

A. Tiziani, P. Ferro, F. Bonollo

MATERIALI METALLICI

Il diagramma Fe-C

A.A. 2008/2009

2° Anno Ingegneria Gestionale - Nuovo Ordinamento

1

- Diagramma Fe-C: generalità
- Trasformazioni alla solidificazione
- Trasformazioni al raffreddamento
- Correlazioni microstruttura-proprietà
- Effetto degli elementi in lega

2

GENERALITA'

Il ferro può sussistere, **a seconda della temperatura**, in due forme cristalline diverse:

Fe CCC = Ferro α, δ

Fe CFC = Ferro γ

(Modificazione allotropica)

Allotropia è una parola che vuol dire semplicemente **la proprietà di cambiare.... faccia**, cioè di modificare la forma cristallina.

OSS: tutti i metalli fanno qualcosa di simile? (**solo poco più di una decina** (Ferro, Cobalto, Cerio, Stagno, Cromo, Manganese, Tungsteno, Calcio....))

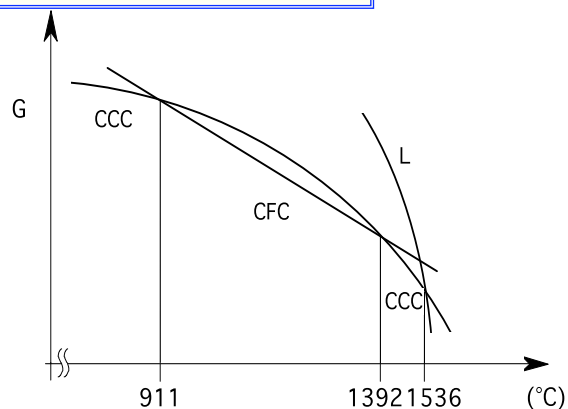
PERCHE'????? Vediamo la cosa più nel dettaglio.....

3

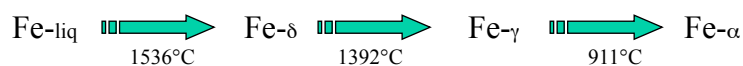
Il diagramma di stato del Ferro

E' tutta una questione di energia:

le forze che tengono uniti gli atomi di ferro, nel loro edificio cristallino sono tali che alla temperatura inferiore a 911 °C è minima l'energia del reticolo cubico corpo centrato $\alpha...$

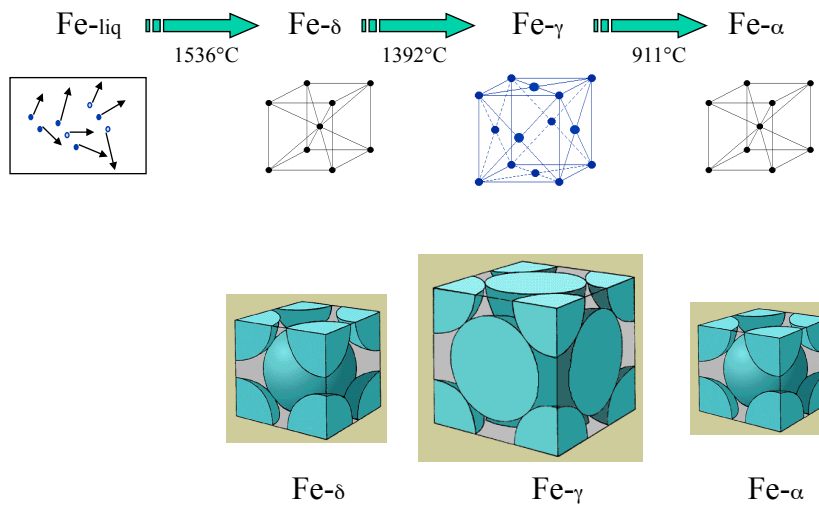


Fe: comportamento ALLOTROPICO (o polimorfo)

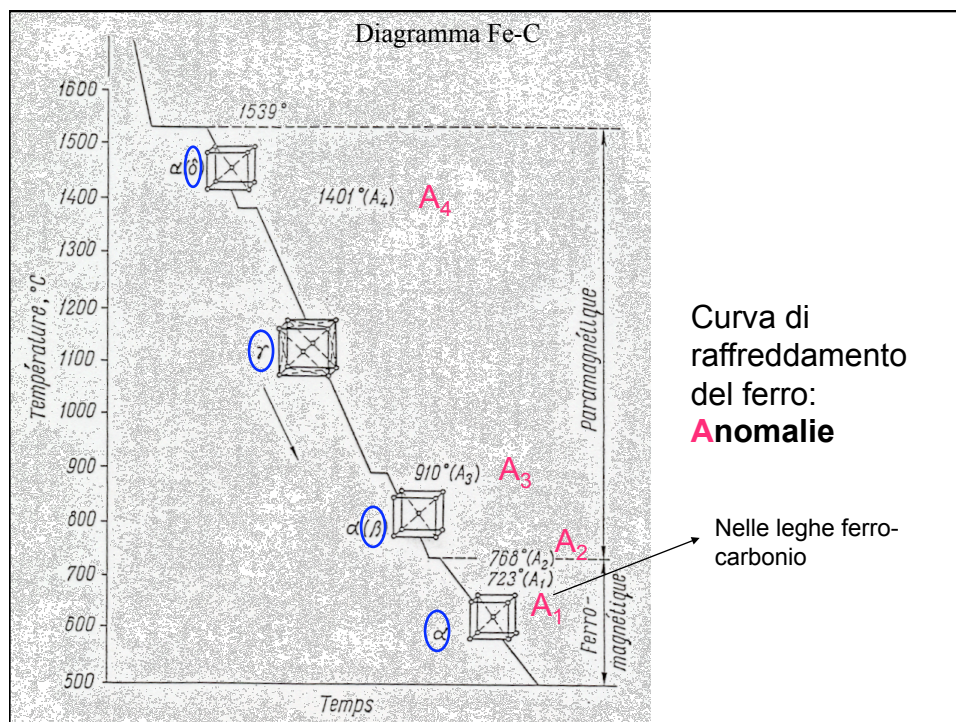


4

Il diagramma di stato del Ferro



5

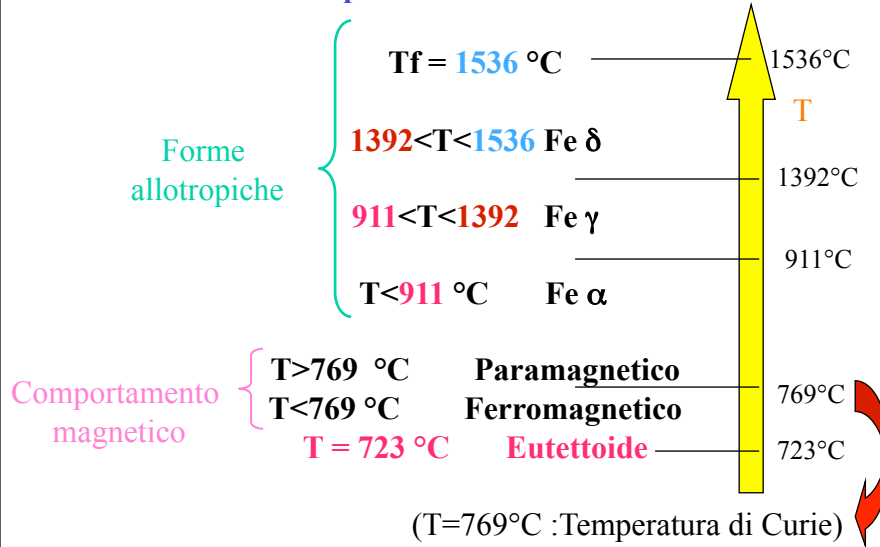


6

DIAGRAMMA Fe-C

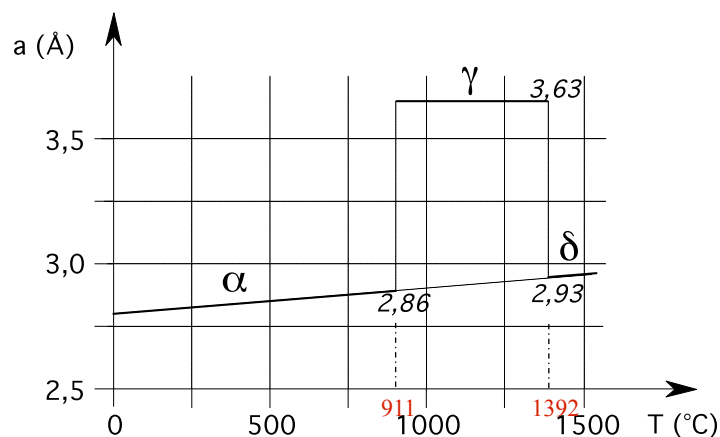
E' caratteristico delle leghe maggiormente usate nell'industria.

Temperature caratteristiche



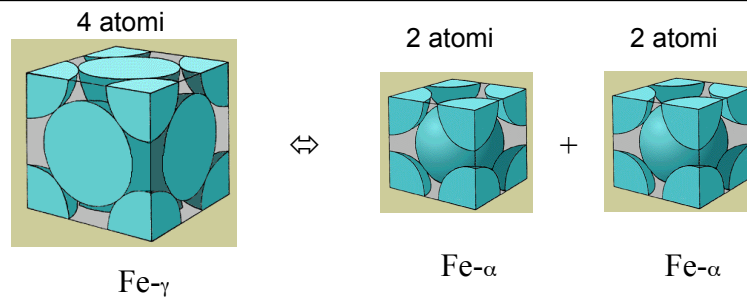
7

Il diagramma di stato del Ferro



Il ferro α e il ferro δ hanno la stessa costante reticolare, tenendo conto della variazione dovuta alla temperatura: il Fe α e il Fe δ non sono due forme reticolari distinte del ferro, bensì la stessa forma CCC, la quale manifesta una lacuna di esistenza tra 900 e 1400 $^{\circ}\text{C}$

8



Il Fe γ ha una **struttura più impaccata** ma cella di dimensioni **doppie rispetto al Fe α**

Cella $\alpha = 2.90 \times 2.90 \times 2.90 = 24.39 \text{ \AA}^3$

Ma quanti atomi ci sono in ogni cella?

