



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

**TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI E DEI
PROCESSI INDUSTRIALI**

(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Materiali)

**ANALISI METALLOGRAFICHE E PROVE DI DUREZZA SU
SIMULACRI DI ANELLI IN 30CrMo4 FUCINATI E BONIFICATI**

Relatore: Prof. Andrea Zambon

Laureando: PIETRO CERCHIER

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

Indice

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1 – ASFO.....	2
1.1 IL PROCESSO ASFO.....	3
CAPITOLO 2 - Il 30CrMo4.....	4
2.1 APPLICAZIONI.....	4
CAPITOLO 3 – L’indagine svolta.....	6
CAPITOLO 4 - I Parametri oggetto di studio.....	10
4.1 LE COMPOSIZIONI.....	10
4.1.1 ANALISI COL QUANTOMETRO.....	12
4.2 LA SGROSSATURA.....	12
4.3 IL MEZZO DI SPEGNIMENTO.....	13
4.4 LA TEMPERATURA DI RINVENIMENTO.....	14
CAPITOLO 5 – Il Trattamento termico.....	16
5.1 LA TEMPRA.....	16
5.2 IL RINVENIMENTO.....	18
5.3 CONTROLLO DEL PROCESSO.....	19
CAPITOLO 6 – Le analisi metallografiche.....	20
6.1 OSSERVAZIONI.....	21
6.2 LA MISURA DEL GRANO AUSTENITICO.....	25
CAPITOLO 7 – Le prove di durezza.....	26
7.1 LE COMPOSIZIONI.....	29
7.2 LA SGROSSATURA.....	31
7.3 IL MEZZO DI SPEGNIMENTO.....	32
7.4 LA TEMPERATURA DI RINVENIMENTO.....	33
CAPITOLO 8 – Profili di durezza.....	34
8.1 LA PROVA JOMINY.....	39
CONCLUSIONI.....	42
APPENDICE.....	A-1
A. IL 30CrMo4.....	A-1
B. L’AQUAQUENCH 352.....	A-2
C. LE MICROGRAFIE.....	A-4
D. I DATI RACCOLTI.....	A-7
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	A-15

Introduzione

Questa tesi raccoglie i risultati del tirocinio svolto presso ASFO, un'azienda specializzata nella forgiatura d'anelli in acciaio.

L'obiettivo della tesi e del tirocinio è stato quello di studiare il trattamento di bonifica di anelli in 30CrMo4, ricavando informazioni su come e quanto le proprietà ottenute dopo il trattamento dipendano da quattro diversi parametri:

- tre composizioni lievemente differenti dell'acciaio
- sgrossatura o meno dei pezzi prima della tempratura
- mezzo di spegnimento (acqua o soluzione polimerica)
- temperatura di rinvenimento

L'analisi è stata svolta in collaborazione con un altro studente che si è occupato della caratterizzazione dei materiali dal punto di vista meccanico.

In questo lavoro invece sono raccolti i risultati delle prove di durezza e le micrografie realizzate.

L'applicazione della tesi da parte dell'azienda si esplicherà nell'utilizzo delle conoscenze acquisite per la previsione in futuro delle proprietà che gli anelli fucinati assumeranno dopo il trattamento termico e quindi faciliterà un'opportuna scelta dei parametri oggetto dello studio.

Si ringraziano quindi vivamente l'azienda ASFO per la grande opportunità offerta, il professor Andrea Zambon per il competente aiuto fornito ed il tutor aziendale David Sartori per la disponibilità dimostrata, oltre a tutto il personale ASFO che mi ha assistito nella realizzazione di questo lavoro.

Capitolo 1

Il Processo ASFO

ASFO s.p.a. è un'azienda appartenente al FOMAS Group, un gruppo industriale con stabilimenti in Italia, Francia, Cina ed India, il quale è leader a livello mondiale nel campo della fucinatura e laminazione circolare.

I fucinati e gli anelli fabbricati sono destinati al settore dell'oil & gas, dell'energia (convenzionale, alternativa o nucleare), dell'auto movimentazione e delle trasmissioni industriali.

FOMAS Group è organizzata in due divisioni principali: *OPEN DIE FORGINGS DIVISION* e *RINGS DIVISION*.

ASFO appartiene proprio a quest'ultima divisione, ed in particolare alla *LARGE RINGS DIVISION*, la quale è in grado di produrre fino a 60.000 tonnellate/anno di anelli di diametro fino a 7000 mm, di sviluppo assiale fino a 1200 mm e di peso unitario fino a 14 tonnellate.

L'azienda ha sede a Chiuppano (VI), ove da oltre quarant'anni produce anelli laminati di alta qualità.

L'elevata flessibilità del processo produttivo consente la produzione di anelli in piccole serie pur mantenendo un alto livello di produttività insieme ad un'eccellenza nelle lavorazioni meccaniche, così da essere in grado di fornire settori industriali particolarmente esigenti come la generazione di energia, l'oil & gas e i riduttori per le turbine eoliche.

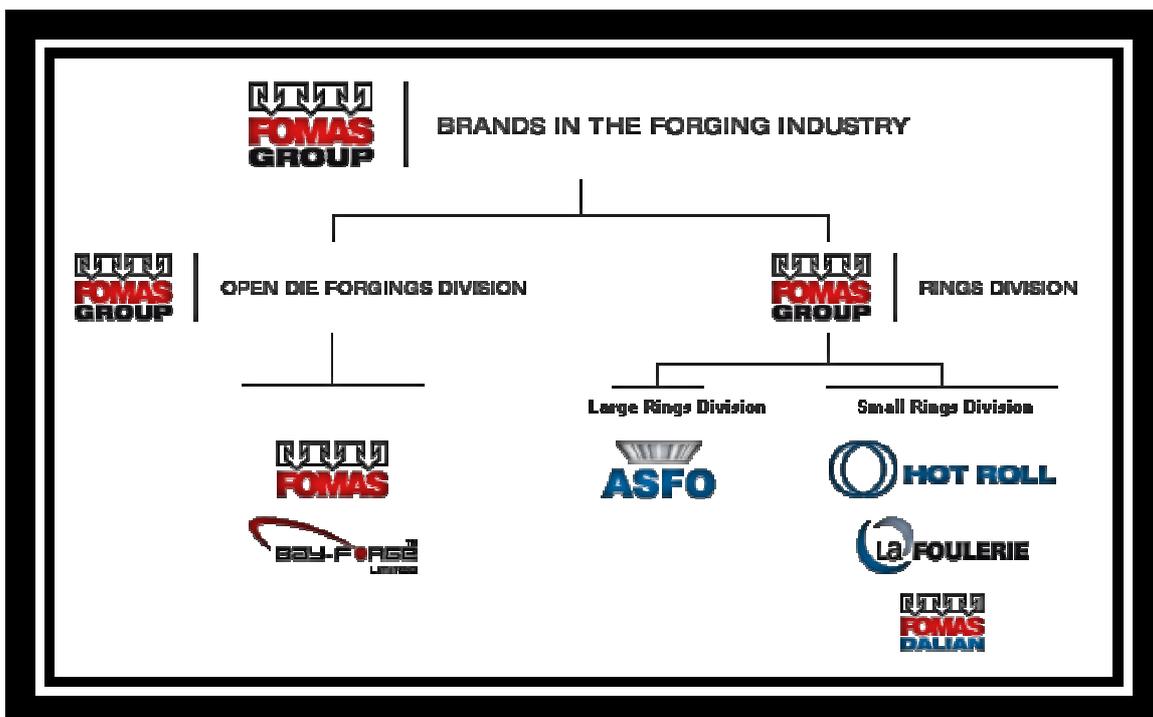


Figura 1.1 Posizione di ASFO all'interno di FOMAS GROUP.

1.1 Il processo ASFO

Il processo produttivo comincia con l'acquisto dalle acciaierie della materia prima, che giunge in forma di lingotti cilindrici o blumi di colata (**Figura 1.2**).



Figura1.2. Lingotti cilindrici ottenuti per colata continua

Per prima cosa il processo ne prevede il taglio (**Figura 1.3**) in più parti, chiamate *masselli*.

Nel caso infatti in cui i lingotti presentino la picciola e la materozza, queste devono essere eliminate mediante un taglio realizzato a freddo.

La stessa operazione viene eseguita nei lingotti prodotti in colata continua per fare in modo che le facce siano parallele e per eliminare le bave generatesi dal taglio con fiamma.

Il taglio è effettuato tramite seghe a nastro, le quali operano su diametri che

possono raggiungere i 1200mm.

Per ridurre l'usura degli utensili, il taglio è lubrificato con acqua emulsionata ad olio.

Successivamente il prodotto viene spinato e forgiato, ovvero deformato plasticamente a caldo, finché esso assume la forma ad anello desiderata (**Figura1.4**).

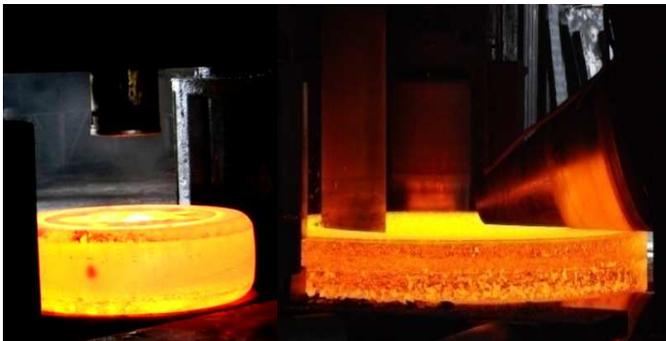


Figura1.4. Operazioni di spinatura e laminazione a caldo

Infine, qualora richiesto, sono eseguiti il trattamento termico e/o la lavorazione meccanica alle macchine utensili.



Figura1.3. Il taglio del lingotto



Figura1.5. La tempra, la lavorazione meccanica ed il prodotto finito

Capitolo 2

Il 30CrMo4

Il 30CrMo4, o 1.7216, è un acciaio medio legato da bonifica.

In particolare gli acciai legati con Cromo-Molibdeno hanno il vantaggio di una facile lavorabilità e saldabilità. Inoltre si forgianno e trafilano molto bene.

Ricordiamo qui anche l'origine della denominazione UNI EU, 30CrMo4.

Seguendo la designazione degli acciai debolmente legati (con tenore di ogni elemento inferiore al 5%), il 30 sta ad indicare la percentuale media di carbonio moltiplicata per 100, Cr e Mo sono i simboli degli elementi di lega in ordine decrescente di tenore percentuale (circa 1% Cr e 0,2% Mo), mentre 4 fa riferimento al tenore percentuale in massa del primo elemento (Cr) moltiplicato per 4. Per quanto riguarda la designazione numerica, che si rifà al sistema delle norme DIN, è necessario fare riferimento alla tabella riportata dalla UNI EN 10027-2.

La denominazione AISI è invece 4130, ove 41 indica la classe d'appartenenza dell'acciaio e 30 la percentuale media di carbonio moltiplicata per 100.

2.1 Applicazioni:

Il 30CrMo4 è il classico acciaio speciale da costruzione e, come tale, trova impiego in parti meccaniche fra le più disparate.

Tipicamente l'acciaio al Cromo-Molibdeno si utilizza nelle costruzioni aeronautiche per farne opere tubolari saldate come carrelli, ali, o per carrozzerie. Viene trafilato per tubi, alberi a gomito, bielle, cilindri, parti che debbano resistere all'abrasione (corone, rondelle) o agli urti ripetuti (parti di armi).

Inoltre si ritrova in ruote di locomotive, manovelle, alberi fucinati, fili per molle (in sostituzione al Cr-V), pezzi con buona elasticità e resistenza anche a caldo, parti di motori, carrelli alberi, trasmissioni, cilindri,...

Gli acciai al Cr-Mo con basso tenore di carbonio sono utilizzati anche dopo cementazione per ingranaggi d'auto: il Mo assicura un maggior indurimento a cuore del pezzo dopo trattamento termico.

Per parti fucinate e per grandi pezzi si preferisce un acciaio al Ni o Cr-Ni poiché, per l'intervallo di tempra che presentano, si può usare il semplice raffreddamento all'aria in luogo di quello più complesso e pericoloso in acqua o olio.

Nel nostro caso il 30CrMo4 è stato richiesto, sotto forma di anelli forgiati e bonificati, dal cliente *Cameron*, che utilizza questi ultimi nei BOP delle piattaforme petrolifere Offshore (stazioni che estraggono il petrolio sottomarino in mare aperto).

Il BOP, *blowout preventer*, è un particolare dispositivo che ha il compito di mettere in sicurezza i pozzi d'idrocarburi durante la loro perforazione, nel caso i fluidi presenti nel sottosuolo dovessero accidentalmente migrare all'esterno del pozzo.

Il pozzo può essere assimilato ad un condotto a sezione circolare, dunque sostanzialmente a una lunga tubazione. Il greggio è contenuto nei pori della roccia del sottosuolo, sottoposto alla pressione di formazione e mantenuto nella roccia dalla contro-pressione esercitata sulle pareti del foro dal fango di perforazione.

Se per un qualsiasi motivo, questi fluidi, dovessero risalire dal pozzo, verso la superficie, raggiungerebbero l'impianto di perforazione, che si trova in superficie sulla bocca del pozzo. In questa maniera l'impianto sarebbe seriamente minacciato dal rischio di incendi ed esplosioni, proprio perché i gas sono facilmente infiammabili. Tra l'altro tali gas, salendo verso l'alto, si espandono perché diminuisce la pressione cui sono assoggettati. Ciò significherebbe che tutto l'impianto sarebbe avvolto dal gas infiammabile, pronto ad accendersi alla minima scintilla o contatto con superfici calde. Seppure i gas non dovessero incendiarsi, causerebbero problemi respiratori o asfissie, nonché avvelenamenti al personale.

Il BOP dunque, viene utilizzato per chiudere il pozzo in situazioni di emergenza, cioè otturare la sua sezione in caso appunto di *blowout*, ossia eruzione del pozzo (così è chiamata la fuoriuscita d'idrocarburi dallo stesso).

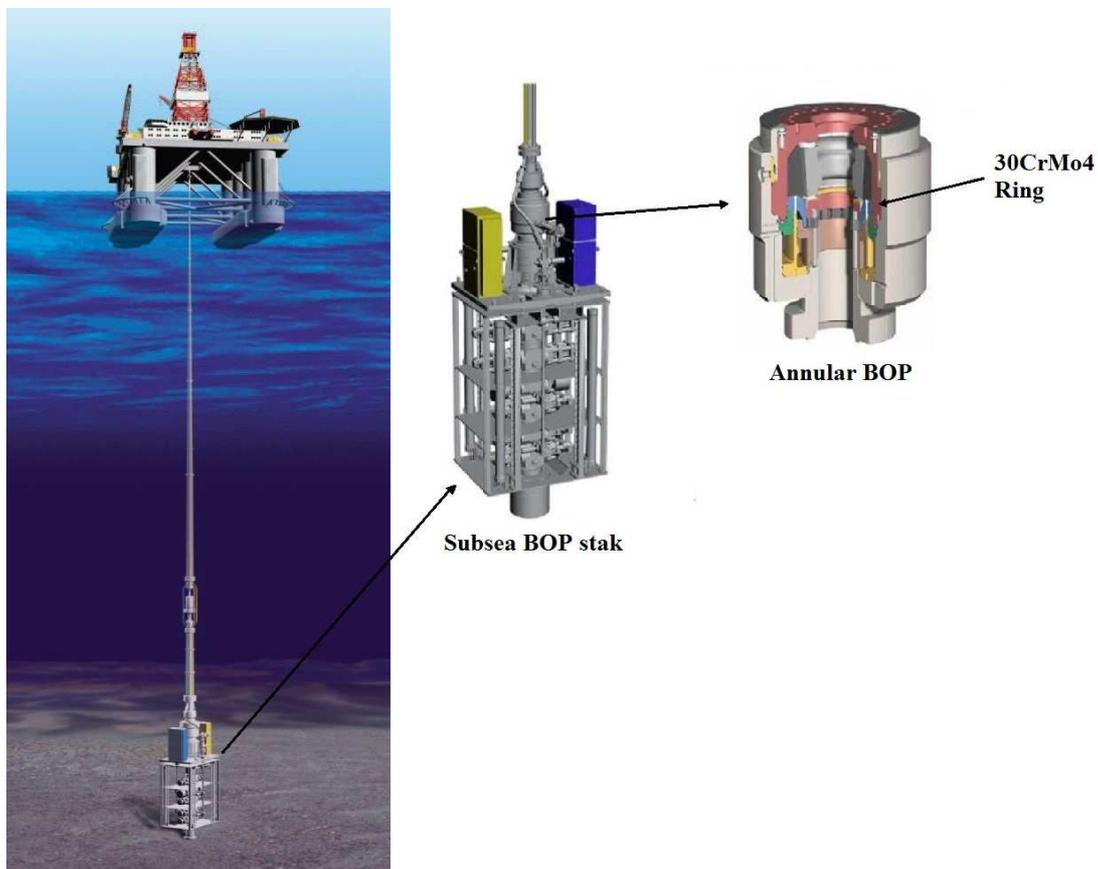


Figura 2.1. Applicazione in un BOP dell'anello forgiato e bonificato in 30CrMo4 oggetto dello studio

Capitolo 3

L'indagine svolta

Innanzitutto era necessario disporre di simulacri sui quali poter svolgere lo studio, i quali sono stati per questo appositamente preparati.

