

# **CONTROLLO DELLE DEFORMAZIONI E RADDRIZZATURA DEI PEZZI TEMPRATI**

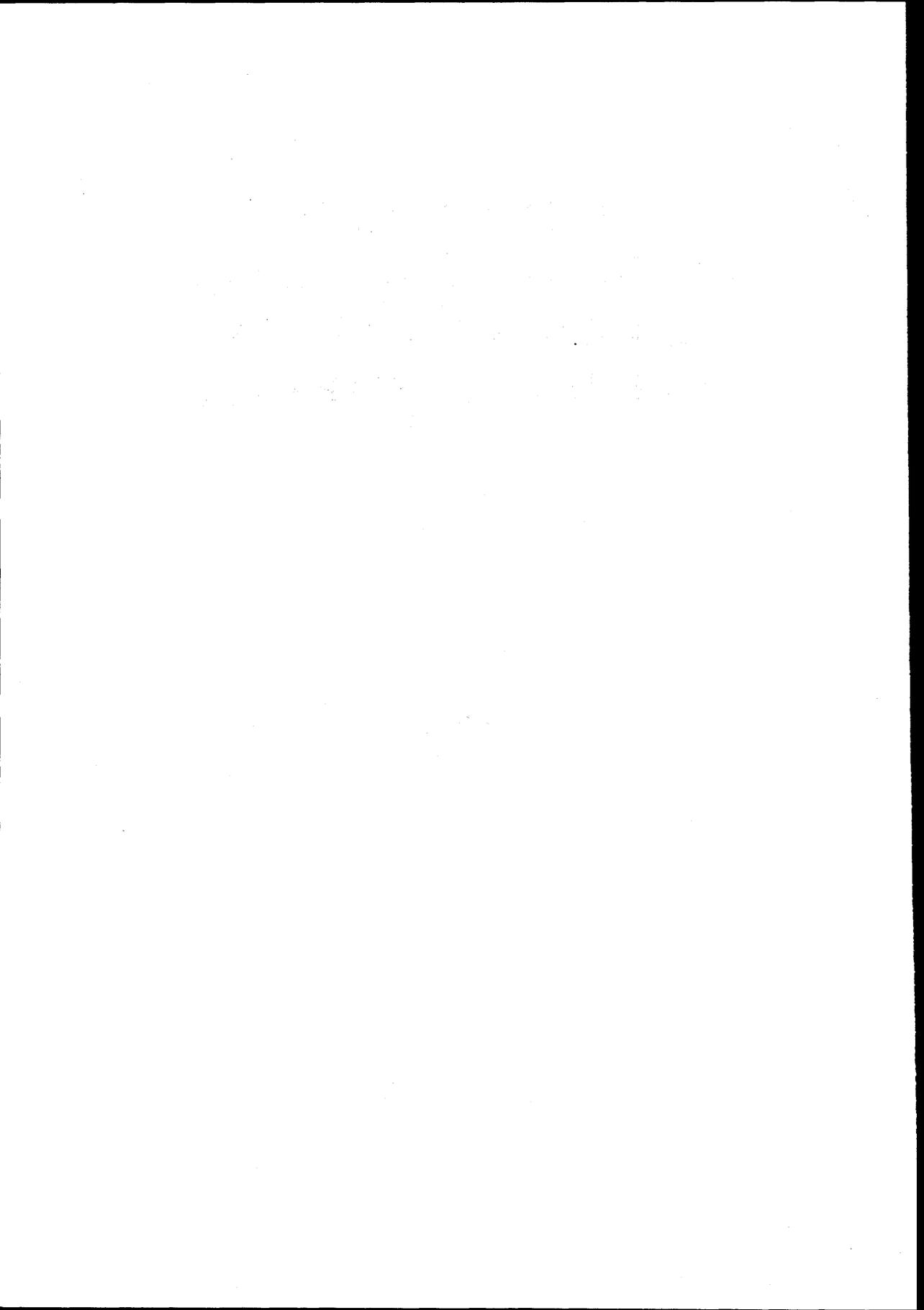
Elio Gianotti



Con il supporto di:



**Trattamenti Termici  
Ferioli & Gianotti S.p.A.**



## INDICE

<u>PREMESSE METALLURGICHE</u>	Pag. 3
STATI ALLOTROPICI DEL FERRO	" 4
DIAGRAMMA DI STATO FERRO-CARBONIO	" 5
CEMENTITE	" 7
FERRITE	" 7
AUSTENITE	" 7
MARTENSITE	" 8
BAINITE	" 8
MARTENSITE RINVENUTA (O SORBITE)	" 10
AUSTENITE RESIDUA O RITENUTA	" 10
<u>VARIAZIONI DI VOLUME DELLE STRUTTURE CRISTALLINE</u>	" 10
EFFETTO DEL CARBONIO	" 11
INFLUENZA DEL TRATTAMENTO TERMICO	" 13
AUSTENITIZZAZIONE: TEMPERATURA, TEMPO	" 13
TEMPRA E RINVENIMENTO	" 14
<u>VARIAZIONI LINEARI DI DIMENSIONE</u>	" 15
<u>VARIAZIONI DI FORMA O DEFORMAZIONI</u>	" 17
<u>RADDRIZZATURA</u>	" 18
<u>PEZZI NON TEMPRATI</u>	" 18
PRESSE E BILANCIERI	" 18
RADDRIZZATURA DI LARDONI SVERGOLATI	" 22
MARTELLINA	" 22
CANNELLO OSSIA CETILENICO E RISCALDO AD INDUZIONE	" 24
RADDRIZZATURA CON FORNO E PIASTRONI	" 25
RADDRIZZATURA CON RULLI INCLINATI E DRITTI"	" 26
<u>PEZZI TEMPRATI</u>	" 27
<u>PEZZI TEMPRATI AD INDUZIONE</u>	" 27
RADDRIZZATURA CON RISCALDO AD INDUZIONE SUCCESSIVO	" 28
RADDRIZZATURA CON LA PRESSA	" 30
EFFETTI METALLURGICI DELLA DISTENSIONE SULLA RADDRIZZATURA	30
RADDRIZZATURA CON LA MARTELLINA	" 31
<u>CONTENIMENTO DELLE DEFORMAZIONI NELLA TEMPRA AD INDUZIONE</u>	" 31
TEMPRA AD INDUZIONE DI CORONE DI AVVIAMENTO	" 32
TEMPRA AD INDUZIONE CORONE DENTATE INTERNE CON	
CONTENITORE A CONCHIGLIA ESTERNO	" 33

<b><u>PEZZI CEMENTATI E TEMPRATI</u></b>	Pag. 34
RADDRIZZATURA ALLA PRESSA	" 34
RADDRIZZATURA COL CANNELLO O AD INDUZIONE	" 34
CORONE DENTATE OVALIZZATE	" 35
RADDRIZZATURA ALLA MARTELLINA	" 36
<b><u>CONTENIMENTO DELLE DEFORMAZIONI NELLA CEMENTAZIONE E TEMPRA</u></b>	" 36
TRATTAMENTI PRELIMINARI	" 36
RICOTTURA SUBCRITICA DI DISTENSIONE	" 36
RICOTTURA ISOTERMICA	" 36
TEMPRA SEGUITA DA RICOTTURA SUBCRITICA	" 38
TEMPRA CON SPINA	" 38
TEMPRA ALLA PRESSA	" 39
CEMENTAZIONE E TEMPRA LIBERA DI INGRANAGGI E CORONE	" 41
CARICAMENTO IN ORIZZONTALE	" 41
CARICAMENTO IN VERTICALE	" 41
<b><u>PARTICOLARI COSTRUITI IN ACCIAI PER STAMPI</u></b>	" 43
TEMPRA FRA PIASTRE FREDE	" 43
RINVENIMENTO FRA PIASTRE O STAMPI	" 43
RADDRIZZATURA SOTTOPRESSA	" 44
RADDRIZZATURA CON MARTELLINA E CANNELLO	" 44
<b><u>ACCIAI RAPIDI</u></b>	" 45
RADDRIZZATURA BROCCHE ALLA PRESSA O AL BILANCIERE	" 46
RADDRIZZATURA ALLA MARTELLINA	" 47
RADDRIZZATURA CON LA FIAMMA	" 48
<b><u>ACCIAI PER MOLLE</u></b>	" 49
<b><u>ACCIAI NITRURATI</u></b>	" 50

# CONTROLLO DELLE DEFORMAZIONI E RADDRIZZATURA DEI PEZZI TEMPRATI

## PREMESSE METALLURGICHE

Le deformazioni di tempra sono essenzialmente dovute alle trasformazioni allotropiche del ferro ed alla formazione delle fasi microstrutturali durante i raffreddamenti rapidi (quelli, cioè, che avvengono con velocità superiore a quella critica di tempra).

Queste fasi hanno dei volumi specifici che sono diversi da quelli delle fasi di partenza degli acciai allo stato ricotto, e queste diversità di volumi sono per l'appunto una delle principali cause delle deformazioni finali in un pezzo temprato. La conoscenza precisa di queste fasi, la loro morfologia e distribuzione, le condizioni di temperatura e tempi di trattamento per ottenerle o per attenuare gli effetti, sono alla base dei procedimenti di raddrizzatura e serve a spiegare i meccanismi delle deformazioni avvenute durante la tempra. ( vedi fig. 1 a - 1 b )

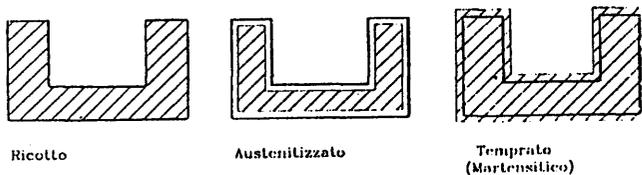


Fig. 1a - Variazioni dimensionali dovute a cambiamenti di fase

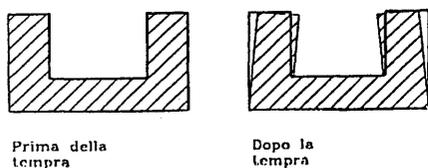


Fig. 1b - Variazioni dimensionali dovute a pretensionamenti

Esistono inoltre altre cause, che generano le deformazioni, che possono essere definite fisiche. Fra queste le più comuni sono:

- Stati di tensionamento del materiale dovuti ad incrudimenti da lavorazione meccanica (vedi fig. 1b) o da deformazioni a freddo (es. stampaggio a freddo, imbutitura, piegatura, raddrizzatura alla pressa non seguite da ricottura subcritica di ricristallizzazione prima della lavorazione meccanica di finitura).

- b) Errato posizionamento nel forno di riscaldamento ( es. alberi non caricati in verticale o appesi, ma appoggiati in orizzontale o peggio ancora inclinati )
- c) Tempra eseguita introducendo il pezzo non secondo l'asse di simmetria nel bagno di raffreddamento

**STATI ALLOTROPICI DEL FERRO**

Per comprendere le variazioni di struttura a cui vanno soggette le leghe ferro-carbonio nell'intervallo di temperatura compreso fra lo stato solido a temperatura ambiente e quello di fusione, occorre conoscere anzitutto le trasformazioni allotropiche che il ferro puro subisce col variare della temperatura. (vedi fig.2 )

Il ferro puro esiste in due forme allotropiche  $\alpha$  (o  $\delta$ ) e  $\gamma$ . Il ferro  $\alpha$  ha struttura stabile fino a  $911^\circ\text{C}$ . Il suo reticolo spaziale (fig. 3a) è corpicentrato, ossia costituito da 9 atomi, dei quali 1 al centro di un cubo di  $2,9 \text{ \AA}$  di lato, ai vertici del quale sono disposti gli altri 8 atomi. E' ferromagnetico, ma solo fino a  $770^\circ\text{C}$ ; oltre questa temperatura subisce una trasformazione per cui diviene paramagnetico, pur conservando il suo reticolo spaziale la disposizione corpicentrata. E' praticamente incapace di tenere in soluzione solida il carbonio. Esso viene genericamente identificato nel costituente "ferrite"

$1 \text{ \AA (Angstrom)} = 10^{-10} \text{ m}$

**Curva raffreddamento Fe Puro**

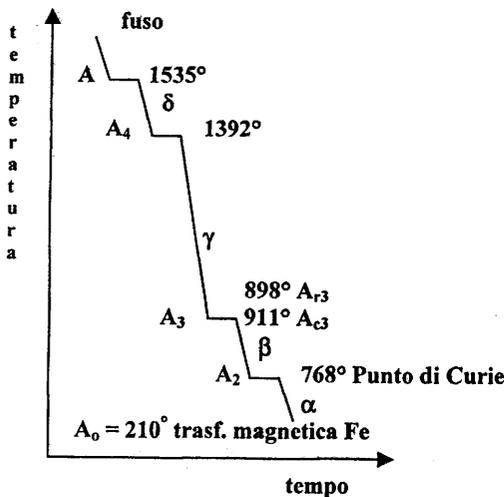


Fig. 2 trasformazioni allotropiche del ferro puro

Il ferro  $\gamma$  è stabile fra 911 e 1392°C. Il suo reticolo spaziale è facce-centrato (fig.3b) ossia è costituito da 14 atomi dei quali 6 disposti al centro delle facce e 8 ai vertici di un cubo di lato 3,63 Å. Non è magnetico. E' capace di formare con il carbonio soluzioni solide di varia concentrazione (fino a un massimo di ca. 2% C) a seconda della temperatura

Da 1392° fino a 1535° (punto di fusione del ferro) il ferro  $\gamma$  si trasforma in ferro  $\delta$ , varietà cubica corpocentrata, disposta come il ferro  $\alpha$  e di identiche dimensioni. La forma  $\delta$  non presenta interesse per l'interpretazione dei fenomeni che vengono qui considerati.

Le temperature indicate, e precisamente:

770° per la trasformazione  $\alpha$  ferromagnetico  $\rightarrow$   $\alpha$  paramagnetico,

911° per la trasformazione  $\alpha \rightarrow \gamma$

1392° per la trasformazione  $\gamma \rightarrow \delta$

si indicano rispettivamente con  $Ac_2$ ,  $Ac_3$ ,  $Ac_4$  e si chiamano punti critici o punti di trasformazione del ferro al riscaldamento.

Al raffreddamento, i punti critici si designano rispettivamente con  $Ar_2$ ,  $Ar_3$ ,  $Ar_4$ , e mentre  $Ar_2$  e  $Ar_4$  coincidono con  $Ac_2$  e  $Ac_4$ , il punto  $Ar_3$  risulta spostato leggermente in basso (898°) per fenomeno di isteresi.

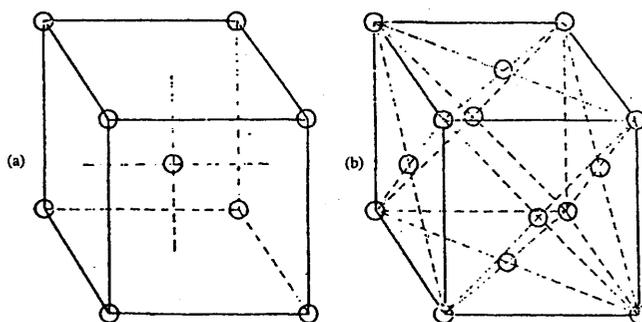


Fig. 3a - Disposizione corpocentrata nel reticolo cubico del ferro  $\alpha$  e  $\delta$   
 3b - Disposizione facce-centrata nel reticolo cubico del ferro  $\gamma$

#### DIAGRAMMA DI STATO FERRO-CARBONIO

L'acciaio e le ghise sono leghe di ferro-carbonio che contengono anche altri elementi, volutamente aggiunti o presenti come impurezze.

Il carbonio è sempre presente perché è l'elemento utilizzato nel processo di riduzione del minerale di ferro di partenza per ottenere la ghisa, o, nei processi moderni, direttamente l'acciaio.

Dobbiamo ora esaminare qual è l'influenza del carbonio sulle trasformazioni allotropiche prima esaminate. Tali trasformazioni sono evidenziate nel diagramma di stato rappresentato in fig.4

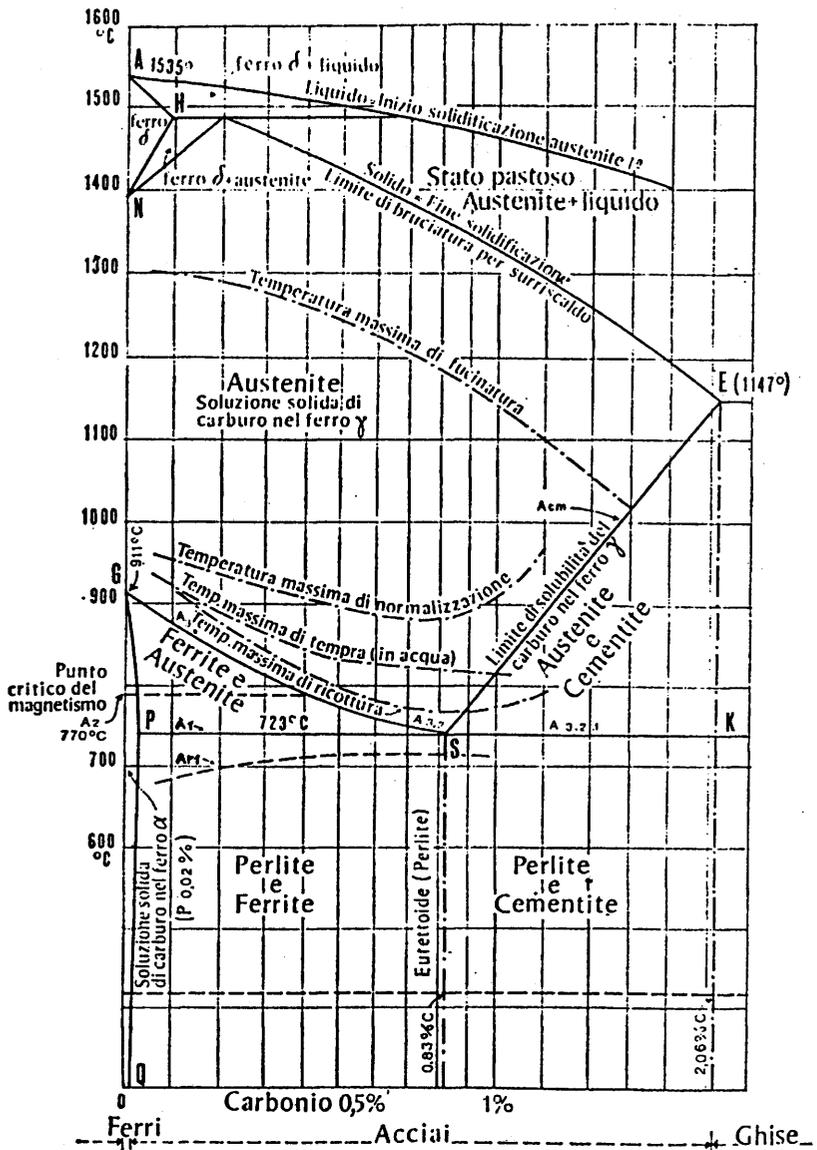


Fig. 4 - Diagramma ferro-carbonio (parziale)

## CEMENTITE

Il carbonio può sciogliersi nel ferro nei suoi vari stati allotropici o può formare un composto dalla formula chimica  $Fe_3C$  chiamato carburo di ferro o cementite.

