

CURVE DI BAIN

Le strutture che appaiono nel diagramma Fe-C sono ottenute in seguito a raffreddamenti molto lenti. Quando i raffreddamenti sono di tipo diverso, si ottengono via via strutture non previste nel suddetto diagramma, variabili con la velocità di raffreddamento.

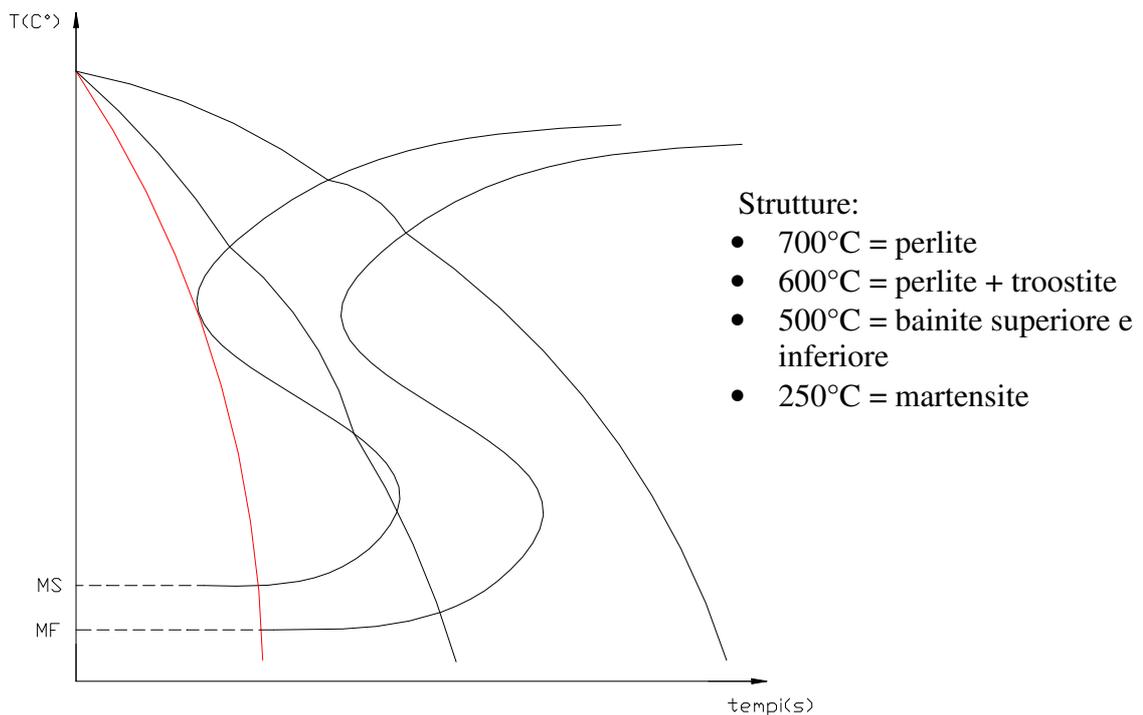
Le curve di Bain, dal nome dello studioso americano Bain che le ha studiate, offrono la possibilità di individuare le varie strutture che si possono ottenere partendo dall'austenite con varie velocità di raffreddamento. Le suddette curve sono ottenute sperimentalmente e vengono riportate in un sistema di assi cartesiani nel quale in ascissa abbiamo i tempi e in ordinata le temperature.

Si possono distinguere due tipi di curve:

1. Curve di Bain TTT (tempi, temperature, trasformazioni). Ottenute in seguito a trasformazioni isoterme;
2. Curve di Bain TRC (trasformazione a raffreddamento continuo). Ottenute per trasformazione anisotermica.

1. La trasformazione è detta isotermica perché i campioni studiati vengono lasciati per un certo tempo in un mezzo raffreddante ove la temperatura si mantiene costante (es. bagno di sali).
2. La trasformazione è detta anisotermica perché i campioni studiati vengono raffreddati in modo continuo (es. acqua).

Curve di Bain TTT per un acciaio eutettoide



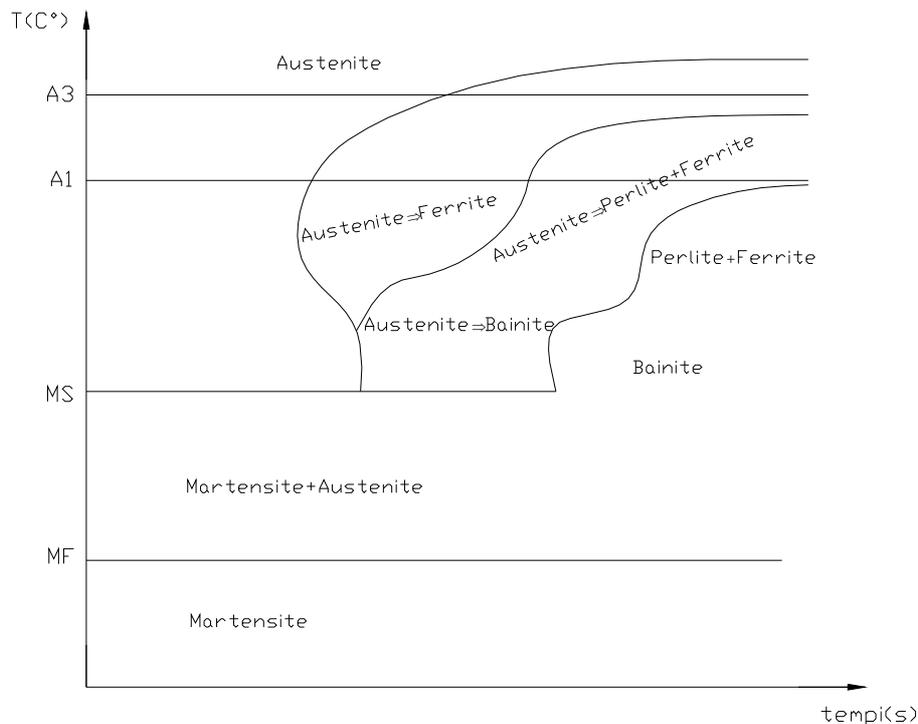
Variando la velocità di raffreddamento, si ottengono diverse curve che possono attraversare le curve di Bain. Aumentando la velocità di raffreddamento queste curve si avvicinano all'asse delle temperature. Nell'attraversare le curve di Bain, le curve di raffreddamento subiscono una deviazione perché, avendo l'origine di una nuova struttura, viene rallentata la variazione della temperatura in funzione del tempo per lo sviluppo di calore di trasformazione che si oppone al raffreddamento.

1. Raffreddamento molto lento:
 - $T=700^{\circ}\text{C}$ - Si ha la completa trasformazione dell'austenite in perlite lamellare grossolana e molto tenera ($\text{HRC}=5$; $\text{HB}=300$; $R=900 \text{ N/mm}^2$; $A=15\%$).
 - $T=600^{\circ}\text{C}$ -Si ha perlite fine più dura ($\text{HRC}=30$).
2. Raffreddamento lento:
 - $T=500^{\circ}\text{C}$ -Si ha la completa trasformazione dell'austenite in troostite simile a perlite estremamente fine, quasi puntiforme, più dura ($\text{HRC}=42$). Presenta fragilità, quindi si deve evitare, o si può avere anche una struttura mista di perlite e troostite.
 - $T < 500^{\circ}\text{C} > M_s$ - La trasformazione isoterma dell'austenite origina strutture di forma aciculare (ad aghi), dette bainiti. Queste, costituite da ferrite molto tenace e da cementite, posseggono duttilità, buona resistenza a trazione;
 - si ha: Bainite superiore ($\text{HRC}=45$) a $T=400^{\circ}\text{C}$
 - Bainite inferiore ($\text{HRC}=54$) a $T=300^{\circ}\text{C}$
3. Raffreddamento rapido:
 - Si ha la parziale trasformazione dell'austenite in troostite. L'austenite residua si trasforma in martensite tra M_s e M_f .
4. Raffreddamento molto rapido :
 - Si ha la trasformazione diretta dell'austenite in martensite, senza comparsa di strutture intermedie si ha la massima durezza ($\text{HRC}=65$). La martensite si presenta sotto forma di cristalli aciculari (ad aghi).