Per evidenti problemi di costi, infatti, era impensabile avere a disposizione per l'analisi direttamente gli anelli in questione, avendo questi ultimi un costo dell'ordine delle migliaia di euro (solamente il materiale ha un costo di circa 0,9 euro al chilo).

Dunque si sono dapprima forgiati tre anelli a differente composizione e in seguito ricavati, da ciascuno di essi, otto barrotti a forma di parallelepipedo 120x120x300 mm che abbiamo utilizzato come simulacri dell'anello.

In **Figura 3.1** è indicato il procedimento con cui ciascun anello forgiato è stato pressato e tagliato per ricavare i barrotti in questione.

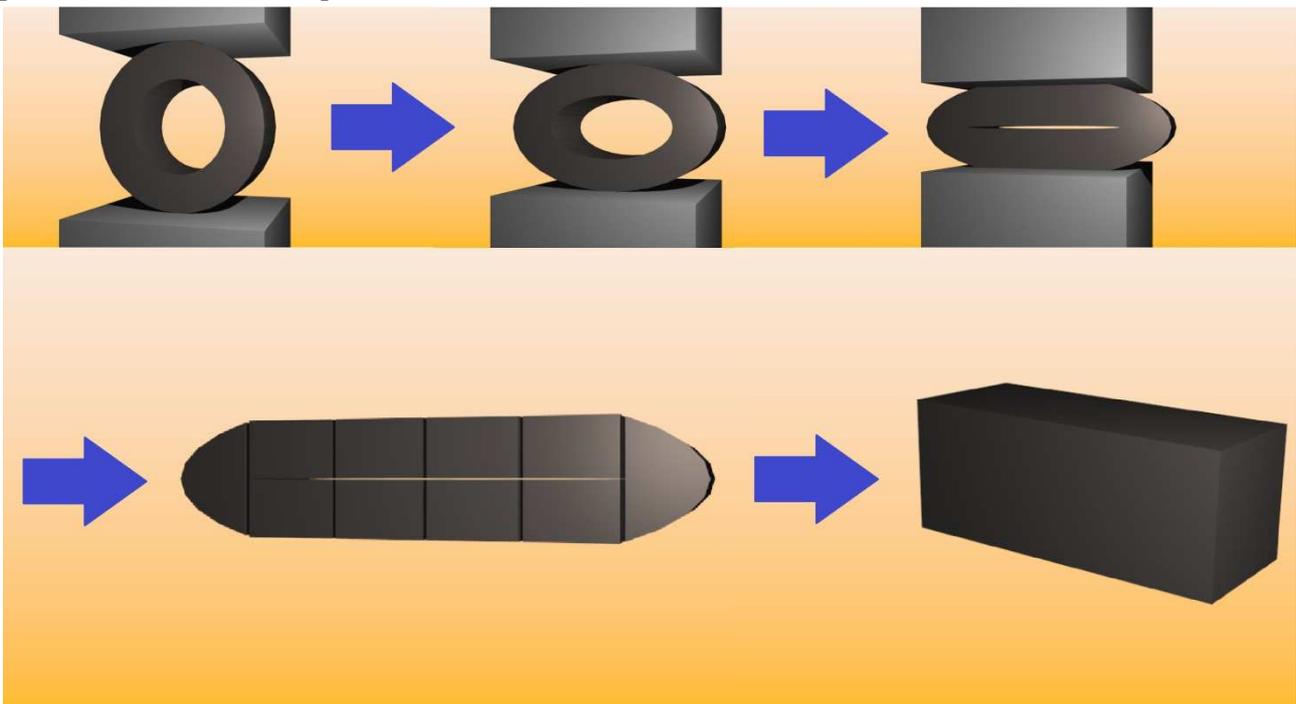


Figura 3.1. Metodo con il quale sono stati ricavati i 24 simulacri

La forma a parallelepipedo dei pezzi, scelta anche per comodità di realizzazione, doveva essere tale da riprodurre abbastanza fedelmente il comportamento di una sezione dell'anello, la cui superficie non presenta particolari sporgenze e seppure, a differenza dei nostri simulacri, sia curva, la curvatura per grandi anelli non è troppo accentuata.

La dimensione della base, pari a 120mm di lato, rispecchia invece lo spessore degli anelli per cui vi era interesse a studiare il trattamento termico.

Infatti vengono prodotti anche anelli con spessori ben maggiori di 120mm, ma per questi ultimi un'analisi era già stata condotta sperimentalmente dall'azienda, trovando in particolare che le

proprietà meccaniche superavano i requisiti solamente per una drastica tempra in acqua di pezzi sgrossati, mentre qualsiasi altro trattamento forniva proprietà non soddisfacenti o, nel caso di pezzi grezzi, avrebbe richiesto comunque un maggior tempo di permanenza nel bagno di tempra. Ragionando infine sulla nostra sostituzione degli anelli con questi loro simulacri si è quindi ritenuto che i dati raccolti ben si possano estendere ai suddetti anelli con spessore pari o inferiore a 120mm. Per lo studio quindi sono stati utilizzati 24 barrotti, dei quali 8 per ciascuna delle tre tipologie d'acciaio (sulla cui differente composizione vedi §4.1), tutti opportunamente numerati durante tutta la nostra indagine, come indicato nella **Tabella 3.1**.

Numero barrotto	Sgrossatura	Materiale	Mezzo temprante	Temperatura di rinvenimento
1	Sgrossati	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660
2			Acqua	580
3			Polimero	660
4			Polimero	580
5		30CrMo4/09	Acqua	660
6			Acqua	580
7			Polimero	660
8			Polimero	580
9		30CrMoV4/VG	Acqua	660
10			Acqua	580
11			Polimero	660
12			Polimero	580
13	Grezzi	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660
14			Acqua	580
15			Polimero	660
16			Polimero	580
17		30CrMo4/09	Acqua	660
18			Acqua	580
19			Polimero	660
20			Polimero	580
21		30CrMoV4/VG	Acqua	660
22			Acqua	580
23			Polimero	660
24			Polimero	580

Tabella 3.1. Tutti i simulacri sono stati numerati come indicato.

Dalla tabella si nota anche come una metà dei campioni sia stata temprata in acqua e metà in una soluzione polimerica (*aquaquench 352*, vedi **Appendice B.**) e come una loro parte sia stata sgrossata prima della tempra.

Dopo la tempra sono state eseguite delle prove di durezza Brinell sulla superficie, rimuovendo i primi millimetri di materiale, per avere una prima stima dell'effetto dei primi tre parametri sulle proprietà.



Figura 3.2. I simulacri d'anello in 30CrMo4

Successivamente metà dei pezzi è stata rinvenuta a 660°C e metà a 580°C.

Dopo il rinvenimento si è proceduto quindi con la caratterizzazione dei pezzi vera e propria.

Per prima cosa sono state effettuate ulteriori misure di durezza sui pezzi, sia in superficie che all'interno di una sezione trasversale di essi.

Inoltre, per quattro di essi opportunamente scelti, la misura è stata perfezionata con la raccolta di durezza Rockwell in diversi punti della sezione suddetta: l'intento era quello di ricavare un profilo di durezza e avere quindi un'idea della penetrazione della tempra, anche se, come detto, è stato possibile raccogliere i dati solamente a bonifica completata.

In contemporanea si sono ricavati, da ciascuno dei 24 simulacri, due provini per eseguire le prove di trazione (uno "a pelle" ed uno "a cuore", **Figura 7.3**) e sei provini (tre "a pelle" e "tre a cuore") per effettuare le prove di resilienza KV.



Figura 3.3. Da ciascuno dei 24 barrotti sono stati ottenuti due provini per trazioni e sei per test di resilienza

Sui provini utilizzati per le prove KV, oltre alla misura dell'energia assorbita nella rottura, si è misurata anche la dilatazione del provino nei pressi della frattura.

Quindi, a conclusione dell'indagine, è stata condotta un'analisi metallografica su due dei provini (uno a cuore e uno a pelle) sottoposti a test di resilienza per ciascuno dei 12 barrotti rinvenuti a 660 gradi (quelli con numero dispari).

Come già accennato, in questo lavoro saranno discussi i risultati delle prove di durezza e le micrografie, pur avendo cura di confrontarli e verificarli con quelli delle prove meccaniche, trattati da un altro studente.

Capitolo 4

I Parametri oggetto di studio

4.1 Le Composizioni

La normativa EN fornisce degli intervalli in cui deve rientrare la composizione dell'acciaio 30CrMo4. Oltre a queste, ASFO richiede ai fornitori ulteriori intervalli, più restrittivi, per le concentrazioni degli elementi più significativi (circa 13) nella colata fornita.

In seguito sono riportate le concentrazioni dei nostri acciai e gli intervalli detti.

Il carbonio equivalente (Ceq) è calcolato come: $C + Mn/6 + (Cr+V+Mo)/5 + (Ni+Cu)/15$.

Elementi	30CrMo4	30CrMo4 MOD/09	30CrMoV4 /VG	30CrMo4/09 (ASFO)	30CrMo4 MOD/09 (ASFO)	30CrMoV4 / VG (ASFO)	EN 10297-1- 2003
C	0.307	0.29	0,31	0.29 ÷ 0.33	0.28 ÷ 0.31	0.30 ÷ 0.33	0.27 ÷ 0.34
Si	0.31	0.28	0,30	0.25 ÷ 0.35	0.25 ÷ 0.35	0.25 ÷ 0.35	0.35 max
Mn	0.55	0.75	0,63	0.50 ÷ 0.60	0.70 ÷ 0.80	0.55 ÷ 0.70	0.35 ÷ 0.6
P	0.011	0.011	0.15	0.020 max	0.020 max	0.015 max	0.035 max
S	0.002	0.006	0.009	0.015 max	0.015 max	0.015 max	0.035 max
Cr	1.04	1.135	1.07	1.00 ÷ 1.10	1.00 ÷ 1.20	1.00 ÷ 1.20	0.9 ÷ 1.15
Mo	0.22	0.226	0.218	0.20 ÷ 0.25	0.20 ÷ 0.30	0.20 ÷ 0.25	0.15 ÷ 0.3
Ni	0.13	0.38	0.03	0.25 max	0.30 ÷ 0.50	0.25 max	-
Cu	0.17	0.21	0.04	0.25 max	0.25 max	0.25 max	-
V	0.006	0.007	0.038	0.03 max	0.03 max	0.03 ÷ 0.05	-
Nb	0.003	0.004	0.002	0.03 max	0.03 max	0.03 max	-
Al	0.030	0.034	0.032	0.025 ÷ 0.040	0.025 ÷ 0.040	0.025 ÷ 0.040	-
H2	1.00 ppm	1.4 ppm	1.30 ppm	2 ppm max	2 ppm max	1.5 ppm max	-
O2	-	-	3	-	-	30 ppm max	-
N2	58 ppm	82 ppm	112 ppm	-	-	100 ÷ 200 ppm	-
Ca/S	-	-	2.8	-	-	2 ÷ 3	-
Ceq	0.627	0	0.69	0.700 max	-	0.65 ÷ 0.83	-

Tabella 4.1. Composizioni dei tre tipi d'acciaio 30CrMo4 secondo i fornitori, intervalli di composizione richiesti da ASFO e normativa Europea

Nelle prime tre colonne vi sono le composizioni effettive degli acciai così come dichiarate dai fornitori: nella prima vi è il classico 30CrMo4 (che nel corso dell'analisi sarà indicato 30CrMo4/09), nella seconda vi è l'acciaio denominato 30CrMo MOD/09, in quanto si tratta di un 30CrMo4 'modificato', con una maggior concentrazione di nickel, e nella terza, il 30CrMoV4 indicato con '30CrMoV4/VG' per la maggior presenza di vanadio.

I fornitori dei tre materiali erano rispettivamente:

-*Acciaierie Bertoli Safau s.p.a.*, Pozzuolo del Friuli (UD) per il '30CrMo4/09'.

-*Acciaierie Venete s.p.a.*, Padova per il '30CrMo4 MOD/09'.

-*Trinecké Zelezárny a.s.*, Staré Mesto, Repubblica Ceca per il '30CrMoV4/VG'.

Nelle seconde tre colonne in tabella sono quindi riportate le composizioni richieste da ASFO e nell'ultima la composizione da normativa Europea.

Prima dell'analisi delle misurazioni raccolte è opportuno fare delle previsioni su come ci si aspetta che la presenza di questi elementi in lega vari le proprietà dell'acciaio.

Consideriamo il secondo acciaio, il 30CrMo4/MOD. Esso, che vanta una maggior presenza di Nickel, il quale, come pure il manganese, è un elemento austenitizzante, dovrebbe possedere una migliore temprabilità.

Ci si aspetta perciò che nel 30CrMo4 modificato la durezza e la resilienza siano elevate anche a cuore e che ivi, nelle micrografie, sia visibile una maggior presenza di martensite (che si ripresenterà rinvenuta a seguito del *martempering*).

Per quanto riguarda invece la terza tipologia d'acciaio, l'effetto del vanadio si manifesta in un'affinazione del grano. In effetti la misurazione del grano austenitico può essere realizzata tramite il test di Mcquaid-Ehn.

Questo test, che prevede la carburazione ad alte temperature per rendere visibili le zone a bordo grano, non è stato realizzato poiché alquanto dispendioso. Il grano austenitico è però stato misurato secondo normativa *ASTM E122*.

Test a parte, si prevede che proprietà conseguenti alla minor dimensione dei grani dovrebbero essere comunque riscontrabili nelle prove meccaniche in aumento dello sforzo di snervamento (rafforzamento di Petch-Hall). Infatti i bordi di grano impediscono il movimento delle dislocazioni e di conseguenza se il grano è piccolo è maggiore la densità di queste superfici a bordo grano ed il movimento delle dislocazioni è impedito, dovendo queste muoversi da un grano all'altro.

Un effetto secondario del vanadio è anche la diminuzione della temprabilità e, quindi, della durezza. Infatti l'accrescimento del grano è impedito poiché il vanadio forma un gran numero di carburi, questi ultimi, però, evidentemente sottraggono carbonio alla soluzione e quindi rendono meno diffusa la formazione della martensite responsabile della durezza (§7.1).

