Corso di metallurgia e saldatura – Parte 2
“Classificazione degli acciai”
“Trattamenti termici degli acciai”

Move Forward with Confidence

BUREAU VERITAS

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

L'ACCIAIO

L'acciaio è una lega ferro-carbonio in cui la percentuale di quest'ultimo elemento è variabile e raggiunge un valore massimo del 2,11%.

Al di sopra di tale percentuale e sino al 6,69% di C si parla di ghise.

Gli acciai, oltre al carbonio, contengono quantità variabili di altri elementi di lega (alliganti) come Cromo (Cr), Molibdeno (Mo), Manganese (Mn), Vanadio (V), Silicio (Si), Wolframio (W), Cobalto (Co), Nichel (Ni), Fosforo (P), Azoto (N), ecc. Questi elementi donano all'acciaio caratteristiche particolari e incidono fortemente sulle sue proprietà meccaniche.

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Vediamo brevemente i principali effetti degli elementi di lega più comuni:

- ***Carbonio (C)**: è l'elemento principale, il più importante. E' proprio grazie ad esso che l'acciaio può essere temprato, donandogli maggiore **durezza** e modificando profondamente la sua struttura le sue caratteristiche meccaniche. Dunque il carbonio **aumenta notevolmente la durezza** (grazie alla formazione di martensite e cementite), **la resistenza all'usura**, **resistenza a trazione e a flessione** ma **diminuisce la resilienza (resistenza all'urto), la resistenza all'ossidazione**.*
- ***Cromo (Cr)**: questo elemento è presente negli acciai in quantità estremamente variabili. La sua funzione principale è di **aumentare la resistenza all'ossidazione e a numerosi agenti corrosivi**, formando un sottilissimo strato protettivo (invisibile ad occhio nudo) sulla superficie dell'acciaio. Gli acciai con un contenuto di cromo superiore al 12% vengono detti inossidabili.*
- ***Manganese (Mn):** Incrementa inoltre la penetrazione della tempra, la tenacità, la resistenza a trazione e all'usura migliora la deformabilità a caldo.*
- ***Molibdeno (Mo):** questo elemento, formatore di carburi estremamente duri aumenta la durezza massima ottenibile grazie alla tempra, la resistenza all'usura, migliora la stabilità della pellicola protettiva formata dal cromo.*
  Incrementa la durezza a caldo dell'acciaio dato che i carburi di tale elemento hanno un elevata resistenza alla coalescenza alle alte temperature.

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

- ***Wolframio (W):*** *questo elemento forma carburi molto duri (2500 HV), aumentando la resistenza all'usura, incrementa i valori di durezza massima e minima ottenibili tramite il processo di tempra.*
  Incrementa la temprabilità dell'acciaio (in misura maggiore rispetto a cromo e molibdeno) anche la resistenza dell'acciaio (allo stato temprato) alla ricottura, migliorando quindi la durezza a caldo, formando carburi molto duri e resistenti alla coalescenza.

- ***Vanadio (V):*** *forma carburi duri (2800 HV) e aumenta la resistenza all'usura, resilienza (resistenza all'urto) e limite a fatica.*
  Diminuisce la crescita del grano.

- ***Cobalto (Co):*** *pur non formando carburi aumentando la resistenza all'usura, la durezza massima ottenibile e la resistenza dell'acciaio (allo stato temprato) alla ricottura, aumentando la stabilita dei carburi di Mo e T anche alle elevate temperature.*

- ***Silicio (Si):*** *aumenta la flessibilità, il limite di snervamento e la durezza (se presente in elevate percentuali all'aumentare del silicio diminuisce resilienza e l'allungamento a rottura). In generale migliora le doti meccaniche dell'acciaio e la temprabilità (diminuisce la velocità critica superiore di raffreddamento).*

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

- **Nichel (Ni):** aumenta la lavorabilità e la duttilità dell'acciaio, eleva la penetrazione della tempra, contribuisce ad aumentare la tenacità (vedi acciai da costruzione) ma abbassa la temperatura di ricottura e di tempra

- **Azoto (N)**: aumenta la durezza, resistenza all'usura e alla corrosione dell'acciaio. Forma nitruri molto duri con l'alluminio

- **Alluminio (Al):** l'alluminio ha un energico potere disossidante. Conferisce all'acciaio una notevole resistenza all'ossidazione a caldo ed ostacola la diffusione del carbonio, quindi e dannoso nella cementazione Forma con l'azoto nitruri durissimi, dunque rappresenta l'elemento base degli acciai per nitrurazione. In piccoli quantitativi l'alluminio contribuisce all'affinamento del grano. Circa la saldabilità, peggiora già con lo 0,40% di alluminio

- **Rame (Cu):** Aumenta la resistenza alla corrosione, la resistenza a trazione e la tensione di snervamento peggiora la saldabilità

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Esistono dunque, a seconda della particolare composizione chimica, diverse categorie di acciai.

Acciai al carbonio:

Sono acciai con contenuto di elementi di lega estremamente variabile ma con contenuto di cromo inferiore dell'11%

Gli acciai al carbonio si possono dividere in:

1. ***Acciai non legati***

Sono gli acciai più comunemente usati principalmente per scopi strutturali.

Rappresentano la categoria prodotta in maggiore quantità per usi generali e non di eccelsa qualità.

Sono caratterizzati dal fatto che vengono utilizzati senza trattamento termico o, in alcuni casi con una semplice normalizzazione.

Esempio di un acciaio al Carbonio : EN 10025 S275 JR (ex FE 360 B)

Dove S = acciaio strutturale (P = pressione) 275 = carico di snervamento

J = resilienza $\geq$ 27 J R = resilienza garantita a + 20° C

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

2. *Acciai legati*

Gli acciai legati a sua volta si suddividono in :

2.1 ***bassolegati***

Ciascun elemento di lega che li costituisce ha una percentuale inferiore al 5%.