La cementite ha forma cristallina, è durissima e fragilissima, contiene 6,67% di C. Si può decomporre ad alta temperatura in ferrite e grafite secondo la reazione  $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$

## FERRITE

E' il ferro  $\alpha$ . Può contenere disciolte solo piccolissime quantità di C (0,04% di C a temperatura ambiente) e come si è visto cristallizza secondo un reticolo cubico corpopcentrato.

## AUSTENITE

E' il ferro  $\gamma$  con in soluzione C e altri elementi leganti (vedi fig. 5) E' presente in condizioni di equilibrio nella zona evidenziata dal diagramma Fe-C. Può contenere fino a 2% di carbonio a  $1147^\circ$ . Se raffreddiamo un acciaio contenente fino a 0,83% di C dalla zona austenitica, quando la temperatura raggiungerà la linea G S avrà inizio la trasformazione  $\gamma \rightarrow \alpha$  del ferro.

ACCIAIO: X 15 CN 1808 - UNI 4047

C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %
0,13	0,47	0,30	18,31	7,99

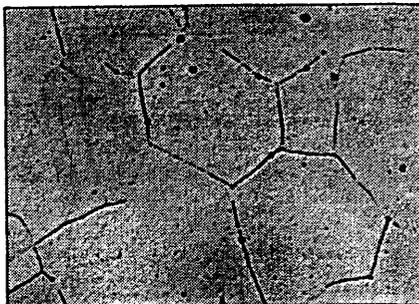
Sezione: tonda, 41 mm

Stato: grezzo di laminazione a caldo

Microstruttura: austenite e carburi al contorno dei grani

Attacco: elettrolitico in soluz. di acido ossalico

Durezza: HRB = 88



x 500

Fig. 5

ACCIAIO: C 60 - UNI 2954

C %	Mn %	Si %	S %	P %
0,59	0,58	0,20	0,027	0,015

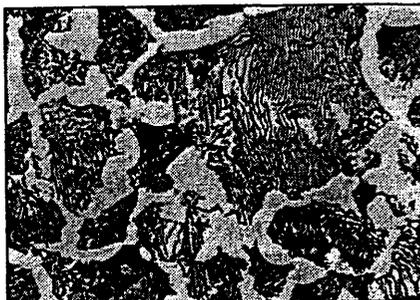
Sezione: tonda, 8 mm

Stato: ricottura completa ( $t = 800^\circ C$   
- permanenza: 4 ore - raffreddamento  
in forno:  $40^\circ C/ora$ )

Microstruttura: perlite e ferrite

Attacco: Picral 4 %

Durezza: HRB = 90



x 500

Fig. 6

Il ferro  $\alpha$  non può contenere che piccolissime quantità di C disciolto (praticamente trascurabili) per cui mano a mano che la fase  $\gamma$  si trasforma in  $\alpha$ , la parte restante di  $\gamma$  si arricchisce di C fino ad arrivare allo 0,86% di concentrazione chiamato punto eutettoide. A questo punto, alla temperatura costante di 723°C si formerà della cementite e della ferrite che si separeranno sotto forma di lamelle accostate dando origine alla perlite. Osservando questo acciaio al microscopio si vedranno dei grani di cristallo di ferrite bianchi e dei grani di perlite a lamelle bianche (ferrite) e nere(cementite) accostate. (vedi fig.6.)

### MARTENSITE

Se la velocità di raffreddamento dalla zona austenitica è molto rapida (tempra) la trasformazione avviene ugualmente ma a temperatura più bassa di 723°C. Per ogni tipo di acciaio tale trasformazione inizia ad una temperatura ben precisa e termina ad una temperatura ancora più bassa ma sempre ben costante.

Alle temperature basse alle quali avviene la trasformazione  $\gamma \rightarrow \alpha$  gli atomi hanno mobilità ridotta ed il C contenuto nell'austenite non riesce a migrare per formare  $Fe_3C$ , ma resta intrappolato nel reticolo del ferro  $\alpha$  deformandolo e quindi creando delle enormi tensioni che si rivelano nella durezza che assume l'acciaio. La fase così ottenuta si chiama martensite ed al microscopio si presenta con una forma aciculare (vedi fig.7) Il reticolo del ferro  $\alpha$  della martensite non sarà più cubico ma tetragonale per la presenza di atomi di C intrappolati (vedi fig.8) che lo deformano.

ACCIAIO: C.60 - UNI 2954

C %	Mn %	Si %	S %	P %
0,59	0,58	0,20	0,027	0,015

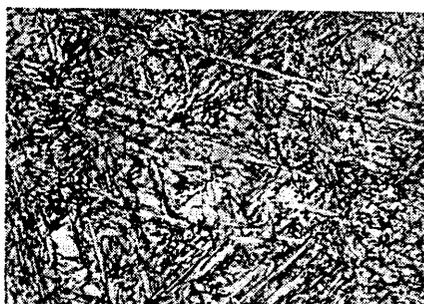
Sezione: tonda, 8 mm

Stato: temprato (t = 785 °C - raffreddamento in acqua)

Microstruttura: martensite

Attacco: Nital 2 %

Durezza: HRC. = 62



x 500

### BAINITE

Se la velocità di raffreddamento dalla zona austenitica è inferiore a quella di tempra che genera martensite, ma è ancora alta da non permettere la formazione di perlite e ferrite come visto sopra, si ottengono delle strutture chiamate "intermedie" o di "transizione" o "Bainitiche".

L'aspetto al microscopio della bainite è ancora di tipo aciculare come per la martensite, dalla quale otticamente è difficile distinguerla, ma il reticolo cristallino è quello cubico corpicentrato del Fe  $\alpha$  e non quello tetragonale della martensite, perché il C ha avuto tempo di uscire e formare dei carburi finissimi difficilmente risolvibili al microscopio ottico. Per questo motivo la bainite è a volte chiamata "perlite fine" da alcuni metallografi.

Quando la bainite si forma a velocità di raffreddamento alte, vicine alle velocità di tempra, si presenta al microscopio ottico in modo simile alla martensite ed è chiamata bainite inferiore. Per capire se è bainite o martensite si può ricorrere al controllo della durezza con un microdurometro.

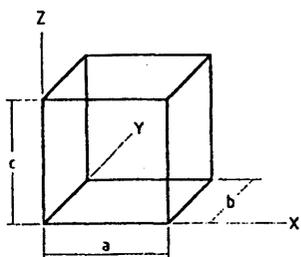


Fig. 8a - Direzioni cristalline principali nei reticoli cubico e tetragonale

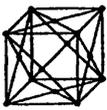
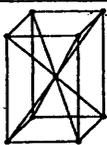
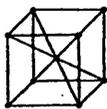
FASE	STRUTTURA	PARAMETRI RETICOLARI KX
<b>Austenite</b> (Cubica facce centrate)		$a=b=c=3,548+0,044 (\%C)$
<b>Martensite</b> (Tetragonale)		$a=b=2,861-0,013 (\%C)$ $c=2,861+0,116 (\%C)$
<b>Ferrite</b> (Cubica corpo centrato)		$a=b=c=2,861$
<b>Cementite</b>	Ortorombico complesso.	$a=4,516$ $b=5,077$ $c=6,727$
<b>Carburo <math>\epsilon</math></b>	Esagonale compatto	$a=2,74$ $c=4,34$

Fig. 8b - Struttura cristallina delle fasi presenti in un acciaio temprabile

### MARTENSITE RINVENUTA (o SORBITE)

Riscaldando la martensite  $\alpha$  o tetragonale a 150-200°C il suo stato tensionale si attenua e si ottiene la cosiddetta martensite K o cubica o rinvenuta con durezza leggermente inferiore.

Il C tende a migrare all'esterno del reticolo cubico che non lo può più contenere ed a formare dei carburi a livello submicroscopico. Il fenomeno è tanto più appariscente quanto più alta diventa la temperatura e lunga la permanenza a tale temperatura, che può naturalmente arrivare fino alla linea PSK del diagramma Fe-C.

Fino a circa 600°C, al microscopio ottico, non si vedono i carburi globulari che si nucleano da questa trasformazione, mentre oltre tale temperatura, e in modo particolare fra 680 e 700°C, si vedono chiaramente.

### AUSTENITE RESIDUA O RITENUTA

Quando le velocità di raffreddamento sono superiori alla velocità critica di tempra, nell'acciaio temprato si trovano, oltre alla martensite, delle percentuali di austenite non trasformata in martensite tanto più alte quanto maggiore è stata la drasticità di tempra. La presenza di austenite genera alcuni inconvenienti:

- a) durezza insufficiente (l'austenite ha una durezza molto inferiore alla martensite).
- b) instabilità dimensionale (l'austenite residua tende a trasformarsi nel tempo in martensite, ma avendo un volume minore della martensite genera un aumento di volume dei pezzi)

Per contro, nel caso specifico della raddrizzatura dei pezzi, la presenza di austenite diminuisce la probabilità di rottura nella raddrizzatura sotto pressa; infatti se sottoposta a sforzi di deformazione tende a trasformarsi in martensite con aumento di volume e quindi facilita l'allungamento della faccia del pezzo sottoposta a trazione dalla pressa, ed essendo molto plastica fa da cuscinetto fra le fasi durissime e non deformabili della martensite.

L'austenite si trasforma rapidamente in martensite per sottoraffreddamento a -70°C e oltre, oppure per rinvenimento dei pezzi temprati. Già a 200-250°C si trasforma in un aggregato molto fine di ferrite e cementite, più duro dell'austenite. In questo caso quindi il rinvenimento può provocare addirittura un leggero aumento di durezza o quantomeno una non diminuzione della stessa. Questo spiega anche perché è più facile raddrizzare alla pressa un pezzo immediatamente dopo tempra, prima del rinvenimento.

### VARIAZIONI DI VOLUME DELLE STRUTTURE CRISTALLINE

Le variazioni microstrutturali che avvengono durante un trattamento termico possono essere schematizzate molto semplicemente come nel diagramma di fig.9. Ad ogni cambiamento di fase corrisponde una variazione di volume delle stesse che si integra con le variazioni dimensionali dovute alla variazione di temperatura. La fig.1a) schematizza le fondamentali variazioni di volume delle due fasi presenti in un pezzo temprato.

Un più approfondito esame cristallografico delle fasi espone nel paragrafo precedente ci porta a valutare con maggiore precisione i volumi che competono ad ogni fase e come la presenza degli atomi di C possono influire su questi volumi.

Parlando di variazioni di volume ci si riferisce di solito alle dimensioni misurate lungo gli assi X, Y e Z del cristallo cubico della fig.8a)

Le dimensioni indicate con a, b e c sono denominate parametri reticolari e i valori da essi assunti, misurati in unità KX (unità Siegbahn)=0,997984 Angstrom, sono esposti nella fig. 8b)

## INFLUENZA DEL TRATTAMENTO TERMICO

Dagli esempi precedenti si evince come i parametri dei trattamenti termici siano importanti agli effetti delle deformazioni e soprattutto della costanza delle deformazioni.

Uno stampo con sezioni diverse se non viene austenitizzato in modo uniforme per insufficiente permanenza in temperatura può dare variazioni dimensionali diverse a seconda delle posizioni in cui viene esaminato.

Allo stesso modo nella fase di tempra spessori diversi possono indurre a velocità di raffreddamento diverse e quindi a microstrutture non uniformi con effetti di distorsione degli stampi.

Oscillazioni nella temperatura di tempra anche abbastanza contenute portano ad austenite più o meno ricca di C e quindi a quantità maggiori o minori di austenite residua dopo tempra.

Velocità di tempra diverse possono portare a contenuti di austenite residua diversi e quindi a deformazioni diverse. Nel caso in cui l'austenite superi certi valori si può addirittura avere una contrazione anziché un aumento di volume.

### AUSTENITIZZAZIONE: TEMPERATURA E TEMPO

A parità di drasticità di tempra, per uno stesso acciaio, la quantità di austenite residua a temperatura ambiente, dopo tempra, è tanto più alta quanto maggiore è la quantità di C disciolto nell'austenite nella fase di austenitizzazione oltre  $A_{c3}$ .

In altre parole si usa dire che l'austenite è tanto più stabile quanto più carbonio contiene in soluzione.

Questo fenomeno è ben conosciuto e sfruttato nell'austempering delle ghise ed il concetto può essere traslato tal quale agli acciai da stampi. Infatti in una ghisa la quantità di C che si scioglie nell'austenite è proporzionale alla temperatura, che aumenta la mobilità atomica ed al tempo che permette ai noduli di grafite di sciogliersi; nel caso dell'acciaio si sciolgono i carburi primari invece dei noduli, ma l'effetto è analogo.

Nel diagramma di fig. 11) di Harris e Cohen è ben illustrato il fenomeno per un acciaio con 1,1% di C e 2,8% di Cr.

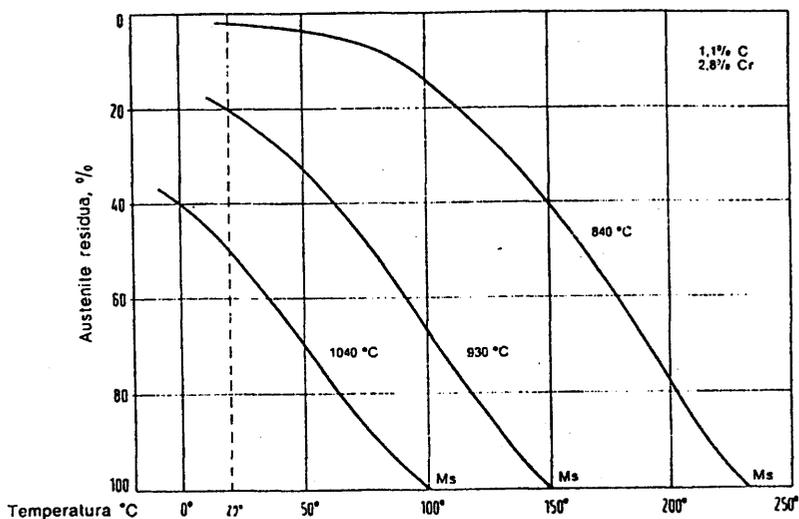


Fig. 11 - Influenza della temperatura di austenizzazione sulla percentuale di austenite residua in un acciaio al Cr ( Harris e Cohen )

## TEMPRA E RINVENIMENTO

A parità di condizioni di austenitizzazione la quantità di austenite residua è maggiore se la velocità di raffreddamento è più alta.

Si è già visto che la condizione migliore per ottenere la trasformazione completa dell'austenite è proseguire il raffreddamento sotto lo  $0^{\circ}\text{C}$  fino al punto  $M_f$ . In pratica questo raffreddamento è troppo pericoloso per le rotture che si possono generare. Se lo si vuole adottare lo si fa solo dopo un primo rinvenimento di distensione che deve essere eseguito immediatamente dopo l'estrazione dello stampo dal bagno di tempra, quando la sua temperatura è ancora sui  $60^{\circ}\text{C}$  e può già essere tenuto in mano senza sensazioni di dolore.

Già con un rinvenimento a  $200^{\circ}\text{C}$  la martensite tetragonale si decompone in martensite con basso contenuto di C (circa 0,25%) e carburi epsilon con detensionamento dello stampo dovuto alla contrazione di volume della martensite.

Contemporaneamente, già da circa  $200^{\circ}\text{C}$  in poi, l'austenite residua tende a trasformarsi in bainite con aumento di volume.

Dipende dagli elementi leganti, ma in tutti gli acciai l'austenite residua finisce col trasformarsi completamente in bainite a temperature più o meno alte ( $500-600^{\circ}\text{C}$ ) dando luogo a microstrutture meno fini, e quindi meno tenaci, di quelle ottenibili dal passaggio attraverso la martensite.

In fig.12 è riportata una curva delle variazioni di volume di un acciaio H13 AISI (0,4%C; 5%Cr; 1%V temprato da  $1010^{\circ}\text{C}$ ).

In esso si nota una diminuzione di volume fino a circa  $190^{\circ}\text{C}$  dovuta alla decomposizione della martensite. Successivamente l'aumento di volume rivela la trasformazione dell'austenite residua che raggiunge il massimo intorno ai  $580^{\circ}\text{C}$ .

L'andamento della curva indica comunque che dopo rinvenimento lo stampo rivelerà un aumento di volume che non c'era subito dopo tempra per la presenza di austenite.

Inoltre sarà necessario eseguire un secondo rinvenimento per detensionare ed omogeneizzare le bainiti a durezza decrescente ottenute dalla decomposizione dell'austenite all'aumentare della temperatura.

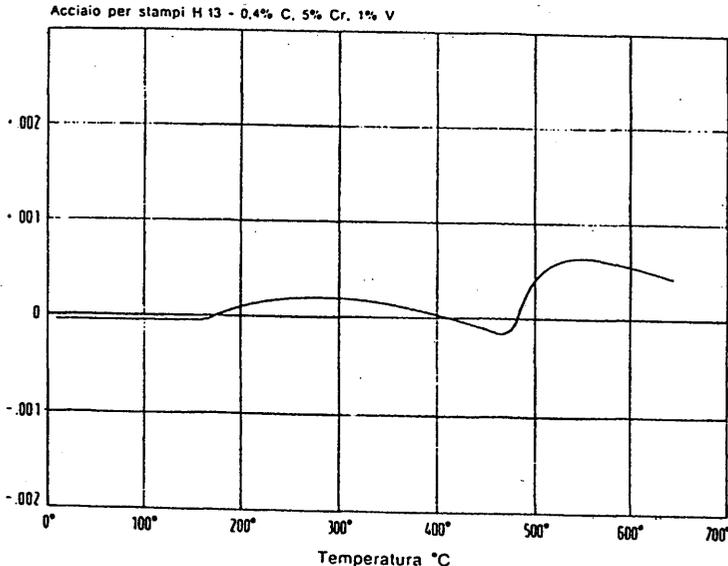


Fig. 12 - Variazione dimensionale media in funzione alla temperatura di rinvenimento

L'austenite è una fase cubica facce-centrate compatta e i suoi parametri reticolari ( $a=b=c$ ) dipendono dal contenuto in C. Il coefficiente di C esprime l'aumento del parametro reticolare dell'austenite in relazione al crescere del tenore in C.

La martensite è una struttura tetragonale corpo-centrata avente dimensione dei parametri a e b uguali, ma differente valore per c, lunghezza misurata sull'asse z. Il valore di questo ultimo parametro reticolare dipende in misura notevole dal tenore di C, mentre le dimensioni di a e b, che sono equivalenti non variano molto al variare del C.

La ferrite è una struttura cubica corpo-centrata con valori di a,b e c uguali (2,861 unità KX). Essa è praticamente esente da carbonio perché il grado di solubilità del C nella ferrite è bassissimo.

Si noti che la formula della martensite, se considerata in assenza di C, diventa la formula della ferrite. In effetti il sistema a cristallo tetragonale, diventa un sistema a cristallo cubico con le relative variazioni di volume o di dimensioni. Non vengono presi in considerazione, in questo paragrafo, i parametri reticolari della cementite e del carburo epsilon, perché essi non sono interessati dalle reazioni che provocano variazioni di volume dell'acciaio.

