



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI
SISTEMI INDUSTRIALI

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI
PROCESSI INDUSTRIALI E DEI
MATERIALI

(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Materiali)

STUDIO DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE PER SIMULACRI
DI ANELLI FUCINATI DI 30CrMo4 SOGGETTI A TRATTAMENTO
TERMICO

Relatore: Prof. Andrea Zambon
Correlatore: Ing. David Sartori

Laureando: GIOVANNI PIZZATO

Riassunto

La tesi tratta di uno studio compiuto durante il mio periodo di tirocinio in azienda su simulacri di anelli in 30CrMo4 fucinati e trattati termicamente. Nell'esperienza svolta sono stati ottenuti da 3 anelli di questo acciaio 24 provini che sono stati sottoposti al trattamento di tempra e di rinvenimento, quindi di bonifica; in seguito sono state analizzate le loro proprietà meccaniche in laboratorio. La particolarità di questo studio è che sono stati valutati diversi parametri nella lavorazione che incidono nelle caratteristiche finali dei prodotti. Questi parametri sono stati chiamati fattori. Per ogni fattore di influenza abbiamo preso in considerazione due modalità, per valutare gli effetti di ognuno di essi a seconda della modalità scelta.

Tutti i provini sono stati caratterizzati da una diversa combinazione di modalità di fattori ed ognuno di essi risulta diverso da tutti gli altri per almeno un fattore.

L'obiettivo della tesi è quello di capire quale sia la migliore modalità di ogni fattore allo scopo di ottenere le proprietà meccaniche richieste dal cliente.

Indice

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| CAPITOLO 1 -Presentazione dell'azienda | 3 |
| 1.1 IL FOMAS GROUP..... | 3 |
| 1.2 ASFO..... | 3 |
| CAPITOLO 2 -Il 30CrMo4 | 7 |
| 2.1 IL MATERIALE..... | 7 |
| 2.2 SCOPO DELLA TESI..... | 8 |
| CAPITOLO 3 -I provini utilizzati | 11 |
| 3.1 I BARROTTI..... | 11 |
| 3.2 LA DIFFERENZIAZIONE DEI PROVINI..... | 12 |
| CAPITOLO 4 -Lo svolgimento dei lavori | 15 |
| 4.1 LA FORMAZIONE DEI BARROTTI..... | 15 |
| 4.2 IL TRATTAMENTO DELLA TEMPRA..... | 16 |
| 4.3 IL RINVENIMENTO..... | 19 |
| 4.4 LE PROVE ESEGUITE..... | 21 |
| CAPITOLO 5 -I diversi 30CrMo4 | 23 |
| 5.1 LE COMPOSIZIONI CHIMICHE..... | 23 |
| 5.2 ANALISI DEGLI EFFETTI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE..... | 24 |
| 5.3 COSA CI SI ASPETTA..... | 25 |
| CAPITOLO 6 -La sgrossatura | 27 |
| 6.1 LA SGROSSATURA..... | 27 |
| CAPITOLO 7 -Lo spegnimento nella tempra | 29 |
| 7.1 I DIVERSI TIPI DI RAFFREDDAMENTO..... | 29 |
| 7.2 L'ACQUAQUENCH 352..... | 30 |

| | |
|--|----|
| CAPITOLO 8 -Il rinvenimento | 37 |
| 8.1 IL RINVENIMENTO..... | 37 |
| | |
| CAPITOLO 9 -La prova di trazione | 39 |
| 9.1 LA PROVA DI TRAZIONE..... | 39 |
| 9.2 GRAFICO SFORZO-DEFORMAZIONE, REGIME ELASTICO, PLASTICO, CARICO DI SNERVAMENTO, CARICO DI ROTTURA..... | 40 |
| 9.3 LA PROVA DI TRAZIONE: MODALITA' DI ESECUZIONE..... | 41 |
| 9.3.1 I provini..... | 41 |
| 9.3.2 Gli strumenti utilizzati..... | 42 |
| 9.3.3 La prova | 44 |
| | |
| CAPITOLO 10 -La prova di resilienza | 47 |
| 10.1 LA RESILIENZA..... | 47 |
| 10.2 LA PROVA CHARPY..... | 47 |
| 10.3 L'ESECUZIONE DELLA PROVA..... | 48 |
| 10.4 IL COMPORTAMENTO DEI PROVINI..... | 50 |
| | |
| CAPITOLO 11 -I risultati | 51 |
| 11.1 LE TRAZIONI..... | 51 |
| 11.1.1 Il grafico totale..... | 51 |
| 11.1.2 La sgrossatura..... | 52 |
| 11.1.3 Il mezzo di spegnimento..... | 53 |
| 11.1.4 La composizione..... | 55 |
| 11.1.5 Il comportamento del 30CrMo4..... | 56 |
| 11.2 LE RESILIENZE..... | 56 |
| 11.2.1 Il grafico totale..... | 56 |
| 11.2.2 La composizione..... | 57 |
| 11.2.3 Il mezzo di spegnimento..... | 59 |
| 11.2.4 La sgrossatura..... | 60 |
| | |
| CONCLUSIONI | 61 |
| RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 63 |

Introduzione

La mia attività di tirocinio è stata svolta presso ASFO S.p.a. , un'azienda che ha sede a Chiuppano (VI) che si occupa di laminazione di anelli piani e profilati. Il problema affrontato nella tesi riguarda il 30CrMo4, un acciaio da bonifica, utilizzato in ASFO in 3 diverse varianti, che consistono nella modifica della percentuale di alcuni elementi in tracce. Le 3 varianti della lega sono:

- 30CrMo4 base
- 30CrMo4 con eccesso di Vanadio
- 30CrMo4 con composizioni di Nickel e Manganese superiori a quelle degli altri due.

Il 30CrMo4 è un acciaio da bonifica e in quanto tale l'abbiamo sottoposto al trattamento termico della tempra; siamo intervenuti su diversi parametri di questo trattamento, la cui modifica influenza le caratteristiche meccaniche finali. I diversi parametri sono:

- *La sgrossatura*: solitamente prima del trattamento di tempra i pezzi vengono sgrossati, così da permettere un migliore scambio termico durante il raffreddamento. Sono stati sgrossati solamente metà di essi in modo da poter valutare l'effetto di questo fattore.
- *Il mezzo di spegnimento*: ASFO utilizza due diversi liquidi di spegnimento, l'acqua ed una soluzione di acqua e polimero, l'acquaquench 352. Metà dei provini sono stati temprati in acqua e l'altra metà in acquaquench, così da poter valutare anche in questo caso l'effetto del liquido di raffreddamento.
- *Il rinvenimento*: sono stati effettuati 2 diversi rinvenimenti, uno a 660°C ed uno a 580°C. Come per i fattori precedenti, anche in questo caso i provini sono stati divisi a metà, e ciascuna metà ha subito uno dei due rinvenimenti.

Sono stati forniti 3 anelli, uno per materiale, e da ogni anello sono stati prelevati 8 provini di dimensioni prismatiche. Ognuno di questi provini è stato caratterizzato da una particolare serie di parametri (composizione, sgrossatura, liquido di spegnimento, temperatura di rinvenimento), in modo tale che ogni provino è risultato diverso da tutti gli altri per almeno un parametro.

L'obiettivo della tesi è quello di valutare quale sia la combinazione di parametri più conveniente da

utilizzare per ottenere le caratteristiche meccaniche richieste dal cliente di volta in volta. Sarà poi compito dell'azienda a parità di proprietà meccaniche richieste dal cliente valutare in base ai dati raccolti ed alle osservazioni emerse in questa tesi quale sia la strada più conveniente da percorrere per arrivare a fornire il prodotto nella maniera più economica.

La tesi è composta da 11 capitoli, in cui il primo capitolo è una presentazione dell'azienda ospitante, dal capitolo 2 al capitolo 4 sono riportate le operazioni che sono state svolte ed è descritto il problema nel dettaglio, dal capitolo 5 al capitolo 8 sono presentati i diversi parametri di influenza che abbiamo analizzato, dal capitolo 9 al 10 sono descritte le prove meccaniche che sono state effettuate, ed infine nel capitolo 11 sono riportati i risultati e le considerazioni finali.

Capitolo 1

Presentazione dell'azienda

1.1 Il Fomas group

ASFO S.p.a., l'azienda presso cui ho svolto l'attività di tirocinio, fa parte della sezione “Large rings division” del gruppo Fomas, il quale è formato da sette compagnie:

1. La “Small rings division”, è composta da *Hot roll S.r.l.*, *La Foulerie S.a.S.* e la *Fomas Dalian*
2. La “Open Die Forgings Divisions”, è formata da *Fomas S.p.a.* e *Bay-Forge Ltd*
3. La “Large rings divisions”, di cui fanno parte solamente i due stabilimenti della ASFO S.p.a a Chiuppano (VI) e a Villamarzana (RO).

Il Fomas Group possiede stabilimenti in Italia, Francia, India e Cina e conta più di 1000 persone.

1.2 ASFO

Asfo S.p.a. ha sede a Chiuppano (VI) e da più di 40 anni si occupa principalmente di laminazione circolare di larghi anelli piani e profilati per molteplici e differenti campi di applicazione. L'azienda è stata fondata nel 1969 con lo specifico scopo di produrre anelli laminati in piccola, media e grande scala, sempre con un alto standard di qualità (figura 1.1, 1.2, 1.3).



Figura 1.1



Figura 1.2



Figura 1.3

Figure 1.1, 1.2, 1.3: Esempi di diverse forme e dimensioni di laminati prodotti in ASFO

Lo stabilimento ASFO di Chiuppano possiede un reparto di taglio di lingotti ed un reparto di forgiatura e laminazione. Inoltre sono in dotazione quattro forni ed una linea di trattamenti termici.

Nel 2004 è stato costruito un altro stabilimento presso Villamarzana (RO), che si occupa di diverse operazioni, tra cui lavorazione meccanica con più di 20 macchine utensili. Successivamente, per ampliare la capacità produttiva, nel 2007 è stato aggiunto anche un reparto di fucinatura e trattamento termico. In questo modo Asfo riesce a gestire il prodotto dalle fasi di forgiatura alle lavorazioni e certificazioni finali, al fine di ottimizzare la produzione e dare un servizio completo ai propri clienti.

In ASFO vengono prodotti anelli che vanno da un peso minimo di 100 kg fino a 15000 kg e da un diametro esterno di 220mm a 7000mm. La produzione mensile ammonta a 5000 tonnellate.

Il processo produttivo di ASFO si sviluppa nei seguenti step: acquisto della materia prima sotto forma di lingotto, blumo o colate continue (figura 1.4), taglio (figura 1.5), fucinatura (figura 1.6) seguita da laminazione (figura 1.7) in uno dei due reparti di forgiatura presenti nei due stabilimenti, trattamenti termici di qualità (figura 1.8), e lavorazioni finali intervallate dai più svariati controlli e collaudi.



Figura 1.4 Lingotti forniti ad ASFO



Figura 1.5 Taglio del lingotto



Figura 1.6 Processo di fucinatura



Figura 1.7 Laminazione



Figura 1.8 Trattamento termico di tempra

Tutti i controlli distruttivi e non distruttivi vengono effettuati all'interno dell'azienda dal personale in laboratori specializzati. Oltre ad un laboratorio metallografico l'azienda dispone anche di un laboratorio per prove distruttive.

La varietà dei materiali prodotti da ASFO passa dagli acciai al carbonio, microlegati e legati, acciai induriti per precipitazione, acciai resistenti alle alte temperature, acciai per applicazioni criogeniche, inossidabili, duplex, superleghe a base nichel e leghe di titanio o rame.

Le forme e le dimensioni dei prodotti ASFO sono tra le più svariate, come si può osservare nelle immagini sottostanti.



Figura 1.9 Bearing housing



Figura 1.10 Riser flange



Figura 1.11 Collect connector



Figura 1.12 Collect connector

Capitolo 2

Il 30CrMo4

2.1 Il materiale

Il mio studio presso l'azienda è stato effettuato sul 30CrMo4, un acciaio da bonifica. Per questa lega, a seconda delle richieste del cliente, ASFO utilizza tre diverse varianti, con aggiunte di elementi in tracce per due di essi, rimanendo però sempre all'interno del range di composizione stabilito dalle norme. I 3 diversi acciai sono:

- Il 30CrMo4, che è quello con composizione standard
- Il 30CrMo4VG, che presenta tracce di Vanadio superiori agli altri 2
- Il 30CrMo4 MOD, che contiene percentuali di Ni e Mn maggiori delle altre 2

Questi tre acciai sono stati forniti sotto forma di anelli da tre diverse acciaierie:

- Le *Acciaierie venete S.p.a.* di Padova per quanto riguarda il 30CrMo4 MOD
- Le *Acciaierie Bertoli Safau S.p.a.* di Pozzuolo del Friuli per il 30CrMo4 standard
- La *Trinecke Zelezarny Moravia Steel* di Starè Mesto per il 30CrMo4 VG

Le composizioni delle diverse leghe per quanto riguarda gli elementi principali sono le seguenti:

30CrMo4MOD

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| % | 0,2900 | 0,2810 | 0,7470 | 0,0110 | 0,0060 | 1,1350 | 0,3820 | 0,2250 | 0,0070 |

Tabella 2.1 Composizione 30CrMo4MOD

30CrMo4

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 0,307 | 0,310 | 0,550 | 0,011 | 0,002 | 1,040 | 0,130 | 0,220 | 0,006 |

Tabella 2.2 Composizione 30CrMo4

30CrMo4VG

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 0,310 | 0,300 | 0,630 | 0,015 | 0,009 | 1,070 | 0,030 | 0,218 | 0,038 |

Tabella 2.3 Composizione 30CrMo4VG

Il 30CrMo4 da noi studiato è utilizzato dai clienti per componenti di piattaforme di estrazione di petrolio offshore. Una azienda che utilizza questa lega per produrre diversi pezzi è la Cameron S.p.a. , alla quale ASFO fornisce gli anelli trattati e che lavora per ottenere prodotti come quello rappresentato in figura 2.1 :

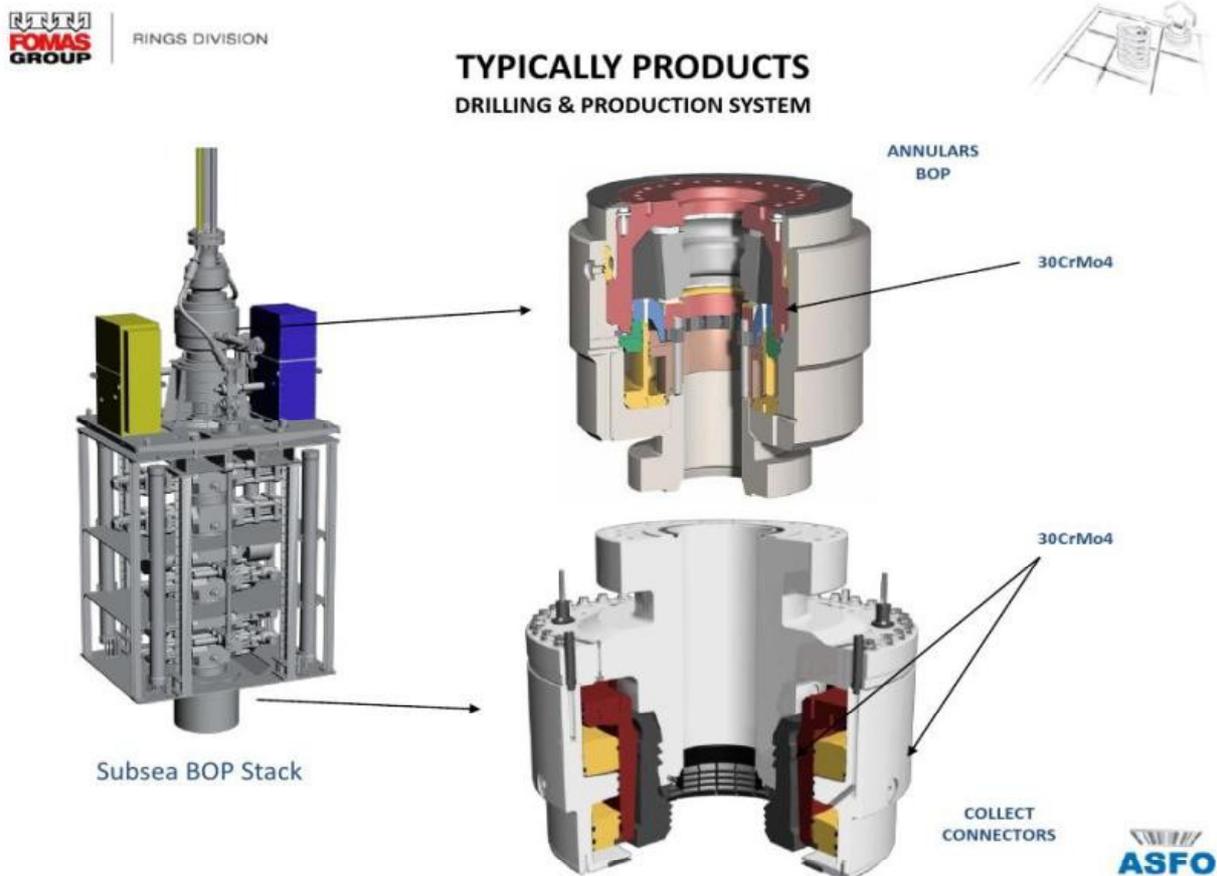


Figura 2.1 Applicazione del 30CrMo4

2.2 Lo scopo della tesi

I clienti di ASFO richiedono a quest'ultima diversi forgiati di 30CrMo4 con determinate caratteristiche meccaniche, necessarie per l'utilizzo del pezzo che intendono realizzare.

