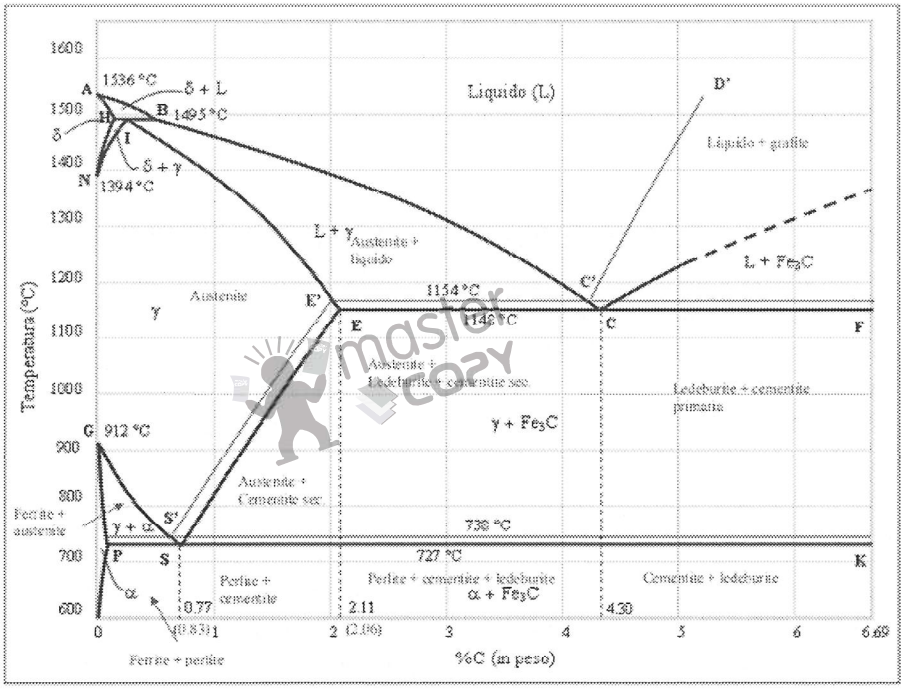
DIAGRAMMI DI STATO FERRO-CARBONIO



Ferro carbonio (nero) Ferro grafite (blu)

La cementite è un composto intermetallico assai duro e fragile tra ferro e carbonio (Fe_3C) ma termodinamicamente sotto 870°C il ΔG è negativo e dovrebbe decomporsi in ferro più grafite; in realtà è una reazione molto lenta per cui gli acciai avranno il C sempre sottoforma di cementite. Questo non accade per le ghise perché (C maggiore del 2,1%) ci si aggiunge il silicio che ha come effetto quello di accelerare molto la decomposizione della cementite quindi il C sarà sottoforma sia di cementite che di grafite. Generalmente gli acciai hanno un tenore di carbonio fino al 2,1% ma nella realtà non ci sono acciai che hanno più del 1,5%; le ghise invece vanno dal 2% di C al 6% ma praticamente si fermano al 3,5%.

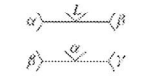
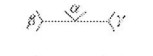
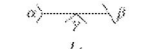
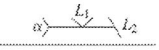
Sull'asse delle ordinate vediamo le trasformazioni allotropiche del ferro. Da temperatura ambiente fino a 912°C il ferro è presente con una struttura CCC, dopodiché subisce una trasformazione allotropica in ferro γ (Austenite) CFC e successivamente vicino a 1400°C ferro γ si trasforma in ferro δ che torna ad esse CCC fino a fusione. Le soluzioni solide (fasi) da ricordare sono:

1) **FERRITE**: soluzione solida interstiziale di C in ferro α (CCC)
2) **AUSTENITE**: soluzione solida interstiziale di C in ferro γ (CFC)

Le trasformazioni più importanti sono:

1) **TRASFORMAZIONE EUTETTICA** che è quella in corrispondenza delle ghise
2) **TRASFORMAZIONE EUTETTOIDICA** (tutta allo stato solido) che è in corrispondenza dello 0,77% di C
3) **TRASFORMAZIONE PERITETTICA** in alto (da saper disegnare e scrivere)

Tabella 7.1 Fasi e tipi di reazioni invarianti che avvengono nei diagrammi di fase binari

