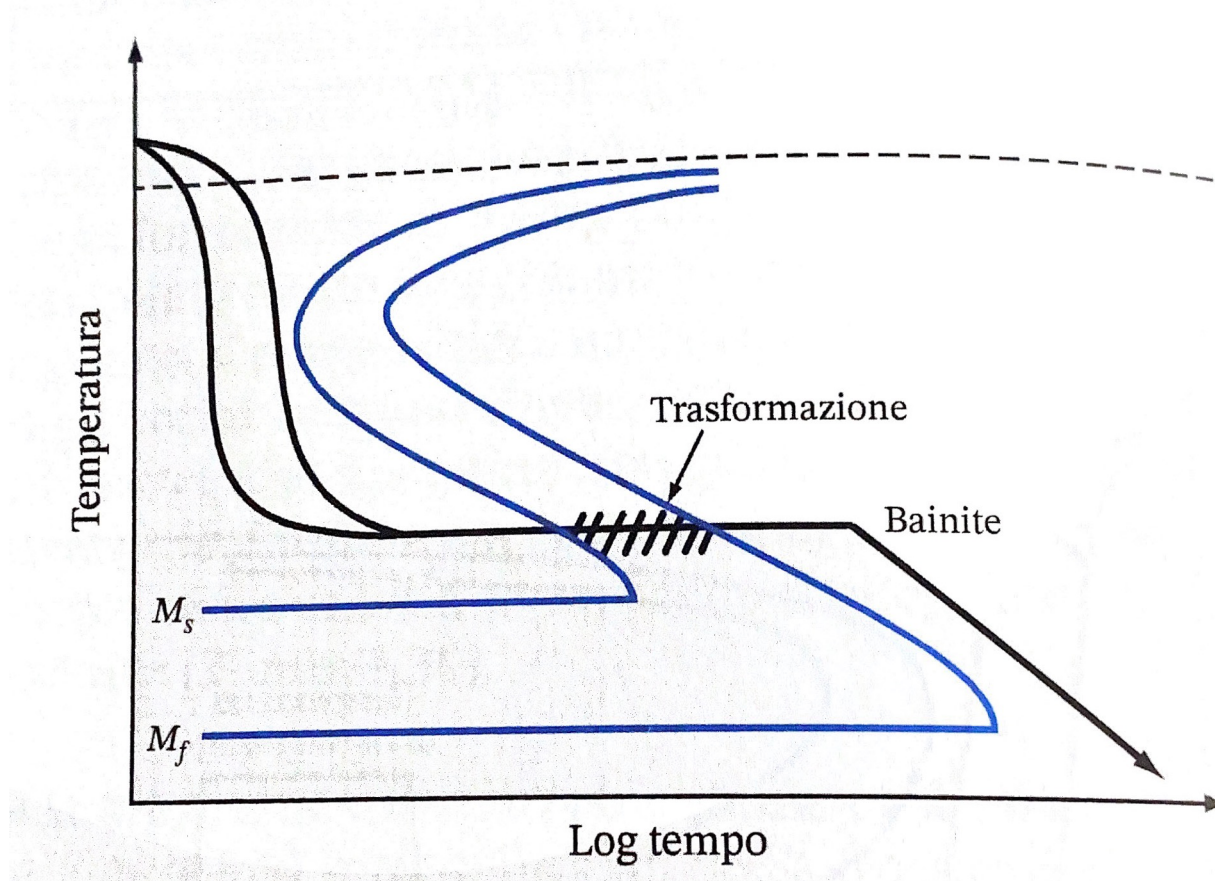
Tempra Martensitica Differita

- **Tempra martensitica differita:** autenitizzazione, tempra a circa M_s , permanenza nel mezzo di tempra finché la temperatura è uniforme, rimozione prima che si formi la bainite e raffreddamento a velocità moderata



Tempra Bainitica Completa

- **Tempra bainitica completa:** come per la tempra martensitica differita, ma mantenimento nel mezzo di tempra finché non avviene la trasformazione da austenite a bainite
- Ha lo scopo di aumentare la tenacità e la duttilità in alcuni acciai (numero contenuto di acciai).



Tempra Martensitica Differita e Tempra Bainitica Completa

- **Tempra martensitica differita:** autenitizzazione, tempra a circa M_s , permanenza nel mezzo di tempra finché la temperatura è uniforme, rimozione prima che si formi la bainite e raffreddamento a velocità moderata
- **Tempra bainitica completa:** come per la tempra martensitica differita, ma mantenimento nel mezzo di tempra finché non avviene la trasformazione da austenite a bainite

Trattamento termico	Durezza Rockwell C	Resilienza , J	Allungamento su 25 mm, %
Tempra in acqua e rinvenimento	53.0	16	0
Tempra in acqua e rinvenimento	52.5	19	0
Tempra martensitica differita e rinvenimento	53.0	37	0
Tempra martensitica differita e rinvenimento	52.8	32	0
Tempra bainitica completa	52.0	60	11
Tempra bainitica completa	52.5	53	8

Fonte: *Metals Handbook*, vol. 2, 8th e., American Society for Metals, 1964.

La Tabella mostra l'impatto di vari processi di tempra su durezza, tenacità e duttilità dell'acciaio 1095

Classificazione degli acciai al carbonio

UNI EN 10027

Acciai Basso Legati

Limitazioni degli acciai al carbonio:

- Non possono avere un carico di rottura superiore a 690 MPa senza perdere in duttilità e resilienza
 - Non possono essere prodotti pezzi con sezioni di elevato spessore con struttura martensitica in quanto non possono essere temprabili in profondità
 - Bassa resistenza a corrosione e all'ossidazione
 - Il raffreddamento veloce porta a cricche e distorsioni
 - Bassa resistenza all'impatto a bassa temperatura
-
- Per superare i limiti di cui sopra degli acciai al carbonio basso legati, sono sviluppati acciai legati che contengono una quantità significativa di impurezze diverse dal carbonio, come manganese, nichel, cromo, molibdeno e tungsteno
 - Questi acciai sono spesso utilizzati nel settore automobilistico e delle costruzioni

Classificazione degli Acciai Legati

- Prime due cifre: principale elemento di lega
- Ultime due cifre: % di carbonio

Tabella 8.4 Principali tipi di acciai basso legati secondo la classificazione AISI-SAE

13xx	Manganese 1.75
40xx	Molibdeno 0.20 o 0.25; oppure molibdeno 0.25 e zolfo 0.042
41xx	Cromo 0.50, 0.80 o 0.95, molibdeno 0.12, 0.20 o 0.30
43xx	Nichel 1.83, cromo 0.50 o 0.80, molibdeno 0.25
44xx	Molibdeno 0.53
46xx	Nichel 0.85 o 1.83, molibdeno 0.20 o 0.25
47xx	Nichel 1.05, cromo 0.45, molibdeno 0.20 o 0.35
48xx	Nichel 3.50, molibdeno 0.25
50xx	Cromo 0.40
51xx	Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 o 1.00
51xxx	Cromo 1.03
52xxx	Cromo 1.45
61xx	Cromo 0.60 o 0.95, vanadio 0.13 o minimo 0.15
86xx	Nichel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.20
87xx	Nichel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.25
88xx	Nichel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.35
92xx	Silicio 2.00; oppure silicio 1.40 e cromo 0.70
50Bxx*	Cromo 0.28 o 0.50
51Bxx*	Cromo 0.80
81Bxx*	Nichel 0.30, cromo 0.45, molibdeno 0.12
94Bxx*	Nichel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12

* B denota acciaio al boro.

Fonte: *Alloy Steel: Semifinished; Hot-Rolled and Cold-Finished Bars*, American Iron and Steel Institute, 1978

Distribuzione degli Elementi di Lega

- La distribuzione dipende dalla tendenza di ogni elemento a formare composti e carburi

Tabella 8.5 Distribuzione approssimata degli elementi di lega negli acciai legati*

Elemento	Dissolto nella ferrite	Combinato nel carburo	Combinato come carburo	Composto	Elementare
Nichel	Ni			Ni ₃ Al	
Silicio	Si			SiO ₂ · MxOy	
Manganese	Mn ↔	Mn	(Fe, Mn) ₃ C	MnS; MnO · SiO ₂	
Cromo	Cr ↔	Cr	(Fe, Cr) ₃ C Cr ₇ C ₃ Cr ₂₃ C ₆		
Molibdeno	Mo ↔	Mo	Mo ₂ C		
Tungsteno	W ↔	W	W ₂ C		
Vanadio	V ↔	V	V ₄ C ₃		
Titanio	Ti ↔	Ti	TiC		
Niobio [†]	Cb ↔	Cb	CbC		
Alluminio	Al			Al ₂ O ₃ ; AlN	
Rame	Cu (piccola quantità)				
Piombo					Pb

* Le frecce indicano la tendenza relativa degli elementi a dissolversi nella ferrite o combinarsi nei carburi.

[†] Cb = Nb (niobio).

Fonte: Bain, E.C. e Doyon, H.W. *Alloying Elements in Steel*, 2nd ed., American Society for Metals, 1966.

Il **Nichel** rimane in soluzione solida nella ferrite- α dell'acciaio poiché ha una minore tendenza del ferro a formare carburi.

Distribuzione degli Elementi di Lega

- La distribuzione dipende dalla tendenza di **ogni elemento a formare composti e carburi**

Tabella 8.5 Distribuzione approssimata degli elementi di lega negli acciai legati*

Elemento	Dissolto nella ferrite	Combinato nel carburo	Combinato come carburo	Composto	Elementare
Nichel	Ni			Ni ₃ Al	
Silicio	Si			SiO ₂ · MxOy	
Manganese	Mn	←→ Mn	(Fe, Mn) ₃ C	MnS; MnO · SiO ₂	
Cromo	Cr	←→ Cr	(Fe, Cr) ₃ C Cr ₇ C ₃ Cr ₂₃ C ₆		
Molibdeno	Mo	←→ Mo	Mo ₂ C		
Tungsteno	W	←→ W	W ₂ C		
Vanadio	V	←→ V	V ₄ C ₃		
Titanio	Ti	←→ Ti	TiC		
Niobio [†]	Cb	←→ Cb	CbC		
Alluminio	Al			Al ₂ O ₃ ; AlN	
Rame	Cu (piccola quantità)				
Piombo					Pb

* Le frecce indicano la tendenza relativa degli elementi a dissolversi nella ferrite o combinarsi nei carburi.

[†] Cb = Nb (niobio).