Essendo un acciaio da bonifica il 30CrMo4 è soggetto al trattamento termico di tempra e rinvenimento. Modificando alcuni parametri di questo trattamento si riescono ad ottenere importanti cambiamenti nelle caratteristiche meccaniche finali. Chiameremo fattori questi parametri da modificare. Il primo fattore è dunque la composizione, che a causa della presenza di differenti elementi in tracce potrebbe incidere sui valori finali. Il secondo fattore è la sgrossatura: i pezzi da sottoporre al trattamento termico solitamente vengono sgrassati per permettere un migliore scambio termico tra liquido e pezzo austenitizzato nel raffreddamento della tempra; un diverso coefficiente di scambio termico tra pezzi sgrassati e non sgrassati potrebbe portare a valori di molto diversi, specialmente in pelle, poiché essendo più vicini alla sorgente di raffreddamento l'effetto della superficie decarburata come barriera nella scambio termico è maggiore. Un altro fattore da tenere in conto è il mezzo di spegnimento dopo l'austenitizzazione che precede tempra, che in ASFO viene effettuato in acqua o in acquaquench. L'ultimo, ma forse più importante fattore di incidenza è la temperatura di rinvenimento, che ha importanza notevole nelle caratteristiche meccaniche finali. Nel mio studio mi propongo di indagare gli effetti combinati di questi diversi fattori per capire quale combinazione di essi sia più opportuno utilizzare per ottenere determinate caratteristiche meccaniche. Chiaramente la scelta finale sarà fatta in base alla convenienza per l'azienda, economicamente parlando.

Capitolo 3

I provini utilizzati

3.1 I barrotti

Ad ASFO sono stati forniti tre anelli in 30CrMo4 di composizioni differenti: uno in 30CrMo4 base, uno in 30CrMo4MOD e uno in 30CrMo4VG. Da ognuno di essi sono stati ricavati 8 “barrotti”, che sono dei parallelepipedi di dimensioni 120 mm x 120 mm x 300 mm. Il perchè dell'utilizzo di questi simulacri di anelli invece che gli anelli stessi sta principalmente in tre motivazioni:

1. L'anello fornito, grazie alla sua ampia circonferenza può essere assimilato ad una trave infinita, sia per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, sia per quanto riguarda la modalità trasferimento di calore, che in entrambe i casi avviene radialmente. Le caratteristiche osservate per il barrotto sono quindi adeguate a rappresentare quelle dell'anello.
2. I barrotti di piccole dimensioni occupano certamente meno spazio in acciaieria rispetto ad anelli veri e propri, quindi ASFO ha potuto più facilmente eseguire tutte le operazioni da noi richieste, anche a distanza di tempo, potendo tenere i parallelepipedi in azienda.
3. Da un singolo anello si riescono a ricavare 8 barrotti, il che risulta molto meno costoso che procurarsi da fornitori 24 anelli.

Dai tre anelli si sono dunque ricavati i 24 barrotti, 8 per ogni anello.

In figura 3.1 sono rappresentati 12 di essi, appena terminato il trattamento di tempra.



Figura 3.1 12 barrotti terminato il processo di tempra

3.2 La differenziazione dei provini

Sono stati predisposti 24 barrotti per poter eseguire uno studio accurato sui fattori che potevano incidere sui valori finali delle caratteristiche meccaniche. Essendo 24 siamo riusciti a lavorare ogni barrotto con una determinata sequenza di fattori, in modo tale che tutti i barrotti sono stati trattati almeno per un fattore diversamente tra di loro e che tutte le combinazioni sono state effettuate. Per fare questo abbiamo dovuto prelevare 8 barrotti da ogni anello. Di tutti i 24 barrotti dall'1 al 4 e dal 13 al 16 sono in 30CrMo4MOD, dal 5 all'8 e dal 17 al 20 sono in 30CrMo4 base, e dal 9 al 12 e dal 21 al 24 sono in 30CrMo4VG. Dall'1 al 12 sono sgrassati, dal 13 al 24 sono grezzi. A coppie alterne sono stati temprati in acqua e in polimero (1,2acqua-3,4polimero-5,6acqua-7,8polimero....). Infine i dispari sono stati rinvenuti a 660°C e i pari a 580°C.

In tabella 3.1 sono rappresentati i barrotti con i loro fattori di differenziazione.

| Provino | Materiale | Sgrossatura | Spegnimento | Rinvenimento |
|---------|------------|-------------|---------------|--------------|
| 1 | 30CrMo4MOD | Sgrossato | Acqua | 660°C |
| 2 | 30CrMo4MOD | Sgrossato | Acqua | 580°C |
| 3 | 30CrMo4MOD | Sgrossato | Acquaquenench | 660°C |
| 4 | 30CrMo4MOD | Sgrossato | Acquaquenench | 580°C |
| 5 | 30CrMo4 | Sgrossato | Acqua | 660°C |
| 6 | 30CrMo4 | Sgrossato | Acqua | 580°C |
| 7 | 30CrMo4 | Sgrossato | Acquaquenench | 660°C |
| 8 | 30CrMo4 | Sgrossato | Acquaquenench | 580°C |
| 9 | 30CrMo4VG | Sgrossato | Acqua | 660°C |
| 10 | 30CrMo4VG | Sgrossato | Acqua | 580°C |
| 11 | 30CrMo4VG | Sgrossato | Acquaquenench | 660°C |
| 12 | 30CrMo4VG | Sgrossato | Acquaquenench | 580°C |
| 13 | 30CrMo4MOD | Grezzo | Acqua | 660°C |
| 14 | 30CrMo4MOD | Grezzo | Acqua | 580°C |
| 15 | 30CrMo4MOD | Grezzo | Acquaquenench | 660°C |
| 16 | 30CrMo4MOD | Grezzo | Acquaquenench | 580°C |
| 17 | 30CrMo4 | Grezzo | Acqua | 660°C |
| 18 | 30CrMo4 | Grezzo | Acqua | 580°C |
| 19 | 30CrMo4 | Grezzo | Acquaquenench | 660°C |
| 20 | 30CrMo4 | Grezzo | Acquaquenench | 580°C |
| 21 | 30CrMo4VG | Grezzo | Acqua | 660°C |
| 22 | 30CrMo4VG | Grezzo | Acqua | 580°C |
| 23 | 30CrMo4VG | Grezzo | Acquaquenench | 660°C |
| 24 | 30CrMo4VG | Grezzo | Acquaquenench | 580°C |

Tabella 3.1 La caratterizzazione dei barrotti

Capitolo 4

Lo svolgimento dei lavori

4.1 La formazione dei barrotti

Arrivati i tre anelli di diversa composizione è cominciata la lavorazione per ottenere i barrotti. Tramite sega sono stati ottenuti da ogni anello 8 barrotti di dimensioni 120 mm x 120 mm x 300 mm presi longitudinalmente sulla circonferenza, in modo tale che le loro caratteristiche meccaniche fossero rapportabili a quelle degli anelli. Di questi provini la prima metà è stata sgrassata con la sega, la seconda metà invece è stata lasciata grezza. Per levare lo strato grezzo decarburato e ricco di ossidi è stato sufficiente togliere 2mm di spessore, in quanto sperimentalmente è noto che la decarburazione nel processo di forgiatura per questo acciaio arriva a circa 1,5mm di profondità. La differenza tra le superfici dei barrotti la si nota in figura 4.1 (gli sgrassati sono i numeri 1,2,5,6,9,10) nonostante tutti possiedano in superficie una parte di wustite, uno strato particolare di ossido di ferro di formula bruta FeO , formatosi con la tempra.



Figura 4.1 Il bancale dei barrotti temprati in acqua, contenente metà barrotti grezzi e metà sgrassati

4.2 Il trattamento termico della tempra

Poiché il 30CrMo4 è un acciaio da bonifica, per conferirgli caratteristiche meccaniche valide è necessario sottoporlo al trattamento di tempra. La tempra è quel trattamento termico che, per soppressione di una trasformazione eutectoidica, conduce allo stato di martensite per raffreddamento continuo. Secondo le norme UNI essa si svolge eseguendo “*un riscaldamento ad una temperatura superiore ad A_{r3} per gli acciai ipoeutetoidici e ad A_{cm} per quelli ipereutetoidici; la permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente a ottenere, nelle zone interessate l'equilibrio della struttura; il successivo raffreddamento fino a temperatura ambiente con velocità superiore a quella critica di tempra*” (figure 4.2-4.3).

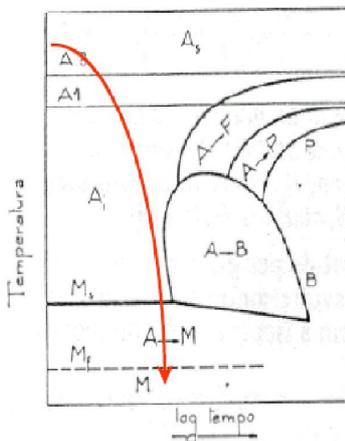


Figura 4.2 Il raffreddamento della tempra



Figura 4.3 Il trattamento di tempra

Nel nostro caso, di un acciaio ipoeutetoidico, la temperatura di riferimento è A_{c3} , che vale circa 800°C . Questo trattamento viene eseguito per formare microstrutturalmente la martensite, che conferisce al materiale importanti proprietà di durezza e di resistenza. Nel nostro lavoro abbiamo naturalmente condotto il trattamento termico secondo la norma, per cui abbiamo agito in questo modo: i barrotti sono stati divisi in 2 gruppi, collocati in 2 diversi bancali. Abbiamo austenitizzato tutti i barrotti ad una T di 880°C per un tempo di tre ore (figura 4.4), dopo di che sono stati estratti dal forno mediante un muletto attrezzato con forche (figura 4.5) ed appoggiati su di una grata metallica soprastante la vasca di spegnimento (4.6). Nella nostra esperienza abbiamo utilizzato come mezzi di spegnimento l'acqua (figura 4.8) e una miscela di acqua e polimero (figura 4.7),

l'acqua quenched 352. Il primo bancale è stato spento in acqua, mentre il secondo bancale in acqua quenched. Appena appoggiati i bancali con i rispettivi barrotti caricati sopra, le 2 grate sono scese fino in fondo alla vasca sommergendo tutti i barrotti.

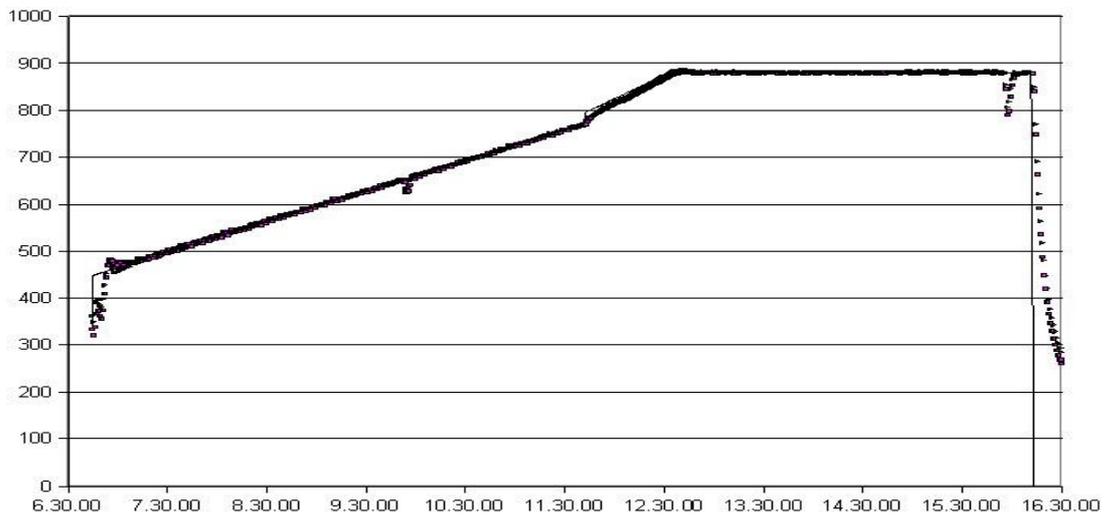


Figura 4.4 L'andamento della temperatura del forno da tempra

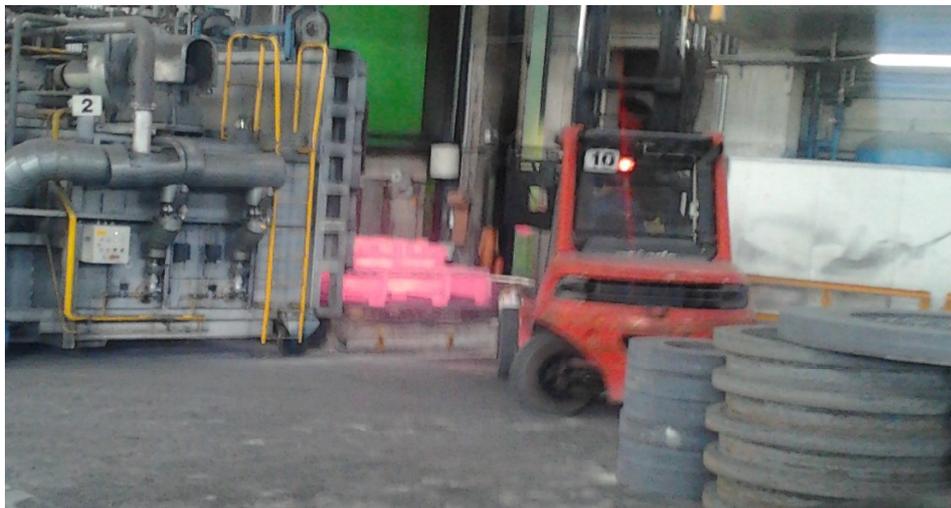


Figura 4.5 Estrazione del bancale dal forno



Figura 4.6 Bancale di austenitizzati appena prima di essere immersi nella vasca di spegnimento

Naturalmente queste operazioni sono state effettuate con grande velocità, per evitare che ancora prima del contatto con il fluido refrigerante diminuisse di troppo la temperatura dei pezzi estratti dal forno e si entrasse nel “naso perlitico” dei diagrammi CCT. Per quanto riguarda il bancale temprato in acqua, è uscito dal forno ad una temperatura di 880°C ed è entrato in vasca ad una T di 847°C . Il bancale temprato in acquaquench invece è uscito dal forno ad una temperatura di 878°C ed è entrato in vasca a 842°C . Le temperature sono state misurate tramite pirometro, uno strumento che, puntato contro una sorgente di calore, riesce a ricavare la sua temperatura dalle radiazioni infrarosse che emette. I tempi di estrazione dal forno e di trasporto si sono aggirati attorno a 1'10", in cui 30" sono stati utilizzati per l'apertura del forno. La permanenza nel liquido, secondo regole sperimentali, è stata fissata 1' ogni 10 mm di spessore. I barrotti temprati in acqua dopo 13' sono stati estratti dalla vasca e possedevano $T=30^{\circ}\text{C}$, mentre quelli in polimero dopo 20' avevano $T=22^{\circ}\text{C}$.



Figura 4.7 Vasca con spegnimento in acquaquench



Figura 4.8 Vasca di spegnimento contenente acqua

Poiché il raffreddamento deve avvenire a temperatura ambiente la temperatura delle due vasche è sempre stata monitorata tramite termocoppie dando i risultati in figura 4.9.

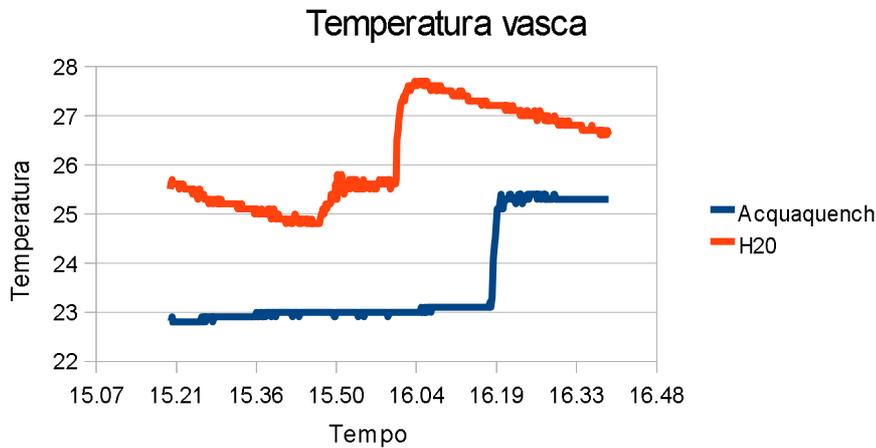


Figura 4.9 Diagramma rappresentante le temperature delle due vasche di spegnimento

Come si nota dal grafico 4.9 la temperatura di entrambe le vasche ha un innalzamento in prossimità dell'immersione del rispettivo bancale, ma grazie al grande volume di liquido contenuto nella vasca questo aumento di temperatura non è mai stato superiore ai 2 gradi.

