

TEMPRA IPER DRASTICA IN ACQUA DI ACCIAI LEGATI SENZA ROTTURE E DEFORMAZIONI

Gianotti Elio. Trattamenti Termici Ferioli & Gianotti Rivoli (Torino).

Introduzione

Nell'ormai lontano 1930, Bain mise a punto la tecnica di registrazione delle trasformazioni microstrutturali nell'acciaio quando viene raffreddato quasi istantaneamente dalla temperatura di austenitizzazione fino a temperature gradualmente sempre più basse, e mantenuto a tali temperature per tempi molto lunghi al fine di permetterne tutte le trasformazioni microstrutturali ed allotropiche possibili.

Nascevano così i primi diagrammi TTT (Tempo, Temperatura, Trasformazione) con le trasformazioni isoterme degli acciai che furono il primo e fondamentale passo verso la comprensione scientifica dei fenomeni che accadevano durante il raffreddamento dell'acciaio.

Successivamente i diagrammi CCT (Continuous Cooling Transformation) resero più aderenti alla realtà tecnologica le curve di trasformazione ricavandole non più da trasformazioni isoterme ma da osservazioni di variazioni microstrutturali che avvengono in situazioni di velocità di raffreddamento variabili.

Le curve di Bain furono le prime che permisero di stabilire in termini scientifici quali potevano essere le curve di raffreddamento ideali per ottenere le migliori microstrutture di tempra evitando rotture e distorsioni. Le basi teoriche erano gettate, alla tecnologia spettava l'arduo compito di realizzare nella pratica industriale i tipi di raffreddamento teoricamente previsti.

A distanza di 70 anni possiamo affermare che il problema non è ancora stato risolto nella sua interezza.

In questo lavoro si tenta di ottimizzare un tipo di raffreddamento di tempra realizzando velocità altissime prima del punto Ms e di rallentarle poi moltissimo intorno a tale punto, al fine di avvicinarsi il più possibile alle condizioni ideali previste dalle curve di Bain.

In questo modo si tenta di ottenere strati superficiali durissimi, totalmente martensitici e quindi in compressione per ottimizzare le caratteristiche meccaniche dei pezzi, in modo particolare la resistenza a fatica ed allo stesso tempo si tende ad ottimizzare un mezzo di tempra totalmente compatibile con l'ambiente come è l'acqua.

Premesse sperimentali

L'analisi delle curve di Bain fa supporre che mentre è necessaria una alta velocità di raffreddamento dalla temperatura di austenitizzazione per evitare il naso della bainite e della perlite, una volta raggiunta la temperatura Ms la velocità di raffreddamento non ha più influenza agli effetti della trasformazione martensitica che avviene comunque e solo in funzione della temperatura raggiunta nel raffreddamento (vedi fig.1). Nelle tecniche di tempra si tende quindi a rallentare il più possibile tale velocità al fine di evitare tensioni residue che possono portare a deformazioni e rotture nei pezzi temprati.

Prove eseguite in laboratorio hanno però dimostrato che evitare alte velocità di raffreddamento nella zona di trasformazione martensitica non sempre è necessario od ottimale per ottenere le migliori proprietà. Tali prove infatti hanno evidenziato che velocità altissime di raffreddamento in tale fase possono evitare rotture e tensionamenti se condotte correttamente.

ACCIAIO 42 CrMo 4

CURVE C.C.T.

COMPOSIZIONE CHIMICA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	0,38	0,23	0,64	0,019	0,013	0,99	0,17	0,16	0,08	<0,01