Fonte: Bain, E.C., e Paxton, H.W., *Alloying Elements in Steel*, 2nd e., American Society for Metals, 1966.

Il **Silicio** si combina in una certa misura con l'ossigeno presente nell'acciaio per formare inclusioni non metalliche o altrimenti si scioglie nella ferrite

Distribuzione degli Elementi di Lega

- La distribuzione dipende dalla tendenza di ogni elemento a formare composti e carburi

Tabella 8.5 Distribuzione approssimata degli elementi di lega negli acciai legati*

Elemento	Dissolto nella ferrite	Combinato nel carburo	Combinato come carburo	Composto	Elementare
Nichel	Ni			Ni ₃ Al	
Silicio	Si			SiO ₂ · MxOy	
Manganese	Mn ↔	Mn	(Fe, Mn) ₃ C	MnS; MnO · SiO ₂	
Cromo	Cr ↔	Cr	(Fe, Cr) ₃ C Cr ₇ C ₃ Cr ₂₃ C ₆		
Molibdeno	Mo ↔	Mo	Mo ₂ C		
Tungsteno	W ↔	W	W ₂ C		
Vanadio	V ↔	V	V ₄ C ₃		
Titanio	Ti ↔	Ti	TiC		
Niobio [†]	Cb ↔	Cb	CbC		
Alluminio	Al			Al ₂ O ₃ ; AlN	
Rame	Cu (piccola quantità)				
Piombo					Pb

* Le frecce indicano la tendenza relativa degli elementi a dissolversi nella ferrite o combinarsi nei carburi.

[†] Cb = Nb (niobio).

Fonte: Bain, E.C., e Paxton, H.W., *Alloying Elements in Steel*, 2nd e., American Society for Metals, 1966.

Il **Manganese** si scioglie nella ferrite. Una parte forma carburi e in genere entra a far parte della cementite

Distribuzione degli Elementi di Lega

- La distribuzione dipende dalla tendenza di ogni elemento a formare composti e carburi

Tabella 8.5 Distribuzione approssimata degli elementi di lega negli acciai legati*

Elemento	Dissolto nella ferrite	Combinato nel carburo	Combinato come carburo	Composto	Elementare
Nichel	Ni			Ni ₃ Al	
Silicio	Si			SiO ₂ · MxOy	
Manganese	Mn ↔	Mn	(Fe, Mn) ₃ C	MnS; MnO · SiO ₂	
Cromo	Cr ↔	Cr	(Fe, Cr) ₃ C Cr ₇ C ₃ Cr ₂₃ C ₆		
Molibdeno	Mo ↔	Mo	Mo ₂ C		
Tungsteno	W ↔	W	W ₂ C		
Vanadio	V ↔	V	V ₄ C ₃		
Titanio	Ti ↔	Ti	TiC		
Niobio [†]	Cb ↔	Cb	CbC		
Alluminio	Al			Al ₂ O ₃ ; AlN	
Rame	Cu (piccola quantità)				
Piombo					Pb

* Le frecce indicano la tendenza relativa degli elementi a dissolversi nella ferrite o combinarsi nei carburi.

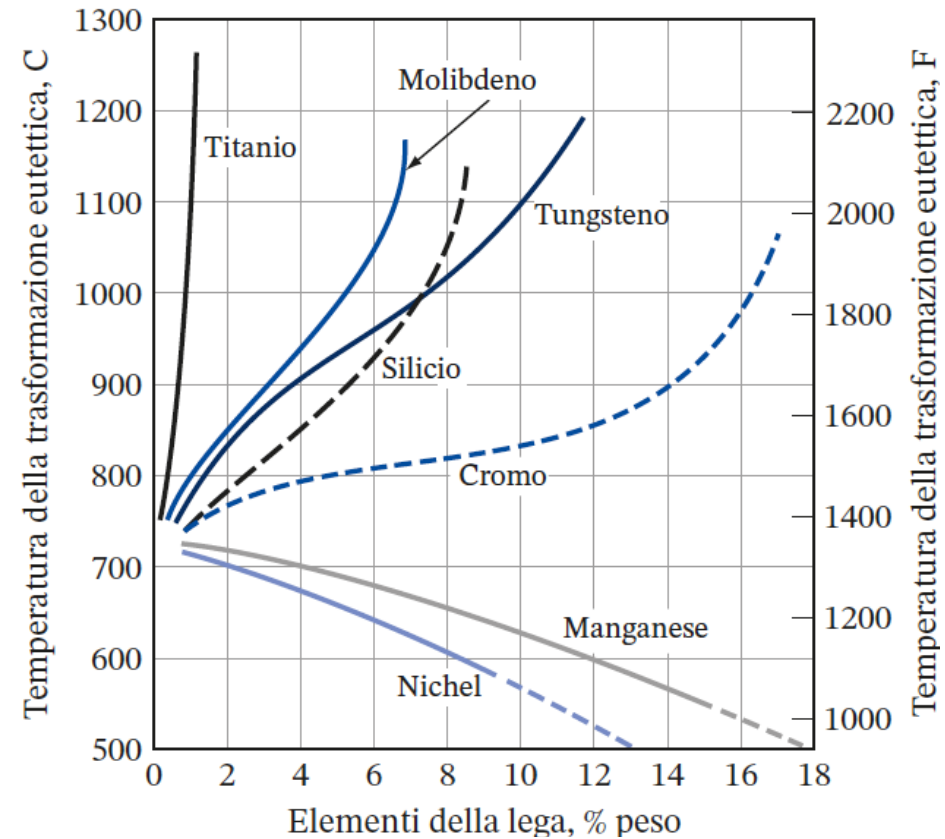
[†] Cb = Nb (niobio).

Fonte: Bain, E.C., e Paxton, H.W., *Alloying Elements in Steel*, 2nd e., American Society for Metals, 1966.

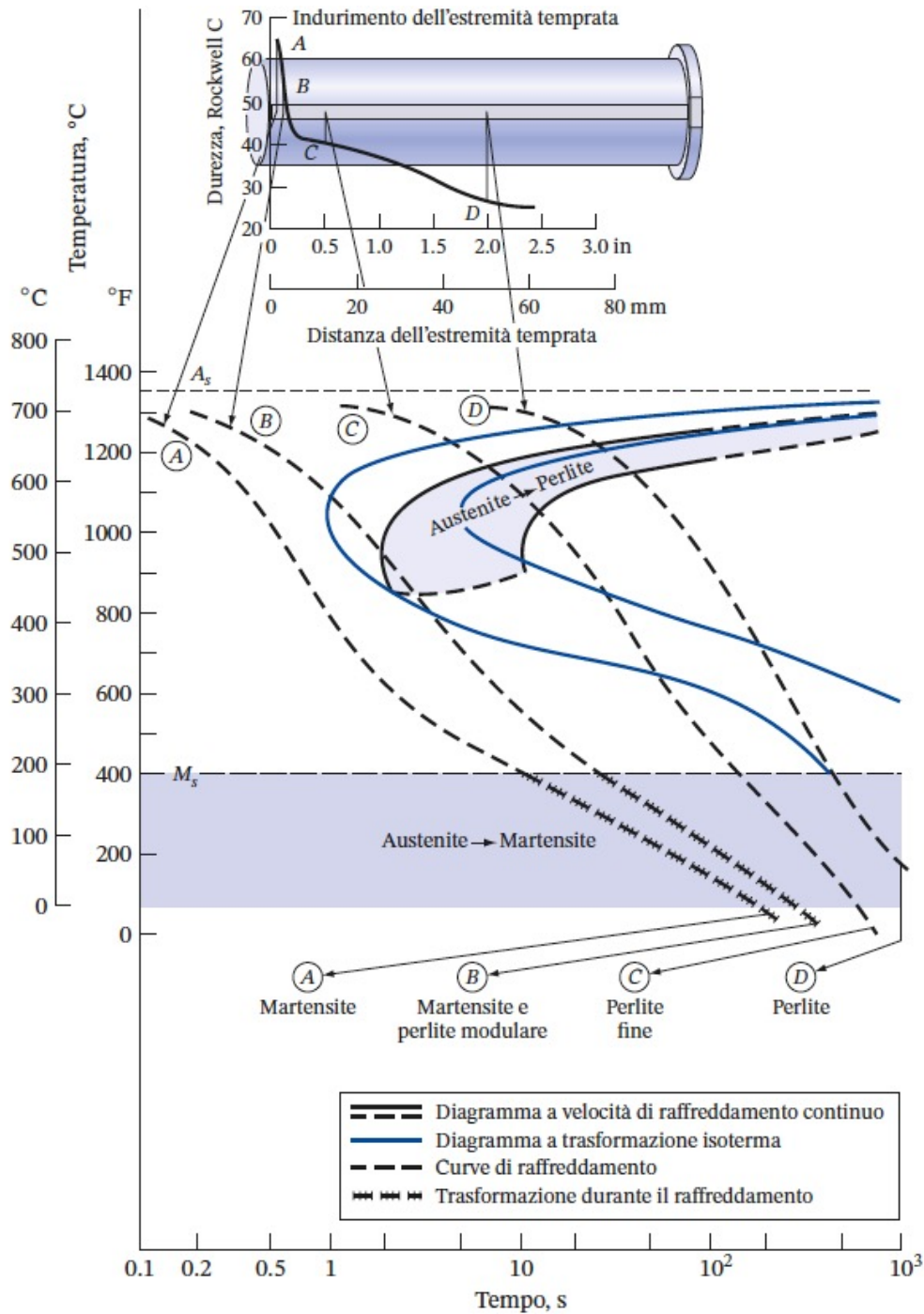
Il **Cromo** che ha una maggiore tendenza a formare carburi del ferro si ripartisce tra ferrite e carburi.