Cella $\gamma = 3.64 \times 3.64 \times 3.64 = 48.23 \text{ \AA}^3$

Spazio a disposizione dall'atomo in $\alpha = 24.39/2 = 12.195 \text{ \AA}^3$

Spazio a disposizione dall'atomo in $\gamma = 48.23/4 = 12.055 \text{ \AA}^3$

Gli atomi nel Fe γ stanno un po' più stretti!!! (contrazione dell'1.15%)

9

Il Carbonio in soluzione solida nel Ferro

...il carbonio si scioglie nel ferro γ e non nel ferro α

Prima sostanziale differenza: **il ferro γ scioglie il carbonio, e il ferro α non lo scioglie!!!**

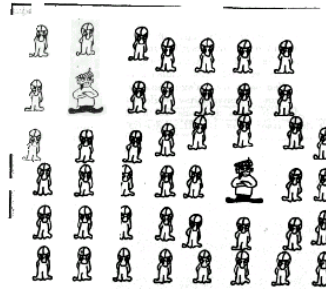
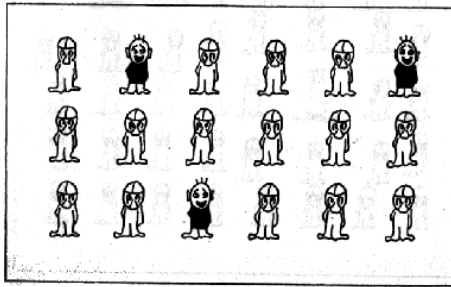
Cosa significa?



10

...rifacciamoci alla natura cristallina dei metalli....

Nelle soluzioni solide gli atomi di soluto prendono il posto degli atomi della matrice (ma nel caso che il disturbo divenisse eccessivo non si avrebbe più soluzione solida e gli atomi del soluto in eccesso finirebbero col...precipitare, separandosi fisicamente da quelli del solvente)



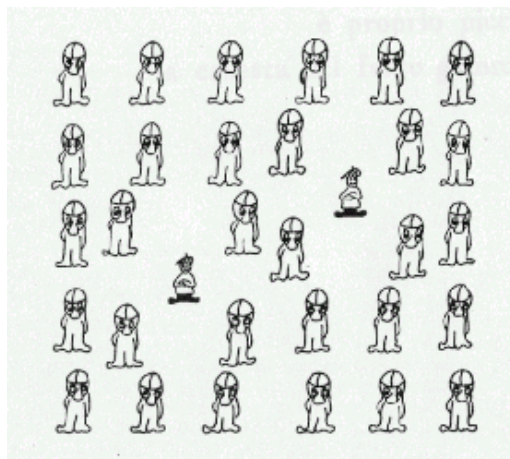
Soluzione solida di sostituzione

11

Ma c'è un altro tipo di soluzione solida che interessa il nostro acciaio...

.....sono le **soluzioni solide interstiziali** (possibili solo quando gli atomi del soluto sono molto piccoli)

Ancora non appena il disturbo diventa eccessivo si ha una precipitazione del soluto che si manifesta con la formazione di una nuova fase!



Nelle soluzioni solide interstiziali si verificheranno sempre delle **distorsioni**, perché, per quanto piccoli siano, gli atomi del soluto si accomoderanno sempre con qualche difficoltà negli spazi vuoti del reticolo del solvente.

Soluzione solida interstiziale

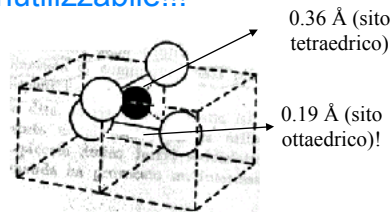
12

...è proprio piccola la casetta del ferro γ ?

...Ma non avevamo detto che gli atomi di ferro sono più 'stipati' nel ferro γ anziché nel ferro α ?

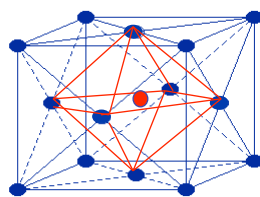
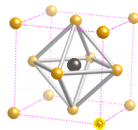


Si tratta di una **questione di distribuzione di spazio**: nel reticolo del ferro γ lo spazio è distribuito più razionalmente che non in quello del ferro α , nel quale **abbiamo sì più spazio, ma è spazio sprecato, inutilizzabile!!!**



13

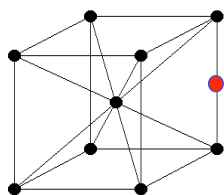
Il Carbonio in soluzione solida nel Ferro



Sito ottaedrico

Raggio max = $0.41 r_{Fe}$

Fe- γ : 0.52 Å

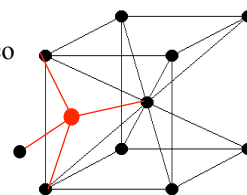


Sito ottaedrico
distorto
 $0.154 r$

Fe- α : 0.19 Å

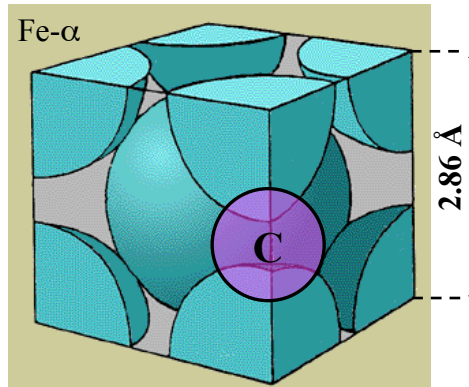
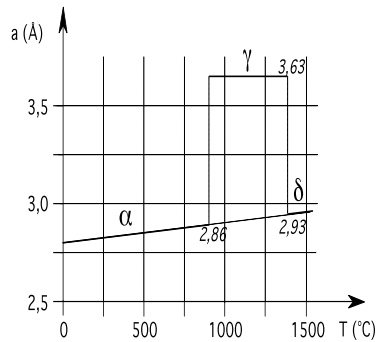
Sito tetraedrico
 $0.29 r$

Fe- α : 0.36 Å



14

Il Carbonio in soluzione solida nel Ferro CCC



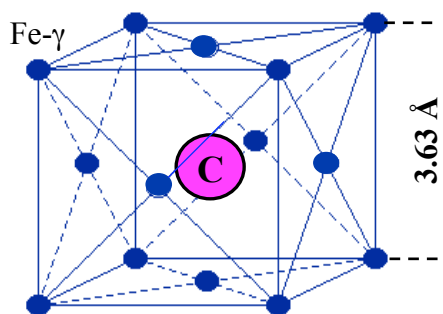
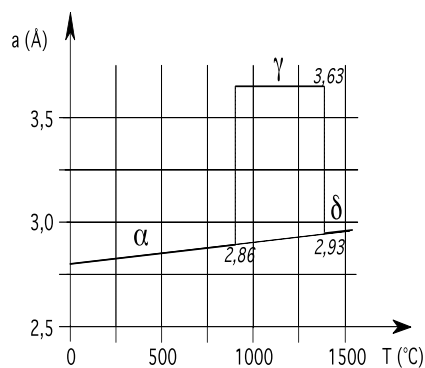
Raggio atomico Carbonio = 0.8 Å

Siti tetraedrici per il Carbonio nel Fe- α : dimensioni = 0.36 Å
 Siti ottaedrici distorti per il Carbonio nel Fe- α : dimensioni = 0.19 Å

Solubilità max del Carbonio nel Fe- α = 0.02% in peso

15

Il Carbonio in soluzione solida nel Ferro CFC



Raggio atomico Carbonio = 0.8 Å

Sito ottaedrico per il Carbonio nel Fe- γ : dimensioni = 0.52 Å

Solubilità max del Carbonio nel Fe- γ = 2.03% in peso

16

In sostanza: nel CFC, più stipato di atomi, si verifica che **tutto lo spazio vuoto è in un certo modo concentrato al centro della cella unitaria**, mentre in quello CCC, lo spazio vuoto è suddiviso in varie zone del reticolo, e perciò è più difficilmente utilizzabile da atomi estranei per formare soluzioni solide interstiziali. **La solubilità del carbonio nel ferro α esiste ma è trascurabile nei confronti dei trattamenti termici più comuni degli acciai**, tuttavia se considerata in concomitanza ad altri fattori, quali per es: la presenza di azoto o di ossigeno, può avere una influenza assai importante agli effetti di un fenomeno spettacolare nelle sue manifestazioni esteriori, quale **l'invecchiamento dell'acciaio!!!**



Solubilità max del Carbonio nel Fe- α = 0.02% in peso

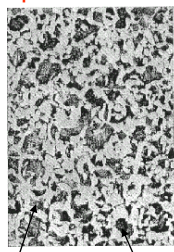
Il diametro del carbonio di 0.8 Å dovrebbe infilarsi in uno spazio di diametro 0.36 Å : **distorsione del reticolo**

17

...osserviamo al microscopio la soluzione del carbonio

... **consideriamo un acciaio C40**

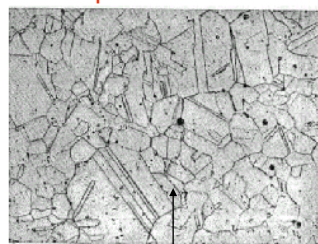
A temperatura ambiente



Ferro α esente da carbonio che chiameremo **ferrite**

Carbonio che non si scioglie?