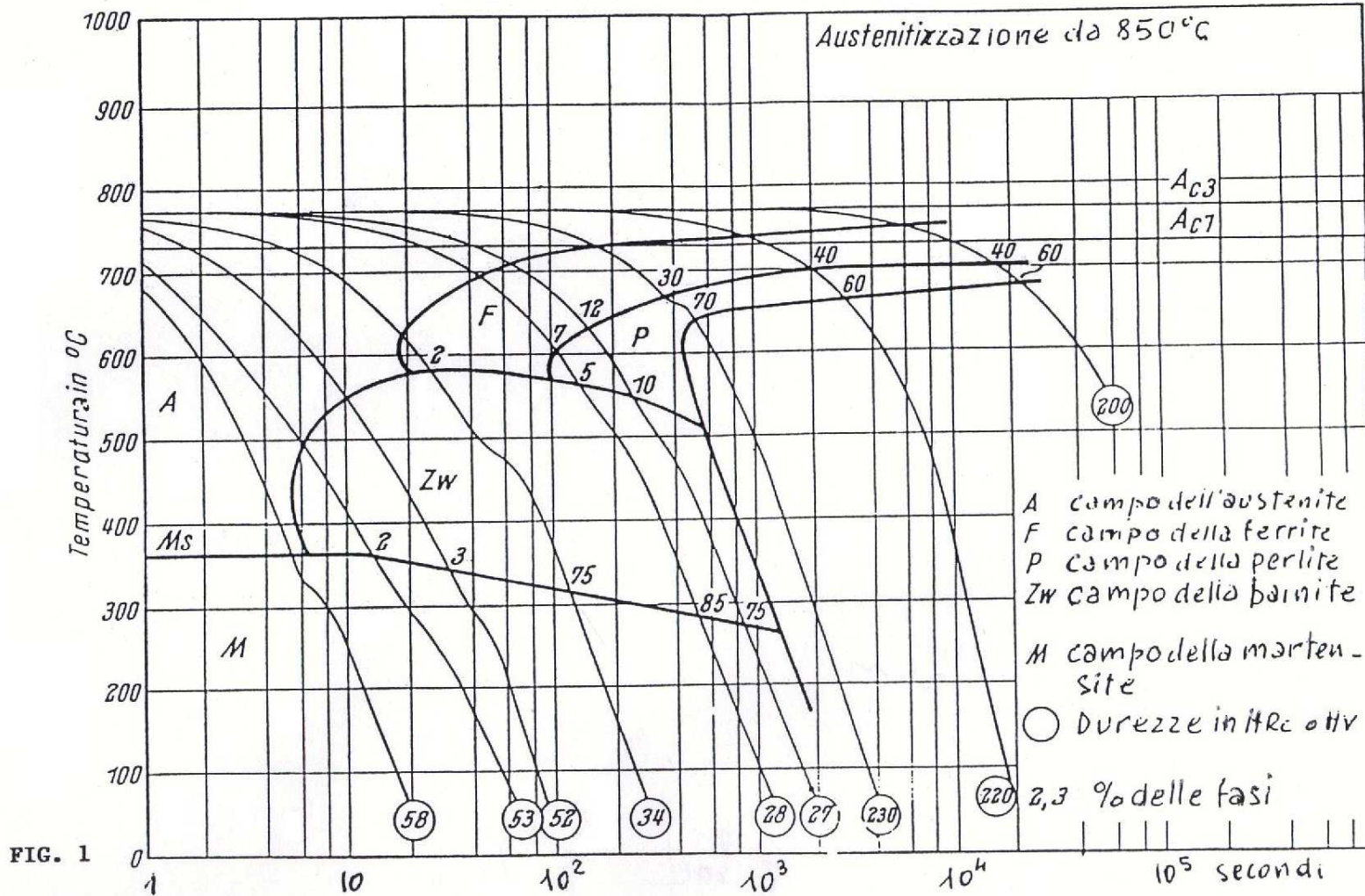


FIG. 1

La fig.2 mostra i dati sperimentali ottenuti su un cilindretto di 6 mm di \varnothing costruito in acciaio debolmente legato sottoposto a varie velocità di raffreddamento nella zona di formazione della martensite. La curva a campana mostra come le probabilità di rotture siano molto basse sia in caso di raffreddamenti lenti che in caso di raffreddamenti molto veloci, di conseguenza anche le tensioni interne sono in questi due casi, minime.

Con un processo di tempra molto drastica si possono quindi ottenere ottime durezza superficiali con distorsioni contenute, anche se le velocità di raffreddamento necessarie sono molto difficili da realizzare. Infatti una volta che la superficie del pezzo ha raggiunto la temperatura del liquido di tempra, il raffreddamento della parte sottostante avviene solo più per il fenomeno di diffusione del calore dal cuore verso l'esterno ed è quindi difficilmente influenzabile.

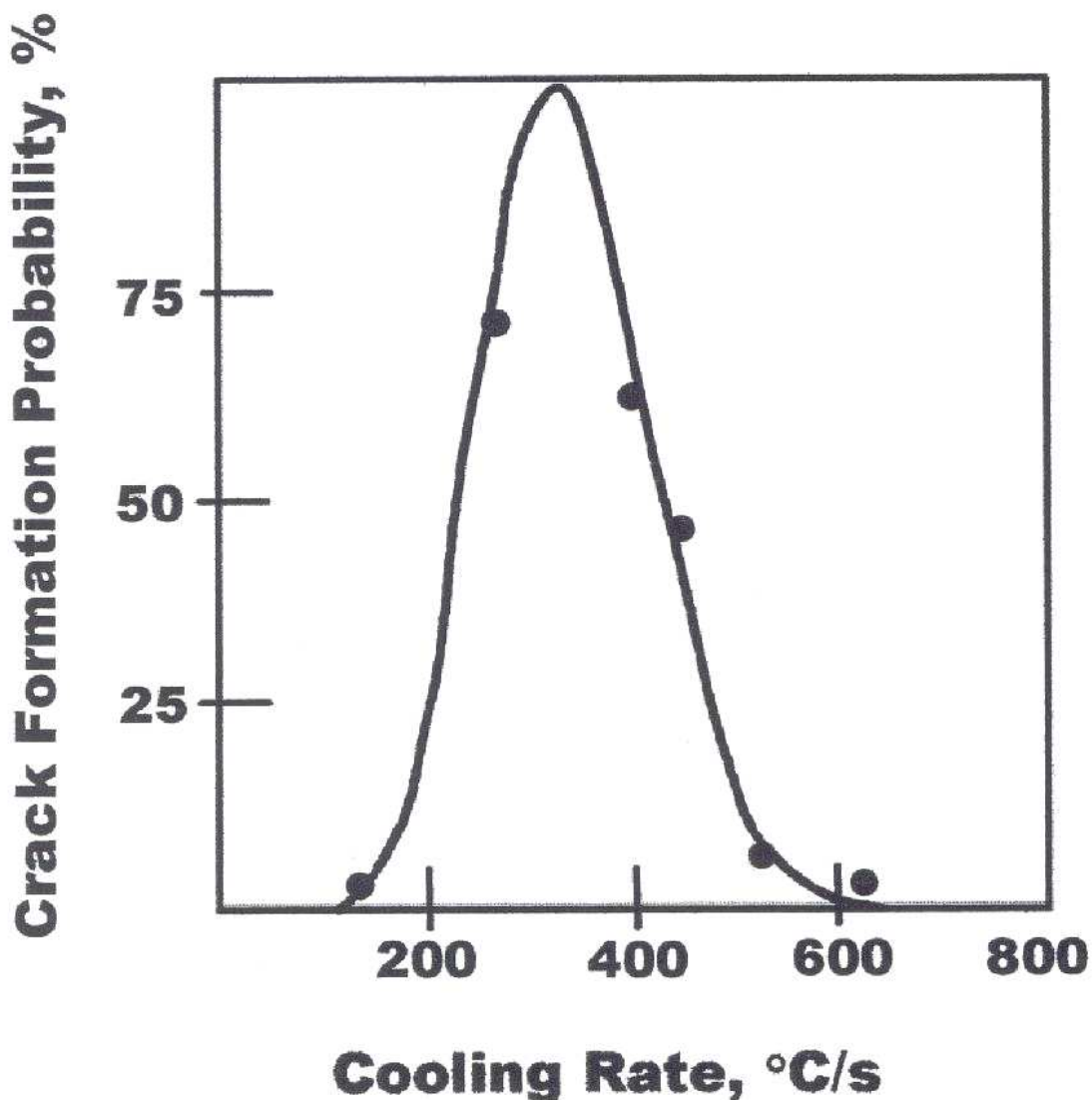


Figure 2 Effect of Cooling Rate on the Probability of Cracking

Spiegazione della diminuzione delle deformazioni

Durante il raffreddamento provocato da una tempra classica assume rilevanza notevole, agli effetti dello spessore superficiale dello strato di martensite che si forma, la variazione degli spessori dei pezzi.