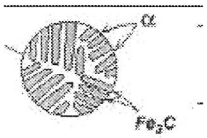
Nome della reazione	Equazione	Diagramma di stato caratteristico
Eutettico	$L \xrightarrow{\text{raffreddamento}} \alpha + \beta$	
Eutettoide	$\alpha \xrightarrow{\text{raffreddamento}} \beta + \gamma$	
Peritettico	$\alpha + L \xrightarrow{\text{raffreddamento}} \beta$	
Peritettoide	$\alpha + \beta \xrightarrow{\text{raffreddamento}} \gamma$	
Monotettico	$L_1 \xrightarrow{\text{raffreddamento}} \alpha + L_2$	

- La trasformazione più importante in assoluto è quella EUTETTODICA che nel caso del diagramma Fe-C si può scrivere come γ (0,77% C) → α (0,022% C) + Fe_3C (6,7% C). Il ferro γ si trasforma in ferrite α più cementite.
- La trasformazione EUTETTICA nel caso del diagramma Fe-C si puo scrivere come L (4,3% C) → austenite γ (2,11% C) + Fe_3C (6,7% C).

Entrambe le trasformazioni hanno una fase che si trasforma contemporaneamente in due fasi di composizione chimica diversa; questo è possibile mediante il meccanismo della CRESCITA ACCOPPIATA:

- ❖ Esempio di un Eutettoide:
  se ho un bordo di grano austenitico e ho l'austenite che si sta trasformando (per raffreddamento), l'unico modo per poter formare due fasi diverse è che si inneschino, all'interno della soluzione solida dell'austenite, dei meccanismi diffusivi all'interfaccia di trasformazione dove il fronte ad una bacchetta di ferrite (0,022% C) il carbonio diffonde sui due lati contrapposti e quindi l'austenite perde il C, arriva alla composizione giusta di ferrite e permette alla bacchetta di avanzare.
  Le due zone adiacenti si sono arricchite di C fino ad arrivare al 6,7% di C in modo tale da continuare la crescita e spostarsi in avanti.
- ❖ Esempio di un Eutettico:
  lo stesso accade per un eutettico soltanto che a trasformarsi è un liquido

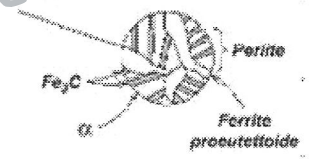
In realtà la Perlite o un Eutettico non sono delle fasi. La **Perlite** è composta da due fasi che sono la ferrite e la cementite e di fatto non è riportata nel diagramma di stato in cui sono riportate solo le fasi. La Perlite ha una morfologia particolare composta da bacchette alternate di ferrite e cementite. Quindi non essendo una fase si chiama MICROCOSTITUENTE STRUTTURALE o COSTITUENTE MICROSTRUTTURALE.



Sempre tra le combinazioni di ferrite e cementite abbiamo la **Bainite**; mentre la **Martensite** è una vera e propria fase, ha una sua struttura cristallografica ed è una fase singola.

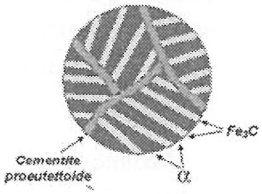
MICROSTRUTTURA ACCIAIO IPOEUTETOIDICO

Prendiamo una composizione minore di quella eutettoidica e scendiamo giù in raffreddamento. (Linea dritta A1, Curva di passaggio da γ ad α è A3, Da γ a composizioni maggiori è ACM).
Scendendo in campo γ e toccando A3 nuclea il primo germe di grano α che ha composizione in base alla regola della leva. Scendendo ancora, nel campo bifasico incontro la curva A3 da un lato e la curva di solvus della ferrite dall'altro ottenendo una composizione di α e γ. Continuando il raffreddamento il γ si sta arricchendo di C e quando arriva a toccare A1 ho formato della ferrite che si chiamerà FERRITE PROEUTETTOIDICA e dell'austenite residua che non ancora si trasforma che ha che la composizione eutettoidica. A questo punto il resto della trasformazione è quello dell'austenite in perlite cioè una trasformazione eutettoidica. Questa è la struttura di un Acciaio da Costruzione composta da una certa quantità di ferrite proeutettoidica e tutto il resto è perlite.
Un acciaio di questo tipo è più resistente di un acciaio puro perché aggiungendo carbonio mi si forma una struttura ferritico-perlitica (più C ho più perlite mi si forma).
La resistenza meccanica è così grande perché le dislocazioni in mezzo alle lamelle si muovono male e per questo le caratteristiche meccaniche incrementano e il carico di snervamento si alza. Più aumento il tenore di C più l'acciaio diventa resistente. Da qui si vede come la resistenza è legata alle colonne perlitiche che possono essere sia di PERLITE GROSSOLANA che di PERLITE FINE; più è fine la perlite e più resistente è il materiale.
Con i trattamenti termici posso agire sulla finezza della perlite migliorando le caratteristiche meccaniche del materiale.



