



*centroappunti.it*

**CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2491A**

**ANNO: 2020**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE: Filice Daniele**

**MATERIA: Tecnologia dei materiali da costruzione (metalli) -  
prof. Bassini**

**Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.**

**Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.**

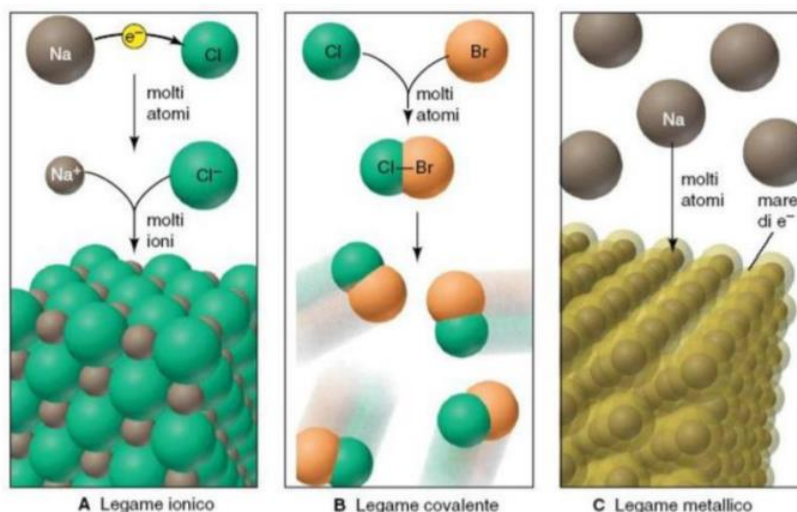
**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Lezione 09/03/2020

## LEGAMI CHIMICI

Esistono tre tipi di legami chimici fondamentali:

- **Ionico:** Ho elementi appartenenti a due specie molto differenti della tavola periodica come Na e Cl
- **Covalente:** non c'è uno scambio di elettroni ma una partecipazione comune di elettroni per completare l'ottetto Cl-Br;
- **Metallico:** il legame metallico puro è quello formato da elementi che si trovano a sinistra della tavola periodica, mentre il legame che troviamo nelle leghe di nichel e cobalto o nell'acciaio sono un mix tra legami covalenti e metallici. A seconda di quante legame covalente abbiamo nelle leghe ci sono comportamenti differenti tra i materiali. In definitiva il legame metallico è quel legame che tiene uniti due atomi che costituiscono un metallo, ed è dovuto all'attrazione tra ioni metallici e gli elettroni mobili, che li circondano. nel legame metallico tutti gli atomi cedono i propri elettroni di Valenza, diventando in questo modo gli atomi positivi, i quali formano una specie di nuvola elettronica delocalizzata capace di creare una forza di attrazione nei confronti degli ioni positivi che compongono il metallo. Il fatto che gli atomi diventano positivi e la ragione fondamentale per cui sia la conducibilità elettrica che termica è così tanto elevata.

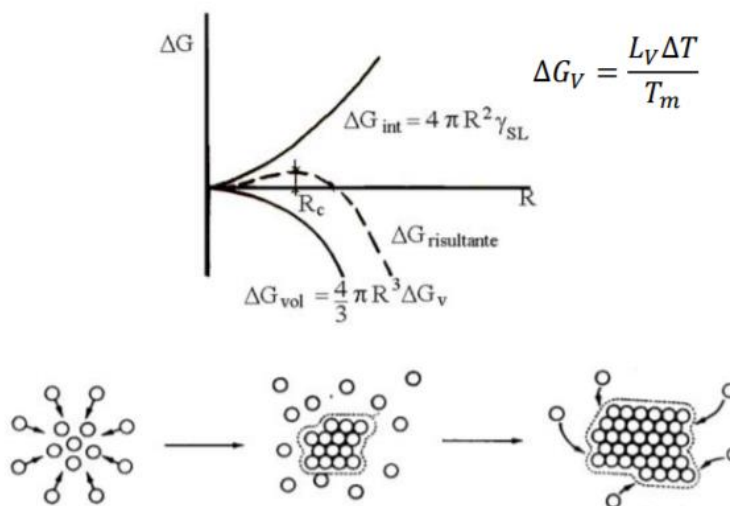


Ricordiamo che gli elettroni di Valenza sono gli elettroni che si trovano sull'ultimo guscio di un atomo e partecipa alla formazione dei legami chimici.

## STRUTTURA CRISTALLINA DEI MATERIALI

Eccezion fatta per alcune specifiche applicazioni, i materiali metallici normalmente presentano una struttura policristallina. Il metallo inizia con un liquido che a poco a poco si cristallizza diventando solido. Durante la solidificazione gli atomi si organizzano in strutture molto ordinate chiamate **grani**. Ogni grano è un'entità a sé stante che cresce in modo indipendente. Quando due cristalli si incontrano si forma un'interfaccia chiamata **bordo di grano**. Se la velocità di solidificazione estremamente rapida circa  $10^6$  °C/min, gli atomi non hanno il tempo di organizzarsi, e non formano strutture ordinate, in questo caso il materiale è detto **amorfo**. ne sono esempi il vetro e vetri metallici. Per creare dei vetri metallici si utilizza il cosiddetto **Melt spinning**, in cui un disco di rame che viene fatto ruotare velocemente, viene colato del metallo fuso. l'effetto combinato della temperatura della forza centrifuga della rotazione

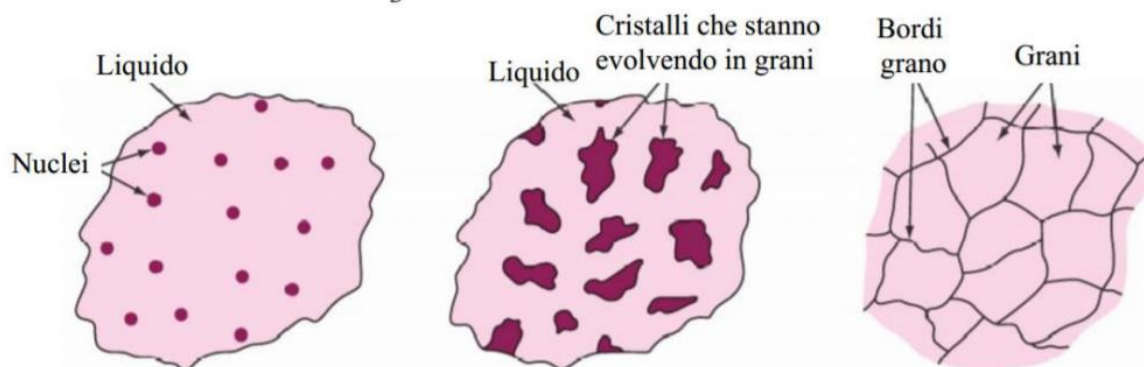
crescere e la solidificazione precede. **Una cosa importante da ricordare è che il raggio critico dell'embrione cambia a seconda del valore del sottoraffreddamento imposto.**



**OGNI R<sub>c</sub> DIPENDE DAL SOTTORAFFREDDAMENTO IMPOSTO**

Nella Pratica non si fa mai raffreddare un metallo appena al di sotto della sua temperatura di solidificazione in quanto prevede tantissimo tempo. pertanto viene definita una temperatura di raffreddamento minore di 30-40 gradi rispetto alla propria solidificazione, così da farvi diminuire R<sub>c</sub>.

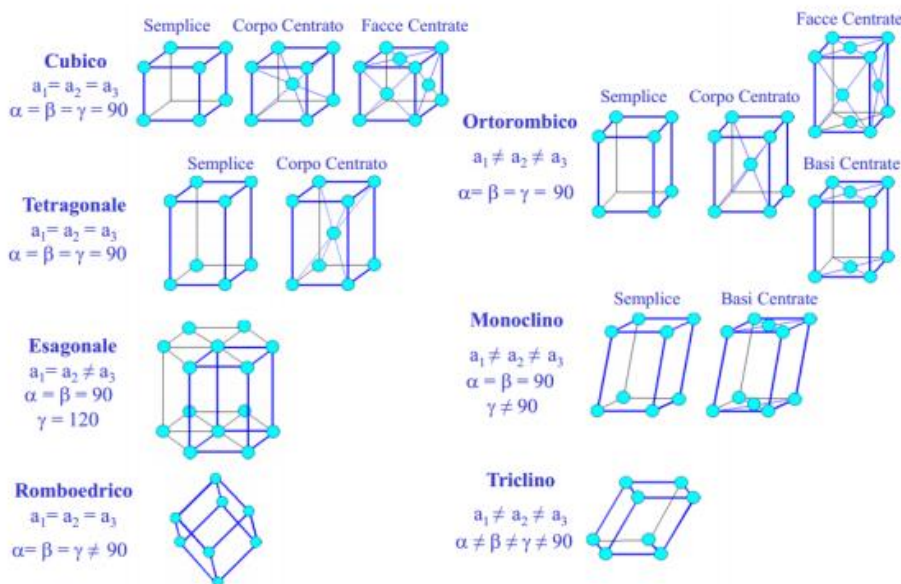
Inizialmente Dunque io ho un liquido con dei nuclei, che crescono come entità indipendenti fin quando i grani si creano delle interfacce, e dunque siamo in materiali policristallini.



Abbiamo visto quando la trasformazione è possibile oppure no tramite la termodinamica e l'energia libera di Gibbs Vediamo adesso il tempo con cui avviene la reazione Dunque con i concetti di cinetica termodinamica. La termodinamica ci dice tutto sulle temperature alle quali una fase è più stabile di un'altra, se una trasformazione è possibile oppure no ecc... ma non dice nulla sul tempo con cui una reazione avviene. Quando solidifico , devo tenere conto della diffusione, ovvero man mano che arriva alla temperatura di fusione, gli atomi possono compiere distanze più ampia perché sono più liberi di muoversi dunque la curva di diffusione aumenta con la temperatura. l'altro parametro da tenere conto è **l'instabilità della fase liquida**.

Tanto più mi allontano dalla temperatura di fusione, tanto più il liquido diventa instabile ed è invogliato a trasformarsi in un solido. Combinando questi due parametri ottengo una sorta di gaussiana che ci dice che **la velocità di nucleazione** , dunque la velocità con cui formo nucleo

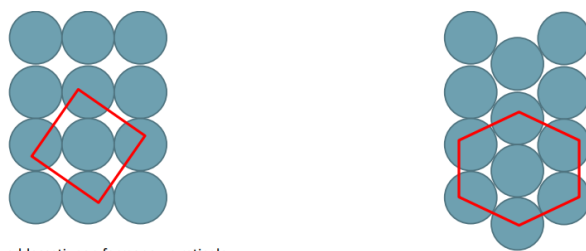
regole geometriche in cui gli atomi si devono disporre solo sui nodi del reticolo cristallino. Bravais Studio come gli atomi si possono disporre nello spazio e determinò che gli atomi possono disporsi solo in 14 modi diversi per costruire dei reticoli nello spazio, questi sono detti **reticoli di Bravais**.



All'interno di un grande dunque gli atomi si distribuiscono in modo definito. Solo quelli cubici sono di interesse per il nostro caso. questi ultimi possono essere:

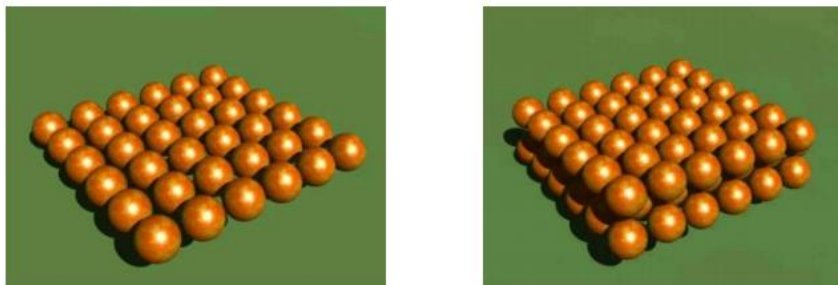
1. SEMPLICE (esagonale compatto)
2. CORPO CENTRATO
3. FACCE CENTRATE

Gli atomi all'interno del reticolo tendono ad impaccarsi, ossia disposti in modo che gli uni siano tangenti agli altri riducendo al minimo gli spazi vuoti circostanti. Si definisce CLOSED PACKED Se un atomo formano un piano atomico ad alto impaccamento, significa che minimizzano i vuoti all'interno del reticolo. Nell'immagine sottostante abbiamo due esempi: a sinistra troviamo il reticolo in cui gli atomi sono addossati e non formano un altro impaccamento, In questo caso gli atomi sono appoggiati sulle creste inferiori; a destra invece abbiamo un piano atomico ad alto impaccamento e dunque closed packed, e gli atomi superiori si collocano nelle gole degli atomi inferiori.

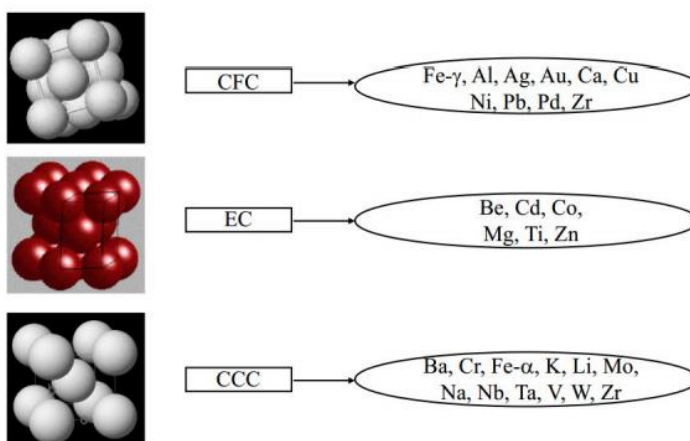


In base quindi a come il materiale si cristallizza, cambia tantissimo le sue caratteristiche. Nel caso a sinistra se prendiamo un singolo atomo vediamo che ha quattro atomi adiacenti, mentre nel caso a destra un atomo ha sei atomi adiacenti, questo significa che il caso a destra

Gli atomi come detto possono impiccarsi anche in maniera non closed packed e dunque si dispongono in maniera meno performante nello spazio. quando i piani atomici si impilano sulla cresta del piano precedente e non nella valle allora abbiamo il reticolo definito **cubico a corpo centrato (CCC)**. In questo caso avremo dei reticoli piccoli con densità inferiore.



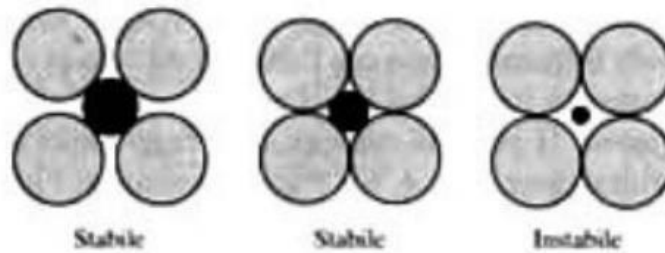
Nei diversi materiali metallici dunque possiamo trovare diversi reticoli. Di seguito vengono riportati un elenco di materiali metallici corrispondenti al proprio reticolo :



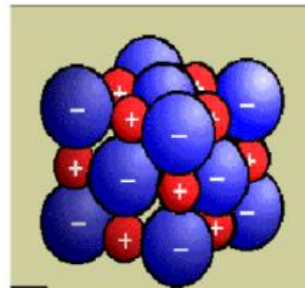
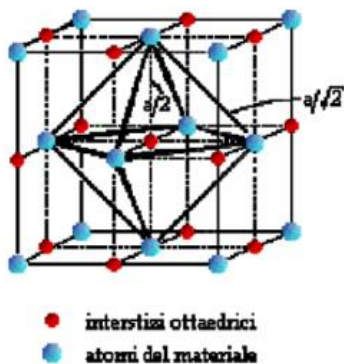
I materiali con il reticolo cubico a facce centrate sono estremamente deformabili proprio per la loro struttura atomica , mentre la struttura cubica a corpo centrato risulta più difficile da deformare, mentre l'esagono alle compatto ha un comportamento borderline fra i due. Il modo in cui gli atomi si distribuiscono dunque ci permettono di caratterizzare i parametri meccanici dei materiali. Un'altra importante caratteristica è l'altezza tra il primo e l'ultimo piano atomico. Questa viene definita **altezza della cella**, Ed a seconda della dimensione atomica e dalla quantità di legame covalente , l'altezza può essere più vicina o più lontana dal valore teorico. Se le facce sono più basse e dunque il materiale a un'altezza minore rispetto al l'attesa geometria , il materiale diventa molto difficile da deformare , mentre se l'altezza Interplanare cresce allora il materiale risulta più deformabile (è il caso del magnesio ).

Vediamo adesso di determinare il **fattore di compattazione atomica (FCA)** per ogni reticolo descritto. Questo parametro è calcolato come rapporto tra il volume occupato da atomi nella cella diviso il volume della cella stessa. Dato che parliamo di cubi in tutti i reticoli appena descritti possiamo dire che in ogni cubo abbiamo 8 spigoli e dunque ci saranno 8 atomi. ognuno di questi atomi condivide con la cella solo 1/8 del suo volume. Per il volume della cella essendo un cubo sarà pari al suo lato elevato al cubo  $a_0^3$ .

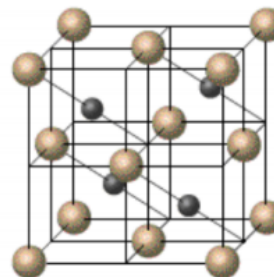
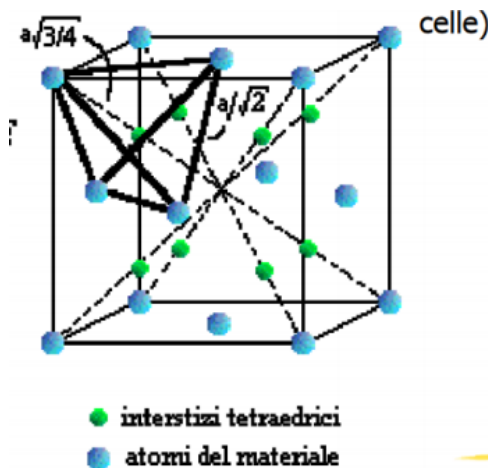
Quando invece gli atomi interstiziali sono tangenti a quelli del reticolo le strutture si dicono **stabili**.



Collegando gli atomi del reticolo al lato mi interstiziale si possono formare altri vuoti di forma ottaedrica e dunque vengono chiamati **interstizi ottaedrici**. Nel cubico a facce centrate abbiamo 13 siti Non tutti appartenenti ad una singola cella , solo il vuoto ottaedrico il centro appartiene ad una singola cella; mentre nel cubo a corpo centrato abbiamo solo un sito su ogni faccia del cubo, end un'altro per ogni spigolo: in questo caso nessuno appartiene ad una singola cella.



Inoltre si possono avere anche gli interstizi di forma tetraedrica: in questo caso nel cubico a facce centrate avremo 8 lacune tetraedriche, tutti appartenenti ad una singola cella; nel cubico corpo centrato addirittura 24 , 4 per ogni faccia del cubo.



Di seguito sono riportati gli interstizi nella cella CFC:

Nel grafico soprastante individuiamo la curva di **Condon Morse**. Questa curva è un'energia potenziale, facendone la derivata otteniamo una forza, quindi possiamo trattare gli atomi anche sotto forma di forze. L'area sottesa da una forza e da uno spostamento ci fornisce l'energia. Se riesco ad esercitare quell'energia l'atomo allora otteniamo l'energia di legame e rompiamo nel vero senso della parola il materiale in due punti. se applico dunque questa forza riesco a separare gli atomi e di conseguenza non posso più legarli insieme appunto la rottura avviene quando rompo tutti i legami atomici all'interfaccia. Per fare questo devo dare al sistema un'energia capace di formare due nuove superfici dai tronconi creati. Il lavoro da compiere è il seguente:

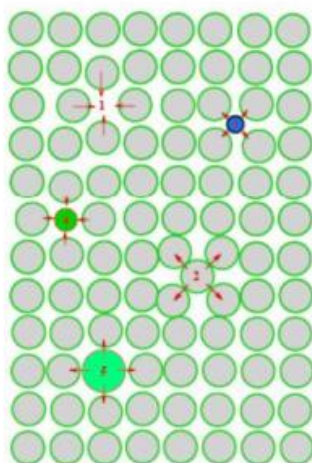
$$W = \text{energia per due nuove superfici} = 2 \gamma s$$

Partendo da questo presupposto posso ricavare la **resistenza teorica** del materiale, escludendo i difetti, ed ottengo una resistenza massima teorica del 20-30% del modulo elastico. Un risultato che però si discosta dalla realtà. Bisogna pertanto iniziare a parlare dei difetti e capire quindi le varie tipologie che possiamo affrontare. Possiamo riconoscere quattro tipi di difetti:

1. **Difetti puntuali:** Sono gli interstizi, vacanze, atomi sostituzionali (sono comparabili alla dimensione di un atomo);
2. **Difetti Lineari:** Dislocazioni, si distribuiscono su un filare atomico;
3. **Difetti superficiali:** Superficie del metallo, difetti di impilamento;
4. **Difetti tridimensionali:** micro e macro vuoti, inclusioni non metalliche.

I metalli oppure le leghe presentano tutte una serie di difetti del reticolo cristallino che dunque diminuiscono fortemente la resistenza meccanica. analizziamo singolarmente ogni tipologia.