La fig.3a) mostra schematicamente tale fenomeno: la variazione dello spessore della martensite, che ha un volume maggiore sia dell'austenite che delle strutture ferritico-perlitiche non temprate, crea delle deformazioni e delle tensioni notevoli che possono anche sfociare in rotture.

Nel caso di raffreddamenti molto veloci invece la martensite si forma in modo simultaneo su tutta la superficie del pezzo creando uno strato indurito uniforme, che mette in compressione tutta la superficie del pezzo, con benefici effetti sia sulla resistenza a fatica che sulla deformazione (vedi fig.3b).

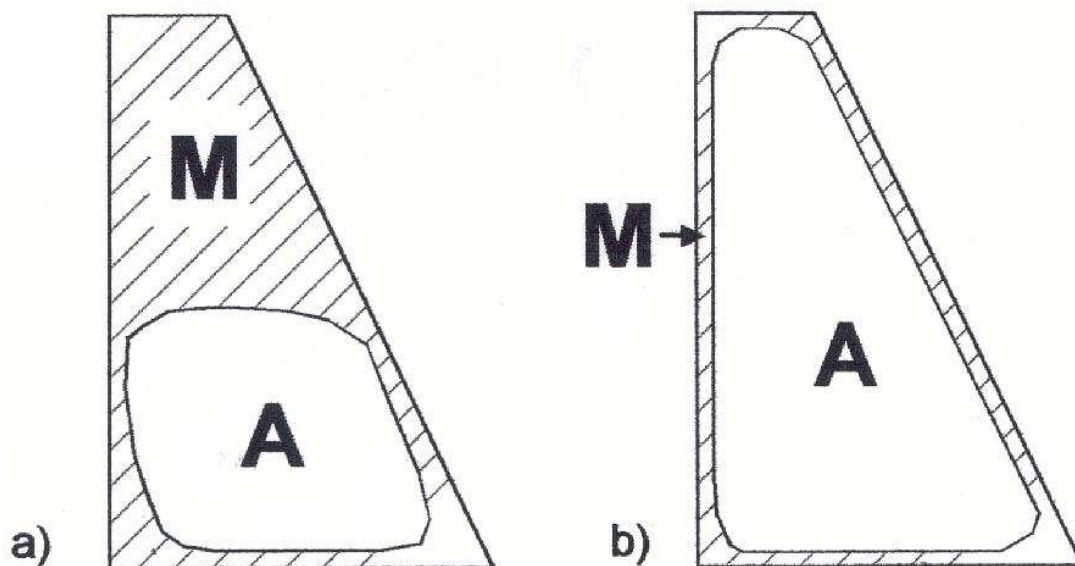


Figure 3 Martensite Formation During Drenching
a) Conventional quenching, b) Intensive quenching

Infatti in queste condizioni la superficie del pezzo raggiunge la temperatura M_s tanto rapidamente che il cuore è ancora caldo, austenitico. Mentre la martensite si forma alla superficie, il cuore austenitico continua a raffreddarsi diminuendo di volume. Ma lo strato superficiale martensitico è ormai rigido e mantiene la forma iniziale del pezzo agendo come uno stampo esterno di contenimento delle deformazioni. L'austenite raffreddandosi diminuisce di volume mettendo ulteriormente in compressione la superficie esterna.

È da notare come l'austenite sia ancora molto plastica per cui se nel raffreddamento le tensioni superano il suo limite di snervamento si deforma e mantiene l'integrità del pezzo che la contiene.

Se il raffreddamento veloce continua, in poco tempo anche il cuore del pezzo diventa martensitico e quindi aumenta di volume spingendo verso l'esterno la primitiva cortecchia martensitica che si trovava in forte stato di compressione. La spinta verso l'esterno esercitata dal cuore martensitico è tale da lasciare però ancora sempre in compressione lo strato esterno perché il volume della martensite a temperatura ambiente è pur sempre

inferiore al volume dell'austenite calda alla temperatura in cui è iniziata a formarsi la corteccia esterna martensitica.

Esiste un preciso momento, nella fase di raffreddamento, in cui la compressione della corteccia esterna raggiunge il suo massimo valore; una delle tecniche di tempra adottate per evitare deformazioni e cricche consiste nell'individuare esattamente questo istante ed estrarre dal liquido di tempra il pezzo per lasciarlo raffreddare all'aria. La velocità di raffreddamento del cuore diminuirà ed a seconda dello spessore del pezzo si potrà formare bainite, oppure perlite e ferrite. Queste fasi hanno un volume minore della martensite e quindi la corteccia esterna martensitica resterà in forte compressione.

Normalmente c'è una finestra di alcuni secondi entro la quale si deve estrarre il pezzo dall'acqua; questa finestra è tanto più grande quanto maggiore è lo spessore del pezzo.

Il diagramma di fig.4 illustra schematicamente il comportamento delle tensioni superficiali di un pezzo temprato in funzione delle trasformazioni che avvengono nel cuore col passare del tempo.