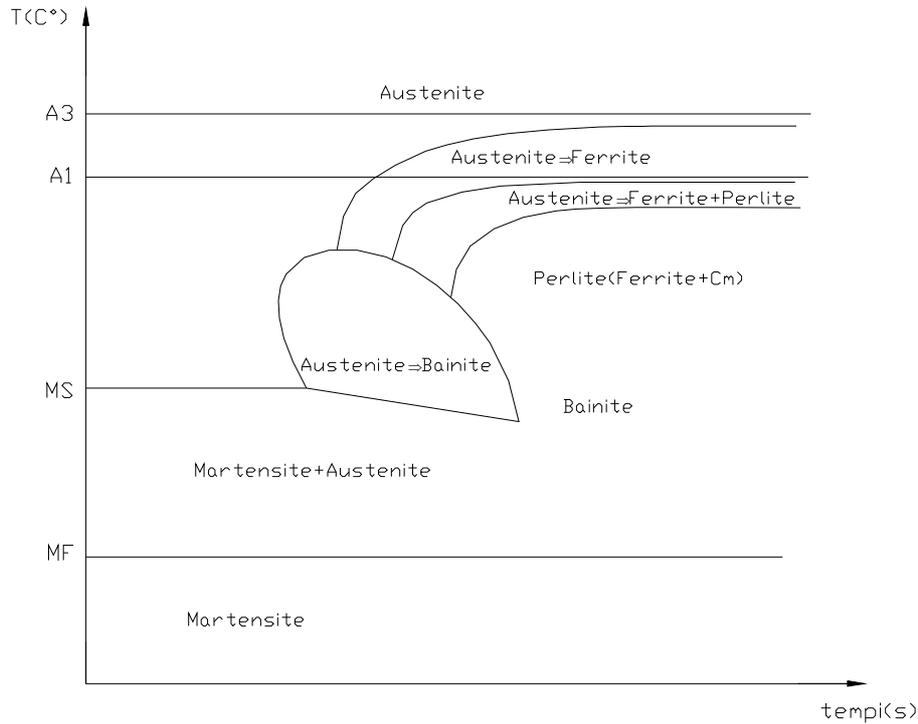
Velocità critica di tempra

Con la velocità di raffreddamento, indicata sulle curve di Bain TTT per un acciaio eutettoide con il colore rosso, e con qualsiasi altra velocità di raffreddamento maggiore (ma non minore) si ottiene la trasformazione di tutta l'austenite in martensite. Questa velocità viene chiamata velocità critica superiore di raffreddamento o, più semplicemente, velocità critica.

Curve di Bain TTT per un acciaio non eutettoide



Curve di Bain TRC per un acciaio non eutettoide



In questo grafico a causa del raffreddamento continuo le curve di Bain TRC sono più spostate verso destra e più basse rispetto alle curve di Bain TTT. La trasformazione avviene perciò in tempi più lunghi e a temperature più basse. Ritenendo valide le curve TTT con un raffreddamento rapido si ha una struttura martensitica, mentre con un raffreddamento meno rapido si ha bainite con martensite. Le curve di Bain TTT non danno quindi la garanzia sulle strutture finali quando i raffreddamenti sono continui.

Influenza degli elementi leganti

L'aggiunta di tutti gli elementi, salvo il cobalto, sposta a destra le curve di Bain e quindi diminuisce la velocità critica di tempra. Sono detti autotempranti gli acciai fortemente legati. Inoltre più carbonio è presente maggiore è l'ostacolo alla trasformazione di austenite in martensite, che quindi avviene in tempi maggiori a temperature più basse. Lo stesso effetto lo fa anche il mezzo raffreddante.

Influenza del grano austenitico

L'aumento della grossezza del grano austenitico ritarda l'inizio della trasformazione dell'austenite, spostando verso destra le curve di Bain.

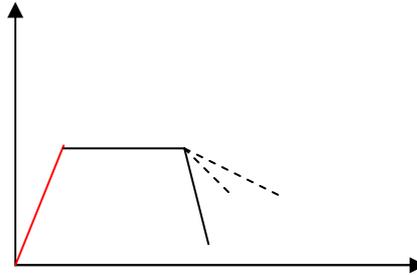
Quindi gli acciai a grana grossa sono più temprabili di quelli a grana fine.

TRATTAMENTI TERMICI

Dalla tabella UNI 3354-70

Trattamento termico è il ciclo termico o il complesso di cicli termici e quindi di operazioni di riscaldamento di permanenza a temperature determinate e di raffreddamento più o meno lento o rapido nell'eventuale presenza di particolari mezzi o ambienti, che vengono eseguite su una determinata lega metallica allo scopo di conferire a tutto il materiale o a parte di esso, come ad esempio gli strati superficiali, particolari caratteristiche meccaniche e tecnologiche adatte al suo impiego.

esempio di ciclo termico:

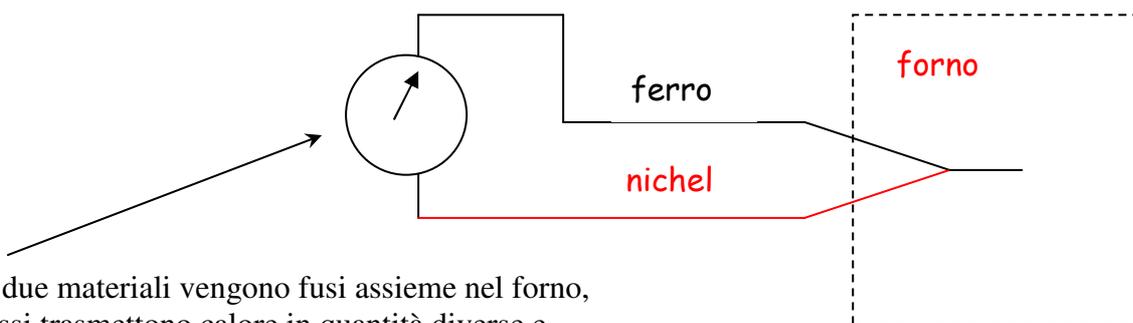


Per l'esecuzione dei trattamenti termici occorrono:

-mezzi per riscaldare: {
forni a muffola
forni a bagni di sale
forni ad atmosfere controllate
forni a induzione

-mezzi per raffreddare: {
acqua (per acciai al C. o debolmente legati)
olio (per pezzi complicati o acciai fortemente legati)
bagni di sale (a temperatura costante 200° - 700°)
aria

-misuratori di temperatura: {
Pirometri a coppia termoelettrica
(T = 200° - 350° - 750° - 1200°)



I due materiali vengono fusi assieme nel forno, essi trasmettono calore in quantità diverse e nasce così una DDP direttamente proporzionale alla temperatura del giunto

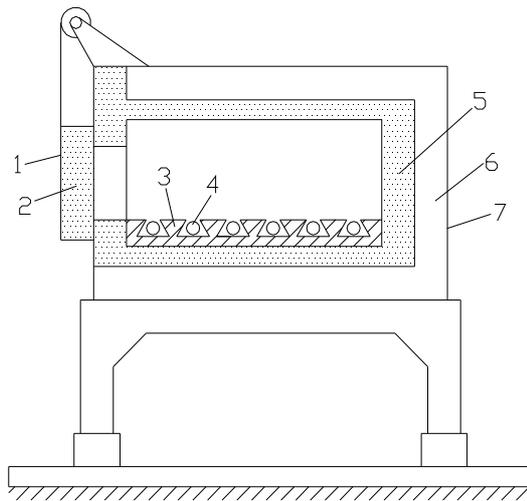
FORNI:

I forni per trattamenti termici possono essere riscaldati A NAFTA, A GAS, o per mezzo DELL'ELETTRICITA':

Oggi sono più impiegati i forni a riscaldamento elettrico che hanno i seguenti vantaggi:

- Minor ingombro ;
- Miglior regolazione della temperatura ;

Forni a muffola



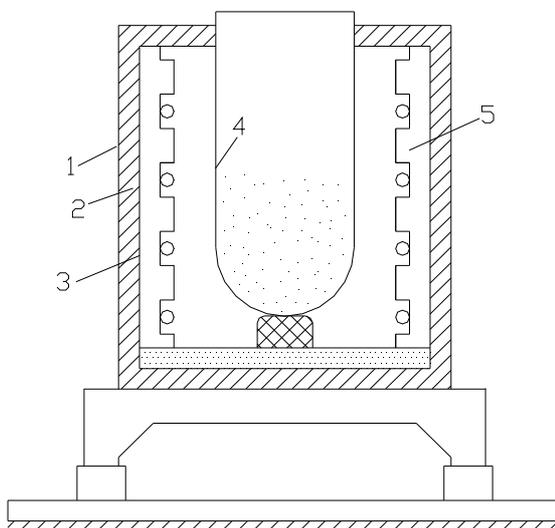
1. porta scorrevole
2. materiale refrattario
3. suola refrattaria
4. elemento riscaldante (resistenze NICHEL - CROMO)
5. materiale refrattario
6. materiale isolante
7. rivestimento metallico (lamiera)

Svantaggi:

La presenza dell'aria, all'interno del forno, provoca l'ossidazione e la decarburazione del pezzo, a ciò si ovvia introducendo carbone di legna o grafite, che brucia togliendo l'ossigeno all'aria.

Forni a bagni di sale:

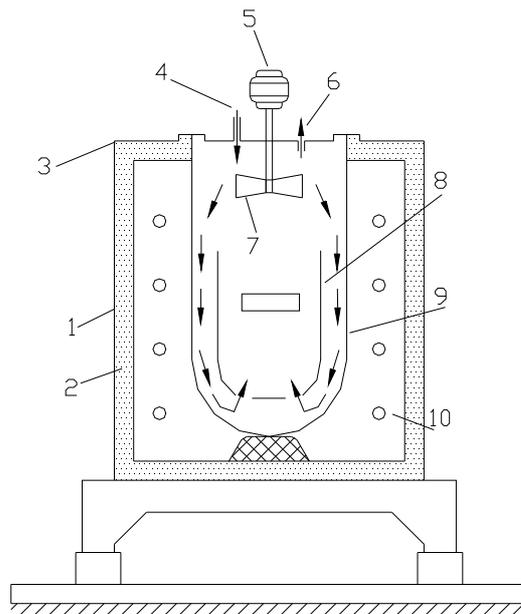
I pezzi vengono riscaldati tenendoli immersi in un bagno di sali fusi che, successivamente, verrà portato alla temperatura occorrente per eseguire il trattamento (mediante bruciatori a nafta o gas all'esterno, o mediante resistenze elettriche interne alla muratura...)