Sopra i 790 °C



Ferro γ che ha sciolto tutto il carbonio presente: **Austenite**

Ad alti ingrandimenti osservereste che quel composto nerastro assume un aspetto più luminoso, **perlaceo**, ed è per questo che i metallografi lo chiamarono **PERLITE**

Dove è finito allora il carbonio?

18

...la cementite

La **perlite** è costituita da lamelle alternate di ferrite e CEMENTITE!

La **cementite** è un composto chimico fra il ferro e il carbonio! E' uno di quei composti chimici fra metalli che non obbediscono alle consuete regole della valenza e che vengono chiamati composti intermetallici o più propriamente costituenti intermedi

La formula della cementite è **Fe_3C**

Ha un **reticolo ortorombico** (parallelepipedo retto a tre dimensioni diverse)
complesso

Fe_3C è un composto **duro** e **fragile**

Negli acciai il carbonio si trova quasi sempre sotto questa forma

19

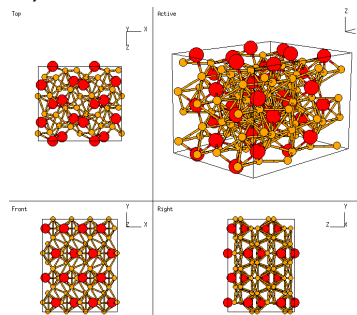
Diagramma Fe-C

La Cementite e la Grafite

La Cementite (**Fe_3C**) con **6,67% di C** ha una $T_f \approx 1550^\circ\text{C}$ ed è una **fase metastabile**.

Può assumere le forme **lamellare**, **globulare** o **a maglie** (cementite secondaria).

La **fase stabile** è la **grafite** (**lamellare**, o **a fiocchi** o **nodulare**) che si forma con raffreddamento lento.



Cementite

20

Il diagramma di stato Ferro – Carbonio

Riepilogando:

Ferro α :

1. è la forma di ferro stabile a temperature inferiori a 911°C
2. Ha reticolo **cubico a corpo centrato**
3. Il carbonio non si scioglie nel ferro α (solo in quantità molto piccola)
4. La soluzione di carbonio (in piccolissima percentuale) nel ferro α si chiama **ferrite**
5. Sotto i 769 °C è magnetico

21

Ferro γ :

1. è la forma di ferro stabile a temperature fra 911°C e 1400 °C
2. Ha reticolo cubico a facce centrate
3. Il carbonio si scioglie in misura considerevole nel ferro γ
4. La soluzione di carbonio nel ferro γ si chiama **austenite**
5. Non è magnetico

Ferro δ :

1. è la forma di ferro stabile a temperature fra 1392°C e 1536 °C (punto di fusione)
2. Ha reticolo cubico a corpo centrato ed è la continuazione del ferro α
3. Assume importanza solo in casi particolari (acciai ad alto tenore di Cr)
4. La soluzione di carbonio nel ferro δ si chiama **ferrite δ**

22

Grafite:

1. Carbonio libero allo stato elementare
2. Si trova nelle ghise raffreddate lentamente
3. In fiocchi o lamelle (ghise grigie); in noduli (ghise malleabili o nodulari)
4. E' la forma stabile del carbonio nelle leghe ferro carbonio

Cementite:

1. Carburo di ferro la cui formula è Fe_3C
2. Si trova nelle leghe a basso tenore di C (acciai) e nelle ghise raffreddate rapidamente (ghise bianche)
3. E' la forma instabile del carbonio nelle leghe ferro carbonio
4. Lamellare, globulare, a maglie (cementite secondaria)

Perlite:

1. È un aggregato costituito da lamelle alternate di ferrite e cementite (ma si può presentare anche sotto altre forme)

23

Il diagramma Ferro-Carbonio

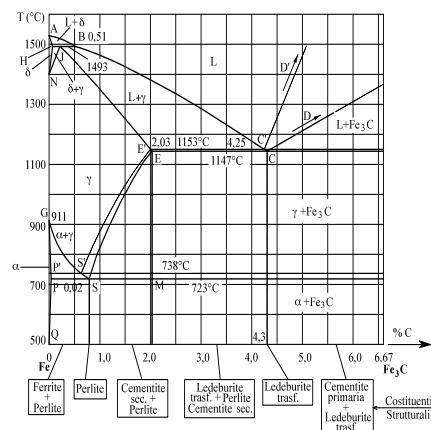
- Diagramma Fe-cementite
- Diagramma Fe-grafite

- Solubilità max del C:
2.06% a 1147°C nel Fe- γ
0.02% a 723°C nel Fe- α

Fasi	e	Costituenti strutturali
- liquida		
- fase δ		- ferrite δ
- fase γ		- austenite
- fase α		- ferrite α
- Fe_3C		- cementite
		- perlite
		- ledeburite

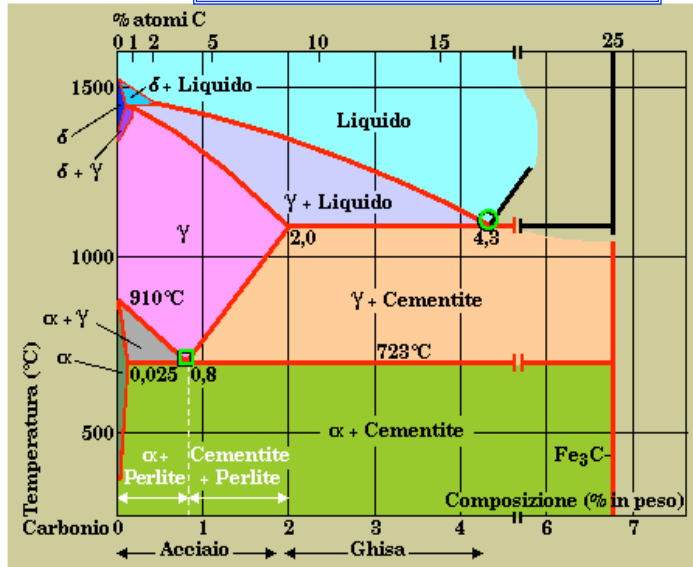
Punti critici (ANOMALIE)

- A4: $\gamma \leftrightarrow \delta$ A1: austenite eutettoidica $\leftrightarrow$ perlite
A3: $\alpha \leftrightarrow \gamma$ Acm: austenite $\leftrightarrow$ cementite



24

Il diagramma Ferro-Carbonio



Zone di stabilità

Le linee indicano le temperature alle quali si manifestano le transizioni a seconda della composizione

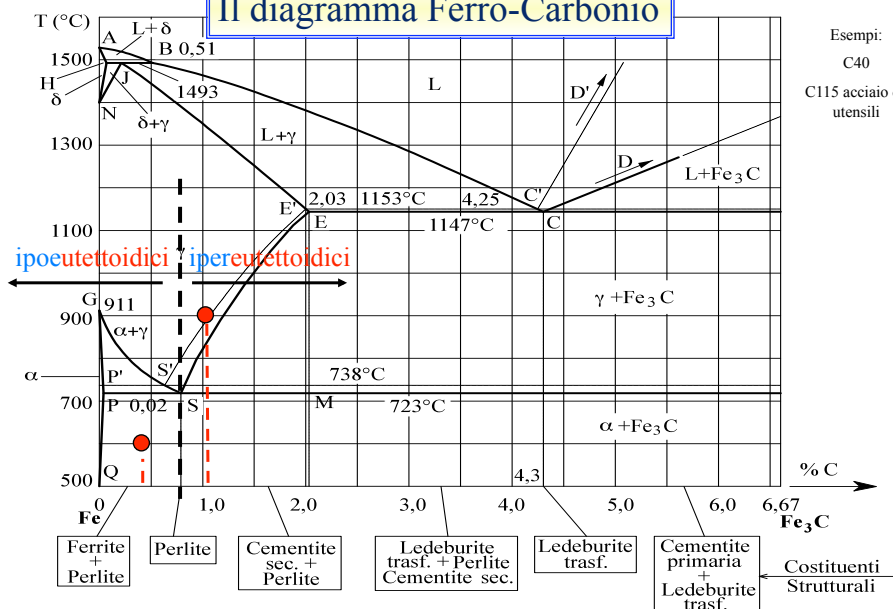
Es linea A3

Ci interessa solo una porzione ai fini dei TT sugli acciai

Diagramma di fase ferro-carbonio. Punto eutettico (●); punto euteticoide (■).