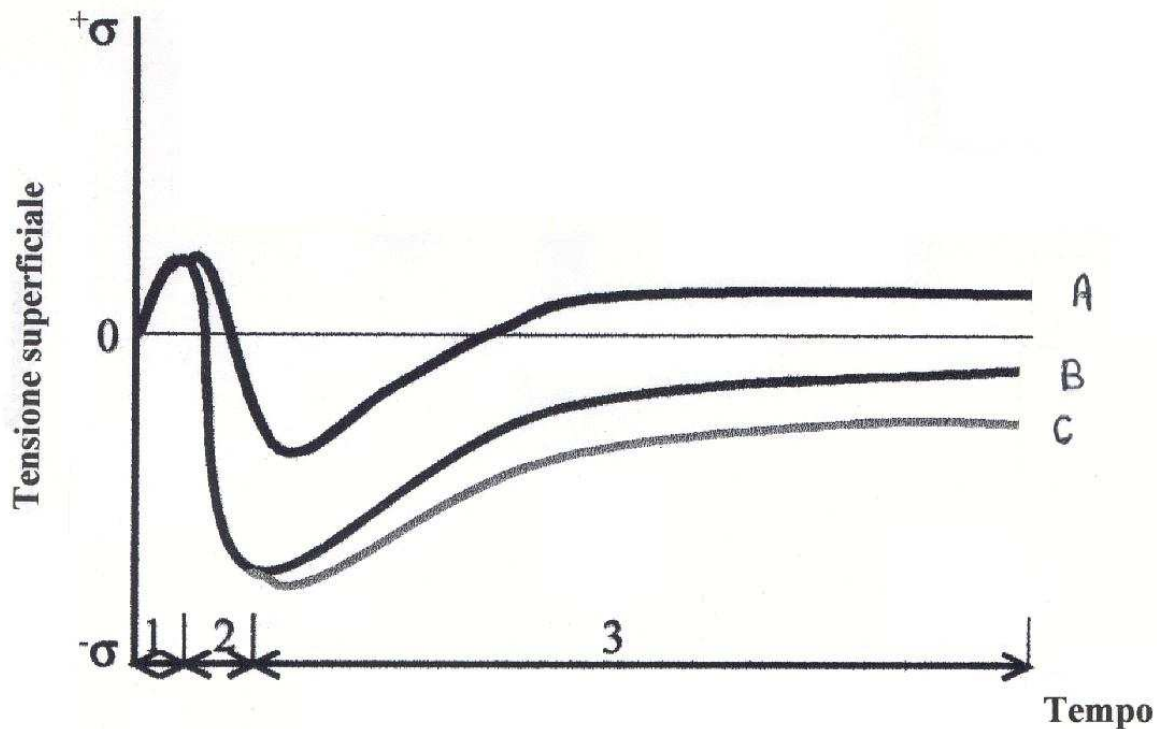


Fig.4 Diagramma delle variazioni delle tensioni superficiali al variare del tempo

- 1 Raffreddamento dalla temperatura di austenitizzazione ad inizio di formazione della martensite.
 - 2 Massima formazione di martensite sulla pelle.
 - 3 Fase di formazione della martensite a cuore.
- A. Tempra tradizionale poco drastica.
B. Tempra drastica con formazione di martensite a cuore.
C. Tempra drastica con formazione di strutture miste a cuore (bainite, perlite e ferrite).

Una tempra poco drastica produce scarsa quantità di martensite nella superficie del pezzo, per cui il fenomeno di compressione è abbastanza limitato ed è molto probabile che quando la trasformazione avviene nel cuore la superficie passi addirittura in uno stato

di tensione. Infatti in questo caso, essendo il raffreddamento lento, quando inizia la formazione di martensite all'esterno la temperatura all'interno del pezzo non è più molto alta e nel raffreddamento finale la diminuzione del volume del cuore è abbastanza limitata per cui il fenomeno di compressione della superficie dovuto a tale ritiro è pure limitato e viene annullato o invertito dalla espansione del cuore quando questo raggiunge la temperatura della trasformazione martensitica.

Questa tensione di trazione superficiale spiega le rotture che a volte avvengono nei pezzi temprati se non prontamente rinvenuti.

Il variare del comportamento e dei risultati che si ottengono al variare della drasticità di tempra in termini di caratteristiche meccaniche, distorsioni e rotture sono rappresentati schematicamente nel diagramma di fig.5. Il diagramma illustra concettualmente i principi sperimentali; è chiaro che le tecnologie per l'attuazione delle velocità di raffreddamento necessarie presentano delle difficoltà non sempre superabili.