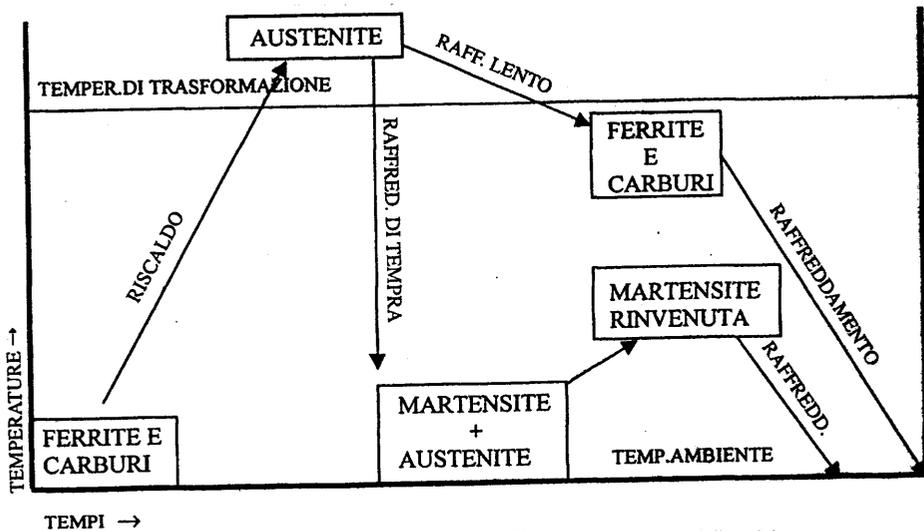


Fig. 9 - Diagramma delle variazioni di fase che avvengono durante il trattamento termico dell'acciaio

### EFFETTO DEL CARBONIO

L'influenza del C sui parametri reticolari vista testè si traduce a livello macroscopico in variazione di volume specifico delle varie fasi che compaiono nel trattamento termico. L'aumento della quantità di C produce un aumento del volume specifico (o una diminuzione del peso specifico) e l'unità della variazione è schematizzata nel diagramma di fig.10 che, per semplificare le cose, fa riferimento ai valori a temperatura ambiente (20°C) di acciai al C. I valori sono comunque validi con buona approssimazione anche per gli acciai legati.

Utilizzando questo diagramma è possibile calcolare su pezzi di forma geometrica semplice le variazioni di volume che si possono generare nella tempra di uno stampo, conoscendo le percentuali di martensite e ferrite che sono presenti. Viceversa, conoscendo la variazione dimensionale si può risalire alla quantità di austenite e martensite formatesi nella tempra.

Per fare un esempio molto semplice si può pensare di dover temprare un acciaio UNI C72 con drasticità tale da ottenere 90% di martensite e 10% di austenite.

Dal diagramma di fig.10) si può calcolare che in un acciaio con 0,72% di C la trasformazione da ferrite a martensite genera un aumento di circa 1% di volume, mentre la trasformazione da ferrite ad austenite provoca una diminuzione del volume di circa il 3%. Le variazioni dimensionali saranno quindi.

$$\begin{array}{r}
 90\% \times 1\% = \quad 0,9\% \text{ aumento della martensite} \\
 10\% \times -3\% = \quad -0,3\% \text{ diminuzione dell'austenite} \\
 \hline
 \quad \quad \quad + 0,6\% \text{ variazione di volume in aumento}
 \end{array}$$

La variazione lineare sarà facilmente calcolabile:

$$\frac{\text{nuovo volume}}{\text{vecchio volume}} = 1,006$$

variazione lineare:  $\sqrt[3]{1,006} = 1,002$ , cioè 0,2%

Il diagramma può essere utilizzato in senso inverso. Conoscendo le deformazioni del pezzo temprato è possibile risalire alle percentuali di martensite e austenite presenti con un sistema di equazioni elementare.

Supponiamo che lo stampo non abbia subito deformazioni, quali saranno le concentrazioni delle due fasi? Chiamando con x la percentuale di martensite e y la percentuale di austenite sarà:

$$\begin{cases}
 1\% x - 3\% y = 0 & x \text{ martensite} \\
 x + y = 1 & y \text{ austenite}
 \end{cases}$$

risolvendo il sistemino :  $y=0,25$  e  $x = 0,75$   
 cioè  $y = 25\%$  e  $x = 75\%$ .

Oppure se c'è variazione di +0,5% di volume, che equivale a 0,17% di lunghezza :

$$\begin{cases}
 1\% x - 3\% y = 0,5 \\
 x + y = 1
 \end{cases}$$

risolvendo il sistemino :

$y=0,125$  e  $x=0,875$ , cioè  $y=12,5\%$  e  $x=87,5\%$

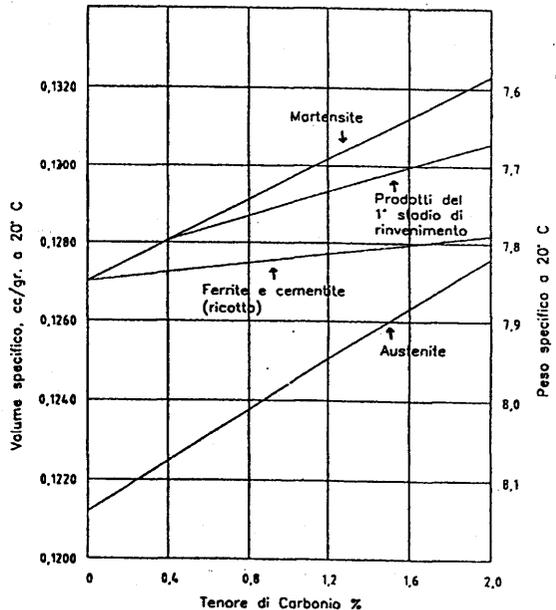


Fig. 10 - Influenza del tenore di C sul volume delle fasi presenti in un acciaio al C

## VARIAZIONI LINEARI DI DIMENSIONE

Le considerazioni sulle variazioni di volume fin qui fatte, pur essendo corrette, non possono essere scomposte in variazioni lineari uguali per i tre assi spaziali in cui si può analizzare un solido. L'acciaio infatti ha, nella maggior parte dei casi, delle anisotropie congenite dovute alla forma di solidificazione (lingotti quadri, esagonali, rotondi, segregazioni) alla laminazione (senso di laminazione, trasverso) alla fucinatura (grado di riduzione, direzione di riduzione).

Per questi motivi le variazioni dimensionali non sono uniformi in tutte le tre direzioni degli assi ortogonali.

In fig.13) è rappresentata la deformazione dopo tempra di barre di acciaio rapido rettificate prima della tempra. La fig.13a) riproduce le deformazioni in scala di una barra prodotta partendo da un lingotto quadro e successivamente laminato con riduzioni primarie sempre a forma quadrata.

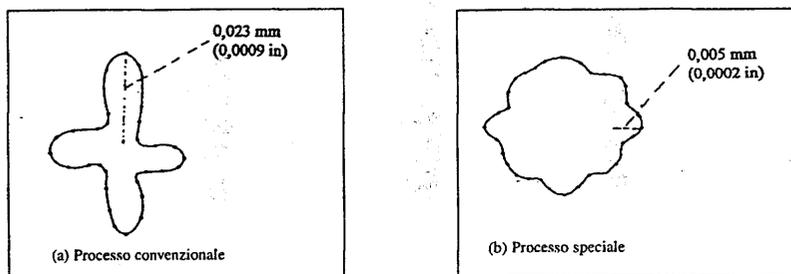
La fig.13 b) rappresenta le deformazioni di una barra, con le stesse misure iniziali della 13a), ma ricavata partendo da un lingotto cilindrico, laminato con riduzioni sempre a forma circolare.

Nel caso degli stampi si possono prendere in considerazione le variazioni dimensionali di barrotti rettangolari ricavati con il lato più lungo nel senso di laminazione. Nella fig.14) si può osservare come le variazioni di volume viste nella fig.12) per l'acciaio H13 (AISI) siano distribuite lungo i tre assi T W L non in modo uniforme. Anzi l'asse L anziché allungarsi si raccorcia, mentre l'aumento più consistente è dell'asse T.

Nel diagramma a blocchi della fig.15) si possono notare le differenze di dilatazione dovute alla temperatura di rinvenimento, ma soprattutto si può notare come con un acciaio rifuso sottoscoria le differenze fra i tre assi siano notevolmente diminuite per la diversità di fabbricazione del lingotto originario.

Risultati notevoli si sono avuti in questo senso con la tecnologia degli acciai da polveri per la perfetta omogeneità ottenuta nella microstruttura di tali acciai.

### Tipiche variazioni di diametro durante il trattamento termico di barre di acciaio rapido



Disegni prodotti attraverso un processo di elaborazione dati di misure di precisione di differenti diametri. I grafici sono stampati su coordinate polari e descrivono le variazioni del diametro dopo trattamento termico di una barra che era stata finita prima del trattamento termico con una tolleranza di  $\pm 1.25\mu\text{m}$  ( $\pm 0.00005$  in.). (Fonte: Latrobe Steel CO., Latrobe, Pennsylvania).

Fig. 13 – Deformazioni tipiche del diametro di barre di acciaio rapido temprate e rinvenute

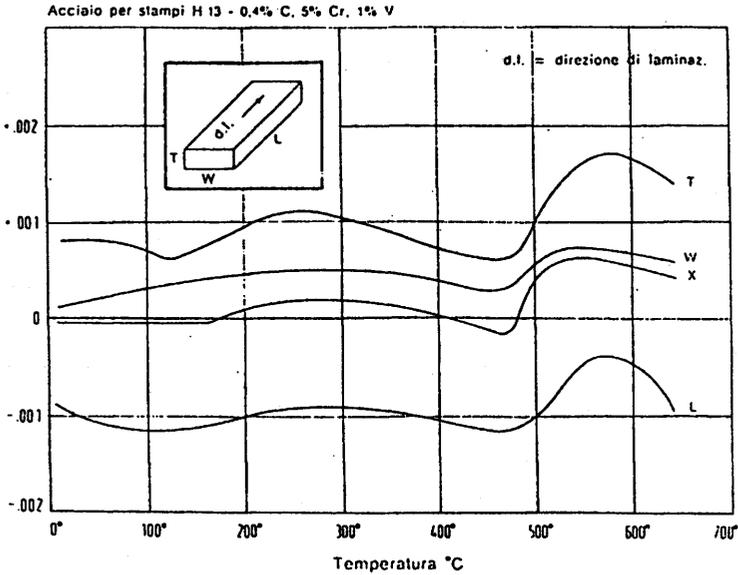
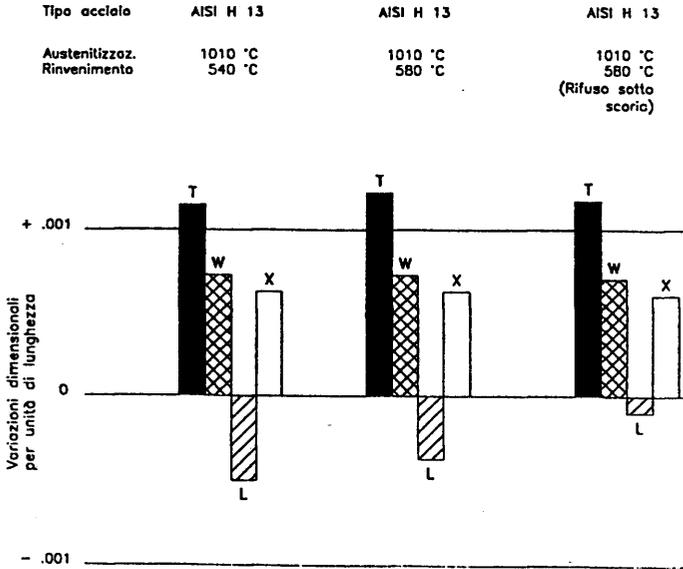


Fig. 14 – Effetto della direzione di laminazione sulla variazione dimensionale (X=valore medio)



Dimensione della barra 25 x 51 x 152 ( T W L )

Fig. 15 – Esempio dell'influenza della direzione di prova sulle variazioni dimensionali

## VARIAZIONI DI FORMA O DEFORMAZIONI

Sono considerate variazioni di forma quelle non legate direttamente alle variazioni dei volumi dovute alle trasformazioni microstrutturali finora esaminate.

Una prima causa di deformazione è il riscaldamento dei pezzi nel forno. Già alle temperature oltre i 600° l'acciaio diventa soggetto a deformazioni plastiche che possono essere influenzate dal peso proprio se il pezzo non è supportato adeguatamente. Inoltre velocità di riscaldamento molto rapide possono creare differenze di temperatura fra sezioni piccole e sezioni massive di un pezzo, e nelle sezioni massive differenze di temperatura fra l'esterno e l'interno. Le tensioni di dilatazione termica si scaricano nelle zone più sottili e più calde creando deformazioni di riscaldamento. E' quindi indispensabile procedere ad un riscaldamento lento ed uniforme od almeno a delle soste a temperature intermedie.

La regola di 1'/mm di spessore di permanenza ad una certa temperatura per permettere l'omogeneizzazione dello stampo è generalmente applicabile.

Durante la tempra si crea una notevole differenza di temperatura fra la superficie ed il cuore e fra le parti massive e quelle sottili. Queste disuniformità, e la formazione di martensite che induce aumento di volume generano notevoli deformazioni che possono anche sfociare in rotture quando la temperatura si abbassa. Il problema è tanto più grave quanto più alta deve essere la velocità di tempra. Per stampi di forma complessa è quindi preferibile adottare acciai ad alta temprabilità.

L'austenite residua in piccola percentuale può essere in alcuni casi addirittura benefica perché migliora la tenacità e può permettere alcuni adattamenti alle tensioni interne migliorando le condizioni di resistenza dello stampo.

## CONCLUSIONI

Come si è visto l'esame delle cause delle variazioni dimensionali e delle deformazioni negli acciai sono molto complesse ed interagenti fra di loro. E' indispensabile una buona conoscenza teorica della metallurgia per spiegare la maggior parte dei comportamenti ma è solo con una grande esperienza pratica che si possono equilibrare e dosare i vari parametri che entrano in gioco in un trattamento termico al fine di ottimizzare i risultati metallurgici e dimensionali di uno stampo.

## RADDRIZZATURA

La raddrizzatura di particolari meccanici può essere necessaria:

- 1) su pezzi trattati termicamente e quindi deformati per le trasformazioni allotropiche e microstrutturali degli acciai o per tensioni create durante il trattamento termico
- 2) su pezzi non trattati termicamente ma deformati da tensioni formate o scaricate da lavorazioni alle macchine utensili; da operazioni di laminazione ed estrusione a freddo o a caldo, di stampaggio a freddo di profilati e lamiere.

Nel primo caso per raddrizzare i pezzi è necessario conoscere a fondo le trasformazioni microstrutturali degli acciai per sfruttarle nel lavoro di raddrizzatura. Nel secondo caso quasi sempre si tratta di acciai poco o affatto temprabili per cui le trasformazioni di volume dovute alle modifiche microstrutturali non possono essere sfruttate ed è necessario ricorrere ad incrudimenti o detensionamenti di tipo fisico.

## PEZZI NON TEMPRATI

Si tratta in genere di lamiere, tondi, quadri, piatti, anelli dalle forme e dimensioni le più svariate.

## PRESSE E BILANCIERI

La raddrizzatura alla pressa o al bilanciere è la più istintiva delle operazioni: spingere il pezzo storto con una forza applicata in senso opposto alla deformazione.

Le macchine usate per questa operazione vanno dai semplici bilancieri sensitivi fino alle presse completamente computerizzate che caricano il pezzo sui rulli o sulle contropunte della pressa, lo fanno girare e misurano automaticamente le deformazioni in punti predeterminati memorizzandole, fanno scendere la mazza della pressa con intensità e posizioni diverse a seconda delle deformazioni riscontrate dai comparatori fino ad arrivare alle tolleranze richieste ed infine scaricano il pezzo. (vedi fig.16, pressa per raddrizzatura Galdabini attrezzata).

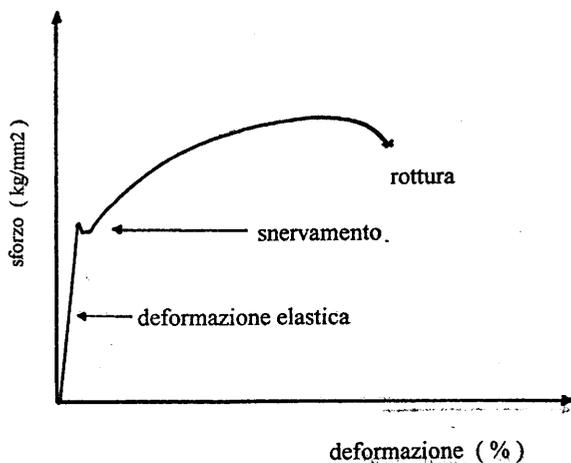


Fig. 17 - Diagramma carichi - allungamenti di una prova di trazione

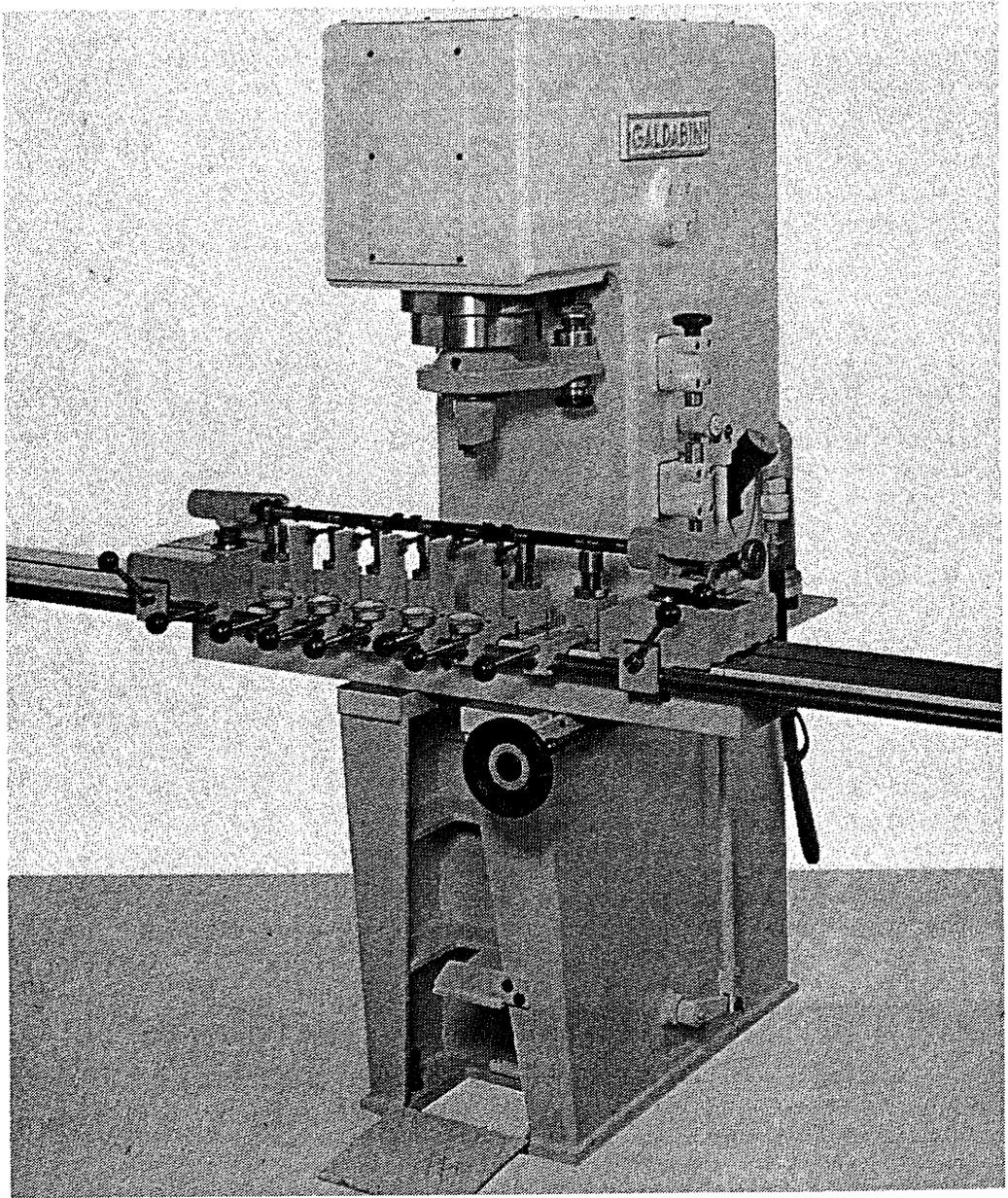


Fig. 16 – Pressa attrezzata per raddrizzare

Perché un pezzo possa essere raddrizzato alla pressa bisogna che la forza applicata superi il valore del limite elastico del materiale ed entri nel campo dello snervamento, senza peraltro superare il carico di rottura (vedi diagramma fig.17) per evitare la formazione di cricche. Le cose diventano più complicate nel caso di raddrizzatura alla pressa di pezzi temprati, cementati e temprati, temprati ad induzione perché oltre ad essere più duri e quindi più fragili intervengono fenomeni di trasformazioni allotropiche del ferro e quindi di trasformazioni di fasi (es: austenite in martensite per effetto dell'incrudimento dovuto alla raddrizzatura ). Ma di questo problema si parlerà più avanti.