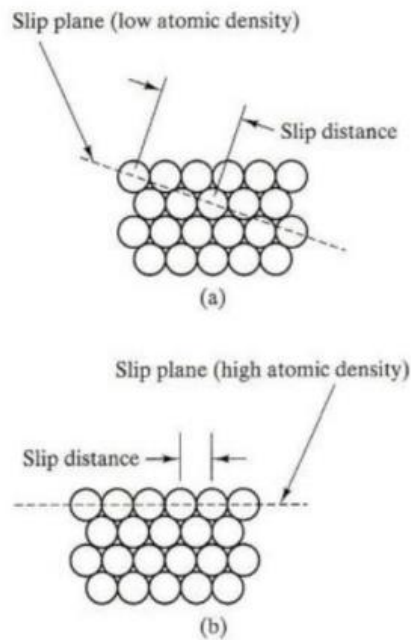
### Difetti puntuali



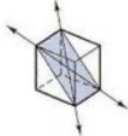
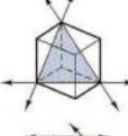

- 1) Vacanza
- 2) Auto interstiziale
- 3) Impurezza interstiziale
- (4,5) Impurezza sostituzionale

Quando un atomo non è presente nel suo reticolo questo tipo di difetto prende il nome di **vacanza** ed il reticolo si deforma per compensare la mancanza dell'atomo. Quando invece un atomo dello stesso reticolo si inserisce nell'interstizio, porta ad avere una forte tensione di compressione nell'intorno del difetto. Possiamo avere poi delle **impurezze interstiziali**, in una posizione interstiziale, oppure un **impurezza sostituzionale** si occupa una vacanza. Se l'atomo è più piccolo abbiamo delle trazioni, se è più grande abbiamo delle compressioni. Il difetto di atomo auto interstiziale è estremamente raro ma comunque è il caso in cui un atomo

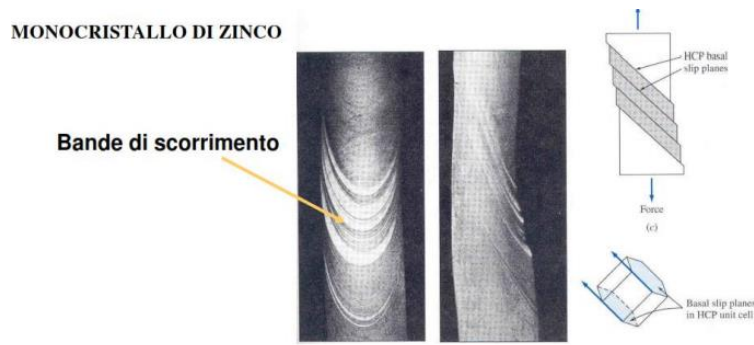




Per ciò che è stato detto prima il secondo sistema è più facile da muovere. Bisogna ricordare che l'atomo si muove tra due posizioni equivalenti, dunque la distanza di slittamento è quella tra due posizioni equivalenti. In base a questo concetto posso identificare i sistemi tramite questa caratteristica.



Crystal structure	Slip plane	Slip direction	Number of slip systems	Unit-cell geometry	Examples
bcc	{110}	$\bar{1}11$	$6 \times 2 = 12$		$\alpha$ -Fe, Mo, W
fcc	{111}	$1\bar{1}0$	$4 \times 3 = 12$		Al, Cu, $\gamma$ -Fe, Ni
hcp	(0001)	$11\bar{2}0$	$1 \times 3 = 3$		Cd, Mg, $\alpha$ -Ti, Zn

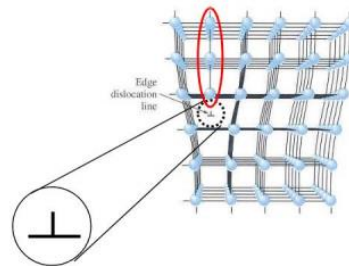
Il primo è il CCC, il secondo è CFC e il terzo è EC. Come si vede dalla tabella il cubica a facce centrate slitta più facilmente rispetto al corpo centrato, perché tutti i piani sono alto impaccamento mentre nel caso di corpo centrato nessun piano e ad alto impaccamento. Il confronto tra CCC e CFC evidenzia che pur avendo lo stesso numero di sistemi di scorrimento, a parità di costante reticolare, la distanza più breve tra due posizioni consecutive è minore nei CFC (tutti Sistemi closed packed). Poiché le forze per deformare i metalli sono legate all' entità degli spostamenti per muovere un atomo da una posizione a una equivalente contigua, occorre in tale reticolo uno sforzo minore. Questo comporta una maggior deformabilità del CFC rispetto al CCC. In più si aggiunge che nei CCC i sistemi di scorrimento attivi a  $T_{amb}$  è inferiore a quelli dei CFC, Dove invece valgono tutti a temperatura ambiente. questo è il motivo principale per cui i CCC soffrono della transizione duttile fragile. Come notiamo dalla tabella



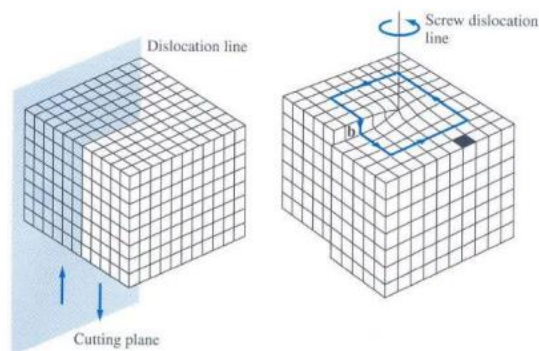
### b. Difetto lineare (dislocazioni)

In questo difetto ho praticamente un filare atomico in più rispetto a quello che ci si aspetterebbe. Sono definiti positivi se sono verso l'alto, negativi verso il basso. E' un difetto lineare in quanto si propaga lungo tutto il filare atomico. Questo permette uno slittamento del materiale molto più semplice. Quando abbiamo un filare atomico in più, in direzione ortogonale alla direzione del closed packed e dunque di scorrimento, è definita **dislocazione a spigolo**.

-  ➔ **dislocazione a spigolo positiva**
-  ➔ **dislocazione a spigolo negativa**

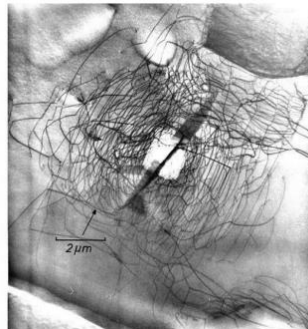
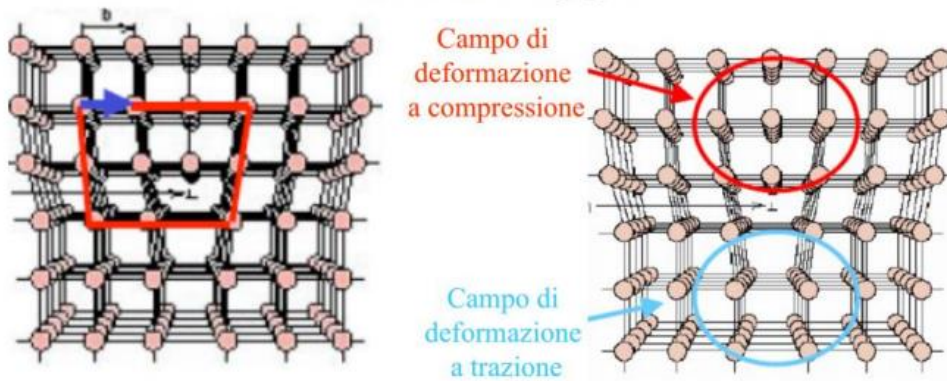


Si dice **dislocazione a vite** quella formata dagli sforzi di taglio applicati a regioni di un cristallo perfetto separato da un piano di taglio.

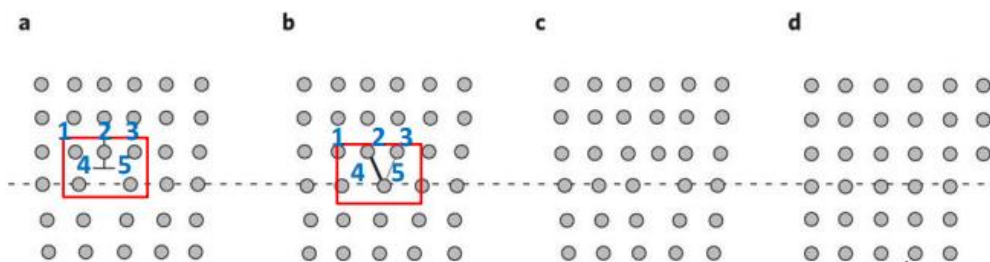


Ci sono i casi più complicati in cui abbiamo entrambe le dislocazioni: **dislocazione mista**. Questo è il caso che succede più frequentemente.

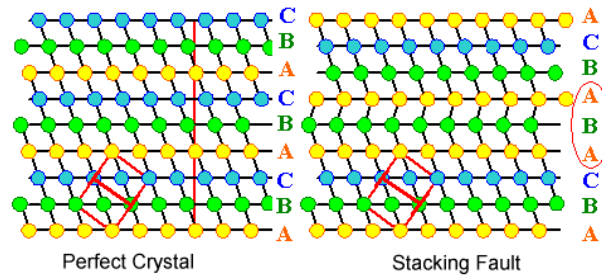
### Dislocazione a spigolo



Ma come si muovono le dislocazioni? Prima di studiare le dislocazioni abbiamo detto che solo se si spostava un intero piano di atomi potevamo avere la deformazione, invece vediamo che qui la cosa è differente. Nell'immagine sottostante abbiamo un movimento da sinistra verso destra punto con il passare degli studi abbiamo scoperto che non c'è una rottura immediata di un filare atomico, e di un piano, ma abbiamo la rottura progressiva e l'unione conseguente dovuta proprio alla dislocazione.



All'equilibrio io dovrei avere sempre alla stessa distanza interatomica. La presenza della dislocazione altera questa distanza di equilibrio. La regione formata da 1 2 3 4 5 possiede un'energia maggiore rispetto a quella di equilibrio, dunque questa regione è più favorita a rompere i legami. Applicando dunque un'azione di taglio da sinistra verso destra, succede che 2 si avvicina a 3 e di conseguenza sarà più vicino a 5. questo causa una condizione non più sopportabile e dunque la struttura dei legami va bilanciata e l'unico modo per abbassare il contenuto energetico è rompere il legame 3-5 e formarne uno nuovo 2-5 così che si agevola lo slittamento. La rottura del legame 3-5 e la formazione del legame 2-5 si ripeterà n-volte, sempre in presenza di uno sforzo di taglio, così che la dislocazione inizia a muoversi sempre verso destra. Questa operazione si ripeterà fintantoché e la dislocazione si trova all'esterno del reticolo. La configurazione "d" è il reticolo perfetto. la dislocazione fino a quando rimane



#### d. Difetto tridimensionale

Sono le porosità, le cavità o le intrusioni non metalliche. Sono i difetti che ci preoccupano di più. La presenza di un' inclusione non metallica riduce la resistenza del materiale e si presenta spigolo vivo e localmente potrebbe accadere che la particella funga come un intensificatore degli sforzi dunque non abbiamo la resistenza nominale. Posso dare vita a delle cricche che portano alla frattura. Le inclusioni possono essere a spigolo vivo, allungate o sferiche, che sono le più innocue rispetto alle altre due. Sono difetti tipici che compaiono dopo colata se non ottimizzata, specie se non è presente una materozza.

Abbiamo visto finora come un materiale dovrebbe essere realmente, abbiamo visto come realmente invece con i difetti, adesso cercheremo di analizzare e vedere i meccanismi in grado di utilizzare i difetti al nostro favore, e così da avere delle resistenze maggiore.

### MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

I sistemi di rafforzamento sono delle tecniche per migliorare le proprietà meccaniche del nostro materiale metallico, si possono utilizzare uno o più dei seguenti meccanismi:

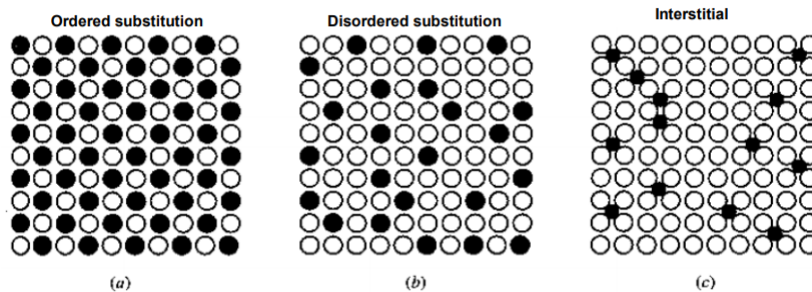
1. INCRUDIMENTO
2. AFFINAMENTO DEL GRANO
3. SOLUZIONE SOLIDE (ALLIGAZIONE)
4. PER PRECIPITAZIONE

Fondamentalmente andremo ad intervenire sullo sforzo di snervamento e sul carico di rottura.

#### Incrudimento

Un materiale fortemente incrudito avrà un carico di rottura più alto ma molto meno duttile. Il metallo viene sottoposto ad una lavorazione plastica freddo, aumentando in tal modo la densità delle dislocazioni. In tal modo il moto delle dislocazioni incontra un maggiore numero di ostacoli. Pertanto un grado di incrudimento superiore significa che si è deformato plasticamente il materiale.

soluto) viene aggiunto ad un metallo. Gli atomi introdotti deformano il reticolo del solvente, ostacolando il moto delle dislocazioni (tale meccanismo è efficace per i reticoli CFC, mentre ha una influenza trascurabile per le CCC).

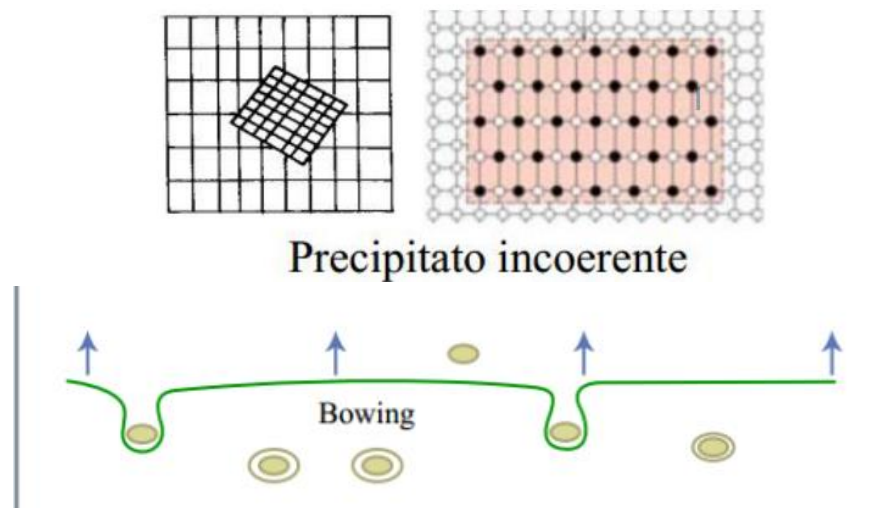


Le soluzioni solide hanno un carico di snervamento superiore Il fatto di non avere un solo tipo di elemento, permette Claude formazione locale del materiale, ma il movimento delle dislocazioni ostacolato dalla differente grandezza degli atomi e che sono presenti nel reticolo come nel caso (a) e (b) della figura. Nella prima immagine abbiamo una **sostituzione ordinata** ovvero abbiamo un ordine stechiometrico tra le due specie di atomi ; nella seconda immagine , invece, abbiamo una **sostituzione disordinata**, in cui non si ha alcun ordine stechiometrico delle specie. Nonostante non si hanno un ordine ben preciso non è mai possibile miscelare un qualsivoglia elemento, ma bisogna sempre rispettare delle regole per miscelare due elementi: **REGOLE DI HUME-ROTHERY**:

1. I diametri degli elementi non si devono differire più del 15%;
2. gli elementi devono avere le stesse strutture cristalline;
3. bisogna evitare di avere differenze di elettronegatività, altrimenti avrei dei composti;
4. Gli elementi devono avere la stessa valenza.

**Queste regole si applicano quando abbiamo soluzioni solide dove un elemento occupa posizioni atomiche del reticolo, non si applicano se l'elemento occupa posizioni interstiziali.**

sistema	Differenza raggio atomico%	Differenza elettronegatività	Grado di solubilità allo stato solido	Max solubilità osservata allo stato solido%
Cu-Zn	+ 3,9	0.1	alta	38,3
Cu-Pb	+36,7	0.2	Molto bassa	0,1
Cu-Al	+ 11,7	0.3	moderata	19,6



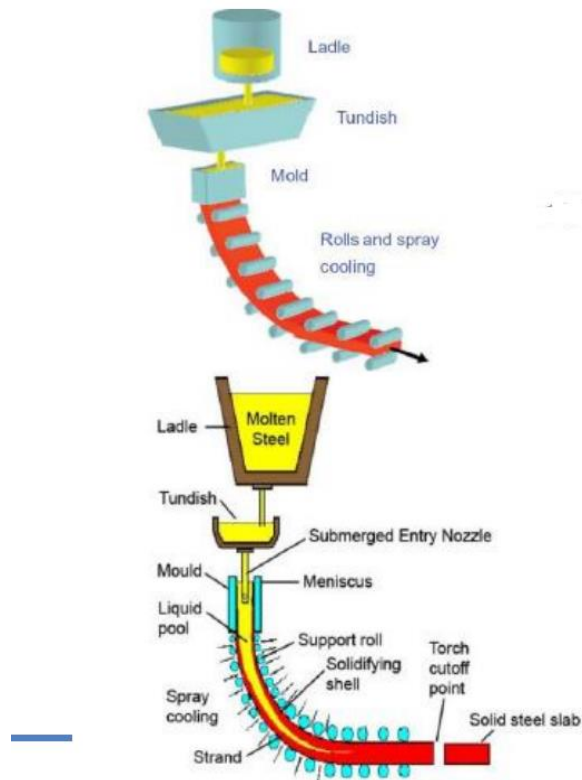
Il meccanismo è chiamato anche di **Bowing** . Il Bowing significa una piegatura ad arco su se stessa della dislocazione. Se abbiamo anche la nascita di nuove dislocazioni, il materiale è ancora più resistente virgola in quanto oltre al precipitato abbiamo la foresta di dislocazioni che bloccano il movimento delle stesse.

L'efficacia dei precipitati dipende essenzialmente da:

- a. Composizione
- b. Dimensione;
- c. Frazione volumetrica;
- d. Distribuzione.

2. l'ossigeno elimina la percentuale di carbonio e il processo va avanti fin quando non si riesce ad ottenere il tenore di carbonio richiesto (2.11% per ottenere l'acciaio).

Colando il materiale risultante dal convertitore ossigeno, ottengo dunque l'**acciaio**. questo procedimento, ovvero partire dal minerale ed arrivare all'acciaio mediante il convertitore ossigeno è definito **CICLO INTEGRALE**. Oggi giorno questo tipo di processo è affiancato dalla rifusione al forno elettrico. L'acciaio viene posto all'interno di questo forno e viene fatto fondere da tre elettrodi in grafite. All'interno del forno viene messo solitamente un carico di acciaio riciclato, Che può essere rottami interno , ovvero un acciaio già prodotto, che il più delle volte risulta essere un DRI (DIRECT REDUCTION IRON), Oh il quale permette di fare alcune miscele. Pertanto un po' di questo acciaio riciclato e di DRI Viene miscelato insieme all'acciaio prodotto dal ciclo e viene fuso il tutto tramite degli archi elettrici. Possono essere anche accompagnate da tecniche di **rifusione** per affinare ulteriormente i lingotti , cioè significa ridurre il contenuto inclusionale e controllare meglio la microstruttura. Di base posso mettere il mio acciaio all'interno di una lingottiera e ottenere un **intermedio siderurgico che è definito Lingotto**. ci sono altre forme di intermedi siderurgici , i quali sono tenuti tramite la cosiddetta **colata continua (continuos casting)**.



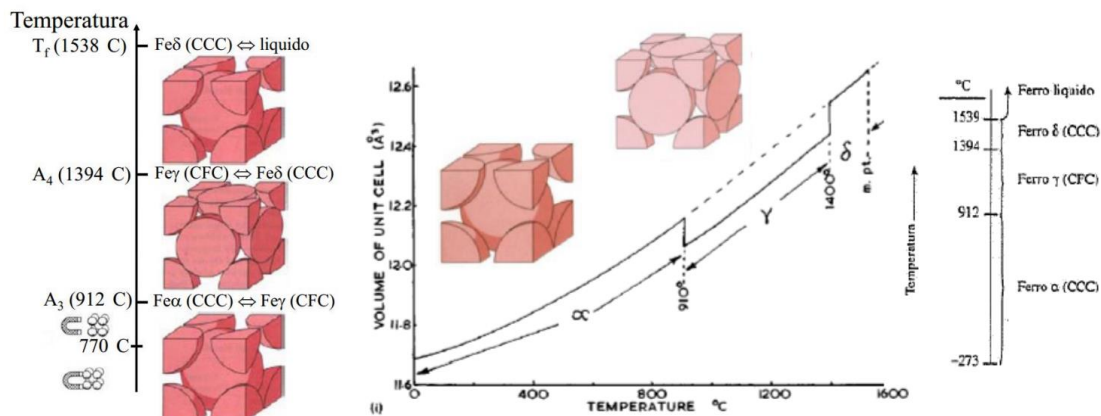
In questo caso l'acciaio fuso viene inserito all'interno di una **siviera** e viene colata in una **Tundish**, Che un contenitore forato che serve per generare un accumulo virgola dopo di che il liquido cola in uno stampo. Prossimo avere anche un contenitore con più stampi per una produzione maggiore. Alla forma gli si toglie la testa che è un difetto e si taglia a misura (**TORCH CUT OFF**). La parte più importante avviene nello stampo dove si cerca di massimizzare lo scambio termico mediante sistemi di raffreddamento in modo da far avvenire la prima solidificazione. Successivamente ci sono dei rulli lungo tutto il tratto che esportano calore gettando gocce d'acqua in maniera continua. L'importante è che una volta compiuta la curva del macchinario la solidificazione deve essere completa. Il rischio più grande della colata



Peso molecolare del composto 179,52  
 $\rightarrow \frac{12,01}{179,52} \cdot 100 \approx 6,68$

Dunque il carbonio massimo che sono interessato è proprio il valore soprastante.