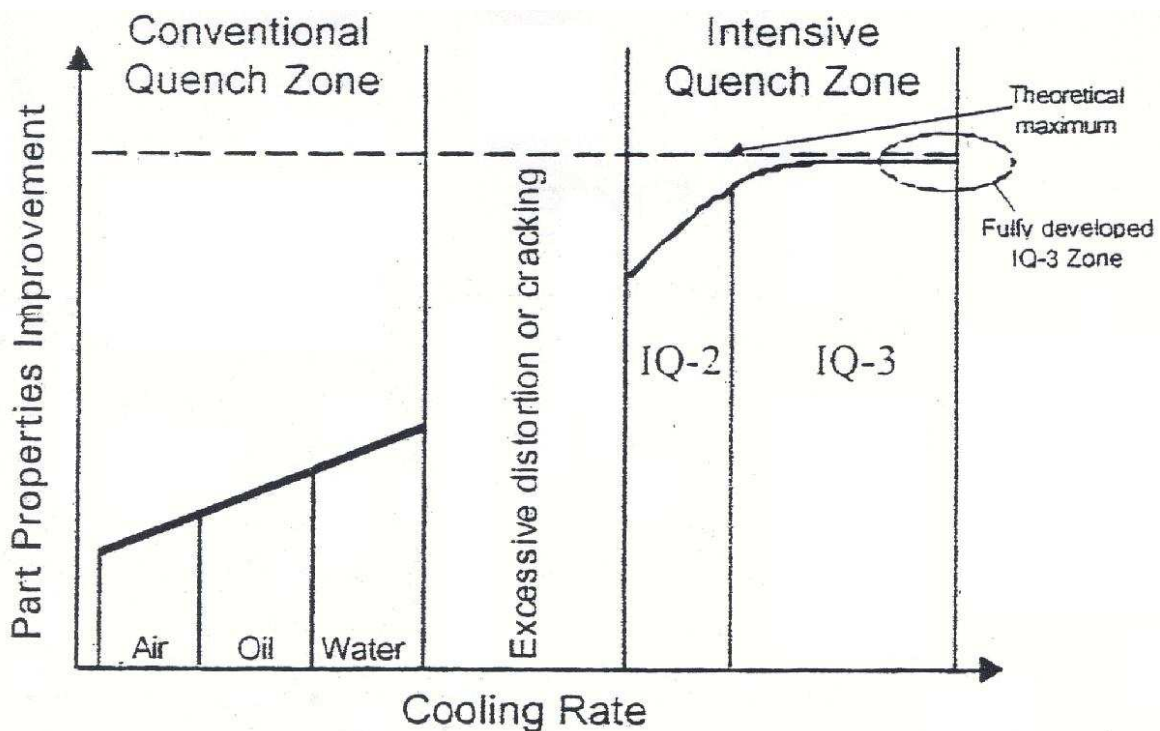


Fig.5 Miglioramento delle proprietà meccaniche con l'aumentare della drasticità di tempra.

Per ottenere i migliori risultati gli elementi leganti e quindi la temprabilità dell'acciaio, deve essere scelta in relazione alla geometria del pezzo in modo da assicurare che lo strato martensitico abbia una profondità ottimale. Un acciaio più temprabile o molto legato non sempre è la scelta necessaria per ottenere la migliore condizione di compressione nello strato martensitico. Molto sovente le proprietà richieste possono essere ottenute con acciai meno legati e meno costosi; un altro vantaggio di questa tecnologia è che si può utilizzare come mezzo di tempra l'acqua che è decisamente meno inquinante e pericolosa dell'olio, del sale e dei glicoli.

Tecniche di tempra iperdrastica

L'estrazione del calore da un pezzo immerso in acqua durante la tempra avviene secondo tre fasi distinte.

- 1 - formazione di uno strato di vapore sulla superficie dovuto alla alta temperatura del pezzo. Tale film di vapore fa da isolante alla trasmissione del calore ed essendo discontinuo e variabile rende il raffreddamento variabile e poco controllabile.
- 2 - al diminuire della temperatura il film di vapore si rompe ed inizia una fase di nucleazione di piccole bollicine di vapore che si originano ad una velocità di oltre 50 per secondo. Questa è la fase in cui è massima la velocità di estrazione del calore.
- 3 - infine si raggiunge una temperatura alla quale non possono più formarsi bollicine ed inizia la fase di raffreddamento per convezione che è la più lenta delle tre.

Le tecniche adottabili per realizzare dei cicli tecnologici che possono mettere a frutto i principi teorici e sperimentali esaminati, utilizzando le capacità di raffreddamento dell'acqua, sono essenzialmente due.

La prima tecnica è una tempra a tre stadi che può essere così riassunta:

- a - raffreddamento veloce fino al raggiungimento della fase di raffreddamento per convezione;
- b - estrazione all'aria per uniformare la temperatura fino a cuore;
- c - immersione in acqua per terminare il raffreddamento in fase di convezione.

Al fine di minimizzare le distorsioni occorre realizzare un raffreddamento molto drastico nello stadio a- per cui non è sufficiente realizzare il raffreddamento in acqua pura ma occorre adottare acqua e sale a concentrazioni del 10% circa. Quando si arriva alla temperatura in cui cessa la formazione delle bollicine di vapore si estrae il pezzo dall'acqua. Per gli acciai da bonifica tale punto è all'incirca a metà delle temperature fra Ms e Mf per cui corrisponde alla formazione di circa il 50% di martensite.

In queste condizioni lo strato superficiale avendo ancora circa il 50% di austenite non è fragile e si evita la formazione di cricche.

Nella permanenza in aria la cortecchia temprata è rinvenuta dal calore che esce dal cuore caldo del pezzo e la temperatura si uniforma; inoltre in questa fase la compressione della cortecchia martensitica formatasi nel raffreddamento in acqua salata, si stabilizza. Questa tensione impedisce la formazione di cricche quando il pezzo viene di nuovo immerso nell'acqua salata per completare lo stadio c- di raffreddamento per convezione fino alla temperatura ambiente (vedi fig.6).