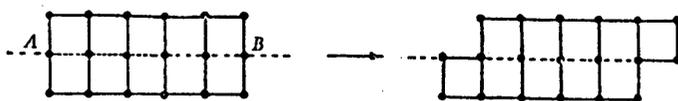


Fig. 18a - Rappresentazione schematica dell'effetto dello slittamento attraverso uno spazio interatomico

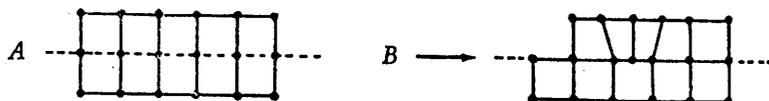


Fig. 18b - Meccanismo dello slittamento con formazione di dislocazioni

Dopo raddrizzatura alla pressa il pezzo è incrudito, almeno nelle parti interessate dalla deformazione, e la sua struttura cristallina non è più regolare ma presenta degli slittamenti dei piani cristallografici che tendono a ritornare nella loro posizione, o a riassumere le distanze atomiche originali, ma ne sono impediti dalla scarsa mobilità atomica dovuta alla bassa temperatura. La fig.18) rappresenta uno dei possibili slittamenti provocati dall'incrudimento chiamato dislocazione. La fig.19) un secondo tipo di slittamento, caratteristico dei metalli con cristalli facce-centrate (es. austenite) chiamato geminazione.

Il bordo dei grani cristallini, per la sua irregolarità di disposizione dei reticoli atomici, rafforza la resistenza allo slittamento dei piani cristallografici. Il fenomeno è ben evidente nell'aspetto superficiale di una provetta di trazione con grano cristallino molto grande sottoposta a trazione, che assume l'aspetto di una buccia di arancia e che è ben schematizzato nella fig.20).

Un acciaio a grano fine, a parità di tutte le altre condizioni è quindi più resistente alle deformazioni plastiche di un acciaio a grano grosso, ed ha una maggiore resistenza alla rottura.

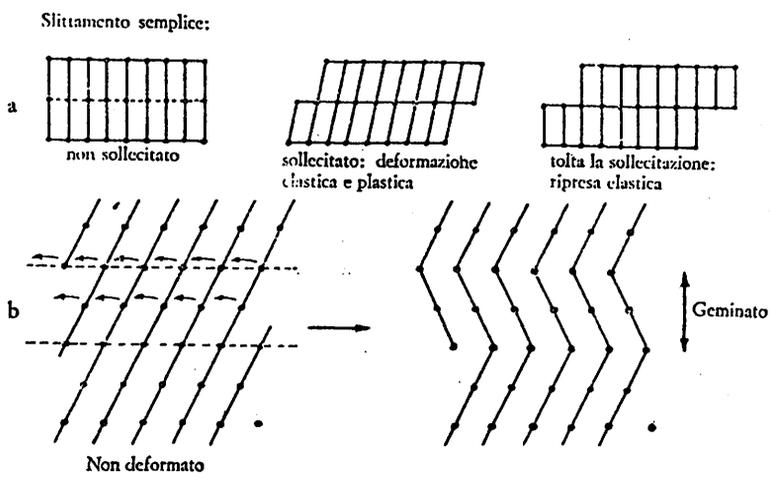


Fig. 19 a) – Slittamento semplice: ad ogni stadio, l'orientamento in tutto il reticolo è il medesimo  
 b) – Geminazione: lo slittamento in piani adiacenti nel modo indicato in figura produce un orientamento speculare da parte del reticolo

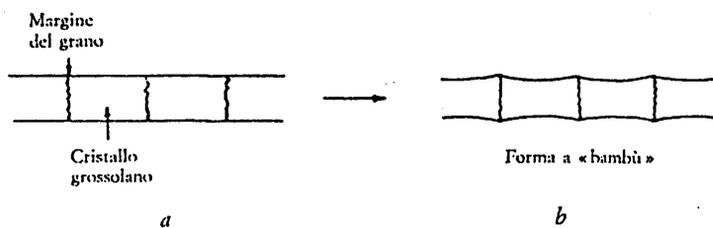


Fig. 20 a) – Barra a grano grosso non deformato  
 b) – La stessa barra dopo deformazione per trazione

Un pezzo raddrizzato alla pressa è quindi incrudito e pieno di tensioni, e col tempo tenderà a ritornare alla sua forma primitiva per effetto dei piccoli movimenti degli atomi dei cristalli deformati che avvengono a temperatura ambiente e che tendono ad assumere le distanze reticolari caratteristiche.

E' bene quindi dopo questa raddrizzatura effettuare una distensione per stabilizzare nel tempo il pezzo raddrizzato. La temperatura di distensione varia da 160° per i pezzi che non devono perdere la durezza fino a 600° per i pezzi bonificati. La distensione deve essere fatta a 10°- 20° in meno della temperatura alla quale era stato rinvenuto il pezzo nel trattamento termico precedente la raddrizzatura per evitare decadimenti di durezza. Dopo distensione il pezzo tenderà a ritornare alla sua deformazione primitiva per effetto del riordino della struttura cristallina. Sarà bene quindi ricontrollare la linearità dopo la distensione e se sarà il caso ripetere la raddrizzatura e la distensione. In casi particolarmente delicati si può arrivare a ripetere tre volte l'operazione.

#### **RADDRIZZATURA DI LARDONI SVERGOLATI**

E' possibile eseguire questa operazione dotando la pressa di un attrezzo fatto a cunei contrapposti come schematizzato in fig.21). Il lardone può essere spostato longitudinalmente sotto i cunei che schiacciandolo con forza adeguata possono raddrizzarlo progressivamente su tutta la lunghezza.

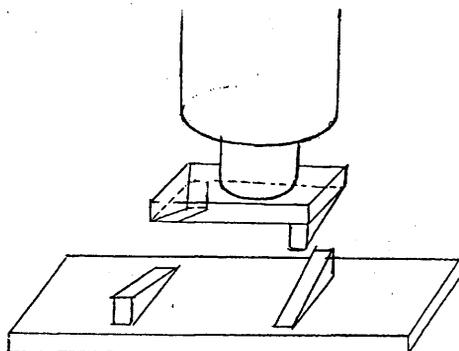


Fig. 21 – Pressa per raddrizzare lardoni svergolati

#### **MARTELLINA**

E' lo strumento più semplice e meno costoso che si può utilizzare nella raddrizzatura; può pesare da 0,5 a 1Kg. Quella raffigurata nella fig.22) è la più comune e serve in tutte le situazioni. Nel caso delle lamiere sottili (spessore fino a qualche mm) la forma della punta può essere più dolce o addirittura diversa a secondo delle deformazioni che si vogliono impartire alla lamiera. Questo caso però esula dagli scopi di questo lavoro perché l'arte entra nel campo della formatura delle lamiere ed è particolarmente utilizzata nella formatura delle lamiere per carrozzerie di automobili non di serie. Lavorazione particolarmente conosciuta a Torino, anche se ormai quasi totalmente abbandonata, dai "battilastra" delle carrozzerie artigiane dove venivano plasmate interamente a mano i prototipi delle vetture o le prestigiose "fuoriserie" che hanno fatto dei carrozzieri torinesi un mito internazionale

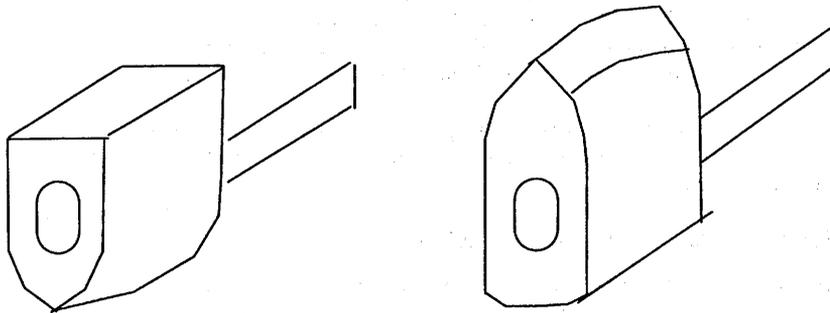


Fig. 22 – Esempio di martellina

La martellina è costruita in acciai da tempra tipo UX200C13 o acciai rapidi, temprata e rinvenuta a durezza di 58 – 60 HRc. La durezza deve essere superiore a quella del pezzo da raddrizzare.

La martellina viene battuta sulla faccia concava del pezzo da raddrizzare, curando che il punto dove batte sia supportato su di una massa consistente di metallo in modo che possa creare delle tacche sulla superficie (fig. 23). Tali incisioni provocano un aumento di volume del materiale nelle zone adiacenti alle incisioni e tale aumento di volume provoca un allungamento della superficie e conseguentemente la raddrizzatura del pezzo. (vedi fig.24)

Più sono profonde e più sono numerose le tacche, maggiore sarà l'effetto raddrizzante dell'operazione.

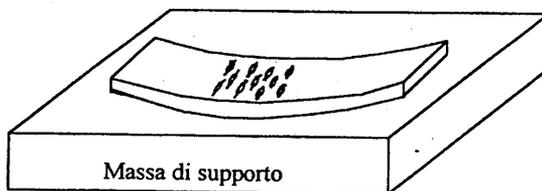


Fig. 23 – Esempio di raddrizzatura con martellina

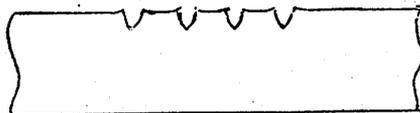


Fig. 24 – Sezione trasversale ingrandita delle tacche create dalla martellina

Se dopo la raddrizzatura il pezzo dovrà essere rettificato, mano a mano che si asporta lo strato di materiale modificato dalla martellatura il pezzo tenderà ad assumere di nuovo la forma primitiva, per cui è sconsigliabile asportare sovrametalli dopo questo tipo di raddrizzatura se non in misura minima. Non interessando, inoltre, trasformazioni allotropiche o microstrutturali del ferro, il suo effetto permane anche dopo una eventuale stabilizzazione del pezzo a temperature di 500-600°C. Questo comportamento è particolarmente interessante per le strutture saldate di acciai non temprabili che devono essere raddrizzate dopo saldatura e che devono essere successivamente stabilizzate.

Queste ultime considerazioni valgono anche per la raddrizzatura sotto pressa e quindi tutte le considerazioni sull'incrudimento fatte a proposito della raddrizzatura sotto pressa sono valide per la raddrizzatura con la martellina.

### CANNELLO OSSIA CETILENICO E RISCALDO A INDUZIONE

Questa tecnologia si basa sulle espansioni e sulle contrazioni di volume generate da una fonte di calore applicata sul metallo da raddrizzare.

La diversità della fonte di calore non varia i risultati ottenibili, si può adottare l'una o l'altra in funzione delle attrezzature disponibili, delle potenze necessarie, della estensione della superficie da scaldare e, non ultimo, delle condizioni ambientali di lavoro che sono decisamente migliori con il riscaldamento ad induzione.

Per ottenere gli effetti di deformazione (o raddrizzatura) permanente è necessario arrivare nelle zone interessate a temperature alte in tempi molto brevi, in modo che la parte restante del pezzo si trovi ancora a temperatura ambiente o quasi. La temperatura da raggiungere è il colore rosso, corrispondente a 800-900°C, alla quale il materiale assume una plasticità notevolmente superiore a quella della temperatura ambiente.

Il principio è illustrato nella fig.25). La zona riscaldata aumenta rapidamente di volume, ma la parte restante del pezzo è fredda e quindi rigida ed obbliga il materiale ad espandersi verso l'alto. Raggiunta questa condizione si deve rapidamente raffreddare la zona calda "bloccando" la forma assunta dal materiale. A raffreddamento ultimato la zona riscaldata avrà un leggero rigonfiamento ma siccome il volume sarà di nuovo quello originale la lunghezza "a" sarà leggermente inferiore ed il pezzo subirà una trazione che lo obbligherà a raccorciarsi e quindi a modificare la sua forma geometrica.

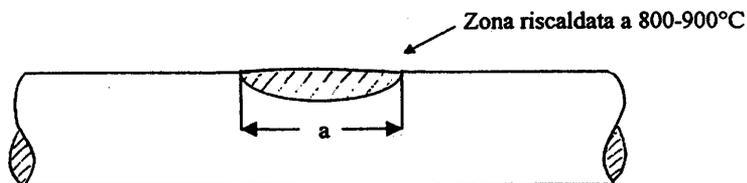


Fig. 25 – Principio di raddrizzatura col cannello ossiacetilenico

E' evidente che la deformazione sarà opposta a quella ottenibile con la martellina. I riscaldi si dovranno fare quindi dal lato convesso del pezzo per avere la sua raddrizzatura.

Se si effettua un riscaldamento ad induzione di passaggio, con induttore che riscalda progressivamente per tutta la lunghezza la faccia di un pezzo da raddrizzare è come se si facessero dei riscaldi localizzati

uno dietro l'altro ed il risultato finale è un ritiro della lunghezza della faccia con un effetto di centina regolare.

Si è detto che il raffreddamento deve essere rapido e quindi a volte è necessario usare un liquido raffreddante come acqua o acqua e glicoli. Quasi sempre però, quando il pezzo ha una massa consistente, è sufficiente l'effetto raffreddante della massa fredda del pezzo.

Anche se esula dallo scopo di questa descrizione, è interessante notare come il cannello possa essere usato nella deformazione (o raddrizzatura) della lamiera con risultati opposti a quelli ottenibili con la martellina e che venga utilizzato nella formatura manuale della lamiera, nelle già citate carrozzerie artigiane. Mentre la martellina "gonfia" la lamiera e crea degli effetti di curvatura, il cannello "tira" la lamiera e tende ad annullare tali effetti. E' chiaro che mentre l'enunciazione dei concetti è abbastanza semplice, la realizzazione pratica e l'ottenimento delle forme volute presuppone una esperienza ed una abilità notevoli che si acquisiscono solo con anni di pratica.

### **RADDRIZZATURA CON FORNO E PIASTRONI**

Nel caso di lamieroni o lardoni deformati in modo irregolare è a volte difficile ottenere una raddrizzatura accettabile con i mezzi fin qui visti. Se il valore di detti pezzi è notevole è conveniente scaldare i pezzi in un forno fino alla temperatura di 800-900°C che li rende plastici, dopodichè estrarli e schiacciarli fra due piastroni piani di notevole spessore, caricando di pesi il piastrone superiore e lasciando raffreddare il pezzo fino a temperatura ambiente.

### **RADDRIZZATURA A RULLI INCLINATI E DRITTI**

La raddrizzatura a rulli riguarda esclusivamente i pezzi tondi quali barre e tubi e si basa sul principio del superamento del carico di snervamento come avviene nella raddrizzatura alla pressa.

#### **RULLI DRITTI**

Con questa tecnica si possono raddrizzare tondi a lunghezza limitata quali semiassi per autocarri o automobili, bulloni grossi e oggetti simili. Il principio di funzionamento è quello schematizzato in fig. 26). Tre coppie di rulli supportate su di un bancale di una pressa vengono fatte ruotare con un motoriduttore di adeguata potenza. I rulli ruotano tutti nello stesso senso in modo che un tondo posato su di essi debba ruotare su se stesso. Altri due rulli folli dello stesso diametro sono supportati con cuscinetti a rulli a botte su una piastra schiacciante di una pressa, posizionati in modo da scendere, quando la pressa viene azionata, al centro delle distanze dei rulli inferiori.

Quando un albero da raddrizzare viene posto sui rulli inferiori si mette a ruotare con questi. Abbassando la pressa i due rulli superiori schiacciano l'albero da raddrizzare imprimendogli una deformazione che deve essere superiore al limite di snervamento ma inferiore al carico di rottura. In questo modo ad ogni giro l'albero subisce una flessione rotante che lo snerva. Se si alzano molto lentamente i due rulli superiori la flessione diminuisce fino ad azzerarsi quando i rulli sfiorano solo più l'albero. In questo modo la deformazione impressa all'albero si smorza con andamento sinusoidale fino ad annullarsi lasciando al termine l'albero dritto.