Effetti degli Elementi di Lega sulla Temperatura Eutettoidica

- Mn e Ni **abbassano la temperatura** eutettoidica e agiscono come **elementi stabilizzanti** dell'austenite **allargando il campo dell'austenite** del diagramma Fe-Fe₃C. In alcune proporzioni possono rendere l'austenite stabile a T ambiente.
- Tungsteno, molibdeno e titanio aumentano la temperatura eutettoidica
- Sono chiamati elementi stabilizzanti della ferrite



Temprabilità - 2



- Per l'acciaio al carbonio 1080, il valore di durezza alla estremità temprata è 65 HR_C mentre è 50 HR_C a 4.8 mm dall'estremità temprata
- L'acciaio legato 4340 ha alta temprabilità e ha durezza pari a 40 HR_C a 50 mm dalla estremità temprata
- Nell'acciaio legato, la decomposizione di austenite in ferrite è ritardata
- La velocità di raffreddamento dipende dal diametro della barra, dal mezzo di tempra e dalla sezione della barra

Proprietà Meccaniche degli Acciai Basso Legati

Tabella 8.6 Tipiche proprietà meccaniche e principali applicazioni di alcuni acciai basso legati

Designazione AISI-SAE	Composizione chimica % peso	Condizione	Carico di rottura	Carico di snervamento	Allun- gamento %	Applicazioni tipiche
			MPa	MPa		
Acciai al manganese						
1340	0.40 C, 1.75 Mn	Ricotto	704	435	20	Bulloni ad alta resistenza
		Rinvenuto*	1587	1421	12	
Acciai al cromo						
5140	0.40 C, 0.80 Cr, 0.80 Mn	Ricotto Rinvenuto*	573 1580	297 1449	29 10	Ingranaggi di trasmissione per auto
5160	0.60 C, 0.80 Cr, 0.90 Mn	Ricotto Rinvenuto*	725 2000	276 1773	17 9	Molle a spirale e balestre automobilistiche
Acciai al cromo-molibdeno						
4140	0.40 C, 1.0 Cr, 0.9 Mn, 0.20 Mo	Ricotto Rinvenuto*	655 1550	421 1433	26 9	Ingranaggi per motori a reazione di aerei, trasmissioni
Acciai al nichel-molibdeno						
4620	0.20 C, 1.83 Ni, 0.55 Mn, 0.25 Mo	Ricotto Normalizzato	517 573	373 366	31 29	Ingranaggi di trasmissione, perni di catene, alberi, cuscinetti a rulli
4820	0.20 C, 3.50 Ni, 0.60 Mn, 0.25 Mo	Ricotto Normalizzato	683 690	462 483	22 60	Ingranaggi per laminatori, impianti per la produzione della carta, impianti minerari, macchine movimento terra
Acciai al nichel (1.83%) – cromo-molibdeno						
4340 (E)	0.40 C, 1.83 Ni, 0.90 Mn, 0.80 Cr, 0.20 Mo	Ricotto Rinvenuto*	745 1725	469 1587	22 10	Componenti fortemente sollecitati, carrelli di atterraggio, parti di camion
Acciai al nichel (0.55%) – cromo-molibdeno						
8620	0.20 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Ricotto Normalizzato	531 635	407 359	31 26	Ingranaggi di trasmissione
8650	0.50 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Ricotto Rinvenuto*	710 1725	386 1552	22 10	Piccoli assali per motori, alberi

Acciai inossidabili

Eccellente resistenza alla corrosione in molti ambienti, dovuta alla presenza di Cromo in tenore del 12%.

Il cromo forma un ossido superficiale che protegge dalla corrosione la lega sottostante. Perché quest'ossido si formi, l'acciaio deve essere esposto ad un ambiente ossidante.

Ci sono cinque tipi di acciai inossidabili:

- Ferritici
- Martensitici
- Austenitici
- A struttura mista austenite-ferrite
- Indurenti per precipitazione

Acciai inossidabili Ferritici

Gli acciai inossidabili ferritici sono **leghe binarie ferro-cromo** contenenti il 12-30% di cromo.

Sono chiamati ferritici in quanto la loro **struttura**, dopo i normali trattamenti termici, **rimane ferritica** (CCC).

Il **cromo** dato che ha struttura CCC come il ferro α , **estende il campo di questa fase** e **restringe** quello della **fase γ** .

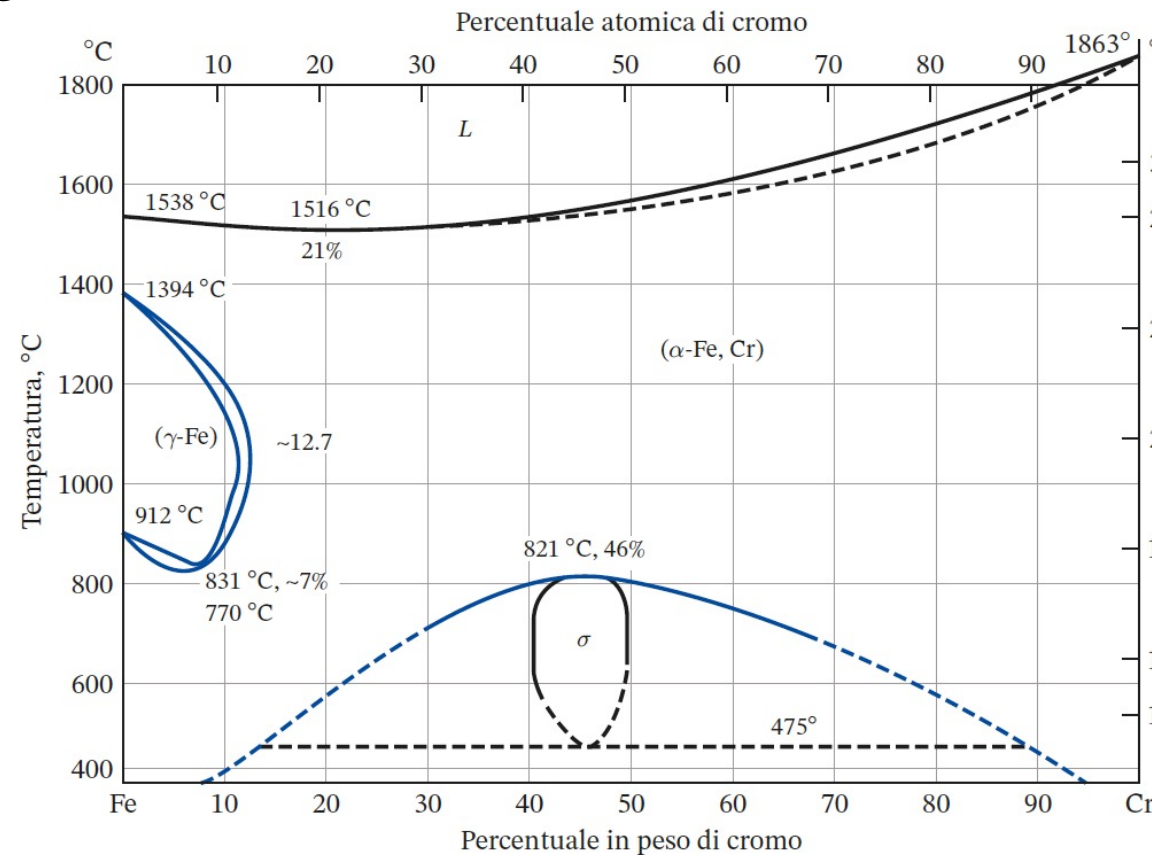
Di conseguenza nel diagramma di stato Fe-Cr si determina per un tenore di cromo superiore al 12 la chiusura del campo γ dividendolo in regione CFC e CCC.

Poiché gli acciai inossidabili ferritici contengono più del 12% di cromo non vi sono più le trasformazioni delta-gamma-alfa e conseguentemente essi raffreddano dalle alte temperature fino a temperatura ambiente come soluzioni solide di cromo nel ferro CCC.

Il loro costo è relativamente basso poiché non contengono nichel.

Acciai inossidabili

- L'eccellente resistenza alla corrosione negli acciai inossidabili è dovuta all'alto contenuto (> 12%) di cromo che forma un ossido di cromo sulla superficie
- Acciai inossidabili ferritici:
 - 12 - 30% Cr
 - la struttura è ferritica (α CCC)
 - il Cr estende la regione α e restringe la regione γ formando un anello γ
 - basso costo, alta resistenza meccanica (517 MPa) e quindi utilizzati come materiali per costruzioni



Acciai inossidabili Martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici sono **leghe ferro-cromo** contenenti il 12-17% di cromo e 0.15-1% di carbonio.

Questo tenore è tale da far assumere all'acciaio **ad alta temperatura una struttura austenitica** che si trasforma in martensite durante la tempra a temperatura ambiente.

La **composizione** di questi acciai è fissata **per ottenere le trasformazioni** di fase citate che **incrementano le proprietà meccaniche e di durezza**, ma hanno una **resistenza alla corrosione inferiore** rispetto a quelli ferritici e austenitici.

L'acciaio viene **austenitizzato** e poi **raffreddato** a velocità sufficientemente alte per ottenere una **struttura martensitica**. Dopo viene **rinvenuto** per eliminare le tensioni interne e per aumentare la tenacità.

Essendo una lega particolarmente temprabile non è necessario avere una tempra in acqua e permette di avere una struttura martensitica anche con raffreddamenti più lenti.

Acciai inossidabili martensitici

- 12 - 17% Cr e 0.15 - 1% C
- Martensite formata durante la tempra dalla regione austenitica
- Bassa resistenza alla corrosione
- Trattamento termico: come per gli acciai al carbonio
- Resistenza meccanica a trazione: da 517 a 1966 MPa
- Usato per componenti di meccaniche, pompe, cuscinetti e parti di valvole
- Quando il contenuto di carbonio è superiore a 1%, il campo di esistenza della fase α si allarga

Acciai inossidabili Austenitici

Gli acciai inossidabili austenitici sono **leghe ternarie ferro-cromo-nichel** contenenti circa il 16-25% di cromo e 7-20% di nichel.

Queste leghe vengono chiamate austenitiche dato che **la loro struttura rimane austenitica** (CFC, γ) a tutte le normali temperature di trattamento termico.

La presenza di **Nichel CFC** permette di avere una struttura **CFC** anche a **temperatura ambiente**.

Gli acciai inossidabili austenitici hanno generalmente una **resistenza alla corrosione migliore di quelli ferritici e martensitici** in quanto i **carburi** possono essere mantenuti in **soluzione solida attraverso un raffreddamento rapido** dalle elevate temperature.

Tuttavia, a seguito di **saldature o lenti raffreddamenti** attraverso l'intervallo da 870 a 600 °C possono diventare suscettibili di **corrosione intergranulare** a causa della **precipitazione di carburi di cromo** al bordo di grano.