1. rivestimento di lamiera
2. materiale isolante
3. muratura di materiale refrattario
4. crogiolo
5. elementi riscaldanti

- maggior velocità di riscaldamento;
- uniformità di riscaldamento;
- esattezza della temperatura;
- minor deformazione del pezzo;
- protezione dall'azione ossidante o decarburante dell'aria;
- possibilità di riscaldare solo un'estremità del pezzo, immergendolo parzialmente;

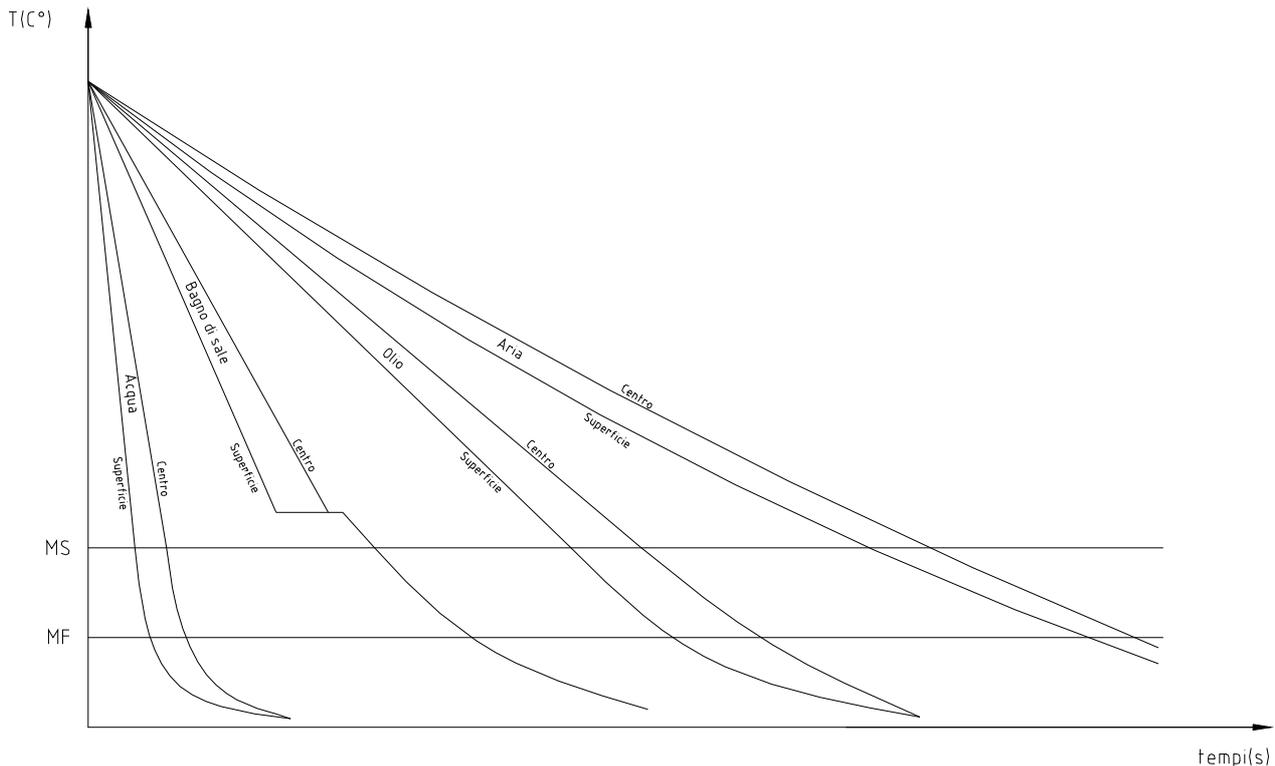
Forno ad atmosfera controllata:



1. rivestimento di lamiera
2. materiale isolante
3. coperchio d'acciaio extra dolce
4. tubo di arrivo gas
5. motore azionante il ventilatore
6. valvola di scarico e prelievo gas
7. ventilatore
8. cestello porta pezzi
9. storta d'acciaio speciale
10. elementi riscaldanti

Il gas, spinto dal ventilatore, percorre l'intercapedine tra storta e cestello, si riscalda al contatto con le pareti calde della storta, quindi attraversa il fondo del cestello ed investe i pezzi contenuti. Il gas che esce dalla valvola (6) e viene rimesso in circolazione dopo il controllo della sua composizione.

INFLUENZA DEL MEZZO RAFFREDDANTE:



Sono rappresentate le curve di raffreddamento relative alla zona esterna e quella interna di un tondino d'acciaio raffreddato in mezzi diversi.

1. RAFFREDDAMENTO IN ACQUA:

quando la zona esterna del pezzo è tutta trasformata in martensite, la zona interna non ha ancora iniziato la trasformazione.

↓

Molte tensioni interne, notevoli trasformazioni e rotture
(a causa dell'aumento di volume della parte interna durante la trasformazione)

2. RAFFREDDAMENTO IN OLIO:

quando l'esterno del pezzo è completamente trasformato in martensite, l'interno ha già iniziato la trasformazione.

↓

Tensioni interne più piccole, minor pericolo di deformazione del pezzo.

3. RAFFREDDAMENTO IN BAGNO DI SALE:

col raffreddamento in un bagno di sale a temperatura leggermente superiore a quella d'inizio formazione della martensite, (**TEMPRA TERMALE**) si ottiene l'uniforme distribuzione della temperatura nel pezzo, cosicché l'interno e l'esterno attraversano l'intervallo martensitico quasi contemporaneamente.

↓

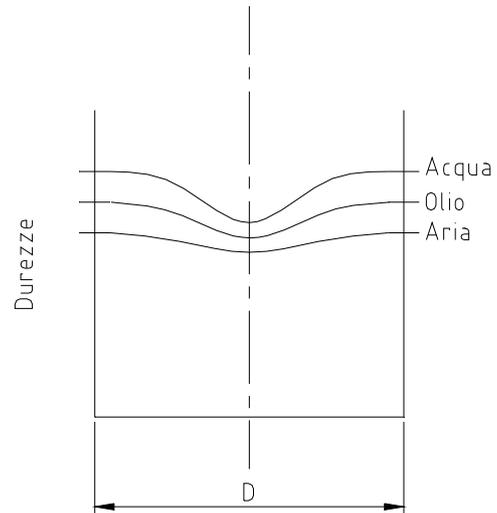
Le tensioni interne vengono ridotte al minimo (quasi nulle)

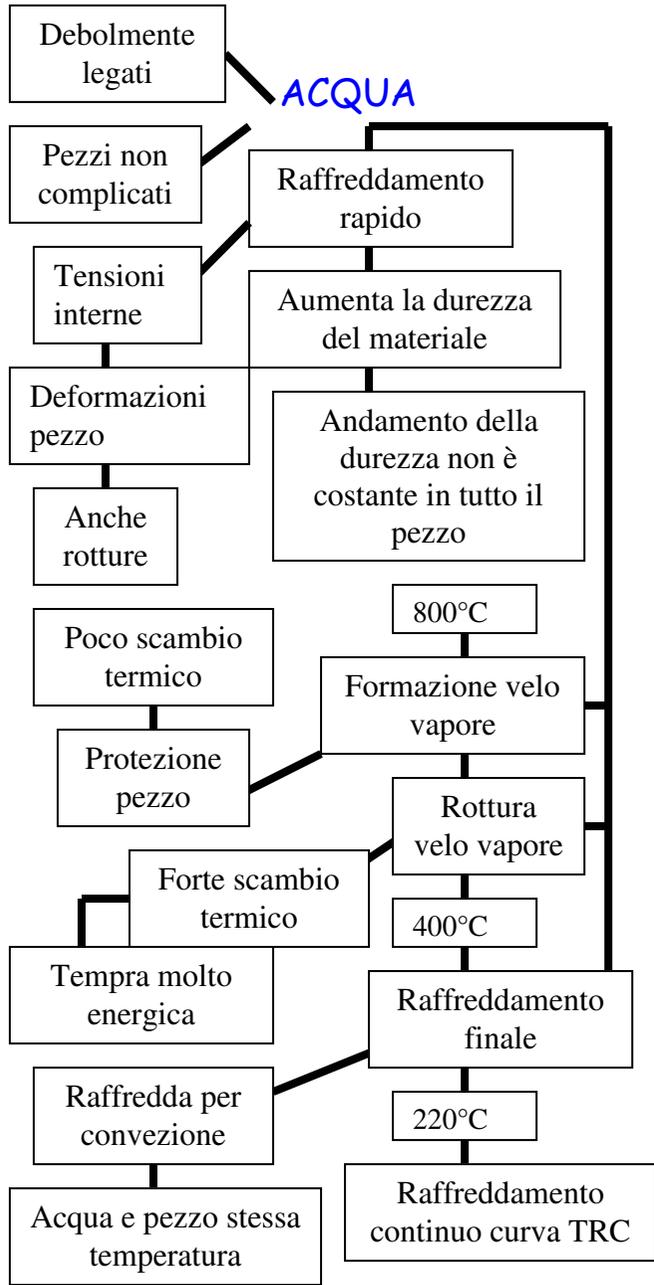
4. RAFFREDDAMENTO IN ARIA:

piccola velocità di raffreddamento. → temperature vicine

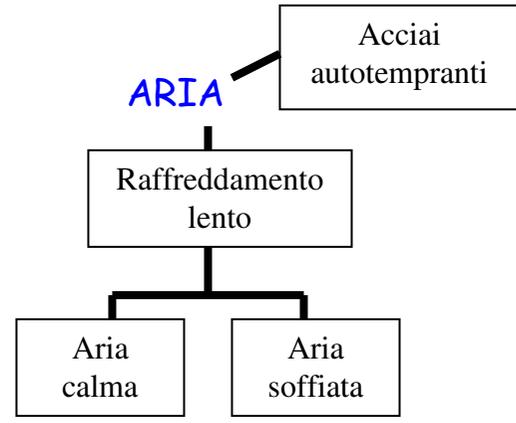
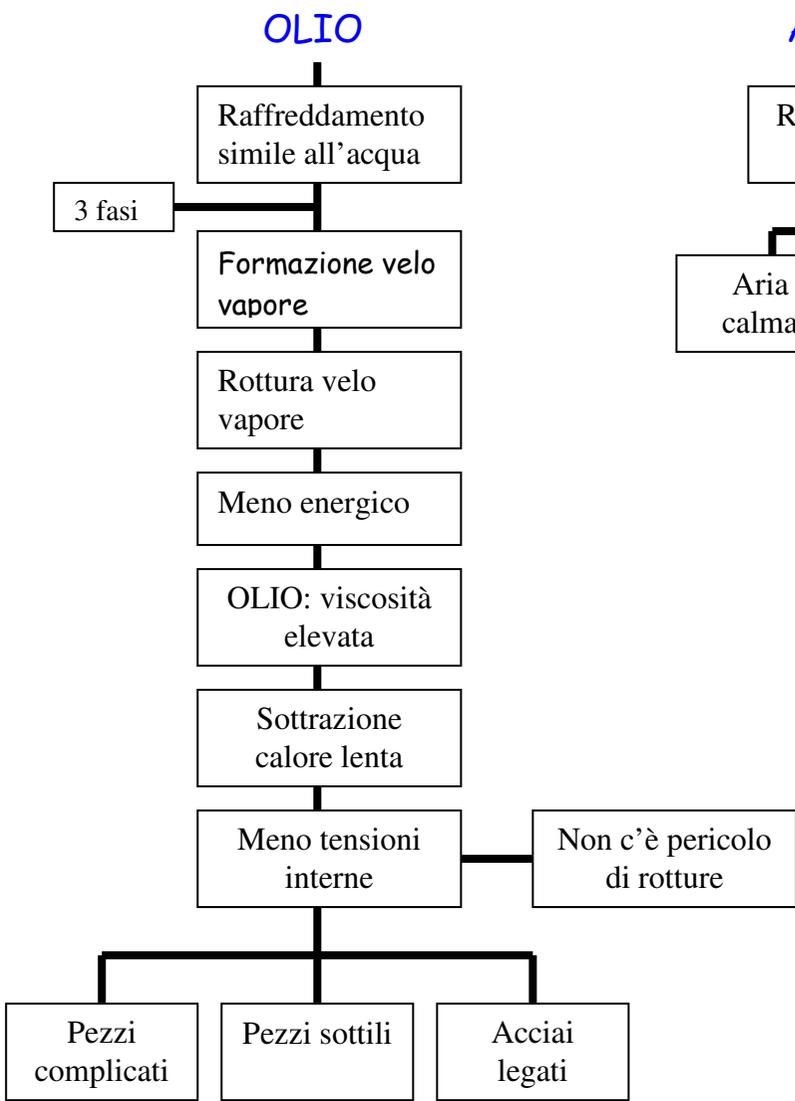
↓
Tensioni e deformazioni praticamente trascurabili

N.B. la durezza acquistata nella tempra non si estende a tutta la massa dell'acciaio, ma va progressivamente diminuendo dall'esterno verso l'interno fino ad una profondità di 2-5 mm. Più il mezzo refrigerante è energico, minore è la penetrazione di tempra.



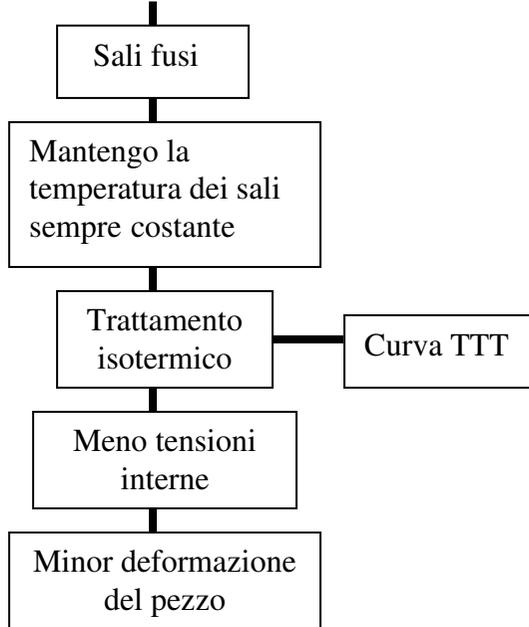


MEZZI PER RAFFREDDARE

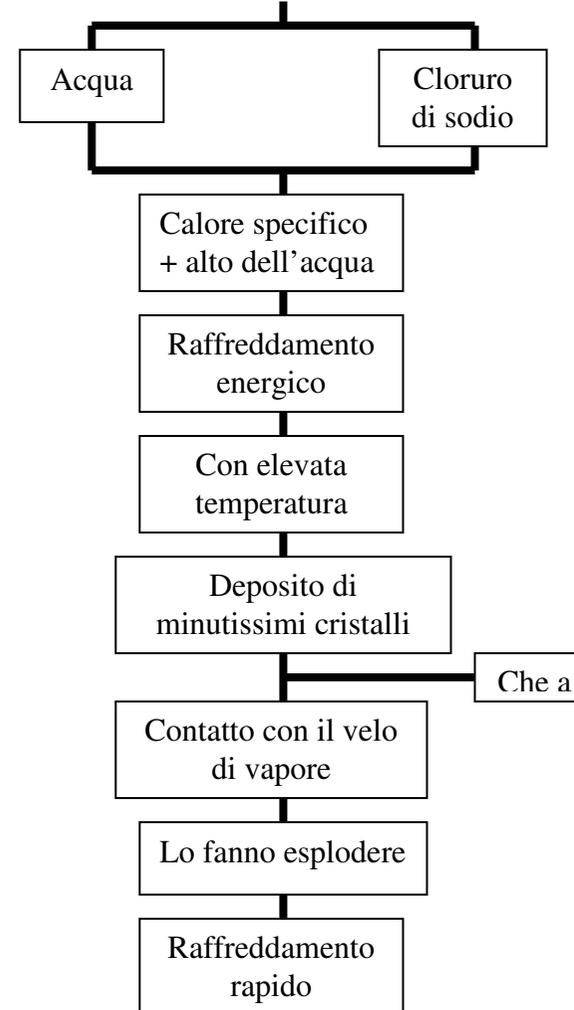


MEZZI PER RAFFREDDARE

BAGNI DI SALE



SOLUZIONI SALINE



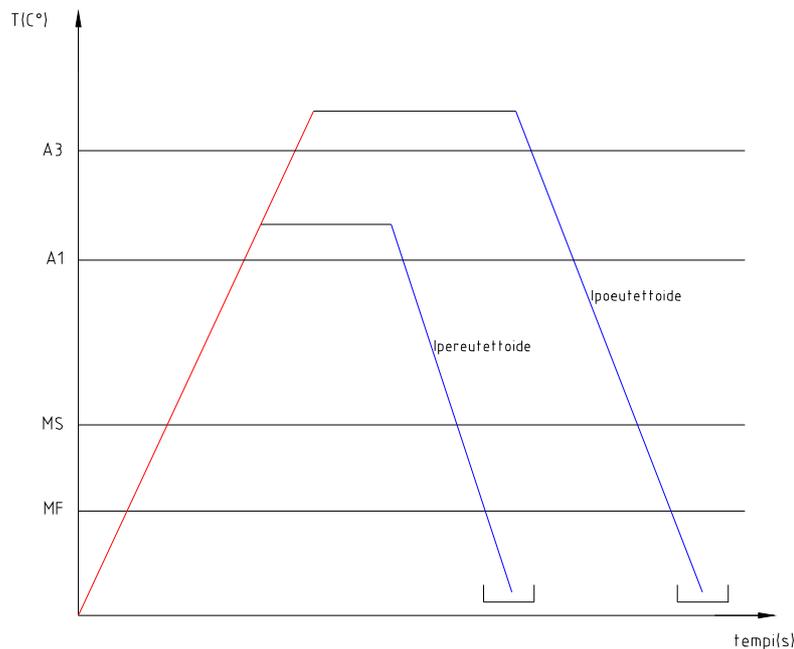
TRATTAMENTI TERMICI DEGLI ACCIAI:

1. TEMPRA:

- Aumenta la durezza degli acciai;
- Conferisce agli acciai la struttura denominata MARTENSITE (soluzione solida interstiziale sovrasatura di carbonio nel ferro α)

LE CONDIZIONI PER OTTENERE LA MARTENSITE SONO:

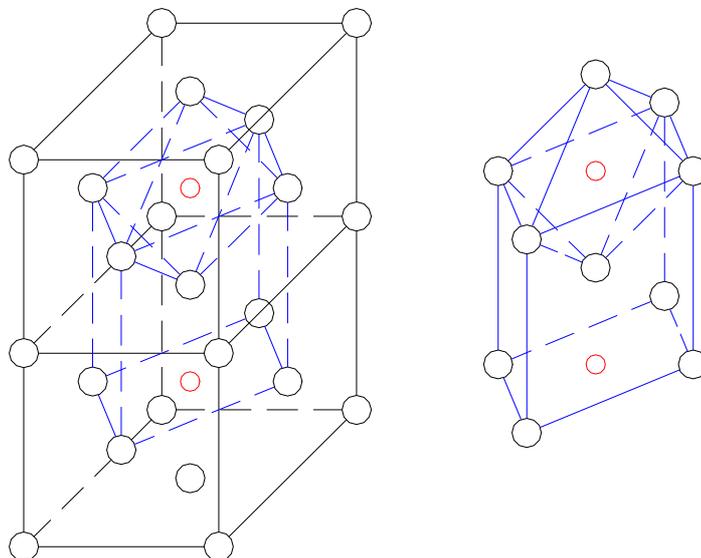
1. Riscaldamento lento fino alla temperatura cui si ha la temperatura austenitica. Normalmente tale temperatura supera di 40° - 50° la curva A3 nel caso di acciai ipoeutettoidi ($C < 0.87\%$) e supera di 40° - 50° la curva A1 nel caso di acciai ipereutettoidi ($0.87 < C < 2.06\%$).