Troviamo solitamente acciai con contenuto di C variabile tra lo 0,4% circa e l' 1,5% (anche se per saldabilità non si supera lo 0,25%) circa e basso-bassissimo contenuto di cromo ed altri alliganti. Gli acciai bassolegati hanno:

- *scarsissima resistenza all'ossidazione e alla corrosione*
- *hanno buone doti meccaniche*
- *sono abbastanza semplici da temprare.*

Esempio di un acciaio al Carbonio bassolegato : Acciai al cromo-molibdeno

1 ¼ Cr, 2 ¼ Cr,

(ASTM A387 P11, ASTM A387 P22)

2.2 *Altolegati*

Elementi di lega con percentuale superiore al 5%.

Le caratteristiche possono essere molto diverse da acciaio ad acciaio, visto che la composizione può variare notevolmente. Per questo motivo è molto difficile fare un discorso generale sulle loro caratteristiche ed è buona norma analizzare singolarmente, a seconda dei casi, ogni singolo acciaio preso in esame.

Esempio : Acciaio INVAR (36% Ni) ed è noto perché ha un coefficiente di dilatazione termica estremamente ridotto

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Acciai inossidabili

Gli acciai inox (o acciai inossidabili) sono leghe a base di ferro e carbonio che uniscono alle proprietà meccaniche tipiche degli acciai al carbonio caratteristiche peculiari di resistenza alla corrosione.
Tali materiali devono la loro capacità di resistere alla corrosione alla presenza di elementi di lega, principalmente cromo, in grado di passivarsi, cioè di ricoprirsi di uno strato di ossidi invisibile, che protegge il metallo sottostante dall'azione degli agenti chimici esterni.

Il fenomeno della passivazione avviene per reazione del metallo con l'ambiente ossidante (aria, acqua, soluzioni varie, ecc).
La natura dello strato passivante, formato essenzialmente da ossidi/idrossidi di cromo, è autocicatrizzante e garantisce la protezione del metallo, anche se localmente si verificano abrasioni o asportazioni della pellicola.

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Gli acciai inox si dividono tradizionalmente, secondo la loro microstruttura, in tre grandi famiglie:

- *Martensitici*

- *Ferritici*

- *Austenitici*

Oltre a queste tre categorie esistono anche gli inossidabili austeno-ferritici (duplex), il cui impiego è in forte ascesa

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Acciai inossidabili martensitici:

Sono acciai con quantità di cromo superiori all'11% e contenuto di carbonio generalmente compreso tra lo 0,4% circa e il 2,1% circa. In questa "categoria" troviamo tutti gli acciai inossidabili che possono essere temprati

Alcuni esempi di acciai inossidabili martesitici: Aisi 420, 440 A, 440B, 440C.

Acciai inossidabili ferritici

*Come i precedenti, anche i gli **acciai ferritici** sono acciai inossidabili al solo cromo (variabile dall'11 al 30% circa).*

Questi acciai hanno buona resistenza meccanica ed alla corrosione.

Hanno un minor tenore di carbonio rispetto al martensitico. Un tipo particolarmente resistente al calore contiene il 26% di cromo. Altri elementi presenti sono il molibdeno, l'alluminio per aumentare la resistenza all'ossidazione a caldo, lo zolfo per facilitare la lavorabilità.

Le proprietà fondamentali sono: moderata resistenza alla corrosione che aumenta con la *percentuale di cromo nonché con la introduzione in lega del molibdeno; è magnetizzabile; non è temprabile ed è da usare sempre dopo ricottura; la saldabilità è scarsa, in quanto il materiale che viene surriscaldato subisce l'ingrossamento del grano cristallino a causa del cromo.*

CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Acciai inossidabili austenitici:

questi acciai hanno tenore di cromo compreso tra il 16% e il 30%, contenuto di nichel compreso tra il 6 e il 20% non che quantità di carbonio inferiori allo 0,1%.

Alcuni esempi di acciai inossidabili austenitici: AISI 316, 316L, AISI 304

La composizione base dell'acciaio inox austenitico è il 18% di Cr e l'8% di Ni, codificata in 18/8 (AISI 304). Una percentuale del 2-3% di molibdeno permette la formazione di carburi di molibdeno migliori rispetto a quelli di cromo e assicura una miglior resistenza alla corrosione dei cloruri (come l'acqua di mare e di sali disgelanti)(acciaio 18/8/3) (AISI 316). Il contenuto di carbonio è basso (0,08% max di C), ma esistono anche acciai inox austenitici dolci (0,03% di C max). L'acciaio inox austenitico può essere stabilizzato con titanio o niobio per evitare una forma di corrosione nell'area delle saldature. Considerando la notevole percentuale di componenti pregiati (Ni, Cr, Ti, Nb, Ta), gli acciai inox austenitici sono fra i più costosi tra gli acciai di uso comune.

Le proprietà fondamentali sono:

- Conservano la loro tenacità fino a temperature criogeniche (He liquido).

- La dimensione dei grani, sensibilmente più elevata di quella degli acciai ferritici da costruzione, li rende resistenti allo scorrimento viscoso; di conseguenza fra gli acciai per costruzione di recipienti a pressione, sono quelli che possono essere utilizzati alle temperature più elevate (600 ° C).

TRATTAMENTI TERMICI DEGLI ACCIAI

Rassegna dei trattamenti termici di interesse applicativo

- Ricottura
- Normalizzazione
- Tempra
- Bonifica
- Rinvenimento
- Distensione

TRATTAMENTI TERMICI

I trattamenti termici sono dei processi cui viene sottoposto l'acciaio allo scopo di conferirgli particolari proprietà. Essi consistono in un riscaldamento e in un raffreddamento successivo, attuato secondo varie modalità, diverse da trattamento a trattamento.