L'effetto si renderà particolarmente evidente osservando i risultati delle prove Jominy (§8.1).

4.1.1 Analisi con il quantometro



A verifica delle composizioni dichiarate dalle acciaierie, una volta eseguite le prove meccaniche, sono stati analizzati con il quantometro tre campioncini cilindrici ottenuti dalle teste di tre provini trazionati.

Queste analisi hanno fornito risultati positivi, nel senso che le composizioni non si discostavano molto da quelle dichiarate dalle tre acciaierie fornitrici.

Figura 4.1. Il quantometro con cui si è indagata la composizione. Si noti il contro elettrodo ed il campione di taratura



Figura 4.2. I tre campioni analizzati con il quantometro

Materiale	C	Mn	Si	P	S	Cr
30CrMo4 MOD/09	0,29	0,723	0,291	0,012	0,009	1,125
34CrMo4/09	0,306	0,537	0,344	0,012	0,005	1,031
30CrMoV4 VG	0,294	0,595	0,324	0,013	0,011	1,039
Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	Ceq
0,231	0,389	0,202	0,01	<0,001	0,04	0,723
0,221	0,127	0,174	0,009	<0,001	0,034	0,668
0,217	0,035	0,034	0,034	<0,001	0,038	0,656

Tabella 4.2. Composizioni dei tre acciai misurate con il quantometro.

4.2 La grossatura

Potrebbe sorprendere il fatto che la grossatura, ovvero la rimozione di uno strato superficiale del pezzo prima del trattamento termico, possa influenzare l'effetto di quest'ultimo.

Effettivamente è necessario considerare che prima del processo di tempra il materiale è stato

forgiato e, a causa dell'alta temperatura alla quale si svolge questo processo (1200°C) e del fatto che esso non può avvenire che in aria, la zona più superficiale si ossida e decarburata.

Un primo effetto della decarburazione è chiaramente la diminuzione della durezza in superficie: motivo per cui dopo tempra si è reso necessario asportare lo spessore di materiale più esterno per eseguire il test HB.

Un secondo effetto, invece, potrebbe manifestarsi durante la tempra stessa.



Figura 4.3. Un esempio di simulacro grossato

Infatti questo strato esterno sia possiede una conducibilità termica minore del materiale originale (80,2 W/(mK) per il ferro puro), sia impedisce lo scambio termico a causa della struttura della scoria.

Quest'ultima si presenta come una lamina non perfettamente aderente alla superficie, e fa in modo che rimanga fra essa e l'acciaio uno strato sottile occupato o da aria rimasta intrappolata o comunque da del fluido in cui, a causa dell'esiguo spessore, sono impediti la convezione e lo scambio termico con il liquido circostante.

Ci si aspetta quindi che la tempra sia un po' meno drastica nei pezzi grezzi che non in quelli sgrassati, in cui questo strato è stato rimosso.

4.3 Il mezzo di spegnimento

Per avere un'idea anche di come la tempra sia differente in funzione del mezzo di spegnimento, metà dei pezzi sono stati spenti in due fluidi differenti a disposizione dell'azienda: una parte in acqua ed una nella soluzione acquosa polimerica *aquaquench 352* della *Houghton* a base di polialchilenglicoli.



Figura 4.4. Vasca contenente la soluzione polimerica di *aquaquench 352*

Il secondo costituisce un mezzo di spegnimento particolarmente interessante (Vedi **Appendice B.**). Infatti i polialchilenglicoli sono sostanze che divengono insolubili in acqua al di sopra di 75°C circa, perciò la velocità di raffreddamento subisce durante il trattamento notevoli variazioni.

E' possibile dividere il raffreddamento in tre fasi distinte.

Negli istanti successivi all'immersione del pezzo, la soluzione, a contatto con il metallo rovente, si trova ad una temperatura superiore a quella d'inversione della solubilità, per cui uno strato polimerico si deposita sul pezzo rallentando notevolmente l'asportazione del calore.

In seguito il polialchilenglicole si attiva e la

temperatura scende velocemente, permettendo così di evitare la formazione di bainite.

Nella terza fase quindi, quando la temperatura scende al di sotto di 75°C, lo strato polimerico si ridiscioglie e il raffreddamento prosegue lentamente per convezione.

Lo spegnimento in acqua invece è più drastico. Inizialmente si forma uno strato di vapore aderente al pezzo che rallenta lo scambio termico, quest'ultimo, però dopo qualche istante si suddivide in bolle che si distaccano dalla superficie e la velocità di raffreddamento diviene molto elevata e solo a basse temperature infine termina per convezione.

Per quanto detto, ci si aspetta che nella soluzione polimerica la tempra sia in generale meno drastica che non nell'acqua pura.

Da ciò l'attesa che i pezzi temprati in acqua possiedano migliori proprietà meccaniche.

Entrambe le vasche contenenti il bagno di tempra erano provviste di agitatore al fine di migliorare lo scambio termico fra il fluido ed il pezzo immerso.

4.4 La temperatura di rinvenimento

Il rinvenimento, come noto, è un trattamento termico effettuato dopo la tempra che si prefigge come scopo il raggiungimento di una microstruttura particolarmente tenace e resiliente che è la martensite rinvenuta, o sorbite.

Questo trattamento permette in questo modo di ridurre le tensioni presenti ed eliminare la fragilità del semilavorato assoggettato a tempra, caratteristiche dovute essenzialmente alla presenza della costituente microstrutturale martensitica, oltre che agli stress originati nell'acciaio dagli elevati gradienti di temperatura propri dello spegnimento e dalle tensioni originate dalla trasformazione strutturale.

Chiaramente, con la decomposizione della martensite, assieme alla fragilità diminuisce molto anche la durezza, la quale però in queste tipologie d'acciaio è di secondaria importanza rispetto alle altre proprietà meccaniche summenzionate .

La temperatura a cui si effettua il rinvenimento, sempre minore di A_{c1} onde evitare la riformazione dell'austenite, va scelta con cura in quanto deve essere sufficientemente alta da permettere di ripristinare la diffusione nel metallo, ma allo stesso tempo non troppo elevata, per evitare un'eccessiva coalescenza dei carburi, i quali devono invece presentarsi finemente dispersi, come tipico della sorbite.

Il rinvenimento è quindi una fase fondamentale del trattamento termico.

Temperature di rinvenimento	580°C	660°C
R_s (N/mm ²)	> 690	>550
R_m (N/mm ²)	800-1000	680-850
A (%)	>15	>15
KV (J)	> 40	>40
HB10	250-300	200-280

Nel caso in esame le due temperature di rinvenimento sono state 580°C e 660°C: quelle che l'azienda utilizza usualmente per ottenere due diverse proprietà dei pezzi.

Infatti generalmente le specifiche richieste dai clienti per questo materiale consistono essenzialmente in due diversi intervalli (**Tabella 4.3**), in cui ASFO riesce a rientrare facendo uso di queste due diverse temperature.

Tabella 4.3. Richieste abituali dei clienti con le due temperature di rinvenimento

Tutto ciò è risultato valido però limitatamente al caso di pezzi sgrassati e temprati in acqua.

Il fine dello studio consiste nella verifica se le proprietà ottenute variando gli altri parametri oggetto di studio possano risultare ugualmente soddisfacenti.

Avendo a disposizione solamente due temperature quindi, non ci si deve aspettare la costruzione di una curva di rinvenimento (**Figura A.2**).

Nonostante ciò, confrontando i diversi effetti delle due temperature (peraltro molto diversi), si cercherà almeno di fornire un'idea di quanto questa variabile sia influente.

Possiamo senz'altro prevedere che i barrotti rinvenuti a 580°C siano più duri e meno resilienti di quelli rinvenuti a 660°C, i quali avranno ridotto gli effetti della tempra a causa della temperatura più elevata.

Capitolo 5

Il trattamento termico

5.1 La tempra

Come noto, la tempra applicata agli acciai speciali da costruzione, consiste nell'abbassarne rapidamente la temperatura, portandoli dal campo austenitico (generalmente 50°C di sopra Ac3) sino alla temperatura ambiente. Il fine della tempra, in questo caso, era la formazione del costituente micro strutturale metastabile martensitico, necessario per il conseguimento della microstruttura sorbitica dopo rinvenimento (§ 4.4).

Il trattamento termico è cominciato riponendo i pezzi da temprarsi in acqua od in polimero su due bancali differenti ed inserendoli in forno.

La temperatura del forno è indicata nella **Figura 5.1**.

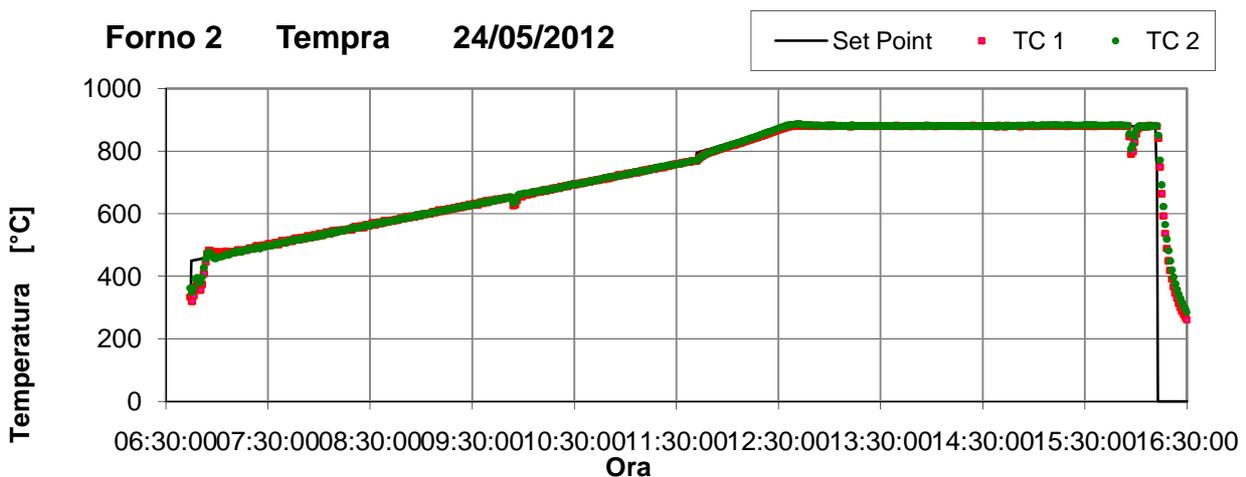


Figura 5.1. Andamento in funzione del tempo della temperatura del forno in cui i 24 simulacri sono stati austenitizzati per la tempra

I pezzi hanno raggiunto la temperatura di 880°C dopo le 12.30 e l'hanno mantenuta per più di tre ore. La diminuzione di temperatura verso le ore sedici è dovuta all'apertura del forno per l'estrazione del primo bancale contenente i pezzi da temprare in acqua.

L'abbassamento di temperatura finale invece coincide con l'estrazione dei pezzi successivamente temprati in polimero.

Il passaggio dal forno alle vasche di tempra è stato il più rapido possibile ovviamente: il tempo è stato circa di 1'10" (di cui 30" erano impiegati per l'apertura del forno).

La temperatura dei pezzi, rilevata con il pirometro ottico, era di circa 880°C all'uscita dal forno (880°C per il bancale spento in acqua e 878°C per quello spento in polimero) e di circa 845°C prima dell'immersione nel bagno (847°C per l'acqua e 842°C per il polimero).

Il tempo di permanenza in acqua, secondo regole sperimentali, è di circa 1' ogni 10 mm di spessore.



I barrotti temprati in acqua dopo 13' sono stati estratti dalla vasca alla temperatura di 30°C, mentre quelli in polimero sono stati tolti dopo 20' e si trovavano a 22°C.

Figura 5.2. 12 simulacri roventi pochi istanti prima di essere spenti in acqua.

Le temperature dei due fluidi sono state le seguenti (**Figura 5.3**).

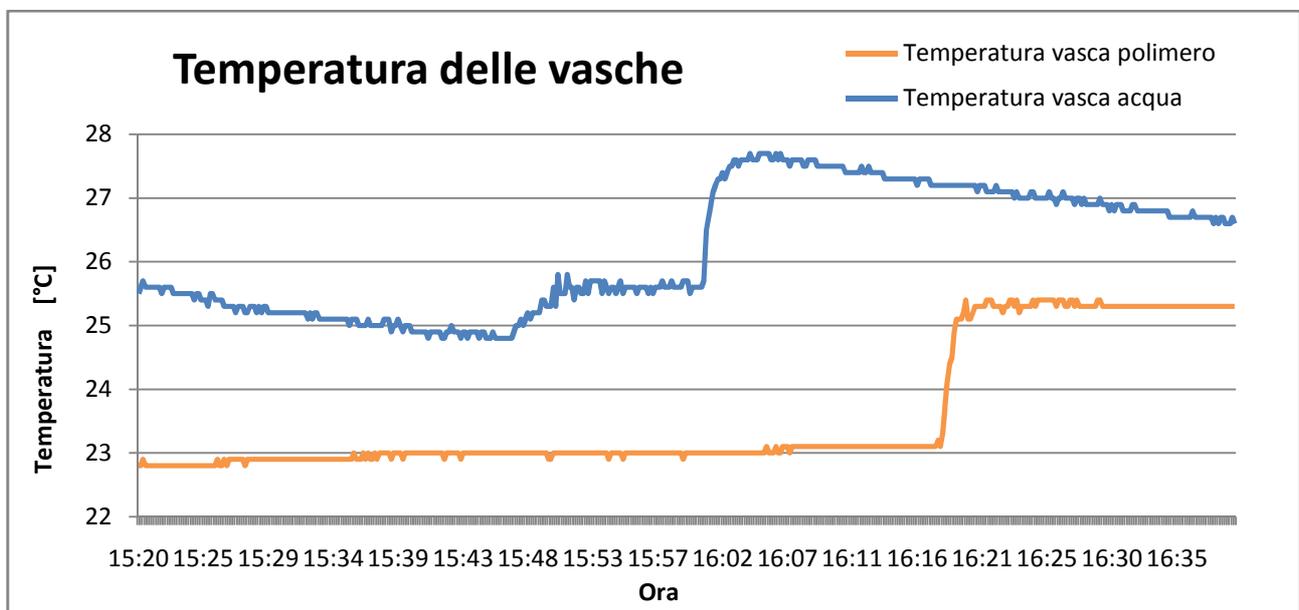


Figura 5.3. Andamento in funzione del tempo della temperatura delle vasche ove è avvenuta la tempra.

5.2 Il rinvenimento

Per completare il trattamento termico di bonifica, alla tempra è seguito il rinvenimento. Quest'ultimo è stato effettuato mantenendo per cinque ore i pezzi alle temperature di 580°C e 660°C.