4.3 Il rinvenimento

L'acciaio temprato però non avrebbe trovato possibilità di impiego a causa della fragilità che caratterizza la martensite. Era necessario quindi conferire una stabile tenacità alla struttura mediante riscaldamento ad una temperatura compresa tra 150° e 660°. Il riscaldamento a queste temperature provoca la trasformazione della martensite in strutture più stabili che sono più tenaci di quelle di partenza. Questo trattamento si chiama rinvenimento. L'insieme di tempra e rinvenimento prende il nome di bonifica. I rinvenimenti sono stati eseguiti a temperature diverse: i barrotti dispari sono stati rinvenuti a 660°C, i pari a 580°C. Come si può vedere dalle figure 4.10 e 4.11, entrambe i rinvenimenti sono stati mantenuti per 5 ore .

Diagramma del rinvenimento a 580°C

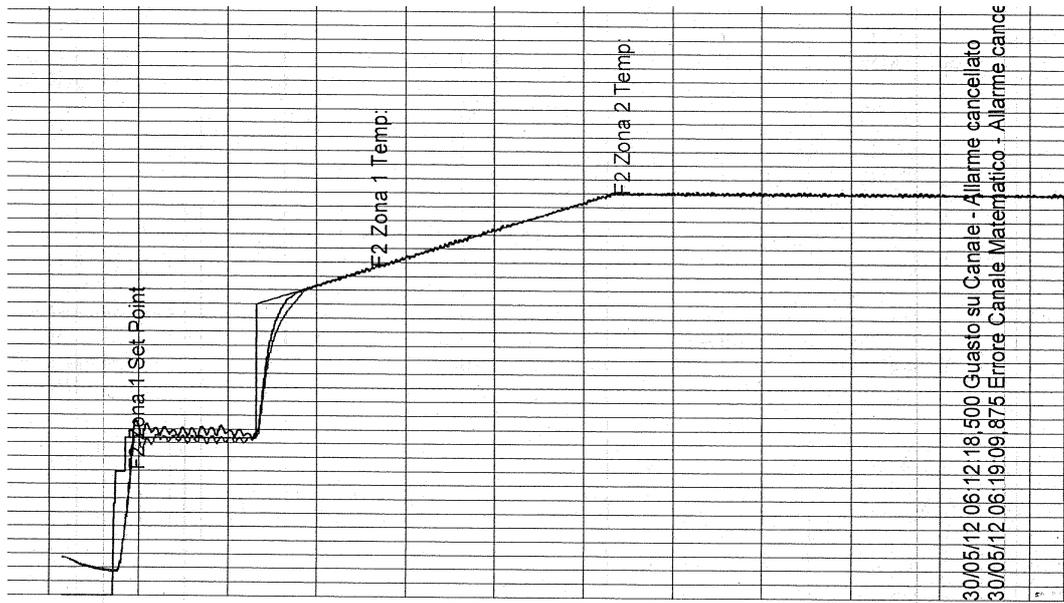


Figura 4.10 Diagramma della temperatura del forno durante il processo di rinvenimento a 580°C

Diagramma del rinvenimento a 660°C

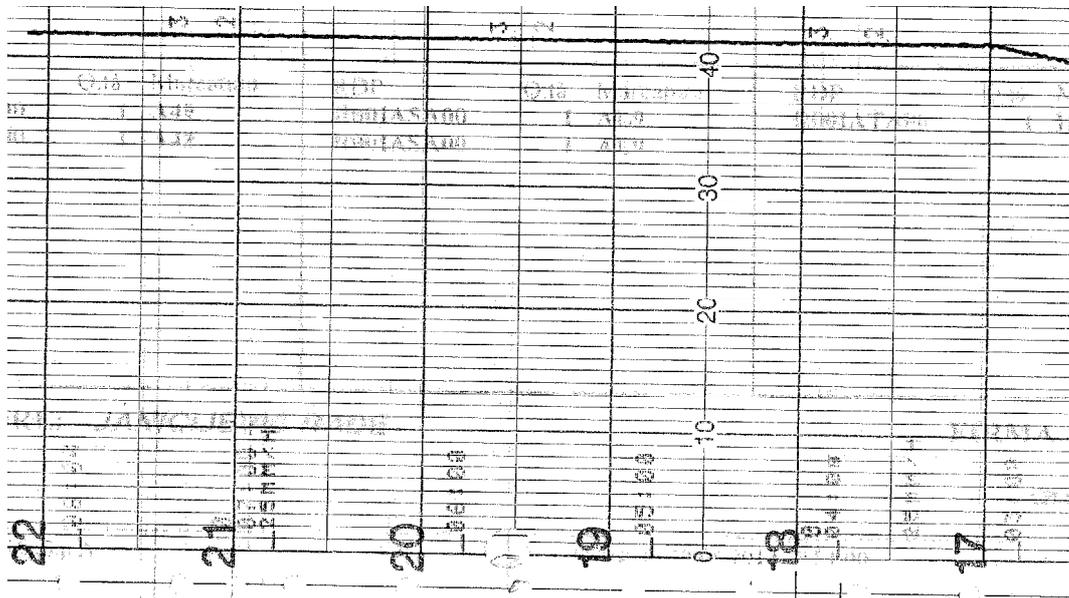


Figura 4.11 Diagramma della temperatura del forno durante il processo di rinvenimento a 660°C

4.4 Le prove eseguite

Una volta completate tutte le operazioni di caratterizzazione dei barrotti sopra descritte sono state eseguite delle prove per verificare le caratteristiche meccaniche. Siamo andati ad indagare se le nostre previsioni sull'incidenza dei fattori si erano rivelate esatte o se qualcosa non era stato previsto. Per fare questo sono state effettuate innanzitutto prove di durezza Brinell nella superficie di ogni barrotto: per ognuno di essi è stato misurato un valore nello spigolo e uno nel centro. Successivamente, dopo che i barrotti sono stati tagliati per ottenere da essi i provini delle trazioni e delle resilienze sono state effettuate delle misure di durezza Vickers a pelle e a cuore della sezione del barrotto e, per tre di essi, è stato eseguito un profilo. Da ogni barrotto sono stati ricavati 2 provini di trazione: uno a pelle e uno a cuore. Per quanto riguarda invece i provini della resilienza, ne sono stati ricavati 6 per ogni barrotto: 3 a pelle e 3 a cuore per ognuno di essi, come da normativa (figura 4.12).



Figura 4.12 I provini delle prove meccaniche: sulla destra quelli relativi alla prova di trazione, mentre sulla sinistra quelli della prova di resilienza

Come ultima prova è stata eseguita su tutti i pezzi dispari (poichè non eravamo interessati a conoscere l'effetto del rinvenimento) un'analisi metallografica. Per fare questa abbiamo utilizzato un lato dei provini delle resilienze rotti. Li abbiamo lucidati prima con dischi di carta smeriglia a granulometria decrescente, poi con panni, per ottenere una superficie priva di segni (figura 4.14), e mediante microscopio ottico abbiamo studiato la metallografia dei provini (figura 4.13).



Figura 4.13 Osservazione al microscopio ottico



Figura 4.14 Provini lucidati per l'osservazione con microscopio

Capitolo 5

I diversi 30CrMo4

5.1 Le composizioni chimiche

I tre materiali oggetto di studio, per quanto riguarda gli elementi in tracce, differiscono tra di loro per piccole percentuali di alcuni di essi, che modificano talvolta anche notevolmente le proprietà meccaniche del prodotto finito.

| | <i>30CrMo4MOD</i> | <i>30CrMo4</i> | <i>30CrMo4VG</i> |
|-----------|-------------------|----------------|------------------|
| <i>C</i> | 0,2900 | 0,307 | 0,31 |
| <i>Si</i> | 0,2810 | 0,31 | 0,3 |
| <i>Mn</i> | 0,7470 | 0,55 | 0,63 |
| <i>P</i> | 0,0110 | 0,011 | 0,15 |
| <i>S</i> | 0,0060 | 0,002 | 0,009 |
| <i>Cu</i> | 0,2060 | 0,17 | 0,04 |
| <i>Cr</i> | 1,1350 | 1,04 | 1,07 |
| <i>Ni</i> | 0,3820 | 0,13 | 0,03 |
| <i>Ca</i> | 0,0007 | 0,0016 | |
| <i>Al</i> | 0,0340 | 0,030 | 0,032 |
| <i>Ti</i> | 0,0030 | 0,0105 | 0,0016 |
| <i>Mo</i> | 0,2250 | 0,22 | 0,218 |
| <i>V</i> | 0,0070 | 0,006 | 0,038 |

Tabella 5.1 Confronto tra le composizioni chimiche degli acciai

Dal confronto tra le composizioni in tabella 5.1 si osserva che il 30CrMo4MOD possiede percentuali di Ni e di Mn abbondantemente superiori di quelle degli altri due. Si nota anche che il 30CrMo4VG contiene una percentuale di Vanadio anche decine di volte maggiore degli altri. Per tutti gli altri elementi si ha più o meno uguaglianza di valori e non siamo stati interessati a valutare la leggera oscillazione di alcuni di essi.

5.2 Gli effetti degli elementi in tracce

Nonostante la percentuale degli elementi di caratterizzazione varino in maniera apparentemente ininfluenza da un materiale all'altro, poichè per questi elementi è sufficiente una minima variazione per influenzare di molto le proprietà meccaniche del materiale, analizziamo l'effetto del Manganese, del Nickel, e del Vanadio presenti in tracce.

Manganese:

Ha una spiccata azione gammagena che provoca un sensibile abbassamento di A_{r3} e quindi un forte miglioramento della penetrazione di tempra con diminuzione della velocità critica di tempra (tempra bene anche in polimero) e delle tensioni. Il Manganese provoca un rilevante aumento delle caratteristiche di resistenza, di tenacità e resilienza.

Nickel:

Anch'esso esercita un'azione gammagena che provoca una diminuzione della temperatura di austenitizzazione in vista degli ordinari trattamenti termici. Provoca una diminuzione della velocità critica di tempra e quindi permette lo spegnimento in mezzi meno energici, riducendo il pericolo di tensioni interne, deformazioni e cricche; ne consegue un aumento della penetrazione di tempra in misura notevole se è in presenza di Cromo. Migliorano le caratteristiche di resistenza e di duttilità, col che l'acciaio diventa più tenace, soprattutto se bonificato. Aumenta anche la resilienza.

Vanadio:

Il Vanadio è un potente elemento alfaceno. L'influenza principale del Vanadio negli acciai deriva dalla sua azione carburigena, con formazione di carburi del tipo VC di difficile dissoluzione nell'austenite. Ciò da un lato rende difficoltoso l'ottenimento di una buona temprabilità, dall'altro promuove un notevole affinamento del grano cristallino. Comporta inoltre un sensibile miglioramento delle caratteristiche meccaniche di resistenza.

5.3 Cosa ci si aspetta

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche di carico di rottura, di carico di snervamento e di durezza ci si aspetta che il 30CrMo4MOD sia migliore degli altri. E' infatti modificato con Manganese e Nickel, entrambi elementi con forte azione gammagena e quindi promotori di un'ottima temprabilità. Il 30CrMo4MOD inoltre reagisce molto bene anche alla tempra in acquaquenched, mezzo meno drastico dell'acqua, poiché è fortemente abbassata la velocità critica di tempra. Ci si aspetta che le sue caratteristiche meccaniche siano superiori a quelle degli altri 2, anche di parecchi punti.

Il 30CrMo4VG dovrebbe risultare migliore del 30CrMo4 base per quanto riguarda le prove di resistenza. Il Vanadio infatti è un affinatore di grano e questo dovrebbe comportare un rafforzamento del materiale. Infatti se esistono grani molto piccoli necessariamente ci devono essere molti bordi di grano, i quali impediscono il movimento delle dislocazioni rinforzando il materiale. Inoltre, poiché la struttura dei grani adiacenti differisce nell'orientazione, è richiesta più energia ad una dislocazione per muoversi nel grano vicino poiché deve anche cambiare direzione. L'impedimento di questo movimento delle dislocazioni ritarderà il sopraggiungere delle deformazioni plastiche ed incrementerà la tensione di snervamento del materiale.

In terzo luogo, risultando più brevi i percorsi di diffusione, ne dovrebbe conseguire a parità di altri fattori un benefico effetto sulle estensioni e sull'entità delle segregazioni minori.

Ci aspettiamo quindi in linea generale che il 30CrMo4MOD abbia le caratteristiche migliori, poi il 30CrMo4VG e infine il 30CrMo4 base.

Capitolo 6

La sgrassatura

6.1 La sgrassatura

Prima del processo della tempra solitamente ASFO esegue una sgrassatura dei pezzi, che consiste nella asportazione dello strato superficiale decarburato e ricco di ossidi. Infatti quando un acciaio si trova ad alta temperatura a contatto con determinate atmosfere avviene la decarburazione, che è il processo involontario ed indesiderato di rimozione del carbonio dalla superficie. Essa dipende dalla composizione dell'atmosfera attorno al pezzo ed in particolare dal tenore di CO e CO₂.

La reazione di decarburazione è la seguente: $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$, quindi se l'atmosfera attorno al pezzo è ricca di anidride carbonica (CO₂), questo si decarbura.

Nel nostro caso la parte decarburata da togliere è stata fissata a 2mm, ed è stato adottato tale valore in quanto è noto che per il 30CrMo4 la profondità di questo strato che si forma con la forgiatura è di circa 1,5mm. Per motivi economici e tempistici la sgrassatura è stata effettuata mediante sega, e non con fresa o tornio come viene compiuta di solito.

In figura 6.1 possiamo notare la differenza tra due barrotti con identica combinazione di fattori (sono entrambi in 30CrMo4MOD, temprati in acqua e rinvenuti a 660°C), meno che quello riguardante la sgrassatura.



Figura 6.1 Confronto tra un barrotto sgrossato (1) con uno grezzo (13)

Questa operazione promuove per i pezzi sgrossati un maggiore coefficiente di scambio termico ed una superiore temprabilità. Lo strato da sgrossare infatti durante il raffreddamento nel mezzo di spegnimento esercita il ruolo di “mantello” e funge da ostacolo al raffreddamento delle parti interne. Oltre ad esercitare il ruolo di barriera fisica alla trasmissione di calore (dal pezzo al liquido considerando lo spegnimento), lo strato grezzo possiede anche una chimica caratterizzata da minore coefficiente di scambio termico, infatti quest'ultimo per gli ossidi e per lo strato decarburato è certamente inferiore a quello dell'acciaio. Si è voluta compiere questa verifica per valutare se esiste una variazione o meno nelle caratteristiche meccaniche a seconda che i pezzi siano sgrossati o no, poichè l'azienda avrebbe un vantaggio tempistico nel non eseguire la sgrossatura prima della tempra, ma successivamente, assieme alle lavorazioni meccaniche a posteriori.

Capitolo 7

Lo spegnimento nella tempra

7.1 I diversi tipi di raffreddamento

Nel trattamento termico della tempra, dopo aver portato all'austenitizzazione il pezzo in forno, per far sì che avvenga la trasformazione martensitica e non perlitica è necessario compiere il raffreddamento in maniera rapida, in modo da non entrare nel “naso perlitico” e riuscire ad ottenere la minor quantità possibile di perlite o bainite (figura 7.1). Per fare questo è necessario ricercare un mezzo di raffreddamento con ottima capacità di sottrazione del calore, in modo tale che la velocità di raffreddamento risulti elevata e che la profondità di tempra sia la migliore possibile. Agendo in questo modo si dovrebbe riuscire ad ottenere una buona percentuale di martensite non solo in pelle ma anche a cuore, dove la penetrazione di tempra risulta più difficile.