Regione Austenitica

- Lega ternaria ferro-cromo (16 - 25%) – nichel (7 -20%)
- La struttura austenitica (CFC, Fe- γ) rimane austenitica a tutte le temperature per la presenza del nichel
- Migliore resistenza alla corrosione di altri acciai
- Resistenza meccanica a trazione \rightarrow 559 - 759 MPa
- Usati per componenti chimici, tubature in pressione etc.
- L'elemento di lega, il niobio, previene la corrosione intergranulare se la lega deve essere saldata

Ghise

- Proprietà generali: contiene 2 - 4% C e 1 - 3% Si
- Facilità di fusione, molto fluide, basso ritiro, facilmente lavorabili alle macchine utensili
- Bassa resistenza all'impatto e duttilità
- Basso costo
- Tipi di ghise:
 - ❖ *ghisa bianca*
 - ❖ *ghisa grigia*
 - ❖ *ghisa sferoidale*
 - ❖ *ghisa malleabile*

 - ❖ *Si possono aggiungere le ghise legate*
- Le loro composizioni chimiche si sovrappongono e quindi non possono essere distinte in base ad analisi della composizione chimica.

Ghise

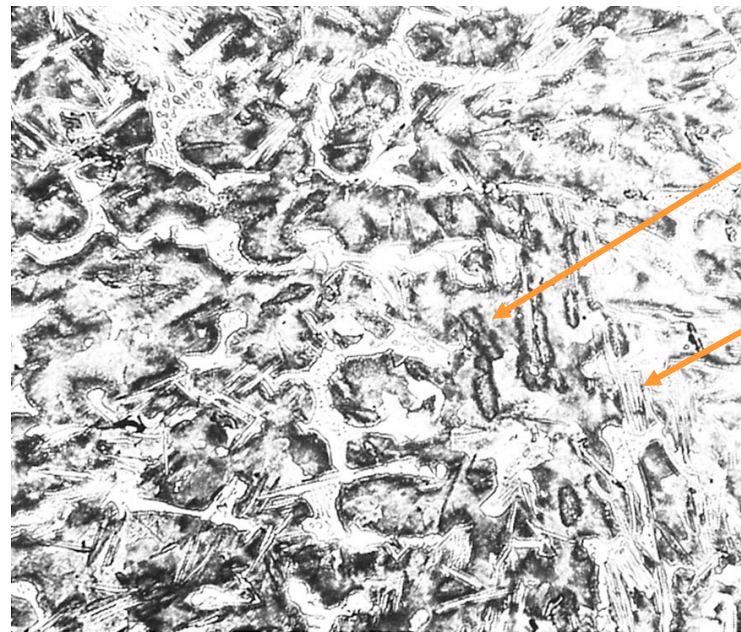
Tabella 8.8 Intervalli di composizione chimica di alcune ghise non legate

Elemento	Ghisa grigia, %	Ghisa bianca, %	Ghisa malleabile, %	Ghisa sferoidale, %
Carbonio	2.5-4.0	<u>1.8-3.6</u>	2.00-2.60	3.0-4.0
Silicio	1.0-3.0	0.5-1.9	1.10-1.60	<u>1.8-2.8</u>
Manganese	0.25-1.0	0.25-0.80	<u>0.20-1.00</u>	<u>0.10-1.00</u>
Zolfo	<u>0.02-0.25</u>	<u>0.06-0.20</u>	<u>0.04-0.18</u>	0.03 max
Fosforo	0.05-1.0	<u>0.06-0.18</u>	0.18 max	0.10 max

Fonte: Walton, C.F., *Iron Castings Handbook*, Iron Castings Society, 1981

Ghise bianche

- La maggior parte del carbonio forma carburo di ferro anziché grafite durante la solidificazione. La microstruttura di fusione della ghisa bianca non legata contiene grandi quantità di carburo di ferro in una matrice perlitica.
- Sono chiamate ghise bianche perché la superficie di frattura appare bianca e cristallina
- Per ottenere il carbonio nella forma di Carburo di ferro il contenuto di carbonio (2.5 - 3%) e di silicio (0.5 - 1.5%) devono essere bassi e velocità di solidificazione alta.
- Eccellente resistenza all'usura e all'abrasione (grazie ai carburi di ferro). Essendo fragili il loro utilizzo è limitato.

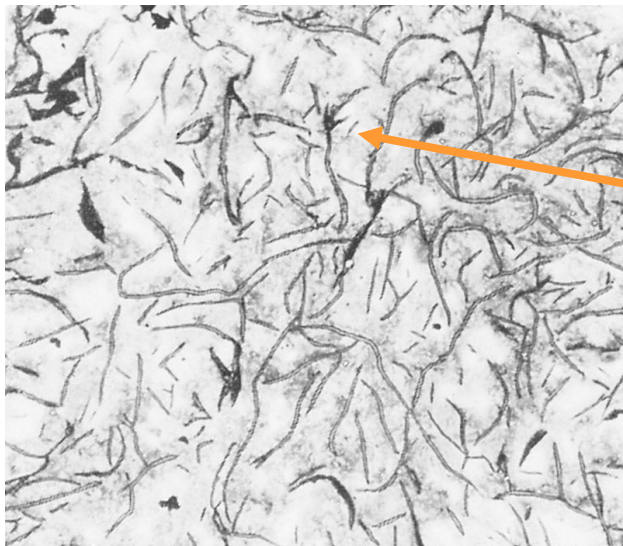


Carburo di ferro

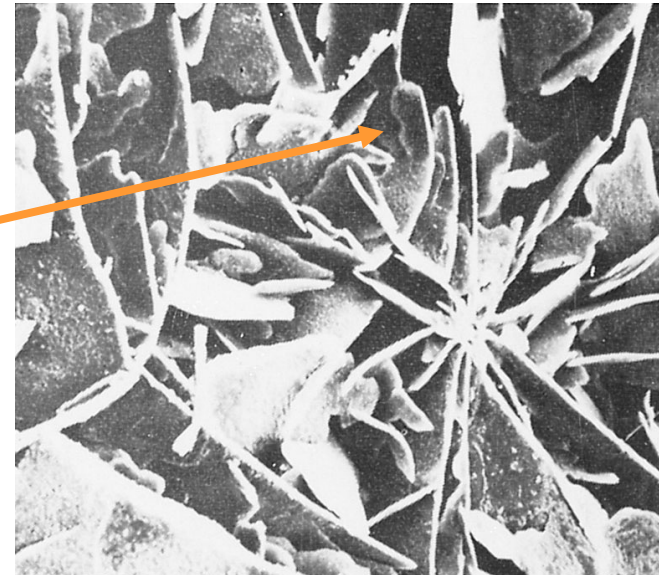
Pearlite

Ghise grigie

- Il carbonio eccede il contenuto che può essere disciolto nell'austenite e precipita come lamelle di grafite
- La superficie di frattura appare grigia per la presenza di particelle di grafite
- Eccellente lavorabilità alle macchine utensili, durezza e resistenza all'usura e capacità di smorzamento delle vibrazioni. Basso costo.
- 2.5 - 4% C e 1 - 3% Si (Si promuove la formazione di grafite)
- L'entità della grafite è condizionata anche dalla velocità di solidificazione: velocità moderate o basse favoriscono la formazione di grafite.
- La velocità di solidificazione influenza anche il tipo di matrice: moderate – perlitica, basse – ferritica.



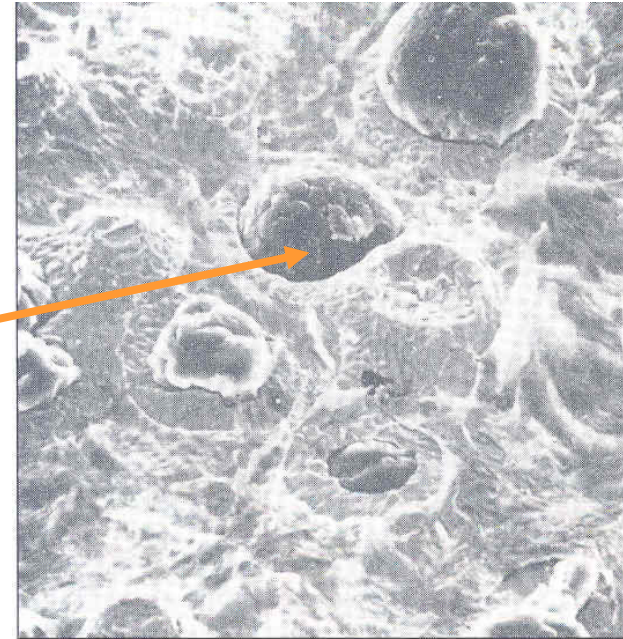
Lamelle di
grafite



Ghisa sferoidale

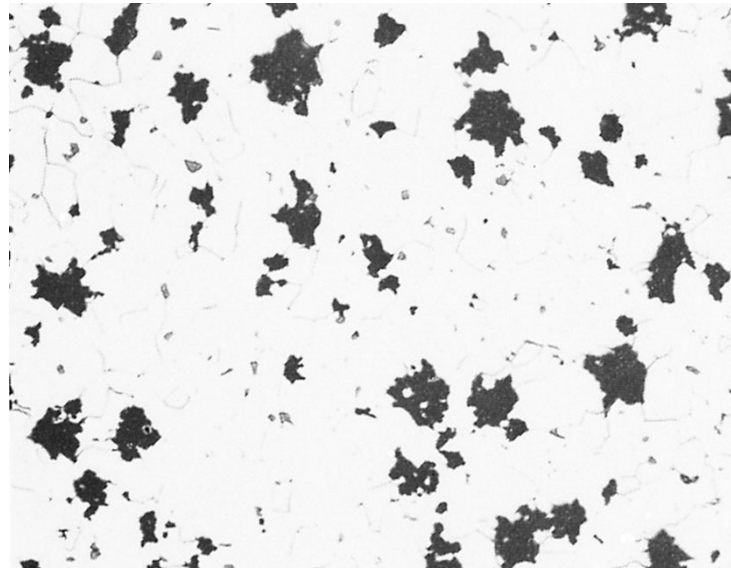
- Ha i vantaggi di ottenimento (dai getti) delle ghise e i vantaggi tecnologici dell'acciaio
- Buona fluidità, colabilità, lavorabilità e resistenza all'usura
- Elevata resistenza meccanica, tenacità, duttilità, lavorabilità a caldo e temprabilità (dovuta agli sferoidi di grafite)
- 3 - 4% C e 1.8 - 2.8% Si, basse impurezze (0.03% di zolfo, 0.1% di fosforo dieci volte inferiori a quelle presenti nella ghisa grigia).
- Anche altre impurezze devono essere controllate in quanto interferiscono con la formazione degli sferoidi di grafite della ghisa sferoidale.
- Lo zolfo viene tenuto a bassi livelli aggiungendo alla ghisa fusa magnesio che si lega allo zolfo e all'ossigeno. I noduli sferoidali sono così preservati.
- Microstruttura tipo occhio di bue.