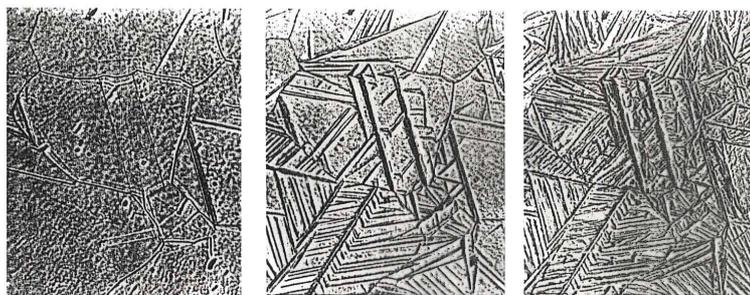
(E' sufficiente trasformare in Austenite tutta la perlite, lasciando la cementite inalterata).

2. Permanenza a tale temperatura per il tempo necessario ad ottenere anche negli strati interni la struttura austenitica (soluzione solida di carburo di ferro nel ferro γ).
3. Raffreddamento rapido ad una velocità superiore a quella critica. L'acciaio così assume la massima durezza.

Il reticolo cristallino a facce centrate (fe γ) si trasforma in un reticolo a corpo centrato (fe α), ma gli atomi di carbonio che erano nell'interno non fanno in tempo ad uscire dal reticolo a causa della rapidità del raffreddamento, **provoca così tensioni interne che deformano il reticolo stesso e creano un ostacolo allo scorrimento dei cristalli ; di conseguenza aumenta la resistenza a trazione e la durezza dell'acciaio.**



Dopo la trasformazione C.F.C. \rightarrow C.C.C. gli atomi di carbonio rimangono imprigionati nel reticolo, occupando però il centro delle facce opposte. Il reticolo cristallino risulta deformato fino a formare tetraedri. Al microscopio compare una caratteristica struttura aciculare (ad aghi) con direzioni preferenziali orientate tra loro a 60° .



Temperatura di inizio trasformazione della Martensite

$$C \leq 0,10\% \quad M_s \simeq 500^\circ\text{C}$$

$$C = 0,87\% \quad M_s \simeq 220^\circ\text{C}$$

$$C > 1,1\% \quad M_s \leq 150^\circ\text{C}$$

Temperature di fine trasformazione della Martensite

$$\text{Acciai al carbonio} \quad M_f \simeq 50 \div 70^\circ\text{C}$$

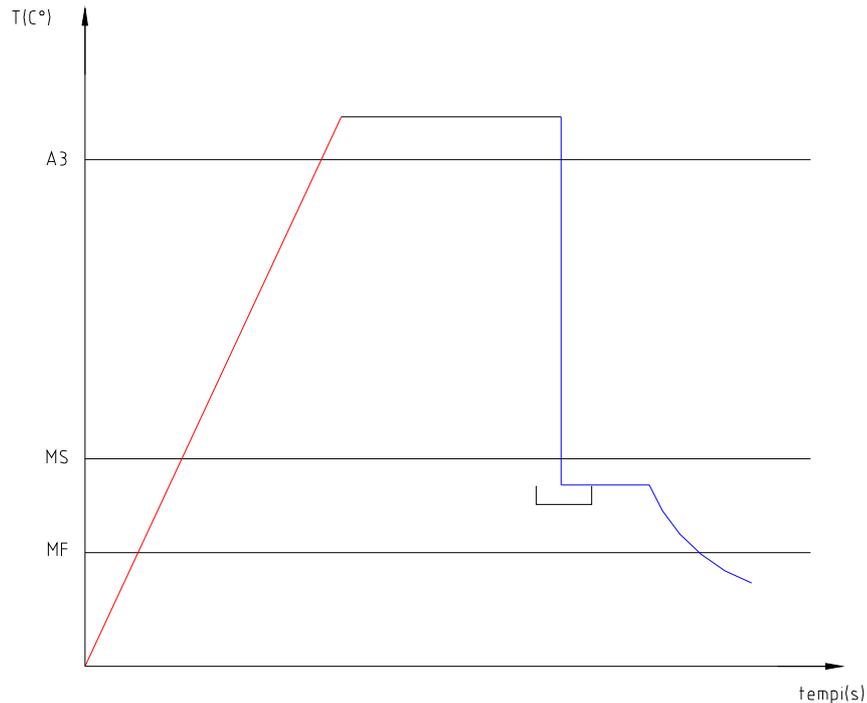
Acciai complessi $M_f \simeq 70^\circ\text{C}$ sotto zero (perché gli elementi leganti fanno rimanere stabile l'austenite fino a temperatura ambiente).

La temperatura a cui compare la Martensite dipende dalla composizione dell'acciaio. Per l'acciaio al carbonio è inversamente proporzionale al tenore di carbonio presente.

METODI DI TEMPRA

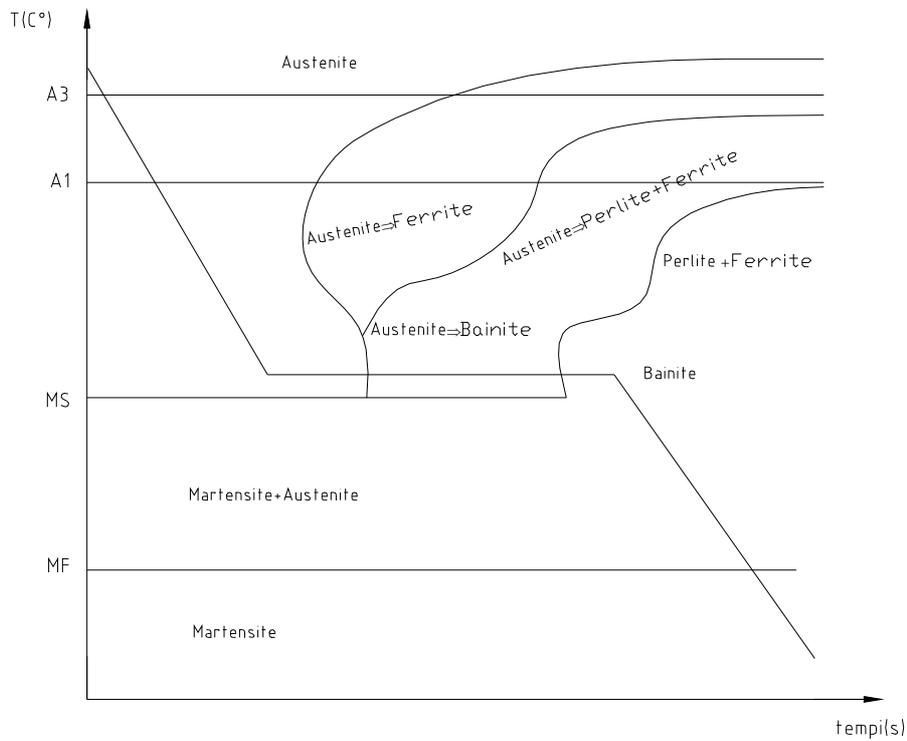
La tempra diretta eseguita in un tempo solo, raffreddando bruscamente il pezzo, provoca eccessiva fragilità e pericolose tensioni interne che possono provocare rotture. L'inconveniente risulta diminuito effettuando una tempra isotermica o una tempra termale.