Vediamo adesso più in dettaglio cosa succede al variare della temperatura.



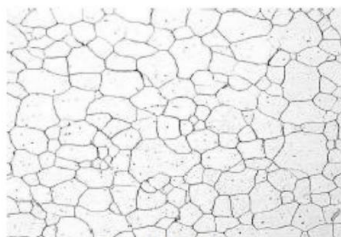
Se considero il contenuto di carbonio pari al 0%, mi sto muovendo lungo l'asse delle y, dunque mi sto riferendo solo al ferro puro, senza alcuna quantità di carbonio. L'unica trasformazione che si può avere è quella **ALLOTROPICA**, Dunque possiamo avere diverse forme cristalline. Si parla così di **polimorfismo del ferro**. Definiamo temperatura di Curie, quello oltre il quale il ferro non è più magnetico, ed è pari a 770°C. Nel grafico abbiamo delle curve dilatometriche, e notiamo che a 912 °C abbiamo un impacchettamento migliore, infatti abbiamo una riduzione del volume della cella quando si passa da ccc ad cfc, si vede infatti un vero e proprio gradino. Dopodiché abbiamo nuovamente una dilatazione in quanto il cubica a corpo centrato a un impacchettamento peggiore. Iniziamo adesso a tenere in conto di alcune percentuali di carbonio:

1. Quando andiamo dai 0°C ai 912°C, abbiamo la **Ferrite**. La percentuale di carbonio aumenta dai 200°C fino ad arrivare ai 727°C. A questa temperatura la solubilità massima del ferro di carbonio è pari a 0.02%. La regione triangolare prende il nome di **Ferrite-α**.

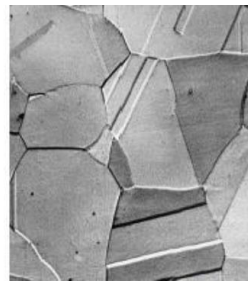


4. **La cementite** ( $Fe_3C$ ) è un composto con un tenore di C pari al 6,67%. È un composto metastabile e tende a decomporsi in grafite + ferrite. Dunque se io dessi il tempo a questo composto alla giusta temperatura di evolvere, ci sarà una segregazione del carbone in grafite più la ferrite- $\alpha$ .
5. Abbiamo infine la **Pearlite**. non è definita come fase, cioè che la porzione chimica non è uguale in tutti i punti, in realtà è una miscela meccanica di ferrite e cementite, abbiamo lamelle alternate di una e dell'altra, pertanto abbiamo due fasi, non una sola. Meglio descriverlo come micro costituente o composto o meglio ancora come miscela intima di lamelle alternate di ferrite e cementite, non sicuramente come fase. questa e lamelle sono difficili da rilevare al microscopio ottico. La distanza Interlamellare della pearlite aumenta al diminuire della velocità di raffreddamento della produzione dell'acciaio.

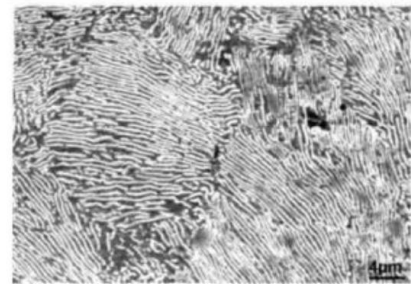
Di seguito vediamo al microscopio tutte queste fasi appena descritte:



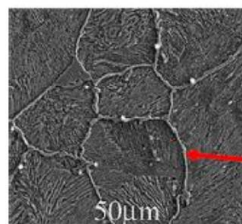
Ferrite ( $\alpha$ )



Austenite ( $\gamma$ )



Pearlite



Cementite  
( $Fe_3C$ )

Per una questione termodinamica è fondamentale descrivere dei campi di transizione tra Fasi differenti all'interno del diagramma. per soddisfare le leggi termodinamiche, io non posso passare direttamente da una fase all'altra, ma deve avere delle regioni di transizione in cui sono presenti i due composti contemporaneamente. Perciò abbiamo delle vele in cui si hanno la compresenza di due fasi nello stesso tempo. Abbiamo dunque le regioni:

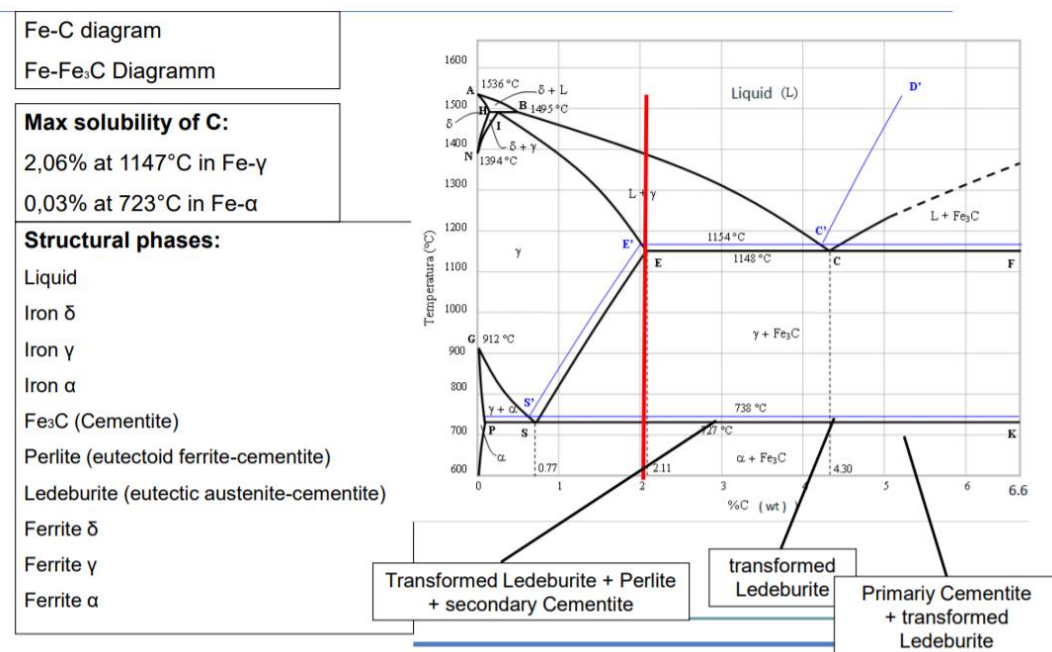
$\gamma + \alpha$ ,  $\delta + \gamma$ ,  $\delta + L$ ,  $\gamma + L$ ,  $L + Fe_3C$ ,  $\gamma + Fe_3C$ ,  $\alpha + Fe_3C$

A temperature molto alte invece si hanno solo fasi liquide. Il campo degli acciai esiste, come detto, solo fino ad una quantità di carbonio pari a 2.11%.

A seconda della percentuale di carbonio che avrò nel mio sistema, durante il raffreddamento dell'acciaio, potrò avere composizioni differenti, con differenti microcostituenti punto facciamo degli esempi:

- $\%C = 0.77$ , facendo raffreddare l'unica miscela possibile è quella composta da Alfa ferrite + cementite, Dunque avremo la perlite;
- $\%C < 0.77\%$ , raffreddando l'austenite, intercetto il campo di compresenza di  $\gamma + \alpha$ , e questo mi darà una differente composizione perché questa ferrite intercettata me la porterò fino a temperatura ambiente, Dunque avrò la trasformazione dell'austenite in  $\alpha + Fe_3C$  ma con la compresenza dell' $\alpha$  Pregressa che prenderà il nome di **ferrite primaria**. Dunque quando in genere avrò un acciaio ipoeutettoidico, la miscela finale sarà: **ferrite primaria: perlite**. ( come si vede dal grafico);
- $\%C > 0.77\%$ , raffreddando la austenite incontrerò la regione  $\gamma + Fe_3C$ , Dunque la cementite me la porterò fino a temperatura ambiente pertanto nella miscela finale avrò la cosiddetta **cementite primaria**, mentre l'austenite che continuerà ad esistere si trasforma al disotto della temperatura eutettoidica in  $\alpha + Fe_3C$  (perlite). **Dunque in genere quando avrò un acciaio ipereutettoidico la miscela finale sarà: cementite primaria +perlite**.

Per ottenere le strutture finali definite nei punti A B C, bisogna eseguire un raffreddamento molto molto lento. Queste sono le strutture che appartengono solo agli acciai punto Vediamo adesso la parte destra del diagramma dunque quella con un contenuto maggiore del 2,11% di carbonio, siamo nel caso delle ghise:



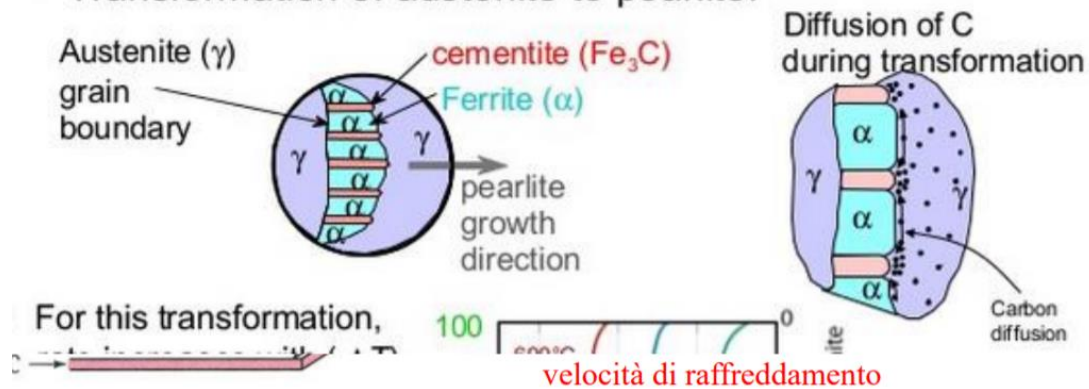
- $\%C = 4.3$ , raffreddando il liquido, ho l'unica miscela possibile,  $\gamma + Fe_3C$ , che è la ledeburite, E continuando a raffreddare, varcando la temperatura delle detto gli dico, troviamo la **ledeburite trasformata**. All'atto pratico sarebbe una perlite, ma avendo una quantità elevata di carbonio, si preferisce chiamarla diversamente;
- $2.11 < \%C < 4.3$ , raffreddando fino a 727°C, avrò sempre la ledeburite trasformata, Ma dovrò tenere conto della austenite che si era formata da raffreddamento ad alta temperatura, pertanto questa ostendite porterà alla formazione di ulteriore perlite e

**ferrite primaria+perlite** se la percentuale di carbonio è inferiore allo 0,8% (in questo caso la ferrite si localizza al bordo di grano e nel centro avremo solo perlite); **cementite primaria+perlite** se la percentuale di carbonio è maggiore dello 0,8%, anche qui la cementite sarà a bordo di grano.

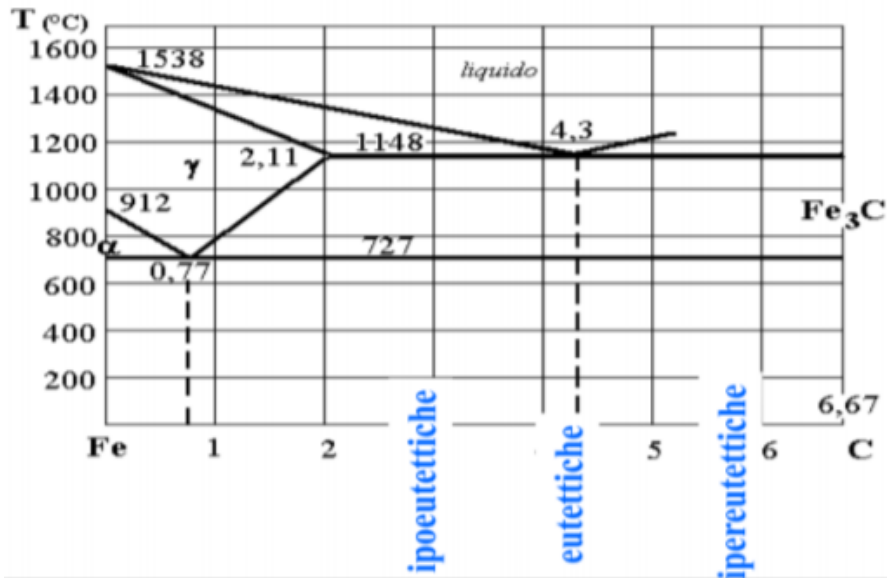
Bisogna vedere infatti che a 723 °C tutta l'austenite, per qualsiasi concentrazione di carbonio, viene convertita in perlite per la trasformazione eutettoidica.

Il fatto che la perlite sia a lamelle alternate, è dovuto ad un fenomeno di diffusione.

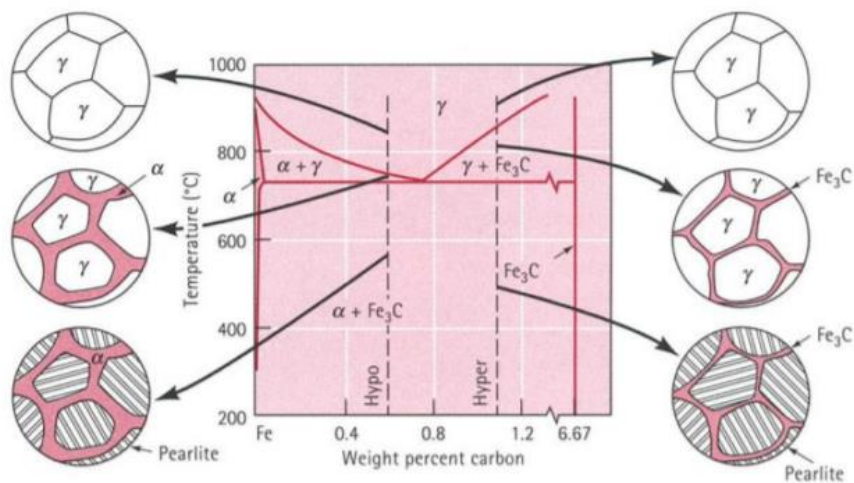
• Transformation of austenite to pearlite:



Il carbonio segue all'interno della lamella i percorsi preferenziali, pertanto l'unico modo che il sistema ha per seguire questa preferenza del carbonio è disporsi a lamelle. Abbiamo lo scheletro di ferrite alternata a cementite. La distanza interlamellare, come detto, varia a seconda della velocità di raffreddamento,  **aumenta alla diminuzione della velocità.**



prendiamo adesso come esempio un acciaio e realizziamo una trasformazione prima ipoeutetoidica e successivamente ipereutetoidica.

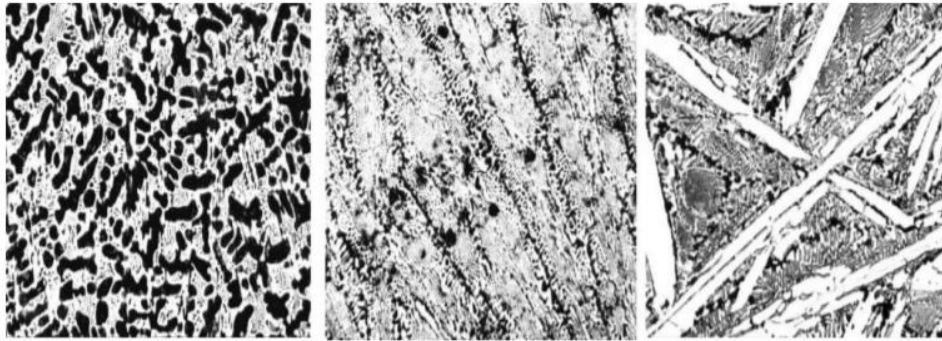


In figura si ha un raffreddamento di una lega Fe-C con  $C \neq 0,77$  w % ipoeutetoidico o ipereutetoidico. Vediamo inizialmente il caso **ipoeutetoidico**: facciamo raffreddare l'acciaio per incontrerà la prima curva in cui solo una parte di austenite si trasformerà in ferrite che si formerà sul bordo di grano austenitico. dopodiché si arriva alla trasformazione eutettoidica alla temperatura di  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  ed affinché la temperatura possa ancora scendere, una fase deve sparire e in questo caso l'austenite va via e compare la perlite. Il caso **ipereutetoidico** Il raffreddamento comporta l'intersezione della linea di trasformazione della cementite, e in questo momento si forma  $\text{Fe}_3\text{C}$  sul bordo austenitico punto arriviamo al punto successivo in cui abbiamo la trasformazione eutettoidica è la temperatura si blocca fin quando l'austenite non si decompone in perlite.

### Microstruttura acciaio

La ferrite si riconosce perché il suo colore è bianco acceso, all'interno del quale troviamo la perlite. Come si vede in figura l'ipoeutetoidico non risulta essere una struttura omogenea. la ferrite Solitamente è molto più globulare della cementite. Anch'essa appare bianca Perché quando utilizzo la soluzione di alcool etilico e acido nitrico per visualizzare le microstrutture di

## GHISE

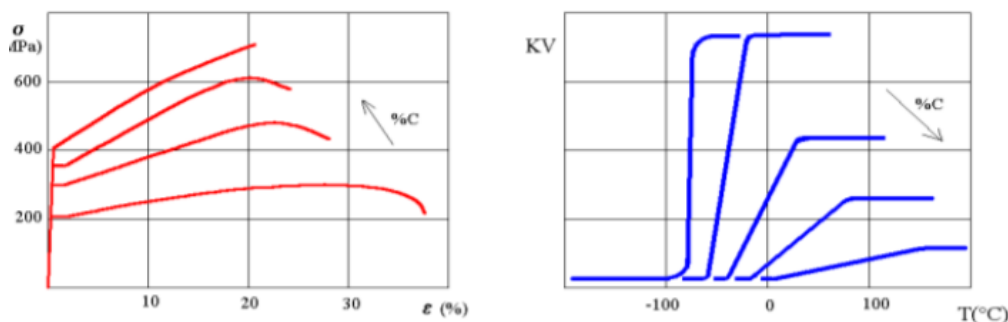


Nella figura le diverse iper eutettiche sono quelle più riconoscibili in quanto si hanno lamelle di cementite decisamente evidenti.

### PROPRIETÀ' MECCANICHE

Vediamo come negli Acciai il tenore di carbonio influenza le proprietà meccaniche:

#### *Influenza del tenore di C*



Quelle a sinistra sono le proprietà statiche quelle a destra invece le dinamiche. dal primo grafico Si può notare Come all'aumentare del tenore di carbonio, diminuisce la duttilità, ma Aumenta il carico di rottura e di snervamento, e il materiale di conseguenza diventa più fragile. quando la percentuale di carbonio è molto bassa invece, non si riesce a misurare il carico di snervamento in maniera normale, ma in questo caso abbiamo una sorta di plateau in cui il carico non sale e il materiale inizia snervarsi e avviene solo una strizione del campione , si riduce la sezione resistente e solo dopo un intervallo di snervamento il carico o inizia a risalire. abbiamo di conseguenza uno **snervamento inferiore e snervamento Superiore** . Questa peculiarità si vede solo negli Acciai molto utili e molto molto poveri di carbonio. solo nella Curva più in alto posso utilizzare la definizione classica di carico di snervamento (quel carico a cui posso far corrispondere una deformazione plastica dello 0,02%).

il secondo grafico invece abbiamo le proprietà ad impatto e dinamiche punto all'aumentare del tenore di carbonio le curve di assorbimento di energia presentano un ginocchio a temperature sempre più prossima a quella ambiente. **L' aumentare della percentuale di carbonio sposta la transizione duttile fragile da temperature sotto lo zero a temperature ambientali.** Questo significa che un materiale perlitico-ferritico , che presenta la transizione duttile fragile a temperatura ambiente, se facciamo una prova di trazione a temperatura ambiente il suo comportamento è duttile, invece a temperature molto basse si comporta in maniera fragile, Ovviamente questa è una condizione da scongiurare. **Dunque avere una temperatura di transizione a temperatura criogenica è molto meno preoccupante rispetto ad avere la temperatura di transizione a 50 °C perché questo può significare**

carbonio sull'eutettico. guardando i diagrammi Si può notare come la percentuale di carbonio dell'eutettico cambia con l'aggiunta di elementi di lega. cambia sia la percentuale a cui avviene la trasformazione e sia cambia la temperatura punto quindi alcuni Acciai che prima erano Ipo eutetoidici possono diventare con questa giunta Iper eutetoidici punto gli elementi in lega vanno a spostare Dunque i punti critici. per questo dalla Fonderia ogni acciaio esce con un documento che attesta tutti i trattamenti a cui sono stati e devono e Possono essere sottoposti.