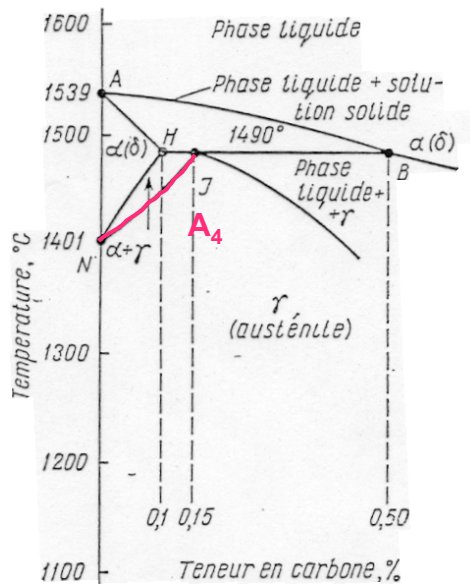
25

Il diagramma Ferro-Carbonio



26

Diagramma Fe-C

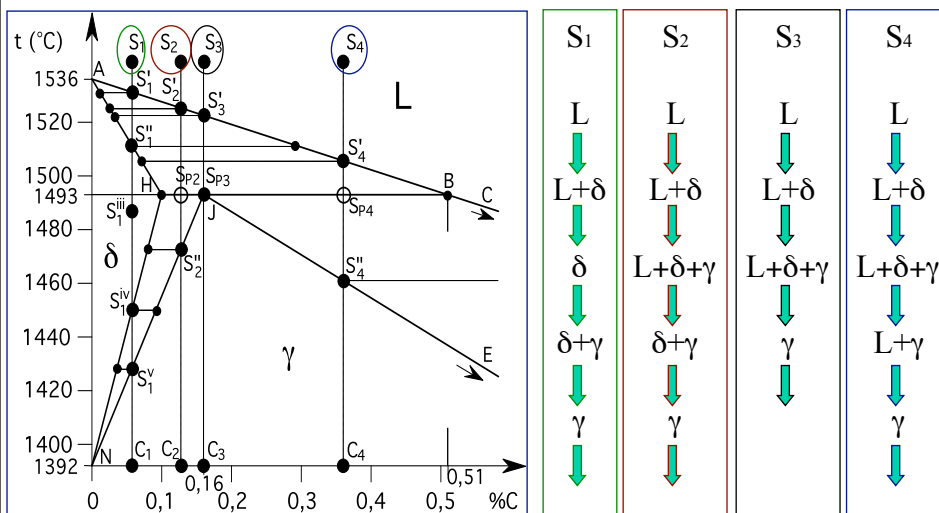


Peritettico del
diagramma Fe-C

Anomalia A_4

27

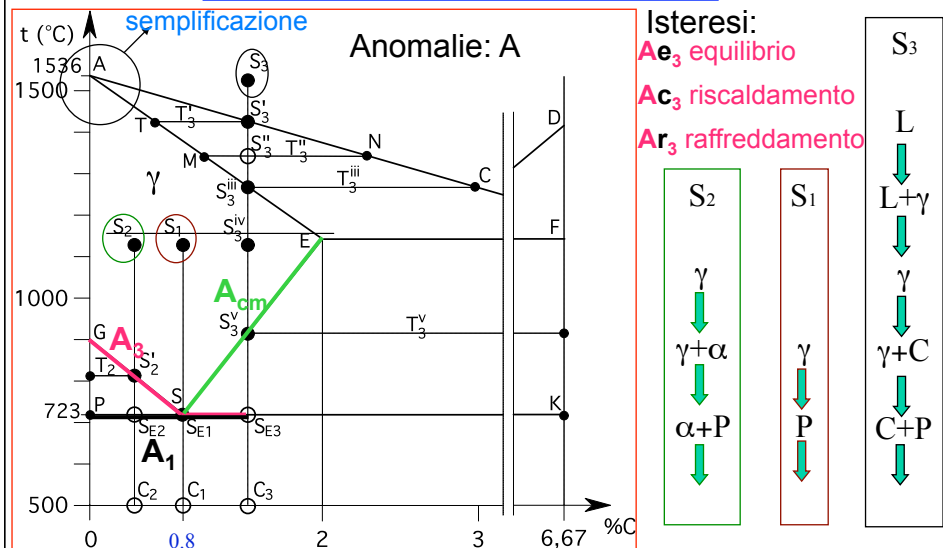
Il diagramma Ferro-Carbonio
Trasformazioni alla solidificazione degli acciai



28

Il diagramma Ferro-Carbonio

Trasformazioni al raffreddamento degli acciai



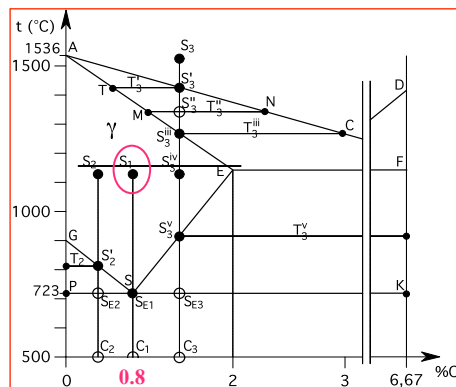
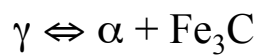
29

...L'eutettoide perlitico

In analogia ai punti eutettici di alcune leghe il punto a 723 °C (0.8% C) viene detto **EUTETTOIDE**

Lega "eutettica" dal greco "fonde bene"

Eutettoide significa "a forma di eutettico"



30

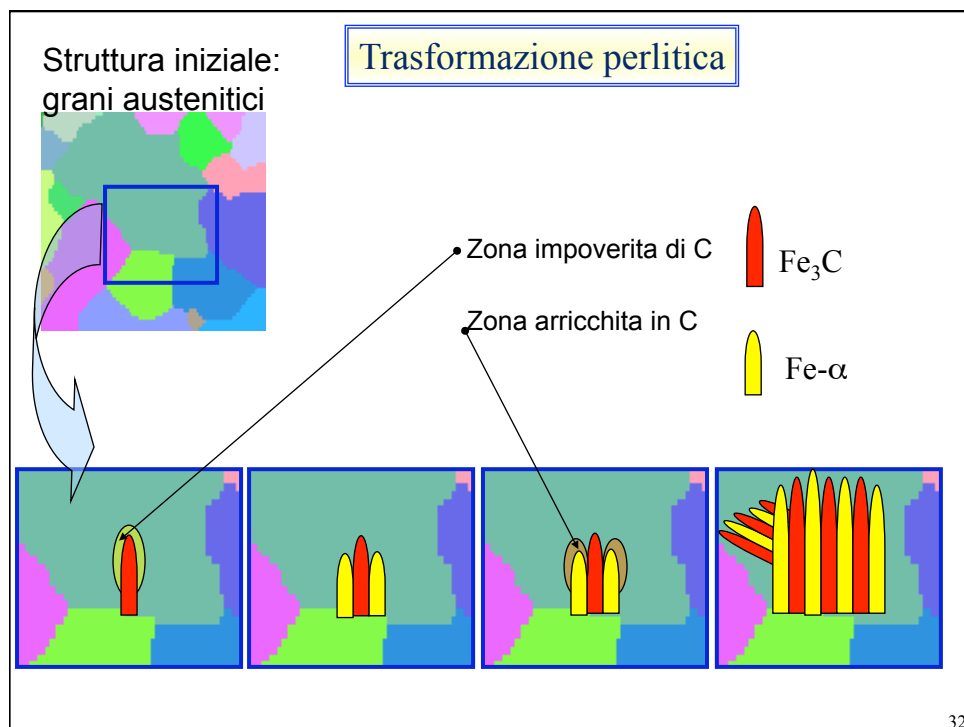
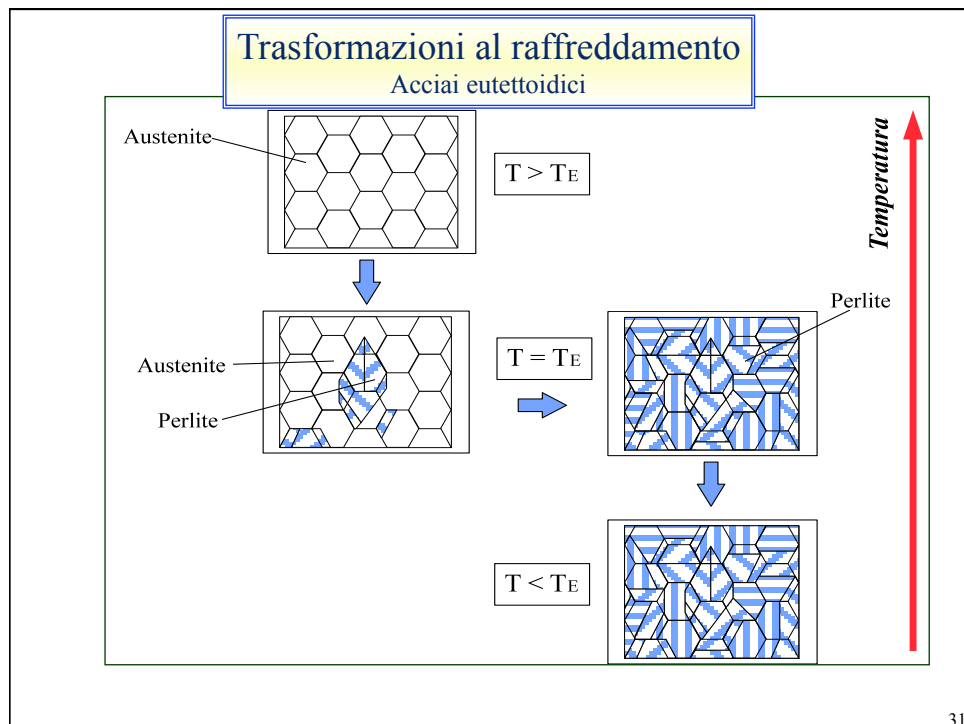
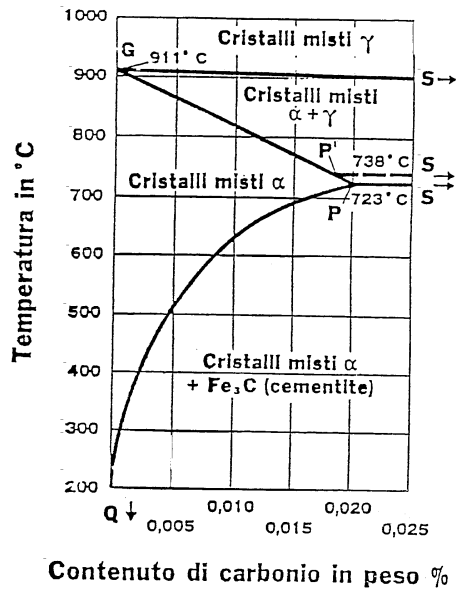


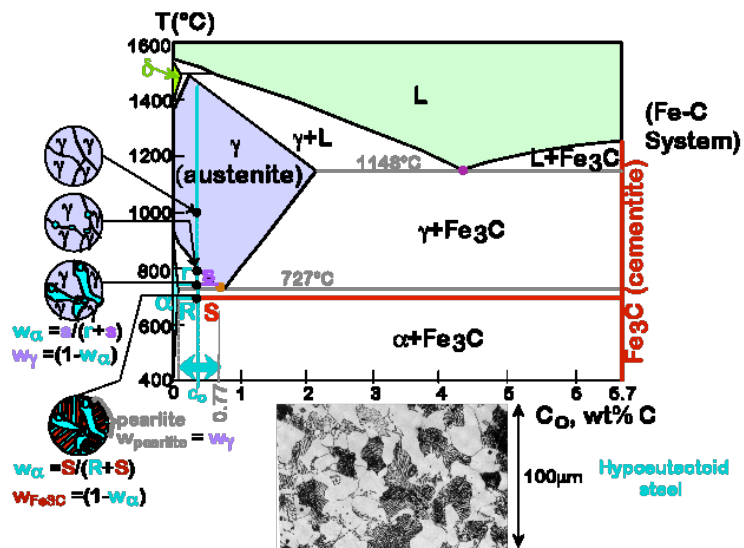
Diagramma Fe-C



Parte in basso a sx del diagramma Fe-C.