1) Tempra bainitica isotermica



Per un acciaio eutettoide, il procedimento comprende:

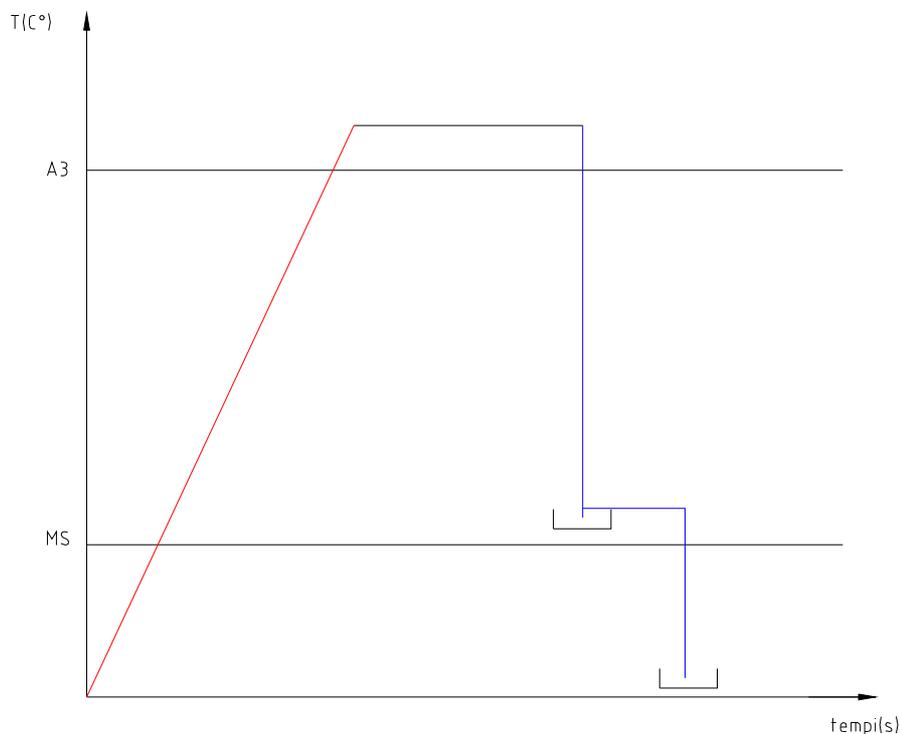
- Riscaldamento per l'austenizzazione completa a $\approx 820^{\circ}\text{C}$.
- Raffreddamento rapido in bagno salino ad una temperatura di $\approx 350^{\circ}\text{C}$.
- Permanenza a tale temperatura finché non si abbia la completa trasformazione dell'Austenite in Bainite.
- Raffreddamento più o meno rapido fino a temperatura ordinaria.



Il diagramma sopra rappresenta la tempra bainitica isoterma sulle curve di Bain nel caso di acciai non eutettoidi.

La tempra Bainitica si esegue su pezzi soggetti a distorsioni o rotture se trattati con la tempra diretta (molle, anelli cuscinetti, ecc...). La resilienza che si ottiene è più elevata rispetto a quella ottenuta con le altre tempre.

2) Tempra termale o differita martensitica



- Si riscaldano i pezzi in un bagno di sali fino ad ottenere la completa austenitizzazione.
- Si immergono i pezzi in un bagno di sali a basso punto di fusione a temperatura leggermente superiore a quella di inizio formazione della Martensite (Ms).

I pezzi vengono lasciati nel bagno per il tempo necessario affinché la temperatura si distribuisca uniformemente in tutte le parti, non di più altrimenti si ricade nella tempra isoterma, con formazione di Bainite, e durezza inferiore.

- Si estraggono i pezzi dal bagno e se ne completa il raffreddamento in un mezzo qualsiasi.

La tempra termale è indicata per pezzi lunghi e sottili. Infatti la permanenza nel bagno di sali non deve essere lunga, e nel pezzo sottile si riesce in breve tempo ad avere una distribuzione uniforme della temperatura tra esterno e interno durante la sosta nel bagno di sali.

3) Tempra superficiale (spessori molto piccoli 0,1÷3 mm)

Ha lo scopo di indurire superficialmente il pezzo mantenendo tenace l'interno.

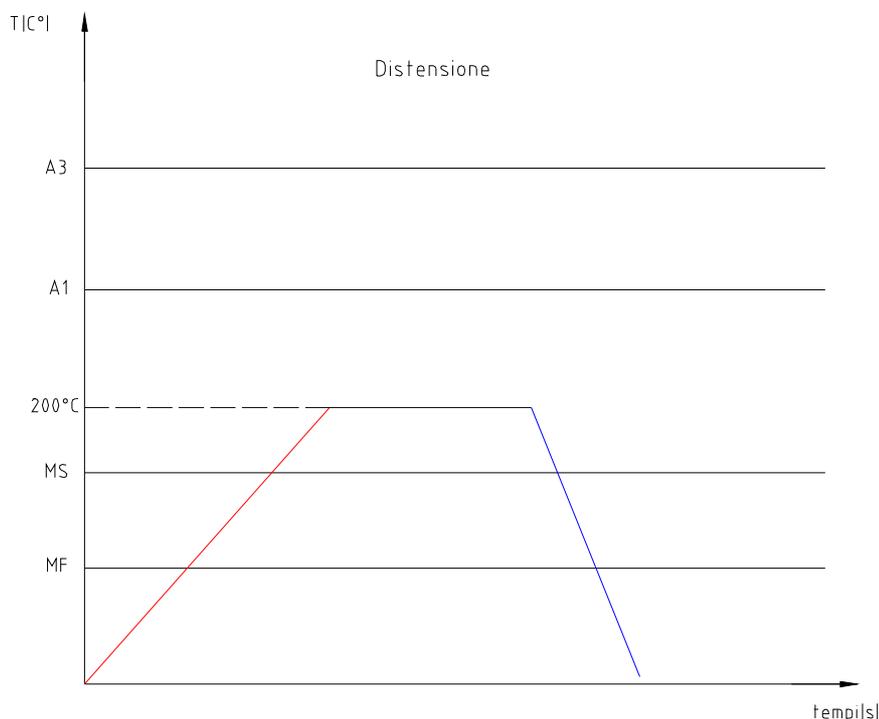
- Al cannello: il riscaldamento viene effettuato con fiamma ossiacetilenica carburante. Dopo si effettua un raffreddamento in acqua o olio (metodo economico, ma poco controllabile per la temperatura).
- Ad induzione: il riscaldamento è dovuto ad un campo elettromagnetico alternato ad alta frequenza per mezzo di una bobina di rame che avvolge il pezzo senza toccarlo.

RINVENIMENTO

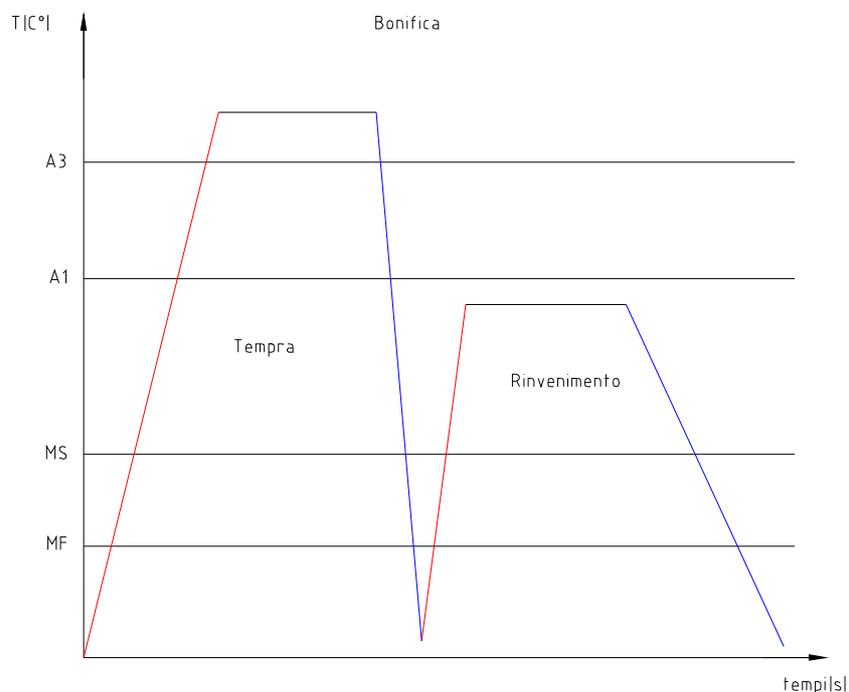
Il rinvenimento è un trattamento termico che viene effettuato dopo la tempra e ha lo scopo di attenuare gli effetti della tempra, cioè ridurre la fragilità e le tensioni interne. Però l'aumento di tenacità porta alla diminuzione della durezza.

In particolare se la temperatura di rinvenimento è di 100÷200°C si parla di Distensione che porta a:

- Riduzioni delle tensioni;
- Aumento della tenacità (senza diminuire in modo sensibile la durezza).

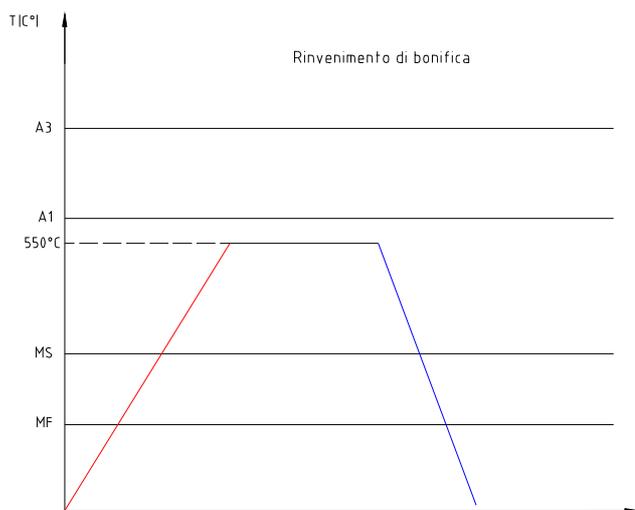


Mentre la tempra seguita da un rinvenimento a temperatura di $550\div 600^{\circ}\text{C}$ prende il nome di Bonifica



Quindi questo trattamento termico consiste in:

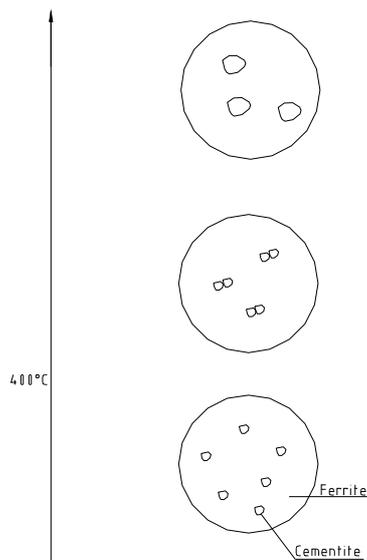
- Riscaldamento lento in forno a una temperatura che varia a seconda dei risultati che si vogliono ottenere.
- Permanenza a tale temperatura per un tempo dipendente dalle dimensioni del pezzo. In genere per gli acciai a medio tenore di carbonio, la durata del rinvenimento varia da 10 a 40 minuti.
- Raffreddamento fino a temperatura ambiente in forno, aria calma, olio o acqua.