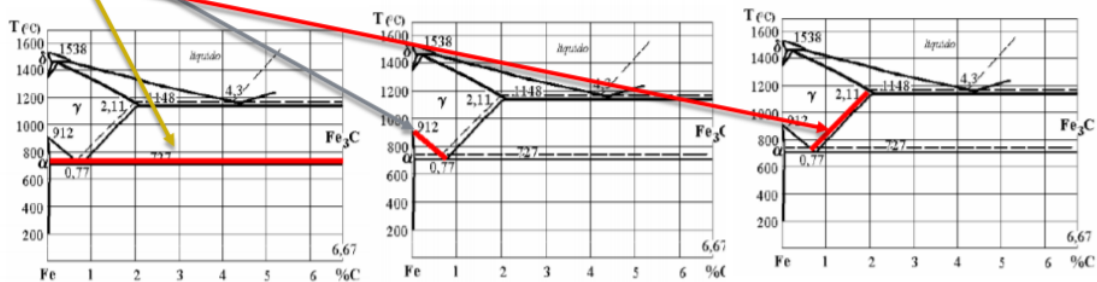
### Punti critici: le trasformazioni degli acciai

Nei diagrammi degli acciai si distinguono tre temperature critiche:

**A<sub>1</sub>**: Equilibrium T Austenite ↔ Perlite (**A<sub>c1</sub>** - **A<sub>r1</sub>**)

**A<sub>3</sub>**: Equilibrium T Austenite ↔ Ferrite (**A<sub>c3</sub>**, **A<sub>r3</sub>**)

**A<sub>cm</sub>**: Equilibrium T Austenite ↔ Cementite (**A<sub>ccm</sub>**, **A<sub>rcm</sub>**)

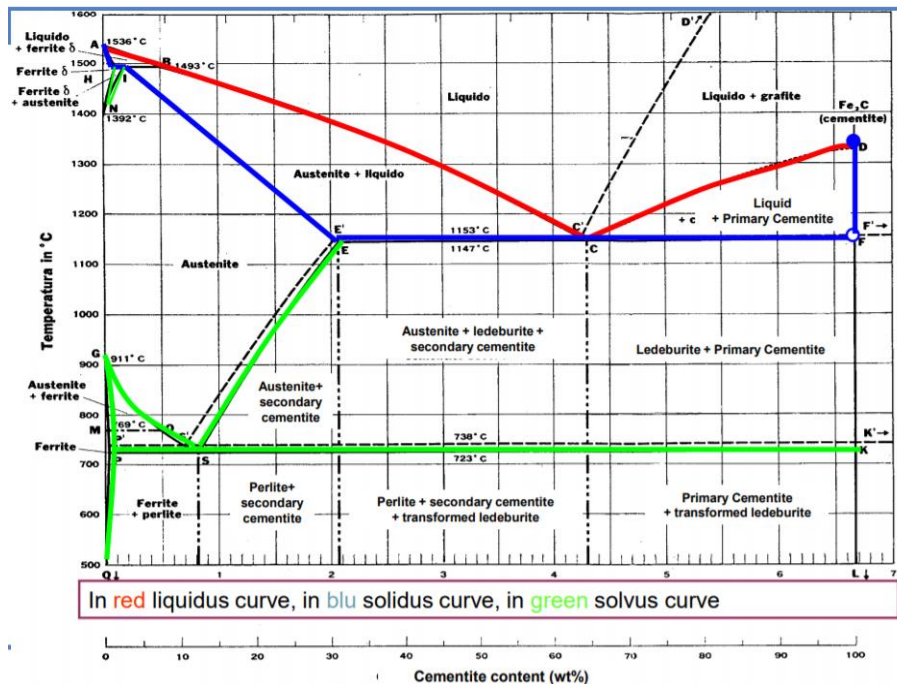


I pedici c,r significano rispettivamente: Chauffage (riscaldamento); refroidissement (raffreddamento).

Per ognuno di questi punti critici si possono distinguere:

- Ae : T di equilibrio della trasformazione ;
- Ac : T alla quale la trasformazione avviene mediante riscaldamento;
- Ar : T alla quale la trasformazione avviene mediante raffreddamento.

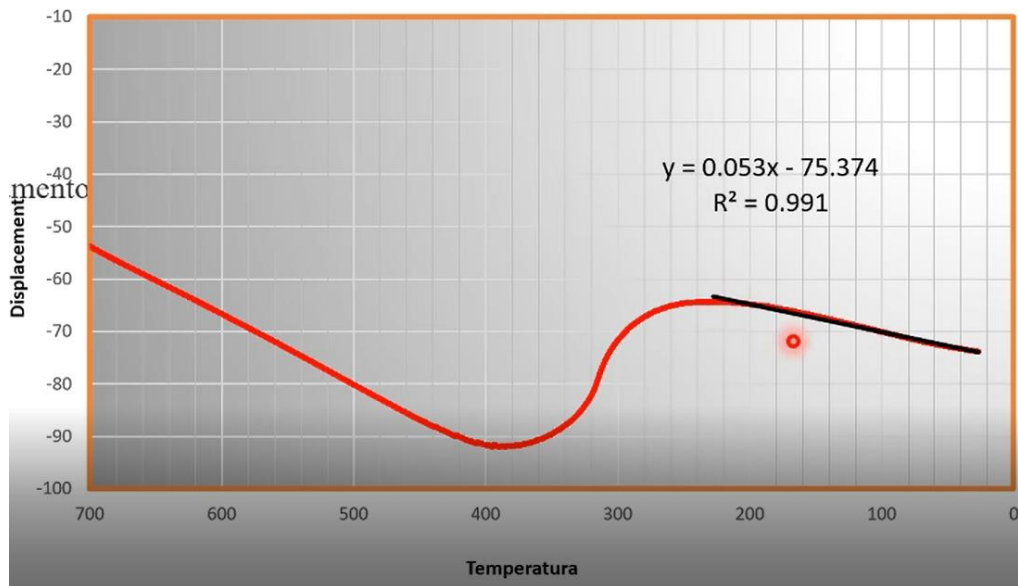
A seconda se io sto raffreddando riscaldando il materiale si compatta in maniera totalmente differente. La differenza fra la Ac ed Ar è dovuta alla cinetica di reazione delle nuove fasi ed a quella di diffusione del C. La Ae La conosciamo in quanto sono le curve proprio del diagramma di stato, mentre la Ac e la Ar si spostano a seconda della velocità di riscaldamento o raffreddamento. se la velocità di riscaldamento è abbastanza lenta, Ac si sovrappone perfettamente con Ae e dunque NON si spostano i punti critici degli acciai. L'unica eccezione è quando riscaldiamo ad induzione , dove la velocità è molto rapida e dunque le curve possono cambiare. Solitamente, tranne in questo caso, a riscaldamento le trasformazioni sono sovrapponibili  $Ac \approx Ae$ . Diversa invece è la questione del raffreddamento, Infatti le curve si spostano solitamente verso il basso all'aumentare della velocità di raffreddamento. Se abbiamo 1°C /min più o meno siamo alla temperatura di equilibrio, Ma già se ho 5°C/min o maggiore, Ar inizia a scendere le curve e dunque l'equilibrio si porta a temperature più basse. Come si vede dal grafico sottostante, abbiamo una diminuzione di Ar1 all'aumentare della velocità di raffreddamento.



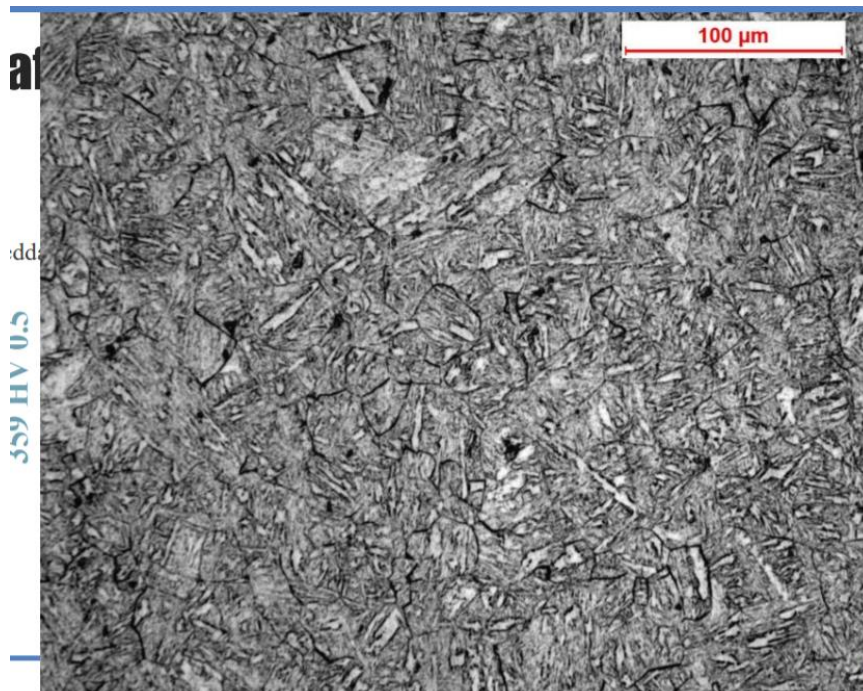
- **La curva di liquidus** , il materiale al di sopra di questa temperatura è completamente liquido;
- **Curva di solidus**, sono curve che indicano, che a seconda se si sta riscaldando o raffreddando, se si sta formando la prima goccia di liquido o se sta per sparire completamente. Quindi se a noi non interessa trattare i materiali liquidi, ci conviene fermarci a **10°C** rispetto alla curva di solidus.
- A1, A3, Acm sono dette **curva di solvus**, cioè se si varcano per i processi diffusivi, si creano dei nuovi composti per diffusione.

**RICORDA-** Il ferro che è un metallo puro, a un unico punto di fusione ed è 1536 °C, mentre un'altra lega ha il punto di fusione a seconda del contenuto di carbonio, ed inizia la sua fusione quando incontra la curva di solidus e arriva completa fusione quando raggiunge la curva di liquidus. **nessuna lega fonde, ma piuttosto a un intervallo di solidificazione o di fusione, ma non un punto.**

### Esempio 2) Raffreddamento lento 1°C/min



Inizialmente abbiamo una contrazione di volume provocata dal raffreddamento, poi intorno ai 400 °C si ha un rigonfiamento, dunque ad una temperatura ben più alta rispetto a prima ed inoltre risulta essere anche una trasformazione non più netta come prima, ma è più una sigmoide. L'espansione qui è molto più graduale e differente rispetto a prima. Qui ho una struttura impure martensitica e in parte bainitica, e nella microstruttura vediamo un qualcosa di più grossolano e si hanno delle placchette ben visibili, che è proprio la bainite. Dunque raffreddando lentamente ho una struttura mista.

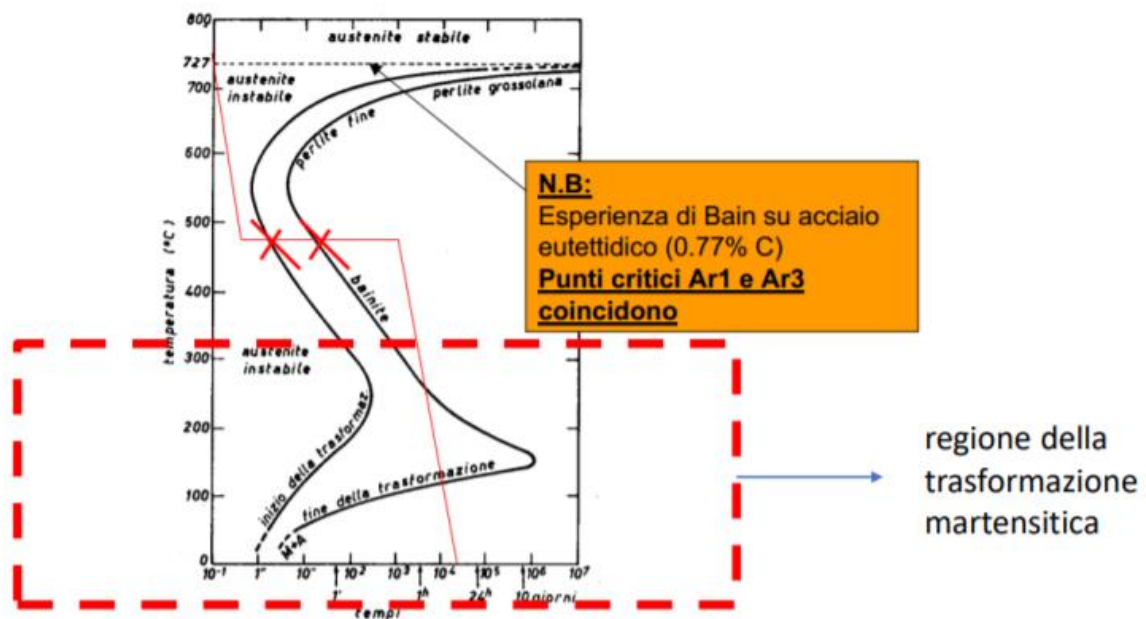




bene la microstruttura finale risultante. Per quanto riguarda raffreddamenti veloci non si sa però il risultato finale, per questo bisogna introdurre le cosiddette **CURVE DI BAIN O TTT**. Con queste curve si ci riferisce alle prime studiate da Bain: si considerava un acciaio con composizione eutettoidica e lo si portava a temperatura di austenizzazione, per poi fare delle prove di raffreddamento a diverse temperature ma soprattutto a diverse velocità.

### CURVE DI BAIN (TTT)

La parte inferiore del diagramma di bain rappresenta la trasformazione martensitica, ma è stata sostituita in quanto sono scorrette. Il diagramma sottostante si legge tramite la curva rossa: si parte da una determinata temperatura, si tempera, successivamente si incontra la prima curva, che determina l'inizio della trasformazione, dopodiché si incontra la seconda curva, che determina la fine della trasformazione, per poi arrivare fino a temperatura ambiente e determinare di conseguenza il prodotto finale. Come si vede in corrispondenza della fine della trasformazione si hanno i prodotti finali.

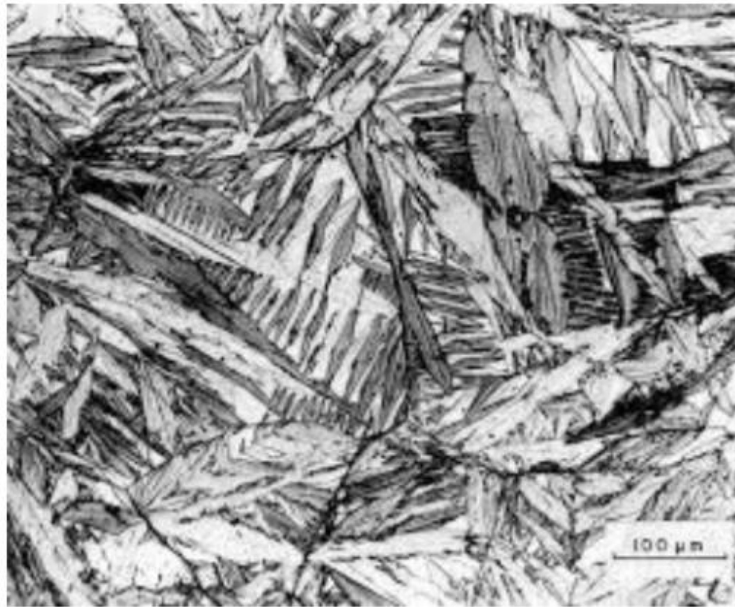


### Trasformazione martensitica

La martensite è un microcostituente che si ottiene dopo tempera, quindi un raffreddamento molto rapido, ha una tipica struttura aciculare, ed è una fase molto dura. Con il termine di tempera si indica un raffreddamento di una fase che si trova al di sopra di A3 e viene raffreddato velocemente. Se invece diciamo **acciaio da tempera o da bonifica** prevediamo 3 trattamenti:

1. **Riscaldamento**
2. **Tempra (la tempera consiste in un rapido raffreddamento ottenuto gettando il pezzo in acqua o olio. è una delle fasi che compongono il trattamento di bonifica (l'altro trattamento è composto dal rinvenimento))**
3. **Rinvenimento**

La martensite NON necessita né di diffusione né di nucleazione e crescita. E' una trasformazione differente. Il fatto che non necessita di diffusione avrà un forte impatto sulla forma della curva. Per ottenere la martensite bisogna per forza partire dall'austenite, dunque il materiale deve aver necessariamente superato la temperatura A3, altrimenti non si può procedere. Oltre ad avere l'austenite deve avere una certa quantità di carbonio. Senza questi



Le curve di Bain ci vengono in aiuto quando la trasformazione avvengono fuori dalle condizioni di equilibrio, Quindi quando non è possibile utilizzare i diagrammi di Stato. la procedura da utilizzare per le curve di Bain è la seguente:

1. un piccolo campione di acciaio eutettoidico viene riscaldato e mantenuto al di sopra di  $A_{c3}$  per un tempo sufficiente da causare la totale austenizzazione del pezzo;
2. raffreddato molto velocemente in bagno appositi (solidificarsi) al di sotto della temperatura critica ( $727^{\circ}\text{C}$ );
3. si mantiene il campione alla temperatura scelta per tempi Crescenti;
4. tramite osservazione dei Campioni si monitora quanto austenite si è trasformata in una fase differente ( il tipo di fase dipende dalla temperatura di mantenimento). Sul grafico le curve si costruiscono segnando il tempo di inizio e fine trasformazione.

RICORDA= quando abbiamo il raffreddamento veloce non possono essere utilizzati i diagramma di stato.

l'austenite si trasforma in un altro microcostituente in maniera isotermica, basta che gli si dia si dia il tempo necessario. Le curve di Bain , come detto prima, hanno due curve: quella di sinistra di inizio trasformazione e quella di destra di fine trasformazione. in mezzo abbiamo una quantità progressiva di austenite che si trasforma pian piano. di conseguenza si possono individuare tre Campi:

1. quella a sinistra dove abbiamo austenite instabile, che non è in condizione di equilibrio;
2. quella destra dove abbiamo i prodotti di reazione;
3. l'area tra le due curve rappresenta l'austenite che si sta trasformando.

La curva di Bain si costruisce con l'ipotesi che il campione passi istantaneamente dalla temperatura austenitica,  $800^{\circ}\text{C}$ , alla temperatura di studio, circa  $400^{\circ}\text{C}$ , dunque si considera una velocità infinita: **è all'opposto del diagramma di stato**. Siamo in una condizione quasi dieale. Per ottenere una velocità così elevata, ho bisogno di preparare la tempra (vedremonelle lezioni successive come prepararla) tramite i bagni di sali fusi. Bisogna avere pertanto un mezzo temprante per congelare la microstruttura.

**La cosa fondamentale da ricordare, è che la velocità con cui passo dal campo austenitico al campo di studio è istantanea.** Pertanto i campioni hanno un inerzia termica

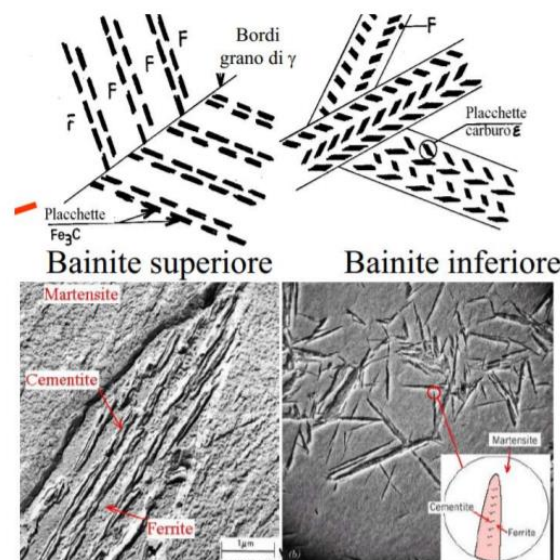
**RICORDA: PER TEMPERAMENTO SI INTENDE UN RAFFREDDAMENTO VELOCE, DA TEMPERATURA DI MANTENIMENTO ALLA TEMPERATURA AMBIENTE.**

Se aspetto invece 15 secondi quando tempro, non ottengo più martensite, perch tutta l'austenite si è trasformata in perlite. Come possiamo vedere dal grafico, appena al di sotto della temperatura dell'austenite la trasformazione è estremamente svantaggiosa, in quanto le curve sono molto a destra e dunque ho la nucleazione svantaggiata e la diffusione favorita. La nucleazione diventa favorita man mano che scendiamo di temperatura, fino ad un massimo, un ginocchio circa a 550°C in cui la nucleazione avviene molto in fretta e la diffusione non avviene e le strutture sono fine. Scendendo di molto di temperatura si hanno strutture intermedie tra la perlite e la martensite, la cosiddetta Bainite. Per temperature ancora più critiche e dunque più basse, si ottiene subito la martensite.