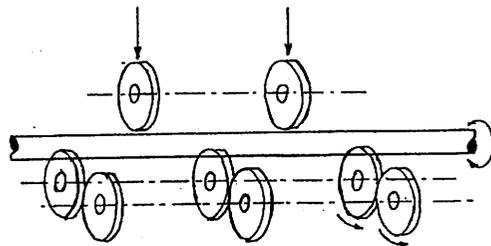


Fig. 26 Schema di raddrizzatura di una barra tonda su rulli

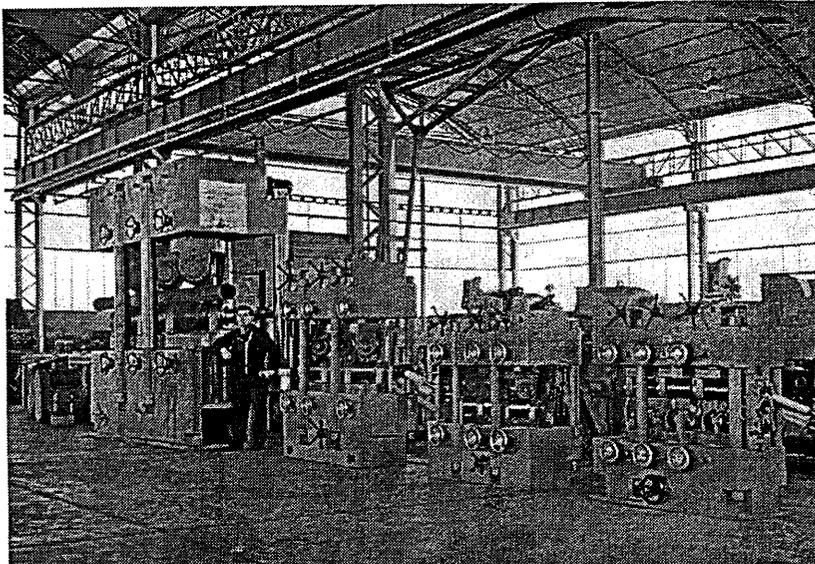
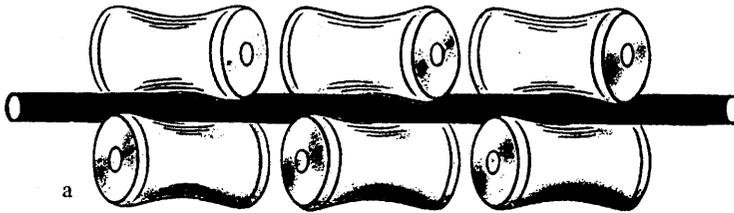
Questo sistema ha l'inconveniente che i rulli possono segnare l'albero diminuendone il diametro. Per evitare ciò occorre ridurre al minimo la deformazione iniziale di snervamento e fabbricare i rulli con le superfici ampiamente raccordate.

Il diametro dei rulli deve essere proporzionato al diametro degli alberi perché se l'albero è troppo piccolo viene pizzicato fra i due rulli opposti e stenta a ruotare, d'altro canto i rulli devono avere il diametro massimo possibile per poter montare dei cuscinetti che reggano il carico di compressione della pressa senza rompersi. Il motoriduttore che aziona i rulli inferiori deve avere una notevole potenza, adeguata al diametro degli alberi da raddrizzare e sarebbe bene, almeno per gli alberi con diametro oltre 25 mm che azionasse anche, tramite un giunto cardanico, l'albero da raddrizzare alla stessa velocità periferica dei rulli.

### RULLI INCLINATI

Il principio di lavoro è analogo a quello dei rulli dritti, ma la macchina è costruita con rulli sghembi in modo che la barra mentre ruota avanza tra i rulli. (vedi fig.27)

E' usata in acciaieria all'uscita delle barre dal laminatoio e lavora in continuo. Sono macchine di potenze notevoli (centinaia di HP) con grandi capacità di produzione.



Fig, 27 a) Principio di raddrizzatura di barre a rulli inclinati  
b) Fotografia di alcune macchine a rulli inclinati

## RADDRIZZATURA PEZZI TEMPRATI

Le tecniche di raddrizzatura degli acciai non temprabili prima elencate, pressa, martellina, riscaldamento col cannello o ad induzione, possono essere applicate anche agli acciai temprati. In questo caso però intervengono alcune variabili quali la durezza, il cambiamento delle fasi cristalline, la fragilità che complicano le cose.

Restano valide tutte le considerazioni teoriche fin qui fatte, è necessario però esaminare con attenzione i fenomeni che succedono perché sovente possono sovrapporsi e generare comportamenti apparentemente inspiegabili.

Verranno quindi esaminate le varie tecniche di raddrizzatura applicate ai vari processi di tempra più conosciuti: induzione, cementazione e tempra, nitrurazione, tempra di acciai rapidi e da stampi.

## RADDRIZZATURA PEZZI TEMPRATI AD INDUZIONE

Consideriamo la tempra ad induzione di un lardone su di una faccia per cominciare a chiarire alcuni comportamenti degli acciai sottoposti a questo processo.

Partiamo dal presupposto che il pezzo da temprare non sia tensionato da raddrizzature precedenti o da lavorazioni meccaniche pesanti, in questo caso la passata di tempra avrà un effetto incurvante concavo dovuto al fenomeno già visto sui pezzi non temprabili. L'intensità della curvatura sarà più debole sui pezzi sottili, aumenterà con l'aumentare dello spessore e della profondità di tempra, per poi di nuovo diminuire oltre certi spessori. La spiegazione risiede nella rigidità meccanica del lardone. Infatti:

- a) spessori sottili rendono poco rigido il lardone che sotto l'effetto del riscaldamento istantaneo si piega, per effetto della dilatazione termica nel punto riscaldato, assumendo una forma convessa. Questo cedimento del lardone nella sua parte fredda, sottostante il punto riscaldato, attenua il fenomeno illustrato in fig.25)
- b) Aumentando lo spessore del lardone aumenta anche la sua rigidità e quindi aumenterà l'efficacia del rigonfiamento provocato dal riscaldamento. Il rigonfiamento sarà tanto maggiore quanto più profondo sarà lo strato riscaldato e quindi la deformazione sarà maggiore quanto più alta sarà la temperatura raggiunta e quanto più bassa la frequenza usata (più è bassa la frequenza e maggiore è la profondità di riscaldamento).
- c) Oltre un certo limite di spessore la rigidità del lardone permette al riscaldamento di sviluppare tutta la sua capacità deformante esattamente come al punto b), però al termine del riscaldamento e del raffreddamento la parte interessata dalla trasformazione, che si sarà riaccurciata rispetto alla lunghezza iniziale del lardone, si troverà in trazione. Mentre tutta la parte restante del lardone si troverà, per l'equilibrio delle forze, in compressione. Supponendo che non si superi il limite elastico della parte trasformata la forza esercitata  $F$  da detta zona è proporzionale alla resistenza alla deformazione elastica per la sezione interessata, ma questa forza è contrastata dalla deformazione (a compressione) della sezione della parte non riscaldata ( $S'$ )

$$1) F = \delta * S = \delta' * S'$$

$\delta$  = carico elastico zona scaldata  
 $S$  = sezione zona scaldata

Siccome il carico elastico è proporzionale alla deformazione  $d$ , l'eguaglianza si può anche scrivere

$$2) d * S = d' * S'$$

Essendo  $S$  costante,  $d$  dovrà aumentare se aumenta  $S'$  per mantenere l'equilibrio delle forze. Se aumenta  $d$ , cioè l'allungamento della zona riscaldata, diminuisce la contrazione provocata dal trattamento termico (vedi fig.28) caso a) caso b) caso c)

Mentre l'enunciazione teorica dei fenomeni a) b) c) è abbastanza semplice, la determinazione dell'influenza dei parametri (spessore del lardone, profondità del riscaldamento, temperatura raggiunta) e la loro correlazione è praticamente impossibile. Basti pensare alla difficoltà di prevedere in linea teorica la profondità di riscaldamento legata alla frequenza, velocità di avanzamento, temperatura. Per cui non essendo possibile correlare con algoritmi matematici i parametri che intervengono con i risultati ottenibili, si procede per tentativi fino ad ottenere l'effetto desiderato, dopo di che adottando esattamente gli stessi parametri di prima si avranno risultati ripetibili.

Agli effetti deformanti, dovuti al riscaldamento, finora esaminati, si devono aggiungere, nel caso di acciai che prendono tempra, le trasformazioni microstrutturali legate alle trasformazioni allotropiche del ferro. Si è già visto come la trasformazione martensitica generi un aumento di volume. Tale aumento genera delle tensioni esattamente opposte a quelle prima esaminate, per cui l'effetto della trasformazione martensitica sarà un incurvamento convesso del lardone. La curvatura sarà tanto maggiore quanto più profonda è la tempra.

I lardoni sottili del caso a) che sentono meno l'effetto del risucchio dovuto al riscaldamento tenderanno a diventare convessi, perché l'effetto dell'aumento di volume martensitico prevale.

I lardoni del caso b) e c) possono restare concavi, o piani o convessi a seconda se prevale l'uno o l'altro effetto. In alcuni casi è possibile, dosando opportunamente le velocità e le temperature di riscaldamento, compensare esattamente le due tensioni ed avere al termine della tempra un lardone dritto. (vedi fig.29 caso a 1) caso b1) caso c1)

#### RADDRIZZATURA LARDONI TEMPRATI AD INDUZIONE CON RISCALDO SUCCESSIVO AD INDUZIONE

Per raddrizzare i lardoni deformati nella tempra ad induzione si può ricorrere, oltre che alla martellina o alla pressa, ad una tempra ad induzione sul lato opposto del lardone.

Se il lardone di partenza era perfettamente detensionato, rifacendo una tempra sul lato opposto con gli stessi parametri usati prima si dovrebbero equilibrare le tensioni ed il lardone dovrebbe diventare dritto. Se invece permane ancora una deformazione si possono avere due casi:

- 1) Nel caso in cui il lardone resta concavo si può rinvenire la faccia opposta già temprata (vedi fig.30). In questo caso si trasforma la martensite in sorbite con diminuzione di volume e la faccia  $b$  si raccorcia raddrizzando il lardone.
- 2) Nel caso in cui il lardone resta convesso si può tentare di ritemperare la faccia opposta a quella che va dura andando più o meno profondi di prima e verificando il risultato finale a lardone freddo.

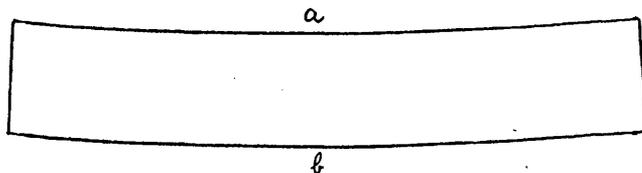


Fig. 30 – Lardone deformato durante la tempra della faccia a) sul quale si tenta la raddrizzatura temprando b)

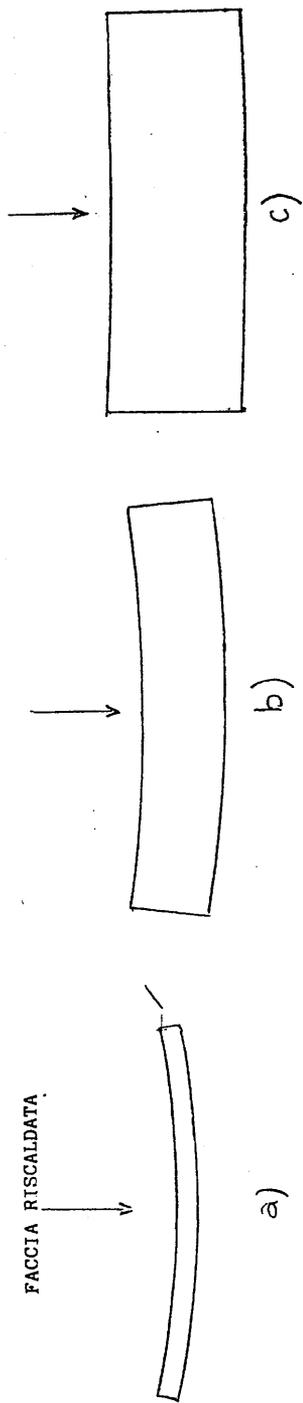


Fig. 28) Schema dell'influenza dello spessore del lardone sulla capacità di deformazione del riscaldo a induzione (acciaio non temprabile)

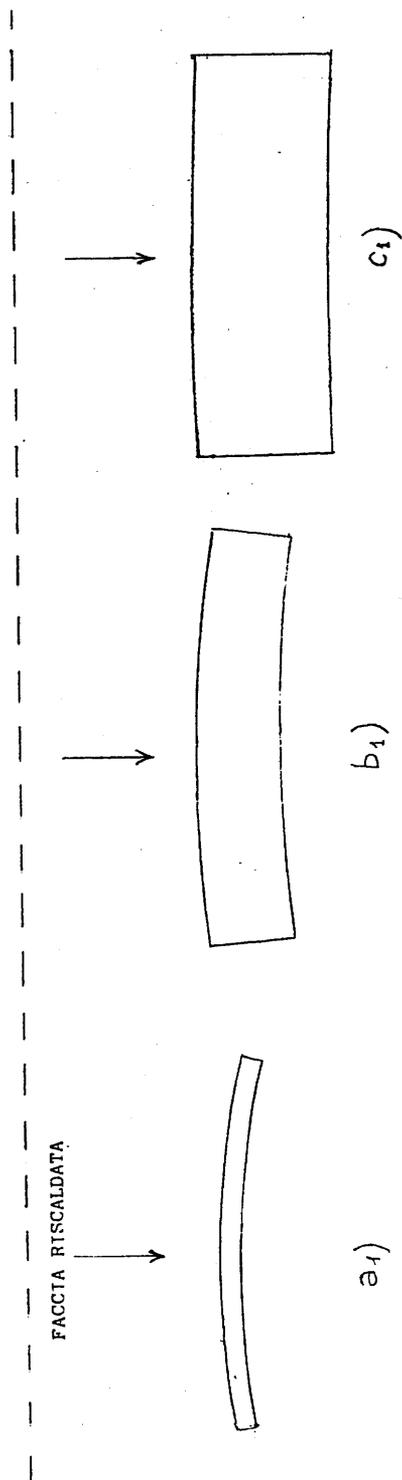


Fig. 29) Schema dell'influenza del rigonfiamento martensitico, combinato con l'effetto illustrato in fig. 27, sulla deformazione di lardoni sottoposti a tempra ad induzione (acciaio temprabile)

## RADDRIZZATURA LARDONI TEMPRATI AD INDUZIONE CON LA PRESSA

La raddrizzatura con la pressa richiede meno esperienza e prove pratiche che non il metodo precedente; ha però l'inconveniente che è molto facile produrre cricche superficiali o addirittura rotture dei pezzi: Questo inconveniente è un grosso rischio per i danni che può provocare ed è bene che venga sempre avvisato il Cliente prima di iniziare il lavoro o meglio, già in fase di preventivo.

La raddrizzatura alla pressa dovrebbe essere fatta immediatamente dopo la tempra ad induzione, mentre il pezzo è ancora caldo, e comunque mai dopo il trattamento di distensione. Queste due affermazioni convalidate dai risultati della pratica quotidiana, hanno spiegazioni teoriche abbastanza semplici

### a) Raddrizzatura appena terminata la tempra

Durante il raffreddamento di tempra, il passaggio da austenite a martensite è vincolato alla temperatura raggiunta. Un pezzo di acciaio appena temprato è normalmente ad una temperatura superiore a quella ambiente di almeno 30-40°C per cui la trasformazione martensitica non è ancora completata (vedi pag. 10). E' quindi molto più facile evitare le cricche perché come si è già detto quando l'austenite viene sottoposta a deformazioni si trasforma in martensite che ha un volume maggiore ed ostacola il formarsi del distacco (cricca) nella zona sottoposta a trazione della pressa.

## EFFETTI METALLURGICI DELLA DISTENSIONE SULLA RADDRIZZATURA

Il rinvenimento di distensione dopo tempra ad induzione avviene normalmente a temperature comprese fra 100 e 250°C. A parità di temperatura le durezza ottenute sono più basse sui pezzi temprati ad induzione che non sugli stessi pezzi temprati in forni tradizionali. Il fenomeno è legato all'alta velocità di riscaldamento ed alla relativa corta permanenza alla temperatura di austenitizzazione dell'acciaio, che non permette la completa soluzione degli elementi leganti e dei carburi nell'austenite per cui in pratica un acciaio temprato ad induzione risulta più "povero" dello stesso acciaio temprato in forno e quindi con minor tenuta della durezza al rinvenimento.

Gli obiettivi della distensione sono:

- riduzione della durezza e delle tensioni dei pezzi temprati con miglioramento della lavorabilità alla mola durante la rettifica e diminuzione dei rischi di cricche da rettifica.
- omogeneizzazione o riduzione delle concentrazioni di tensioni in pezzi di forma non simmetrica, con miglioramento della sensibilità agli intagli o spigoli vivi.
- Aumento della resilienza. Questo è l'effetto più importante soprattutto per componenti di sicurezza.
- Aumento dello snervamento e del limite di fatica. Quest'ultimo è particolarmente importante per la durata e la sicurezza dei particolari trattati.

La distensione cambia l'andamento della curva carico-allungamento nella zona della deformazione plastica, alzandola rispetto a quella del materiale non disteso. Questa particolarità assume molta importanza nel ciclo di lavorazione di un particolare che debba essere raddrizzato dopo tempra. Se la raddrizzatura si effettua prima della distensione risulterà più facile e necessiterà di minori carichi alla pressa. (Fig.31).

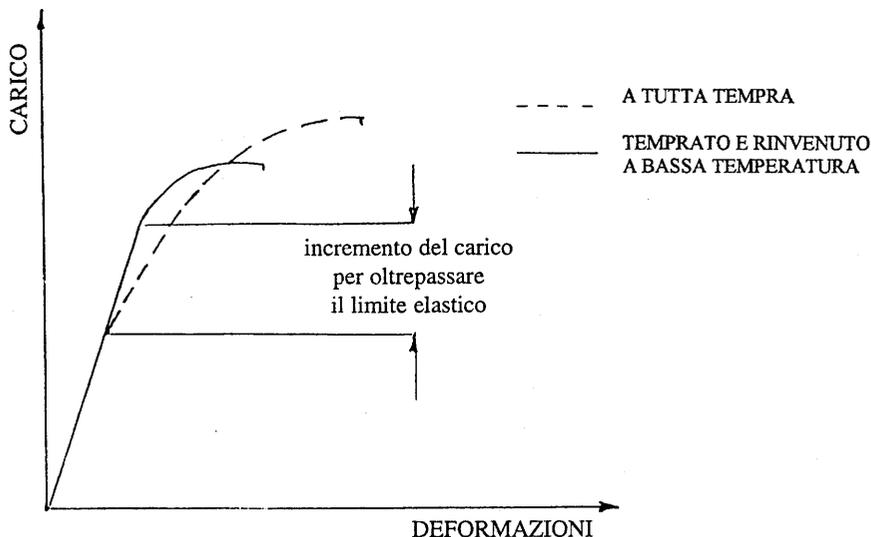


Fig. 31 – Curve carico – deformazioni di un provino a tutta temprata e di uno uguale ma rinvenuto a bassa temperatura ( 150- 250°C )

#### RADDRIZZATURA DI PEZZI TEMPRATI AD INDUZIONE CON LA MARTELLINA

Si è già visto che la martellina procura con le sue incisioni dei rigonfiamenti del materiale per cui la faccia incisa tende a diventare convessa. L'uso della martellina è quindi particolarmente indicato nei lardoni temprati ad induzione che sono diventati convessi; infatti è facile incidere la faccia opposta a quella temprata perché è ancora tenera.

Meno adatta e conveniente è nel caso opposto perché bisogna incidere la parte indurita ad induzione e l'operazione oltre che essere difficile può provocare delle microcricche nelle zone incise.

A volte, quando non è disponibile la pressa, può essere necessario usare la martellina anche sulle superfici temprate. Nel caso ad esempio di alberi temprati ad induzione su tutti i diametri e nei quali esistono spigoli vivi interni fra i diversi diametri che possono diventare pericolosi inneschi di rottura nella raddrizzatura alla pressa, si può tentare la raddrizzatura con la martellina, anche se buoni risultati sono difficili da ottenere.