MICROSTRUTTURA ACCIAIO IPEREUTETTOIDICO

Si ragiona allo stesso modo ma prendo una composizione maggiore di quella eutettoidica. Non succede nulla fino a quando non tocco ACM in cui lungo i bordi di grano dell'austenite inizia a nucleare a cementite.
In questo caso la microstruttura sarà composta da perlite più CEMENTITE PROEUTETTOIDICA, ovvero formatasi a T superiori a quella dell'eutettoide.

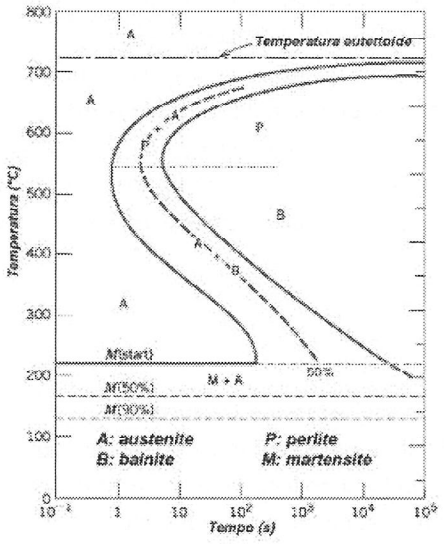


In generale noi sappiamo che i bordi di grano sono delle zone distorte ad energia molto alta e sono siti preferenziali di nucleazione perché la fase nuova nuclea dove più gli conviene energeticamente. Le energie di cui bisogna tener conto quando una nuova fase si inizia a formare sono dette ENERGIE DI NUCLEAZIONE:

- ENERGIA ELASTICA cioè distorsione che un germe va a portare ad un cristallo
- ENERGIA SUPERFICIALE per creare una nuova interfaccia tra la fase nuova e quella vecchia

Molto importante è anche l'ENERGIA DI DISTORSIONE RETICOLARE: sui bordi di grano ad alto angolo, quindi molto distorti, è più facile che il reticolo abbia delle maglie allargate perciò un nucleo impiega meno energia per formarsi.

CURVE TTT (Curve di Bain)



Sono state ottenute in questo modo: lui prese tanti piccoli provini, li portò in capo γ (ad austenite stabite), li raffreddò velocemente a T inferiore a 728°C (T eutettoidica) e li mantenne a quella temperatura; dopo un tot di secondi ne tirava fuori uno alla volta e li immergeva in acqua per congelarne la struttura. Da qui ottenne le curve di Bain.
In funzione della temperatura trovò che dopo 10s l'austente cominciava a trasformarsi in perlite e dopo 100s tutto il materiale si era trasformato. Facendo questo a varie temperature tracciò la curva di Perlite Start e Perlite Finish per quel acciaio.
Se trasformo ad alte T ottengo **Perlite Grossolana** mentre se la trasformazione avviene a 600°C ottengo perlite più fine e a 550°C avrò **Perlite Finissima**. Quest'ultima ha molte più interfacce tra ferrite e cementite quindi il blocco di dislocazioni è più efficace e quindi la Perlite Fine è più resistente della Perlite Grossolana.

Esiste un trattamento termico chiamato PATENTAMENTO RAPIDO che consiste nel raffreddare fino al NASO della Curca TTT (cioè 550°C) in modo da ottenere una perlite finissima. Questa struttura già molto resistente meccanicamente, si fa su dei fili che vengono deformati plasticamente in modo tale che tramite incrudimento cresca ancora di più il carico di snervamento che arriva a 2000-2500 Mpa. Questi fili vengono poi messi insieme per poter reggere carichi enormi (ascensori ecc..).