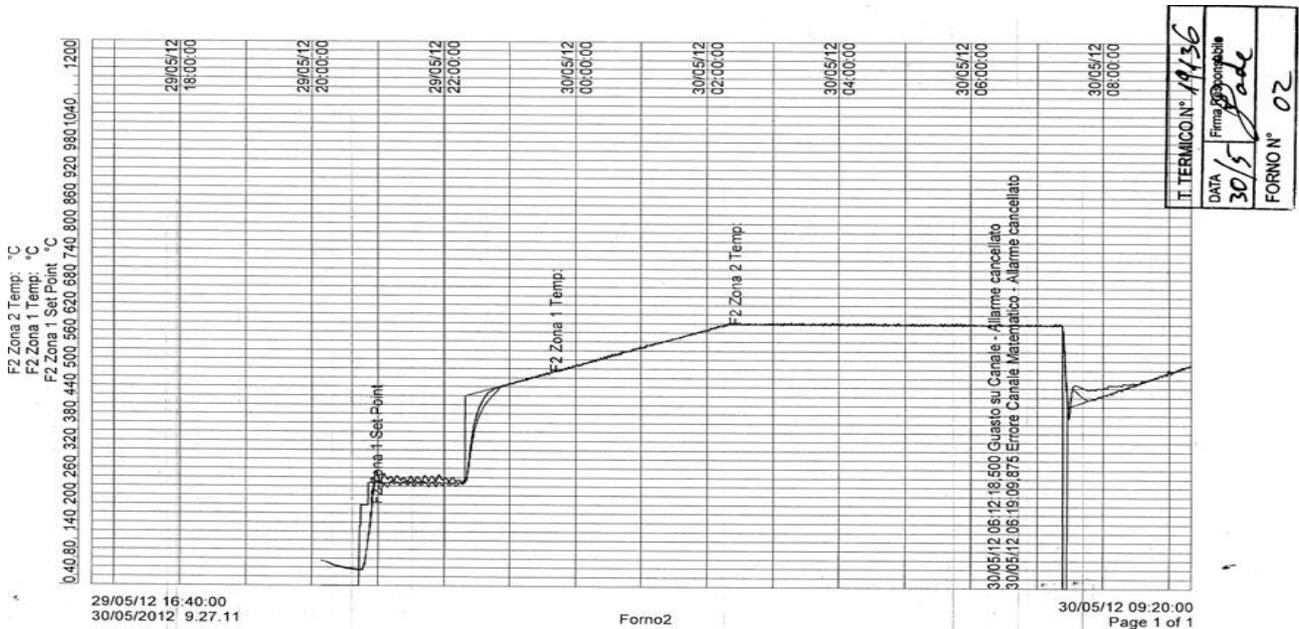


Figura 5.4. Andamento in funzione del tempo della temperatura del forno ove è stato effettuato il rinvenimento a 580°C Il grafico, come pure il seguente, è stato fornito da ASFO così com'è poiché la termocoppia del forno è collegata ad un pennino che segna continuamente su di un rullo di carta la temperatura. La curva che ne deriva è proprio questa sopra esposta.

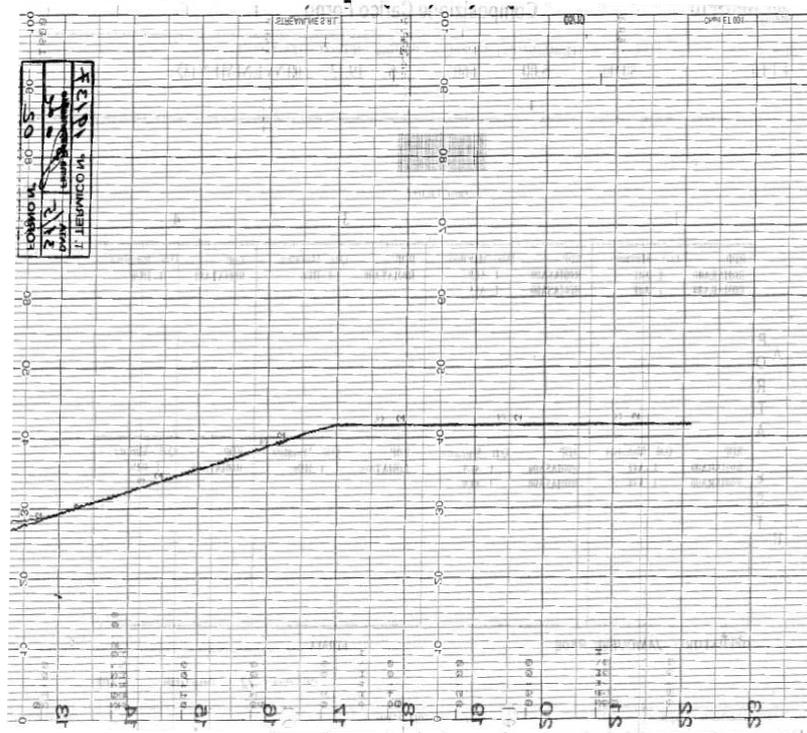


Figura 5.5. Andamento in funzione del tempo della temperatura del forno ove è stato effettuato il rinvenimento a 660°C.

Gli effetti del rinvenimento sulla microstruttura dell'acciaio, dovuti al ripristino della diffusività del carbonio nel metallo, nel nostro caso si possono riassumere nella decomposizione della martensite e nella coalescenza di sferoidi di cementite, che originano nel loro insieme la sorbite di rinvenimento. La sorbite è una struttura omogenea e fine, caratterizzata da carburi a morfologia globulare e con ottime caratteristiche globali di tenacità. E' proprio questo costituente strutturale che si mira ad ottenere con il trattamento termico.

5.3 Controllo del processo

Per le misurazioni delle condizioni al contorno in cui si è svolto il trattamento termico si è fatto uso diversi strumenti.

Per quanto riguarda la temperatura del forno, questo era dotato di un termometro a termocoppia che ne monitorava la temperatura in continuo.

Una termocoppia è stata pure utilizzata per controllare la temperatura dei bagni di tempra ove è stato eseguito lo spegnimento.

Le termocoppie erano di tipo K, ovvero sensori che sfruttano la differenza di potenziale che si instaura per effetto Seebeck fra *Chromel* (Ni-Cr) e *Alumel* (Ni-Al).

Inoltre, come accennato, è stata misurata la temperatura dei pezzi al di fuori del forno tramite un pirometro ottico.

Il tempo trascorso fra l'estrazione dal forno e lo spegnimento è stato da noi cronometrato.

Per quanto riguarda invece la concentrazione della soluzione d'*aquaquench 352*, pari al 10%, quest'ultima è stata ricavata in maniera indiretta tramite tabelle di conversione fra viscosità e concentrazione nella soluzione acquosa.



Figura 5.6.
Viscosimetro con cui si è analizzato l'*aquaquench 352*

Per ciò è stata misurata la viscosità del polimero tramite un viscosimetro che prevedeva di cronometrare il tempo per cui il polimero percorreva un tratto di capillare, il quale era mantenuto in un bagno d'acqua termostata alla temperatura di cento gradi.

Per il range di concentrazioni d'interesse si è fatto riferimento all'equazione 5.1 che lega linearmente viscosità cinematica (ν) e tempo di percorrenza del capillare (t):

$$\nu = 0,156 \times t. \quad (5.1)$$

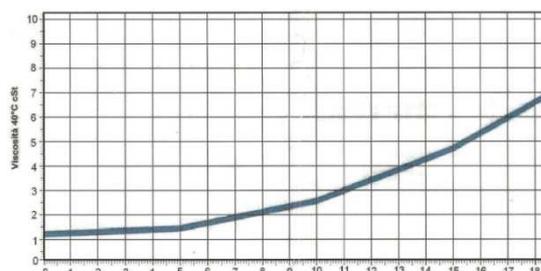


Figura 5.7.
Relazione fra viscosità e concentrazione percentuale della soluzione acquosa di *aquaquench 352*

Capitolo 6

Le analisi metallografiche

Le analisi metallografiche sono state eseguite su due dei sei provini di resilienza ricavati da ciascun materiale.

Un provino era scelto fra i tre prelevati a cuore ed uno fra i tre ottenuti a pelle, ovvero nei pressi della superficie del pezzo: per la posizione di queste due zone si faccia riferimento alla **Figura 7.3**. I campioni osservati sono stati solamente quelli rinvenuti a 660°C (ovvero quelli con numero dispari).

Innanzitutto è stata lucidata una delle facce laterali del provino (di forma circa di un parallelepipedo). Poiché il provino ricavato ed il barrotto, entrambi, come detto, parallelepipedi, avevano fra loro la stessa orientazione, la faccia lucidata possiede la propria direzione maggiore parallela a quella maggiore del barrotto, quest'ultima da considerarsi a sua volta tangente all'anello primitivo da cui è stato ricavato (**Figura 3.1**).



Figura 6.1. Superficie dei campioni lucidata per l'attacco metallografico.

La lucidatura è stata effettuata levigando la superficie per mezzo di carte abrasive con progressivamente minore ruvidità (dai 1000 μm ai 120 μm) sino a concludere con due panni su cui vi erano particelle di dimensione di 6 μm e 3 μm .

La superficie, divenuta lucente, è stata quindi attaccata con il *Nital*, una soluzione al 2% di acido nitrico ed alcool etilico, per 10 secondi.

Il pezzo infine, ripulito con alcool etilico ed aria compressa pulita, è stato osservato al microscopio ottico.

Essendo quest'ultimo collegato ad un computer, abbiamo potuto digitalizzare delle immagini, che abbiamo registrato con tutti i diversi ingrandimenti del microscopio: dai 25x ai 1000x.



Figura 6.3. Analisi dei campioni al microscopio ottico

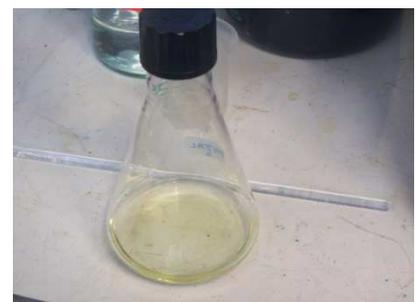


Figura 6.2. Ampolla in vetro contenente 'Nital', soluzione di acido nitrico ed alcool etilico

6.1 Osservazioni

Una prima interessante osservazione, visibile anche ad occhio nudo, ma ben apprezzabile con bassi ingrandimenti, è stata la presenza di fasce scure longitudinali più o meno fitte in tutti i provini ricavati a cuore (**Figura 6.4**).

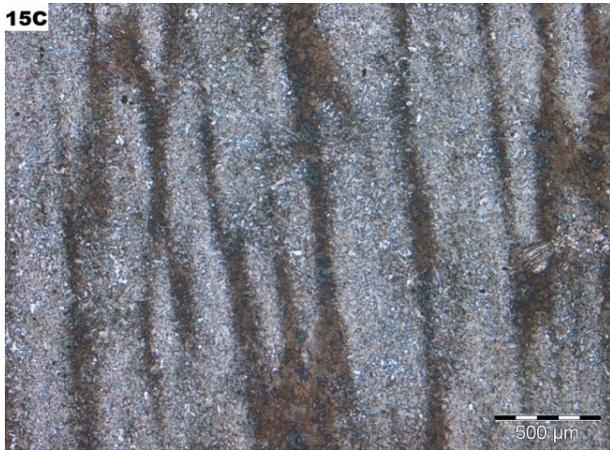


Figura 6.4. Micrografia 25x del simulacro n.15

Queste bande, visibili dopo l'attacco, stanno ad indicare una segregazione del carbonio. Infatti le zone meno ricche in carbonio vengono ossidate di più dall'acido rispetto alle zone più ricche. Queste segregazioni sono riconducibili ad una non perfetta diffusione durante la trasformazione peritettica.

Ciò è particolarmente degno di nota in quanto ci si aspettava che a seguito delle alte temperature di forgiatura e del trattamento termico, le segregazioni venissero meno.

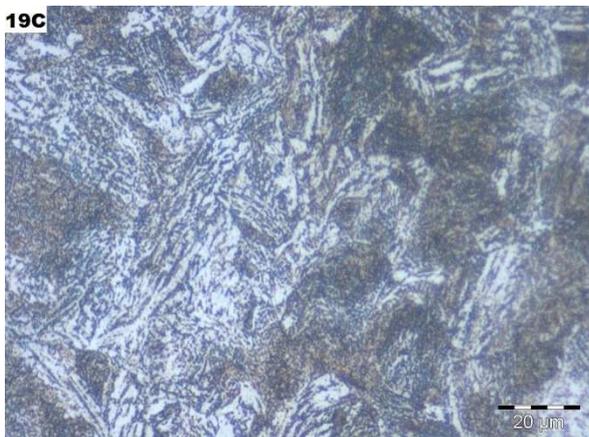
Notiamo anche che le bande sono dirette parallelamente alla dimensione maggiore del

provino e del barrotto: quindi erano in direzione tangente all'anello primitivo.

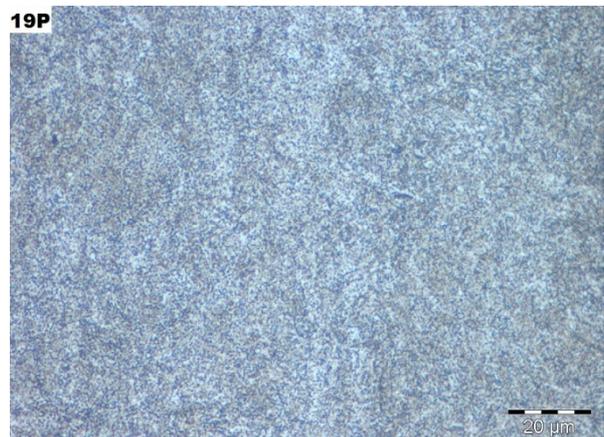
Esse dunque state stirate durante il processo di laminazione.

Osservato questo, ci si è concentrati sulla struttura ad ingrandimenti maggiori, trovando per i pezzi la presenza di sorbite rinvenuta ma anche di carburi, perlite e persino di ferrite.

Sono quindi state confrontate fra loro le immagini dei diversi pezzi, evidenziando innanzitutto una grande differenza fra le micrografie a cuore e quelle in pelle (**Figura 6.5**).



(a)



(b)

Figura 6.5. Micrografie 25x del simulacro n.19 a cuore (a) e a pelle (b)

In primo luogo in pelle sono meno visibili le segregazioni, molto evidenti invece a cuore. Inoltre in pelle la microstruttura appare più omogenea e in gran parte costituita da sorbite, mentre a cuore notiamo forti eterogeneità, con perlite, carburi e zone di ferrite.

Quindi abbiamo cercato le differenze fra i pezzi grezzi e quelli sgrossati.

Per quel che riguarda le immagini raccolte sui provini ottenuti a cuore, non vi sono state grosse differenze.

Differenze però molto più accentuate a pelle, ove i pezzi sgrossati presentano una struttura meno uniforme dei grezzi (**Figura 6.6**).

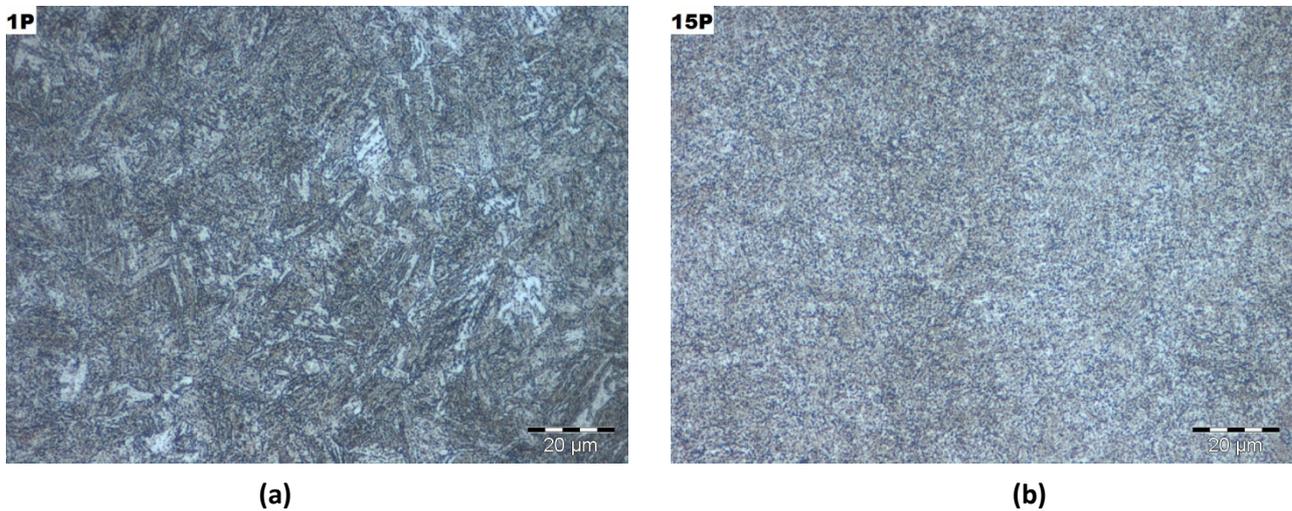


Figura 6.6. Micrografie 500x a pelle dei pezzi n.1 sgrossato (a) e n.15 grezzo (b)

Considerando i tre tipi di materiale vi erano pure delle differenze.