#### CONTENIMENTO DELLE DEFORMAZIONI NELLA TEMPRATA AD INDUZIONE

- a) Uno dei metodi più intuitivi è quello di deformare i pezzi alla pressa in senso esattamente contrario alla deformazione provocata dalla temprata ad induzione. Questo metodo presuppone che tutti i pezzi del lotto da temprare siano perfettamente detensionati da una ricottura di stabilizzazione fatta prima della lavorazione meccanica. Prima si tempereranno due o tre pezzi del lotto e si misureranno esattamente le deformazioni; dopodiché il restante lotto verrà deformato in senso esattamente opposto e verrà temprato con gli stessi parametri dei pezzi campione. I risultati sono soddisfacenti anche se non perfetti.
- b) Un altro sistema, quando si tratta di pezzi sottili e quindi difficilmente temprabili perché con le loro deformazioni durante il riscaldamento rendono difficile eseguire il riscaldamento stesso in modo costante e corretto, è di imbullonare i pezzi ad un lardone decisamente robusto, con spessore di 5-10 volte quello del pezzo da temprare. Al termine della temprata quando si sbullona il lardone si avrà ancora una piccola deformazione, ma decisamente più contenuta che non nella temprata libera.

- c) Nel caso di tempra ad induzione di alberi rotondi con tempra a passaggio con induttore circolare è molto importante avere i pezzi perfettamente detensionati. Per tale scopo bisogna bonificare i pezzi in verticale per evitare di doverli raddrizzare dopo bonifica, oppure se la raddrizzata si è resa necessaria si deve fare una stabilizzazione ad una temperatura di 20°C più bassa della temperatura di rinvenimento per una durata di circa 8 ore.
- d) Pur avendo i pezzi perfettamente detensionati, se i diametri sono piccoli (10-30 mm) e i tondi sono lunghi, si possono avere ugualmente deformazioni inaccettabili. In questo caso è bene tenere i tondi in tensione durante la tempra ad induzione facendo degli opportuni attacchi con delle molle, in luogo di tenerli per pressione fra due contropunte. A volte è sufficiente, anziché metterli in tensione, tenerli appesi alla parte superiore, e liberi dalla parte inferiore, con delle guide ancorate all'induttore per impedire che questi possa andare a toccare il tondo durante la tempra.

**TEMpra AD INDUZIONE DELLE CORONE DI AVVIAMENTO**

Le corone di avviamento vengono tornite, dentate, temprate ad induzione ed infine calettate a freddo sul volano del motore.

La tempra ad induzione viene fatta con riscaldamento in pieno, con induttore circolare ed immersione in acqua o acqua e glicoli. Viene temprato tutto il dente e la base dente per una profondità di ca. 2mm. Durante il riscaldamento la corona aumenta di diametro per cui bisogna prevedere due conseguenze:

-l'induttore deve essere calcolato più grande perché abbia ancora la luce necessaria quando la corona raggiunge la temperatura di tempra

-il centraggio della corona deve dilatarsi in modo simmetrico seguendo la dilatazione della corona in modo da tenerla centrata rispetto all'induttore e deve analogamente restringersi durante il raffreddamento di tempra Per ottenere questo effetto in genere la corona viene supportata su tre bilancini vincolati meccanicamente fra di loro nel movimento di apertura e chiusura, che sono tenuti in tensione da molle elicoidali. Un altro sistema si basa sulla spinta esercitata per proprio peso da un centraggio conico che si abbassa quando la corona dilata e si alza quando la corona si chiude (vedi fig. 32).

Un'ultima considerazione da fare riguarda l'aumento della circonferenza dovuto alla trasformazione martensitica della parte temprata. Bisogna tener conto di questa deformazione tornendo le corone più piccole prima della tempra di una misura uguale all'aumento che subiranno. Per tener costante questa deformazione bisognerà tenere assolutamente costanti i parametri di tempra e lavorare con colate separate. L'ovalizzazione, se contenuta in limiti che permettono ancora il piantaggio, non è dannosa perché viene recuperata in fase di piantaggio sul volano.

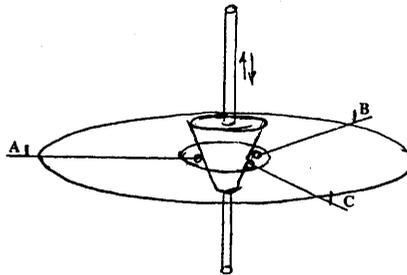


Fig. 32 – Schema di attrezzo per tenere centrate le corone di avviamento durante la dilatazione del riscaldamento ad induzione e nella tempra successiva  
A,B,C sono gli appoggi della corona

## TEMPRA AD INDUZIONE DI CORONE CILINDRICHE DENTATE INTERNE CON CONCHIGLIA ESTERNA

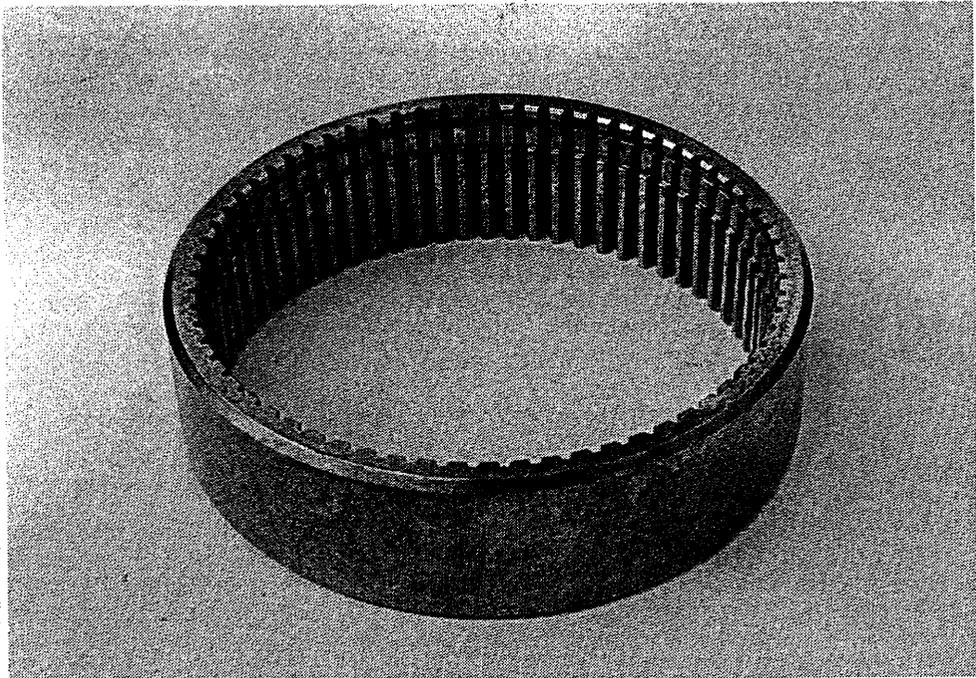
E' un processo che viene applicato su grosse serie di corone perché implica una messa a punto alquanto laboriosa. Quando si tratta di corone con diametro interno di 300-400 mm ed altezza di fascia di 80-150 mm occorrono potenze di 500-600 KW con frequenze di 10 KHz  $\pm$  4KHz

La frequenza è vincolata al modulo dei denti . più è grande il modulo dei denti e minore deve essere la frequenza affinché il riscaldamento avvenga in modo uniforme fra punta del dente e radice. Se la frequenza è troppo bassa tenderà a scaldare prima la radice della punta secondo la seguente regola : Se la penetrazione  $P$  della corrente indotta è maggiore della metà dell'altezza  $h$  del dente il riscaldamento comincerà alla base del dente e la punta scalderà solo per conduzione del calore dalla base.

Se la penetrazione  $P_1$  della corrente indotta è minore del 10% dell'altezza  $h_1$  del dente (quindi  $P_1 < 0,1 h_1$ ) si scalderà solo la punta dei denti .

L'induttore avrà forma anulare, generalmente ad una spirale, con altezza uguale a quella della corona. L'elevata potenza è necessaria perché l'induttore lavora nella parte esterna e quindi con rese di potenza molto basse; inoltre i riscaldi devono essere veloci perché il calore non si trasmetta all'esterno per conduzione.

Nel caso in cui dopo tempra la corona diventi conica è possibile correggere la deformazione ponendo all'esterno della corona, in fase di riscaldamento, una conchiglia con inclinazione della parete interna esattamente contraria alla deformazione constatata. E' necessario però che la corona, durante la fase di riscaldamento, vada ad adagiarsi sulla conchiglia e ne venga deformata nel senso corretto.



### RADDRIZZATURA PEZZI CEMENTATI E TEMPRATI

La cementazione e tempra, diversamente dalla tempra ad induzione è un indurimento che interessa contemporaneamente tutte le facce del pezzo, salvo casi eccezionali in cui venga richiesta la protezione di qualche zona. Le eventuali deformazioni possono essere causate da una forma asimmetrica del pezzo, da eventuali tensioni preesistenti al trattamento, o infine dal caricamento nel forno o dall'introduzione nell'olio in modo non simmetrico ed equilibrato.

Nel caso della cementazione e tempra la trasformazione martensitica riguarda tutto il volume del pezzo anche se la superficie arricchita di carbonio ha una martensite più ricca e quindi con maggior volume rispetto alla parte sottostante. Questa è la causa principale della deformazione dei pezzi asimmetrici.

### RADDRIZZATURA ALLA PRESSA DI PEZZI CEMENTATI E TEMPRATI

Valgono tutte le considerazioni fatte per la raddrizzatura alla pressa dei pezzi temprati ad induzione. In questo caso però l'operazione è più delicata perché il pezzo è totalmente martensitico e quindi più fragile.

E' molto importante, come è già stato detto e spiegato, procedere alla raddrizzatura immediatamente dopo l'estrazione del pezzo dall'olio, quando si trova ancora ad una temperatura di almeno 70°C: In questo caso però sarà bene ricontrollare il pezzo quando arriverà a temperatura ambiente perché tenderà a ridiventare leggermente storto. Allo stesso modo conviene agire dopo la distensione. Va notato inoltre che dopo ogni raddrizzatura si deve ripetere la distensione.

Un'altra considerazione molto elementare da tener presente è quella di evitare sui pezzi gli spigoli vivi interni, che diventano inneschi di rottura per la concentrazione delle tensioni di raddrizzatura che generano. Sarà bene prevedere sempre dei raccordi i più ampi possibili.

Nel caso in cui si debbano raddrizzare pezzi ormai cementati temprati e distesi, sarà bene preriscaldarli ad una temperatura vicina a quella di distensione per diminuire il pericolo di rotture.

### RADDRIZZATURA COL CANNELLO O CON RISCALDO AD INDUZIONE

La raddrizzatura mediante riscaldi localizzati sui pezzi cementati e temprati è normalmente da prendere in considerazione solo nei casi in cui il ricorso alla pressa è troppo pericoloso per le rotture.

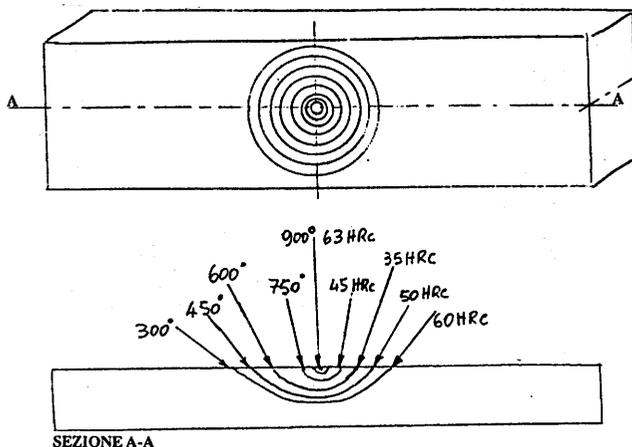


Fig. 33 – Raddrizzatura con riscaldamento al cannelo ossiacetilenico. Curve isoterme durante il riscaldamento e corrispondenti durezze finali ottenute

permettere la trasformazione completa dell'austenite in ferrite e perlite lamellare. (vedi fig.35)

Stahl 25 CrMo 4  
(Schmelze 4)

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild  
(kontinuierlich)

II-107 E

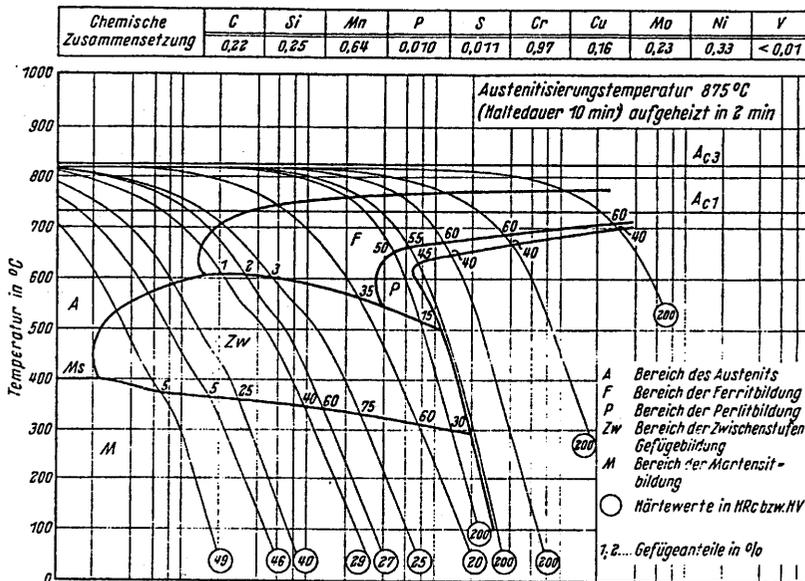


Fig. 35 – Curve isothermiche dell'acciaio 25CrMo4 ( T.T.T. )

E' doveroso notare che nel processo industriale le curve di raffreddamento non sono esattamente isoterme per cui i tempi di permanenza del 2° stadio devono essere calcolati un po' più lunghi perché la prima curva viene generalmente intersecata ad una temperatura più alta del previsto. Inoltre non tutti i pezzi raffreddano alla stessa velocità perché risultano quasi sempre sovrapposti e quelli al centro raffreddano più lentamente. La curva di raffreddamento che si otterrà sarà una interpolazione fra le teoriche curve isoterme dei diagrammi TTT e le curve di raffreddamento continuo illustrate nei diagrammi CCT (continuous cooling transformation) ( vedi fig.36 ) ed anche i tempi di trasformazione e le microstrutture ottenibili dovranno essere mediate facendo uso di tutti e due i diagrammi.

Più è alta la temperatura del 2° stadio più sarà bassa la durezza ottenuta. Se la permanenza nel 2° stadio non è sufficiente l'austenite residua nel raffreddamento successivo può dare origine a isole di bainite, soprattutto se l'acciaio ha molti elementi leganti (es. 18NiCrMo5).

La bainite crea seri problemi alla lavorabilità all'utensile ed il modo più semplice di recuperare i pezzi è ricorrere ad una ricottura subcritica. Tale ricottura distrugge la struttura aciculare della bainite e ne abbassa la durezza, ma tende a globulizzare la perlite che in questo modo perde un po' della sua lavorabilità. Fra i due mali è decisamente meno grave il secondo.

Se l'acciaio presenta una microstruttura a bande è possibile mascherare queste bande aumentando la velocità di raffreddamento dal 1° al 2° stadio, usando ad esempio aria fortemente ventilata, ma se si ripete la ricottura raffreddando lentamente dal 1° al 2° stadio ricompaiono le bande.

La ricottura isoterma se condotta correttamente dà la massima lavorabilità alle macchine utensili e riduce molto le deformazioni nel trattamento successivo di cementazione e tempra. Inoltre, ponendo i pezzi tutti nelle stesse condizioni microstrutturali e di detensionamento, rende costanti tali deformazioni, per cui è possibile correggerle a priori nella lavorazione meccanica.

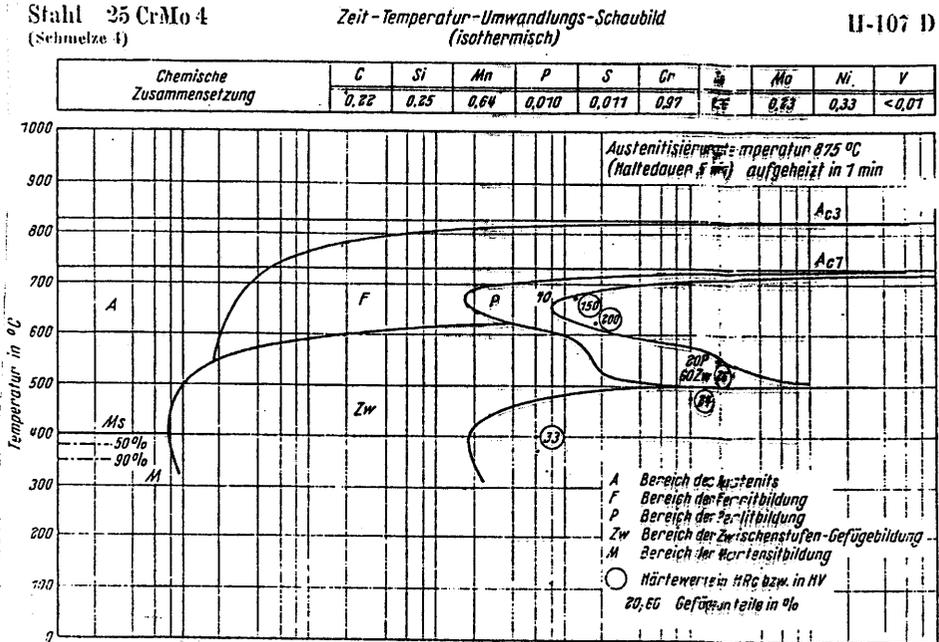


Fig. 36 – Curve di trasformazione con raffreddamento continuo dell'acciaio 25CrMo4 (C.C.T.)

**TEMPRA SEGUITA DA RICOTTURA SUBCRITICA**

E' il più efficace dei trattamenti preliminari agli effetti delle deformazioni. La microstruttura che si ottiene è però decisamente meno lavorabile alle macchine utensili rispetto a quella ottenibile con la ricottura isoterma.

Il ciclo consiste in una tempra in olio da una temperatura di almeno 20°C superiore a quella di cementazione, seguita da una ricottura subcritica. Se la ricottura supera il punto AC<sub>1</sub> vengono in parte annullati i benefici del contenimento delle deformazioni. Nel caso di acciai da cementazione, se non esistono forme estremamente complicate, è anche possibile fare la tempra in acqua anziché in olio, ottenendo risultati ancora migliori.

La microstruttura finale sarà sempre una martensite rinvenuta con tendenza dei carburi a globulizzare in dimensioni tanto maggiori quanto più alta è la temperatura della ricottura.

**TEMPRA CON SPINE**

Il pezzo viene scaldato alla temperatura di austenitizzazione in forni ad atmosfera controllata poi estratto e, previa introduzione di una spina nel foro avente dimensioni appropriate, temprato.

La tempra con spina presuppone sempre un trattamento preliminare di ricottura isoterma per portare il materiale tutto nelle stesse condizioni di partenza e quindi in grado di reagire e deformarsi sempre allo stesso modo nella fase di tempra alla spina.