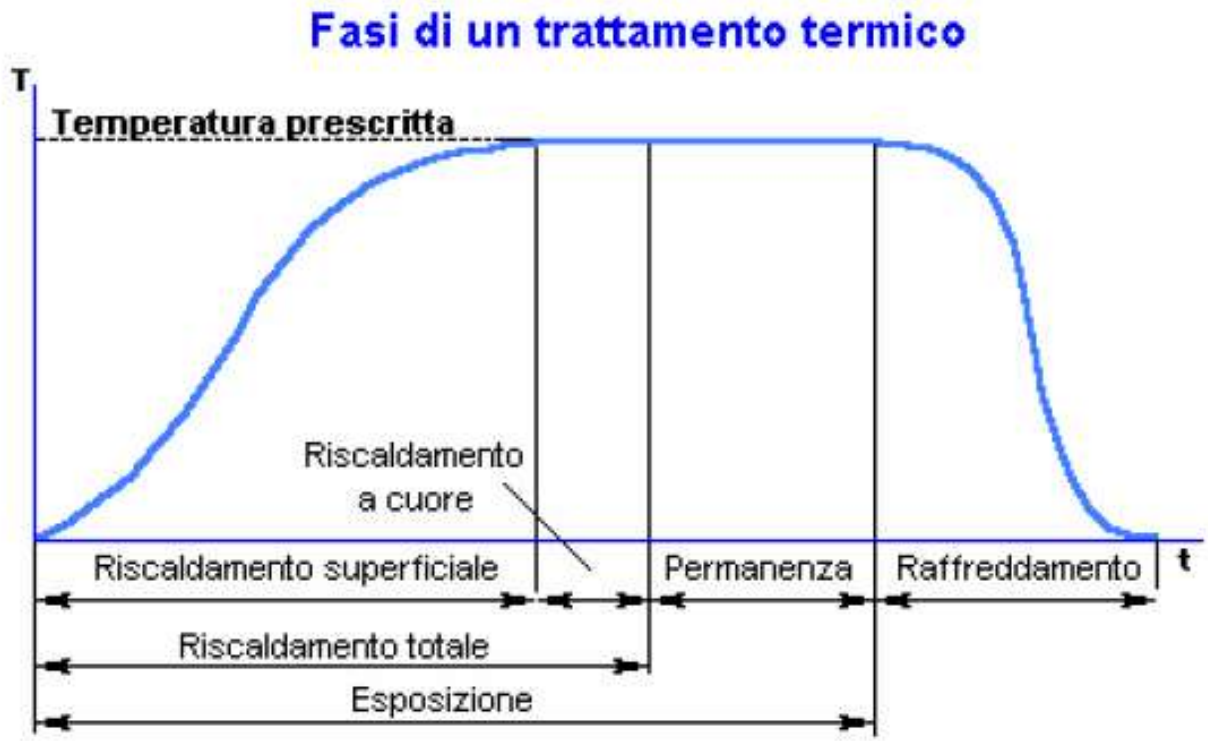
Un generico trattamento termico si compone delle seguenti fasi:

-riscaldamento superficiale

-riscaldamento a cuore

-permanenza

-raffreddamento



TRATTAMENTI TERMICI

Riscaldamento superficiale
Riscaldamento fino al raggiungimento della temperatura di trattamento voluta nella zona superficiale.

Riscaldamento a cuore
Riscaldamento fino al raggiungimento della temperatura di trattamento in tutta la sezione e quindi anche a cuore del pezzo.

Permanenza
Mantenimento della temperatura di trattamento su tutta la sezione del pezzo.

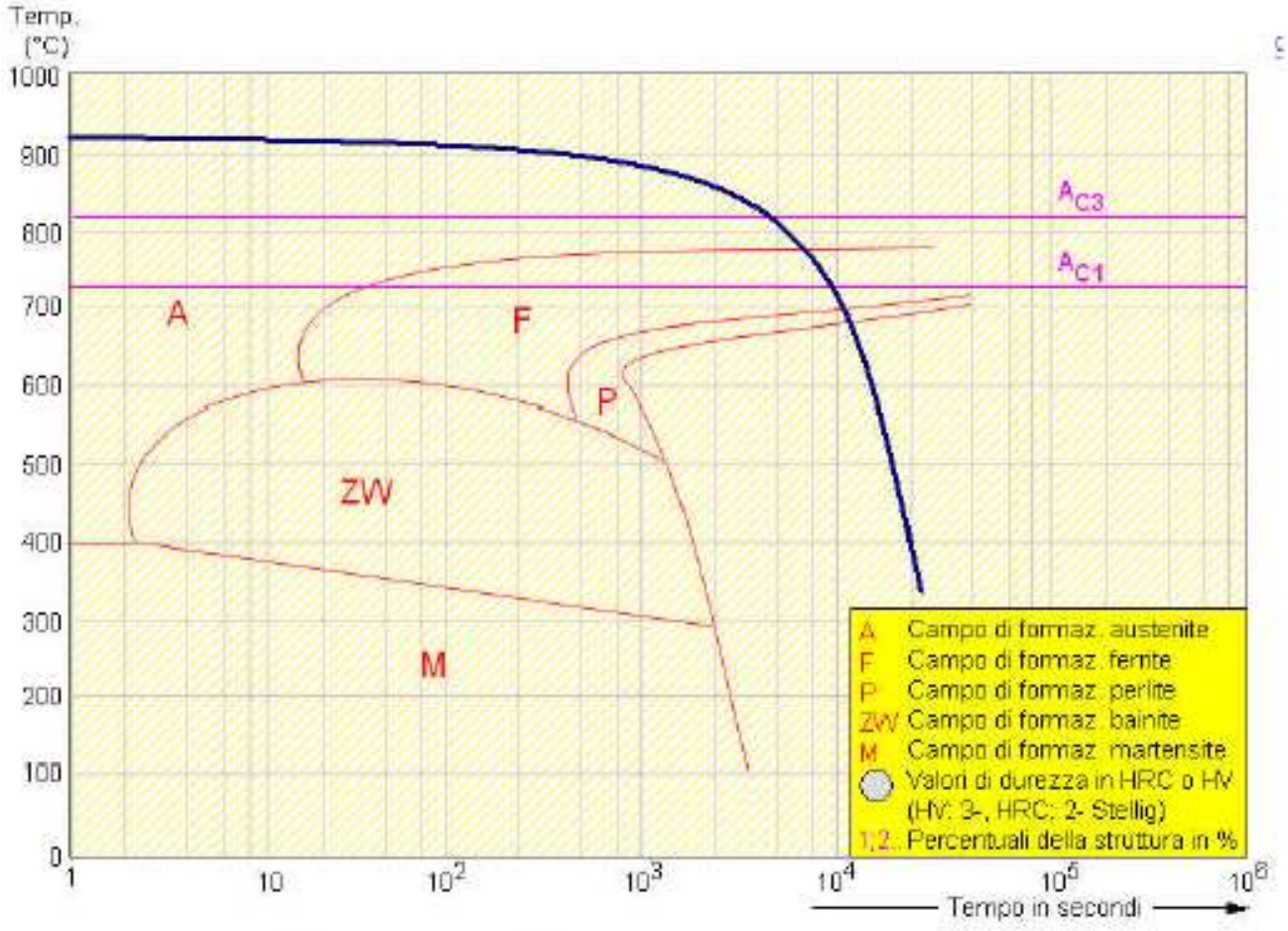
Raffreddamento
Diminuzione della temperatura di un pezzo.