Innanzitutto il 30CrMoV4/VG, a causa della grana ridotta, presentava molto meno l'effetto delle segregazioni di carbonio. Ciò è evidente nelle immagini seguenti (**Figura 6.7**), in cui si nota anche una struttura più raffinata nel 30CrMo4 modificato al nickel rispetto quella presente nel 30CrMo4 non modificato.

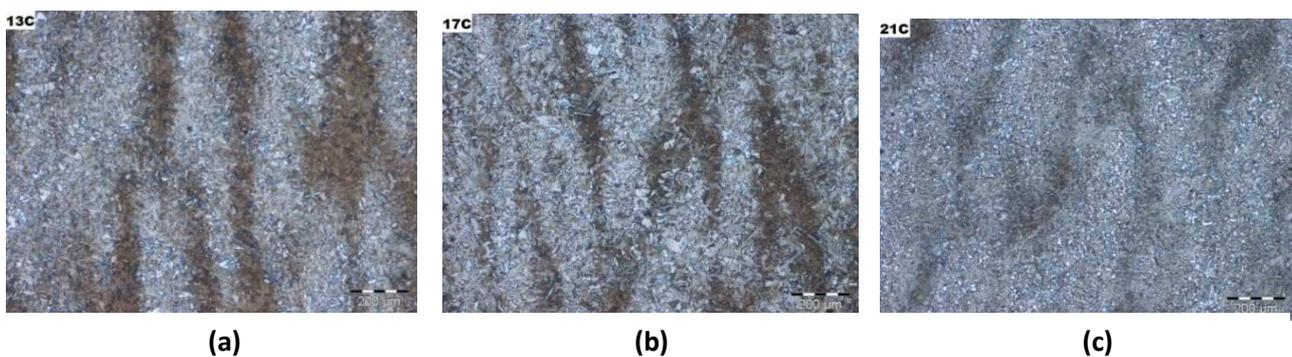


Figura 6.7. Micrografie 50x a cuore dei pezzi n.13 in 30CrMo4/MOD (a), n.17 in 30CrMo4 (b) e n.21 in 30CrMoV4/VG(c).

Inoltre nei simulacri in 30CrMoV4, ed in particolare in quelli sgrossati, si è notata la presenza di numerose isole ferritiche (**Figura 6.8** (c)).

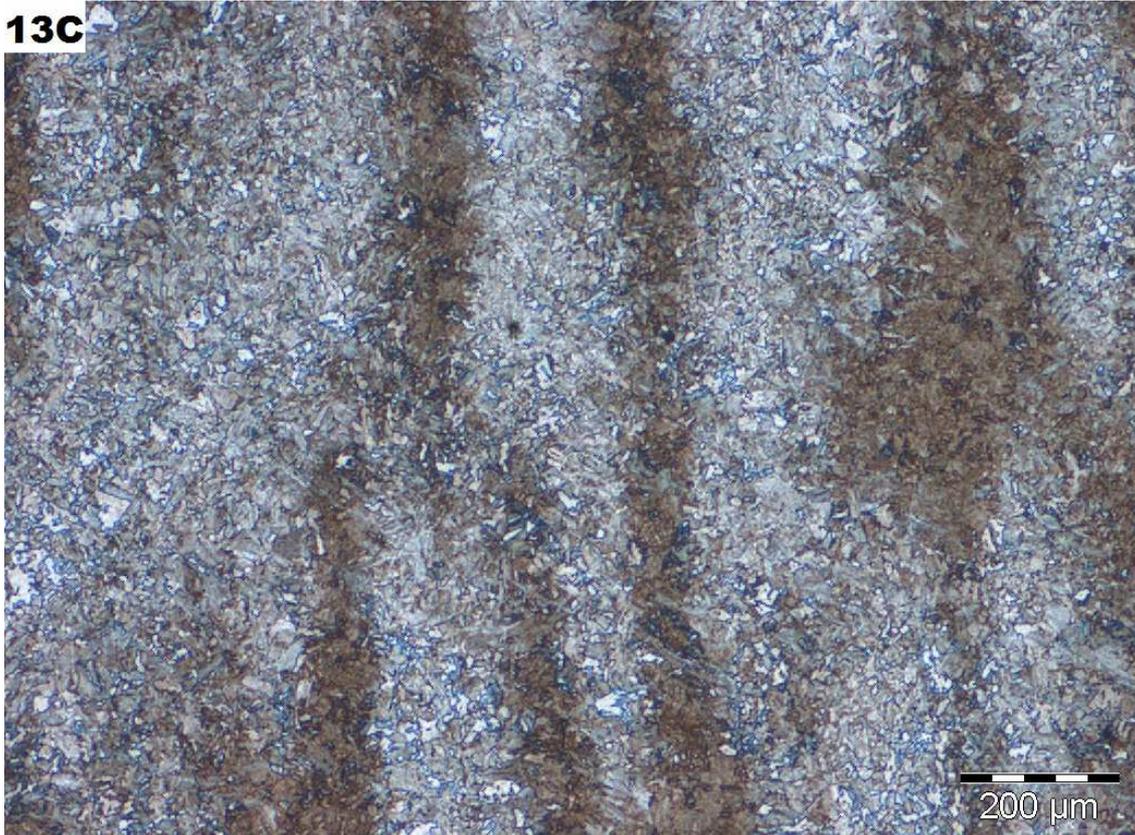


Figura 6.8. (a) *Micrografia 100x a cuore dei pezzi n.13 in 30CrMo4 modificato al nickel*

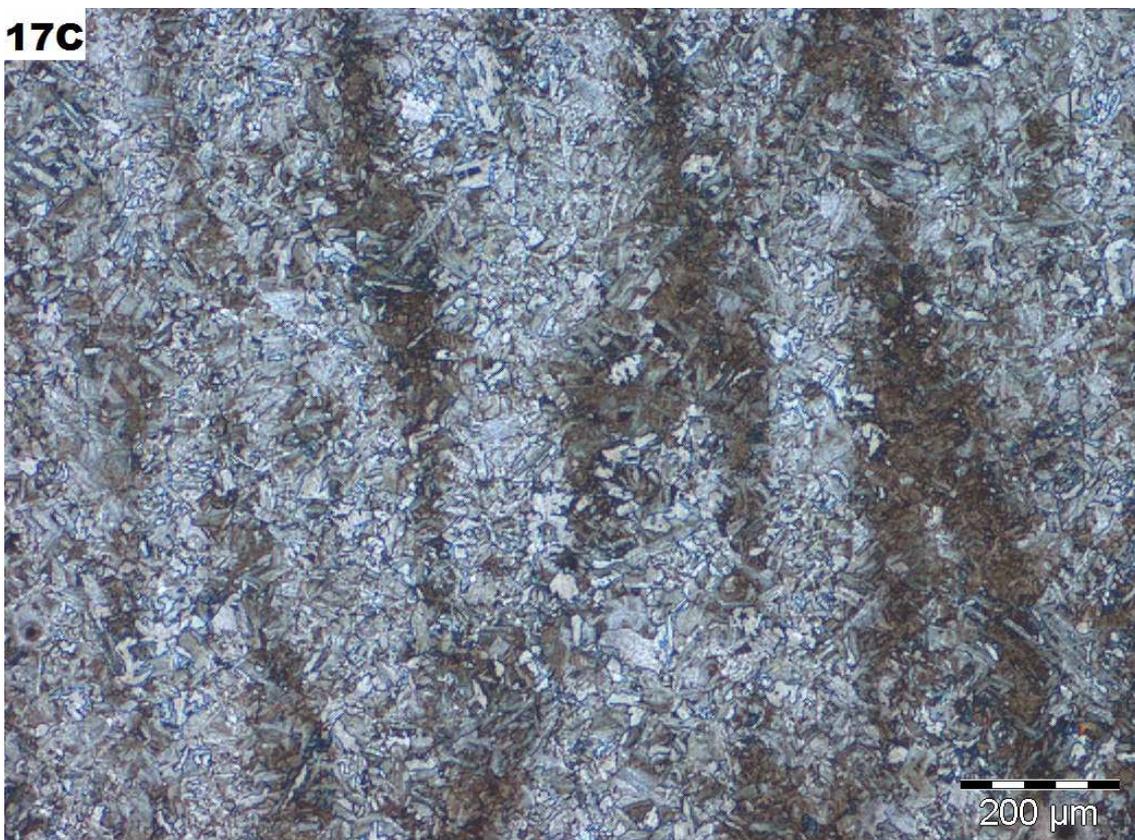


Figura 6.8. (b) *Micrografia 100x a cuore del pezzo n.17 in 30CrMo4 'standard'*

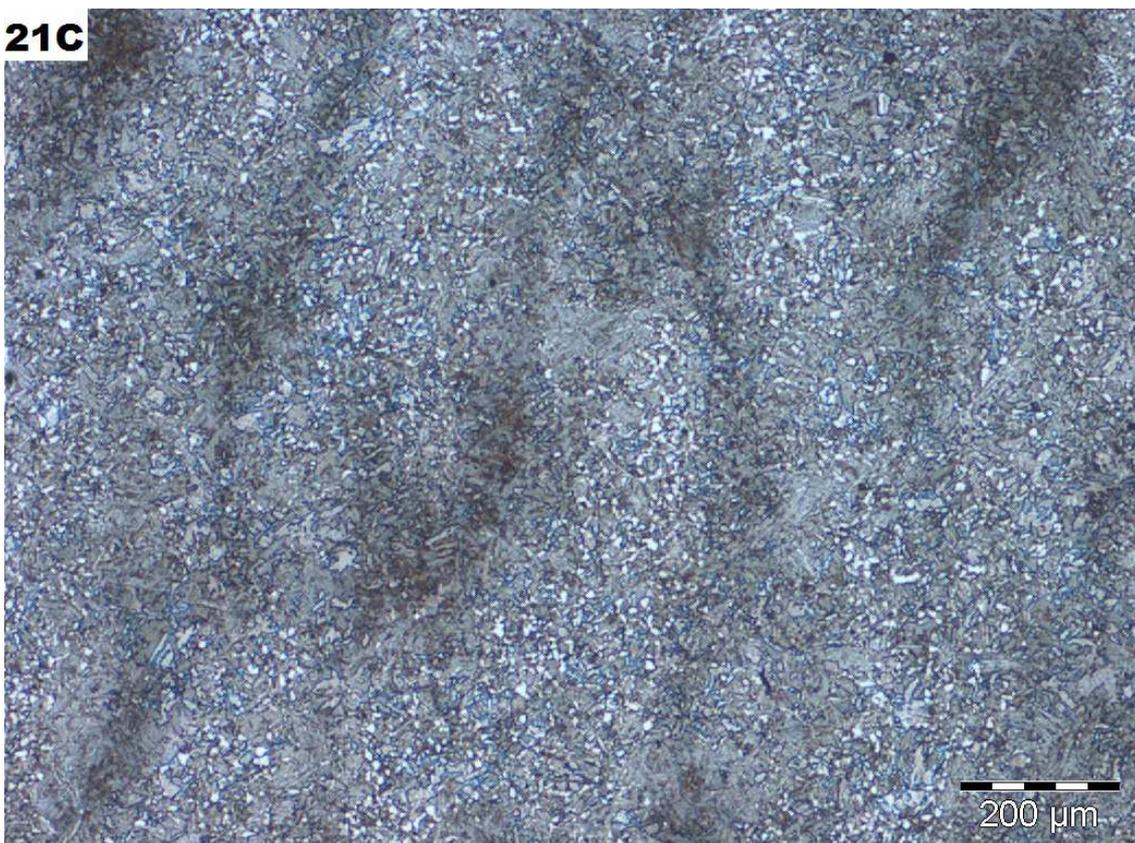
21C

Figura 6.8. (c) *Micrografia 100x a cuore del pezzo n.21 in 30CrMoV4/VG, oltre alla presenza d'isole ferritiche, si noti ancora la struttura più omogenea rispetto agli altri due acciai dovuta all'affinazione del grano operata dal vanadio.*

Infine abbiamo confrontato fra loro le strutture di pezzi temprati in acqua ed in polimero (**Figura 6.9**), non trovando però differenze significative.

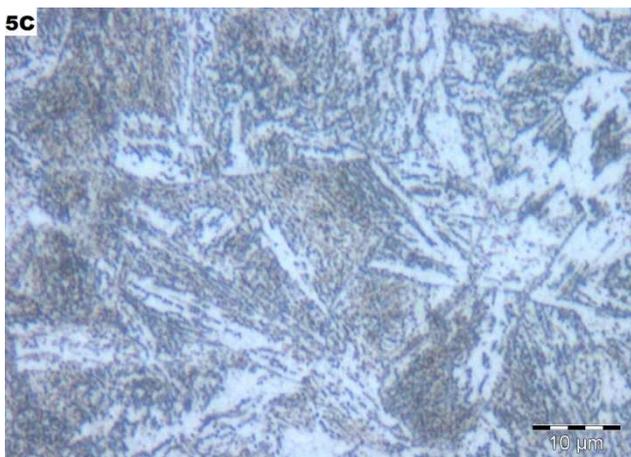
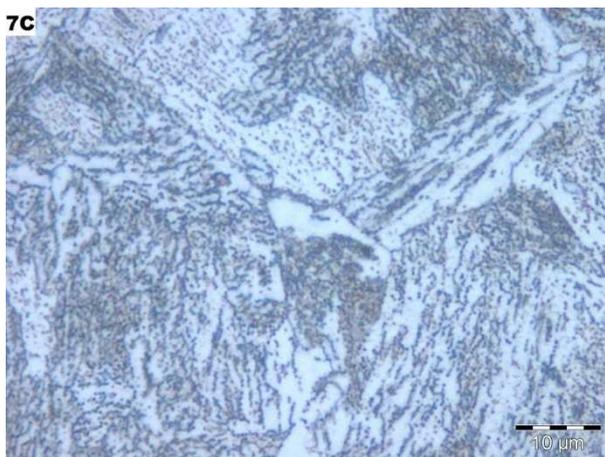
5C**(a)****7C****(b)**

Figura 6.9. *Micrografia 1000x a cuore dei pezzi n.5 e n.7, entrambi in 30CrMo4 standard sgrossati e temprati in acqua (a) e polimero (b)*

6.2 La misura del grano austenitico

Per verificare l'effetto d'affinazione del grano operato dal vanadio, si è proceduto alla misurazione del grano austenitico sui provini delle prove di resilienza KV ricavati a cuore dei simulacri n.1, n.5 e n.9, ovvero su di un provino per tipologia d'acciaio (**Tabella 3.1**).

Ai fini della determinazione delle dimensioni è stata seguita la normativa *ASTM E112*.

Il metodo ha previsto che il campione, opportunamente lucidato come fatto nelle micrografie, venisse ossidato.

Per questo è stato riscaldato in presenza d'aria in un fornello a 880°C per un'ora circa.

Il campione quindi, dopo essere stato raffreddato in acqua, è stato ripassato ai panni ed attaccato con *Vilella* (soluzione di acido picrico, acido cloridrico ed alcool) per 10 secondi.

Per la valutazione si è confrontata la micrografia a 100x con le immagini in **Tabella 6.1**.

Si è trovato che la dimensione dei grani era di 9 per il 30CrMo4 ed il 30CrMo4/MOD, e di 8,5 per il 30CrMoV4.