Microstruttura tipo occhio di bue



Ghise malleabili

- 2 - 2.6% C e 1.1 - 1.6% Si
- La ghisa bianca è riscaldata in un forno di malleabilizzazione per trasformare i carburi di ferro della ghisa bianca in grafite e ferro
- Si formano noduli di grafite irregolari
- Buona colabilità, lavorazione alle macchine utensili, moderata resistenza meccanica, tenacità e uniformità



Trattamento termico

- Il trattamento termico delle ghise bianche per ottenere una ghisa malleabile avviene in due fasi

➤ **Grafitizzazione:** vengono riscaldate sopra la temperatura eutettoidica (940°C) e mantenute per 3 – 20 ore a seconda della composizione e della struttura ghisa bianca → grafite e austenite

➤ **Raffreddamento:**

- *Ghisa malleabile ferritica:* raffreddata velocemente da 740-760 °C e poi raffreddata lentamente (3-11 °C/ora). Austenite si trasforma in ferrite e grafite. Grafite che si deposita sulle particelle preesistenti di grafite di ricottura.

- *Ghisa malleabile perlitica:* raffreddata lentamente fino a 870 °C e poi raffreddata in aria. Austenite si trasforma in perlite. Noduli di grafite di ricottura in una matrice perlitica.

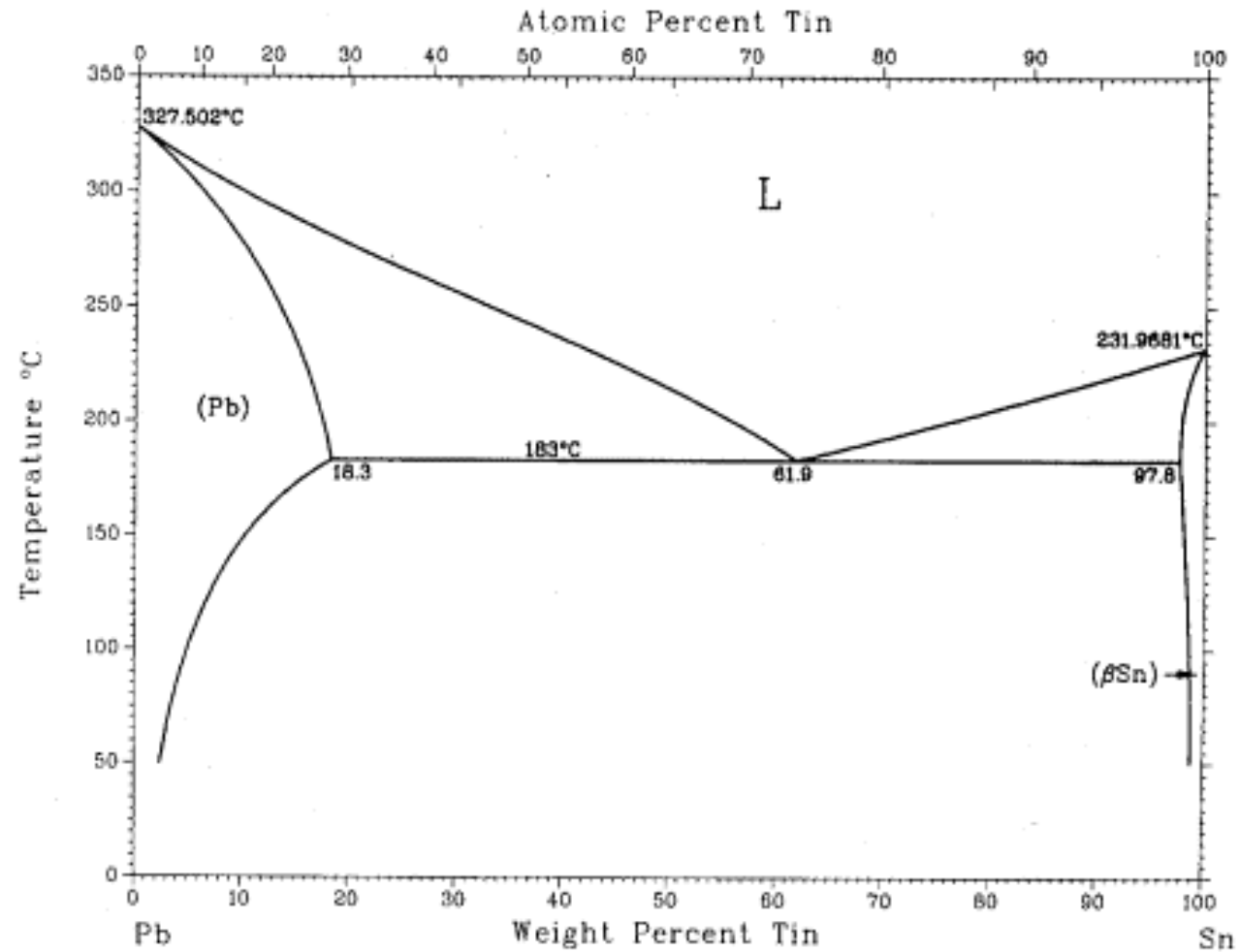
- *Ghisa malleabile martensitica rinvenuta:* getto raffreddato in forno ad una temperatura di tempra (845-870 °C) e omogeneizzato (15 minuti) e temprato in olio agitato perché si formi una matrice martensitica. Infine i getti vengono rinvenuti a una T 590-725 °C per ottenere le caratteristiche meccaniche volute.

Leghe di Alluminio

- **Rafforzamento per precipitazione:** produrre una dispersione fine di precipitati nel metallo e ostacolare il movimento delle dislocazioni
- Stadi fondamentali:
 - **trattamento termico di solubilizzazione:** il campione di lega viene riscaldato ad una temperatura tra quelle di *solvus* e *solidus* e mantenuto a quella temperatura
 - **Tempra di soluzione:** il campione viene raffreddato velocemente a temperatura ambiente in acqua
 - **invecchiamento:** il campione solubilizzato e temprato viene invecchiato per formare precipitati finemente dispersi.
 - Invecchiamento naturale – temperatura ambiente
 - Invecchiamento artificiale – $T = 15-25\%$ della differenza tra temperatura ambiente e temperatura del trattamento termico in soluzione

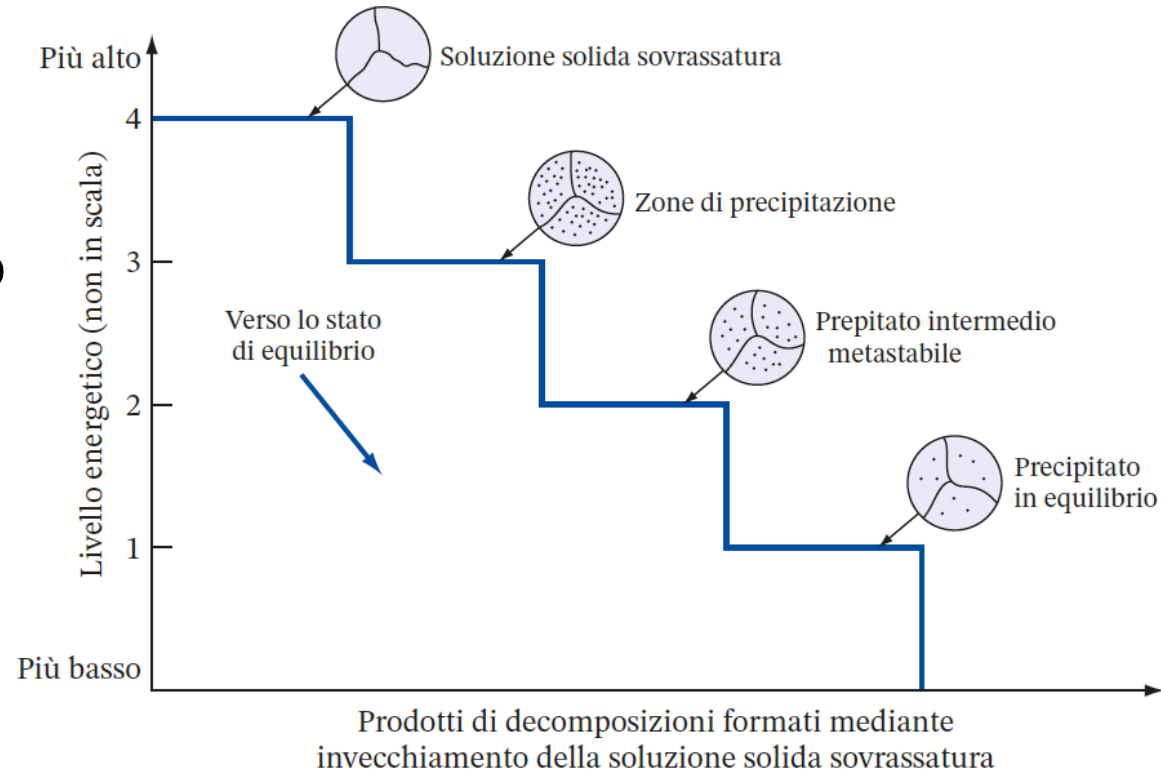
Leghe di Alluminio

Pb-Sn



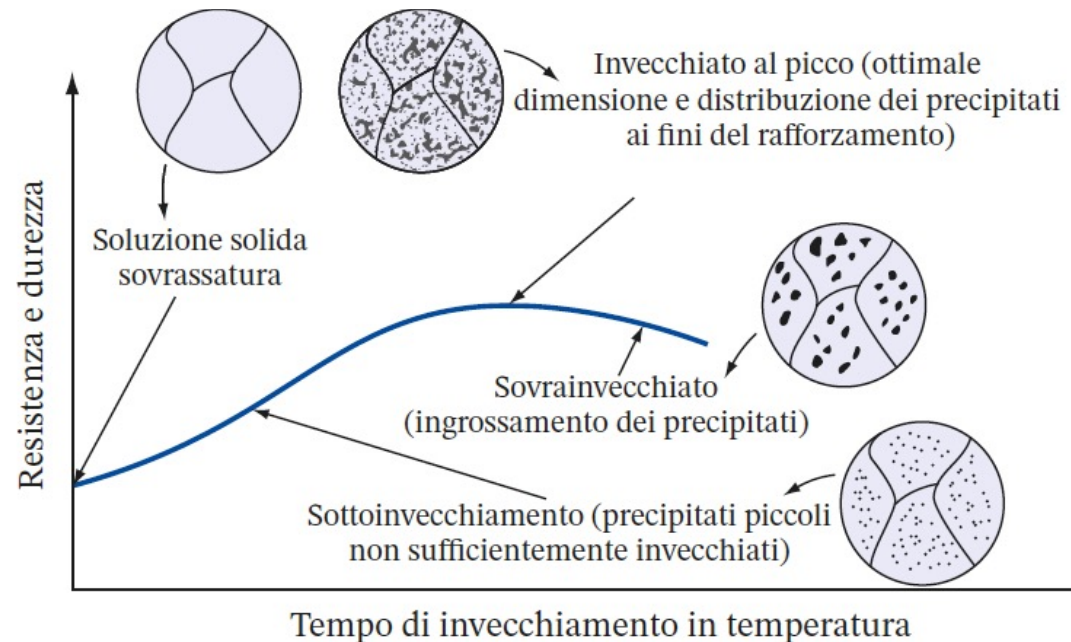
Prodotti di Decomposizione Dovuti all'Invecchiamento