RICOTTURA

È un trattamento termico che si realizza riscaldando il materiale sopra A3; la struttura micrografica di partenza si trasforma in una struttura austenitica tanto più fine quanto meno si spinge la temperatura oltre A3. Si deve fare in modo però che la trasformazione austenitica interessi tutta la massa metallica.

Si fa poi seguire un raffreddamento lento in forno in modo da attraversare le linee A3 ed A1 in un tempo sufficientemente lungo per ottenere la completa separazione di ferrite e perlite.

Tale trattamento termico permette di cancellare le strutture di prima solidificazione che sono più fragili, cioè meno plastiche delle strutture ricristallizzate.



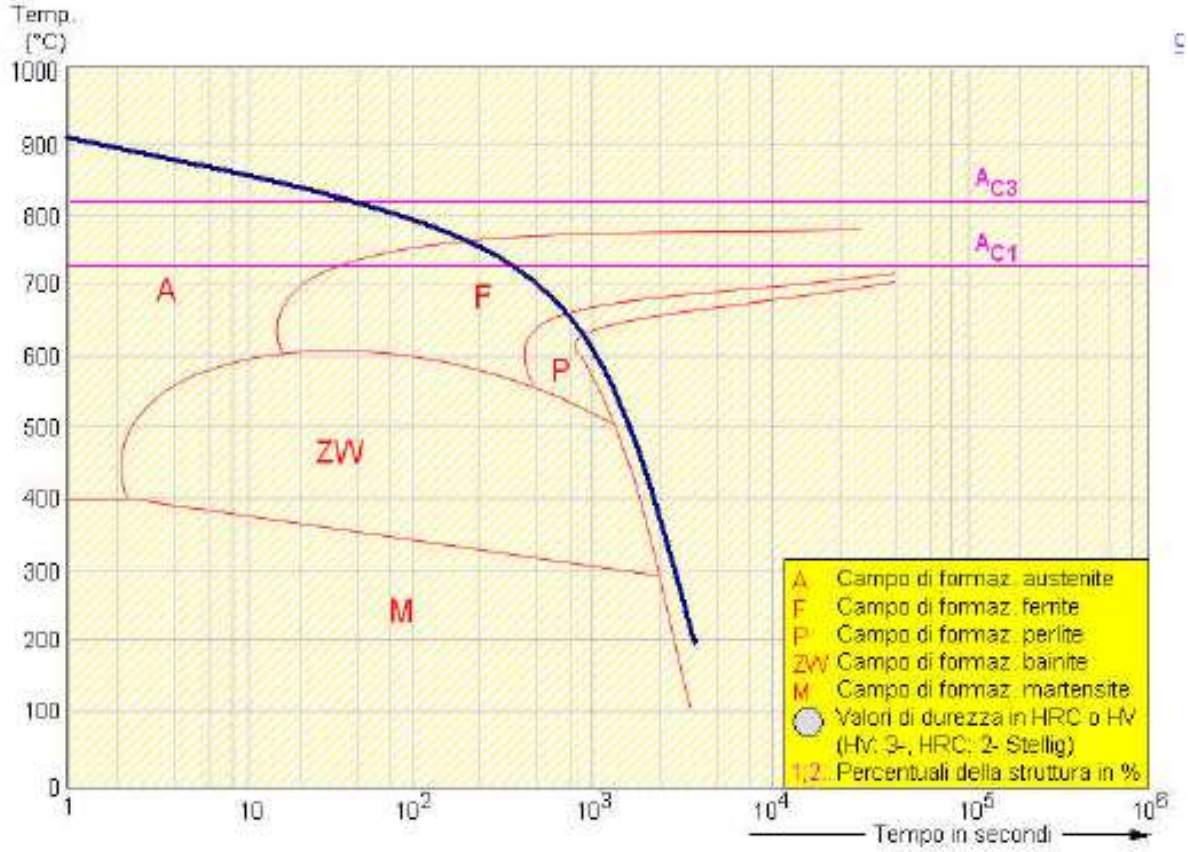
NORMALIZZAZIONE

La normalizzazione è un trattamento termico che si differenzia dalla ricottura per la maggior velocità di raffreddamento.

Dopo la permanenza in campo austenitico, il pezzo viene raffreddato, anziché in forno, in aria tranquilla; l'intervallo A3 - A1 viene attraversato più rapidamente e ne deriva una struttura ferrite + perlite ancora di tipo granulare ma più fine.

La finezza del grano, tipica delle strutture normalizzate, come abbiamo visto conferisce al metallo in generale migliori proprietà meccaniche.

La normalizzazione ha anche lo scopo di trasformare una struttura disomogenea e grossolana in una struttura a grano fine ed omogenea.



NORMALIZZAZIONE

Nelle figure che seguono sono esemplificati gli effetti della normalizzazione su un getto e su una lamiera.
Se però il tenore di C è piuttosto alto (oltre 0,30), il raffreddamento in aria può dar luogo ad incipienti fenomeni di tempra con sensibile peggioramento della duttilità; in questo caso si dovrà preferire la ricottura.