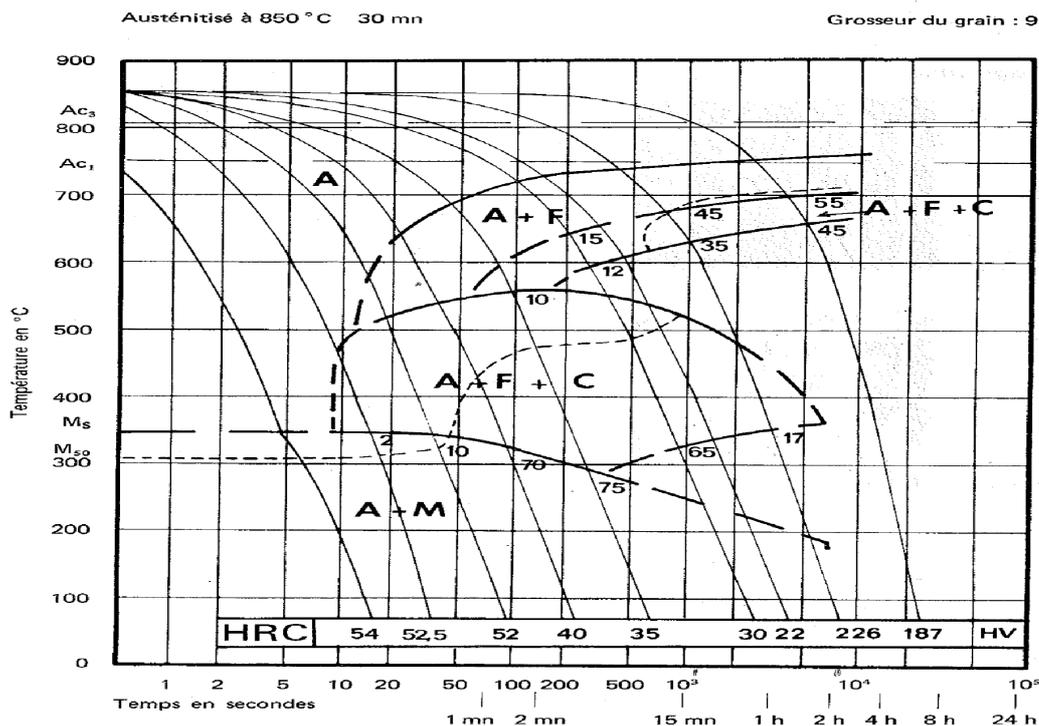


Figura 7.1 Diagramma CCT per il 30CrMo4

La scelta del liquido però, è sempre più condizionata non solo dalle capacità di raffreddamento intrinseche del mezzo, ma prima di tutto dalla necessità di contenimento delle deformazioni, in secondo luogo dalla salvaguardia ambientale, ed ultimo, ma non meno importante, dalla

disponibilità e prezzo. Infatti, riferendosi alla figura 7.2, verrebbe spontaneo dire che il liquido più conveniente da utilizzare sia l'acqua o addirittura l'acqua salata, in quanto la velocità di raffreddamento è evidentemente più alta. Questo è vero, ma non per tutti gli acciai. Per il 30CrMo4 infatti, a causa dell'elevata drasticità dell'acqua esiste il problema della rottura del pezzo, per cui si utilizzano anche altri mezzi di spegnimento. Certamente l'acqua è il mezzo con più alta velocità di raffreddamento, ma la rottura del pezzo a causa della drasticità di raffreddamento è un rischio che l'azienda non può correre. Per questo da parecchi anni ASFO oltre all'acqua utilizza anche una miscela di acqua e polimero, l'acquaquench 352. Gli olii non sono considerati a causa di molti svantaggi che non sussistono utilizzando l'acqua e l'acquaquench.

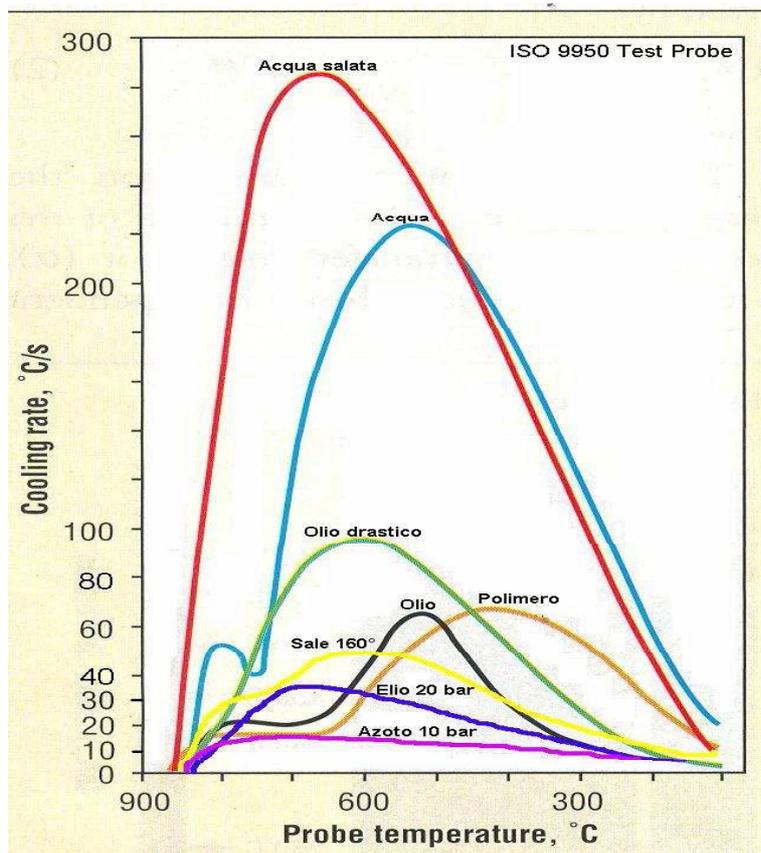


Figura 7.2 Velocità di raffreddamento per diversi mezzi di spegnimento

7.2 L'acquaquench 352

L'acquaquench 352 è una soluzione di acqua e polimero a base di polialchilenglicoli, sostanze organiche ad alto peso molecolare solubili in acqua a temperatura ambiente. Il suo impiego abbassa la velocità di raffreddamento rispetto all'acqua diminuendo le deformazioni e le tensioni dopo

tempra. L'acquaquench 352 da noi utilizzato infatti è un mezzo di spegnimento notevolmente meno drastico dell'acqua, inoltre consente di mantenere buone condizioni ambientali, di abbassare i costi di produzione e di variare la velocità di tempra secondo necessità cambiando la concentrazione del polimero nella soluzione.



Figura 7.3 Acquaquench 352

Esso possiede inoltre una proprietà importante, che è il suo metodo di sottrazione del calore. Per l'acqua infatti il meccanismo di raffreddamento è il seguente:

- A temperature alte il liquido a contatto con la superficie calda evapora e forma uno strato di vapore che isola termicamente il pezzo caldo rallentando di molto la velocità di raffreddamento.
- Quando la temperatura si abbassa lo strato di vapore perde la continuità e si trasforma in tante bollicine che si staccano subito dalla superficie e portano la velocità di scambio a dei valori molto alti.
- Quando la temperatura della superficie del solido scende al di sotto del punto di ebollizione del liquido lo scambio avviene solo per convezione e la velocità diminuisce notevolmente.

Per quanto riguarda l'acquaquench invece, il raffreddamento è caratterizzato dal particolare comportamento della soluzione al riscaldamento: ad una temperatura di circa 75°C il polimero diventa insolubile in acqua, e viceversa, quando la temperatura della soluzione scende al di sotto di tale temperatura il polimero torna solubile. Questa caratteristica conferisce alla soluzione un meccanismo di raffreddamento unico. Quando un acciaio austenitizzato viene temprato in tale soluzione, il raffreddamento avviene in tre fasi distinte:

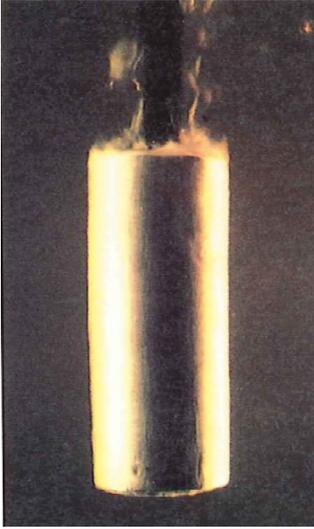


Figura 7.4 1° stadio del raffreddamento

1. Al momento dell'immersione del pezzo nel fluido da tempra la soluzione, a contatto col metallo, raggiunge temperature superiori a 75°C (T di inversione solubilità). Il polimero diventa insolubile in acqua e deposita uno strato sottile sulla superficie del pezzo. Il raffreddamento è più lento di quello in acqua.

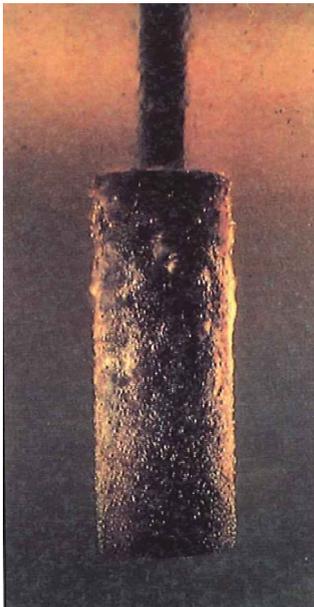


Figura 7.5 2° stadio del raffreddamento

2. Lo strato di polimero diventa attivo.



Figura 7.6 3° stadio del raffreddamento

3. Non appena la temperatura dell'acciaio scende sotto a quella di inversione di solubilità, lo strato si ridiscioglie e il calore viene asportato dal pezzo con un meccanismo di raffreddamento convettivo.

Le caratteristiche positive del raffreddamento mediante acquaquench sono:

1. Possiede una drasticità di raffreddamento minore dell'acqua. Il rischio di cricche e/o deformazioni è minore.
2. Come l'acqua non è infiammabile, fattore importante in un'industria.
3. Non sono presenti fumi durante l'esecuzione della tempra.
4. Il costo iniziale è ridotto rispetto agli olii. Nel nostro caso poi, in cui utilizziamo il liquido a bassa concentrazione per una maggiore velocità di tempra il costo risulta essere ulteriormente basso.
5. Ha un basso consumo per asporto.
6. Rispetto agli olii possiede calore specifico molto più alto quindi per uno stesso carico la temperatura della vasca varia di meno
7. Maggiore pulizia delle strutture
8. Facilità di cambio di velocità di raffreddamento variando anche di poco la percentuale di polimero puro
9. A seconda della percentuale di polimero utilizzato si può inoltre modificare la velocità di raffreddamento: maggiore è la quantità di polimero, minore sarà la velocità di sottrazione di calore (figura 7.7).

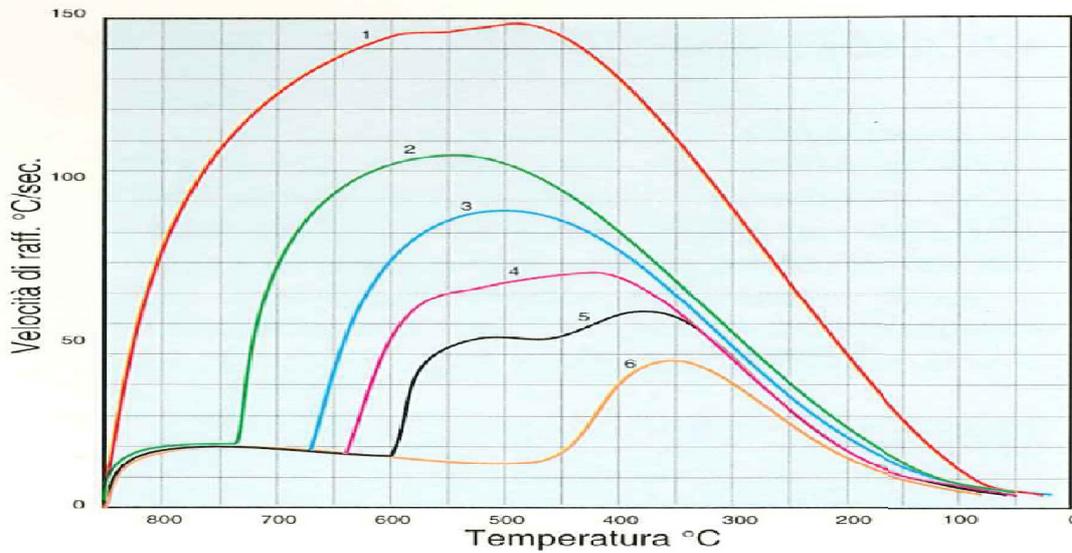


Figura 7.7 Variazione della velocità di raffreddamento con la concentrazione di polimero

- | | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 1) Sol. 5% | 4) Sol. 20% | 2) Sol. 10% |
| 5) Sol. 25% | 3) Sol. 15% | 6) Sol. 30% |

In figura 7.8 è rappresentato un diagramma contenente 2 curve riferite all'acquaquench 352: quella *velocità di raffreddamento-temperatura* e quella *temperatura-tempo*, dove in entrambe i casi la temperatura è riferita alla soluzione. Sotto a questo troviamo invece il diagramma *velocità di raffreddamento-temperatura* per l'acqua a diverse temperature.

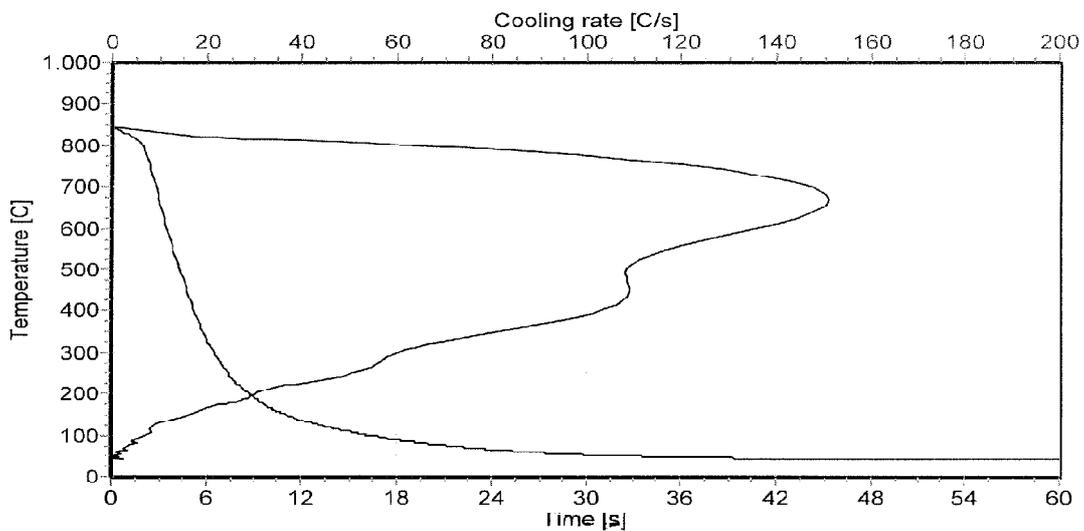


Figura 7.8 Diagramma temperatura-velocità di raffreddamento e temperatura tempo per l'acquaquench 352

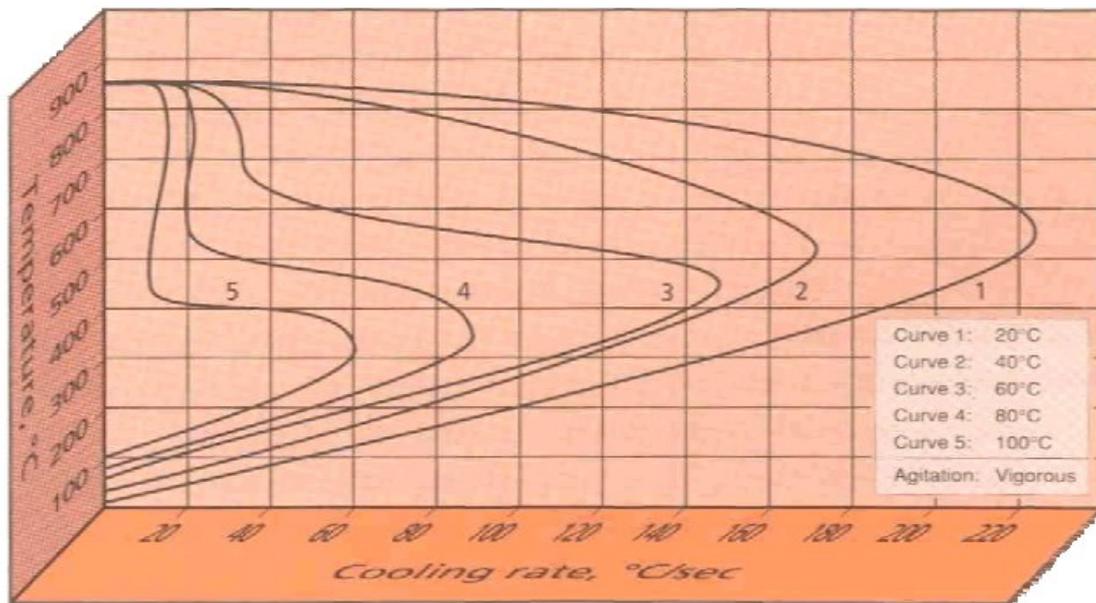


Figura 7.9 Velocità di raffreddamento dell'acqua a diverse temperature

Come ci si aspettava, confrontando il grafico 7.8 riferito alla velocità di raffreddamento dell'acquaquench con il 7.9 riferito all'acqua a diverse temperature, si può notare come la velocità di sottrazione di calore del primo sia nettamente inferiore a quella dell'acqua a 20°C, che è quella impiegata in ASFO. Questa cosa però, come già detto, è auspicata perchè in questa maniera non si incorre alla rottura dei pezzi.