- La soluzione solida sovrassatura si trova in una condizione instabile
- La lega tende a **raggiungere** lo stato di minore energia mediante decomposizione in fasi metastabili o nella fase di equilibrio
- La soluzione solida sovrassatura si trova al più alto livello energetico
- Il precipitato di equilibrio ha il livello energetico più basso



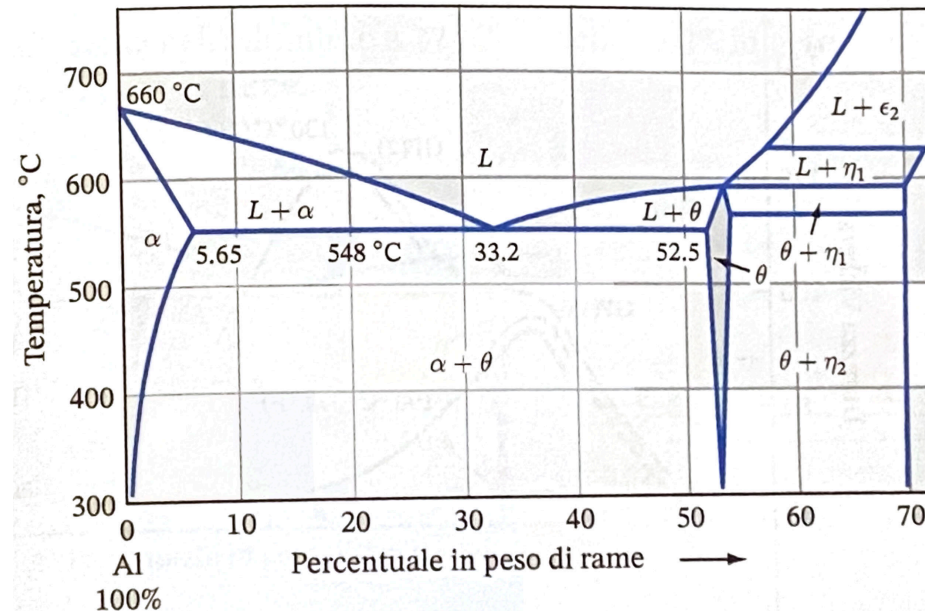
Effetto dell'Invecchiamento sulla Resistenza Meccanica

- Curva di invecchiamento: diagramma della resistenza meccanica o della durezza in funzione del tempo di invecchiamento
- All'aumentare del tempo di invecchiamento, la lega diventa più resistente e dura e meno duttile
- Un lungo tempo di invecchiamento diminuisce la resistenza meccanica e la durezza



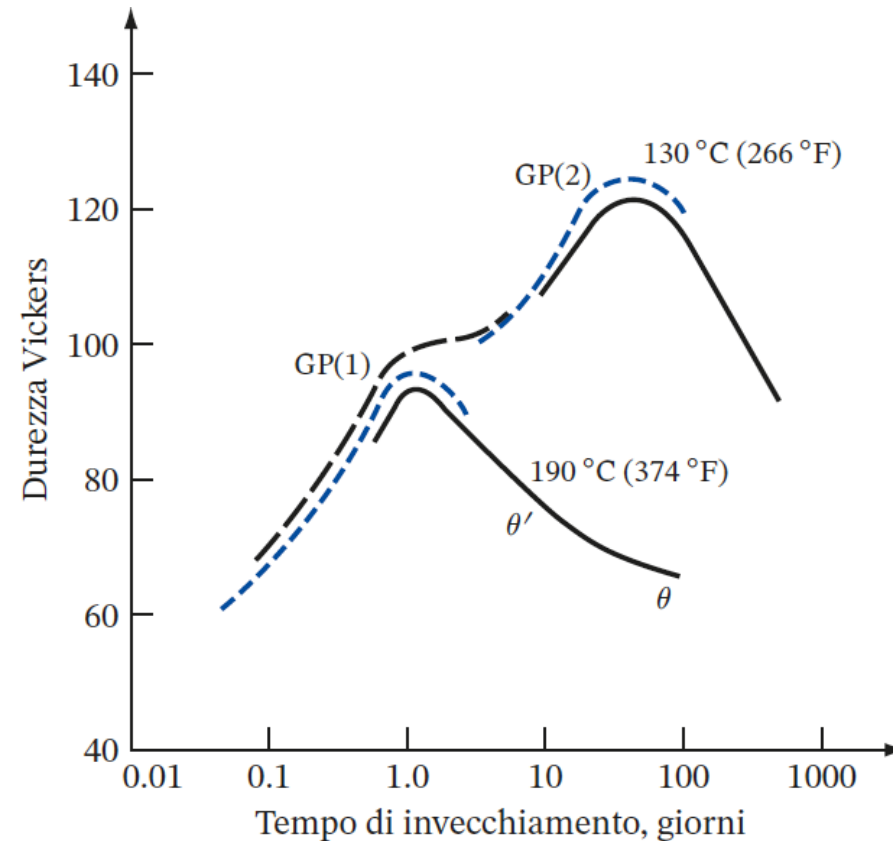
Esempio – Lega Al 4% Cu

- Al -4% Cu è solubilizzata a circa 515°C
- La lega è rapidamente raffreddata in acqua
- La lega è invecchiata artificialmente a 130 – 190 °C
- Strutture formate:
 - *zona GP1*: a più basse temperature di invecchiamento, gli atomi di rame sono segregati in una soluzione solida sovrasatura
 - *zona GP2*: struttura tetragonale, diametro 10 - 100 nm, spessore 1-4 nm
 - *fase θ'*: nuclea eterogeneamente sulle dislocazioni
 - *fase θ*: fase di equilibrio, incoerente (CuAl_2)



Correlazione tra Struttura e Durezza

- Le zone GP1 e GP2 aumentano la durezza ostacolando il movimento delle dislocazioni
- A 130 °C, quando si forma θ' , la durezza è massima
- Dopo la formazione di θ le zone GP2 sono disciolte e θ' si ingrossa diminuendo la durezza



Proprietà generali dell'alluminio

- Bassa densità, resistenza alla corrosione
- Alta resistenza meccanica con aggiunta di elementi in lega (circa 690 MPa)
- Non tossico e buone proprietà elettriche
- Costo relativamente basso

Leghe di alluminio per deformazione plastica

- *Classificazione*: in base ai principali elementi di lega
- *Quattro cifre*: prima cifra - maggiore gruppo di elementi di lega
- Seconda cifra: limiti di impurezze
- Ultime 2 cifre: identifica la lega di alluminio

Tabella 8.10 Designazione delle leghe di alluminio per deformazione plastica

Alluminio, 98.00% minimo o maggiore	1xxx
Leghe di alluminio raggruppate in base ai principali elementi di lega:	
Rame	2xxx
Manganese	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio e silicio	6xxx
Zinco	7xxx
Altri elementi	8xxx
Serie inusuali	9xxx

Designazione del trattamento

- La designazione del trattamento è presente nella designazione della lega da cui è viene separata da un trattino
- Esempio: 2024-T6

F – come prodotto
O – ricotto
H – incrudito
T – trattato termicamente produrre effetti diversi

H1 – solo incrudimento
H2 – incrudimento e parziale ricottura
H3 - incrudimento e stabilizzazione

T1 – invecchiamento naturale
T3 – tempra di solubilizzazione
T4 – tempra di solubilizzazione e invecchiamento naturale
T5 – raffreddamento e invecchiamento artificiale
T6 – tempra di solubilizzazione e invecchiamento artificiale
T7 – tempra di solubilizzazione e stabilizzazione
T8 – tempra di solubilizzazione, deformazione a freddo e invecchiamento artificiale

Leghe di alluminio non trattate termicamente

- Leghe 1xxx : 99% Al + Fe + Si + 0.12% Cu
 - Carico di rottura = 90 MPa
 - Utilizzata per produrre lamiera
- Leghe 3xxx : il manganese è il principale elemento di lega
 - Al 3003 = Al 1100 + 1.25% Mn
 - Carico di rottura = 110 MPa
 - Usata per impieghi generali
- Leghe 5xxx : Al + fino a 5% Mg
 - Al5052 = Al + 25%Mg + 0.2% Cr
 - Carico di rottura = 193 MPa
 - Utilizzata per lamiera per autobus, autocarri e applicazioni marine

Leghe di alluminio trattabili termicamente

- Leghe 2xxx: Al + Cu + Mg
 - Al2024 = Al + 4.5% Cu + 1.5% Mg + 0.6%
 - Carico di rottura = 442 MPa
 - Utilizzata per applicazioni strutturali aeronautiche
- Leghe 6xxx: Al + Mg + Si
 - Al6061 = Al + 1% Mg + 0.6%Si + 0.3% Cu + 0.2% Cr
 - Carico di rottura = 290 MPa
 - Utilizzata per applicazioni strutturali generali
- Leghe 7xxx: Al + Zn + Mg + Cu
 - Al7075 = Al + 5.6% Zn + 2.5% Mg + 1.6% Cu + 0.25% Cr
 - Carico di rottura = 504 MPa
 - Utilizzata per applicazioni strutturali aeronautiche

Composizione delle Leghe di Alluminio per Getto

- La composizione delle leghe per getto differisce molto da quella delle leghe per deformazione plastica
- Le proprietà di colaggio e le proprietà meccaniche sono di primario interesse
- Notazione a 4 cifre con un punto tra le ultime due cifre

Tabella 8.12 Designazione Aluminum Association delle leghe di alluminio per getti

Alluminio, 98.00% minimo o maggiore	1xx. x
Leghe di alluminio raggruppate in base ai principali elementi di lega:	
Rame	2xx. x
Silicio, con aggiunta rame e/o magnesio	3xx. x
Silicio	4xx. x
Magnesio	5xx. x
Zinco	7xx. x
Stagno	8xx. x
Altri elementi	9xx. x
Serie inusuali	6xx. x

Composizione delle Leghe di Alluminio per Getto

- Il **silicio** (5-12%) è il più importante elemento di lega delle leghe di alluminio per getti. Aumenta la fluidità del metallo fuso, e la sua capacità di riempire lo stampo.
- Conferisce resistenza meccanica all'alluminio.