Fig. 61a – fuso allo stato grezzo

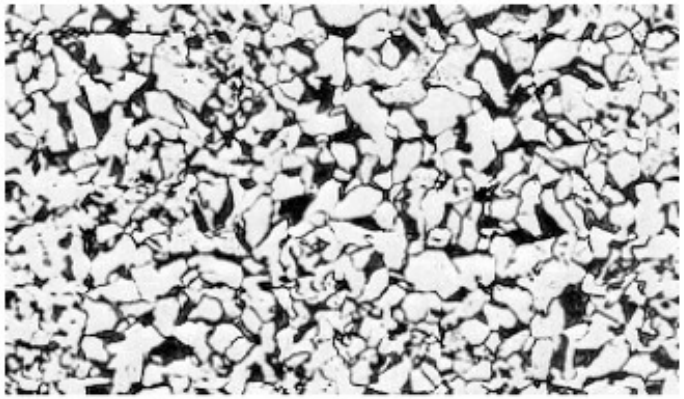


Fig. 61b fuso normalizzato

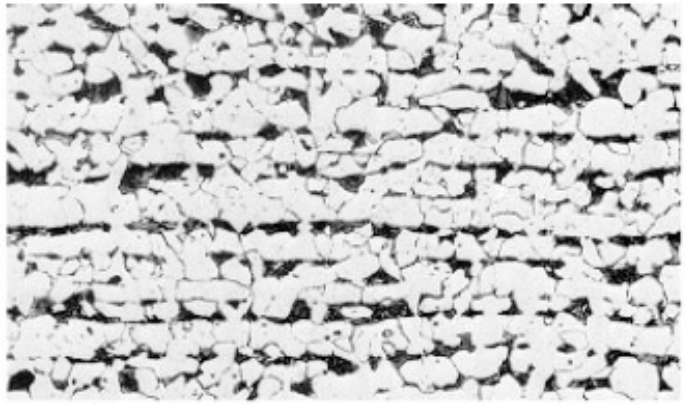


Fig. 62a – lamiera allo stato "as rolled"

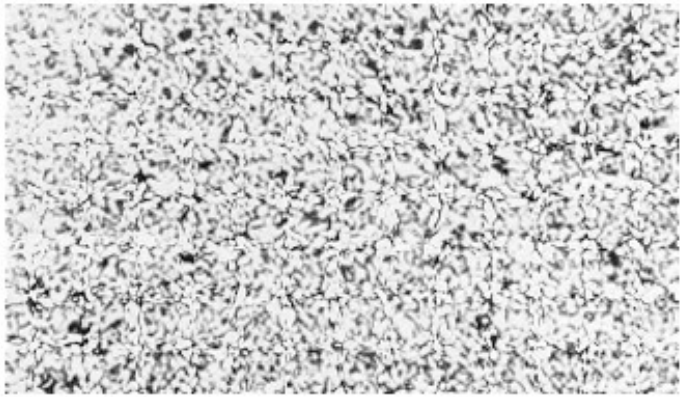


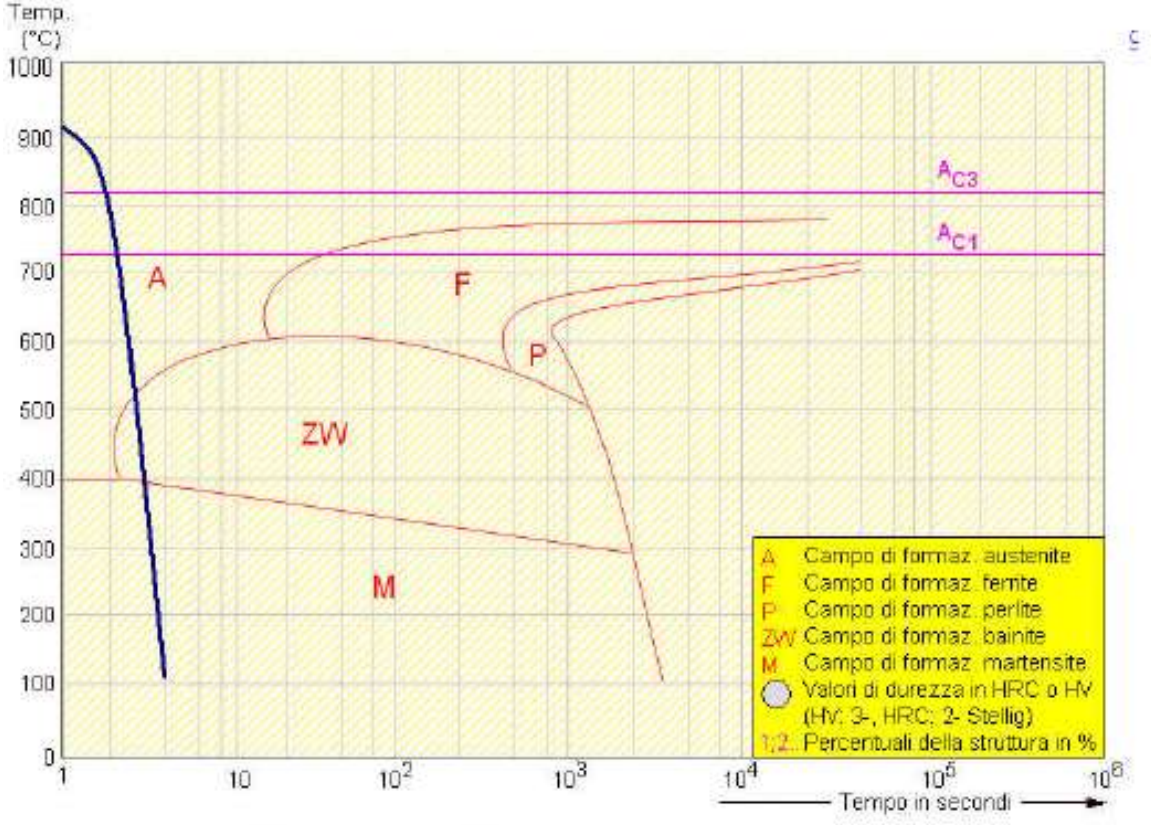
Fig. 62b lamiera normalizzata

TEMPRA

La tempra è un trattamento termico che si realizza riscaldando il materiale ad una temperatura superiore ad A3 e facendo seguire un raffreddamento molto veloce in acqua o olio.