Dopo questa analisi ci aspettiamo diversi comportamenti dei pezzi temprati in acqua o in acquaquench a seconda delle caratteristiche meccaniche che si vanno a considerare. Abbiamo detto che la tempra in acqua è più drastica di quella in acquaquench, e che quindi forma maggiori quantità di martensite. Ne deriva che per le caratteristiche di durezza o di resistenza a trazione lo spegnimento in acqua procura risultati migliori di quello in polimero. Per quanto riguarda la prova di resilienza invece, si avrà un'inversione di tendenza in alcuni casi, poiché essa non è influenzata dalla quantità di martensite, ma dalla martensite rinvenuta, cioè dalla sorbite. A rinvenimenti alti quindi ci aspettiamo comunque che sia migliore la tempra in acqua, perchè forma maggiori quantità di martensite, che poi viene rinvenuta trasformandosi in grandi dosi di sorbite. A rinvenimenti bassi al contrario ci aspettiamo che risulti migliore la tempra in polimero, poiché da vita a minori quantità di martensite, che non viene trasformata in sorbite a causa della bassa temperatura di rinvenimento. Essendo poi la martensite non rinvenuta nociva nelle prove di resilienza in quanto infragilente, ottengono risultati più alti i barrotti temprati in acquaquench.

Capitolo 8

Il rinvenimento

8.1 Il rinvenimento

Dopo il trattamento termico della tempra a causa della fragilità della martensite è necessario eseguire un rinvenimento per conferire una stabile tenacità alla struttura. Questo è stato eseguito mediante riscaldamento ad una temperatura che poteva essere o 580°C o 660°C a seconda dei barrotti, e mantenimento per un tempo di 5 ore. Rinvenendo a tale temperatura è stata ottenuta su tutti i pezzi una struttura detta sorbite, che possiede la migliore combinazione di resistenza e duttilità, nonché un'ottima resistenza all'urto. La diversa temperatura di rinvenimento è il fattore certamente più incidente nelle caratteristiche meccaniche finali: i pezzi rinvenuti ad una temperatura più alta assumono maggiori caratteristiche di duttilità, invece i pezzi rinvenuti a temperature più basse possiedono maggiori valori resistenza, come sforzo di rottura e durezza. La variazione delle caratteristiche meccaniche con la temperatura di rinvenimento la si può vedere anche in figura 8.1.

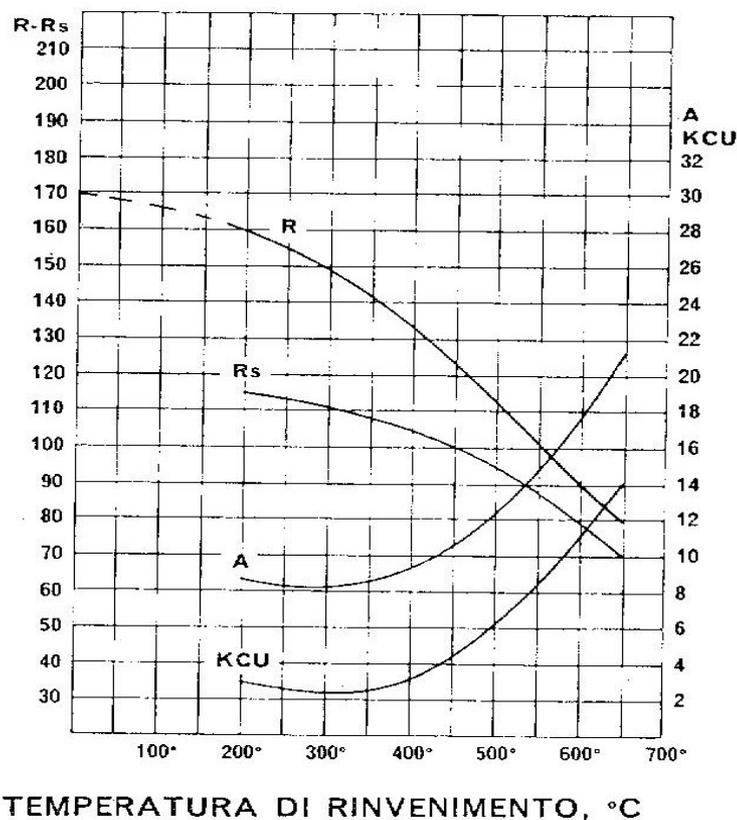


Figura 8.1 Variazione delle proprietà meccaniche con la temperatura di rinvenimento

Capitolo 9

La prova di trazione

9.1 La prova di trazione

La prova di trazione (figura 9.1) è una prova statica di caratterizzazione dei materiali che consiste nel sottoporre il provino del materiale in esame ad un carico F inizialmente nullo che viene incrementato fino a un valore massimo che determina la rottura del materiale. Serve a determinare alcune caratteristiche del materiale, tra cui il carico unitario di rottura (R_m), il carico unitario di snervamento (R_s), l'allungamento, lo strizionamento e il modulo di Young o modulo di elasticità (E).

La macchina utilizzata per la prova di trazione fornisce direttamente una curva, detta curva di trazione nominale, o curva ingegneristica, che mette in relazione i "carichi unitari" o "sforzi" (σ) in funzione degli "allungamenti unitari" o "deformazioni" (ε)

Il carico unitario σ è pari a:

$$\sigma = F/A_0$$

essendo:

- F è il carico applicato;
- A_0 è l'area iniziale della sezione del provino.

L'allungamento unitario ε è invece pari a:

$$\varepsilon = \Delta L/L_i = (L_f - L_i)/L_i$$

in cui:

- L_f è la lunghezza finale del provino (variabile) ottenuta dall'allungamento del provino;
- L_i è la lunghezza iniziale del provino

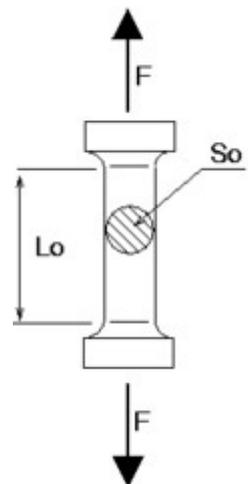


Figura 9.1
Simulazione di
trazione

9.2 Grafico sforzo deformazione, regime elastico, plastico, carico di snervamento, rottura

Questa curva esprime l'allungamento unitario ε del materiale di prova sotto l'azione dello sforzo di trazione gradualmente (ma lentamente) crescente nel tempo; essa, dovrebbe rappresentare la funzione $\varepsilon=f(\sigma)$. In realtà, per comodità, viene tracciata la curva: $\sigma=f(\varepsilon)$. Il diagramma che si ottiene può essere del tipo riportato in fig 9.2. In esso sono distinguibili diverse zone:

1. Comportamento elastico: fase di deformazione del materiale; le deformazioni che avvengono durante questa fase sono reversibili, per cui se in questa fase si riporta a zero il carico non si hanno deformazioni residue del provino, cioè viene ripristinata la sua lunghezza iniziale; in questa fase gli allungamenti sono direttamente proporzionali ai carichi (per cui nel diagramma sforzo-deformazione è rappresentata da un tratto rettilineo) e il rapporto è pari ad una costante che viene detta modulo di Young; in questo tratto è valida la legge di Hooke.
2. Continuando la prova di trazione, si ha un comportamento non più lineare; questa fase è detta snervamento e corrisponde ad una fase di instabilità del materiale in cui cominciano a muoversi le dislocazioni; lo snervamento corrisponde alla parte iniziale del tratto plastico;
3. Comportamento plastico: in questa fase le deformazioni sono solamente plastiche (a parte la fase elastica nel ritiro); ciò significa che azzerando il carico durante questa fase si hanno deformazioni residue associate al contributo di deformazione plastica, per cui il provino avrà una lunghezza maggiore rispetto all'inizio della prova. La differenza A si dirà allungamento.
4. Continuando la prova, si assiste ad una deformazione localizzata del provino, per cui una sua piccola parte diminuisce velocemente l'area della sua sezione; questa fase è detta strizione e caratterizza la parte discendente del diagramma sforzo-deformazione;
5. in seguito alla strizione si ha la rottura del provino

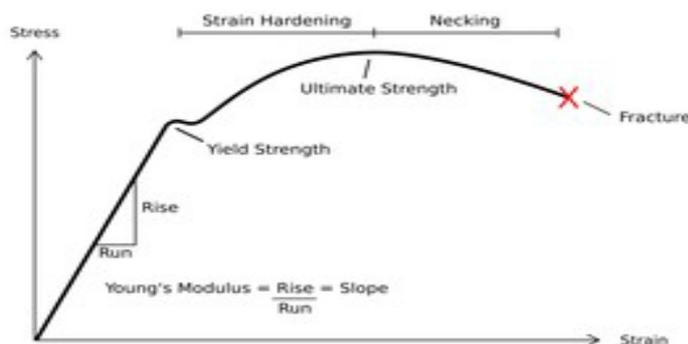


Figura 9.2 Esempio di curva sforzo-deformazione

La curva 9.2 non rappresenta la realtà fisica della deformazione del materiale, poiché essa è calcolata rispetto alle dimensioni iniziali del provino (A_0, L_0), quando invece le vere dimensioni cambiano continuamente durante la prova. Così mentre lo sforzo unitario appare decrescente dopo la strizione, in realtà il materiale continua ad incrudirsi fino alla rottura, per cui lo sforzo reale continua ad aumentare. Non è però questo un errore grave in termini ingegneristici perchè gli sforzi di snervamento e di rottura qui sopra calcolati sono quindi minori di quelli reali.

9.3 La prova di trazione: modalità di esecuzione

9.3.1 I provini

La prova di trazione è stata eseguita su provini del materiale in esame sottoposte ad un carico monoassiale continuamente crescente. Sono stati ricavati per ogni barrotto due provini di trazione: Uno a cuore e uno a pelle, come rappresentato dai dati sottostanti e in figura 9.3.

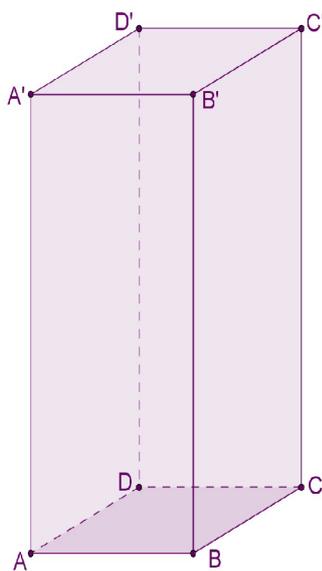
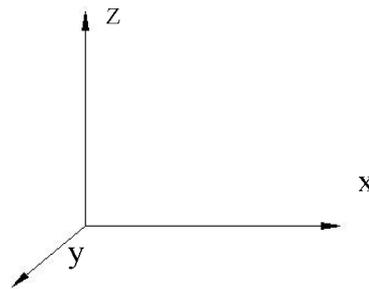


Figura 9.3 Modello di barrotto. Il piano cartesiano di riferimento è rappresentato a lato

1. 1 provino di trazione a $(0,0,z/2)$
2. 1 terna di provini di resilienza a $(x/2,0,z/2)$
3. 1 provino di trazione a $(x/2,y/2,z/2)$
4. 1 terna di provini di resilienza a $(x/2,y/2,z/2)$



Per ricavare il provino dal barrotto è stata asportata da quest'ultimo una porzione di materiale a forma di parallelepipedo, in seguito il pezzo è stato lavorato tramite tornio per dare la forma esatta al provino.

La sezione del provino è circolare. In esso, preparato in modo da non alterare le caratteristiche

microstrutturali del materiale, si distinguono un tratto utile, di lunghezza iniziale L_0 , e un tratto calibrato, la cui lunghezza iniziale deve essere compresa tra $L_0+d_0/2$ e L_0+2d_0 . Il simbolo d_0 rappresenta il diametro iniziale del tratto calibrato. La lunghezza L_0 del provino e la sezione S_0 sono normate. La lunghezza del provino è di 100 mm, mentre la sezione è di 10 mm. Ogni provino è provvisto di due teste, che consentono il serraggio e lo stiramento da parte delle macchine. Come si vede da figura 9.4, il tipo di testa sui provini è quello semplice.



Figura 9.4 Provini di trazione con testa semplice utilizzati

9.3.2 Gli strumenti utilizzati

- **Macchina di trazione:** Apparato che consente lo stiramento graduale dei provini con carichi regolabili nell'intensità e nella velocità di applicazione, misurando contemporaneamente le deformazioni prodotte (figura 9.5). Esso è formato da un *organo di potenza*, destinato a raccogliere lo sforzo, da un organo misuratore del carico e da un organo di trasmissione del carico. E' collegata al computer e ad esso comunica i dati. Può applicare oleodinamicamente una forza massima di 300 kN .



Figura 9.5 Macchina di trazione Wolpert

- **Estensimetro:** Consente la misurazione delle deformazioni contemporanee allo sforzo applicato. E' esterno alla macchina e collegato al computer (figura 9.6).

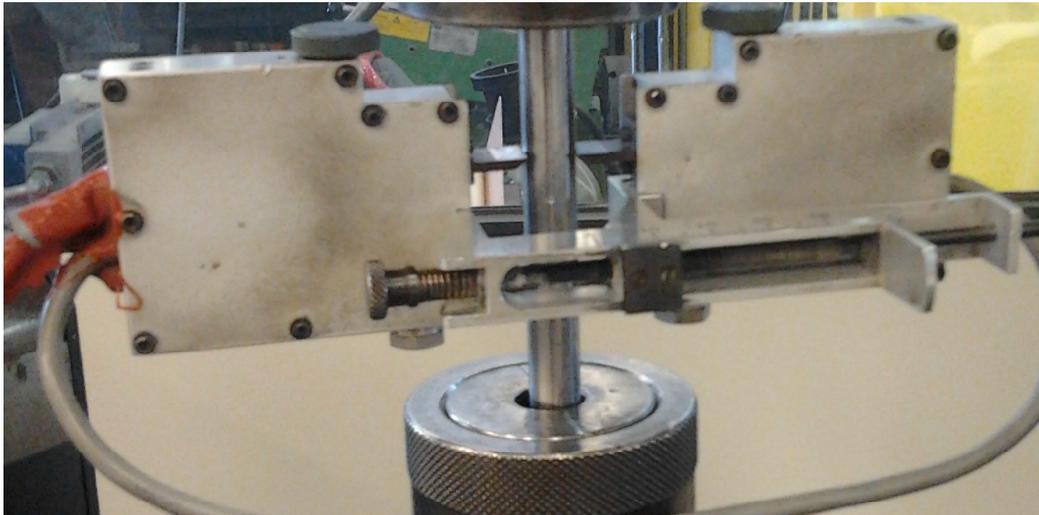


Figura 9.6 Estensimetro

- **Punzonatore:** Calibro di distanza 50 mm utilizzato per marcare il campione con segni facili da individuare dopo la trazione (figura 9.7).



Figura 9.7 Punzonatore

- **Calibro:** Misuratore di distanza, utilizzato per calcolare l'allungamento e la strizione (figura 9.8). Consente tre tipi di misure, il calcolo del diametro esterno, interno e della profondità di un cilindro.



Figura 9.8 Calibro

Tutti gli strumenti, dalla macchina di trazione, al punzonatore, al calibro, devono essere calibrati, ognuno secondo la propria normativa.

9.3.3 La prova

Per prima cosa si procede alla marcatura del provino. Per fare questo si utilizza un punzone di lunghezza 50mm che colpito con un martello lascia dei piccoli solchi sul tratto calibrato del provino. Secondo normativa questo procedimento si effettua 3 volte, 2 sulle estremità opposte del provino ed uno in centro, in modo tale che, una volta effettuata la trazione, sia facile misurare la distanza tra 2 punti distanti 50mm all'inizio della prova, riuscendo così a calcolare il valore dell'allungamento. Si deve inoltre misurare la lunghezza iniziale del diametro.

Eseguite queste prime misure si pone il provino in posizione nella macchina, si chiudono le ganasce e si azzerava il carico. A questo punto si pone l'estensimetro a contatto con il provino e si fa iniziare la prova.

Mano a mano la macchina inizia ad applicare il carico e l'estensimetro segnala l'allungamento percentuale del provino. Quando l'estensimetro calcola un allungamento pari a 0,2% arriva l'ordine di levarlo dalla macchina, in quanto inizia la fase di deformazione plastica. Dopo alcuni secondi

comincia la strizione e in seguito la rottura.

Tolte quindi dalle ganasce le due parti di provino rotte si calcola l'allungamento percentuale e la strizione tramite il calibro.

Misurando la distanza tra i solchi lasciati ad inizio prova si riesce a risalire all'allungamento, calcolando poi il diametro nella parte strizionata si ottiene il valore della strizione. Questi valori, come rappresentato in figura 9.9, si ricavano facendo combaciare le 2 estremità fratturate dalla trazione.