Tabella 8.12 Designazione Aluminum Association delle leghe di alluminio per getti

Alluminio, 98.00% minimo o maggiore	1xx. x
Leghe di alluminio raggruppate in base ai principali elementi di lega:	
Rame	2xx. x
Silicio, con aggiunta rame e/o magnesio	3xx. x
Silicio	4xx. x
Magnesio	5xx. x
Zinco	7xx. x
Stagno	8xx. x
Altri elementi	9xx. x
Serie inusuali	6xx. x

Composizione delle Leghe di Alluminio per Getto

- Il **Magnesio** (0.3-1%) aumenta la resistenza meccanica principalmente attraverso il rafforzamento per precipitazione durante il trattamento termico.

Tabella 8.12 Designazione Aluminum Association delle leghe di alluminio per getti

Alluminio, 98.00% minimo o maggiore	1xx. x
Leghe di alluminio raggruppate in base ai principali elementi di lega:	
Rame	2xx. x
Silicio, con aggiunta rame e/o magnesio	3xx. x
Silicio	4xx. x
Magnesio	5xx. x
Zinco	7xx. x
Stagno	8xx. x
Altri elementi	9xx. x
Serie inusuali	6xx. x

Composizione delle Leghe di Alluminio per Getto

- Il **rame** (1-4%) viene aggiunto ad alcune leghe di alluminio per aumentare la resistenza meccanica ad alte temperature.

Tabella 8.12 Designazione Aluminum Association delle leghe di alluminio per getti

Alluminio, 98.00% minimo o maggiore	1xx. x
Leghe di alluminio raggruppate in base ai principali elementi di lega:	
Rame	2xx. x
Silicio, con aggiunta rame e/o magnesio	3xx. x
Silicio	4xx. x
Magnesio	5xx. x
Zinco	7xx. x
Stagno	8xx. x
Altri elementi	9xx. x
Serie inusuali	6xx. x

Leghe di Rame

- Proprietà generali del rame: buona conducibilità elettrica e termica, facilità di fabbricazione, resistenza alla corrosione, medio carico di rottura

Classificazione delle Leghe di Rame

- I numeri da C10100 a C79900 designano le leghe per deformazione plastica
- I numeri da C80000 a C99900 designano le leghe per getti

Tabella 8.13 Designazione Copper Development Association (CDA) delle leghe di rame

Leghe lavorate	
C1xxxx	Rame* e leghe ad alto tenore di rame [†]
C2xxxx	Leghe rame-zinco (ottoni)
C3xxxx	Leghe rame-zinco-piombo (ottoni al piombo)
C4xxxx	Leghe rame-zinco-stagno (ottoni allo stagno)
C5xxxx	Leghe rame-stagno (bronzi al fosforo)
C6xxxx	Leghe rame-alluminio (bronzi all'alluminio), leghe rame-silicio (bronzi al silicio) e altre leghe rame-zinco
C7xxxx	Leghe rame-nichel e rame-nichel-zinco (alpacche)
Leghe in getto	
C8xxxx	Rame in getto, leghe in getto ad alto tenore di rame, ottoni in getto di vario tipo, leghe bronzo-manganese in getto e leghe rame-zinco-silicio in getto
C9xxxx	Leghe rame-stagno in getto, leghe rame-stagno-piombo, leghe rame-stagno-nichel, leghe rame-alluminio-ferro e leghe rame-nichel-ferro e rame-nichel-zinco.

* Il rame ha un tenore minimo di rame del 98.3% o maggiore.

[†] Le leghe ad alto tenore di rame hanno un tenore di rame inferiore al 98.3% ma superiore al 96% e

Rame Non Legato

- Il rame raffinato elettrolitico è il meno costoso, il più usato nella produzione di fili, barre e lamiere
- Contenuto di ossigeno: 0.04%
- L'ossigeno nel rame è quasi insolubile e forma un ossido. Se questo rame raffinato viene riscaldato a temperatura superiore a 400 °C in un'atmosfera contenente H si avrà la reazione

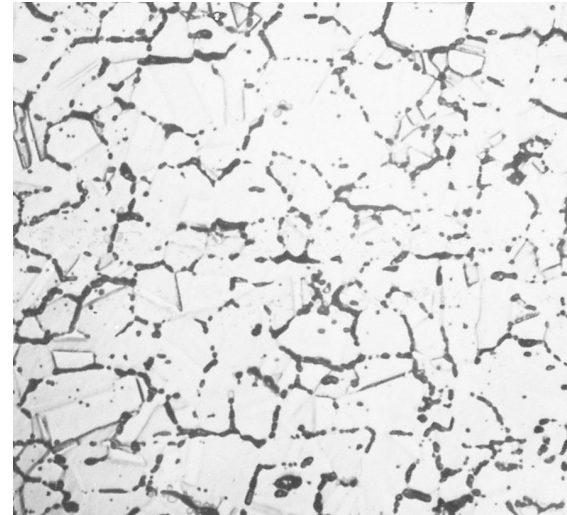


Le grosse molecole d'acqua non diffondono prontamente e formano delle cavità interne, in particolare al bordo di grano, che rendono fragile il rame. Per evitare questo l'ossigeno può essere fatto reagire con il fosforo. Oppure fondendo il rame in un'atmosfera riducente controllata in modo da avere il rame esente da ossigeno.

- Rame fuso in un'atmosfera riducente controllata

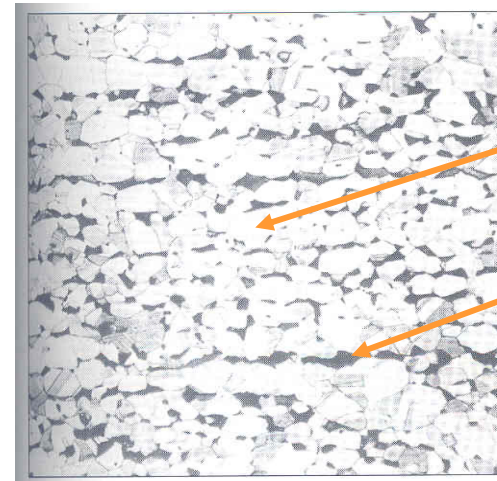
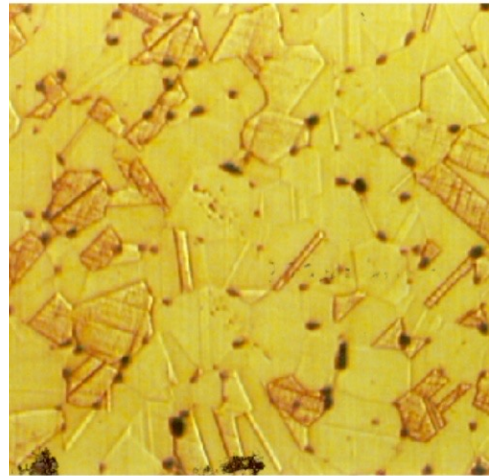


***Rame libero da ossigeno
ad alta conducibilità
(lega C10200)***



Leghe Rame-Zinco (ottone zinco in tenore 5-40%)

- Il rame forma una soluzione solida sostituzionale con lo zinco fino a 35% Zn
- Ottone cartridge → 70% Cu & 30% Zn → monofasico (α)
- Ottone Muntz → 60% Cu & 40% Zn → bifasico ($\alpha+\beta$)



- Piombo (0.5 - 3%) è sempre aggiunto al rame per aumentare lavorabilità alle macchine utensili

Altre Leghe di Rame

- Bronzi rame-stagno: da 1 a 10% di stagno con Cu per formare leghe rafforzate per soluzione solida
 - più resistenti e meno corrodibili dei bronzi Cu-Zn
 - viene aggiunto fino a 16% Sn alle leghe utilizzate per ingranaggi ad elevata resistenza
- Leghe rame-berillio: da 0.6 a 2% Be e 0.2 - 2.5 % Co con rame
 - possono essere trattate termicamente e lavorate a freddo per produrre bronzi molto resistenti (1463 Mpa la più alta resistenza meccanica di una lega commerciale di rame)
 - eccellente resistenza alla corrosione e elevata resistenza a fatica
 - utilizzate per molle, diaframmi, valvole etc.

Struttura e proprietà delle leghe di magnesio

- Limitata deformabilità a freddo per la struttura EC
- Solitamente deformate a caldo
- Al e Zn vengono aggiunti per aumentare la resistenza meccanica
- La lega formata con aggiunta con terre rare (cerio) determina una struttura rigida al bordo di grano
- Resistenza meccanica a trazione: 179 – 310 Mpa (relativamente bassa)
- Allungamento: 2 - 11%
- Costo maggiore dell'alluminio
- La fusione deve essere fatta in atmosfera controllata per evitare che il magnesio bruci all'aria

Leghe di titanio

- Bassa densità e alta resistenza meccanica
- Alto costo – utilizzate per applicazioni aerospaziali
- Elevata resistenza alla corrosione
- Occorrono tecniche speciali per lavorare il metallo
- Struttura EC a temperatura ambiente. Si trasforma in CCC a 883 °C
- Al e O aumentano la temperatura di transizione
- Resistenza meccanica a trazione: 662 - 862 MPa

Leghe di titanio

Approfondimento

- Struttura EC a temperatura ambiente detta fase α .
- Si trasforma in CCC a 883 °C chiamata fase β

L'aggiunta di elementi di lega influenza la temperatura della trasformazione $\alpha \rightarrow \beta$ che può diminuire o aumentare.