Ms=Martensite start

Mf= martensite finish

Da Ms in giù la diffusione non avviene più. La differenza sostanziale tra i prodotti è l'aspetto e le dimensioni. La bainite superiore somiglia alla perlite, mentre quella inferiore è più simile alla martensite. Per temperature ancora più basse si incontra la trasformazione martensitica la quale non è di tipo isoterma e quindi la forma delle curve di Bain va modificata per tenere conto di ciò. La trasformazione martensitica non avviene per diffusione e prede il nome di **trasformazione militare**. La quantità di martensite che si ottiene **non cambia col tempo di mantenimento** è **funzione esclusiva della temperatura a cui si fa avvenire la trasformazione** → Ms Mf. **Da austenite a martensite si ha solo un ricollocamento di atomi.**



Man mano che mi sposto di temperatura verso il basso, aumenta la quantità di martensite che riesco ad ottenere. Solo se siamo sotto il Mf ho la certezza di avere una struttura 100% martensitica. Tra Ms ed Mf ho tutte le miscele tra martensite e austenite:

Ms→0%martensite, 100%austenite;

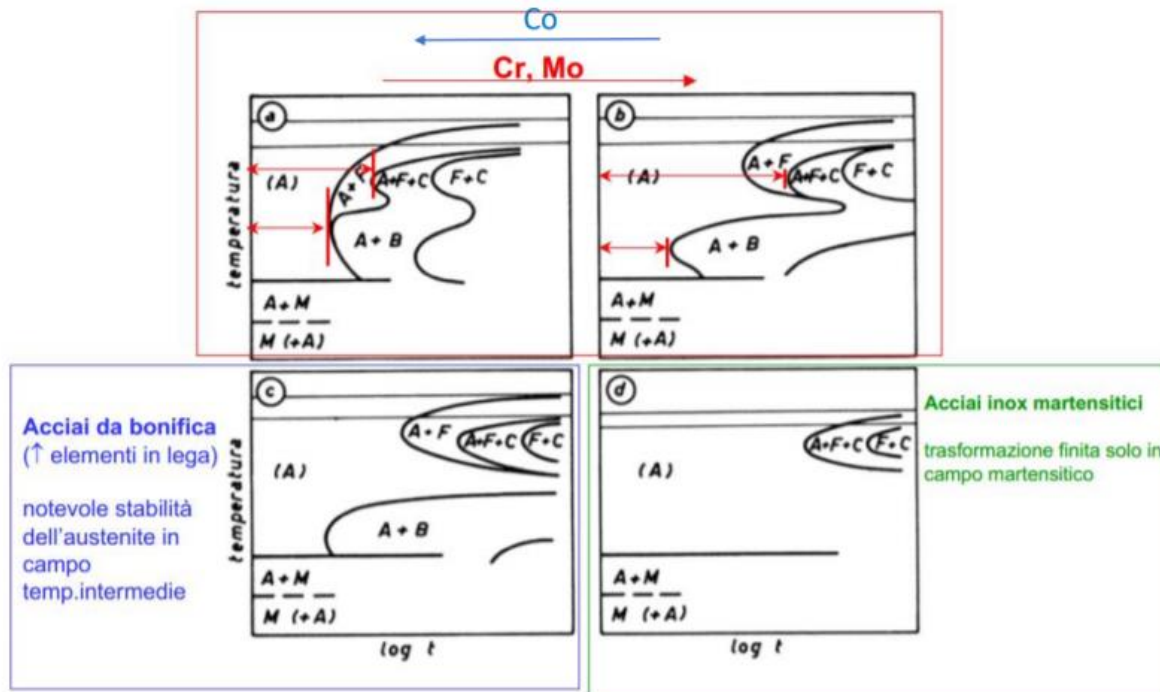
Mf→100% martensite, 0%austenite.

Se mi metto a 150°C e ci sto un determinato periodo, la quantità di martensite che ho NON cambia, questo perchè, come detto, la trasformazione martensitica NON è diffusiva. L'unico modo per completare la trasformazione martensitica è oltrepassare Mf. Anche se io tempro fino a 150°, poi aspetto per un determinato tempo, e successivamente abbasso la temperatura fino ad ambiente, non ottengo 100% martensite anche se oltrepasso Mf, in quanto NON ho una forza spingente tale da poter trasformare il tutto in martensite. La trasformazione martensitica

**microcostituenti.** Bisogna notare che in questo grafico non ho più due curve, ma ne avrò ben 3 di cui una tiene conto della ferrite.

Se considerassimo anche gli elementi di lega, essi apportano una modifica alle curve TTT.

**Curve T.T.T. reali (effetto di altri elementi in lega)**



Il cromo ad esempio, come si vede in figura, sposta le curve tutte verso destra, mentre il cobalto verso sinistra. Utilizzando cromo o carbonio o monibdeno io impedisco la normale diffusione o il normale moimento degli atomi all'interno del reticolo e tutto quello che concerne una trasformaionr su base di diffusione diventa più complessa e con tempi dunque più lunghi.

**CURVE ANISOTERMA: CCT (CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION)**

Sono delle curve che permettono di rappresentare contemporaneamente differenti trasformazioni microstrutturali, comprese quelle non rappresentabili nei diagrammi di fase, e le leggi di raffreddamento effettivamente seguite dal campione.

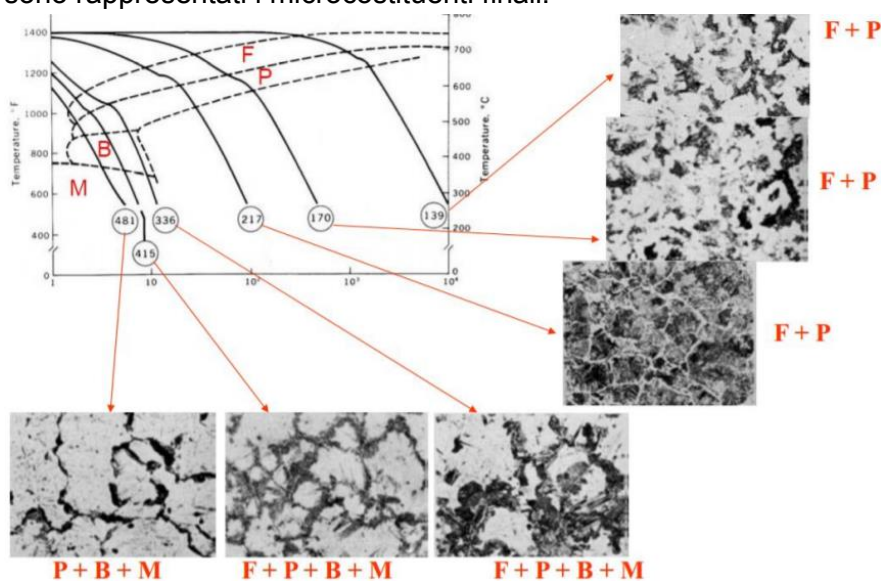
Abbiamo delle equazioni che mi permettono di passare dalle curve TTT a CCT, ma si preferisce ottenere sperimentalmente punto a punto. Le CCT sono poste più in basso e più verso destra. Si leggono allo stesso modo delle precedenti, ma abbiamo delle curve che ci indicano la velocità con cui il pezzo si sta raffreddando (curve 1 e 2).

Nel terzo grafico invece la Ms è localizzata uguale al secondo, dunque siamo sempre in un materile **ipoeutetoidico**, in quanto il tenore di carbonio non è cambiato. Si è modificato il naso bainitico che è a destra. Questo è un tipico grafico per gli acciai molto legati. A seconda della velocità di raffreddamento utilizzata, il mio materiale avrà alla fine una microstruttura completamente differente. Si identifica inoltre la **velocità di raffreddamento critica**, che è tangente al naso bainitico in cui si formerà una struttura completamente martensitica.

**N.B.** “il contenuto di carbonio modifica la temperatura di Ms: esso scende all’aumentare del tenore di C. Questo succede in quanto il carbonio è un elemento stabilizzante per l’austenite, dunque avere più carbonio significa che l’austenite riesce ad essere stabile a temperature più basse, dunque per indurre ad una trasformazione martensitica, bisogna avere un raffreddamento maggiore. L’andamento della retta Mf ha lo stesso andamento di Ms”.

In alcuni casi questo può provocare delle criticità soprattutto in termini di **austenite residua**, cioè quella austenite che per la grossa quantità di carbonio non si è trasformata e dunque persiste a temperatura ambiente.

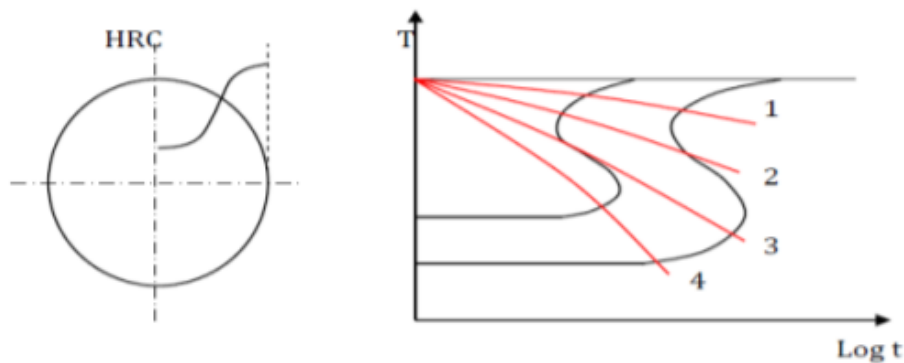
Di seguito sono rappresentati i microcostituenti finali:



Notiamo come al variare della velocità varia la microstruttura finale anche visivamente. Inoltre man mano che la velocità di raffreddamento aumenta, si vanno a creare microstrutture sempre più **dure**, questo perché la diffusione diminuisce e il costituente finale ha maggiore carbonio. Da destra verso sinistra quindi io costruisco costituenti molto più ricchi di carbonio e dunque più tensionati e duri. Tutte queste peculiarità mi portano ad un movimento delle dislocazioni molto più complicato, inficiando sulla duttilità del materiale, infragilendolo. I valori di snervamento e rottura però, saranno più alti.

### TEMPRABILITÀ' DEGLI ACCIAI

È l'attitudine di un acciaio ad assumere più o meno completamente una struttura martensitica, strettamente legata alla velocità critica di raffreddamento (quella che permette di avere 100% struttura martensitica bypassando i nasi delle curve CCT). La velocità critica, cala all'aumentare del tenore di elementi in lega → la temprabilità aumenta → le curve CCT e TTT si spostano verso destra. Diventa possibile temprare a cuore pezzi di grandi dimensioni. Un acciaio più dolce è meno temprabile. La penetrazione di tempra dipende da:



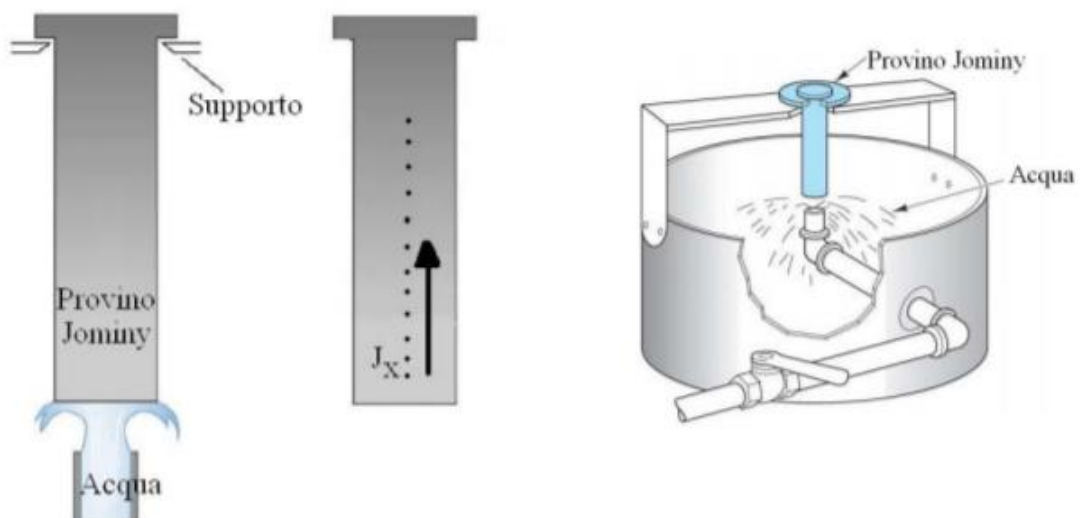
### Prova Jominy

E' una prova che permette di misurare la temprabilità degli acciai molto velocemente. Su un unico provino si riesce a capire e riprodurre la velocità di raffreddamento differente. Le dimensioni del provino cilindrico sono:

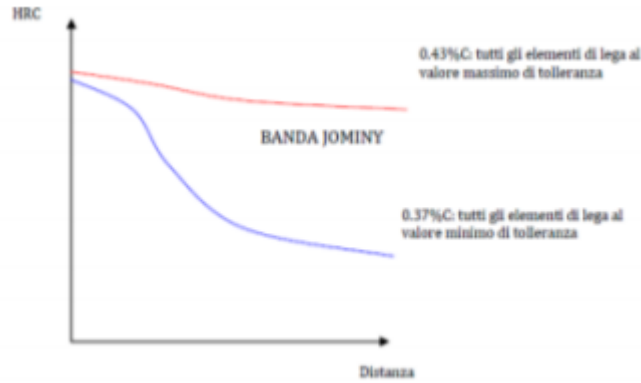
Diametro 25mm;

Lunghezza 100 mm.

Il provino viene incastrato su un telaio, e al di sotto del quale viene applicata una tubatura con acqua in pressione (tutte le dimensioni e le grandezze sono ben espresse in normativa, sono delle prove standard). L'acqua viene gettata sul provino austenitizzato e ottengo delle curve di raffreddamento diverse. La testa del campione che è più vicina all'acqua avrà delle velocità di raffreddamento più veloce di tutte e mano a mano che mi allontano, ho curve sempre meno veloci. Il mio campione viene rettificato su una faccia, e una volta che ho temprato il mio campione, eseguo una cucitura di durezza dalla punta fino alla base e vedo come la durezza cambia dalla testa al supporto. Ovviamente mi aspetto che la durezza maggiore sia localizzata in testa dove lo scambio termico è molto elevato e minore in corrispondenza del supporto.



La curva di output che avremo è la seguente:

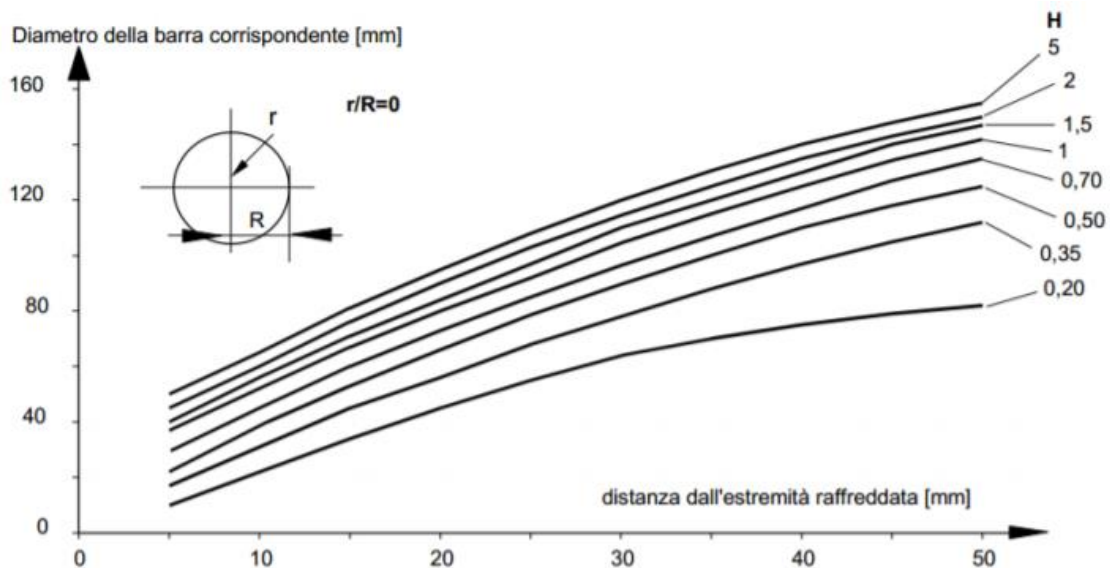


La curva superiore si riferisce ai valori massimi di tolleranza, mentre quella inferiore ai valori minimi.

Le curve CCT per valori massimi sono verso destra, mentre per i valori minimi sono verso sinistra. Nei valori minimi la durezza cala vertiginosamente, abbiamo un ginocchio. Dunque a noi interessano la BANDA JOMINY che permette di progettare in sicurezza avendo un limite superiore ed inferiore. La durezza e il carico di snervamento sono correlati da una equazione (che non vediamo). Le curve Jominy sono importanti perchè ci dicono come varia la durezza in funzione della velocità di raffreddamento, ma solo su una barra di diametro e lunghezza nota. Quindi ha un limite importante. Come facciamo a portare queste soluzioni ottenute da campioni piccoli su campioni industriali? La soluzione risiede nelle curve di Lamont.

### Curve di Lamont

Forniscono la relazione tra "distanza dall'estremità temprata" della prova Jominy e il "diametro della barra corrispondente" per la quale si verifica (ad una certa distanza dalla superficie, in rapporto predeterminato con il diametro) la stessa velocità di raffreddamento e quindi la stessa durezza e le stesse strutture.



Ovviamente la curva di Lamont e Jominy sono state ottenute con lo stesso acciaio. Dove abbiamo il tondino di acciaio, abbiamo la zona che ci fa capire in che punto del tondino siamo e stiamo analizzando. Se siamo al centro al centro  $r/R=0$ . L'indice H è la drasticità del mezzo con cui stiamo temprando. Partendo dalla banda Jominy e dico che dai miei calcoli che io ho bisogno di una durezza pari a 35 HRC, e sul grafico Jominy su quello acciaio, quella durezza

Lezione 17/03/2020

## TRATTAMENTI TERMICI

Sono dei trattamenti che servono per passare dal grezzo al componente finito per poter essere poi utilizzato nella messa in opera. I trattamenti termici sono particolari cicli termici a cui si sottopone il materiale per garantire alcune caratteristiche prestazionali, ad esempio per migliorarne la deformabilità plastica a freddo, migliorarne la resilienza, etc.. Parleremo di:

- Ricotture
- Normalizzazione
- Bonifica

sono tutte e 3 delle tecniche di trattamento termico. Sono delle tecniche che vengono definite MASSIVE. I primi due sono riferiti più che altro ai semilavorati, mentre la bonifica è riferita al quasi finito. Per questo si possono dividere in *massivi* che prevedono la trasformazione dell'intero componente(intervengono sul grezzo); *superficiali* che intervengono sul finito e trasformano solo una piccola parte di superficie (cementazione, impiegato sui cuscinetti o su ingranaggi). Noi ci soffermiamo sui massivi che sono i 3 elencati precedentemente. Tutti i trattamenti termici si iniziano con il riscaldamento del pezzo, che deve essere pianificata in modo da riscaldare in modo omogeneo. Esso va eseguito lentamente (salvo eccezioni) in modo che anche i componenti più grandi raggiungono la stessa temperatura in ogni punto, evitando che si sviluppino tensioni dovute agli eventuali gradienti termici. Si procede con curve di riscaldamento a gradini con 10-15°/min così che anche il cuore ha il tempo di omogeneizzarsi e raggiungere la temperatura della superficie. solitamente si utilizza la conduzione o l'irraggiamento. solitamente il cuore rimane sempre un pò indietro per questo si utilizzano grafici a gradini. Analizziamo le tecniche uno alla volta.

### RICOTTURE

Ne esistono di diverse, ognuna delle quali ha applicazioni specifiche a seconda del fine che si vuole ottenere esse sono:

- Ricristallizzazione (es. per lamiere)
- Omogeneizzazione (es. per lingotti)
- Sferoidizzazione (per agevolare lavorazioni meccaniche a freddo)
- Normalizzazione (elimina la storia termica pregressa di un acciaio)
- Stress relieving
- Stabilizzazione dimensionale (es. nei getti da fonderia)

Analizziamo la ricristallizzazione. Possiamo averla per due ragione: o perché abbiamo deformato plasticamente il materiale, riducendone la sezione tramite laminazione a freddo e la microstruttura che ottengo viene deformata lungo la direzione di laminazione ottenendo la TESSITURA, significa che tutti i grani sono orientati e allungati nella direzione della laminazione stessa. La laminazione a freddo fa aumentare le dislocazioni in modo casuale nel reticolo (a) e il materiale incrudisce. Quando arrivo a temperature più elevate, raggiungendo il cosiddetto intervallo di temperatura di ricristallizzazione, le dislocazioni tendono a riassetarsi e riorganizzarsi e costruiscono strutture ben organizzate. Questo processo al livello



momento mettiamolo da parte. Nel momento in cui faccio varcare A1 e A3 il nostro materiale raffreddato avrà sicuramente una struttura più fine.