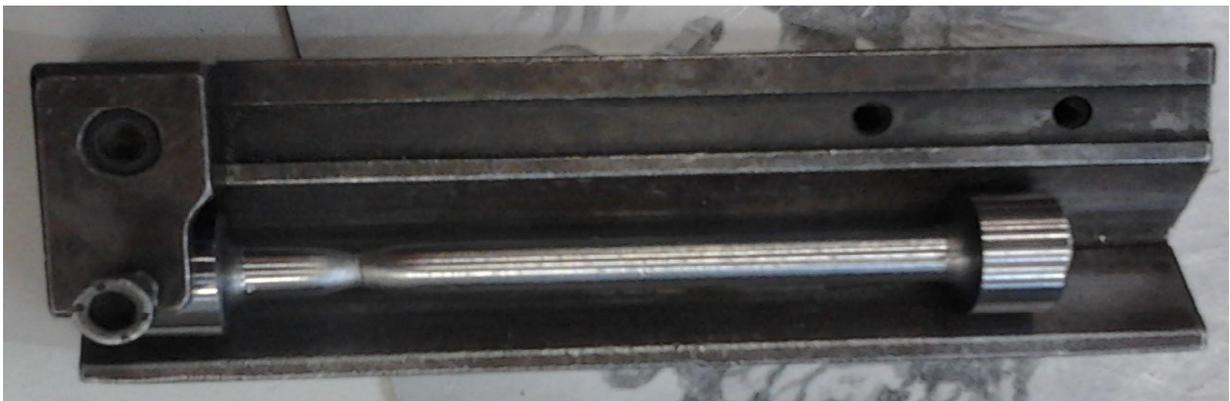


Figura 9.9 Disposizione del provino per la misurazione dell'allungamento e della strizione

Capitolo 10

La prova di resilienza

10.1 La resilienza

La resilienza (tenacità dinamica) è la resistenza che un materiale oppone ad una sollecitazione impulsiva, cioè che tenda a romperlo improvvisamente. Poiché l'impulsività del carico accentua la fragilità del materiale, la resilienza misura il comportamento dei materiali alla frattura. Una lega con alti valori di resilienza avrà un comportamento duttile in caso di urto, mentre una lega con scarsa resilienza avrà un comportamento fragile. La necessità di conoscere questo comportamento deriva dal fatto che le prove statiche, anche nella loro forma più completa, non sono sufficienti a definire compiutamente le proprietà dei materiali metallici: è anzi possibile avere due campioni di uno stesso acciaio nelle medesime condizioni di trattamento termico, con medesimo comportamento nelle prove statiche, dei quali uno sia tenace e l'altro fragile, se sottoposti ad urto. Poiché i metalli di uso industriale sono soggetti anche a sforzi impulsivi, non solo statici, e poiché in caso di cedimento improvviso non devono essere un pericolo, risulta utile effettuare prove per studiare anche queste caratteristiche dei materiali.

10.2 La prova Charpy

La prova Charpy prevede di sottoporre a rottura, mediante flessione per urto centrale, una barretta intagliata, e di calcolare l'energia assorbita alla rottura. Come è rappresentato in figura 10.1, i provini che si utilizzano, secondo normativa italiana e comunitaria, hanno forma prismatica a sezione quadrata di 10 mm di lato e di lunghezza 55mm. Su di esso, in posizione esattamente centrale, vi è un intaglio a V di profondità 2 mm. Tutti gli strumenti utilizzati in questa prova sono necessariamente calibrati, con degli standard ufficiali forniti da ASTM. Essendo una prova ASTM il peso della mazza è di 30,5 Kg, l'energia della mazza è di 295±10 Joule e la velocità d'urto è di circa 5m/s. La prova sempre secondo normativa ASTM secondo normativa è stata effettuata alla temperatura di -29°.

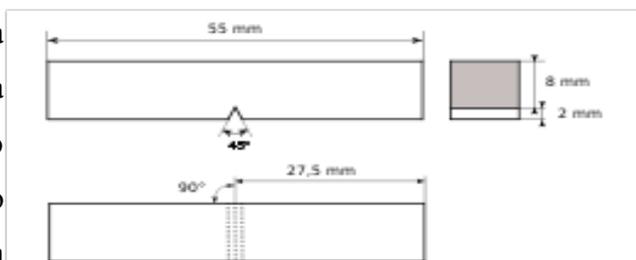


Figura 10.1 Modello di provino della prova di Charpy

10.3 L'esecuzione della prova

I provini, dimensionati secondo normativa, si dispongono inizialmente in un criostato a -29°C (figura 10.2) per circa 10', in modo tale che anch'essi raggiungano questa temperatura. Il liquido in cui sono immersi i provini nel criostato è alcool, in modo tale che non diventi solido, a causa del suo basso punto di solidificazione.



Figura 10.2 Criostato

Una volta raggiunta questa temperatura, il provino viene prelevato con una pinza, anch'essa precedentemente posta nel criostato per non alterare la sua temperatura tramite il contatto, e si pone tra le incudini della macchina di Charpy (figura 10.4). A questo punto la macchina viene azionata, il pendolo scende e colpisce il provino con il coltello esattamente nella sua precisa metà, in maniera perfettamente simmetrica (figura 10.3). Tutte queste operazioni devono essere eseguite molto velocemente in modo che non cali la temperatura del provino prima della prova e che non venga falsata.

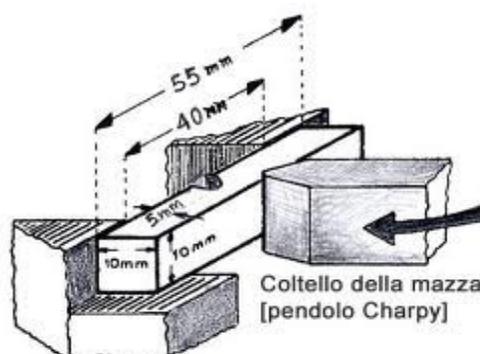


Figura 10.3 La prova di Charpy



Figura 10.4 Le incudini del pendolo di Charpy

Per il calcolo del valore della resilienza si agisce in questa maniera: se P è la massa del pendolo, H_i e H_f rispettivamente l'altezza di caduta e quella di risalita della mazza, si ha che $KV=(H_i-H_f) \times P$ (J). La lettura del valore della KV viene fatta su un quadrante con due indici, di cui uno è solidale con la mazza, mentre l'altro viene trascinato dal primo (figura 10.5); ne consegue che l'indice “folle” raggiunge il punto più elevato della scala sospinto dall'indice motore e, a differenza di quest'ultimo che segue le oscillazioni del pendolo, conserva la posizione finale, permettendo di leggere la misura.



Figura 10.5 Il pendolo di Charpy

10.4 Il comportamento dei materiali

Il comportamento dei materiali sottoposti alla prova di Charpy può essere molto diverso, e lo è stato anche nel nostro caso, in cui di molto sono variati i valori a seconda della combinazione di fattori utilizzata. I differenti comportamenti dei provini si possono immediatamente notare dal tipo rottura che si verifica una volta che il pendolo impatta su di essi. Le rotture possono essere di due tipi: rottura per decoesione o rottura per scorrimento. Nel primo caso, nel caso di materiale fragile, la provetta si rompe di schianto senza deformarsi, mentre per quelli tenaci la rottura è accompagnata da una certa deformazione. La rottura fragile avviene per distacco netto e improvviso dei piani cristallografici e la frattura risulta cristallina. In questo caso la rottura assorbe pochissimo lavoro di deformazione, poiché crea essa stessa le condizioni necessarie per la sua propagazione, costituite da uno stato triassiale di tensioni che si concentrano sul fondo dell'intaglio. La velocità della frattura è di qualche migliaio di m/s, ben maggiore di quella della mazza. Nel caso invece di rottura tenace si ha una rottura per scorrimento plastico di aspetto fibroso con lucentezza setacea, rottura che avviene con la stessa velocità della mazza, per effetto di uno stato triassiale di tensioni. A causa del lavoro necessario per deformare il provino che risponde in maniera tenace, la resilienza dei provini che si deformano è chiaramente più elevata dei precedenti. Entrambi i fenomeni possono essere contemporaneamente presenti in uno stesso provino in misura più o meno grande. Si può quindi considerare il lavoro di rottura U_r come somma di due contributi:

1. Lavoro di decoesione pura $\Delta_{U_{r1}}$, proporzionale alla sezione di rottura del provino $S_0 = a_0 b_0$, per cui:

$$\Delta_{U_{r1}} = K_1 a_0 b_0$$

2. Lavoro di deformazione plastica $\Delta_{U_{r2}}$, anch'esso funzione di a_0 e b_0 , ma in forma più complessa

$$\Delta_{U_{r2}} = K_2 f(a_0 b_0)$$

La resilienza può dunque essere espressa dalla relazione

$$K = \Delta U_r / S_0 = (\Delta_{U_{r1}} + \Delta_{U_{r2}}) / S_0$$

Capitolo 11

I risultati

Dalla caratterizzazione dei barrotti si può notare come ognuno di essi abbia almeno un fattore differente rispetto a tutti gli altri. Per eseguire un'efficace analisi dei dati mirata allo studio dell'effetto di ogni singolo fattore, ho fatto un confronto tra coppie/terne di barrotti che hanno identica combinazione dei fattori meno che quello che stiamo analizzando. Così, quando l'analisi è effettuata su di un solo fattore il grafico non è da leggersi globalmente, ma singolarmente all'interno delle coppie/terne confrontate. In secondo luogo verrà poi ricercata una possibile interazione tra i fattori.

11.1 Trazioni

11.1.1 Il grafico totale

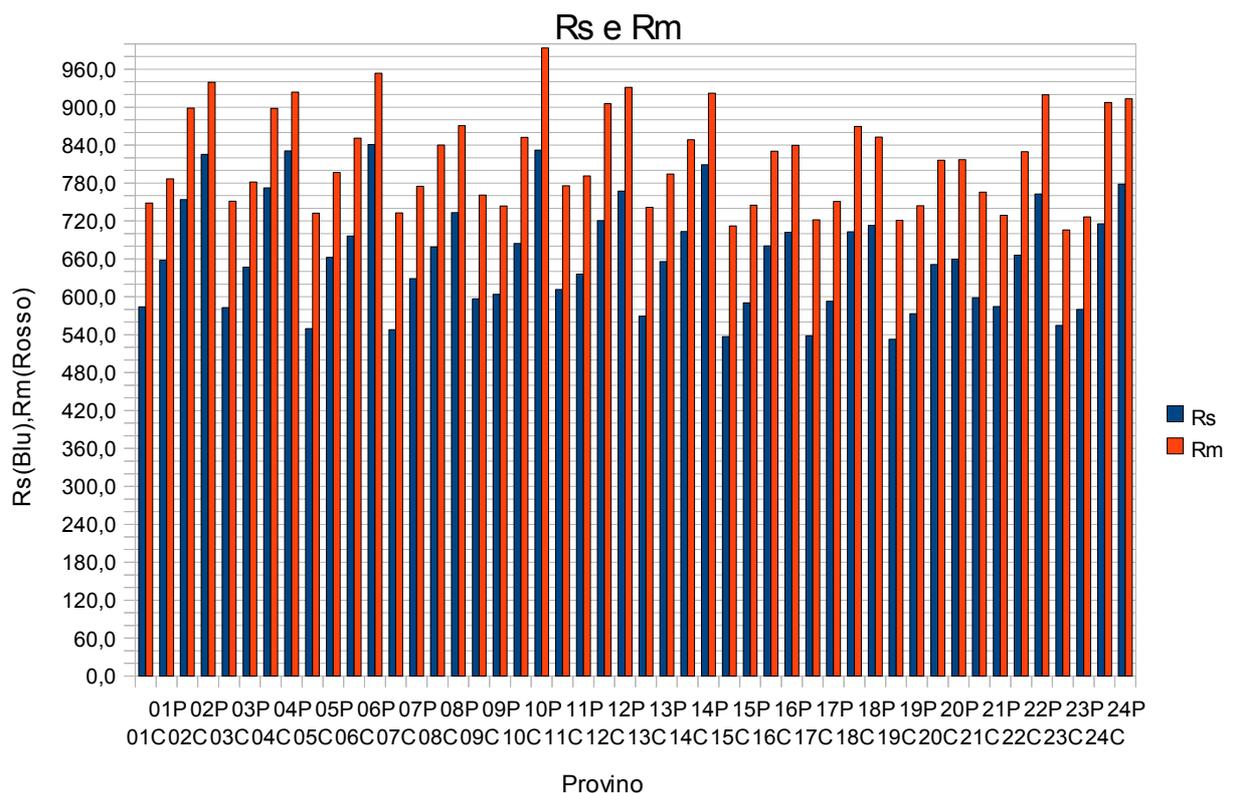


Figura 11.1 Grafico totale dei valori di Rm e Rs ricavati dalla prova di trazione

Dall'analisi del grafico 11.1 la prima cosa che si nota è lo scalino che esiste tra i pezzi pari e i pezzi dispari. I pezzi dispari infatti, rinvenuti a 660°C, possiedono Rs e Rm nettamente inferiori ai pari, rinvenuti a 580°C. Questa differenza è dovuta al fatto che eseguendo il rinvenimento a più alta temperatura si ottiene sì una struttura sorbitica meno tensionata e più duttile, ma per contro si perde in caratteristiche di resistenza. Un altro aspetto immediatamente visibile è la differenza tra i provini prelevati dai barrotti a cuore contrassegnati con una C e quelli in pelle, segnati con una P. Quelli più esterni, in cui la tempra ha agito più efficacemente, possiedono valori sempre superiori di quelli a cuore.

11.1.2 La sgrossatura

Per lo studio della sgrossatura poiché i barrotti sgrossati sono quelli dal n° 1 al n°12, mentre quelli grezzi sono dal n°13 al n°24 il confronto è stato eseguito su queste coppie:

N°Coppia (N° barrotto-N°barrotto)

1(1-13), 2(2-14), 3(3-15), 4(4-16), 5(5-17), 6(6-18), 7(7-19), 8(8-20), 9(9-21), 10(10-22), 11(11-23), 12(12-24).

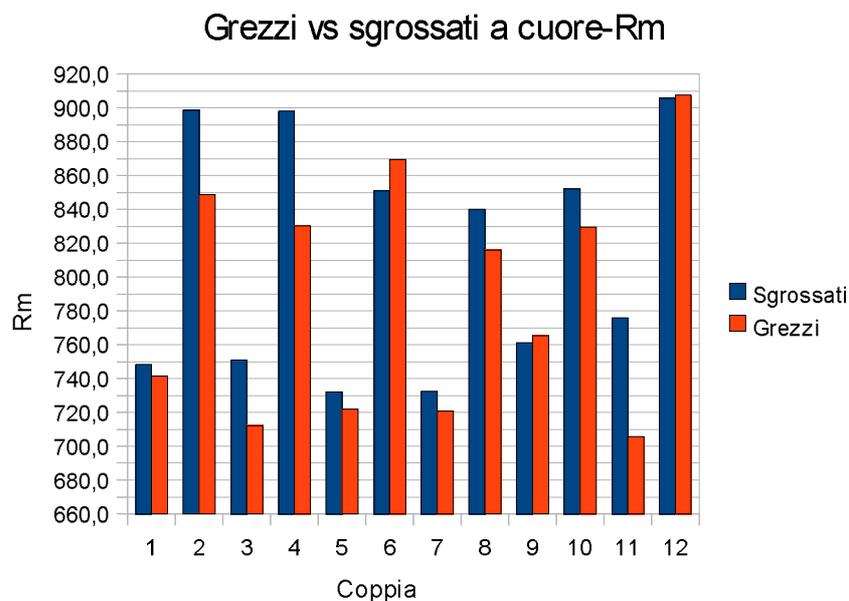


Figura 11.2

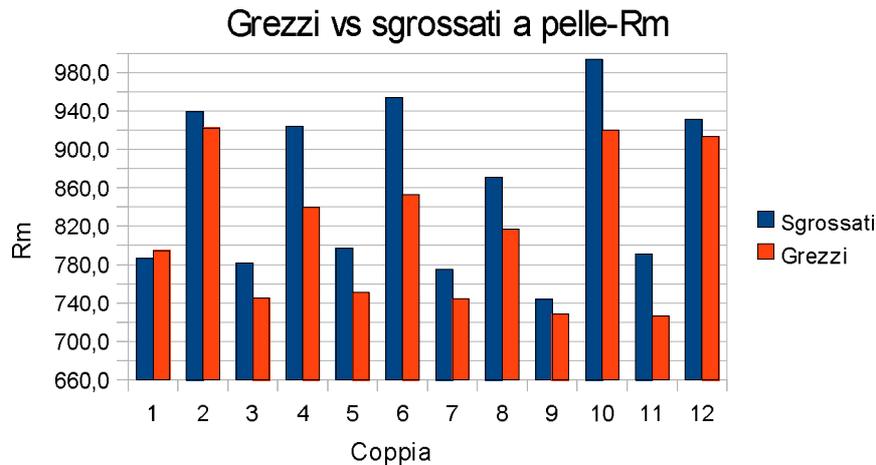


Figura 11.3

Sia per quanto riguarda i dati raccolti sui barrotti prelevati in pelle (figura 11.3) che per quelli a cuore (figura 11.2) si vede chiaramente la supremazia di quelli sgrossati prima della tempra. Questo fatto si può spiegare immaginando che lo strato nei barrotti grezzi funga da “mantello” ed impedisca il regolare scambio di calore durante lo spegnimento nella tempra, che invece avviene correttamente nei pezzi sgrossati. In questa maniera la tempra agisce meno efficacemente e la quantità di martensite che si forma è minore. Tale risultato ce lo si aspettava e rispetta le nostre previsioni.