Gli elementi di lega sono suddivisi in **stabilizzanti della fase α** (alluminio, azoto, ossigeno) e **stabilizzanti della fase β** (cromo, vanadio, molibdeno, niobio).

Se aggiungiamo i primi la temperatura della trasformazione aumenta, se aggiungiamo i secondi diminuisce causando una trasformazione eutettoidica che produce una struttura bifasica a temperatura ambiente.

Leghe di nichel

- Elevato costo, buona resistenza alla corrosione e facilmente deformabile
- Leghe di nichel commerciali e Monel : buona saldabilità, conducibilità elettrica e resistenza alla corrosione
- Nickel + 32% Cu → lega Monel (nichel rafforzato)

- **Superleghe a base di nichel:** resistenza al creep ad elevate temperature e resistenza all'ossidazione per componenti di turbine a gas
- 50 - 60% Ni + 15 – 20% Cr + 15 - 20% Co + 1- 4% Al + 2 - 4% Ti
- 3 fasi: austenite gamma, una fase precipitata Ni₃Al e Ni₃Ti detta gamma primaria, particelle di carburo conseguenti all'aggiunta di circa 0.01-0.04% di carbonio

Intermetalli

- Combinazione unica di proprietà
 - *Esempi:* alluminato di nichel
alluminato di ferro
alluminato di titanio
- Applicazioni a elevate temperature**
- Bassa densità, buona resistenza meccanica ad elevata temperatura, bassa corrosione, ma fragile
 - L'aggiunta di 0.1 % boro e 6-9 % Cr riduce l'infragilimento e aumenta la duttilità
 - Applicazioni: motori di aerei, pistoni, parti di fornaci, applicazioni magnetiche (Fe_3Si) e applicazioni per l'elettronica (MoSi_2)

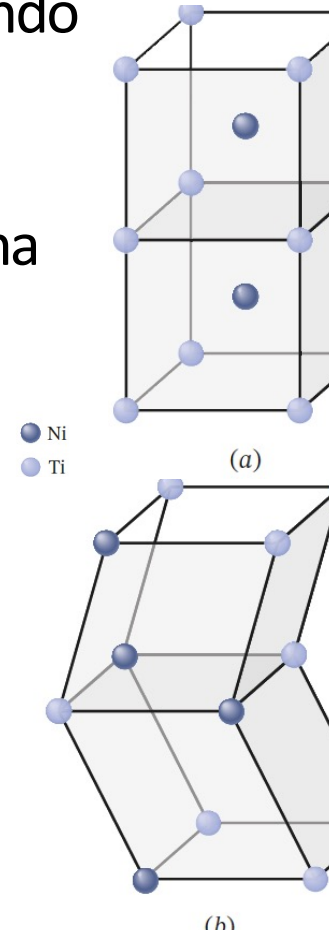
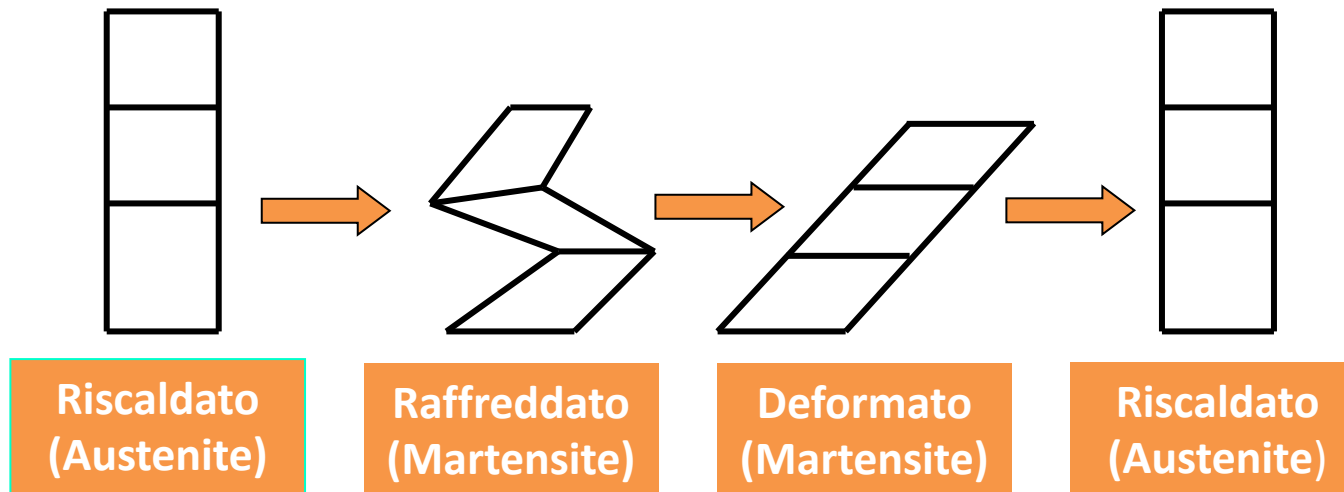
Leghe a memoria di forma (SMA)

- SMA recupera una forma predefinita quando è soggetta ad un appropriato trattamento termico
- Recupera la deformazione e applica forze
- Esempi: AuCd, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Ni-Ti
- Lavorate utilizzando tecniche di deformazione a caldo e a freddo e trattate termicamente a 500 - 800°C per ottenere la forma desiderata

- Ad alta temperatura --- struttura cubica regolare (austenite)
- Dopo il raffreddamento – struttura *twinned* (martensite)

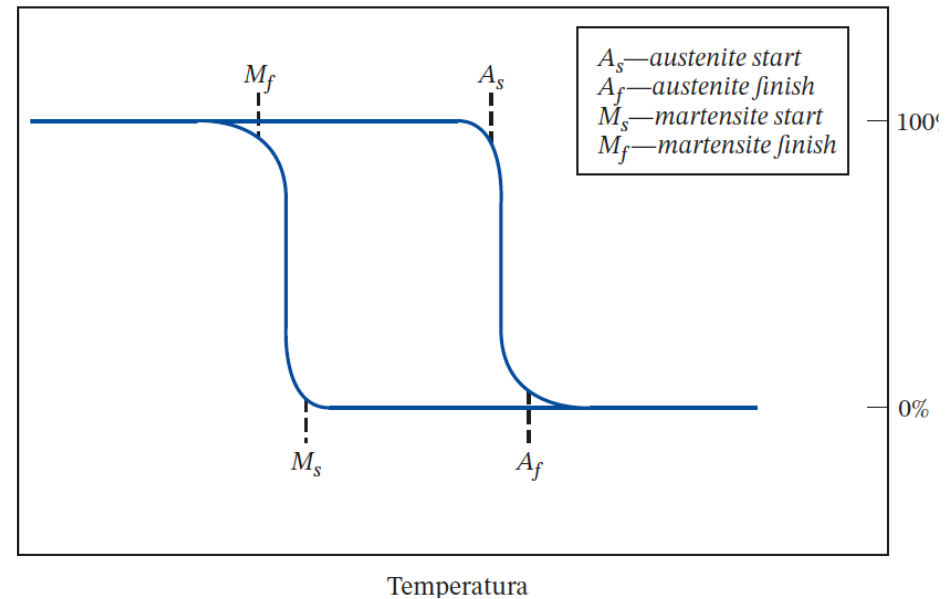
Effetto di memoria di forma

- SMA si deforma facilmente nello stato martensitico per i bordi di geminati e la deformazione non viene recuperata quando viene rimosso il carico
- Il riscaldamento provoca la trasformazione martensite ↔ austenite così che si recupera la forma
- L'effetto avviene in un intervallo di temperatura



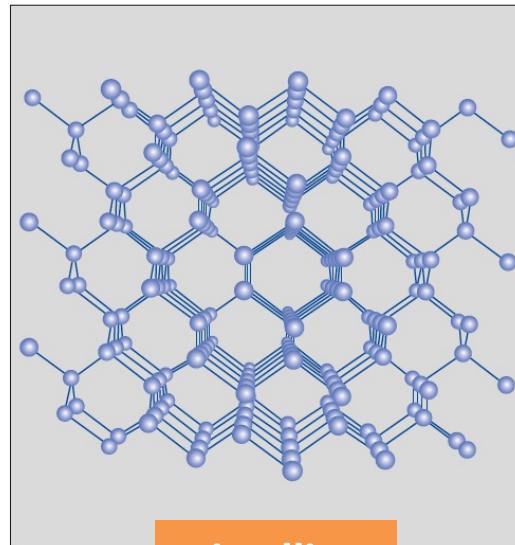
SMA - Isteresi

- Le temperature di raffreddamento e di riscaldamento non si sovrappongono – il sistema mostra isteresi
- Lo sforzo applicato può deformare e trasformare la SMA in martensite – trasformazione stress indotta
- La forma viene recuperata quando lo sforzo viene rimosso
- Nitinol (NiTi) è una SMA comunemente utilizzata
 - **deformazione recuperata: 8.5%**
 - **non-magnetico, resistente a corrosione**
 - *Applicazioni:* stent vascolari, termostati di caffettiere, montatura di occhiali, archi ortodontici, assorbente di vibrazioni e strumenti chirurgici

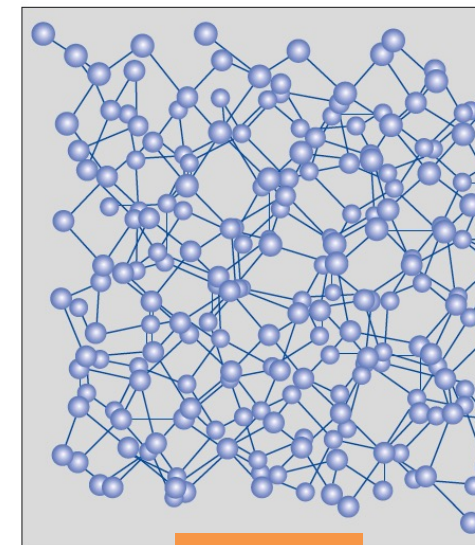


Metalli amorfi

- Gli atomi sono disposti in maniera casuale nei metalli in condizioni speciali
- Prodotti per rapido raffreddamento (10^5 K/s) – non c'è il tempo per formare cristalli
- A oggi possono essere prodotti solo pezzi di piccola dimensione
- Non ci sono movimenti di dislocazioni: molto duri, perfettamente plastici, alta precisione dimensionale (no ritiro)
- Applicazioni:
 - strumenti chirurgici;
 - mazze da golf



cristallino



amorfo