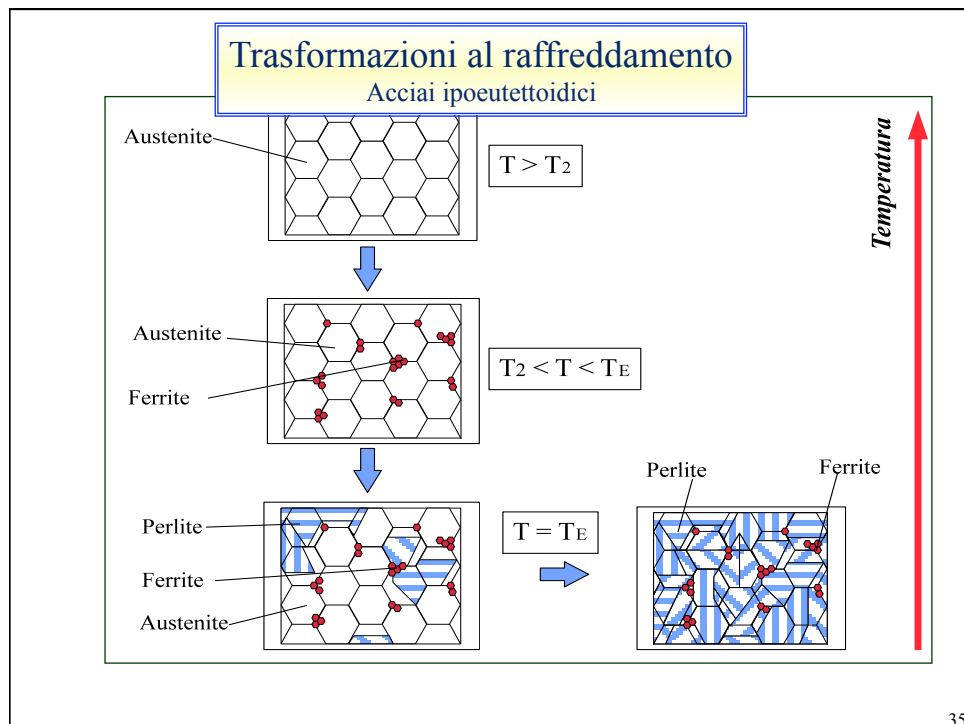
33

Acciaio IPOEUTETTOIDICO

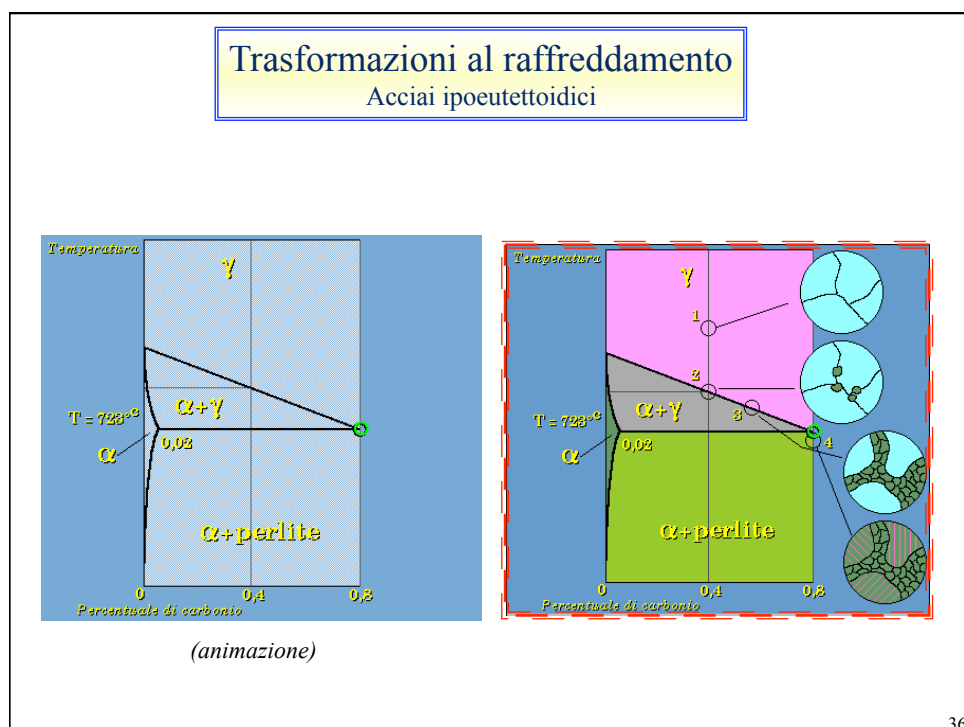


22

34



35



36

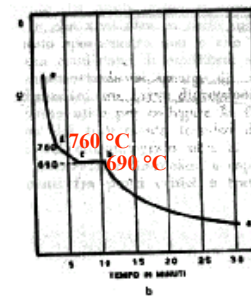
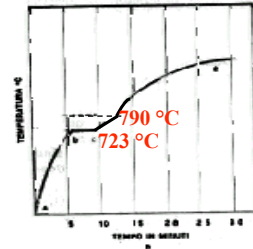
Per ogni tipo di acciaio la concentrazione di C nella perlite è sempre dello 0.8%!!! (composizione dell'austenite saturata a 723 °C)

La trasformazione della ferrite però non avviene a T cost.

Ciò è in relazione al fatto che la trasformazione avviene con una continua variazione della composizione della soluzione solida austenitica

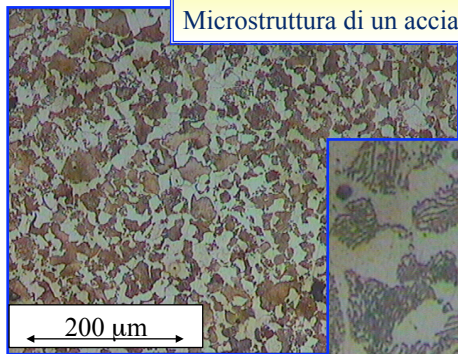
Regola delle fasi

$$V = n + 1 - f$$



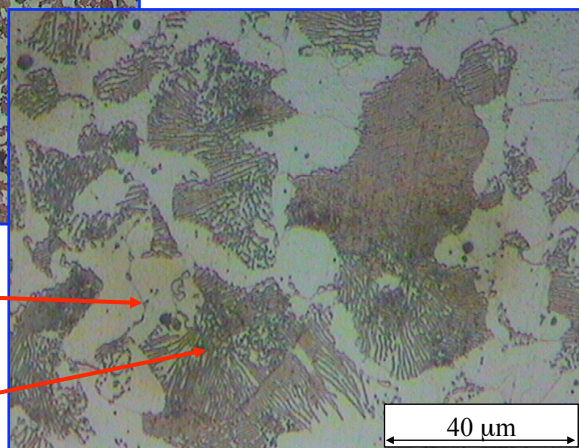
37

Trasformazioni al raffreddamento Microstruttura di un acciaio ipoeutetoidico (C45)