Nelle **Figure 6.10, 6.11 e 6.12** sono riportate le tre micrografie acquisite .

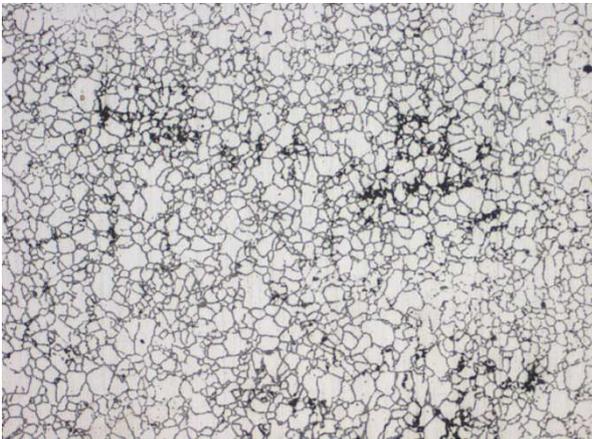


Figura 6.10. Micrografia 100x a cuore del pezzo n.1 in 30CrMo4/MOD

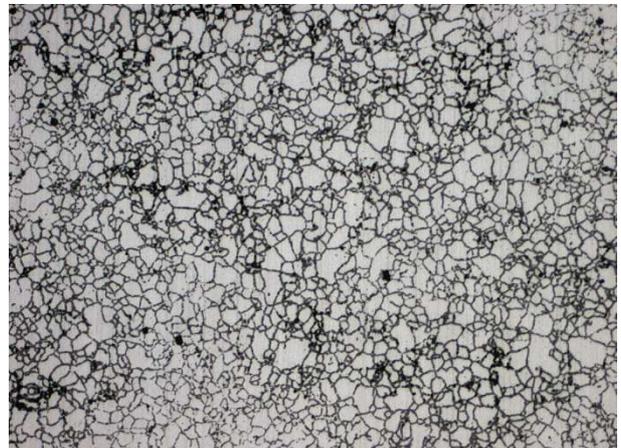


Figura 6.11. Micrografia 100x a cuore del pezzo n.5 in 30CrMo4 standard

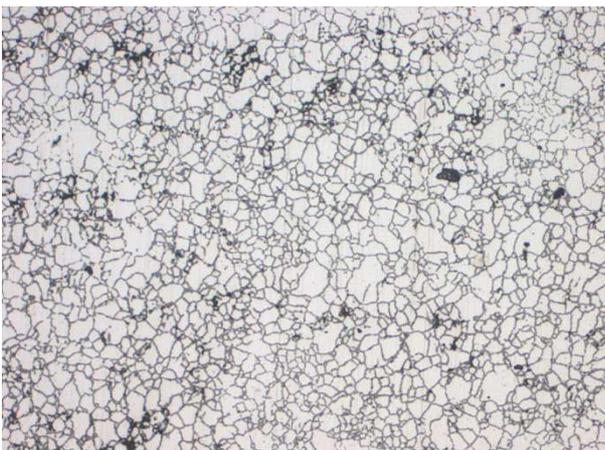


Figura 6.12. Micrografia 100x a cuore del pezzo n.9 in 30CrMoV4/VG

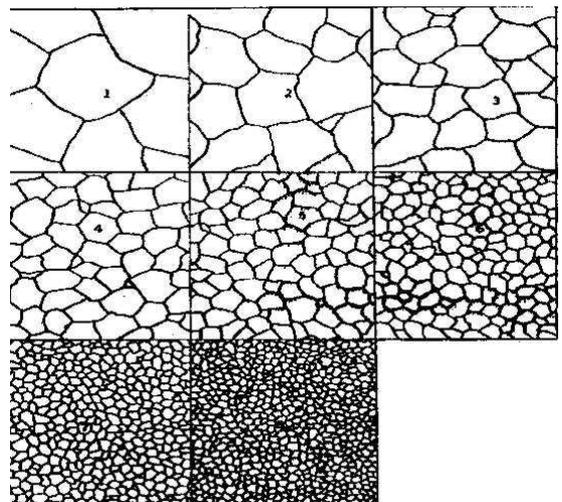


Tabella 6.1. Immagini a 100x di grani austenitici a dimensione decrescente

Capitolo 7

Le prove di durezza

Per la misura delle durezza superficiali è stato utilizzato un durometro Brinell portatile della *King Tester Corporation*.



Per effettuare la prova è stata prima abrasa con una fresa la superficie del materiale nel punto ove era da effettuarsi la durezza Brinell (lo spessore rimosso era dell'ordine dei millimetri), quindi si è applicato per quindici secondi un carico di 3000 Kg tramite una sfera d'acciaio del diametro di 10 mm.

Si è quindi provveduto a leggere le dimensioni dell'impronta con un oculare a dieci ingrandimenti che, oltre ad ingrandire l'immagine, vi sovrapponeva una linea graduata su cui leggerne la lunghezza del diametro. La misura era eseguita su due diametri ortogonali fra loro per una maggior accuratezza del risultato. La dimensione dell'impronta è stata poi convertita in durezza Brinell tramite apposite tabelle di conversione.

Figura 7.1.

*Durometro
Brinell portatile
'King'*

Abbiamo controllato le durezza sia subito dopo la tempra che dopo il rinvenimento. Nel primo caso le misure sono state effettuate solamente su metà dei pezzi

(12), in quanto la differenziazione dovuta alla temperatura di rinvenimento era ancora da effettuarsi, e di conseguenza abbiamo risparmiato altre dodici misurazioni.

Per ogni simulacro però abbiamo compiuto due misurazioni: una in prossimità dello spigolo ed una nella parte centrale del pezzo (vedi **Figura 7.3**). Anticipiamo che fra le due misurazioni i risultati sono pressoché uguali, anche se generalmente i valori di durezza nei pressi dello spigolo sono lievemente superiori: segno di una maggior effetto della tempra in quest'ultimo caso.

Dopo il rinvenimento abbiamo rieseguito su tutti i 24 simulacri le stesse due misurazioni, sempre abradando qualche millimetro di materiale superficiale.

Accanto a queste però, essendo ormai possibile sezionare i pezzi per ricavare i campioni per le prove meccaniche, abbiamo eseguito altre due Brinell nella sezione centrale del barrotto, una presso il centro ("cuore") ed una a pochi centimetri dalla superficie ("pelle").

Ai fini dell'identificazione delle posizioni si faccia sempre riferimento alla **Figura 7.3**.



Figura 7.2. Esempio dell'impronta lasciata dalla sfera Brinell sulla superficie abrasa di un simulacro

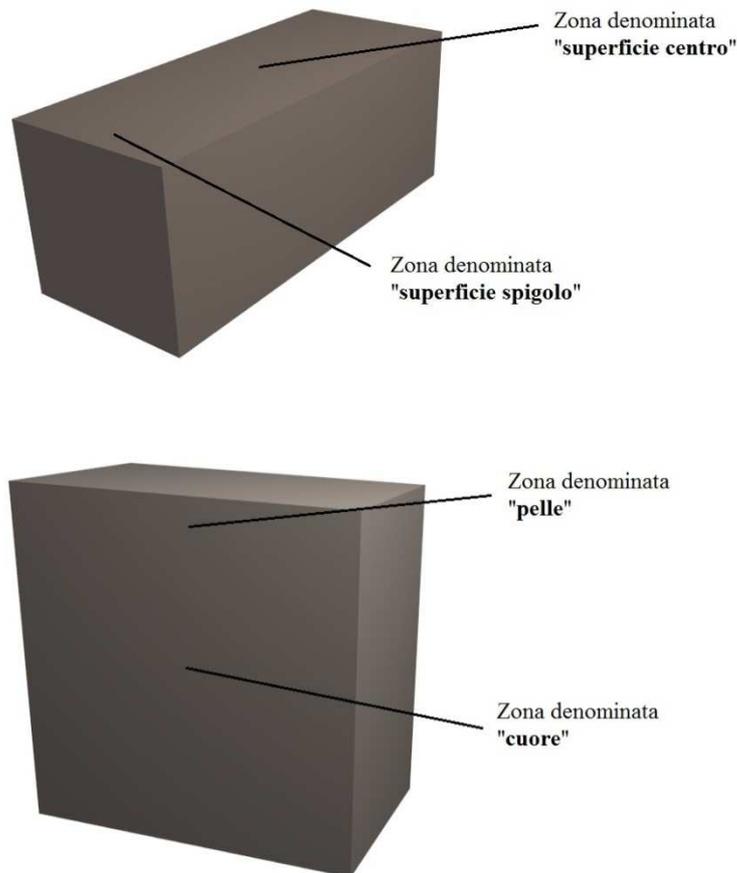


Figura 7.3. Posizioni rispettivamente del simulacro intero e sezionato ove sono state compiute le misurazioni di durezza Brinell. Le zone “pelle” e “cuore” sono anche quelle ove si sono ricavati i provini per le prove meccaniche.

In quest’ultimo caso, ovvero per le misure a pelle e a cuore, l’impronta è stata ottenuta con una macchina della *Metrocom* (modello B73-L6) da considerarsi statica, a differenza delle *Brinell King* portatili che, dato il loro peso contenuto (circa 15 kg) e le dimensioni ridotte, possono essere utilizzate in modo molto più versatile.

Gli operatori ASFO testano abitualmente mediante l’uso del *Metrocom* barrotti e/o parti di anello (provini) staccati dai pezzi di produzione.

L’operazione di carico/scarico è sempre di tipo manuale e poco differente da quella effettuata per il durometro portatile.

Per la misurazione, si carica il pezzo sulla tavola porta-pezzo, si avvicina quest’ultimo alla sfera (penetratore) portandolo in appoggio, si rilascia la leva che, mediante i leveraggi della macchina combinati con i pesi posti dietro la stessa, imprime un carico di 3000 kg.

L’operatore lascia agire il carico per un tempo di circa 15 secondi e successivamente lo rimuove riportando la leva nella posizione iniziale.

Infine si passa al controllo dei 2 diametri dell’impronta ottenuta per poi determinare la durezza del pezzo.

Anche questo strumento, secondo quanto prescritto dalle procedure ASFO, è sottoposto a taratura e a periodici controlli di verifica di funzionamento.

In seguito sono riportati nel complesso tutti i valori di durezza Brinell ricavati dopo la tempra e dopo il rinvenimento (**Figure 7.4 e 7.5**)

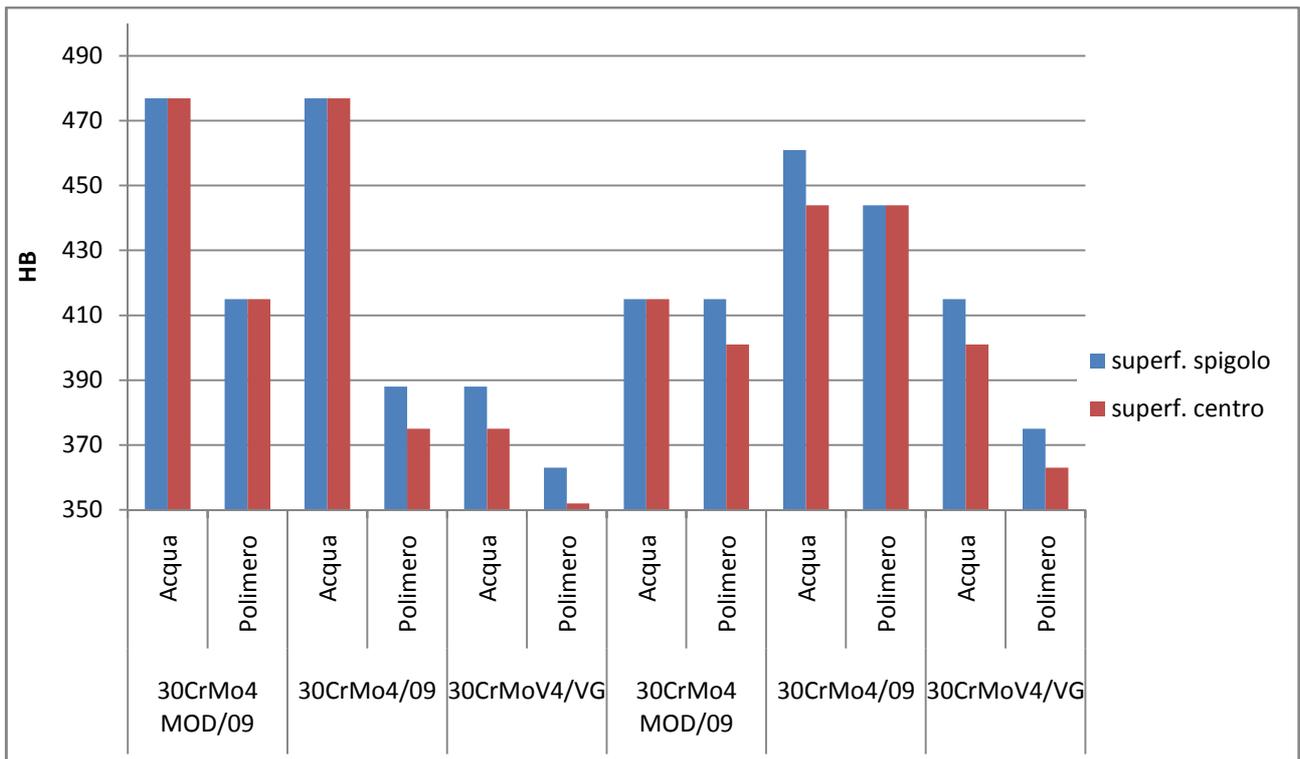


Figura 7.4. Durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo la tempra

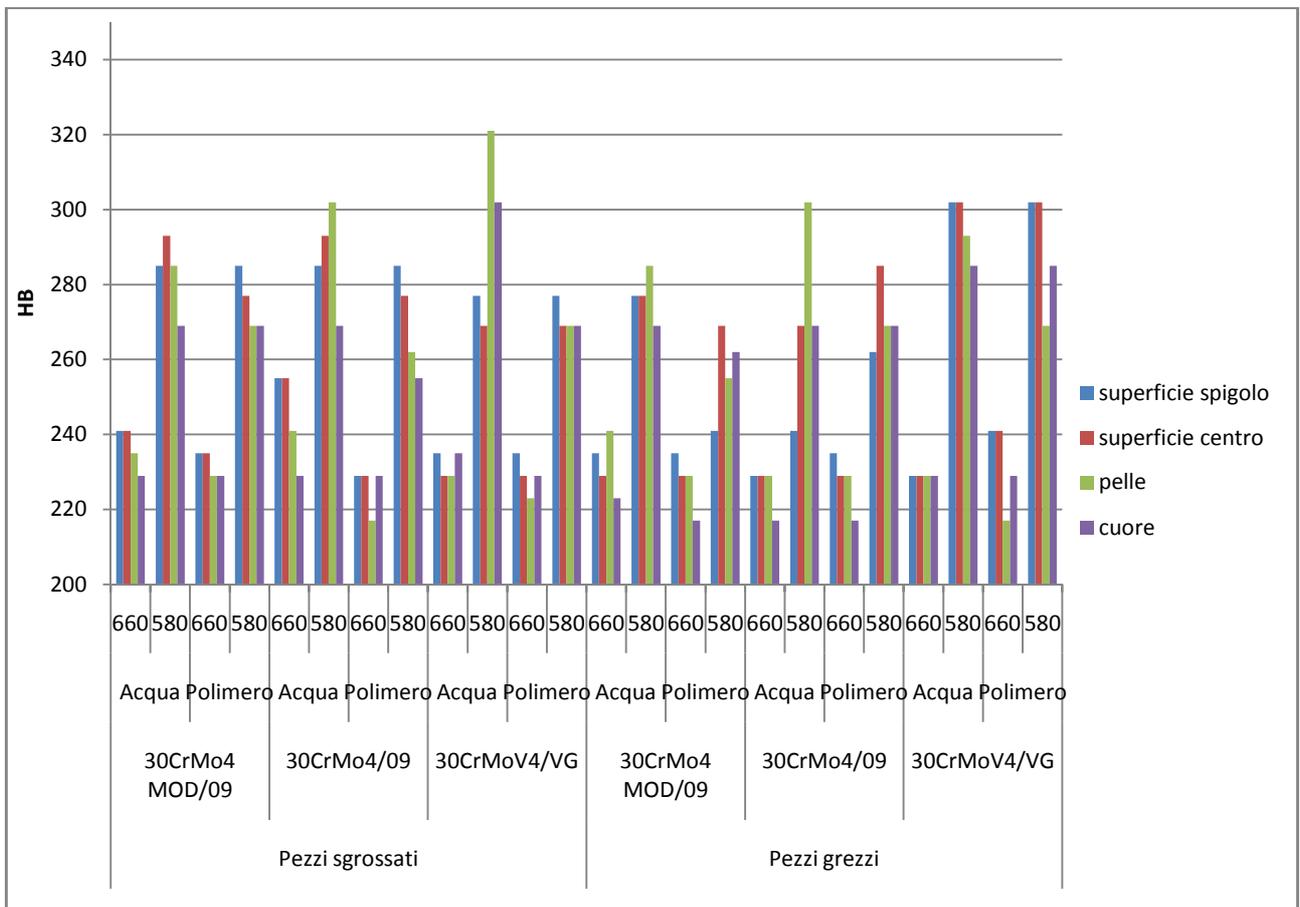


Figura 7.5. Durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo il rinvenimento

Per studiare l'effetto dei vari parametri è utile osservarli singolarmente.