Il raffreddamento veloce non lascia il tempo per la trasformazione da austenite in ferrite/perlite e vengono a formarsi strutture bainitiche o, per velocità di raffreddamento molto elevate, strutture martensitiche dure e fragili.

I fattori di temprabilità', cioè gli elementi e le situazioni che favoriscono la tempra, sono molti:
- velocità di raffreddamento;
- percentuale di carbonio;
- presenza di elementi di lega;
- dimensioni dei grani;
- temperatura di austenitizzazione;
- presenza di elementi non disciolti;
- velocità di riscaldamento.



TEMPRA

La velocità di raffreddamento è, come già detto, un fattore basilare e al suo aumentare aumentano le probabilità di avere strutture martensitiche.

Il carbonio e gli elementi di lega spostano verso destra le curve TTT o CCT e quindi a parità di velocità di raffreddamento e di altri fattori, favoriscono l'insorgere di strutture di tempra.

Le dimensioni dei grani giocano un ruolo importante; infatti la trasformazione ferritico-perlitica avviene per nucleazione a bordo grano e, tenendo conto che tutto ciò che inibisce questa trasformazione favorisce la tempra, più il grano è grosso meno contorno di grano è disponibile e più facile è l'insorgenza della tempra.

Più alta è la temperatura di austenitizzazione, più il grano risulta surriscaldato e di maggiori dimensioni e quindi l'acciaio è più temprabile.

Una velocità di riscaldamento molto elevata e una permanenza molto breve in campo austenitico-ferrtitico (fra A1 e A3) come ad es. in una saldatura, possono comportare una bassa diffusione ed omogeneizzazione del carbonio proveniente dalla cementite e creare quindi zone più ricche di carbonio. Tali zone quindi, al successivo raffreddamento, potranno tendere a temprare anche quando la composizione media dell'acciaio farebbe escludere questa possibilità.

TEMPRA

Oltre alla velocità di raffreddamento quindi sono molto importanti anche altri fattori tra cui la percentuale di C e degli altri elementi di lega.

Esiste una formula che mette in relazione i vari elementi e la loro influenza sulla temprabilità del materiale, è la formula del C equivalente:

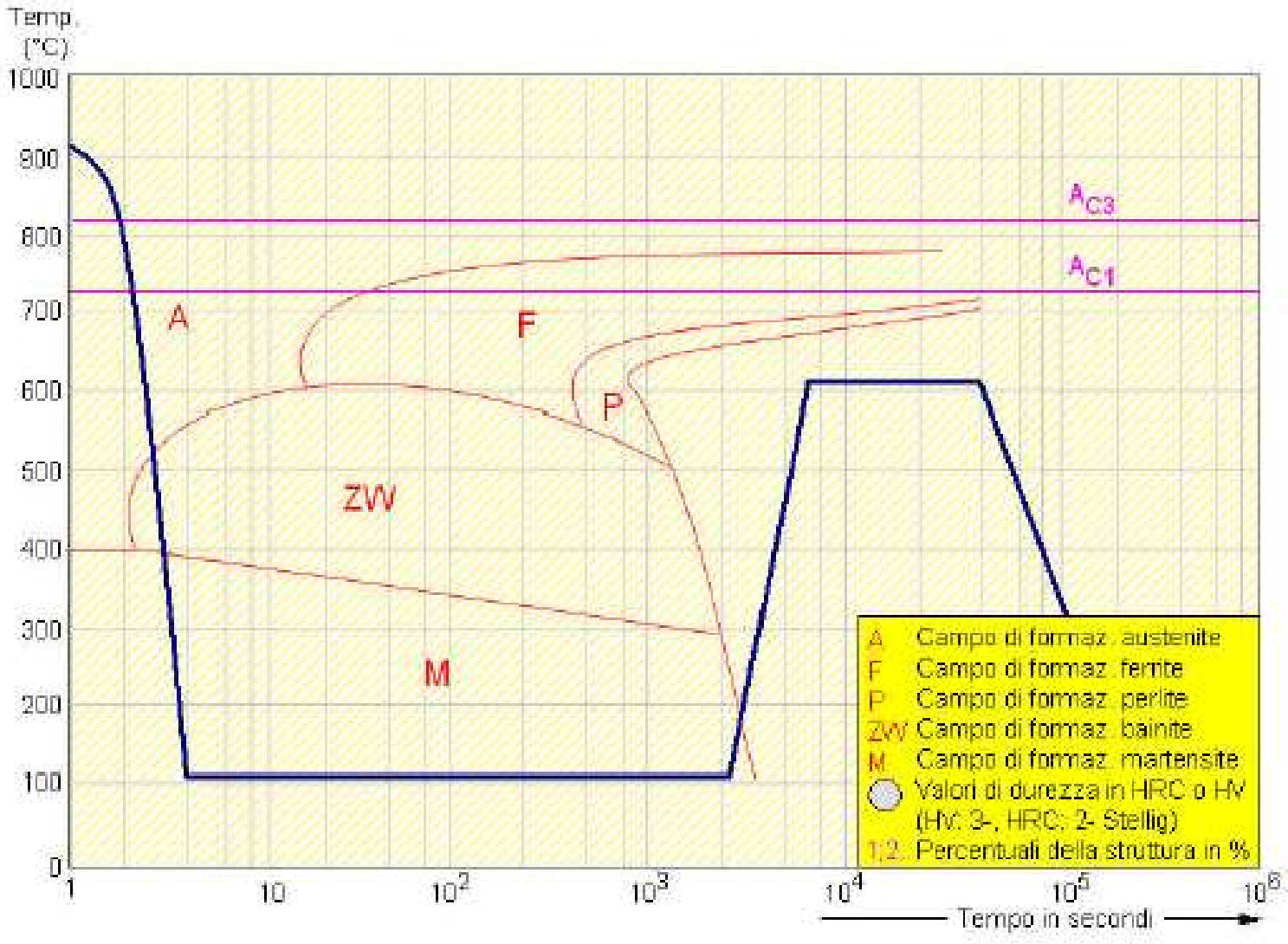
Ceq= C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

La tempra comporta un aumento della durezza del materiale ed una forte diminuzione della duttilità e della tenacità; è quindi molto importante cercare di evitare i fenomeni di tempra in particolare a seguito di operazioni di saldatura.