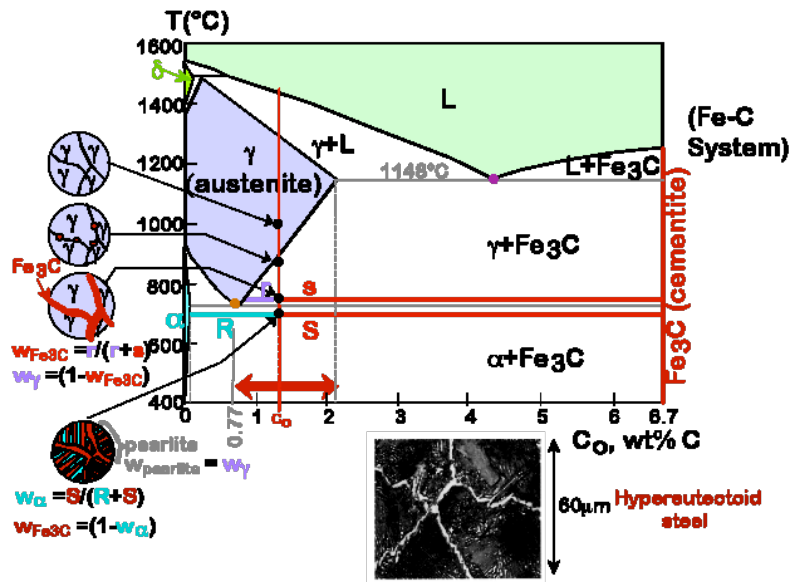
Ferrite

Pearlite



38

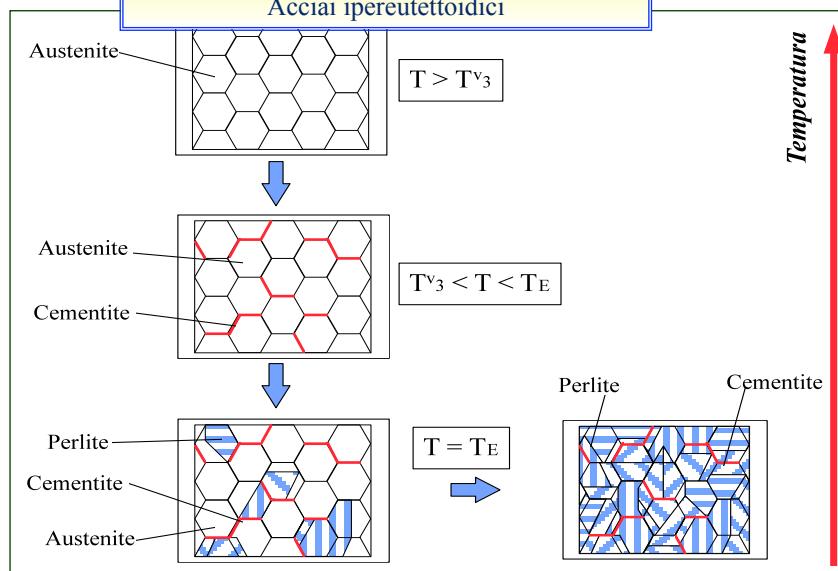
Acciaio IPEREUTETTOIDICO



23

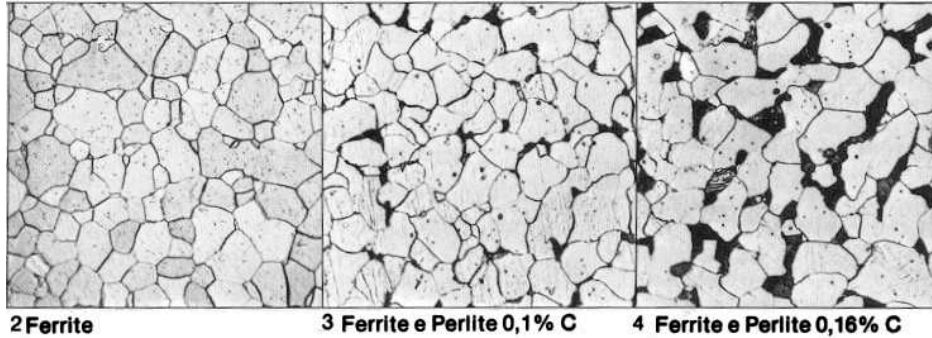
39

Trasformazioni al raffreddamento Acciai ipereutetoidici



40

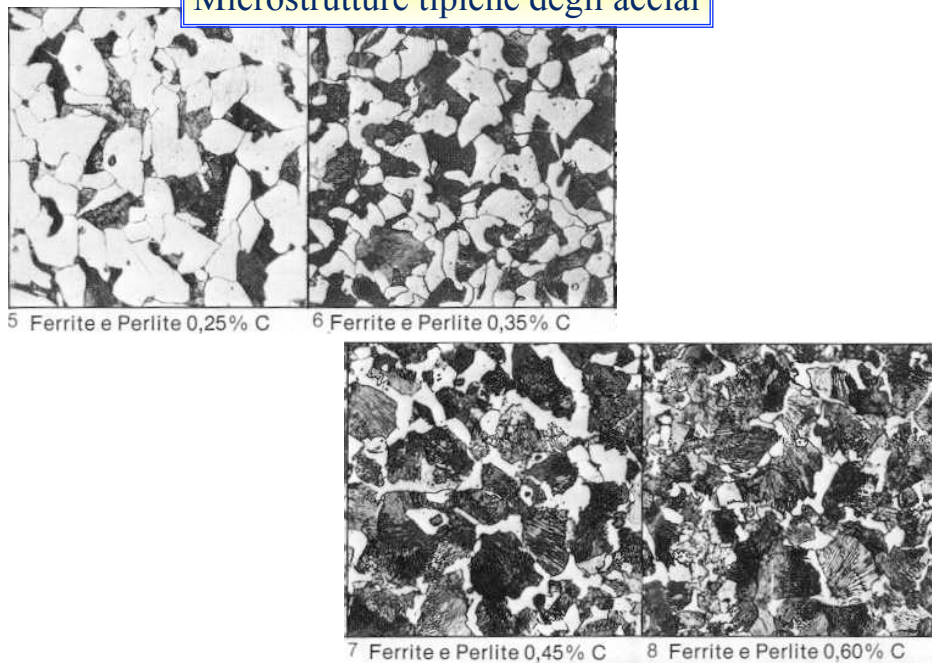
Microstrutture tipiche degli acciai



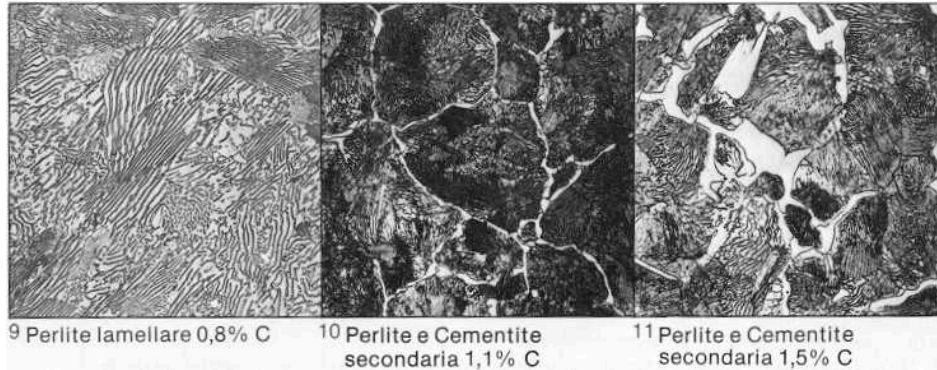
Questi rapporti di quantità tra i vari costituenti possono essere calcolati per ogni T con la **'regola della leva'**

41

Microstrutture tipiche degli acciai

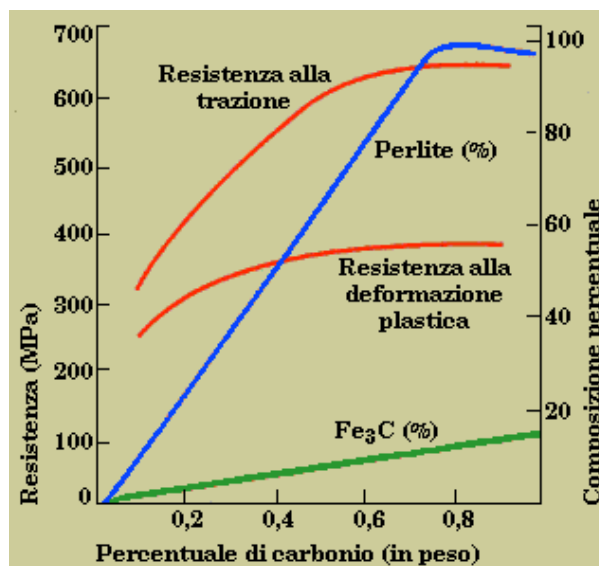


Microstrutture tipiche degli acciai



43

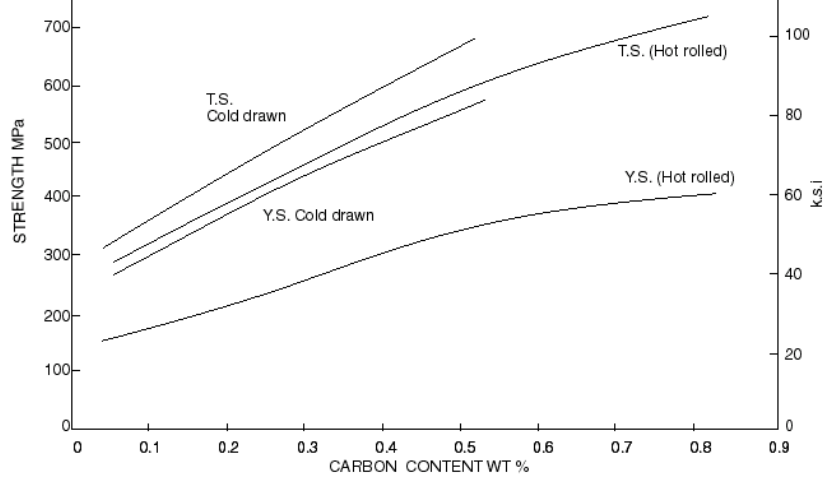
Correlazioni microstruttura-proprietà



44

Correlazioni composizione-proprietà

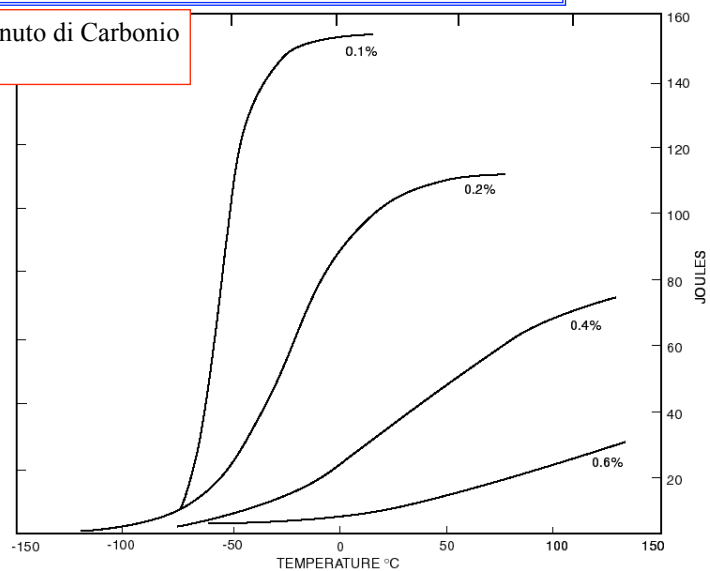
Effetto del contenuto di Carbonio sulle caratteristiche meccaniche
(acciai al C, barre di diametro 25 mm)