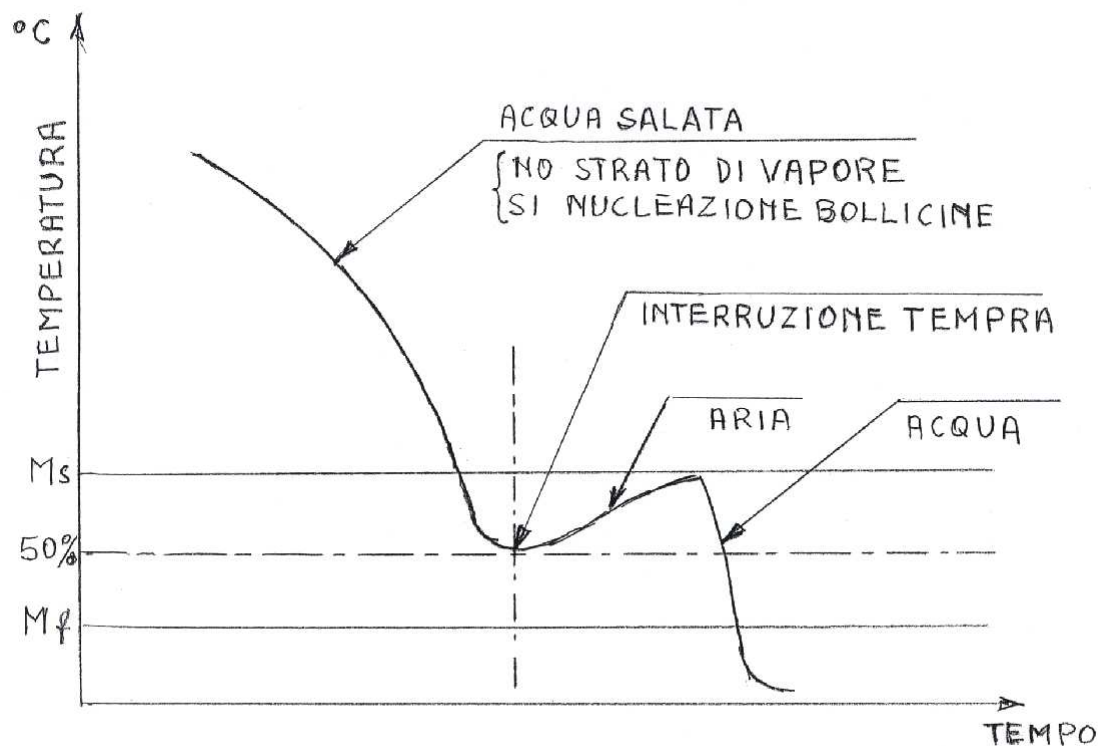


Fig.6 Tempra iperdrastica a tre stradi.

La seconda tecnica è una tempra a due stadi che produce uno strato di compressione superficiale, più intenso e profondo.

In questo caso si tende a realizzare un'agitazione dell'acqua tanto drastica da eliminare sia la formazione dello strato di vapore che delle bollicine e rendere il raffreddamento completamente convettivo. Il raffreddamento deve essere continuo ed uniforme sull'intera superficie fino a quando lo strato martensitico superficiale raggiunge il suo massimo grado di compressione ed il valore ottimale di spessore in relazione alla forma geometrica del pezzo, dopo di che si estrae il pezzo e lo si lascia raffreddare all'aria, invece se dopo aver raggiunto questo stadio, il raffreddamento continua in acqua fino a raggiungere la temperatura del mezzo di tempra al cuore del pezzo, la tensione di compressione dello strato superficiale diminuirà. È quindi importante fermare il raffreddamento al momento ottimale (vedi fig.7)

Non sempre la realizzazione di questo ciclo è possibile. Ci sono infatti forme di pezzi con geometria tale da rendere difficile l'afflusso dell'acqua in modo uniforme su tutta la superficie; oppure delle zone sottili che diventano martensitiche immediatamente fino a cuore ed infine se i pezzi sono temprati a lotti tendono a formarsi delle zone a minor agitazione nel liquido temprante che creano disuniformità nel raffreddamento. In questi casi è necessario ricorrere alla prima tecnica di ipertempra.

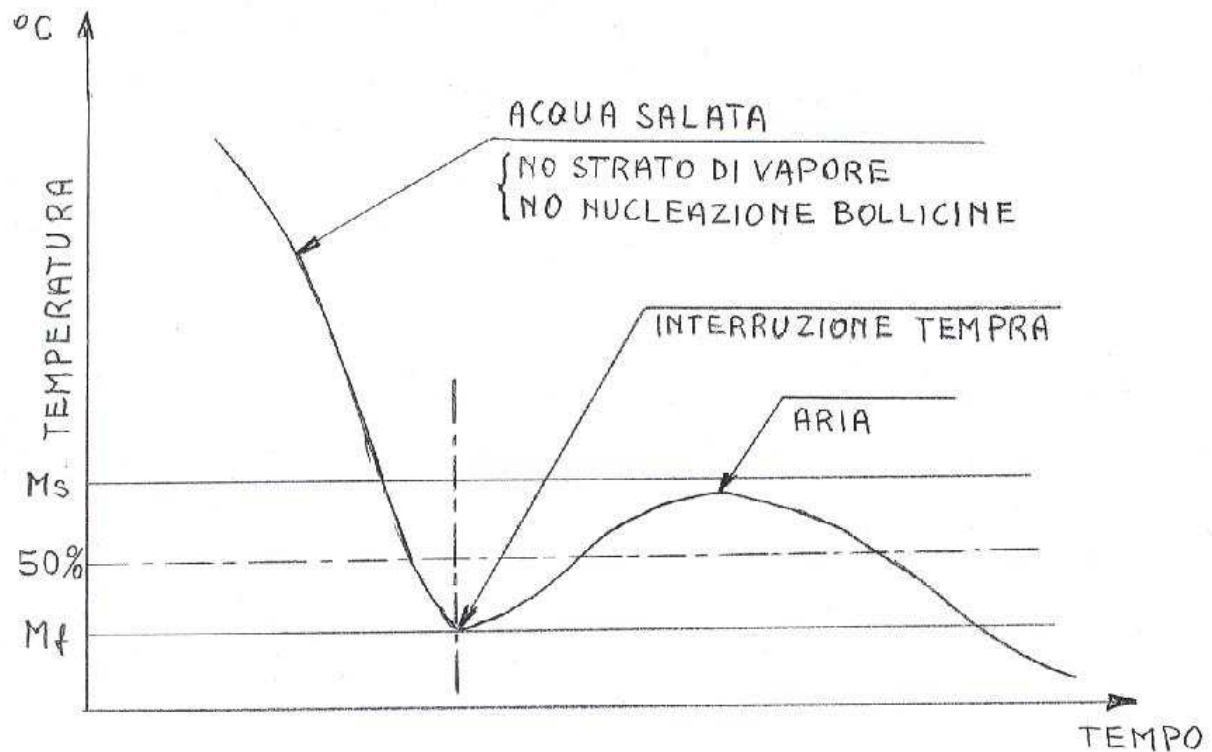


Fig.7 Tempa iperdrastica a due stadi.