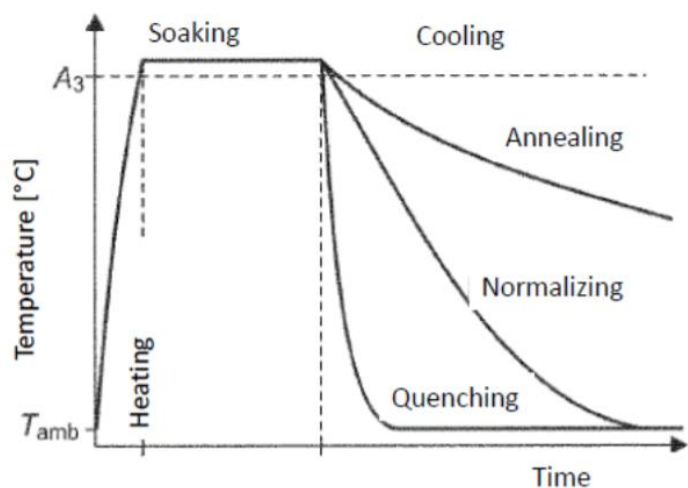
Introduciamo adesso ad introdurre due concetti fondamentali (due famiglie) di ricottura:

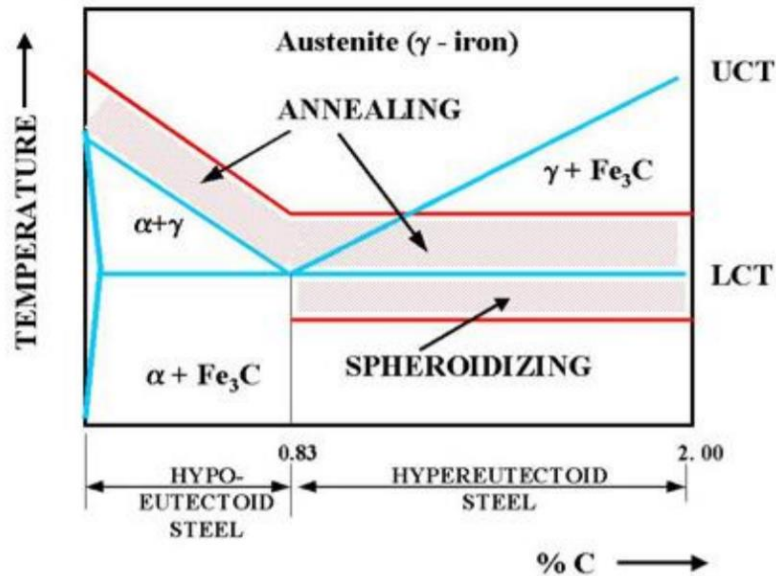
- RICOTTURA COMPLETA(full annealing): si esegue su semilavorati per promuovere la diffusione degli elementi di lega dal cuore alla superficie. Cerchiamo di omogeneizzare dal punto di vista chimico il nostro lavorato. Si utilizza nei lingotti in cui la microstruttura è disomogenea, dove infatti in superficie è fine dove c'è stato molto scambio termico e tende ad essere molto grossolano al cuore. la ricottura completa serve a rendere il tutto più omogeneo. Uniformare il grano dei lingotti che, per come vengono prodotti sono fortemente disomogenei, subiscono addolcimento per le successive operazioni di deformazione plastica. La microstruttura finale ottenuta è quella predetta dal diagramma di stato. Si riscalda il materiale appena sopra A3 (ipercritica). la temperatura è mantenuta finché tutto il materiale è austenitizzato (grano più fine) e poi si raffredda in modo controllato all'interno del forno stesso. Il raffreddamento è estremamente lento. si definisce ipercritico perchè siamo al di sopra di A3. Il fatto di essere sopra A3 possiamo avere ricristallizzazione e siamo sicuri di ottenere al raffreddamento dei grani fini.
- RICOTTURA DI NORMALIZZAZIONE(Normalization): La differenza più importante è che il raffreddamento è fuori forno e dunque molto più veloce. e la microstruttura finale non è quella predetta dal diagramma di stato ma quello predetta dalle CCT. La normalizzazione è importante in quanto è in grado di resettare la storia termica del mio materiale, e questo mi è permesso perchè ottengo un grano austenitico completamente nuovo riscaldando a 50-80 gradi sopra A3. All'aumentare della velocità di raffreddamento la struttura perlitica diventa progressivamente più fine. L'addolcimento ottenuto è minore rispetto a quello della ricottura completa. sono meno duttili i microcostituenti in quanto il raffreddamento è molto più rapido e la microstruttura che ottengo sono più performanti (perlite fine).

Solitamente il riscaldamento viene fatto su diverse rampe, anche se nei grafici sottostanti è fatto con una sola rampa. poi a seconda di che tipo di raffreddamento sto eseguendo, abbiamo diverse tipologie:

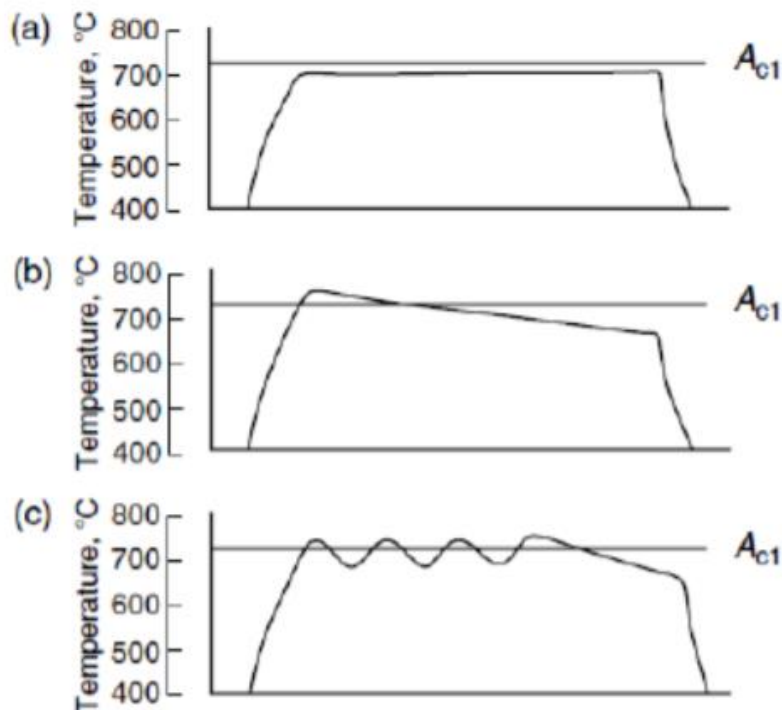
- in forno---> Annealing (ricottura)
- in aria calma ---> Normalizing
- tempra ---> Quenching, qui il raffreddamento è rapido ed otterrò quasi certamente una struttura martensitica.

Posso ovviamente poi affidarmi alle curve CCT per sapere quali saranno i microcostituenti finali dopo il trattamento. quando il raffreddamento è molto lento mi aspetto una struttura F-P, aumentando la velocità e ad esempio utilizzando una normalizzazione potrei ottenere A-B, e ovviamente una quenching porta ad avere una struttura martensitica.

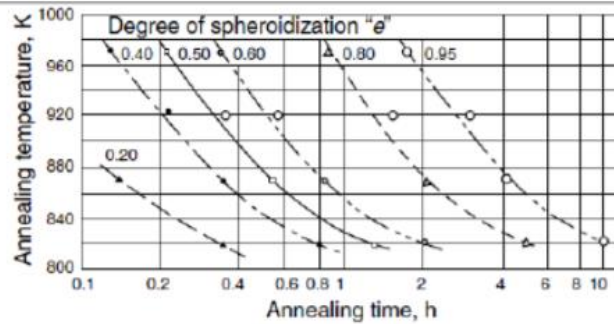




La microstruttura di partenza influenza tanto il processo. Il risultato è comunque che tutti i microcostituenti duri vengono trasformati in carburi sferoidali in una matrice ferritica. Questo processo, come detto in precedenza, è essenziale per migliorare la lavorabilità all'utensile degli acciai e per favorire eventuali deformazioni plastiche a freddo successive. Vediamo a seconda delle microstrutture iniziali a quali temperature bisogna arrivare per ottenere il processo di sferoidizzazione.

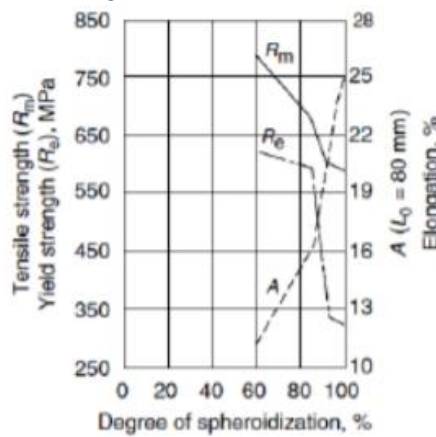


- (a)- Se abbiamo come microstruttura di partenza, acciai poco legati o legati con struttura bainitica martensitica si arrivano a temperatura al di sotto di  $A_{c1}$  di  $20^\circ$ .
- (b)- Se abbiamo un acciaio con forti elementi in lega, almeno all'inizio bisogna stare una decina di gradi al di sopra di  $A_{c1}$  per poi scendere fino a  $30^\circ$  sotto  $A_{c1}$ . Abbiamo un progressivo raffreddamento molto lento.
- (c)- In questo caso abbiamo un grafico a jo-jo, in cui si continua a saltare  $\pm 5^\circ$  rispetto ad  $A_{c1}$  e lo si fa quando si hanno acciai ipereutetoidici.



**FIGURE 6.76** Time-temperature diagram for soft annealing of the unalloyed steel DIN C35 (previously deformed 50%), to achieve the required degree of spheroidization. (After Köstler; see H.J. Eckstein (Ed.), *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*, 2nd ed., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987.)

Per una completa sferoidizzazione, dovrò attendere almeno circa 2 ore, se lavoro a temperatura di 980°K. se scendo di qualche grado i tempi si allungano vistosamente per ottenere lo stesso risultato. Ad alte temperatura la diffusione avviene con velocità superiori, ecco spiegato il motivo. Possiamo fare anche dei diagrammi che ci dicono come le proprietà meccaniche cambino a seconda del grado di sferoidizzazione.



**FIGURE 6.77** Change of ultimate tensile strength, yield strength, and elongation with increasing spheroidization of an unalloyed eutectoid steel, DIN C75. (From H.J. Eckstein (Ed.), *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*, 2nd ed., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987.)

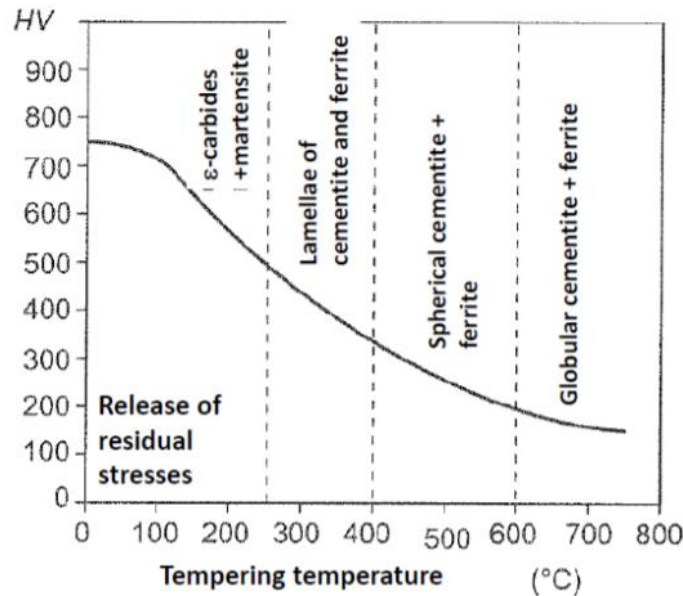
Si noti come all'aumentare della sferoidizzazione, l'allungamento a rottura aumenta in fretta, e che il carico di rottura e di snervamento con delle leggi differenti, entrambi si abbassano ovviamente. Quindi riusciremo a plasticizzare il materiale con maggiore semplicità.

**BONIFICA**

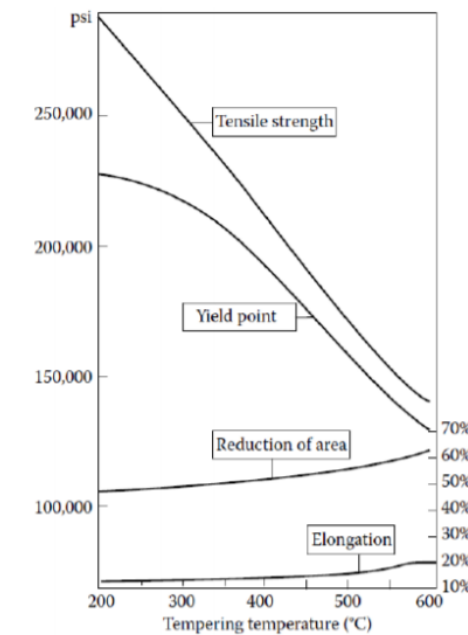
Col termine bonifica si intende il trattamento termico composto da Tempra e Rinvenimento. La bonifica è costituita da 3 differenti fasi:

- 1) Austenitizzazione
- 2) Quench-raffreddamento rapido in un mezzo adatto(olio, acqua, aria)
- 3) Tempering Rinvenimento

3) RINVENIMENTO: Prima del rinvenimento quando sto per riscaldare il mio materiale cosa accade? si possono dividere le curve di rinvenimento in diversi sotto fasi come si vede dal grafico. Per temperature basse l'unica cosa che succede nel materiale è il rilascio delle tensioni residue dovute alla tempra stessa e alla formazione di carburi metastabili in una matrice martensitica. quando inizio poi a rinvenire verso i 250-300° inizio ad avere la decomposizione della martensite in lamelle di cementite e ferrite **sorbite, termine per indicare proprio la martensite rinvenuta**. Andando a rinvenire a temperature più alte si passa a cementite sferica in matrice ferritica e infine avere una forma globulare di cementite nella matrice ferritica. Si ha quindi lo stesso risultato della ricottura.



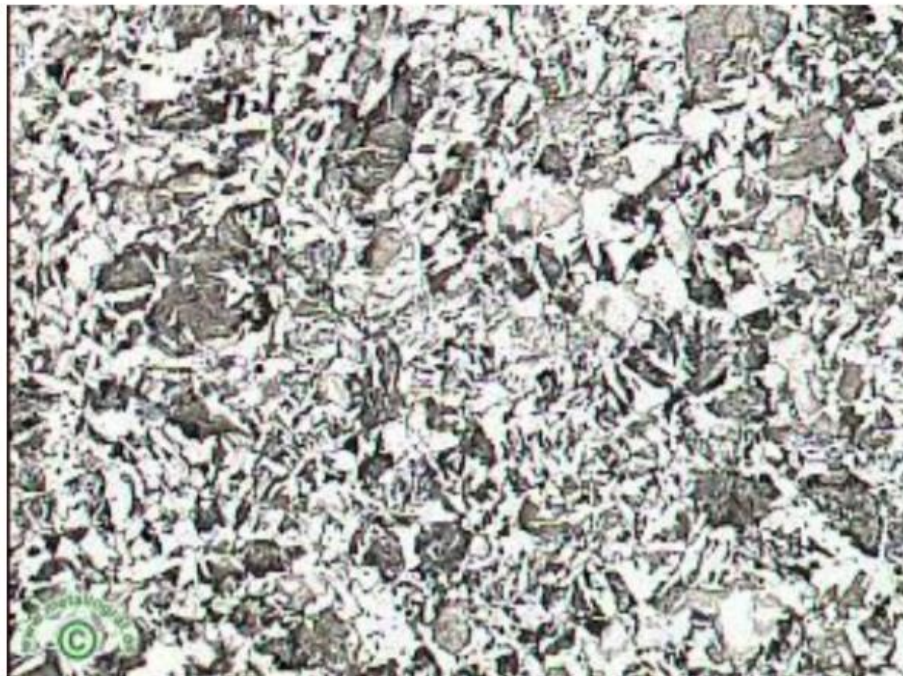
All'aumentare della temperatura di rinvenimento si modificano le proprietà meccaniche:

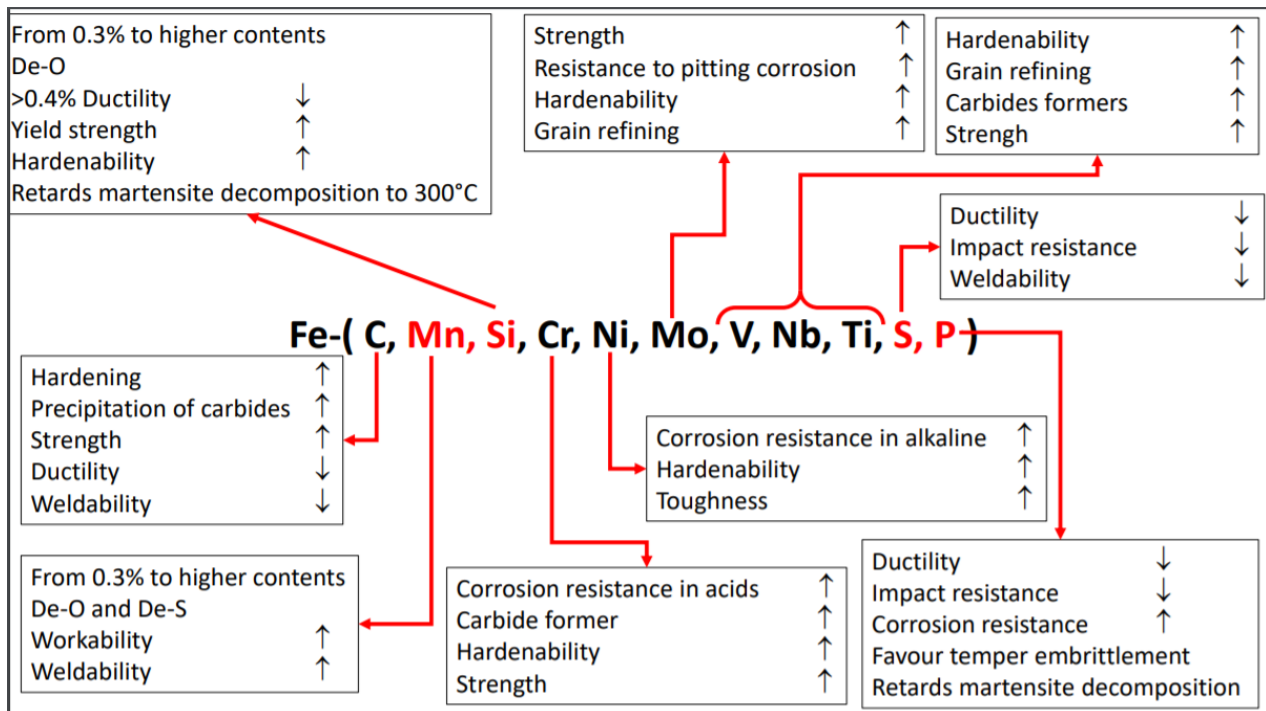


La resistenza a trazione massima via via scende come il carico di snervamento, mentre la riduzione d'aria e l'elongazione, dunque la duttilità a poco a poco cresce. Durante il rinvenimento, in generale tra 80 e 160 °C la cella tetragonale della martensite inizia ad espellere carbonio riducendo gli stress interni. il tenore di carbonio nella martensite tende a

la temperatura abbiamo la trasformazione della martensite in strutture sempre più duttili , cementite e ferrite, a cui corrisponde un aumento della tenacità, ma un abbassamento importante delle proprietà meccaniche. A seconda dell'utilizzo che bisogna fare dello strumento creato, si potrà rinvenire o a temperature molto basse, così da avere materiali duri e resistenti ma con una duttilità molto ridotta, oppure rinvenire a temperature molto elevate così da ottenere strutture molto duttili. Quello che bisogna assolutamente evitare è rinvenire in quel determinato intervallo di temperatura, in quanto la tenacità del materiale sarebbe davvero bassa. In questo caso, se si hanno cromo e manganese in presenza di carbonio a circa 300-400°, se si rinviene si genereranno carburi metastabili infragilenti. Si può evitare questo effetto, aggiungendo elementi che formano carburi via via più stabili, come ad esempio il Molibdeno. Si aggiunge in piccole quantità il MO, che formerà carburi più stabili rispetto a quelli che formerebbe il cromo e di conseguenza riesco ad evitare il problema causato dal fatto che nella matrice si formano carburi misti di cromo e manganese.

Di seguito si propone al microscopio la martensite rinvenuta ad alta temperatura.





Finchè si rimane a basse quantità di Cr, circa 1-2% non parliamo di resistenza a corrosione, ma questo permette solo la formazione di carburi. Per fare questo dobbiamo raggiungere circa l'11%. Il cromo aumenta la temprabilità perché sposta le curve CCT a destra e favorisce la trasformazione martensitica. Anche per il Nichel bisogna mettere un certo quantitativo per ottenere la resistenza a corrosione di alcalini. Il monidbeno è simile al cromo, aumenta la resistenza al pitting, e agisce come **affinante di grano**, genera dei carburi al bordo di grano molto stabili che impedisce la microstruttura di ingrandirsi e vincolare i grani. Lo stesso effetto lo conferiscono V, Nb, Ti. Lo zolfo ha solo effetti decrescenti, e dunque è tra gli elementi peggiori che possiamo inserire. Il fosforo ha una condizione mista, migliora leggermente la resistenza a corrosione, ma il gioco non vale la candela per gli altri effetti che produce. Per migliorare le proprietà meccaniche si preferisce il silicio o il cromo piuttosto che il fosforo proprio per gli altri effetti che produce.

### FAMIGLIE DI ACCIAI (STEELS GRADES) E CLASSIFICAZIONE

Poiché il numero di acciai esistenti è assai numeroso, serve un modo opportuno per classificarli. La classificazione deve essere:

- Chiara
- univoca
- Il codice utilizzato deve fornire le principali informazioni dell'acciaio a prima vista ed in modo efficace

Gli acciai possono essere classificati sulla base di specifici requisiti qualitativi.

- **Acciai di base:** sono acciai che vengono classificati solo in base alle loro proprietà Meccaniche. Nessun altro requisito deve essere soddisfatto (composizione chimica).
- **Acciai di qualità:** Questi acciai devono garantire specifiche proprietà oltre alle sopracitate proprietà Meccaniche
- **Acciai Speciali** acciai particolari da impiegare per specifiche applicazioni o trattamenti.

In alternativa gli acciai possono venire classificati sulla base della loro composizione chimica, oppure sulla base della loro applicazione finale per esempio: Acciai per applicazioni generiche, acciai strutturali, acciai strutturali per applicazioni speciali, acciai inossidabili, acciai

per le prove ad impatto abbiamo delle sigle ben precise che si riferisce alla prova Charpy:

Resilienza		
min. 27 J	min. 40 J	Temp. °C
JR	KR	20
J0	K0	0
J2	K2	-20
J3	K3	-30
J4	K4	-40

J --- si assorbe fino a 27 J

K --- si assorbe 40J dunque molto più duttile

R --- temperatura ambiente

0-2-3-4 --- temperatura sotto la quale è stata effettuata la prova.