45

Correlazioni composizione-proprietà

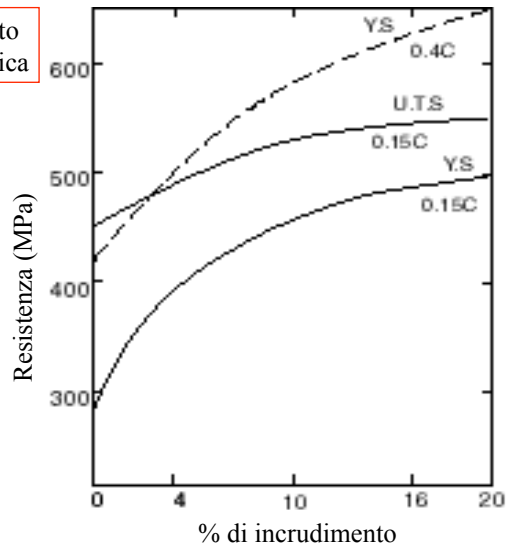
Effetto del contenuto di Carbonio sulla resilienza



46

Correlazioni composizione-processo-proprietà

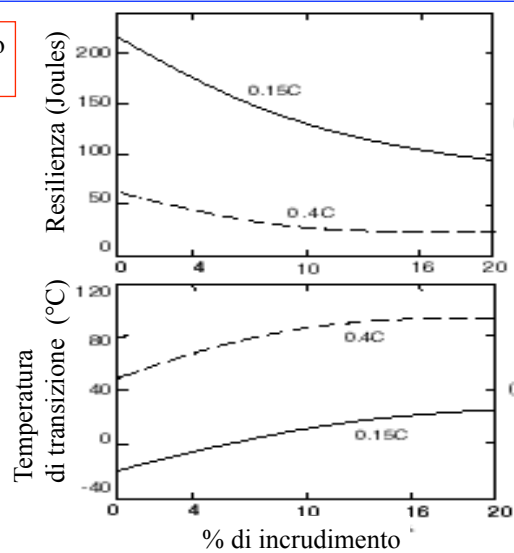
Effetto dell'incrudimento sulla resistenza meccanica



47

Correlazioni composizione-processo-proprietà

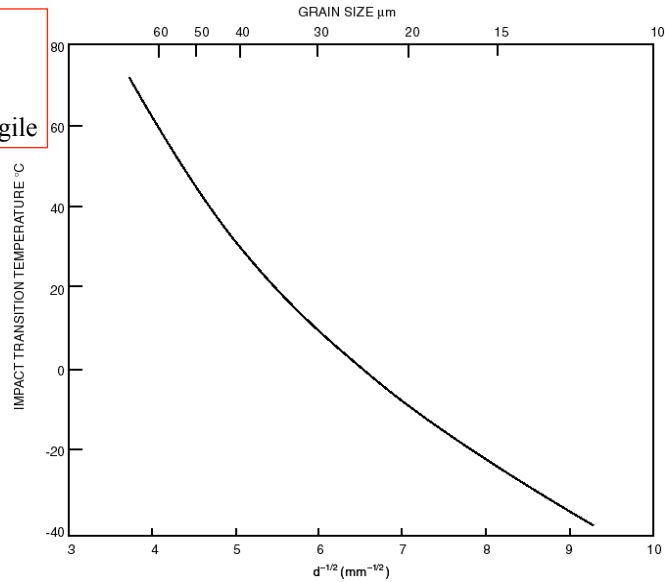
Effetto dell'incrudimento sulla resilienza



48

Correlazioni microstruttura-processo-proprietà

Correlazione
tra dimensioni del grano
e temperatura
di transizione duttile-fragile



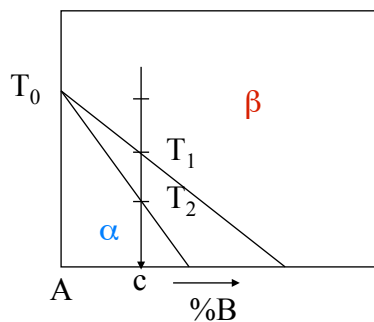
49

Effetto degli elementi in lega

L'aggiunta di un elemento in lega ad un metallo avente diverse modificazioni allotropiche causa:

1. *Variazione della temperatura di trasformazione*
2. *La trasformazione avviene in un intervallo di T dipendente dal tenore dell'elemento aggiunto*
3. *La velocità di trasformazione è minore*

Esempio:

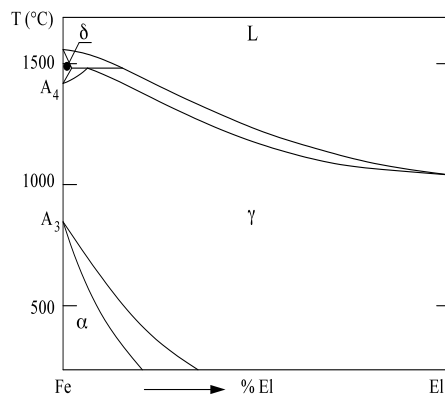


1. In una lega si parla di INTERVALLO di transizione
2. T_1 e $T_2 < T_0$
3. La trasformazione comporta una diffusione allo stato solido

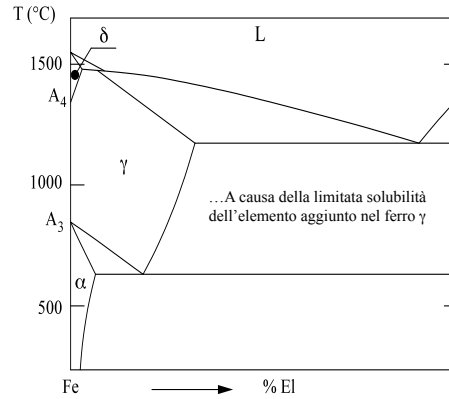
50

Effetto degli elementi in lega

Elementi gammageni



Allargamento illimitato del campo γ
Ni, Mn, Co, Ru, Rh, Pd, Ir, Pt

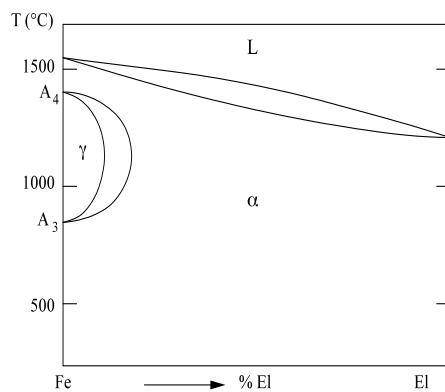


Allargamento limitato del campo γ
C, N, Cu, Zn, Au

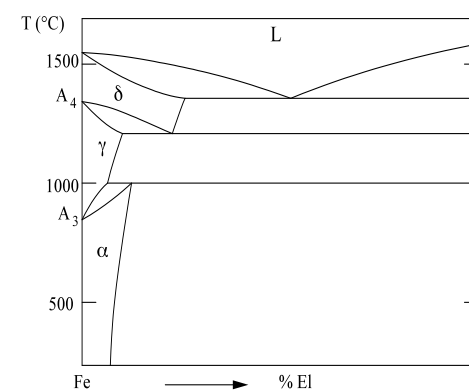
51

Effetto degli elementi in lega

Elementi alfageni



Campo γ chiuso,
 campo α unito a campo δ
Be, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Mo, Sn, Sb, W



Campo γ chiuso,
 campo α separato da campo δ
B, S, Zr, Nb, Ce, O, Ta

52

Effetto degli elementi in lega

Azione contemporanea di due elementi di lega:

In generale, nel caso in cui tali elementi non interagiscono, la loro influenza può **compensarsi** almeno per tenori appropriati

Alcune conseguenze di ordine tecnico:

Effetti favorevoli della trsaformazione allotropica:

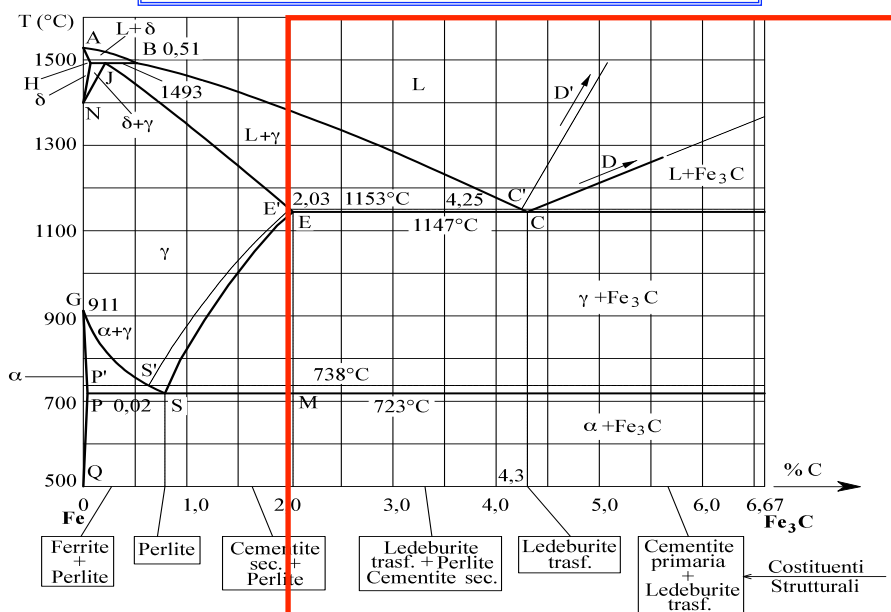
1. Diminuzione della dimensione del grano
2. Soppressione delle anisotropie cristalline (tessitura di solidificazione o di laminazione)
3. Ridistribuzione delle impurezze

Effetti sfavorevoli della trsaformazione allotropica:

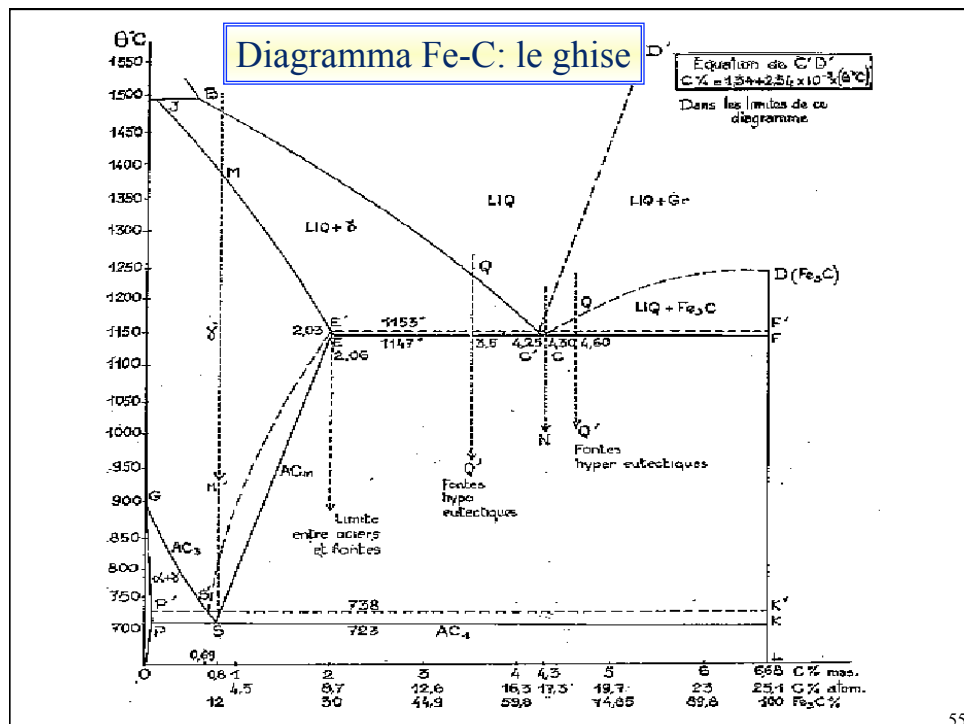
1. Brusca variazione di volume

53

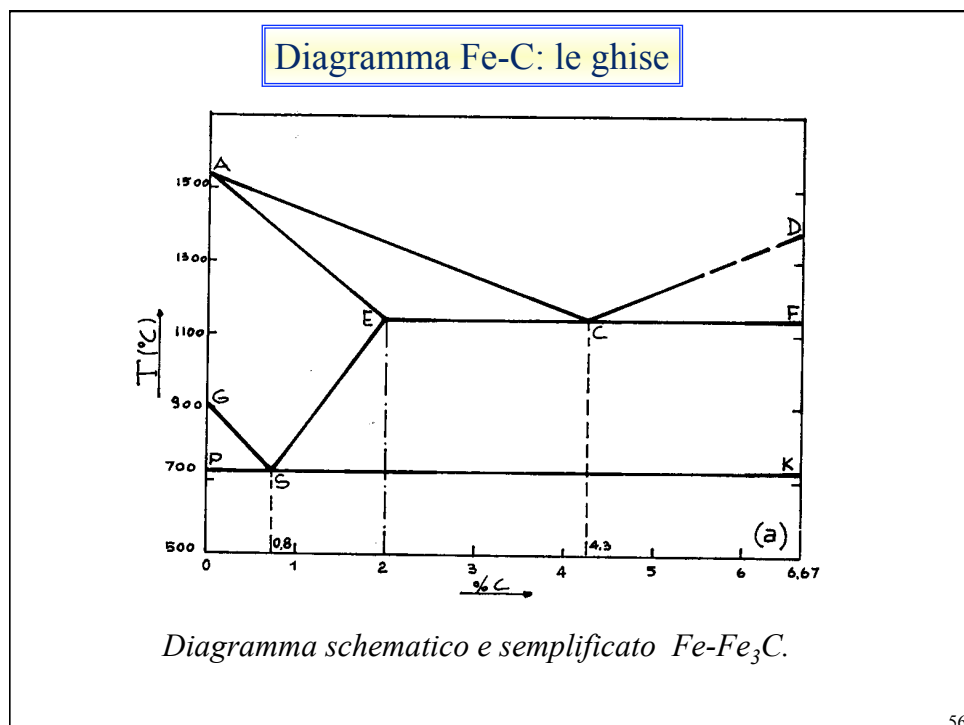
Diagramma Fe-C: la regione delle ghise



54



55



56

Diagramma Fe-C: le ghise

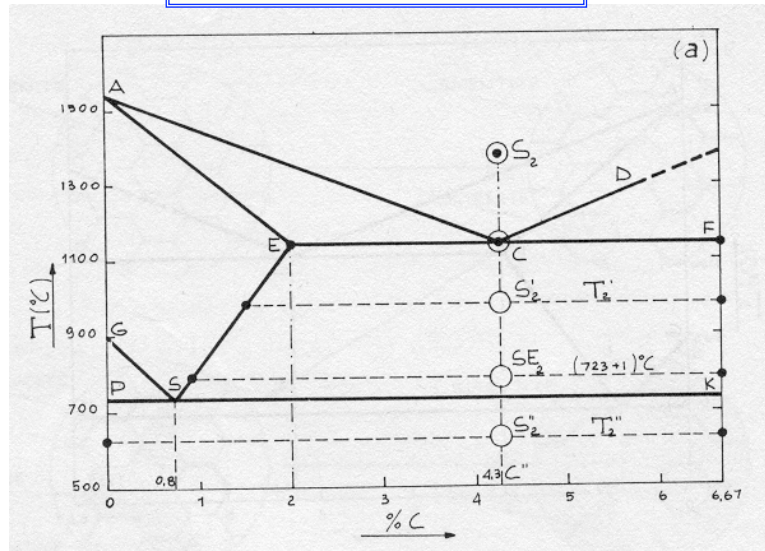


Diagramma schematico e semplificato Fe-Fe₃C:
raffreddamento di un liquido di composizione eutettica.

57

Diagramma Fe-C: le ghise

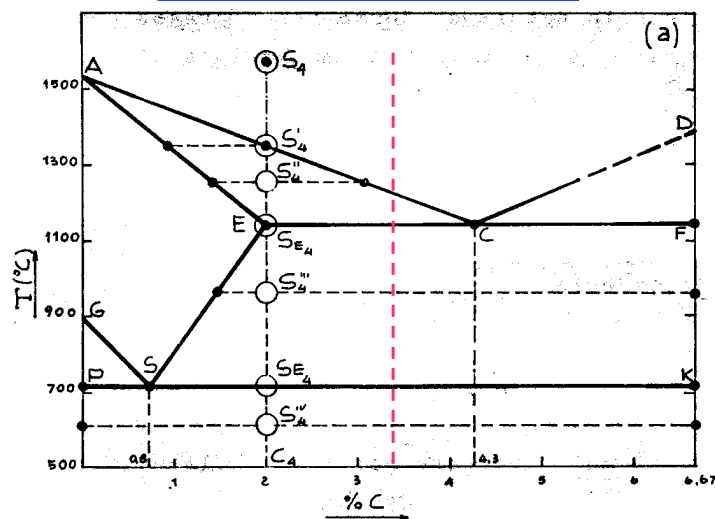


Diagramma semplificato e completo Fe-Fe₃C:
raffreddamento di un liquido di composizione ipoeutettica.

58

Diagramma Fe-C: le ghise

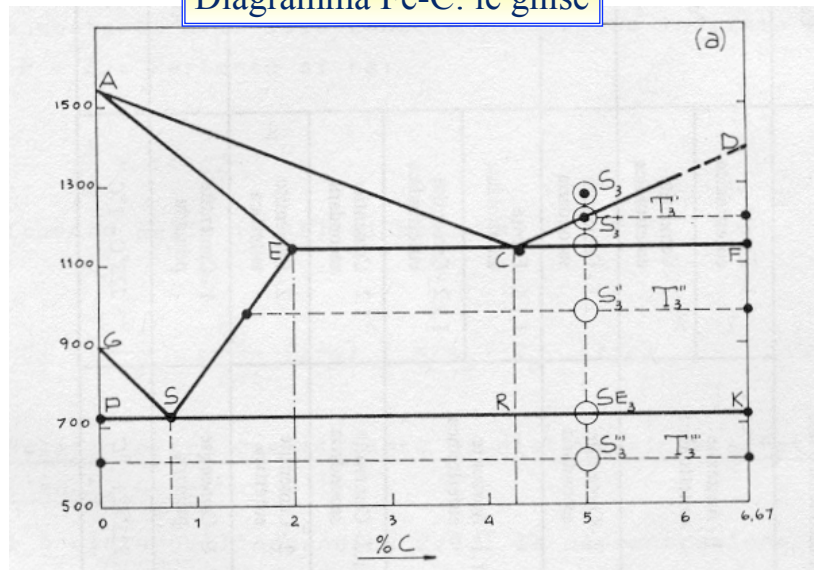
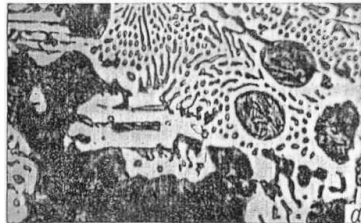


Diagramma semplificato e completo Fe-Fe₃C:
raffreddamento di un liquido di composizione iper-eutettica.

59

Diagramma Fe-C: le ghise



Composizione *ipoeutettica* (con %C tra 2 e 4,3 %): dopo il raffreddamento riscontriamo perlite (zone scure), ledeburite e cementite secondaria (non visibile).

(500x)



Composizione *eutettica*, ledeburite. Le zone scure sono perlite e quelle chiare cementite.



Composizione *ipereutettica*. Lamelle chiare di cementite e ledeburite (formata da zone scure e chiare corrispondenti a perlite e cementite rispettivamente).

60

Diagramma Fe-C: le ghise