11.1.3 Il mezzo di spegnimento

Il confronto in questo caso è stato fatto tra le seguenti coppie:

N°Coppia (N° barrotto-N°barrotto)

1(1-3), 2(2-4), 3(5-7), 4(6-8), 5(9-11), 6 (10-12), 7(13-15), 8(14-16), 9(17-19), 10(18-20), 11(21-23), 12(22-24).

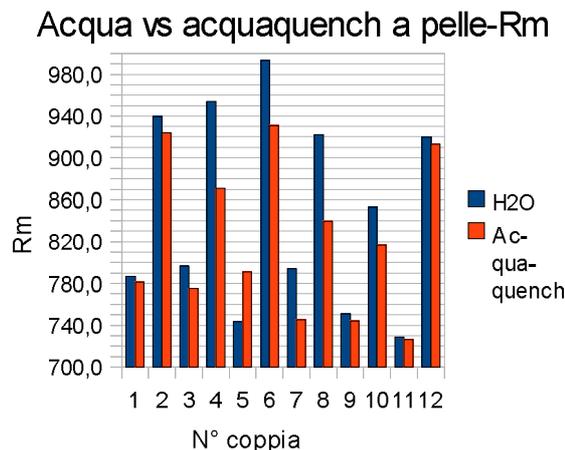


Figura 11.4

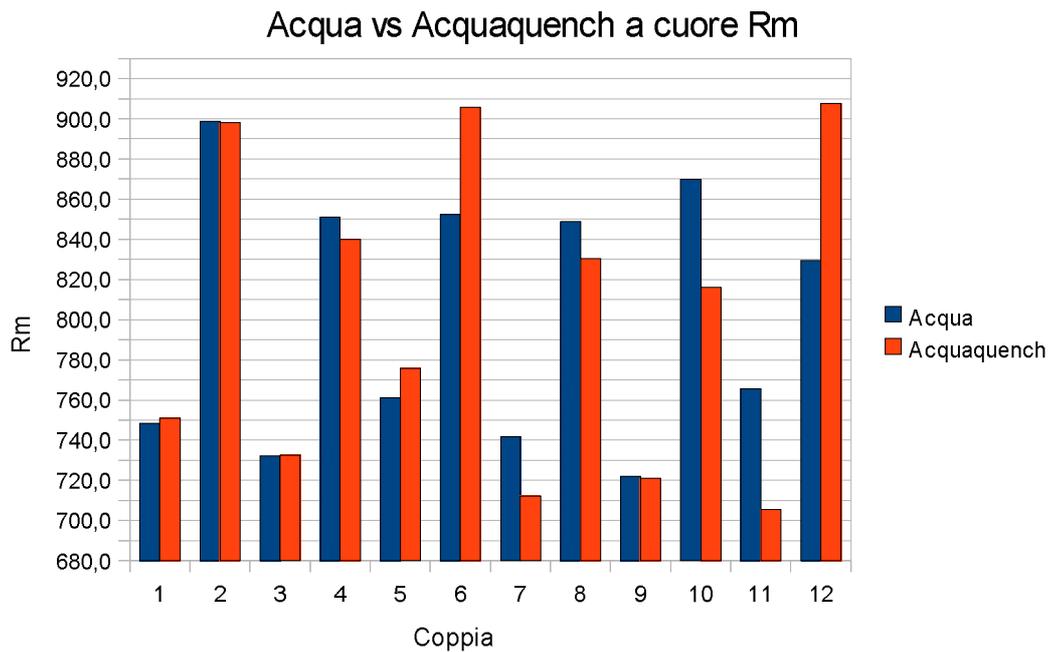


Figura 11.5

L'effetto del differente mezzo di spegnimento è evidente in superficie, dove la maggiore drasticità dell'acqua provoca un rafforzamento nettamente superiore di quello in polimero (figura 11.4), poiché lo spegnimento in acqua naturalmente dà vita ad una maggiore quantità di martensite. A cuore invece i risultati sono molto più uniformati (figura 11.5), ci sono addirittura 4 valori in cui Rm calcolato per un barrotto temprato in polimero risulta essere maggiore di quello temprato in acqua. Questo è probabilmente dovuto al fatto che a cuore la maggiore drasticità dell'acqua ha minori effetti rispetto all'esterno in quanto la velocità di raffreddamento risente molto dello strato di materiale da oltrepassare e quindi si uniforma a quella del polimero. Quello che si nota inoltre è che tra pelle e cuore generalmente c'è un abbassamento di valori notevole, ma per 2 barrotti, precisamente il 12 ed il 24 non si verifica questo abbassamento. Questi due barrotti sono entrambi di 30CrMo4VG, la differenza tra di essi è che uno è sgrassato (il 12) e uno è grezzo (il 24). Solo per questi due a cuore si vede una netta supremazia rispetto ai barrotti temprati in acqua. Si nota quindi un comportamento del 30CrMo4VG in controtendenza rispetto agli altri; si può ipotizzare una maggiore temprabilità del 30CrMo4VG in polimero rispetto che in acqua, anche se la spiegazione non è molto convincente. Oppure, considerando che il Vanadio è un noto elemento carburigeno, si può pensare ad una diversa precipitazione dei carburi a seconda del mezzo di spegnimento.

11.1.4 La composizione

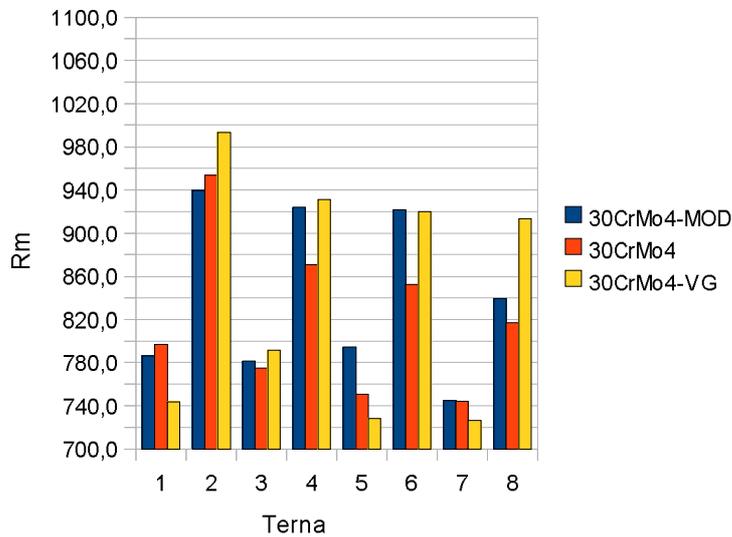
Il confronto in questo caso è stato compiuto a terne, non più a coppie, poiché le modalità per questo fattore sono 3. Come nei casi precedenti però per ogni terna l'unico fattore di differenza è quello della composizione.

Le terne fatte sono le seguenti e sono rappresentate secondo questo schema:

N°Terna (N° barrotto-N°barrotto-N° barrotto): 1(1-5-9), 2(2-6-10), 3(3-7-11), 4(4-8-12), 5(13-17-21), 6(14-18-22), 7(15-19-23), 8(16-20-24)

Figura 11.6

Effetto della composizione su Rm a pelle



Effetto della composizione su Rm a cuore

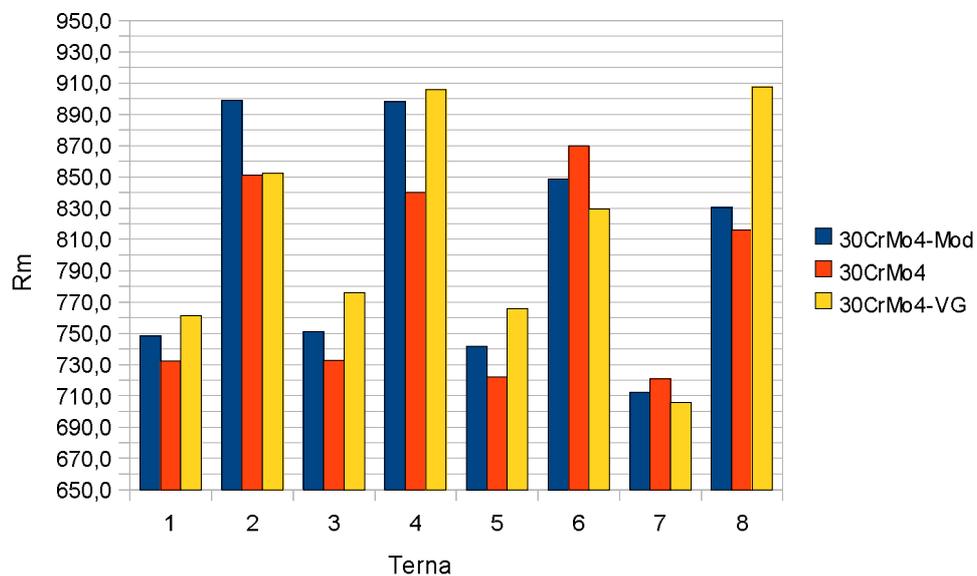


Figura 11.7

Osservando i grafici 11.6 e 11.7 possiamo notare come le aggiunte al materiale base portino i loro frutti per quanto riguarda la resistenza a trazione. Infatti sia la maggiore temprabilità dovuta al Nickel e al Manganese, sia l'affinamento del grano dovuto al Vanadio innalzano i punti a svantaggio del 30CrMo4 base. Questo effetto è ugualmente evidente sia a pelle che a cuore. L'impressione inoltre, è che la lega modificata al Vanadio ottenga valori superiori agli altri 2 quando viene temprata in polimero. E' un'ulteriore conferma all'osservazione fatta nel §11.1.3.

11.1.5 Il comportamento del 30CrMo4VG

Dall'analisi dei carichi di rottura è emersa l'ipotesi che la lega al Vanadio reagisca meglio al trattamento di tempra in polimero che in acqua. La spiegazione che si dà a questo inconsueto risultato è che avendo l'acquaquench una velocità di raffreddamento caratteristica inferiore a quella dell'acqua, ci sia più tempo e possibilità per la precipitazione di Carburo di Vanadio, un noto rafforzante, nel lento raffreddamento eseguito con l'acquaquench.

11.2 Le resilienze

Le coppie/terne confrontate in questo paragrafo sono le stesse già utilizzate per la prova di trazione.

11.2.1 Il grafico totale

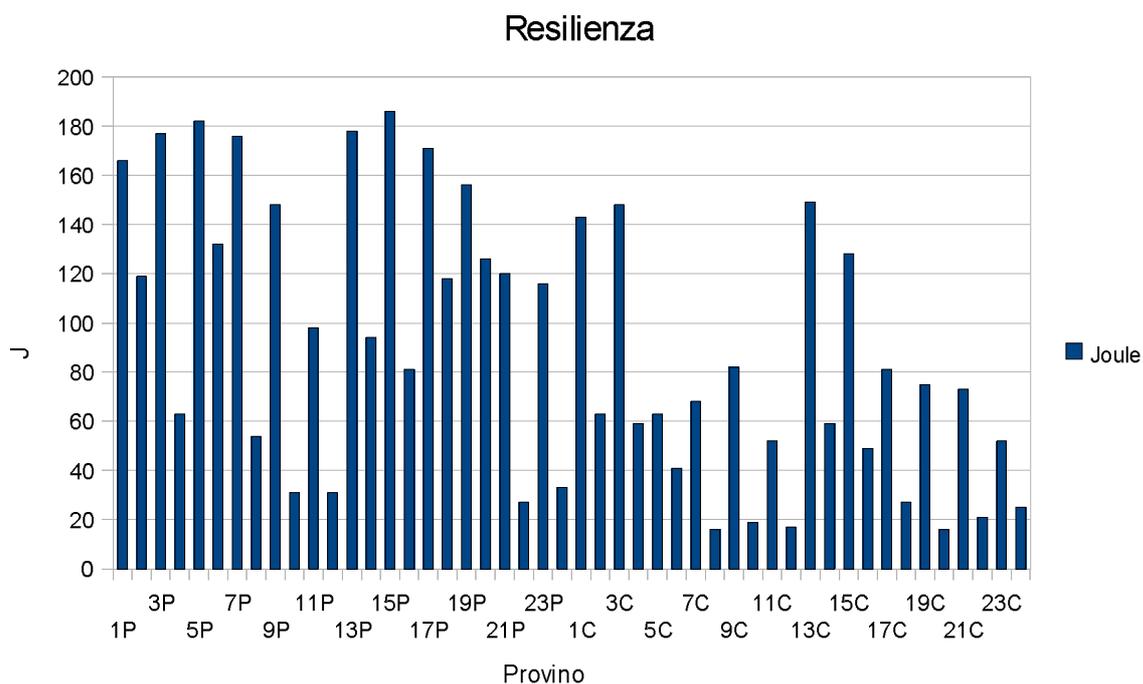


Figura 11.8

Come nella prova di trazione precedente anche nei risultati della prova Charpy, riportati in figura 11.8, si nota una notevole differenza tra barrotti rinvenuti a 660°C(dispari) e rinvenuti a 580°C(pari) ma l'effetto ottenuto è esattamente il contrario di quello precedente. Infatti mentre nella prova precedente il requisito determinante per ottenere alti valori di Rm era riuscire ad ottenere più martensite possibile, ora la microstruttura ideale per alti valori di resilienza è la sorbite, che è la martensite rinvenuta. Il rinvenimento infatti procura maggiore duttilità e propensione alla deformazione plastica. Questo comporta un assorbimento di energia maggiore poiché oltre a quella necessaria per causare la rottura, va ad aggiungersi anche quella per la deformazione. L'energia assorbita nell'urto dunque è di molto maggiore nei pezzi dispari. Tra i pezzi a cuore e quelli in pelle inoltre esiste una differenza notevole che vede primeggiare i secondi, in quanto essendo più esterni ottengono un migliore trattamento di tempra e rinvenimento per cui si viene a creare una quantità di sorbite maggiore di quella a cuore .