2. **Acciai per cemento armato:** si indica con una **B** all'inizio del codice. Il numero che segue è sempre il valore minimo garantito di snervamento in MPa. Seguono altre lettere per indicare il grado di duttilità. Tale valore è espresso per classi dalla A alla C.
3. **Acciaio per applicazione in cemento armato precompresso:** si indica con una **Y** seguita dal carico di rottura espresso in MPa.
4. **Acciaio per linee in pressione e recipienti in pressione** indicate con una **P**. Qui bisogna stare attenti alla duttilità, perché possiamo avere uno scoppio e un'esplosione, se il materiale si frattura o c'è una piccola fessurazione. La criticità sta nel tipo di progettazione. Il tipo di progettazione che si utilizza è il **Lickedged before breaking**. Si costruisce con un materiale molto duttile in modo che se ci fosse una fessurazione, il materiale segue la deformazione e non esplose, ma ci sarà una depressione del recipiente in modo controllato e non ci sarà la rottura fragile d'impatto che porterà ad una esplosione. avremo dunque uno sfiato.
5. **Acciai per condutture** indicate con **L**
6. **Acciaio per ferrovie** indicato con **R**
7. **Acciaio per semilavorati piatti per deformazione plastica a freddo** indicate con la lettera **D**

esempi

**S 275 K2**, Acciaio strutturale con un carico di snervamento minimo garantito di 275 MPa ed un'energia di impatto assorbita di 40 J a -20 °C

**Y 900**, Acciaio per cemento armato precompresso con un carico di rottura minimo di 900 MPa

**B 450 A**, Acciaio per tondini per calcestruzzo armato con carico di snervamento minimo garantito di 450 MPa e con proprietà di duttilità che lo fanno rientrare nella categoria (A)

**UNI EN 10027-1 categoria 2: stavolta la designazione è a seconda della composizione chimica.**

1. **Acciai in cui il Mn è contenuto al di sotto dell'1%** sono designate con una **C** e il contenuto di carbonio moltiplicato per 100
2. **Acciai in cui il Mn è contenuto al di sopra dell'1%, oppure acciai contenenti altri elementi ma tutti al di sotto del 5%** vengono designati come segue:  
Contenuto di C X100, Seguono i simboli chimici degli elementi in lega in ordine decrescente (dal più presente a quello in minore concentrazione) numeri che indicano il quantitativo medio di ciascun elemento **moltiplicato** per uno specifico coefficiente\*.
  - 4 per Co, Cr, Mn, Ni, Si, W
  - 10 per Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr
  - 100 per Ce, N, P, S

- X3CrNiMo 17-13-3
- X30Cr13
- 41Cr4
- 42CrMo4
- 48Si7

---

### **NOTE STORICHE ACCIAI DI QUALITA'**

Uno dei motivi che ha portato all'uso degli acciai di qualità era la ricerca di proprietà Meccaniche superiori. Per fare un esempio, gli acciai comunemente usati nel passato avevano un carico di snervamento pari a 250 MPa mentre gli acciai di qualità odierni raggiungono i 450 MPa. Gli acciai di qualità sono più economici rispetto al passato perché non richiedono più operazioni accessorie quali la pelatura (la rimozione dell'ossido superficiale) con una conseguente riduzione del costo per tonnellata. Avendo proprietà Meccaniche superiori, possono essere scelti al posto degli acciai strutturali speciali che richiedono invece particolari trattamenti termici, dunque un'ulteriore riduzione dei tempi di produzione. Durante la II Guerra mondiale il criterio con cui si progettavano le strutture era basato sul carico Massimo di rottura, mentre il carico di snervamento veniva trascurato, e poco risalto era dato anche a concetti come la resilienza e la saldabilità. Normalmente le pannellature venivano unite tra di loro mediante rivetti, con quindi un aumento del peso considerevole a causa della posizione dei rivetti. Di conseguenza la rivettatura è stata eliminata con la saldatura, ma andiamo per gradi. Mediamente il contenuto di carbonio di questi acciai era intorno allo 0.3% il che limitava molto la saldabilità degli acciai. In oltre, un tenore di carbonio del genere in acciai ferritico-perlitici porta ad avere la transizione duttile fragile già sopra gli 0 °C. Col passare del tempo la rivettatura fu sostituita dalla saldatura e per fare questo si ridusse il tenore di carbonio degli acciai. Dato che la riduzione del carbonio mi riducono le proprietà, per compensare l'abbassamento delle proprietà Meccaniche il contenuto di Mn venne aumentato (contributo di rafforzamento per soluzione solida). Queste operazioni però non modificarono minimamente la duttilità. Le strutture Saldate non pongono nessun freno alle cricche che possono percorrere l'intero cordone di saldatura. Al contrario le strutture rivettate sono più sicure perché una cricca non può passare da una lastra alla successiva essendo entità distinte. Questa quindi è una negatività importante, dunque per moltissimo tempo nelle applicazioni aeronautiche non sono ancora utilizzate. Giungendo alle *nave liberty* che si spaccarono perfettamente a metà. Il motivo per cui successe questo era dato dal fatto che ampie porzioni di cordoni di saldatura erano fatti male perché i saldatori avevano fretta, la qualità dell'acciaio era minore, la transizione duttile fragile era di 10-15° e dato che la nave viaggiava nelle acque con temperatura di 4° si capisce bene l'esito della struttura. Inoltre è da considerare anche il fatto che si considerava solo il carico di rottura di laboratorio, dunque su un piccolo provino e questo valore veniva trasportato su larga scala senza considerare l'effetto scala che come sappiamo riduce drasticamente la tenacità degli oggetti e inoltre su larga scala si possono trovare maggiori difetti rispetto ad un piccolo provino di laboratorio. Questi difetti propagandosi nella saldatura hanno causato la rottura di queste navi liberty.



diminuito ulteriormente. ma questo provoca una diminuzione delle proprietà meccaniche, per questo si aggiunse dell'alluminio per ottenere dei grani più fini (affinamento di grano), che permette un miglioramento della duttilità e dunque un abbassamento della transizione duttile-fragile. Avere un grano di dimensioni inferiori infatti, migliora le proprietà Meccaniche e abbassa la temperature di transizione. Grazie a queste modifiche la tensione di snervamento raggiunge i 300 Mpa mentre la transizione duttile fragile venne spostata intorno allo 0°C, dunque nulla ancora di eccezionale, pertanto ulteriori miglioramenti vennero ottenuti sfruttando il rafforzamento attraverso precipitazione. Il risultato venne ottenuto aggiungendo Nb Ti o V in piccole quantità negli acciai. Nonostante questo, la resilienza era ancora piuttosto bassa perché all'epoca il controllo della dimensione del grano durante la laminazione a caldo non era ancora noto. Il grande salto tra acciai di base e quella di qualità richiede un miglioramento della linea di produzione che potesse implementare un maggiore controllo nella dimensione del grano. L'affinamento di grano può essere ottenuto con delle ricotture di ricristallizzazione ma risulta una scelta piuttosto costosa per questo si è introdotta la laminazione a caldo controllata. Il processo termo-meccanico permette di ridurre lo spessore delle lastre via laminazione a caldo. Ma in questa modalità, la temperature è controllata attentamente lungo tutto il processo, in questo modo si ottiene il semilavorato con la giusta microstruttura in un solo passaggio . **La laminazione a caldo** inizia portando il pezzo ad una temperature superiore ad A3, in modo che il materiale sia totalmente austenitico. A questo punto del processo il semilavorato è ancora 5 volte più spesso del dovuto. l'austenite ricristallizza durante le fasi d'attesa. La temperature poi è abbassata a 900 °C e si esegue una seconda laminazione, in questo step la temperatura è mantenuta tra i 900 e i 750 °C. La rollatura viene eseguita in più passaggi fino al raggiungimento dello spessore richiesto. In questo intervallo di temperature carburi molto fini possono precipitare ed impediscono l'ingrossamento del grano austenitico. Al raffreddamento l'austenite si trasforma generando strutture ancora più fini essendo il grano austenitico già piccolo in partenza. Questi acciai così prodotti mostrano un carico di snervamento di 450 MPa e una transizione duttile fragile intorno ai -80 °C. Quindi grazie alla laminazione a caldo controllata che si è fatto il vero e proprio salto verso gli acciai di qualità. Dunque non solo la legge di delpech è soddisfatta, ma con queste caratteristiche è possibile anche utilizzare i BCC a temperatura ambiente e non si rischia di avere una rottura fragile per pochi gradi di temperatura.

accostare degli acciai di base per colmare qualche buco di produzione. Insieme all'acciaio per tondini, nella categoria degli acciai di qualità troviamo anche gli acciai alto resistenti, gli acciai ad alta resilienza, i laminati per imbutitura ed il cor-ten.

Per rafforzare il calcestruzzo si parla di tondini di acciaio. Solitamente rientrano solo nella categoria di acciai di qualità per rientrare nei range delle normative costruttive. Per i tondini di cls bisogna appellarsi al **EUROCODE 2**, che è la normativa che si occupa di regolamentare la produzione di questi componenti. In base a questa normativa, l'acciaio **B450C** (l'ultima lettera può essere A,B,C: C si riferisce ai laminati a caldo, che sono i tondini più duttili e possono essere utilizzati anche per l'antisismicità; A sono quelli laminati a freddo ed hanno una resistenza e duttilità inferiore e non possono essere utilizzati in zona sismica) deve presentare un carico di snervamento ed un carico di rottura pari a 450 and 540 MPa rispettivamente. Anche la duttilità deve essere strettamente regolamentata. Per questi acciai anche la "Agt" viene normata, si tratta della deformazione raggiunta in corrispondenza del Massimo sforzo e non va confusa con l'allungamento a rottura (che è più basso). Il rapporto fra carico di rottura e di snervamento è un altro parametro ripreso nella normativa. Infine, anche il rapporto fra il carico di **snervamento caratteristico** e quello **nominale** deve essere calcolato e in ottemperanza allo standard.

Tra le varie prove i tondini vengono sottoposti a **prova di piegatura**. Corrisponde ad una flessione su 3 punti (in cui tutta la prova è definita in normativa). Il punzone centrale preme e forma una piegatura di 90 gradi del ferro grazie agli altri due cilindri su cui poggia il ferro. Dopo la piegatura si effettua una contro prova in cui il tondino viene raddrizzato fino ad un certo angolo. Alla fine del test i ferri vengono sottoposti a laser ottici, per controllare che il tondino non presenta alcun tipo di cricca o danneggiamento, affinché la prova sia superata. Solo se il tondino supera questo test può essere commercializzato. I tondini presentano una nervatura per favorire l'aggrappaggio al cemento. Questa nervatura è formata durante la laminazione. Il diametro dei tondini varia tra 6-40 mm. Solamente acciai molto saldabili possono venire impiegati per produrre tondini e la composizione chimica (almeno per certi elementi) è strettamente regolamentata. I limiti di composizione sono i seguenti:

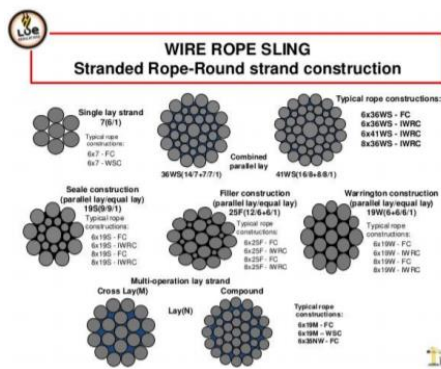
$$C < 0.22 \quad P < 0.05 \quad S < 0.05 \quad Cu < 0.8 \quad N < 0.012$$

### **CICLO PRODUTTIVO TONDINI PER C.A.**

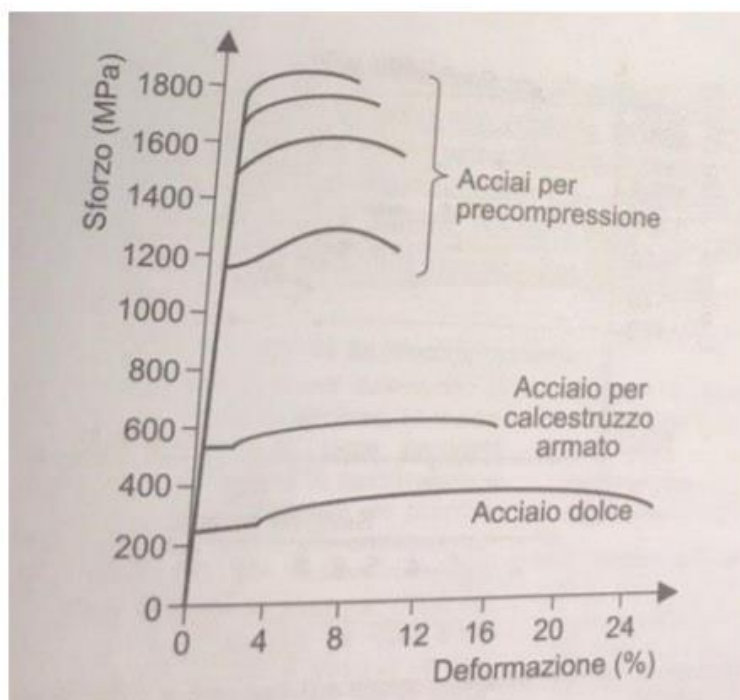
Storicamente si ottenevano esclusivamente attraverso laminazione a caldo. Per questo motivo, si utilizzavano acciai contenenti lo 0.5 % di C legati con Mn e Si. Poiché oggi anche la saldabilità è strettamente regolamentata, il contenuto di C è stato ridotto. La diminuzione del C portava un conseguente abbassamento delle proprietà Meccaniche al di sotto delle specifiche. L'introduzione di moderni strumenti di fabbricazione permisero di avere ottime proprietà Meccaniche con contenuti di C non più alti dello 0.2%. Le nuove tecnologie per produrre tondini con elevate saldabilità, alta resistenza e duttilità. Il raggiungimento di questi obiettivi apparentemente inconciliabili è stato permesso da:

- l'uso di trattamenti termici
- Aggiungere degli elementi in lega in piccole quantità (microalloying con V, Nb)
- L'uso della deformazione plastica a freddo. Si fa solo con tondini di diametro inferiore ai 10 mm. La duttilità però si abbassa drasticamente e infatti i valori ottenuti sono compatibili solo con lo standard riportato per l'acciaio B450C. (Solo la categoria a caldo dunque C).

Ogni lotto di tondino potrebbe avere delle proprietà meccaniche leggermente differenti. Per questa ragione bisogna introdurre dei concetti statistici così che all'interno di un'enorme costruzione di acciai, le proprietà degli acciai oscillano attorno ad un valore medio standard.



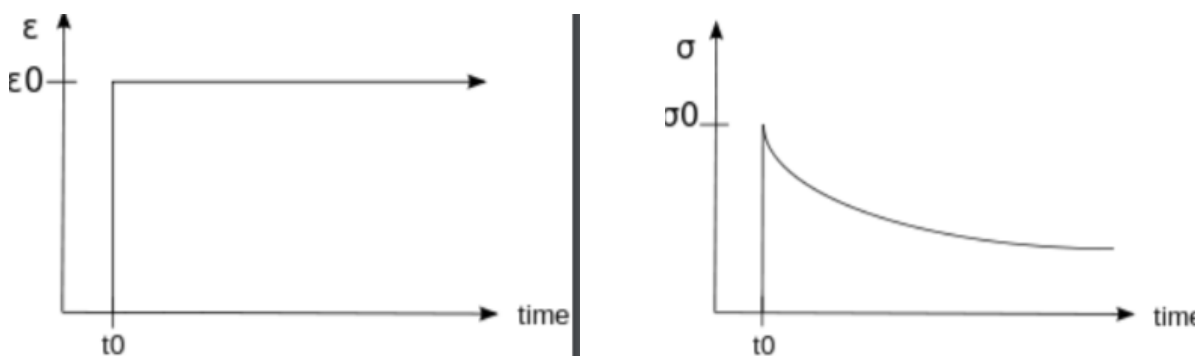
Possiamo fare un confronto tra i diversi acciai che abbiamo analizzato finora( acciai dolci, e quelli utilizzati per il c.a.):



I punti caratteristici dello snervamento inferiore e superiore non sono più visibili e l'allungamento a rottura è drasticamente ridotto. Questi acciai dunque risultano molto molto meno duttili. Si passa da un 25% di deformazione per acciai dolci; 16% per acciai da c.a.; e nel migliore dei casi al 10% per quelli in precompressione altoresistenziali. Quelli migliori presentano un elongazione del 5% in corrispondenza del carico massimo e dell'8% in corrispondenza del carico di rottura. Il contenuto di Carbonio è tipicamente dello 0.9%. Vengono aggiunti inoltre altri elementi in lega come il Mn, Cr, Mo e V. Questi elementi modificano la temprabilità degli acciai e di conseguenza anche la microstruttura finale di quest'ultimi alla fine del processo di produzione. La composizione chimica ed il processo di produzione sono controllati in modo molto attento per evitare la formazione di composti infragilenti, che avrebbero un effetto deleterio sui componenti finali. Infatti già questi acciai non hanno molta duttilità, dunque se si inseriscono degli elementi infragilenti o se sono presenti cricche, possono causare dei danni immani alla struttura dunque devono essere ben

dunque l'intera struttura viene compromessa in quanto si riduce la precompressione e pertanto le proprietà meccaniche dell'elemento in precompressione. Applicando un carico dall'esterno il materiale reagisce con una deformazione e la tensione via via diminuisce con il tempo. Quello che ci interessa è la variazione percentuale dallo stato iniziale allo stato finale e vedere se questa variazione è minore rispetto al limite posto per legge. La variazione può essere formulata tramite modelli **aereologici**.

Il rilassamento degli sforzi si misura applicando una deformazione fissa per un tempo determinato. Si applica una deformazione che provochi uno stato tensionale pari al 70% del carico di snervamento e questa condizione è mantenuta per 1000h. La variazione di carico/tensione è misurata durante la prova e la variazione percentuale viene confrontata coi limiti di legge.



### PROTEZIONE CONTRO LA CORROSIONE (NEGLI ACCIAI PER PRECOMPRESSO)

Essendo questi molto ricchi di carbonio sono molto suscettibili alla corrosione, soprattutto negli ambienti marini, ma anche banalmente con l'umidità, un alto contenuto di carbonio produce la corrosione dell'acciaio. Se abbiamo corrosione la sezione resistente diminuisce fin quando diventa insufficiente e dunque la sezione risulta essere collassabile in modalità fragile. Per controllare questa evenienza dunque durante la costruzione delle strutture gli acciai sono controllati in loco per evidenziare eventuali segni di corrosione inoltre mi affido al cemento che protegge l'acciaio dalla corrosione perché i due sono in stretto contatto (strutture pretensionate). In questo caso bisogna avere cura di proteggere anche le parti di armature esterne al getto che vengono ricoperte da calcestruzzo. Di base nelle strutture precomprese dove il tondino è protetto dal cemento questa corrosione non avviene perché il cls lo protegge dalle intemperie esterne. Più complesso è il caso delle strutture post-comprese dove i tondini o trefoli sono conservati in speciali guaine, i componenti d'acciaio vanno protetti con malte iniettate successivamente al tensionamento (le strutture in esame vengono chiamate bonded post-tensioning). In alcuni casi invece i tondini non sono rivestiti da malta e sono lasciati liberi di scorrere nelle guaine. In questi casi si usano dei grassi per proteggere i componenti metallici (strutture unbonded post-tensioning). Questi acciai se adeguatamente protetti, possono essere usati all'aria aperta per realizzare reti di contenimento.

### TIPOLOGIE ACCIAI PER PRECOMPRESSI

- **FILI:** venduti in bobine, vengono poi filati per realizzare trefoli o trecce. Le trecce contengono solo 2 o 3 fili avvolti ad elica mentre i trefoli sono gruppi di fili avvolti a spirale intorno ad un filo centrale diritto.
- **BARRE:** sono già raddrizzati possono presentare una superficie liscia oppure caratterizzata da una rigatura che può essere sull'intera sezione oppure solo per un certo tratto.

Norma	Qualità degli acciai	Spessore nominale dell'elemento (t)			
		t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
		f <sub>yk</sub>	f <sub>tk</sub>	f <sub>yk</sub>	f <sub>tk</sub>
UNI EN 10025-2	S235	235	360	215	360
	S275	275	430	255	410
	S355	355	510	335	470
	S450	440	550	420	550
UNI EN 10025-3	S275N/NL	275	390	255	370
	S355N/NL	355	490	335	470
	S420N/NL	420	520	390	520
	S460N/NL	460	540	430	540
UNI EN 10025-4	S275M/ML	275	370	255	360
	S355M/ML	355	470	335	450
	S420M/ML	420	520	390	500
	S460M/ML	460	540	430	530
UNI EN 10025-5	S235W	235	360	215	340
	S355W	355	510	335	490

Vengono riportati in funzione dello spessore nominale dell'elemento.

La saldabilità di questi acciai deve essere estremamente alta, per saldare insieme diversi profili e creare delle strutture più complesse, per cui la loro composizione chimica va controllata con attenzione. Secondo la normative, possono essere saldati solo con **tecniche ad arco elettrico**. Le saldature vanno verificate con tecniche NDT (non distruttive), dove la più importante è la **verifica ad ultrasuoni**. In questo test c'è un tecnico con un trasduttore che viene collegato con il cordone di saldatura che permette di verificare se sono presenti delle difettosità che non si vedono ad occhio nudo. Questo trasduttore emette degli ultrasuoni, si calcola il tempo che il suono necessita di passare da una parte all'altra del cordone e se all'interno ci sono delle difettosità allora si possono avere dei segnali di ritorno ritardati, o si possono avere dei picchi che nella normalità non abbiamo confrontando con un tracciato normale. Le proprietà Meccaniche nella regione del cordone di saldatura e nell'antistante zona termicamente alterata non possono essere troppo dissimili da quelle del materiale base. Ogni volta che eseguo una saldatura modifico la microstruttura all'interno e nella zona termicamente alterata io sto facendo un rinvenimento ad alta temperatura, quindi mi aspetto delle modifiche e alterazioni microstrutturali. se la saldatura è fatta ad arte non si riscontrano criticità nonostante si hanno delle trasformazioni in corrispondenza delle zone di saldatura. Si possono poi indicare dei requisiti di resilienza mediante le note sigle JR, J0, J2 e K2 (proprietà meccaniche ad impatto).