In alcuni casi il trattamento di tempra viene però volutamente applicato; è questo il caso della bonifica per mezzo della quale si possono ottenere materiali dotati di notevoli caratteristiche meccaniche associate a buone caratteristiche di tenacità.

BONIFICA

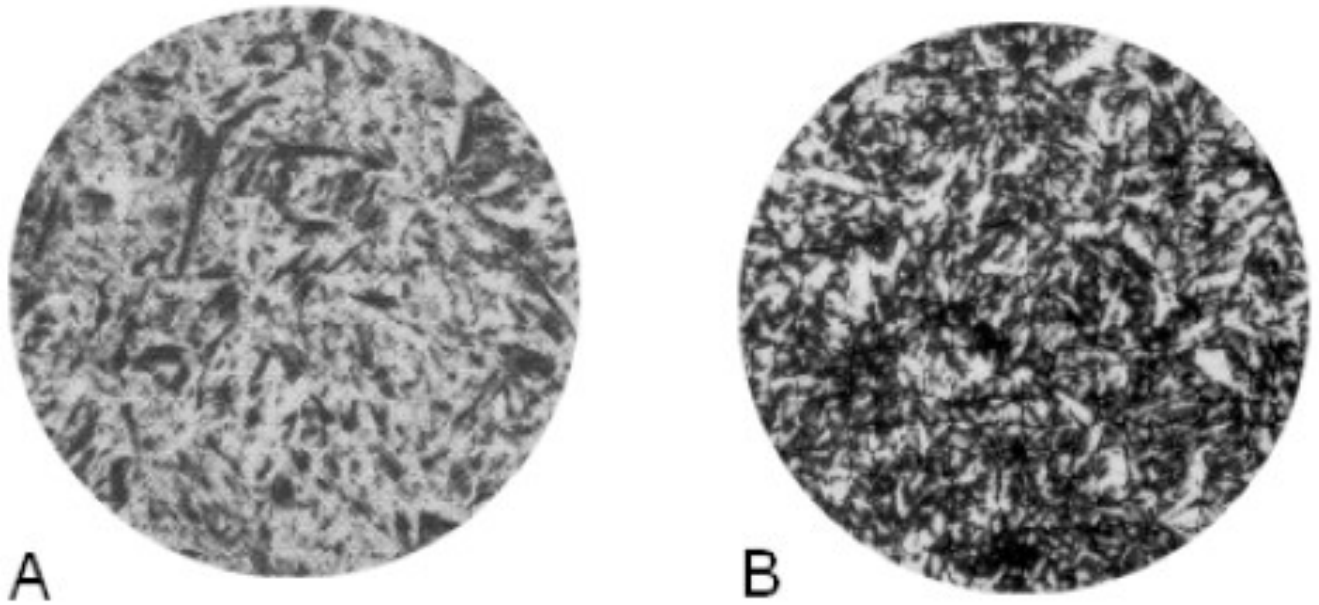
La bonifica consiste nella combinazione di due trattamenti termici: la tempra e il successivo rinvenimento .



RINVENIMENTO

Vediamo dunque come agisce in questo senso il trattamento di rinvenimento che si effettua a temperature comprese tra 400 e 650° C.

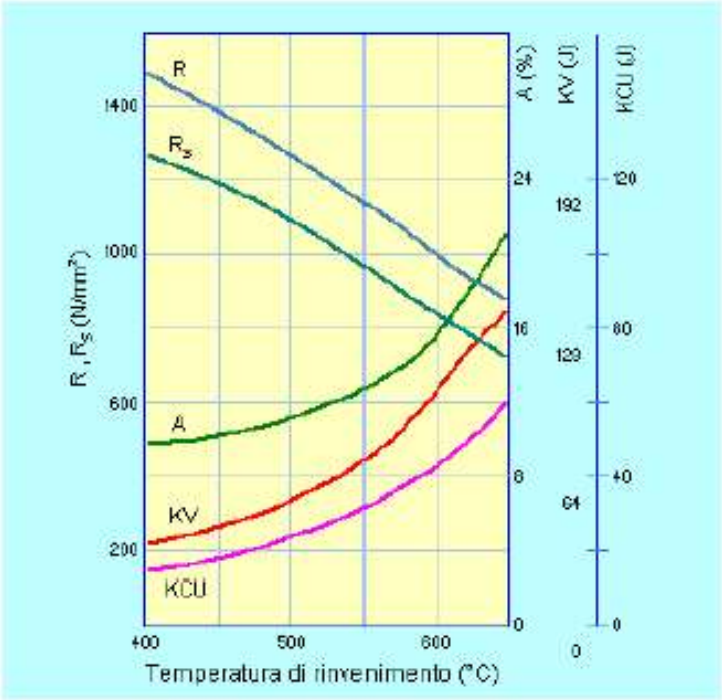
A tali temperature la struttura aciculare della martensite (figura A) si trasforma in una struttura non lamellare di ferrite e cementite (figura B).