11.2.2 La composizione

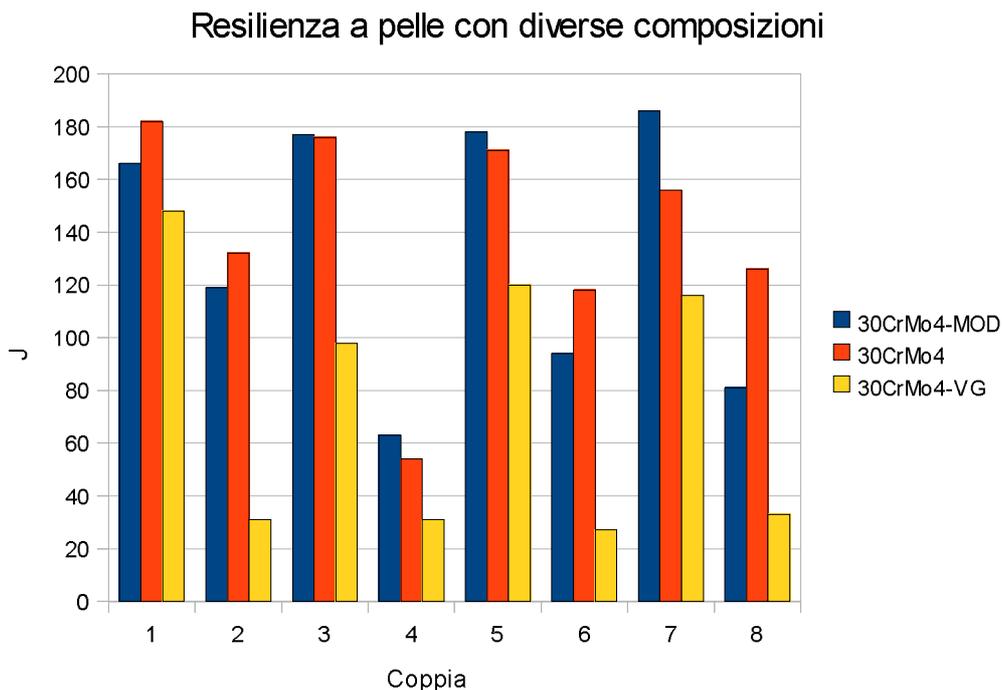


Figura 11.9

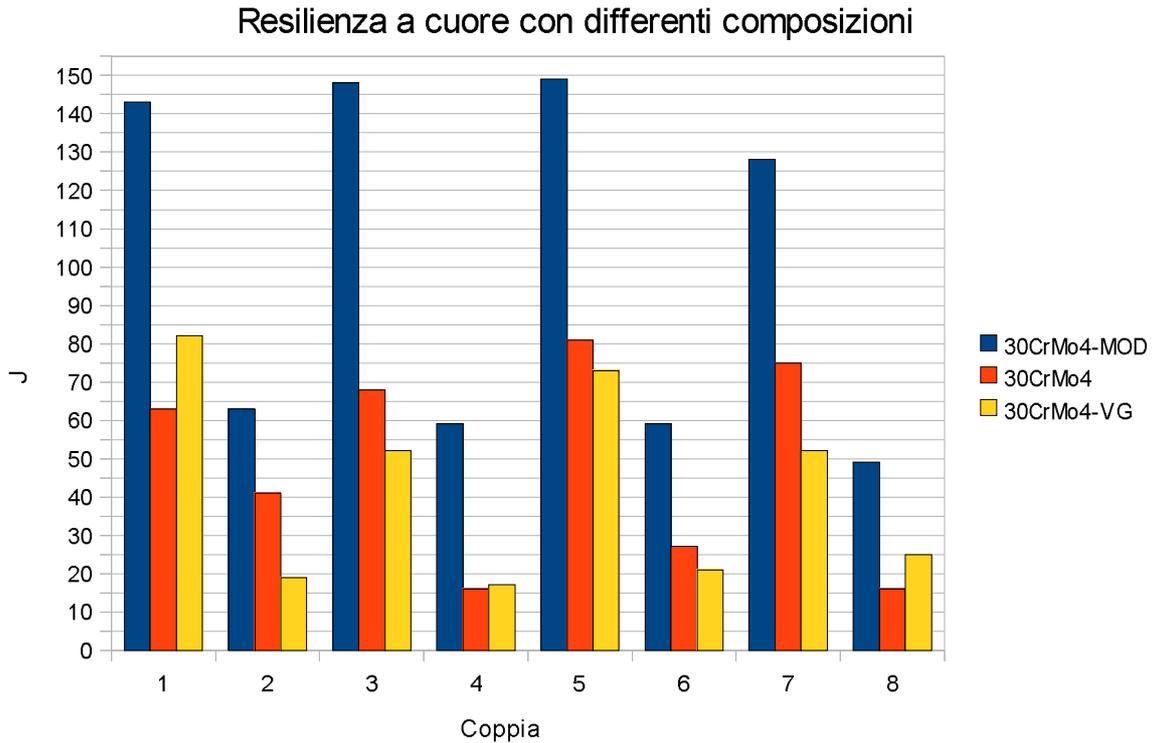


Figura 11.10

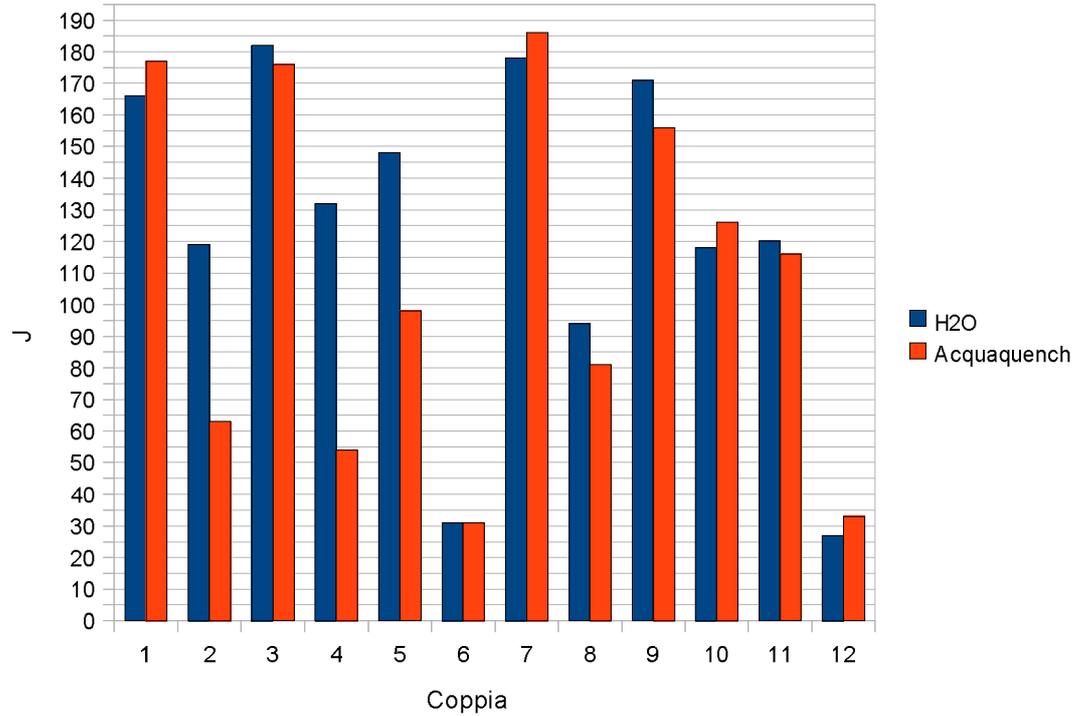
Per quanto riguarda i dati in pelle in figura 11.9, sono da sottolineare gli scarsi valori del 30CrMo4VG, che risulta sempre inferiore agli altri due. Questo è probabilmente dovuto alla reazione del Vanadio con il Carbonio che causa la formazione di Carburo di Vanadio. Gli altri due invece mantengono valori simili senza che nessuno prevalga globalmente sull'altro.

Nell'osservazione dei dati a cuore in figura 11.10 invece è da evidenziare il crollo rispetto ai valori in pelle del 30CrMo4 base, mentre subiscono una diminuzione più lieve gli altri due. Il 30CrMo4MOD rimane su valori molto alti anche a cuore ed il distacco medio dagli altri due materiali è dell'ordine dei 50 punti. Questo cambio di tendenza è dovuto al fatto che il Nickel e il Manganese gli conferiscono ottime proprietà di temprabilità, che gli comportano una forte diminuzione dello stato tensionale dopo tempra, e di conseguenza ottimi valori di resilienza. La supremazia del 30CrMo4MOD è più evidente quando il rinvenimento viene eseguito a 660°C. Questo avviene poiché il rinvenimento ad alta temperatura comporta la trasformazione della martensite in sorbite e maggiore è la temperatura di rinvenimento maggiore è la quantità di sorbite che si viene a formare, di conseguenza i barrotti dispari riescono a raggiungere valori altissimi.

11.2.3 Il mezzo di spegnimento

Figura 11.11

Resilienze a pelle con diversi mezzi di spegnimento



Resilienze a cuore con diversi mezzi di spegnimento

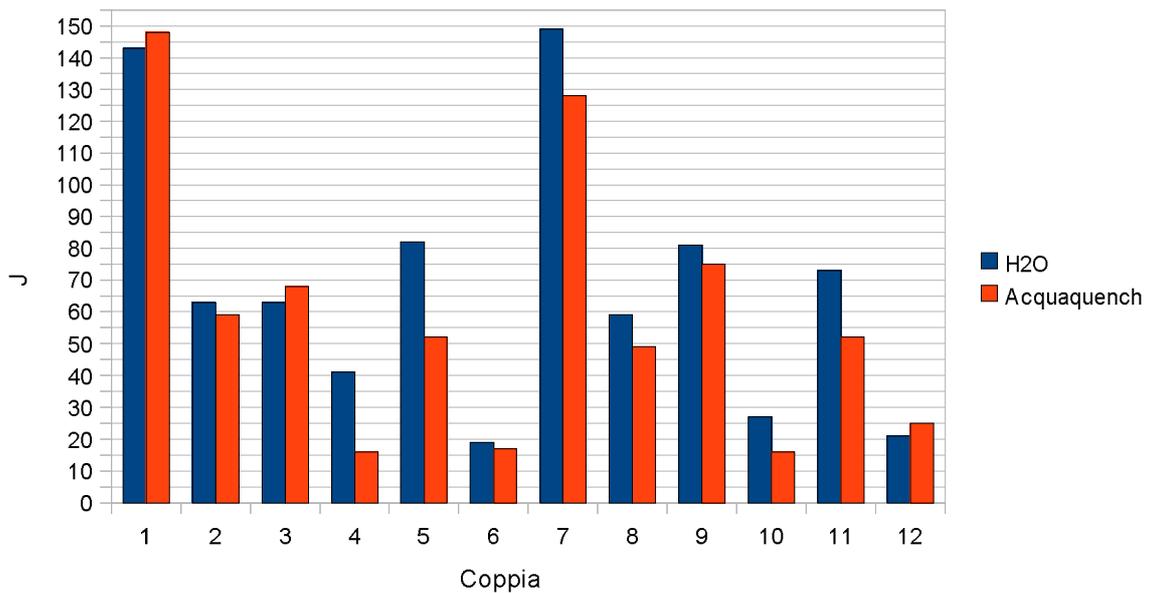


Figura 11.12

Osservando l'andamento generale delle figure 11.11 e 11.12 si nota che eseguendo la tempra in acqua si ottengono valori mediamente maggiori. La motivazione la si può attribuire al fatto che spegnendo in acqua un pezzo austenitizzato la quantità di martensite che si forma è maggiore. Si può affermare inoltre che la supremazia di acqua o polimero dipenda da diversi fattori che determinano la trasformazione o meno della martensite in sorbite. Infatti, nel caso in cui ci fosse questa trasformazione certamente risulterebbe più elevata la resilienza del pezzo temprato in acqua, poiché possederebbe maggiore quantità di martensite; nel caso invece in cui il rinvenimento e gli altri fattori non fossero sufficienti per trasformare la martensite in sorbite sarebbe più elevata la resilienza del pezzo temprato in acquaquench, poiché possederebbe meno martensite non rinvenuta, che abbassa drasticamente l'energia assorbita in un urto.

11.2.4 La sgrossatura

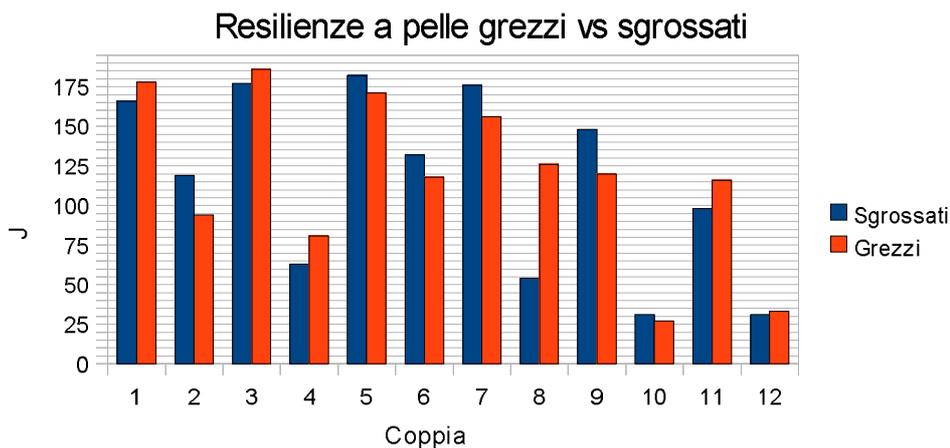


Figura 11.13

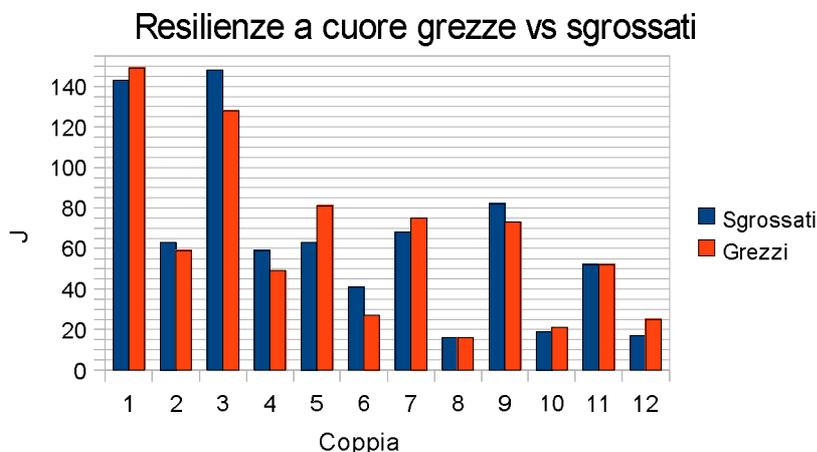


Figura 11.14

La sgrossatura, a differenza di quanto osservato nella prova di trazione ha effetto praticamente nullo.

Conclusioni

Nel nostro lavoro abbiamo studiato alcuni simulacri di anelli in 30CrMo4 fucinati e temprati ed analizzato i fattori che ne modificano le proprietà meccaniche finali. Abbiamo utilizzato tre varianti del materiale differenti nella composizione degli elementi in tracce: una che è il materiale base, una con un eccesso di Vanadio e una con eccesso di Nickel e Manganese. Abbiamo effettuato su metà dei nostri 24 simulacri la sgrossatura, poi abbiamo eseguito la tempra per metà di essi con spegnimento in acqua e per l'altra metà in acquaquench, ed infine abbiamo eseguito il rinvenimento a 660°C per una metà, e a 580°C per l'altra, in modo tale che ogni provino fosse caratterizzato da almeno un fattore di differenza rispetto a tutti gli altri. Il nostro obiettivo era capire l'effetto di ognuno di questi fattori sulle proprietà meccaniche finali per valutare quale fosse la migliore combinazione di fattori da utilizzare a seconda delle richieste ricevute.

Le caratteristiche meccaniche prese in considerazione sono il carico di rottura, di snervamento e la resilienza.

Dall'analisi dei dati abbiamo notato che il fattore più incidente in entrambe le caratteristiche è la temperatura di rinvenimento. Questo trattamento infatti dà vita ad una struttura sorbitica che influisce pesantemente sia su R_m che sulla resilienza. La struttura sorbitica ottenuta mediante riscaldamento ad alte temperature è molto meno dura e meno resistente ai carichi applicati lentamente rispetto alla martensite, quindi il rinvenimento a 660°C causa valori di R_m e R_s molto bassi rispetto a quello a 580°C. Si ha effetto opposto invece nei valori di resilienza, dove grazie alla grande duttilità acquisita con il trattamento ad alta temperatura, i pezzi rinvenuti a 660°C hanno valori molto più elevati di quelli rinvenuti a 580°C.

Per quanto riguarda la composizione abbiamo osservato che l'acciaio più conveniente da utilizzare è il 30CrMo4MOD, che risulta essere il più completo in entrambe le caratteristiche meccaniche e che non presenta bassi valori in nessuna prova. La stessa cosa non si può dire per il 30CrMo4VG, che grazie all'affinazione del grano ha alti valori di R_m , talvolta anche maggiori della lega modificata al Nickel, ma che nella prova di resilienza possiede valori bassissimi. E' consigliabile quindi l'utilizzo del 30CrMo4VG nel caso in cui non vi siano richieste di alte resilienze.

Generalmente lo spegnimento mediante acqua porta a valori maggiori di quello in polimero sia per quanto riguarda le caratteristiche di R_m e R_s che di resilienza. Questo effetto è più visibile in pelle che a cuore; prendendo in considerazione la prova di resilienza, se risultano maggiori i valori per i provini temprati in acqua o in polimero, dipende anche dalla temperatura di rinvenimento, non solo dal mezzo di spegnimento.

La sgrossatura porta a significative differenze per quanto riguarda i dati delle prove di trazione, in cui i pezzi sgrossati maggiorano sempre quelli grezzi. Nella prova di resilienza invece la sgrossatura non incide nei valori finali.

Per uno sviluppo futuro sarebbe interessante proseguire l'analisi del comportamento della lega al Vanadio, osservare le micrografie dei pezzi anomali e studiare il perchè dei così bassi valori di resilienza. Inoltre si potrebbe valutare l'ipotesi di inserire nella lega al Vanadio un altro elemento che formi con esso precipitati alternativi al Carburo di Vanadio ed osservare se aumentano i valori di resilienza, poichè i valori ottenuti dalla prova di trazione sono davvero ottimi e confermano la grande utilità del Vanadio in lega come elemento rinforzante. Riuscendo ad alzare anche i valori di resilienza si otterrebbe un acciaio con caratteristiche meccaniche confrontabili con quello modificato al Nickel.

Riferimenti bibliografici

- Paolucci, G.M. (2000) *Lezioni di Metallurgia volume 1, 2^a edizione: struttura, proprietà e comportamento dei materiali metallici*, Libreria progetto, Padova.
- Paolucci, G.M. (1996) *Lezioni di Metallurgia volume 2, 2^a edizione: tecnologia dei materiali metallici*, Libreria Progetto, Padova.
- Paolucci, G.M. (1995) *Lezioni di Metallurgia volume 3, 2^a edizione: analisi, prove e controlli sui materiali metallici*, Libreria Progetto, Padova.
- Catalogo *Houghton Italia S.p.a.*
- ASTM E23-2006, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.
- ASTM E8M-2004, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

Siti web

[http:// www.sciencedirect.com/](http://www.sciencedirect.com/) (ultimo accesso: 11/09/2012).