Il cannello o l'induzione infatti, anche se portano il pezzo nel punto scaldato alla temperatura di austenitizzazione, e quindi in grado di subire di nuovo l'indurimento di tempra nel raffreddamento, nelle zone immediatamente adiacenti generano delle temperature intermedie fra quella di austenitizzazione e quella del pezzo freddo che producono effetti di ricottura subcritica e di rinvenimento. Si genera così un alone tenero intorno al punto scaldato, tanto più ampio quanto più largo e profondo è stato il riscaldamento, che può inficiare l'uso del pezzo (vedi fig.33)

Nel caso dei pezzi cementati e temprati dopo il riscaldamento non è quasi mai necessario ricorrere ad un raffreddamento drastico con acqua, o acqua e glicoli, o stracci bagnati, perché è sufficiente la velocità determinata dall'assorbimento del calore da parte della massa fredda del pezzo. Quasi sempre anzi il raffreddamento con acqua provoca cricche nel pezzo. E' preferibile invece dare la massima potenza al cannello per ridurre al minimo il tempo di riscaldamento, contenere l'alone di rinvenimento ed aumentare la velocità di raffreddamento.

In alcuni casi è consigliabile abbinare il potere raddrizzante del cannello con la pressa che ne accentua l'effetto. In questo caso si pone il pezzo da raddrizzare sotto la pressa e lo si schiaccia sino ad un punto in cui non ci sia ancora pericolo di rotture. Tenendolo così incurvato si fanno le "punture" col cannello dalla parte tenuta schiacciata. Il pezzo in questo caso, anche se sottile, non può sollevarsi e quindi l'effetto raddrizzante del riscaldamento arriva al massimo della sua efficacia.

E' interessante notare un aspetto della raddrizzatura col cannello che riguarda le varie fasi che si formano sul pezzo con questa tecnica e che la rendono particolarmente efficace.

Si è già visto (fig.33) come si formi una parte centrale temprata che ha un effetto raddrizzante per i motivi già evidenziati in fig.25), ma all'interno si formano anche degli aloni di martensite rinvenuta, che ha un volume inferiore della martensite preesistente, e quindi anche questi aloni, creano un ritiro del materiale e quindi una raddrizzatura.

E' possibile addirittura sfruttare il rinvenimento superficiale per ottenere la raddrizzatura del pezzo, anche se è abbastanza difficile tenere sotto controllo le temperature. In questo caso è più vantaggioso sfruttare il riscaldamento ad induzione che permette di vedere con maggiore precisione il cambiamento del colore superficiale dell'acciaio, che dovrà essere preventivamente lucidato, e paragonarlo con una tabella dei colori di rinvenimento. Bisognerà tener conto in questo caso, essendo la velocità di riscaldamento rapidissima, che i colori sono un po' sfalsati verso l'alto (la temperatura raggiunta sarà più alta di quella corrispondente al colore ottenuto).

#### **CORONE DENTATE OVALIZZATE**

Corone dentate molto grandi, ma anche anelli o boccole possono deformarsi nella cementazione e tempra. E' possibile correggere l'ovalizzazione intervenendo col cannello sia sulla circonferenza interna che su quella esterna. Anche in questo caso è possibile migliorare la deformazione ricorrendo all'aiuto combinato di una pressa. In fig. 34) è schematicamente mostrato come si deve intervenire col riscaldamento per eliminare l'ovalizzazione del pezzo.

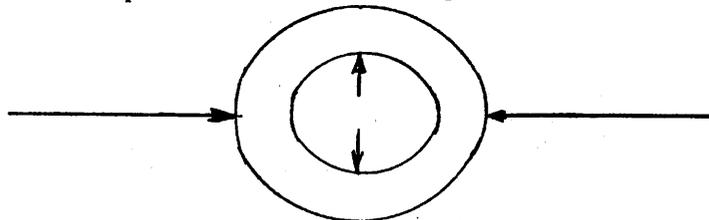


Fig. 34 - Punti da scaldare per eliminare l'ovalizzazione della corona

### RADDRIZZATURA ALLA MARTELLINA

La raddrizzatura alla martellina comporta una deformazione a freddo del materiale nella zona martellinata. Nel caso della cementazione e tempra, trattandosi di materiali molto duri, è particolarmente difficile rendere efficace l'operazione. Occorre adattare martelline particolarmente dure, costruite con acciai rapidi o ledeburitici (es. UX200C13, UX150CD12) ed esiste il rischio molto forte di creare delle cricche nella incisione.

Essendo l'incisione molto superficiale per la durezza del pezzo, si corre il rischio che durante la rettifica venga asportata la zona rigonfiata e che il pezzo tenda ad assumere di nuovo la forma originale. Si può avviare parzialmente all'inconveniente facendo una distensione dopo l'operazione di martellinatura.

### CONTENIMENTO DELLE DEFORMAZIONI NELLA CEMENTAZIONE E TEMpra

E' praticamente impossibile riuscire ad ottenere un pezzo cementato e temprato senza deformazioni, non fosse altro per le trasformazioni di fase che il trattamento comporta.

E' però auspicabile riuscire ad avere almeno deformazioni costanti e simmetriche, in modo tale da prevederle ed assumere provvedimenti dimensionali sui pezzi prima del trattamento termico in modo da compensarle. Per ottenere questo scopo tre sono le principali tecnologie adottate:

- 1) Fare dei trattamenti termici preliminari tali che rendano il materiale di partenza uniforme e il più possibile detensionato.
- 2) Effettuare la fase di tempra contenendo le deformazioni a mezzo di stampi o spine.
- 3) Fare la cementazione e lo spegnimento dei pezzi su specifici attrezzi di sostegno che minimizzano le deformazioni per scorrimento viscoso nel forno e le deformazioni per introduzione nella vasca di tempra non secondo gli assi di simmetria dei pezzi.

### TRATTAMENTI PRELIMINARI

Sono sempre necessari anche se vengono adottate successivamente le tecnologie elencate ai punti 2) e 3)

### RICOTTURA SUBCRITICA DI DISTENSIONE

Si tratta di una ricottura fatta ad una temperatura intorno ai 620-680°C, al disotto cioè del punto critico AC<sub>1</sub>, con raffreddamento all'aria calma. Ha l'unico scopo di detensionare il materiale eliminando incrudimenti dovuti alla lavorazione meccanica, a tensionamenti dovuti al taglio delle fibre, a deformazioni a freddo, od a disuniformità di fasi dovute a raffreddamenti non uniformi da temperatura oltre AC<sub>3</sub> (es. taglio alla fiamma, saldature, stampaggio a caldo con raffreddamento non uniforme)

E' il meno efficace, ma anche il meno costoso, dei trattamenti preliminari.

### RICOTTURA ISOTERMICA

E' una ricottura eseguita in due stadi.

Il primo è una austenitizzazione del materiale oltre AC<sub>3</sub>, comunque ad almeno 20° oltre la temperatura della successiva cementazione, seguita da un raffreddamento il più veloce possibile fino ad una temperatura generalmente intorno ai 620-650°, ed una permanenza a tale temperatura per 4-6 ore, che costituisce il secondo stadio. Terminato il 2° stadio il materiale può essere raffreddato all'aria.

Il ciclo termico trova la sua ragione d'essere nelle curve ad S di trasformazione isoterma dell'acciaio, e tali curve servono anche a calcolare i tempi di permanenza nel 2° stadio per

Anche le colate vanno naturalmente tenute separate.

Alla tempra con spina vengono sottoposti pignoni o altri particolari sui quali necessita avere la dimensione del foro abbastanza precisa per evitare la rettifica finale.

La spina è costruita generalmente in acciaio cementato e temprato e successivamente rettificato ad una misura tale che il pezzo da temprare che viene calzato su questa spina quando ha finito il raffreddamento di tempra abbia la dimensione del foro voluta. Non sempre il diametro della spina deve essere uguale a quello del foro finito. A volte il pezzo raffreddando calzato sulla spina si chiude nella spina stessa a tal punto che deve essere estratto con una pressetta.

In questo caso il pezzo avrà il foro leggermente più piccolo della spina, di conseguenza il diametro della spina dovrà essere più grande del teorico per avere un pezzo conforme.

Altre volte il pezzo si chiude sulla spina durante il primo raffreddamento, ma poi subentrando la trasformazione martensitica tende ad allargarsi. Alla fine il pezzo avrà un diametro leggermente maggiore della spina.

Quest'ultimo caso è più frequente negli acciai da tempra perché la trasformazione martensitica è più consistente per i maggiori tenori di carbonio nell'acciaio. In questo caso è anche più facile però avere delle ovalizzazioni perché la fase finale avviene senza che la spina eserciti più la sua funzione di contenimento.

Il foro tende a chiudersi o meno sulla spina non solo in funzione del tenore di carbonio dell'acciaio ma anche della forma del pezzo. Pezzi molto sottili tenderanno ad allargarsi perché l'aumento di volume della martensite agirà essenzialmente sulla circonferenza (fig.37a) mentre nei pezzi spessi il foro tenderà a chiudersi per la prevalenza dell'aumento di volume radiale rispetto a quello circolare (fig.37b)

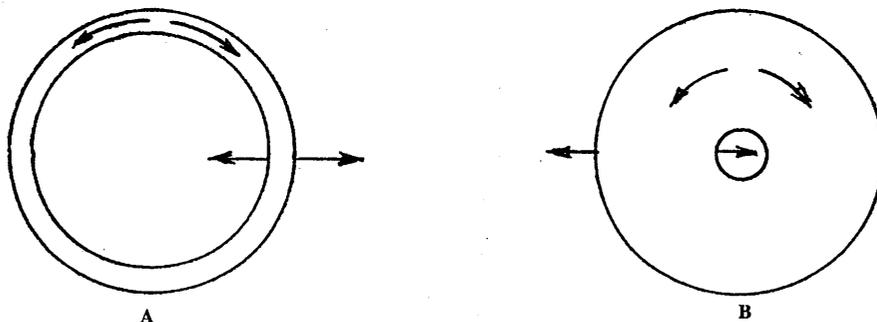


Fig. 37 a - il foro della corona tende ad allargarsi dopo tempra

37 b - il foro della corona tende a chiudersi dopo tempra

#### TEMPRA ALLA PRESSA

Come per la tempra con spina il pezzo viene riscaldato alla temperatura di austenitizzazione e quindi temprato in una macchina che lo tiene chiuso in un apposito stampo al fine di controllarne le dimensioni. L'olio di tempra pompato da una pompa centrifuga arriva al pezzo a mezzo di opportune aperture ricavate nello stampo.

La pressa, o la Gleason come viene comunemente chiamata dal nome della casa che ha fatto scuola nella costruzione di questo tipo di presse, ha una base piana scanalata per il passaggio dell'olio che serve da base di appoggio per il pezzo caldo da temprare. Nella parte superiore della macchina sono

alloggiati due pistoni concentrici, generalmente comandati ad aria compressa a pressione regolabile, che abbassano sul pezzo caldo due matrici di forma tale da coprire il pezzo. La matrice esterna, più grande, serve a tenere il pezzo schiacciato sulla base piana della pressa ed a ottenere quindi la planarità. Il pistone centrale porta invece generalmente una matrice cilindrica a settori che ha un foro conico centrale. Nel foro conico entra un pistone conico ancorato al cilindro che scendendo tende ad allargare la matrice cilindrica in modo simmetrico e tale da spingerla contro le pareti del foro del pezzo da temperare.

La sequenza di tempra sarà quindi:

- posizionamento del pezzo caldo sotto la verticale dei pistoni .
- discesa dei pistoni in modo tale che prima quello interno spinga la matrice circolare nel foro del pezzo e lo centri e successivamente quello esterno schiacci la parte superiore del pezzo per ottenere la planarità..

Le pressioni vanno regolate in modo tale che il pezzo sia tenuto in piano ma possa fare gli spostamenti dovuti alle contrazioni termiche, altrimenti tende ad ovalizzarsi mentre la matrice a settori nel foro deve potersi stringere durante la prima fase di raffreddamento ed allargarsi durante la fase di aumento di volume determinata dalla trasformazione martensitica. In questo modo il foro resterà perfettamente cilindrico ma naturalmente la sua dimensione, per essere in tolleranza dovrà avere una partenza sul pezzo da cementare calcolata in base alle deformazioni ottenute in parecchie prove di tempra su pezzi campione.

La tempra alla Gleason ha il vantaggio rispetto alla spina, che il punzone segue le variazioni dimensionali del foro sia nella fase di restringimento, nella prima fase di raffreddamento, che nella fase di allargamento dovuto alla trasformazione martensitica del pezzo dopo il primo raffreddamento. Tale comportamento è dovuto al fatto che il pistone è azionato ad aria compressa e quindi può salire e scendere nel cilindro come fosse spinto da una molla. Il risultato finale è una migliore rotondità finale del foro del pezzo temperato.

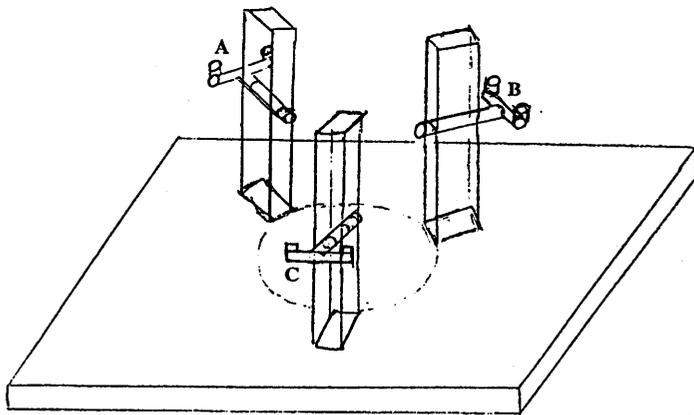


Fig. 38 – Attrezzo per il caricamento orizzontale delle corone da cementare e temperare. Appoggio su tre punti sostenuti tramite i bilancini A-B-C

## CEMENTAZIONE E TEMPRA LIBERA DI INGRANAGGIE CORONE

Quando gli ingranaggi e le corone sono di una certa dimensione (200-500 mm) ed in quantitativi minimi, non tali almeno da giustificare la costruzione di stampi per una Gleason, si adottano alcune tecniche di caricamento in forno e di immersione in olio che permettono di contenere le deformazioni. I sistemi di caricamento sono fondamentalmente due: con i pezzi in orizzontale, oppure con i pezzi in verticale appoggiati o appesi.

### Il caricamento orizzontale

Adatto per gli ingranaggi e le corone, viene fatto su attrezzi che sostengono i pezzi in modo che quello sopra non gravi con il suo peso su quello sotto. Inoltre ogni singolo pezzo viene supportato in tre soli punti equidistanti secondo la regola che per tre punti passa un solo piano. Una ulteriore raffinatezza consiste nel sostituire i tre punti con tre bilancini che automaticamente si allineano sul piano della corona da sostenere (vedi fig.38)

### Il caricamento verticale

Per gli ingranaggi con un mozzo relativamente piccolo, può avvenire per appoggio sul pianale di caricamento del forno, con la distribuzione del peso sui due denti di appoggio inferiori. Se si vuole migliorare la qualità, o nel caso di corone o di ingranaggi con mozzo relativamente grande, bisogna invece appenderli usufruendo di apposite robuste attrezzature che reggono delle traverse che passano attraverso il foro (vedi fig.39)

In questo caso le corone tendono ad ovalizzarsi per il proprio peso. Per evitare il fenomeno le traverse devono essere due ed i loro assi vanno posti ad una distanza pari a  $185/295$  del diametro del foro attraverso cui passano.

In tutti i casi è necessario che il riscaldamento avvenga in modo uniforme ed è quindi utile fare due fermate del forno intorno ai  $680^{\circ}\text{C}$  e poi a  $780^{\circ}$ , per una durata in minuti pari allo spessore dei pezzi, durante la fase di riscaldamento. Se non è possibile fare due fermate fare almeno quella a  $780^{\circ}$ .

Allo stesso modo è importante che la temperatura dell'olio sia tenuta intorno ai  $140^{\circ}\text{C}$  (martempering) e che l'agitazione dell'olio sia uniforme e simmetrica rispetto al posizionamento dei pezzi (sempre dal basso verso l'alto).

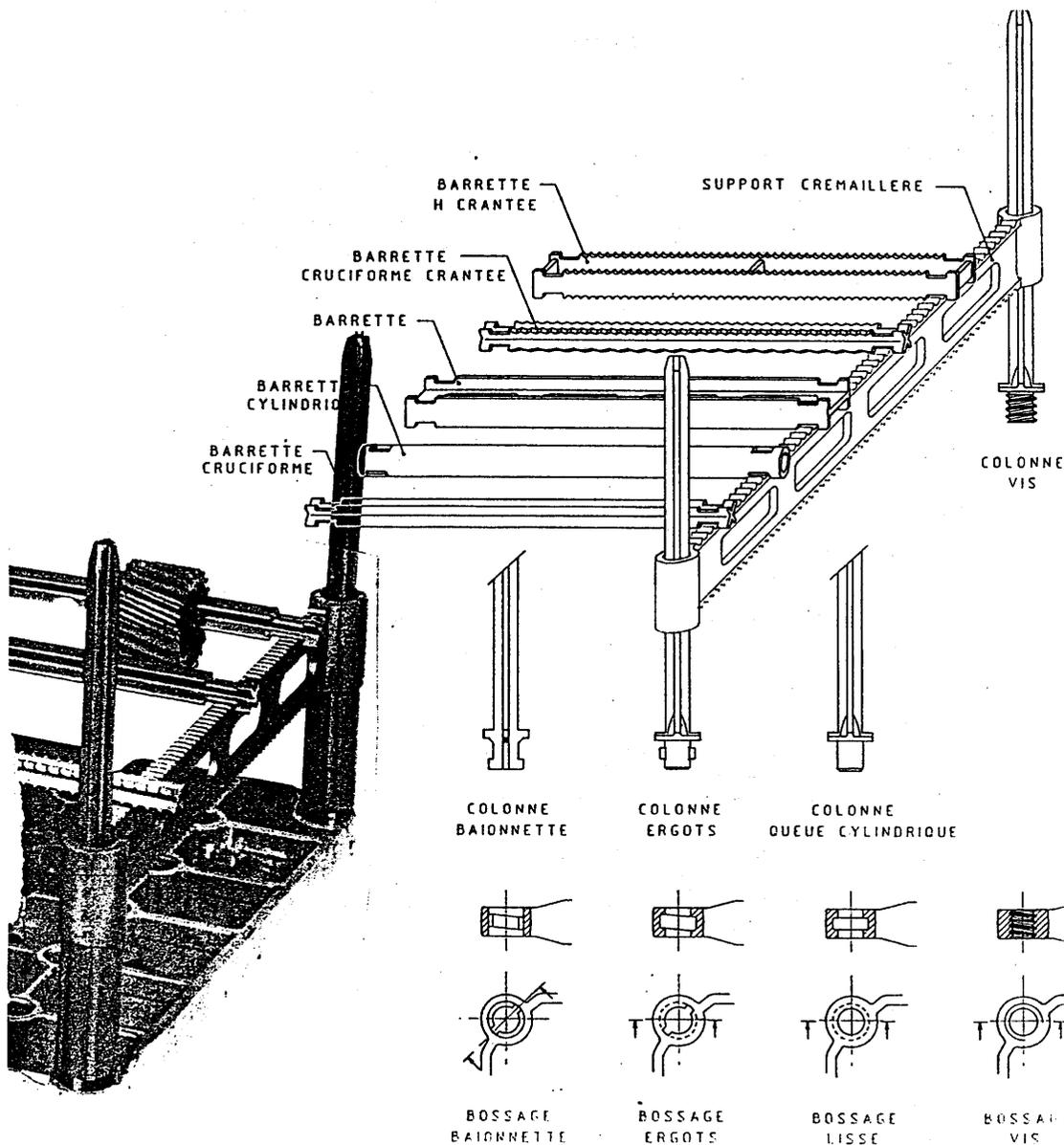


Fig. 39 – Attrezzi per il caricamento delle corone, da cementare e temprare, appese

## RADDRIZZATURA PARTICOLARI COSTRUITI IN ACCIAI PER STAMPI

Non si intende qui parlare di modificare i profili sagomati di punzoni o matrici di imbutitura o trancia, in quanto troppo complicati ed asimmetrici, ma di particolari piani o cilindrici o di forma parallelepipedica come ad es. guide di scorrimento, che hanno comunque sempre un asse di simmetria. In questo caso non si potrà intervenire sulle deformazioni di aumento o contrazione di volume dovute alle trasformazioni di fase microstrutturali, ma sulle deformazioni legate a:

- a) tensioni preesistenti
- b) riscaldi di pezzi non ben sostenuti nel forno
- c) raffreddamenti non simmetrici ed uniformi

In questi casi, oltre alla tecnica già illustrata della tempra alla Gleason, applicata qualche volta alla tempra di anelli per cuscinetti in acciaio 100Cr6, esistono delle forme di raffreddamento controllato in mezzo a stampi oppure tecniche di raddrizzatura sottopressa quando lo stampo non ha ancora subito la totale trasformazione martensitica. ( si trova cioè appena al disotto del punto  $M_f$ .)