ATTREZZATURE PER LA IPERTEMPRA

Ipertempa a tre stadi

La vasca di tempa tradizionale non necessita di grosse modifiche. È necessario implementare l'agitazione aumentando il numero delle eliche di dotazione od il diametro delle eliche stesse. È sconsigliabile invece aumentare il numero dei giri perché tendono a formarsi delle cavitazioni con disuniformità di movimento del liquido. L'attrezzatura di immersione e riemersione dei pezzi deve essere abbastanza veloce e deve comunque avvenire in tempi costanti per garantire la ripetibilità del ciclo una volta messi a punto i tre stadi.

In fig.8 sono schematizzati i controlli necessari sia per la messa a punto del ciclo che per la sua ripetibilità.

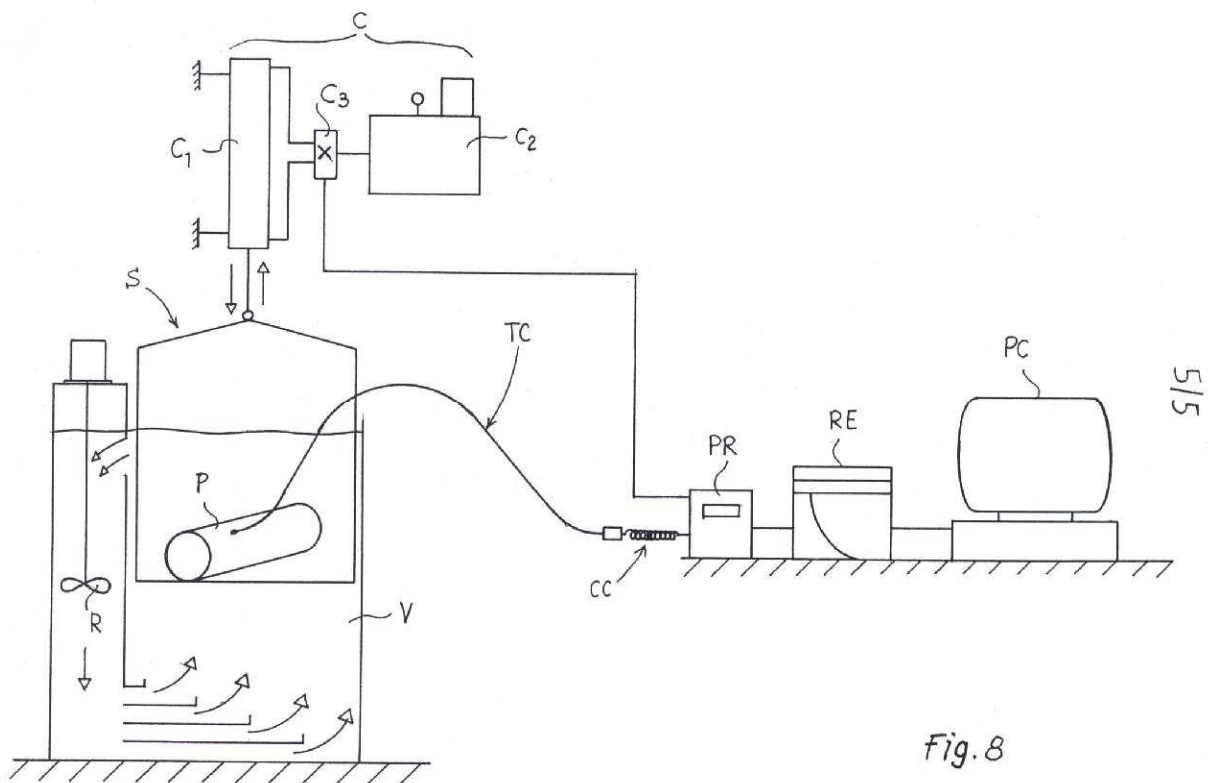


Fig. 8

Legenda dell'attrezzatura per la realizzazione della tempra iperdrastica

C= gruppo di immersione e riemersione dei pezzi da temprare

C1=cilindro e pistone per salita e discesa rapide.

C2= centralina idraulica,

C3= elettrovalvola di distribuzione olio pilotata.

S= cestello;

R= elica di agitazione acqua

V= vasca

P= pezzo da temprare

TC= termocoppia

CC= cavo compensato della TC

PR= programmatore

RE= registratore

PC= personal computer

Ipertempra a due stadi

Può essere realizzata in due modi.

Quando i pezzi hanno una geometria relativamente semplice, come ad esempio cilindri, anelli, forme piatte, ecc. un flusso di acqua molto veloce che sfiora le superfici delle parti può essere sufficiente per realizzare le velocità di raffreddamento necessarie.

Per parti più complicate, come ad esempio alberi con flangia, in cui la flangia può bloccare il flusso d'acqua lungo il gambo, è necessario creare dei sistemi di raffreddamento a doccia che possono coprire uniformemente tutta la superficie dei pezzi.

In entrambi i casi una o più pompe provvedono al necessario flusso di acqua per ottenere il massimo di drasticità di tempra.