Ai fini dello studio nei grafici seguenti sarà presa in considerazione la durezza media fra quelle ricavate nelle quattro posizioni.

7.1 La composizione

Per quel che riguarda le tre differenti composizioni, osserviamo dopo tempra (**Figura 7.6**):

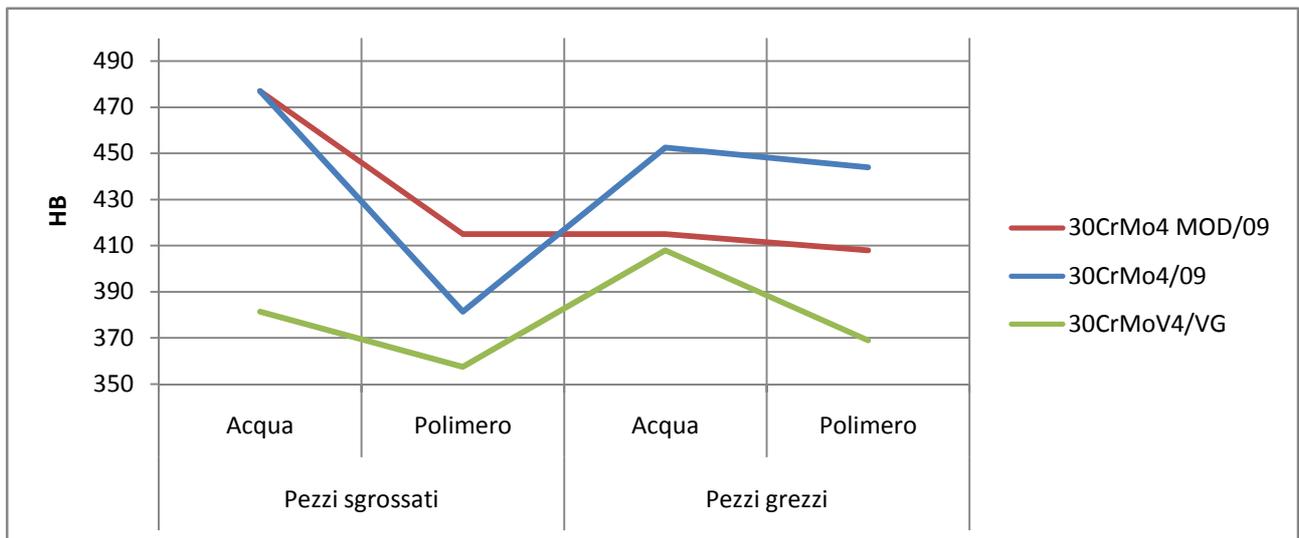


Figura 7.6. Grafico con durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo la tempra che evidenzia la differenza fra i tre tipi d'acciaio

Ove risulta che il 30CrMoV4 presenta durezza inferiori agli altri materiali.

Il 30CrMo4 modificato inoltre da grezzo ha proprietà nettamente inferiori rispetto a quelle che possiede da sgrassato.

Dopo rinvenimento si ha (**Figura 7.7**):

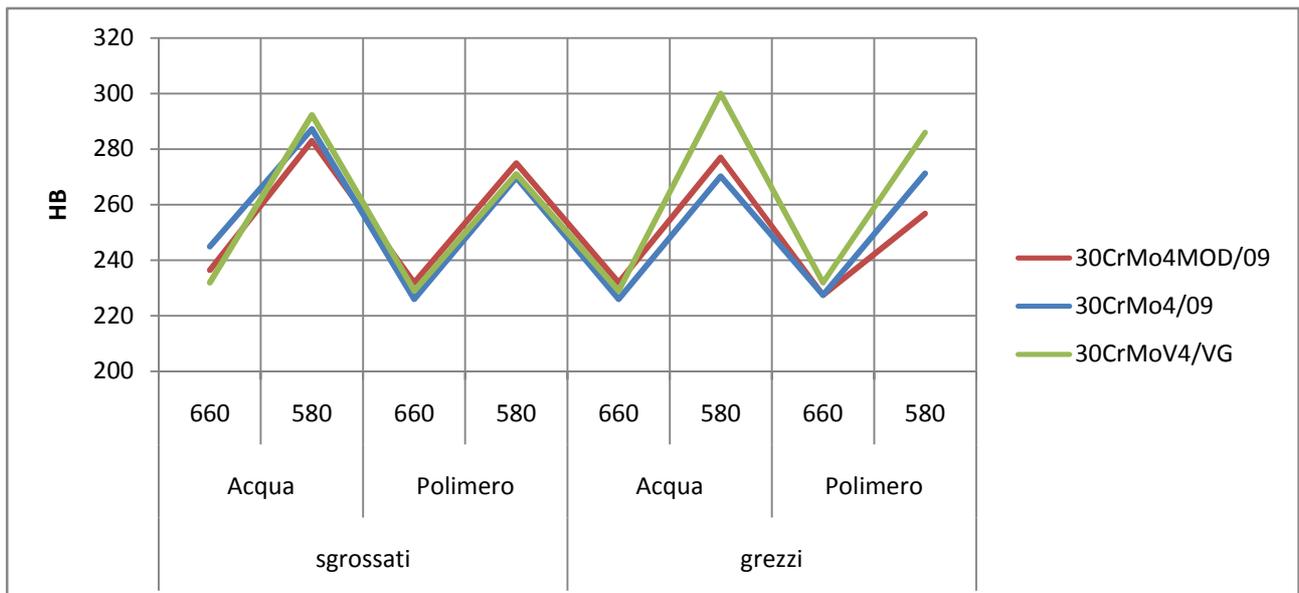


Figura 7.7. Grafico con durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo il rinvenimento che evidenzia la differenza fra i tre tipi d'acciaio

Notiamo che il 30CrMoV4 a seguito del rinvenimento conserva la propria durezza molto più degli altri due materiali. Ciò è particolarmente evidente graficando i soli dati relativi al cuore e al sottopelle, mentre considerando le misure superficiali, si ritrova per questo materiale una notevole durezza nel caso di pezzi grezzi.

Il fatto che dopo la tempra la durezza del 30CrMoV4/VG sia inferiore rispetto agli altri due acciai e che senta meno l'effetto del rinvenimento si può ipotizzare che sia dovuto a due effetti sovrapposti e connessi fra loro.

Da un lato, poiché molto carbonio è impegnato nella formazione di carburi di vanadio, tra il resto difficilmente solubili nell'austenite salvo innalzare ulteriormente la temperatura, si avrà una formazione di martensite con tenore di carbonio inferiore, dall'altro si avrà pure una minor formazione di quest'ultima, in quanto il vanadio è un potente elemento alfaceno (Pag. 268, *Lezioni di Metallurgia per la laurea in Ingegneria Meccanica vol.2*, G. M. Paolucci) e diminuisce il tempo di trasformazione dell'austenite in fasi intermedie, complice a sua volta anche la sottrazione del carbonio, che è invece un elemento gammageno.

Questo è probabilmente anche il motivo per cui la durezza risente anche meno dell'effetto del rinvenimento.

7.2 La sgrossatura

Innanzitutto osserviamo dopo la tempra l'effetto della sgrossatura (**Figura 7.8**).

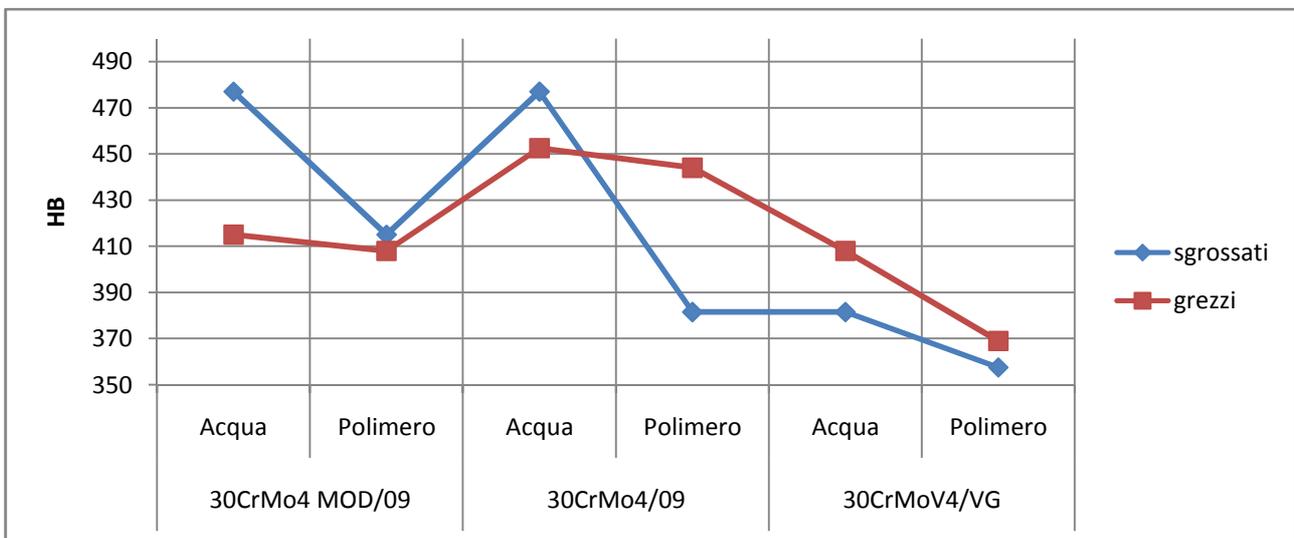


Figura 7.8. Grafico con durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo la tempra che evidenzia la differenza fra pezzi grezzi e sgrossati

Osserviamo che mediamente non vi sono particolari effetti sulla durezza.

Pare che il 30CrMo4 modificato tragga benefici dalla sgrossatura, mentre il 30CrMoV4 viceversa ne sia svantaggiato.

Quanto al 30CrMo4 standard, esso sembra sentirne l'effetto positivo solamente nel bagno d'acqua. Ci aspettiamo che, non essendo presenti dopo la tempra eccessive differenze, non vi siano neppure dopo il rinvenimento. Il grafico con le durezza dopo rinvenimento è il seguente (**Figura 7.9**):

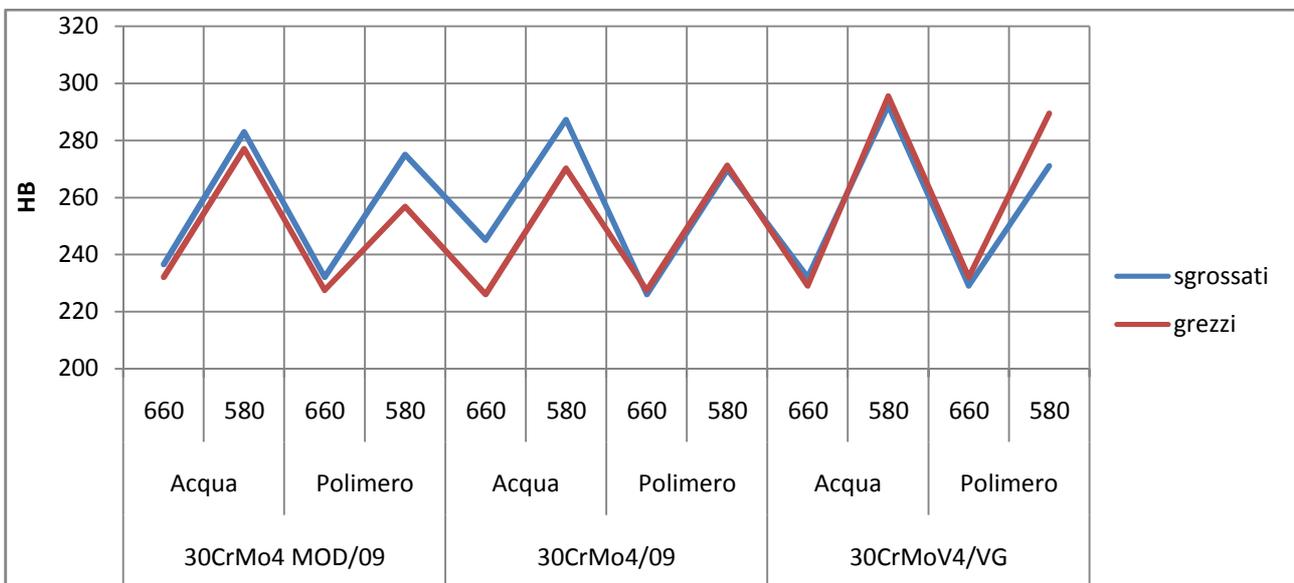


Figura 7.9. Grafico con durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo il rinvenimento che evidenzia la differenza fra pezzi grezzi e sgrossati

Anche considerando fra loro misure dello stesso tipo (ad esempio: cuore con cuore, pelle con pelle, ecc) l'andamento non si discosta molto da quanto sopra, in cui si potrebbero ripetere le osservazioni fatte dopo tempra. Le differenze sono state solamente mitigate dal rinvenimento.