Strutture dal rinvenimento

Dopo aver effettuato il rinvenimento possiamo avere due strutture:

- Martensite rinvenuta: quando la temperatura di rinvenimento è minore di 300°C.
- Sorbite: quando la temperatura di rinvenimento è superiore a 500°C (ma < 721°C).
Per effetto del riscaldamento, la martensite si decompone in cementite e ferrite; in un primo momento la cementite precipita sotto forma di minutissime particelle nella matrice ferritica; poi, aumentando la temperatura oltre i 400°C le particelle si coagulano e si ingrandiscono assumendo l'aspetto di globuletti a contorno irregolare.



RICOTTURA

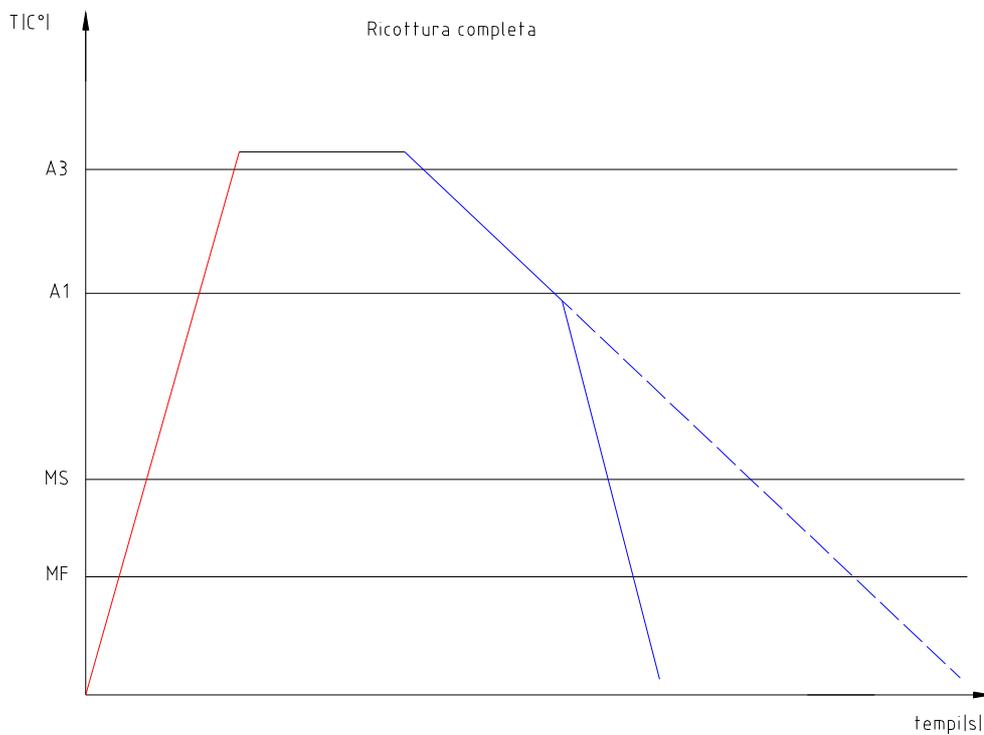
La ricottura è un trattamento termico che ha lo scopo di addolcire i materiali metallici e renderli più facilmente lavorabili alle macchine utensili e per deformazioni plastiche a freddo.

Inoltre:

- annulla gli effetti della tempra;
- omogeneizza la struttura degli acciai dopo una lavorazione a caldo ;
- rigenera i cristalli lesionati da lavorazioni a freddo (incrudimento).

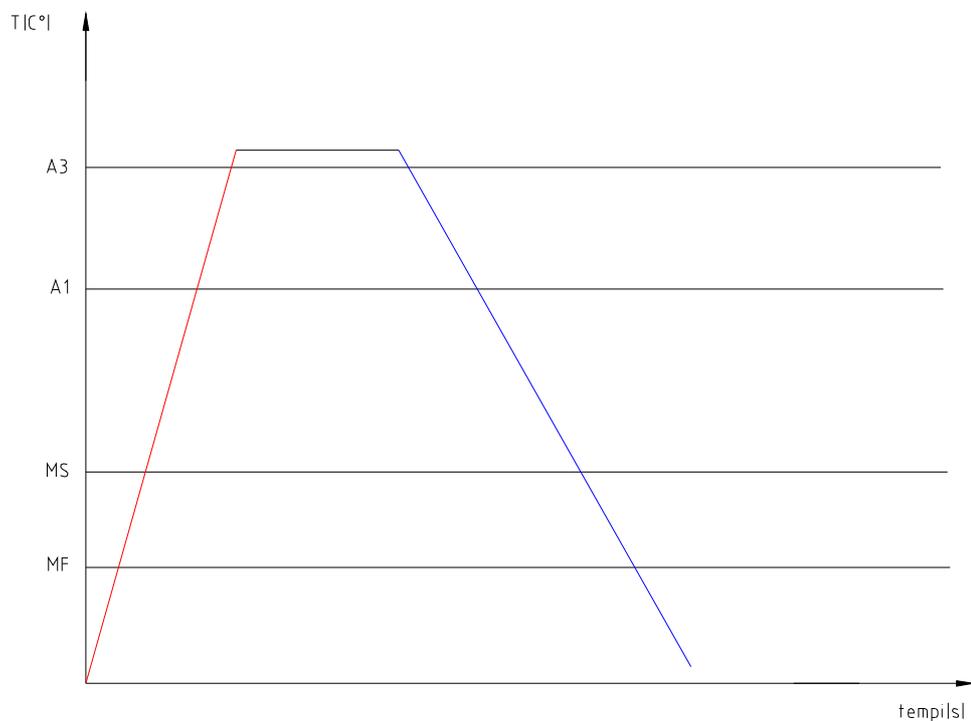
Il processo di ricottura completa consiste in:

- Riscaldamento lento ad una temperatura superiore di 50÷60°C rispetto a quella cui si ha la struttura austenitica.
- Permanenza a tale temperatura perché tutto il pezzo abbia assunto una struttura austenitica.
- Raffreddamento lentissimo in forno fino alla temperatura di 721°C (cioè nell'intervallo in cui avvengono le trasformazioni strutturali), poi un raffreddamento veloce fino a temperatura ambiente.



NORMALIZZAZIONE

La normalizzazione è un trattamento termico il cui scopo è di affinare ed omogeneizzare il grano degli acciai dopo la fucinatura o altri trattamenti a caldo (stampaggio, laminazione..) che appunto provocano un ingrossamento del grano e, quindi, fragilità. Il trattamento è identico a quello della ricottura completa per quanto riguarda il riscaldamento; infatti il raffreddamento avviene completamente in aria tranquilla per cui la durezza e la resistenza saranno maggiori che non nella ricottura.



La struttura ottenuta è però più fine e più omogenea. Se tale trattamento si effettua sugli acciai legati autotempranti si ha un effetto di tempra.

Curve di raffreddamento sulle curve di Bain per un acciaio ipoeutettoide nel caso di ricottura completa e di normalizzazione.

STABILIZZAZIONE

E' un trattamento che viene effettuato per trasformare l'eventuale austenite residua, presente nel pezzo, la quale si ottiene dopo un trattamento termico di tempra diretta. Infatti quando raffreddiamo molto rapidamente il pezzo, può succedere che l'austenite non ha il tempo necessario per trasformarsi tutta in martensite; per questo l'austenite che rimane viene detta residua. Però col tempo questa austenite aumenta di volume dilatando il pezzo e quindi compromettendone la funzionalità (pensiamo a blocchetti piano paralleli, perché diventa assurdo pensare a un cambiamento delle loro dimensioni). Questo trattamento consiste nell'immergere il pezzo nell'azoto liquido a 80°C sotto lo zero dopo aver eseguito i trattamenti termici di tempra e di rinvenimento di bonifica.



TRATTAMENTI TERMOCHIMICI DI DIFFUSIONE (o indurimento superficiale)

Scopo di questi trattamenti è di modificare la composizione chimica degli strati superficiali di pezzi meccanici (e quindi anche le proprietà meccaniche e tecnologiche di tali strati) facendo assorbire loro, portandoli ad adatte temperature, elementi chimici con cui hanno affinità: carbonio, azoto, zolfo... .

Es.: Una ruota dentata si può costruire in acciaio dolce, tenace in tutta la massa per resistere agli urti e sforzi; per poi indurirla superficialmente per dar modo ai denti, soggetti a logorio, di resistere all'usura.