Se scendo al di sotto dei 550°C si formano altri costituenti microstrutturali che sono **Bainite (Superiore o Inferiore)** che rappresenta un'altra fase di equilibrio insieme alla perlite. La bainite non ha il tempo necessario per far avvenire la diffusione (indispensabile per la formazione della struttura perlitica) e allora energeticamente la struttura assume un'altra forma: è costituita da bastoncini molto fini con sui bordi delle piccole particelle di cementite. Queste strutture, essendo gli aghi molto piccoli, sono ancora più resistenti della perlite finissima.

Se vado ancora più velocemente a raffreddare dall'austenite in giù mi si forma una nuova fase che non ha proprio il tempo di diffondere per cui non si può formare una struttura di equilibrio. La nuova fase è la **Martensite** con

struttura tetragonale a corpo centrato che è una via di mezzo tra l'austenite di partenza (CFC) e il CCC dove vorrebbe andare il materiale (Non essendoci tempo a sufficienza per la diffusione la trasformazione è detta di tipo "Militare" cioè avviene a scatto. Questa trasformazione è detta Atermica che va a velocità del suono nel materiale e si può concretizzare solo se i piani cristallografici scorrono a scatto uno sull'altro formando un numero enorme di dislocazioni). La struttura tetragonale assomiglia abbastanza ad un materiale INCRUDITO A MORTE cioè un materiale molto resistente ma con un allungamento a percentuale molto piccolo. La martensite ha le caratteristiche meccaniche più alte che un acciaio possa avere ma con allungamento percentuale nullo.
La martensite tal quale (dopo Tempra) non si mette mai in opera perché al suo interno ha forti auto tensioni dovute alla trasformazione quindi deve essere sempre fatto un trattamento di leggero Rinvenimento a bassa T. Le principali caratteristiche sono:

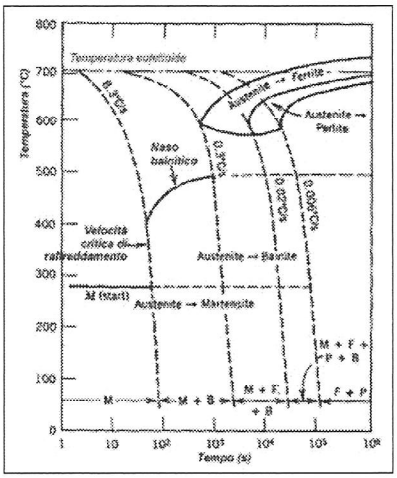
- Massimo carico a rottura
- Massimo carico di snervamento
- A% circa 0
- Durezza Vickers circa 700 che corrisponde a 60 Rockwell

Questo ci fa capire che oltre alla composizione chimica di un materiale è di estrema importanza anche la sua microstruttura, quindi anche il trattamento termico che gli ho imposto per avere quella determinata struttura che gli conferisce quelle proprietà.

Fattori che modificano le Curve TTT

L'aggiunta di elementi di lega sposta verso destra le curve di Bain rendendo più facile la tempra di un materiale perché la velocità critica di tempra diminuisce. Aggiungendo gli elementi di lega deformo il reticolo cristallino, aumentano le caratteristiche meccaniche, l'energia di attivazione aumenta e perché un atomo possa saltare da una posizione ad un'altra deve scostare quelli che ha davanti utilizzano questa energia; quindi in un reticolo distorto l'energia di attivazione cresce, il coefficiente di diffusione Do diminuisce, la diffusione diminuisce (per la prima legge di Fick) quindi rallentano tutti i meccanismi di trasformazione che utilizzano la diffusione (le trasformazioni perlitiche e bainitiche rallentano perché le curve si spostano verso destra). Aumenta anche la temprabilità dell'acciaio.