### WEATHERING STEELS

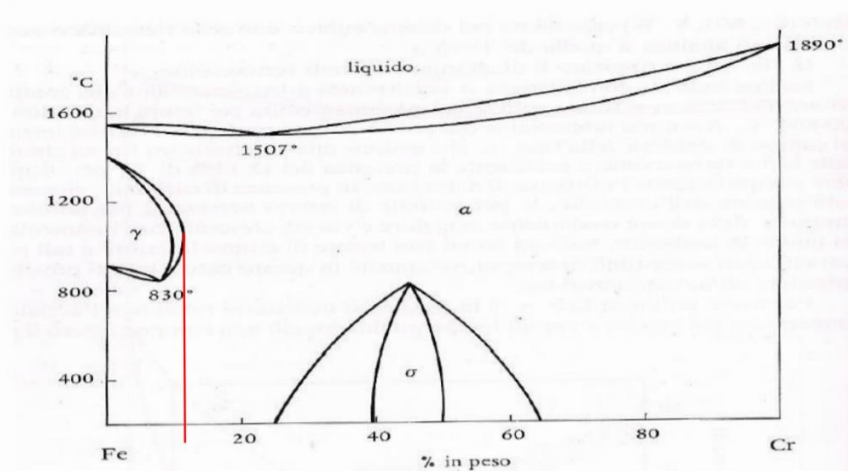
I weathering steels sono acciai strutturali, meccanicamente molto resistenti, con una composizione chimica alterata. Sono state infatti aggiunte piccole quantità di Rame, Fosforo e Cromo che permettono di limitare la corrosione degli acciai a seguito degli elementi atmosferici. Il nome commerciale con cui si tende ancora oggi a chiamare l'intera categoria è Cor-ten (trademark name). Questi acciai, se la composizione è esattamente quella corretta per un weathering steel, si corrodono alle intemperie ma poi la corrosione rallenta drasticamente. non possono essere immerse in acqua o interrati. Dopo qualche anno, lo strato di ruggine che si è formato, risulta molto ben adeso al materiale sottostante e funge da barriera, rallentando enormemente i fenomeni di corrosione successivi. L'ossido che si forma non ha il classico colore della ruggine ma è aranciato giallognolo. Può essere prodotto sia in barre che in pannelli. Ha sia un vezzo estetico che proprietà strutturali. La peculiarità è che la composizione chimica deve essere centrata al 100% altrimenti si ha una resistenza alla corrosione pessima. Dunque bisogna necessariamente attendere qualche anno per la formazione di questi ossidi misti che si formano che devono essere perfettamente adesi. A bisogno di andare a regime il materiale. E' anche importante che questo materiale si asciughi

Lezione 24/03/2020

## ACCIAI INOX

Sono degli acciai che vengono utilizzati soprattutto negli ambienti molto corrosivi ma non sono molto performanti in termini meccanici rispetto altri acciai. Si collocano come caratteristiche tra quelli dolci e quelli altoresistenziali, ma hanno il grande vantaggio di essere molto forti contro la corrosione. Non subiscono fenomeni corrosivi ma in realtà questa caratteristica deriva dal fatto che sono già 'ossidati' in partenza sulla superficie **passivazione**. È la formazione di uno strato di decine di nanometri di un ossido che protegge il materiale dall'unione del ferro con l'ossigeno. Per far avvenire questo processo nella composizione degli acciai deve essere presente il Cromo almeno al 12%. Se si ha questa percentuale si formerà questo strato passivante e compatto di **CROMIA**  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Questo strato impedisce al ferro di ossidarsi un'altra volta. Dire dunque che gli acciai inox non si ossidano è sbagliato perché in realtà si ossida in superficie solo in prima istanza così da non far ossidare il resto successivamente con l'impatto con l'ossigeno. Il tenore del carbonio deve essere molto basso in quanto il cromo si potrebbe legare con il carbonio, dunque una quota parte di cromo non sarebbe più in soluzione solida per formare questo strato passivante e se scendiamo sotto il 12% l'acciaio potrebbe subire corrosione. Dunque per essere sicuri di avere un acciaio inox dobbiamo avere contemporaneamente il 12% di Cr tutto nella soluzione solida e una bassa concentrazione di carbonio. Ovviamente questa percentuale è il valore minimo, maggiore sarà il Cr, maggiore sarà la resistenza alla corrosione. Possiamo analizzare anche il diagramma Fe-Cr:

DIAGRAMMA DI STATO Fe-Cr

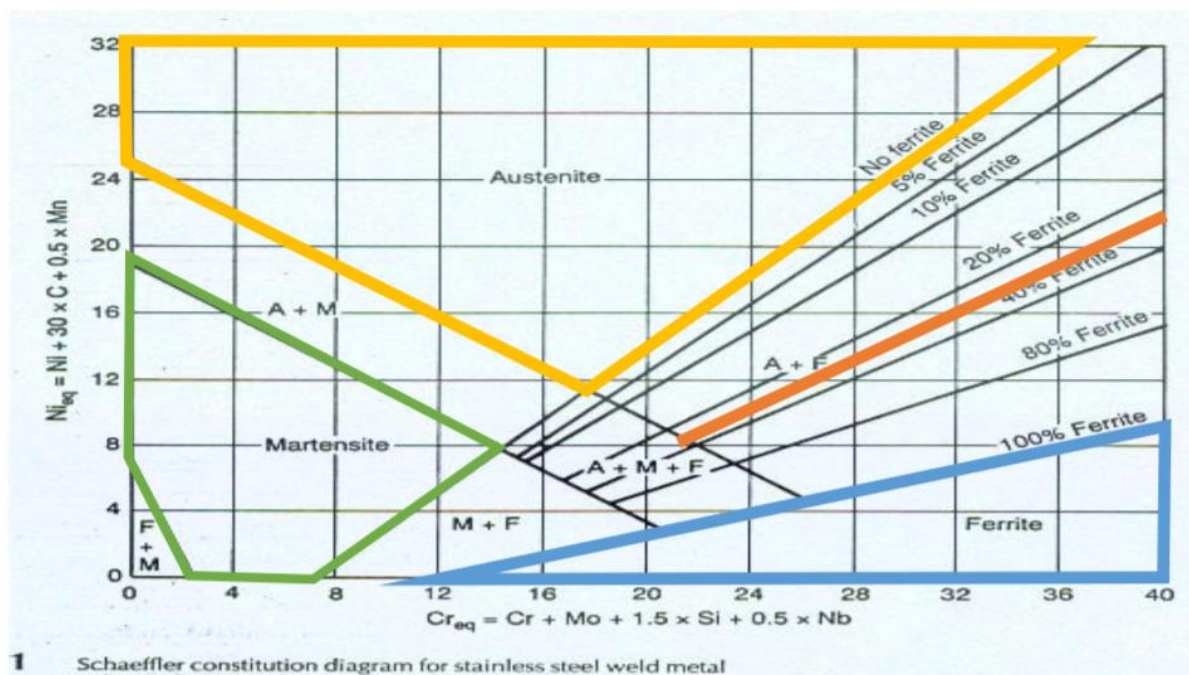


Il cromo ha un effetto stabilizzante nei confronti della ferrite, dunque è detto alpha stabilizzante. Il campo di esistenza di alpha è praticamente ovunque infatti. Il campo austenitico è notevolmente ridotto. Il diagramma spazia dal ferro puro al cromo pure. Basta solo il 10% di cromo per generare alpha per tutte le temperature. Da temperatura ambiente fino alla fusione seguendo la linea rossa, non incontriamo nessuna trasformazione di fase. Se il mio tenore di cromo è basso ho trasformazione invece, ma di base se garantisco un tenore di cromo sufficiente al di sopra del 10% e rispetto il fatto di avere riscaldamenti e raffreddamenti molto lenti, sopprimo ogni tipo di trasformazione. Per determinate composizioni di ferro e cromo può avvenire la cosiddetta **trasformazione congruente** ovvero il passaggio da alpha a sigma e viceversa. Per questo fatto infatti non possiamo avere neanche una grossa quantità di cromo altrimenti a temperatura ambiente si andrà a formare questa fase aciculare sigma, che ha una consistenza particolarmente svantaggiosa per gli acciai perché oltre ad

espressa in Ni equivalenti e Cr equivalenti. Per ottenere questo diagramma si fece un esperimento molto semplice. Si considera un cordone di saldatura, dunque la lega iniziale si trasformava, si attendeva che il cordone si solidificasse e si studia la composizione finale. Dunque alterando la composizione del nostro sistema, schaeffler si rese conto di quali fase rimanevano stabili a raffreddamento. E' fondamentale il passaggio da liquido a solido rispettando una determinata velocità di raffreddamento in aria che è molto più elevata rispetto a quella prevista lenta nei diagrammi di stato. Questo diagramma è molto utile perchè non prende in considerazione solo nichel e cromo ma tutti gli elementi che sono simili a questi due. Si introducono così il cromo-equivalente e il nichel-equivalente. Per ottenere questi due nuovi composti, il carbonio il silicio la manganese e il niobio vengono moltiplicati per alcuni coefficienti:

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * \%C + 0.5 * \%Mn$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 * \%Si + 0.5 * \%Nb$$



1 Schaeffler constitution diagram for stainless steel weld metal

Il nichel e il cromo non vengono moltiplicati per 1. Il carbonio è un forte stabilizzante dell'austenite, infatti lo si capisce dal suo coefficiente molto alto. Bastano poche percentuali di carbonio per avere un contributo molto alto sul nichel equivalente. Sull'asse delle Y abbiamo il Nichel-eq, mentre sulle X abbiamo il Cr-eq. Combinando Nichel e cromo equivalente, vogliamo capire dal grafico la microstruttura finale. Se si ricade nella regione verde ricadiamo nella **martensite** ricca di cromo e nichel. Quando abbondiamo il cromo equivalente, rientriamo nel campo di acciai inox **ferritici** (linea blu) fino alla fusione. Nel campo più in alto troviamo un raffreddamento **Austenitica** (regione gialla). Abbiamo poi una categoria di acciai detta **duplex o bifasici** dove abbiamo una compresenza di austenite e ferrite(50% a testa). Sono degli acciai fortemente prestanti sia meccanicamente che alla corrosione. Questi sono i più cari e i più costosi, ma possono essere applicati in moltissimi campi, soprattutto quando si parla di conservazione del petrolio. Pertanto riassumendo possiamo distinguere gli acciai inox in 4 differenti tipologie:

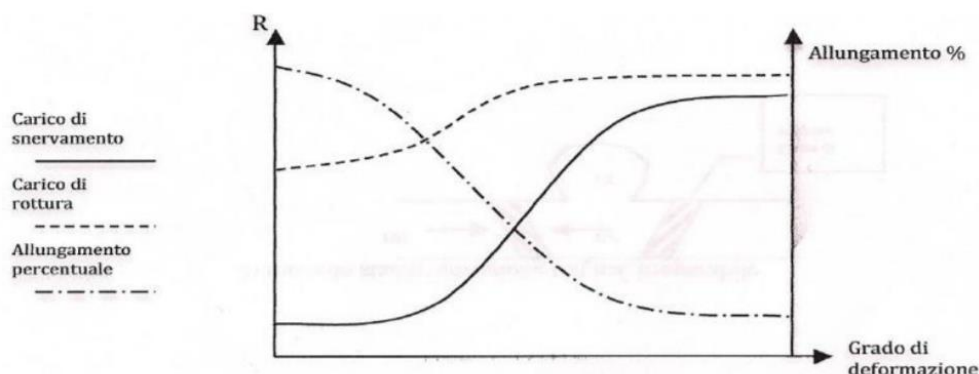
1. **Ferritici** (acciai resistenti alla corrosione, con struttura puramente ferritica)

- X2CrNi18-11 AISI 304L

(L sta per low carbon e ovviamente è una lega più costosa in quanto tuttora è più difficoltoso il processo per portare la percentuale di carbonio a livelli minimi). Questo piccolo contenuto in meno di carbonio, ci fa alzare il contenuto di Nichel, questo perché la variazione di carbonio va moltiplicata per 30, dunque devo aggiungere il nichel. Il 304L nasce per esigenze particolari, soprattutto nei sistemi sotto pressione, dove risulta vincente ridurre il carbonio perché miglioro la saldabilità. Questi mi costano di più perché diminuire il tenore di carbonio è una tecnica complicata, e questo implica un dosaggio maggiore del nichel. per le proprietà meccaniche il carico a rottura e snervamento sono basse, ma non è un problema perché a seconda di dove dobbiamo applicarli noi ci adeguiamo all'acciaio che abbiamo. La cosa particolare è anche l'allungamento A%. Essendo austenitici a temperatura ambiente sfruttano lo scorrimento dei materiali CFC che risultano essere materiali fortemente deformabili, dunque il fatto di avere questo tipo di materiale ci permette di utilizzare questi materiale anche dopo la deformazioni plastiche di una certa importanza. Le pentole sono fatte con questi tipi di acciai in quanto è fortemente deformabile e dunque possiamo dare diverse forme alle pentole. Questo utilizzo non è possibile in un materiale ferritico in quanto ha un allungamento a rottura minore della metà rispetto all'austenitico. C'è ovviamente un lato negativo, in quanto questo è amagnetico dunque non è possibile utilizzarlo su piastre ad induzione, bisogna aggiungere un fondello di materiale ferritico e dunque per conduzione il calore passa prima sul piastrello del materiale ferritico con reticolo BCC e poi scalda la pentola austenitica. Quindi la maggior parte delle pentole sono in acciaio austenitico con il fondello in ferritico. Il fatto che non è magnetico lo rende praticamente invisibile ai radar dunque moltissime applicazioni STAND in medicina sono fatti in questa maniera. Il 304 è anche saldabile perché possiede una zona termicamente alterata prestazionale (ZTA), poiché, anche con un grano ingrossato, è pur sempre fatto da grani austenitici deformabili e dunque buoni da saldare,essendo anche CFC. Inoltre si può dire dunque che non presenta una transizione duttile fragile, dunque si possono fare applicazioni di tipo criogeniche, dunque un utilizzo a basse temperature.

All'aumentare del grado di deformazione, cambiano le proprietà meccaniche dell'acciaio inox-austenitico.

Fatta eccezione della duttilità che diminuisce con il grado di deformazione, si vede come il materiale indurisca e quindi aumentano le proprietà meccaniche. L'incrudimento avviene molto lentamente, ma posso utilizzare questa tecnica per rafforzare il materiale. A scapito della duttilità anche i materiali CFC possono essere rafforzati per incrudimento. L'incrudimento può essere utilizzato efficacemente per rafforzare il materiale, a scapito di alcuni punti percentuali di allungamento.





DENOMINAZIONE	COMPOSIZIONE	R <sub>0,2</sub>	A%	PRI
AISI 302	X10 Cr Ni 18-09	280	45	
AISI 304	X5 Cr Ni 18-10	250	55	18
AISI 304L	X2 Cr Ni 18-11	220	55	
AISI 316	X5 Cr Ni Mo 17-12	260	55	24,5
AISI 316L	X2 Cr Ni Mo 17-12	240	55	
AISI 321	X6 Cr Ni Ti 18-11	250	50	
AISI 347	X6 Cr Ni Nb 18-11	260	40	
A PARTE				
AISI 309	X6 Cr Ni 23-14	320	45	
AISI 310	X6 Cr Ni 24-20	350	45	

AISI 309 e 310 possiedono un tenore di Cr così elevato che si possono formare anche più carburi senza perdita di resistenza a corrosione. Per mantenere un struttura austenitica, hanno anche tenori più elevati di C (per aumentare Ni-equivalente) e Ni. Questi acciai vengono comunemente denominati **refrattari**, proprio per l'elevato contenuto di Cr, perché adatti a lavorare ad alte temperature; per tale utilizzo sono caratterizzati da una bassa sensibilità e una buona resistenza al creep (migliorata in parte anche dalla presenza dei carburi). Una comune applicazione per il 309 e 310 è per cestelli contenenti i pezzi destinati ai trattamenti termici nei forni, neanche le atmosfere riescono infatti ad aggredirli in quanto passivati in superficie.

### INOX MARTENSITICI

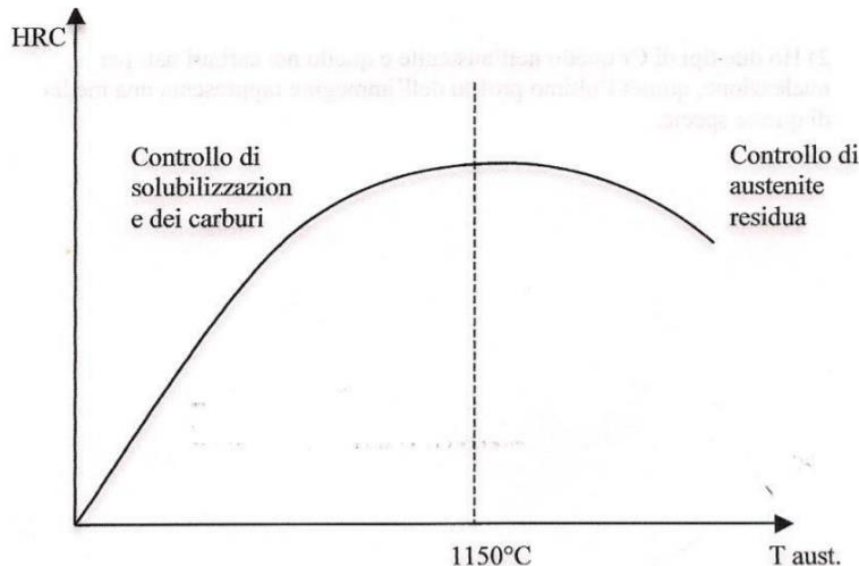
Classificati anche come **acciai da utensile**, per via dell'elevata resistenza ad usura dato l'elevato contenuto di carbonio. Sono ovviamente anche resistenti alla corrosione, in misura minore rispetto agli altri acciai inox. Queste leghe possiedono un tenore di carbonio maggiore delle altre, ma questo genera precipitazione di carburi. Il nostro obiettivo, in questo caso, è quello di ottenere una matrice tenace e una fase resistente all'usura (carburi) la resistenza alla corrosione passa in secondo piano. Bisogna trovare un giusto compromesso per adoperarli. Sono acciai relativamente poveri di Cr e si distinguono fra loro per via del costante aumento di C, il quale aumenta la resistenza all'usura, ma diminuisce la resistenza alla corrosione, il loro uso è consigliato in ambienti poco aggressivi. Ai primi due acciai non corrisponde una struttura martensitica spontanea: essa deve essere ottenuta con un opportuno trattamento di bonifica (austenitizzazione, tempra e rinvenimento), mentre gli AISI 440 sono autotempranti.

I martensitici più utilizzati sono questi sottostanti:

**temprante molto drastico** per acciai con poco C, la curva K tende a spostarsi verso l'alto e verso destra.

2. Ottengo carburi in una matrice martensitica, è la struttura che prediligo in quanto incontro la curva k in basso e quindi i grani sono fini.
3. Incontrando la curva K più in alto, si genereranno meno carburi, per via della velocità di raffreddamento, ma più grandi, data la maggiore permanenza in temperatura; al contrario se ne generano di più piccoli, ma ben distribuiti incontrando K a temperature inferiori (caso 2). Nel 410 riesco a solubilizzare completamente i carburi nella matrice austenitica. Nel 440 non riesco ad avere solo  $\gamma$ , ma  $\gamma$  + **carburi (primari)**.
4. Carburi grossolani + ferrite e perlite. A basse velocità di raffreddamento, i carburi primari si ritrovano a crescere, abbassando la tenacità del materiale. Incontreremo la curva K molto molto in alto e dunque con carburi molto molto grossolani.

A secondo della composizione chimica devo stare attento a scegliere la temperatura di austenizzazione. Al progredire della temperatura i carburi primari iniziano a dissolversi. Tolto il 410 che ha un composizione in cui questa situazione non si presenta, per tutti gli altri tipi come ad esempio il 440, ricchissimo di carburi, se mi porto a temperature troppo elevate, c'è il rischio che dissolva una quantità di carburi troppo eccessive e va a finire nell'austenite che ha una funzione nettamente stabilizzante dell'austenite che quindi riuscirà a mantenersi tale a temperature più basse e martensite start e finish scenderanno più in basso proprio perchè l'austenite è più stabile. Mentre sto temprando potrei arrivare a temperatura ambiente ancora con austenite residua. Questa è una condizione critica in quanto riduce le caratteristiche meccaniche del materiale.



Per temperature molto elevate sovrassaturo l'austenite di carbonio e quando tempo c'è il rischio di formare austenite residua (CFC) super duttile con caratteristiche pessime. Il mix martensite austenite ha caratteristiche pessime e dunque si deve cercare di evitarla assolutamente.

Il rinvenimento va scelto in base alla tipologia di acciaio che stiamo costruendo. Il processo di rinvenimento, essendo leghe ternarie (Fe-C-Cr) e quindi sensibili a fragilità da rinvenimento, può essere effettuato con due metodi:

1. Rinvenimento a circa  $200^{\circ}\text{C}$ , quando si deve mantenere la resistenza all'usura, garantendo la massima durezza. Esempi:
  - **Coltelli** in inox martensitico, rinvenuti a questa T per permettere il mantenimento dell'affilatura della lama (a differenza dei coltelli da design prodotti in inox austenitico facile da lavorare). Il coltello martensitico ha sempre