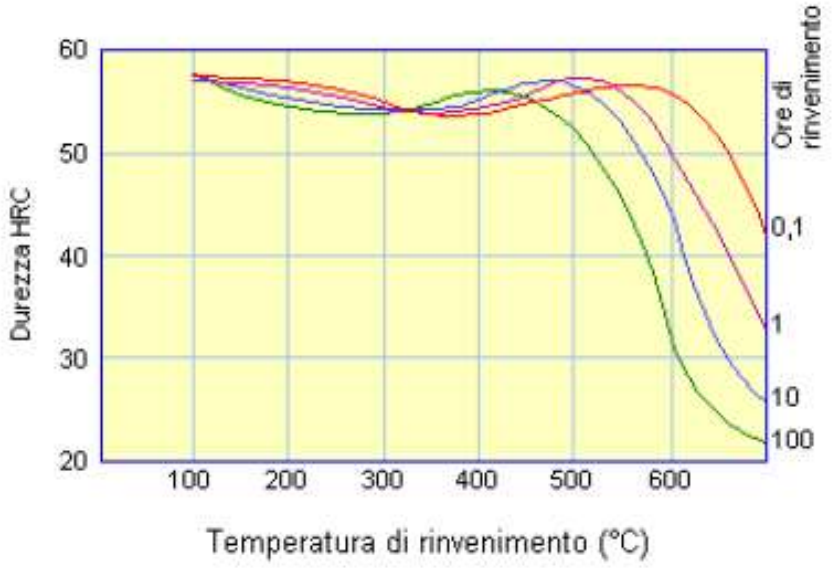


RINVENIMENTO

La durezza diminuisce fortemente e, tanto più, quanto più alta è la temperatura di rinvenimento; aumentano molto la duttilità e la tenacità dell'acciaio.

Ciò è determinato dalla fuoriuscita del carbonio, alle temperature di rinvenimento, dalla struttura tetragonale distorta della martensite, mentre rimane invariata la dimensione del grano, molto piccola perché ottenuta con elevate velocità di raffreddamento.





DISTENSIONE

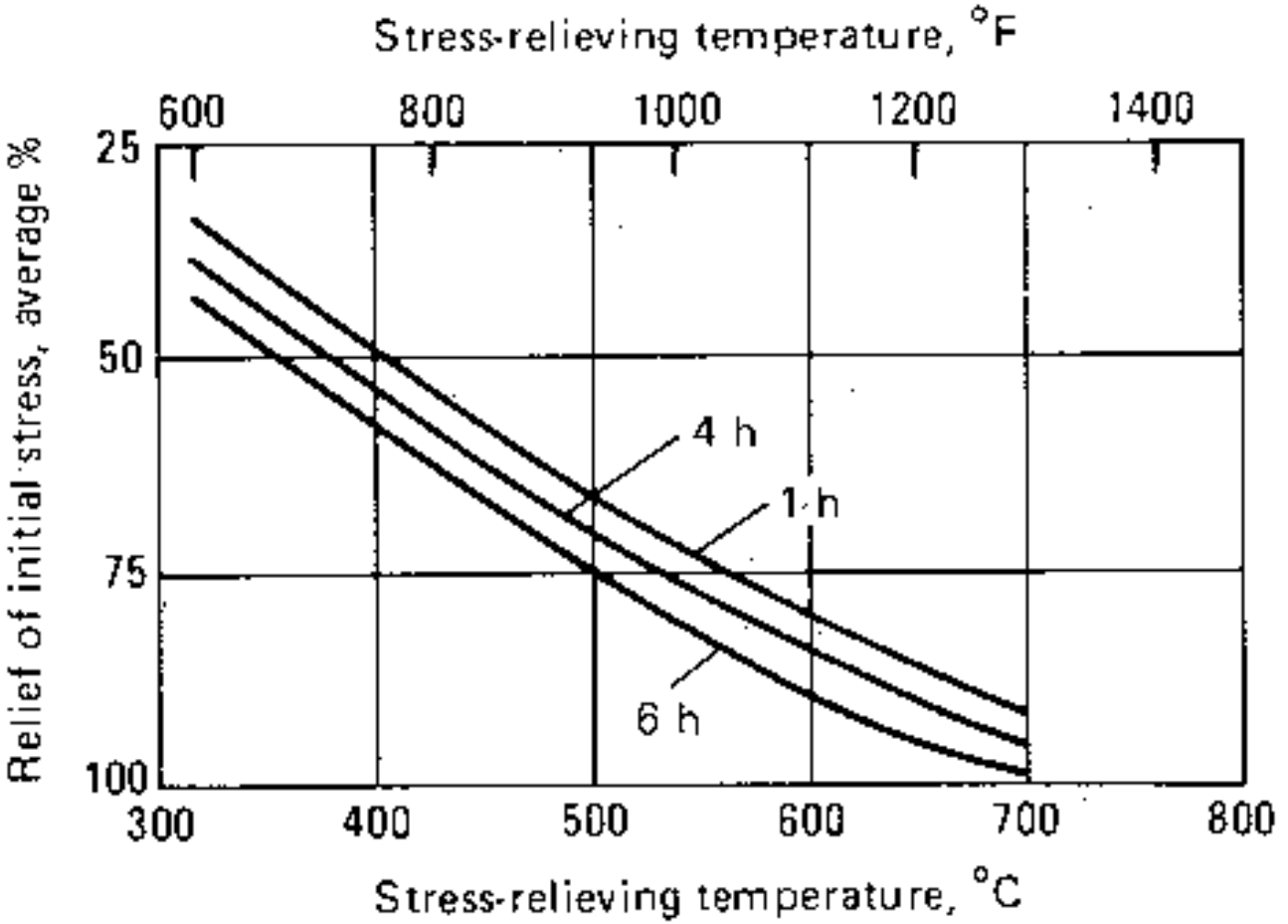
Il trattamento di distensione ha essenzialmente lo scopo di eliminare o meglio di ridurre il più possibile le tensioni residue che accompagnano inevitabilmente ogni saldatura.

Per gli acciai comuni da costruzione tale trattamento viene effettuato a 600 - 650° C mantenendo in genere questa temperatura per due minuti ogni millimetro di spessore con un minimo di 30 minuti.

L'efficacia del trattamento è conseguente al fatto che ad alta temperatura il carico di snervamento del materiale è ridotto a valori praticamente trascurabili.
Pertanto, riscaldando tutto un complesso saldato alla suddetta temperatura e mantenendovelo per un tempo sufficiente, le tensioni si rilassano riducendosi al valore del carico di snervamento a quella temperatura.

Naturalmente essendo questo trattamento termico eseguito alla stessa temperatura di quello di rinvenimento, gli effetti benefici dei due si sommano e quindi nel caso specifico possono essere eliminate ad esempio le punte di durezza.

TRATTAMENTI TERMICI DEGLI ACCIAI



Correlazione tra tempi e temperature del trattamento di distensione ed entità del rilassamento delle tensioni