CURVE CCT

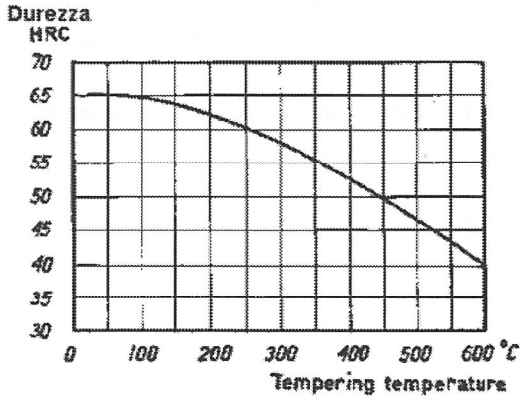


Sono curve ANISOTERME che mi aiutano a capire le varie trasformazioni durante un raffreddamento continuo del materiale. Le Curve CCT si possono ottenere direttamente dalle Curve TTT perché sono leggermente spostate verso destra e verso il basso. Queste curve si ottengono in modo molto più semplice rispetto a come fece Bain, cioè utilizzando dei dilatometri: quando il γ subisce delle trasformazioni ci sono anche delle variazioni volumetriche associate, con i dilatometri si riesce ad individuare quando si dilata o si comprime una struttura e quindi quando avvengono le trasformazioni.
Utilità: se ho le Curve CCT di un acciaio, noto che ogni curva tratteggiata è ad una diversa velocità di raffreddamento. Quindi se sovrappongo la curva di raffreddamento con la CCT di un acciaio so, in funzione della velocità, cosa otterrò.

TRATTAMENTI TERMICI

I trattamenti termici mi aiutano a cambiare la microstruttura dei materiali. I più importanti sono:

- ✓ **RICOTTURA COMPLETA**: consiste in un riscaldamento in campo γ e poi in un lento raffreddamento in forno in modo tale da ottenere ferrite e perlite, con la perlite formata ad alta T. Questo perché se raffreddo molto lentamente la perlite si forma grossolana, quindi meno interfacce tra le lamelle perlitiche e avrò meno resistenza. Durezza non elevata che permette le lavorazioni.
  Se ho un acciaio con alto contenuto di C posso sovrapporci anche una RICOTTURA DI GLOBULIZZAZIONE cioè posso far si che invece di avere una perlite lamellare ottengo una cementite globulare e questo perché la durezza mi va ancora più in giù e posso lavorare ancora meglio il materiale.
  Un altro modo per fare la ricottura completa senza impiegare il forno per una giornata intera è anche quella di raffreddare velocemente sotto ad A1 fino a 700°C e mantenerlo a quella T per tutto il tempo fino alla fine della trasformazione perlitica (RICOTTURA ISOTERMA).
- ✓ **NORMALIZZAZIONE**: come la ricottura ma si fa avvenire un RAFFREDDAMENTO IN ARIA CALMA, cioè faccio il trattamento termico ad alta T dopodiché tolgo il pezzo dal forno e lo lascio per conto suo. Un pezzo normalizzato deve sempre essere costituito da ferrite + perlite che sarà più fine ma comunque non potrò avere bainite. Potrei ottenere bainite o martensite se le curve fossero spostate verso destra e questo non va bene.
- ✓ **TEMPRA**: quando si parla di tempra si intende sempre TEMPRA A CUORE altrimenti bisogna specificare **TEMPRA SUPERFICIALE**. Nella tempra ottengo una struttura molto resistente che poi dovrò trattare termicamente. Bisogna stare attenti perché aumentando gli elementi di lega le curve di Bain si spostano verso destra, ma si abbassano anche verso il basso le T di Martensite Start e Martensite Finish.
  Se raffreddiamo in acqua la T finale del pezzo sarà quella dell'acqua. Quando si aggiungono elementi di lega la MF può scendere anche al di sotto della T del mezzo temprato che usiamo e ci ritroviamo in mezzo dove non è trasformato tutto in martensite ma rimane una certa percentuale di austenite residua; questo non va bene perché quando faccio la tempra voglio solo martensite per avere il pezzo molto resistente. Quindi se ho le T MS e MF molto abbassate l'unica cosa che posso fare è l'IPERTEMPRA in cui porto il materiale ben al di sotto della T ambiente e questo per minimizzare l'austenite residua che mi abbassa la durezza del materiale.
- ✓ **RINVENIMENTO**: 3 intervalli di T possibili:



- ✓ Da 150°C a 250°C
- ✓ Da 250°C a 450°C
- ✓ Da 550°C a 650°C

master COPY

(Da 150°C a 250°C)

Il rinvenimento va sempre fatto. La martensite ha una struttura tetragonale e man mano che perde C avrà una struttura cubica. Andando dal primo al terzo intervallo, accresce gradualmente la tenacità dell'acciaio, mentre diminuiscono il carico a rottura e il carico di snervamento. Infatti, man mano che aumento la T, il C fuoriesce e