CARBOCEMENTAZIONE (UNI 5381)

Questo trattamento termico consiste in:

- Riscaldamento lento in forno ad una temperatura di circa $850 \div 950^{\circ}\text{C}$;
- Permanenza in forno per un certo tempo, che varia in base al mezzo utilizzato;
- Raffreddamento del pezzo in un mezzo qualsiasi.

Si effettua su acciai con basso tenore di carbonio ($C \leq 0.20\%$).

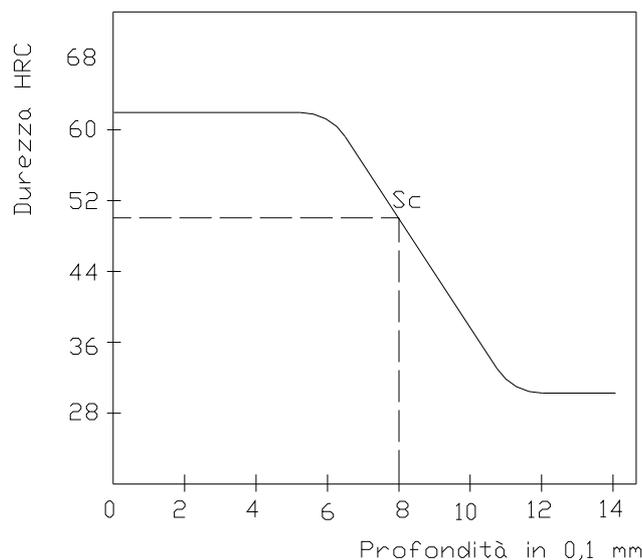
Mezzi : cementi solidi, liquidi, gassosi.

Velocità di penetrazione :

- solido $0.1 \div 0.2$ (mm/h)
- liquido $0.3 \div 0.4$ (mm/h)
- gas 1 (mm) in tre ore

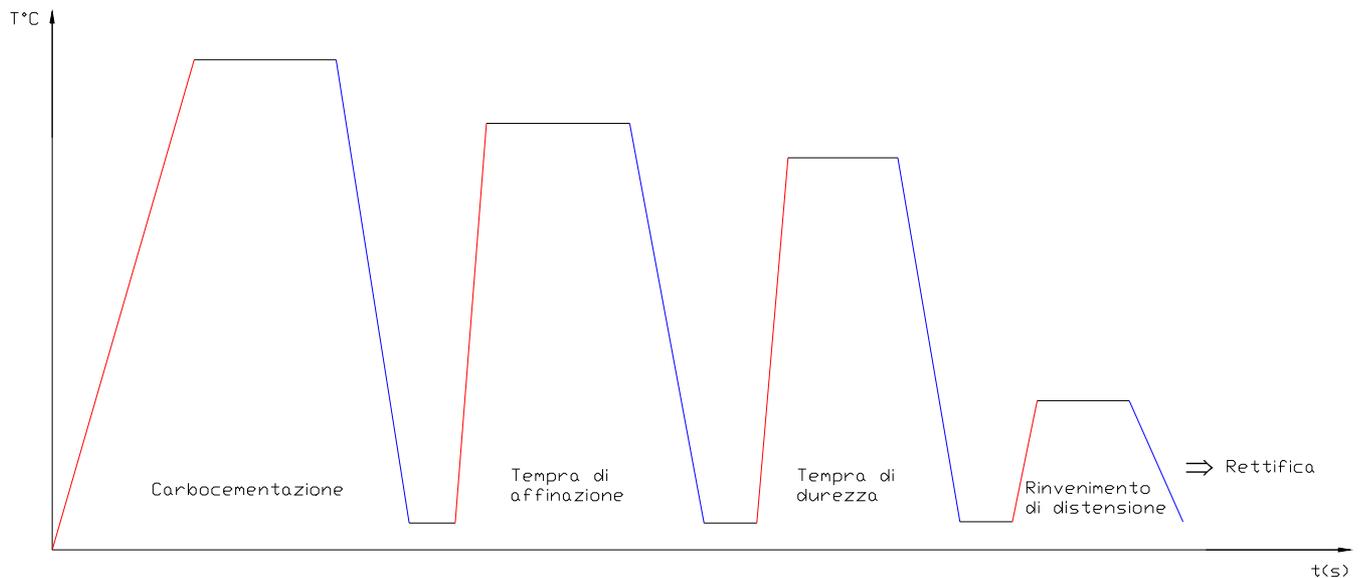
Spessore di carbocementazione va da $0.2 \div 2$ (mm). Ottengo grande resistenza all'usura e mantenimento all'interno del pezzo della resilienza.

Durezza ottenibile : $62 \div 65$ HRC dopo tempra.



Il diagramma a fianco mostra la variazione della durezza in funzione della profondità in un acciaio al carbonio cementato e temprato. Inoltre nel punto Sc abbiamo lo spessore efficace, parametro molto utile che è un valore intermedio tra lo spessore carbocementato minimo e lo spessore carbocementato totale. Questo corrisponde a una durezza di 50 HRC e una profondità di 0.8 mm.

TRATTAMENTO TERMICO DOPO LA CARBOCEMENTAZIONE SOLIDA



Siccome il riscaldamento avviene lentamente, i pezzi presentano, dopo la carbocementazione, una struttura cristallina a grano ingrossato. Conviene quindi eseguire una tempra di affinazione da 900°C per ottenere un grano più fine e poi una tempra di durezza da circa 780°C . Dopo la tempra si effettua un rinvenimento di distensione a circa 150°C per attenuare le tensioni. Infine eseguo una rettifica per portare la ruota alle dimensioni stabilite. Per rettificare devo lasciare uno spessore in più che va da $0.2 \div 0.3 \text{ mm}$.

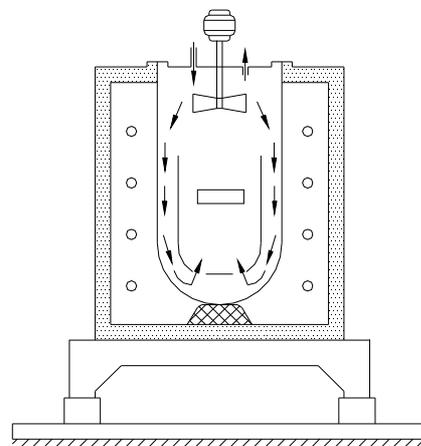
NITRURAZIONE (UNI 5478 70)

Questo trattamento può essere eseguito su qualsiasi tipo di acciaio e in particolare negli acciai legati con l'alluminio, perché quest'ultimo facilita l'assorbimento dell'azoto.

Questo trattamento termico consiste in:

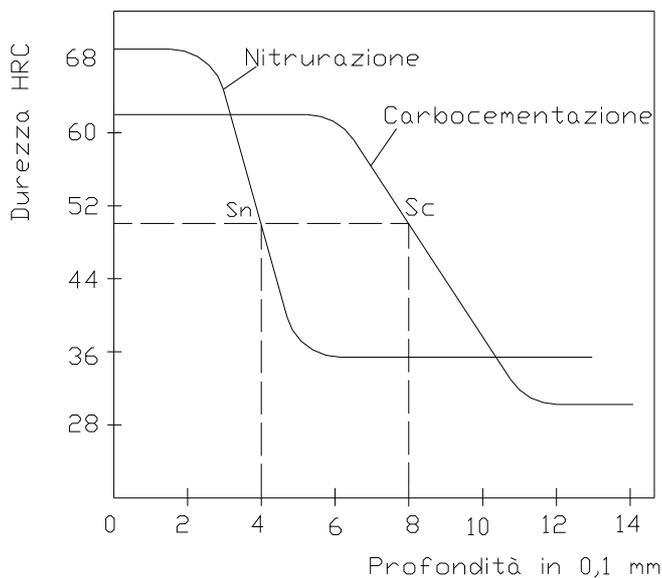
- Riscaldamento in forno elettrico (atmosfera controllata) a circa $500 \div 600^{\circ}\text{C}$;
- I pezzi vengono sottoposti ad una lenta corrente di ammoniaca gassosa (NH_3);
- Raffreddamento in un mezzo qualsiasi.

La velocità di penetrazione è di 0.1 mm in 10 ore.
Durezza ottenibile è di 72 HRC.



Durante l'esposizione del pezzo all'ammoniaca gassosa, l'assorbimento superficiale di questo elemento provoca la formazione di azzoturi o nitruri di ferro che provocano una distorsione del reticolo cristallino e quindi impartiscono grande durezza. Altra caratteristica fondamentale di questo trattamento è che il riscaldamento a una temperatura di $560\div 590^{\circ}\text{C}$, non modifica la struttura originale e non provoca ingrossamento della grana cristallina.

Quindi durante la nitrurazione i pezzi non subiscono né distorsioni né particolari variazioni dimensionali; per tanto dopo la nitrurazione non bisogna effettuare alcuna operazione di rettifica.



Il diagramma a fianco mette a confronto la variazione di durezza in funzione della profondità di un acciaio cementato e di un acciaio nitrurato. Anche qui per la nitrurazione abbiamo nel punto Sn lo spessore efficace, parametro molto utile che è un valore intermedio tra lo spessore nitrurato minimo e lo spessore nitrurato totale. Questo corrisponde a una durezza di 50 HRC e una profondità di 0.4 mm.