### TEMPRA FRA PIASTRE FREDEDE

Il processo può essere eseguito secondo due tecniche diverse in funzione della temprabilità dell'acciaio.

- a) nel caso di acciai autotempranti o con buona temprabilità si possono scaldare i pezzi alla temperatura di austenitizzazione e quindi raffreddarli schiacciati fra due piastroni (se hanno facce piane e parallele) o fra due stampi sagomati con la forma del pezzo da temprare. Nel caso di acciai autotempranti es. UX150CD12, non ci sono problemi di dimensione, nel caso di acciai con buona temprabilità, ma non autotempranti (es. UX200Cr13—U85MV8 ecc) ci sono dei limiti allo spessore temprabile. Questi limiti possono essere parzialmente superati aumentando la temperatura di austenitizzazione fino a ca. 100°C ed aumentando lo spessore delle piastre o degli stampi di raffreddamento che sottraggono così più rapidamente il calore. Se i pezzi da temprare con la tecnica del raffreddamento fra stampi sono molti è necessario prevedere un raffreddamento degli stampi.
- b) Nel caso di acciai poco temprabili (es, 100Cr6—U85MV8 di spess. >10 mm) per i quali la velocità di raffreddamento fra stampi non può essere sufficientemente veloce da superare la velocità critica di tempra, si può fare una tempra in olio interrotta alla temperatura corrispondente ca. al punto  $M_s$ . Si estrae rapidamente il pezzo a questa temperatura e lo si lascia raffreddare schiacciato fra le piastre o gli stampi. In questo secondo caso la pressione da applicare sulle piastre è maggiore che non nel caso a) Questo secondo metodo è meno sicuro ed efficiente del primo ma può comunque a volte risolvere gravi problemi di deformazione, soprattutto se anche il rinvenimento successivo viene fatto con il pezzo schiacciato fra le due piastre.

### RINVENIMENTO FRA PIASTRE O STAMPI

Questo processo consiste nel serrare il pezzo temprato e deformato fra due piastre, se piano, o fra due stampi, se cilindrico o a forma di parallelepipedo, con spessori due o tre volte lo spessore del pezzo da raddrizzare, e nel portarlo alla temperatura di rinvenimento mantenendolo per almeno 1 minuto per ogni mm. di spessore del pezzo più gli stampi.

Prima di serrare il pezzo fra gli stampi è bene eseguire un rinvenimento libero preliminare per evitare la formazione di rotture e cricche, soprattutto se la deformazione è notevole.

I risultati sono soddisfacenti se il rinvenimento può essere fatto a temperature superiori a 400°C.

A temperature inferiori la raddrizzatura non è completa ed occorre aumentare i tempi di permanenza in temperatura.

Prima di liberare il pezzo dallo stampo occorre attendere che si raffreddi a temperatura ambiente.

### RADDRIZZATURA SOTTO PRESSA

E' un'operazione delicata che comporta rischi di rottura.

E' necessario conoscere esattamente il punto Ms dell'acciaio e per avere una buona tranquillità di riuscita occorrerebbe temprarlo in un bagno di sale tenuto a qualche decina di gradi al disotto di tale temperatura. Dopo una permanenza sufficiente a permettere a tutta la massa di raggiungere la temperatura del bagno termale si estrae il pezzo e rapidamente lo si porta sotto una pressa. L'acciaio è ancora prevalentemente austenitico e si raddrizza facilmente. Durante il raffreddamento a temperatura ambiente può ancora "ritornare" cioè deformarsi nuovamente per cui è bene tenerlo obbligato nella forma definitiva usando presse con pistone fisso o bilancieri bloccabili nella posizione voluta.

E' anche possibile fare la tempra in olio ma in questo caso è difficile monitorare la temperatura superficiale del pezzo nell'olio ed anche nel caso in cui si adottino termocoppie a contatto, bisogna ancor sempre mediare le temperature e le permanenze perché il cuore del pezzo avrà sempre una temperatura maggiore della superficie.

La tempra in olio si può adottare se esistono lotti di pezzi uguali per cui è possibile fare la messa a punto dei tempi di spegnimento sacrificando qualche pezzo all'inizio della lavorazione.

Nel successivo rinvenimento i pezzi possono ancora tendere a "ritornare", per cui è bene fare il rinvenimento con i pezzi tenuti da piastre o stampi.

### RADDRIZZATURA CON MARTELLINA E CANNELLO

Sono sconsigliabili per questi tipi di acciai perché provocano cricche e tensioni che possono portare alla rottura immediata o dopo pochissimo tempo di utilizzo dei pezzi.

La tecnica viene usata in casi estremi negli acciai rapidi ed a tale capitolo si rimanda per gli accorgimenti da seguire nel caso in cui si volesse tentare questa strada.



## RADDRIZZATURA DELLE BROCCHE ALLA PRESSA O AL BILANCIERE

Questa tecnica non è applicabile alle lamiere per le quali si deve ricorrere alla tempra sottopiastre. La raddrizzatura delle brocche è complessa e si può suddividere in stadi che corrispondono alle varie fasi del trattamento termico e precisamente:

- A -) la tempra
- B -) il I° rinvenimento
- C -) il II° e III° rinvenimento

A-) Le brocche tonde o piatte dopo austenitizzazione vengono temprate in un bagno termale a 550°C dal quale si estraggono dopo una permanenza tale da omogeneizzare la temperatura, e si lasciano raffreddare all'aria fino a ca. 300-350°C. A questa temperatura si esegue la prima raddrizzatura.

Intorno ai 200°C si esegue una seconda raddrizzatura ed a 150°C ca., si esegue la terza.

In questo stadio la raddrizzatura deve essere fatta intervenendo con la pressa non al centro della broccia ma alle estremità a non più di 200-300 mm. da queste a seconda della lunghezza della broccia. Inoltre bisogna cercare di avere al termine la broccia dritta senza deformazioni dalla parte opposta a quella di partenza.

Se non si riesce in questo intento, anziché lasciare raffreddare la broccia a temperatura ambiente per completare la tempra, la si riscalda di nuovo a 500°C e si ripete il ciclo di raddrizzatura già elencato.

B-) I° rinvenimento. Si esegue a 550-560°C - Quando si estrae la broccia dal bagno di sale si eseguono tre raddrizzate alle stesse temperature già elencate al punto A). Anche in questo caso se la raddrizzatura finale non è soddisfacente anziché lasciare raffreddare la broccia fino a temperatura ambiente la si rimanda a 550°C e si ripetono i tre cicli di raddrizzatura.

Nella raddrizzatura dopo il I° rinvenimento, diversamente da quella dopo tempra, la broccia deve essere deformata di ugual misura dalla parte opposta a quella di partenza.

Anche in questo caso la raddrizzatura deve essere effettuata agendo con la pressa verso le estremità e non al centro della broccia .

C-) II° e III° rinvenimento. Si effettuano a 550-560°C. La broccia va raddrizzata appena uscita dal bagno, cioè a ca. 500°C. Con la pressa si spinge nei punti in cui la broccia è storta e quindi anche al centro e non più solo alle estremità come nei casi A) e B). La broccia deve essere lasciata raffreddare sotto la pressa, deformata dalla parte opposta di un valore circa doppio della deformazione originale rilevata.

Dopo il III° rinvenimento seguito da raddrizzatura la broccia viene lavata e ricontrollata. Se esistono ancora piccole deformazioni eccedenti la tolleranza si può intervenire con la fiamma sulle parti che non hanno taglianti, oppure con la martellina fra un dente e l'altro. Per queste operazioni vedi i paragrafi seguenti.

### RADDRIZZATURA ALLA MARTELLINA

E' un'operazione che si esegue sulle brocche tonde o piatte quando al termine della raddrizzatura a caldo non risultano ancora in tolleranza. La martellina sarà in questo caso costruita in acciaio rapido, temprato e rinvenuto a durezza almeno uguale a quella della broccia da raddrizzare.

Se la zona da raddrizzare è nella parte dentata della broccia, per evitare di dare colpi sui denti si preferisce fissare la martellina con la punta in su, sopra una massa di appoggio, appoggiare la broccia sulla martellina e battere sulla broccia con un martello di rame (vedi fig.40)

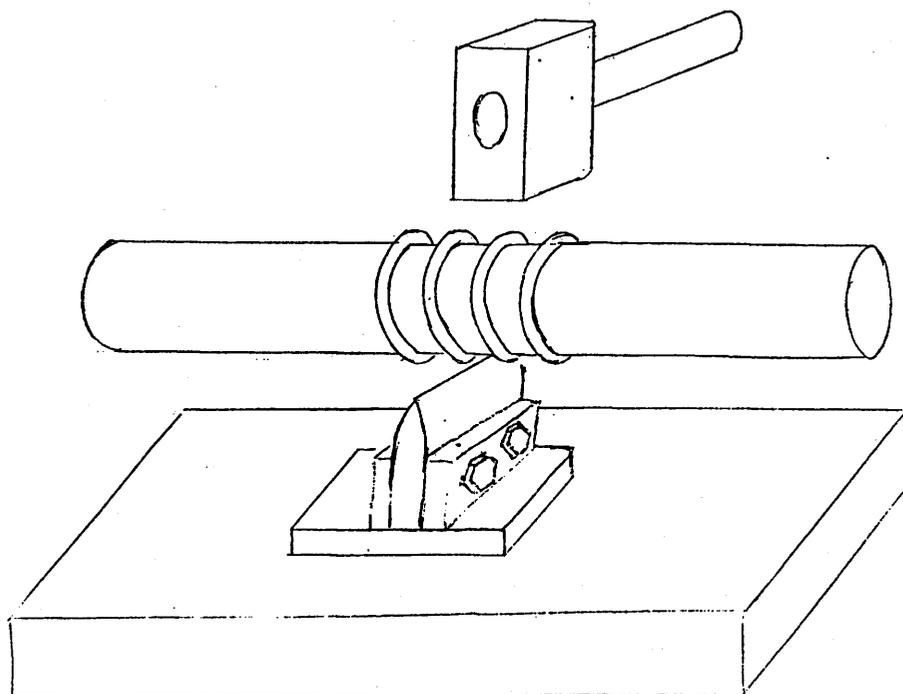


Fig. 40 – Raddrizzatura di brocchie con martellina rovesciata

Durante l'operazione di martellinatura è preferibile dare molti colpi leggeri e uniformi piuttosto che pochi colpi pesanti. L'effetto raddrizzante è più efficace e si corrono meno rischi di cricche nelle zone martellate. La realizzazione di questo sistema può essere meccanizzata usando una macchina come quella rappresentata in fig. 41), che utilizza una specie di martello pneumatico per azionare la martellina.

Un effetto secondario della martellinatura può essere la rottura per distacco delle zone terminali in corrispondenza di una forte variazione di diametro. La rottura può essere provocata da un effetto risonanza della broccia, infatti se si afferrano saldamente con le mani le due estremità durante la martellinatura, smorzando così le vibrazioni, l'effetto si annulla.

Se si rettifica una zona martellinata si ha un ritorno di deformazione dovuto all'asportazione della zona incrudita dalla martellina. Se si effettua prima una distensione si attenua l'effetto del ritorno, ma si corre il rischio di formare cricche nelle zone martellate.

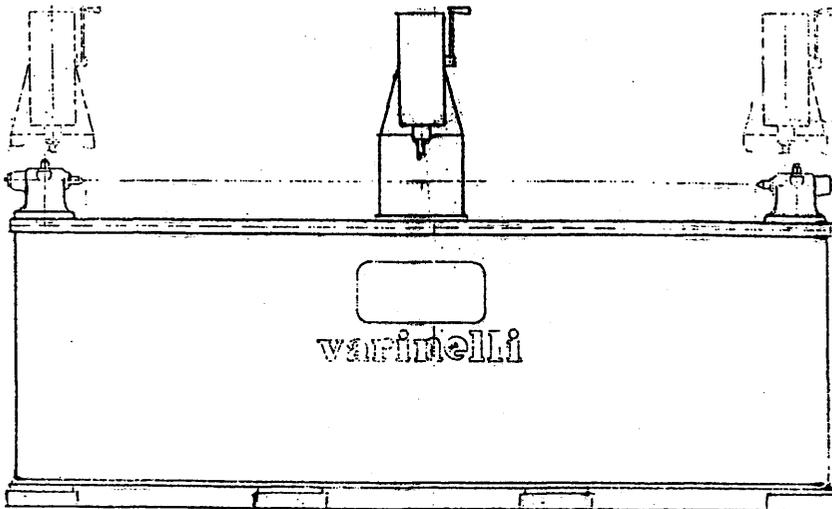


Fig. 41 – Martellinatrice pneumatica per raddrizzare brocche

#### RADDRIZZATURA CON LA FIAMMA

E' la tecnica già descritta nei capitoli precedenti.

E' poco consigliabile per i pericoli di rottura provocati dal riscaldamento e raffreddamento repentini,

La si può fare solo nelle zone che non lavorano perché provoca degli addolcimenti di durezza.

Essendo la trasformazione provocata dal cannello più profonda di quella della martellina la rettifica successiva non provoca quasi ritorni di deformazione.

La distensione dopo raddrizzatura non è necessaria.

## RADDRIZZATURA DI MOLLE

E' abbastanza raro il caso di dover raddrizzare acciai per molle temprati e rinvenuti, o di doverne correggere la forma. Normalmente i particolari vengono temprati sotto pressa, oppure temprati liberi e poi rinvenuti una o più volte impaccettati o tenuti nella forma finale desiderata, fino a raggiungere la tolleranza (vedi capitolo acciai per stampi)

Si ricorre alla pressa solo nel caso di piccole serie per le quali non è giustificabile la costruzione di attrezzature.

Sono decisamente da evitare le tecniche della martellina o del cannelo perché provocano incrudimenti o rinvenimenti tali da ridurre notevolmente il limite di fatica e rendono quindi le molle inutilizzabili.

Nella raddrizzatura alla pressa è praticamente impossibile operare a temperatura ambiente perché il limite di snervamento degli acciai per molle bonificati è assai alto, vicino al carico di rottura, per cui è molto probabile arrivare al limite di rottura prima ancora di essere riusciti ad ottenere le deformazioni desiderate superando il carico di snervamento (vedi fig.42)

Si deve perciò riscaldare i pezzi da raddrizzare alla temperatura di rinvenimento e tentare di raddrizzarli il più rapidamente possibile per evitare che il pezzo si raffreddi.

Occorre quindi avere un forno vicino alla pressa e possibilmente una termocoppia a contatto in modo da poter interrompere la raddrizzatura quando la temperatura scende al disotto dei 300-350°C. Operando a caldo non è necessario fare una stabilizzazione finale sui pezzi raddrizzati.

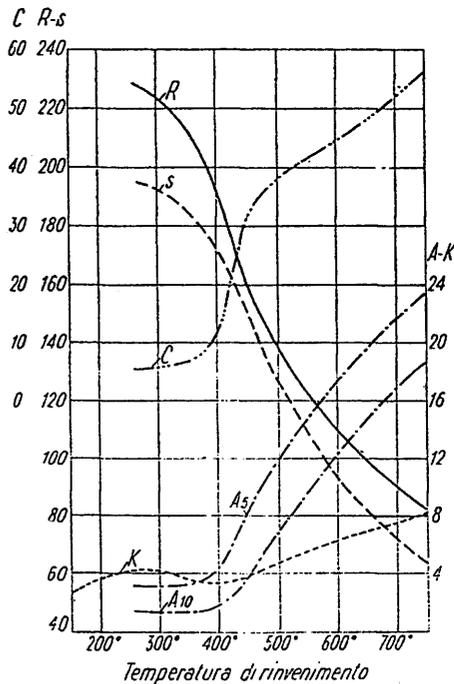


Fig. 42 - Diagramma di rinvenimento di un acciaio contenente:  
0,50% carbonio  
1,00% manganese  
2,00% silicio.  
Prove eseguite su barrette ricavate da barre da mm 20 quadre, temprate in olio da 870° e rinvenute alle temperature indicate.

## RADDRIZZATURA ACCIAI NITRURATI

Può sembrare un controsenso parlare di raddrizzatura di pezzi nitrurati perché in genere si adotta questo trattamento di indurimento proprio nei casi in cui si vogliono evitare le deformazioni (oltre naturalmente per le altre caratteristiche metallurgiche peculiari ottenibili con la nitrurazione).

Le deformazioni si hanno quando il pezzo non è simmetrico, tipico è l'esempio delle cremagliere. Infatti la nitrurazione comporta un aumento di volume dello strato arricchito di azoto e nel caso delle cremagliere la superficie del pezzo dal lato della dentatura è decisamente maggiore di quella opposta e quindi l'aumento di volume sarà più importante e determinerà un incurvamento che rende convessa la cremagliera dal lato della dentatura.

Lo strato nitrurato è durissimo e fragilissimo per la presenza di aghi di nitruri per cui non è assolutamente possibile ricorrere alla martellina, d'altro canto il riscaldamento con il cannello oltre a distruggere la coltre bianca, rinviene la struttura di bonifica dell'acciaio e può provocare lo stacco dello strato nitrurato, per cui le due tecniche non sono utilizzabili.

L'unica strada percorribile è quella di utilizzare la pressa preriscaldando il pezzo a 500°C e operando come nel caso delle molle. Lo strato nitrurato non subirà variazioni di durezza, la coltre bianca non verrà distrutta ed il pericolo di cricche ridotto al minimo.

Sarà bene comunque al termine, controllare l'integrità dei pezzi con i liquidi penetranti o con il metalloscopio.