Risultati metallurgici e di forma

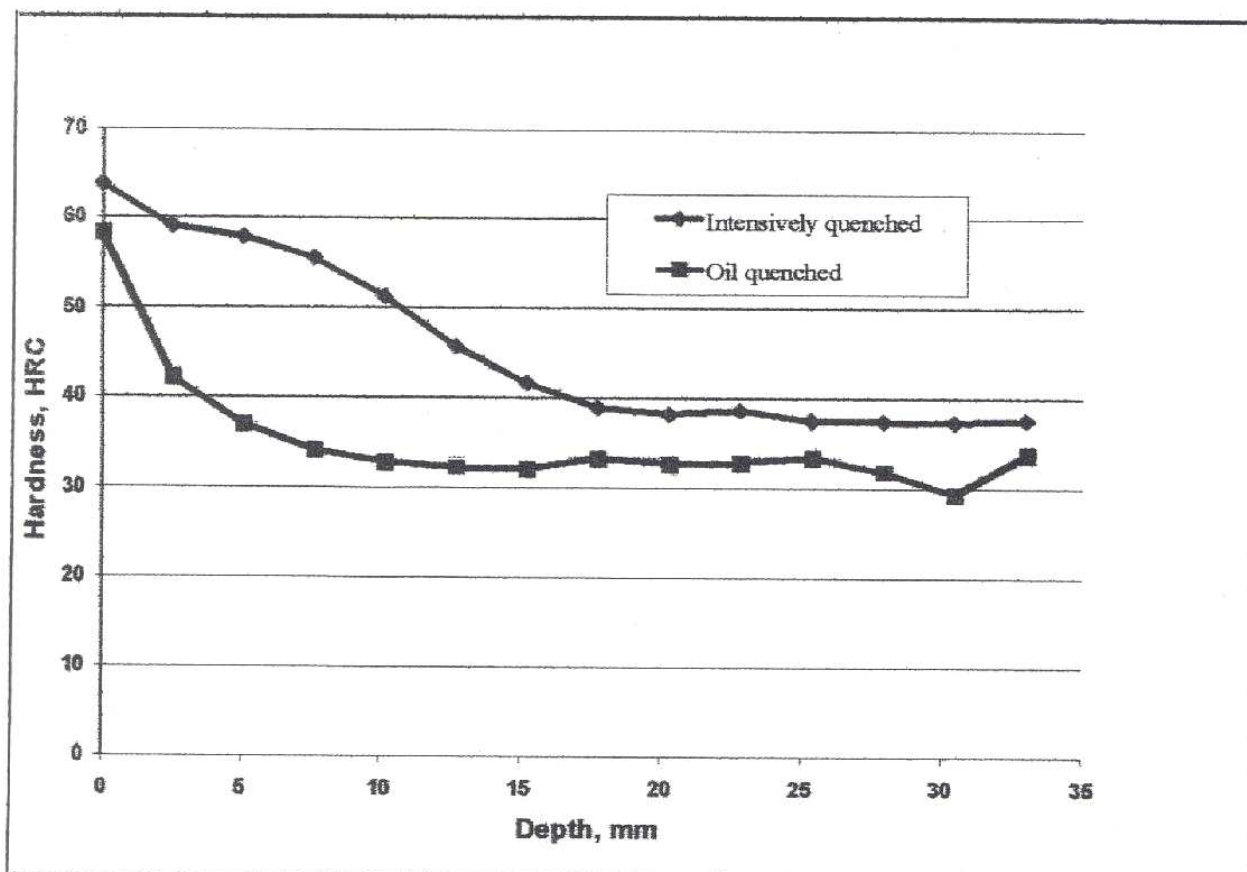
I risultati che si ottengono con le tecniche di ipertempra sono illustrati nelle tabelle sottostanti.

Tipo di tempra	Durezza HRc		
	40 Cr (AISI 4140) bulloni M10	4037 bulloni M18	5160 H barra Ø 30mm
Olio	42.7	51-47	60.4
Ipertempra	54.8	58-60	63.4

Tab.1 Durezze superficiali. Differenza fra tempra in olio e ipertempra.

Particolari	Durezza a cuore HRc	
	Olio	Ipertempra
86B30, spessore 25X25mm denti di ruote	36	50
52100, anelli di cuscinetti spessore 19mm	56	61
4140, Ø 45 X 264 mm perno sterzo	30	48
1045, Ø 25,4X 254 mm alberi con chiavetta	31	50
4137, 110 X 116 mm soles forgiate	42	47
4130, 129 X 137 mm cunei denti di escavatore	29	38

Tab.2 Durezze a cuore. Differenze fra tempra in olio e ipertempra.



Tab.3 Distribuzione della durezza a tutta tempra di un cilindro in acciaio 1547 Ø 73 mm.

Acciai Russi (Acciai AISI)	Tempra	Trazione	Snervamento	Resilienza	Durezza HRB
40x (5140)	In olio	780	575	113	217
	Ipertempra	860	695	168	269
35XM (4130)	In olio	960	775	54	285
	Ipertempra	970	820	150	285
25X1M (4118)	In olio	755	630	70	229
	Ipertempra	920	820	170	285

Tab.4 Proprietà meccaniche a cuore dopo tempra in olio e dopo ipertempra di campioni Ø 50 mm. L'ipertempra migliora tutte le proprietà meccaniche, la resilienza aumenta in alcuni casi addirittura di 2 o 3 volte.

Particolari	Proprietà	Tempra in olio	Ipertempra
1340 M22X123mm bulloni	Resistenza a trazione, MPa	1093	1176
S5 Ø 38X56mm punzoni	Resilienza Nxm	6.8	12.2

Tab.5 Miglioramento delle proprietà meccaniche di differenti particolari. L'ipertempra migliora le proprietà meccaniche perché rende più fine la struttura martensitica.

Riduzione delle deformazioni con l'ipertempra

Tempra in olio 1 pezzo alla volta	Tempra in olio a lotti	Ipertempra
0.20 – 0.36 mm	0.25 – 0.51 mm	0.08 – 0.12 mm

Tab.6 Misura delle deformazioni assiali di un albero con chiavetta (acciaio 1045, Ø 25.4 mm con chiavetta di 6.4 x 6.4mm). L'ipertempra deforma meno nei confronti della tempra in olio sia nel caso di pezzi singoli che nel caso di tempra in lotti.