7.3 Il mezzo temprante

Per il mezzo temprante, si nota dopo tempra il seguente andamento (**Figura 7.10**):

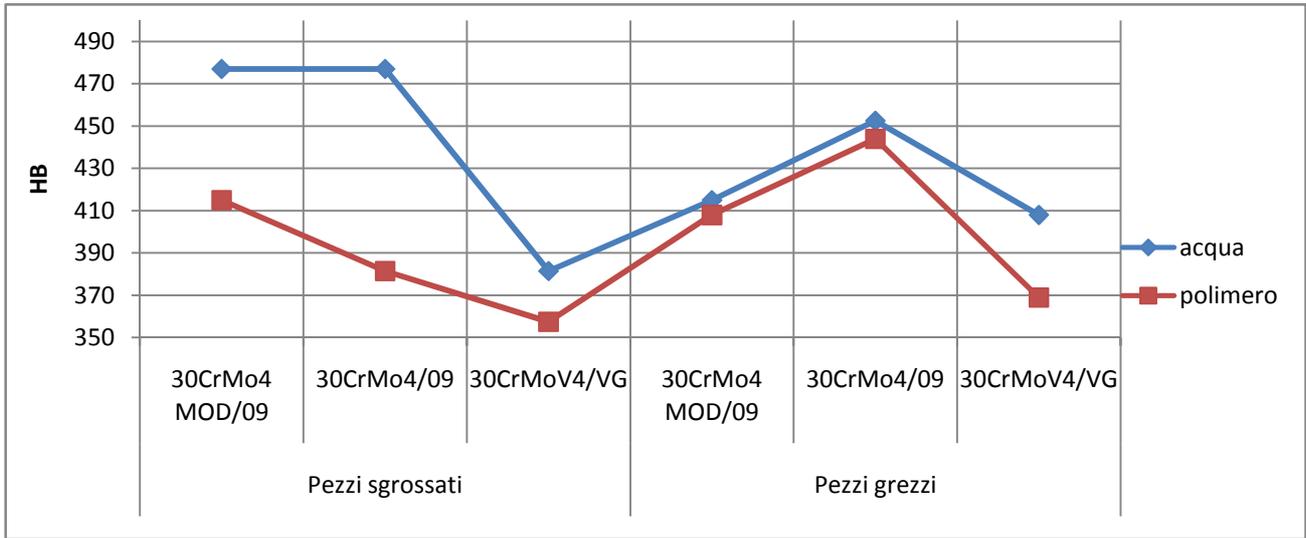


Figura 7.10. Grafico con durezze Brinell eseguite sui pezzi dopo la tempra che evidenzia la differenza fra i due mezzi di spegnimento

La tempra in acqua aumenta la durezza più che nell'*aquaquench* 352, com'era prevedibile. Notiamo inoltre che la differenza fra i due mezzi di spegnimento è più accentuata nel caso di pezzi sgrossati, fuorché per il 30CrMoV4/VG, che sembra non risentire della sgrossatura in questo caso.

Per quel che riguarda l'effetto dopo il rinvenimento, si trova (**Figura 7.11**):

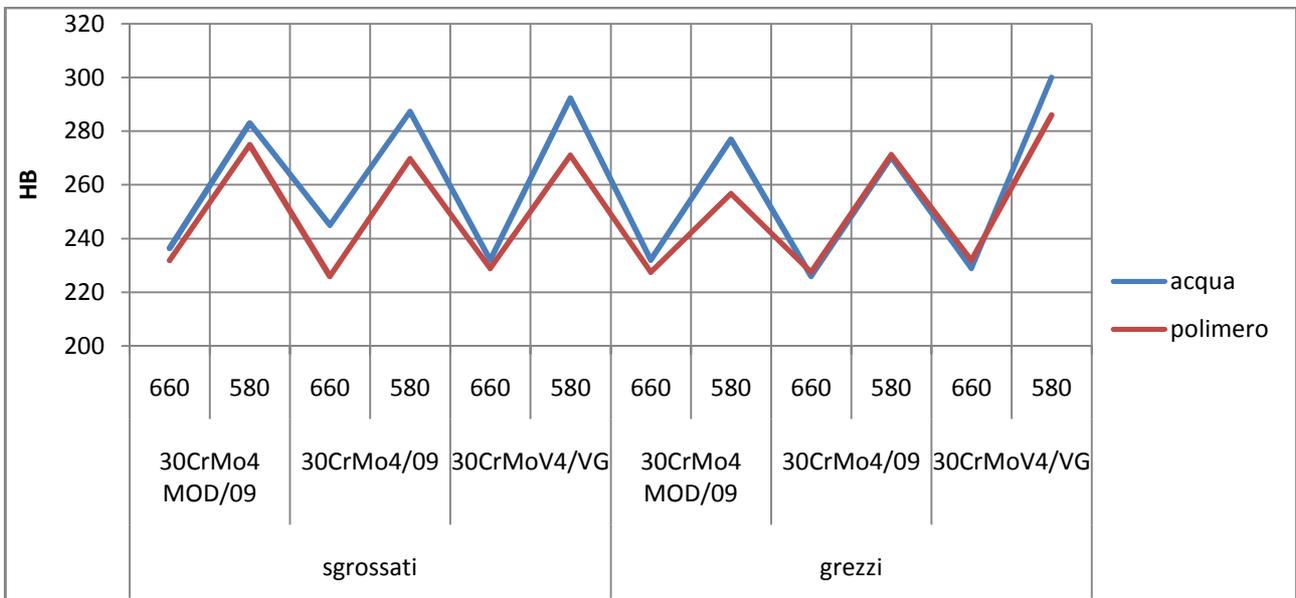


Figura 7.11. Grafico con durezze Brinell eseguite sui pezzi dopo il rinvenimento che evidenzia la differenza fra i due mezzi tempranti

7.4 La temperatura di rinvenimento

Per ciò che concerne la temperatura di rinvenimento, si hanno le differenze di durezza più significative (Figura 7.12):

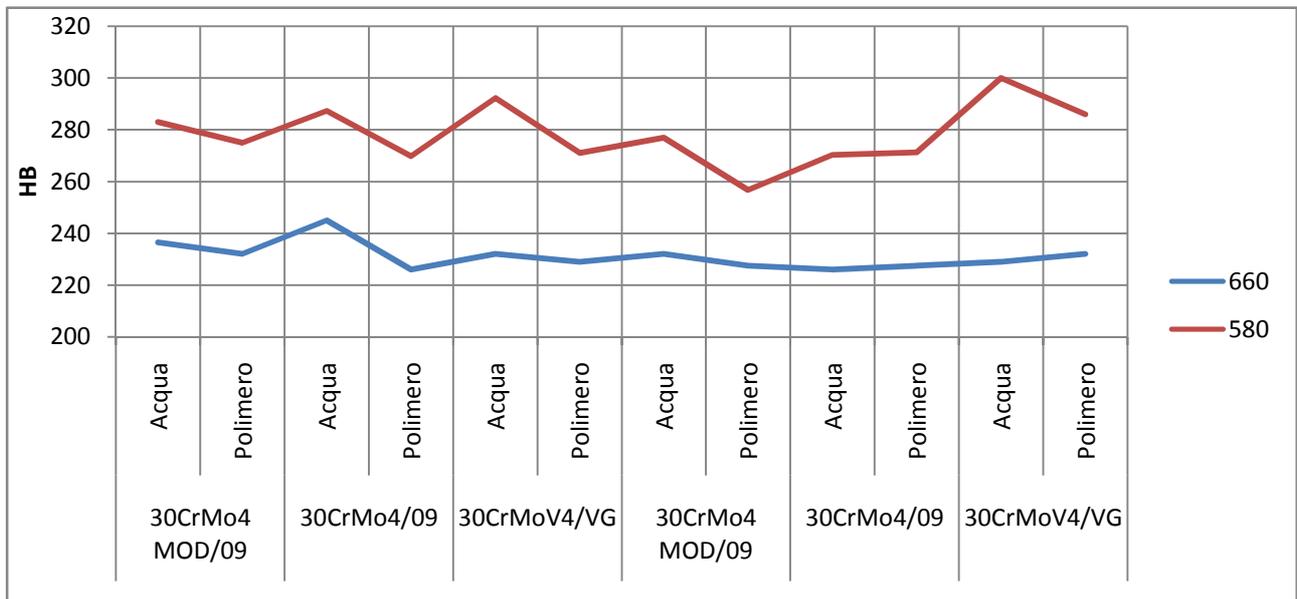


Figura 7.12. Grafico con durezza Brinell eseguite sui pezzi dopo il rinvenimento che evidenzia la differenza fra le due temperature di rinvenimento

I dati confermano le aspettative. Non ci dilungheremo su osservazioni banali, ma faremo solo notare come alla temperatura di rinvenimento maggiore (660°C), tutte le durezza non solo diminuiscano, ma tendano anche a ridurre le differenze fra loro. In pratica nel grafico la curva blu appare più regolare.

Capitolo 8

Il profilo di durezza

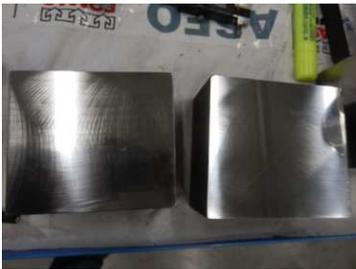


Figura 8.1. Superfici delle sezioni di due simulacri lucidate per compiere le misure di durezza Rockwell

Per arricchire il nostro studio abbiamo voluto ricavare qualche informazione sulla penetrazione della tempra. In questo caso abbiamo trascurato le differenze di composizione (considerando il solo 30CrMo4 standard) e abbiamo realizzato un profilo di durezza Rockwell sulla sezione centrale di quattro barrotti (i pezzi n.6, n.7, n.8, n.18, **Tabella 3.1**) scelti in modo da permetterci di osservare le differenze dovute a temperature di rinvenimento (n.7 e n.8),

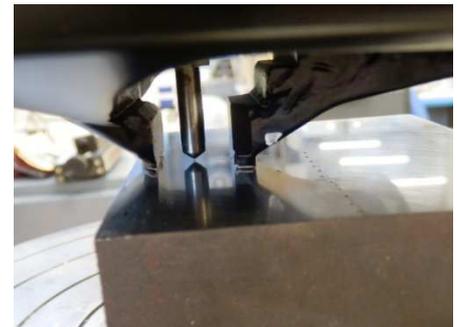


Figura 8.2. Il penetratore Rockwell di forma conica con punta sferica in diamante

mezzo temprante (n.6 e n.8) e sgrossatura (n.6 e n.18).

Innanzitutto le superfici dei pezzi sono state lucidate.

Successivamente, tracciate con un pennarello le diagonali e le

linee mediane sulla faccia, nonché segnati dei punti a distanza di 50 mm fra loro, si è provveduto ad effettuare le misure di durezza Rockwell sul pezzo.

Nella **Figura 8.3** sono indicate le posizioni ove sono state misurate le durezza.

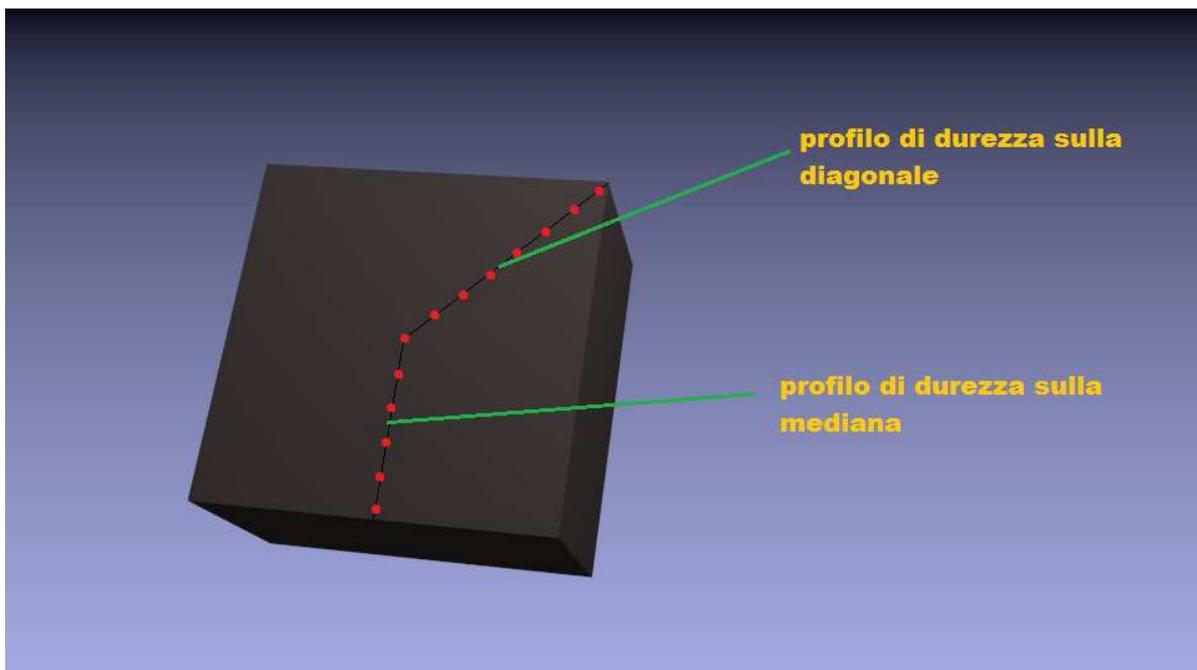


Figura 8.3. Posizioni in cui sono state misurate le durezza Rockwell per elaborarne un profilo sulle diagonali e sulle mediane della sezione.

Le misure sono state raccolte tramite un durometro della *Emcotest*, opportunamente tarato con campioni certificati da *Trescal*.



Le misure di durezza sono state compiute a distanza di mezzo centimetro fra loro lungo tutte le linee diagonali e le mediane della sezione. E' stata quindi fatta una media dei valori raccolti. I dati si trovano nelle **Tabelle D.2** in **Appendice**.

Figura 8.3. Durometro Rockwell con cui sono state eseguite le misure

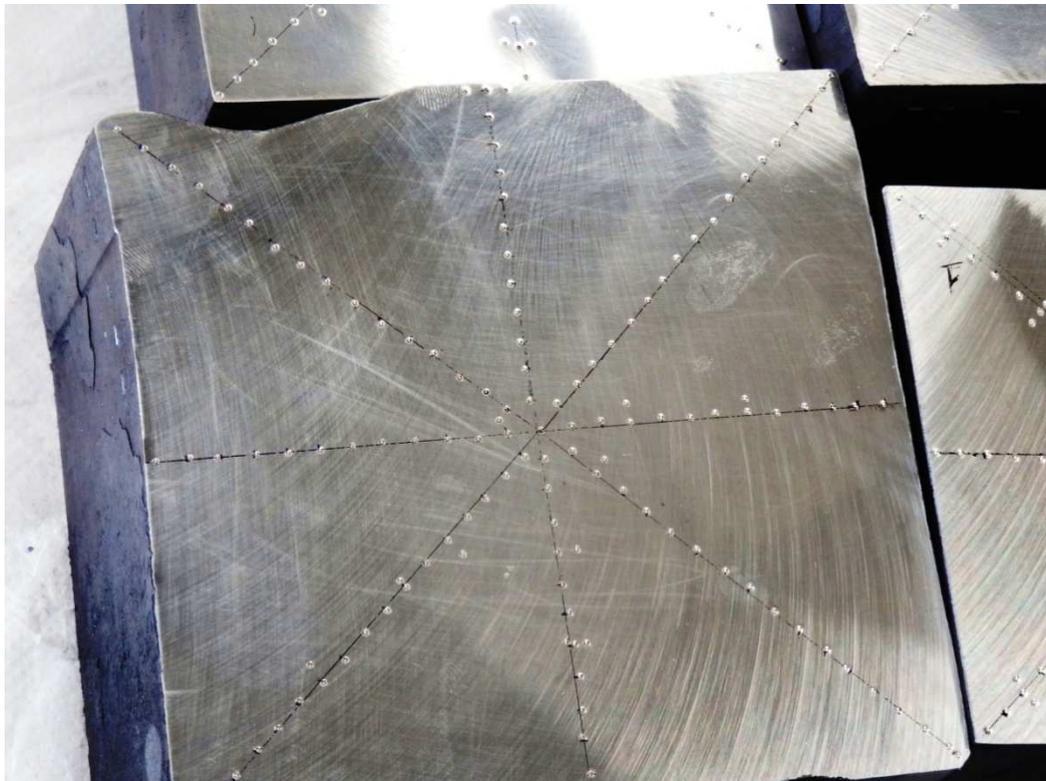


Figura 8.4. Superfici delle sezioni dei simulacri ove sono state eseguite le misure: si notino le impronte delle durezze allineate lungo le mediane e le diagonali

In seguito sono stati quindi riportati in un grafico i profili di durezza a partire dal centro e allontanandosi progressivamente (**Figura 8.5**):

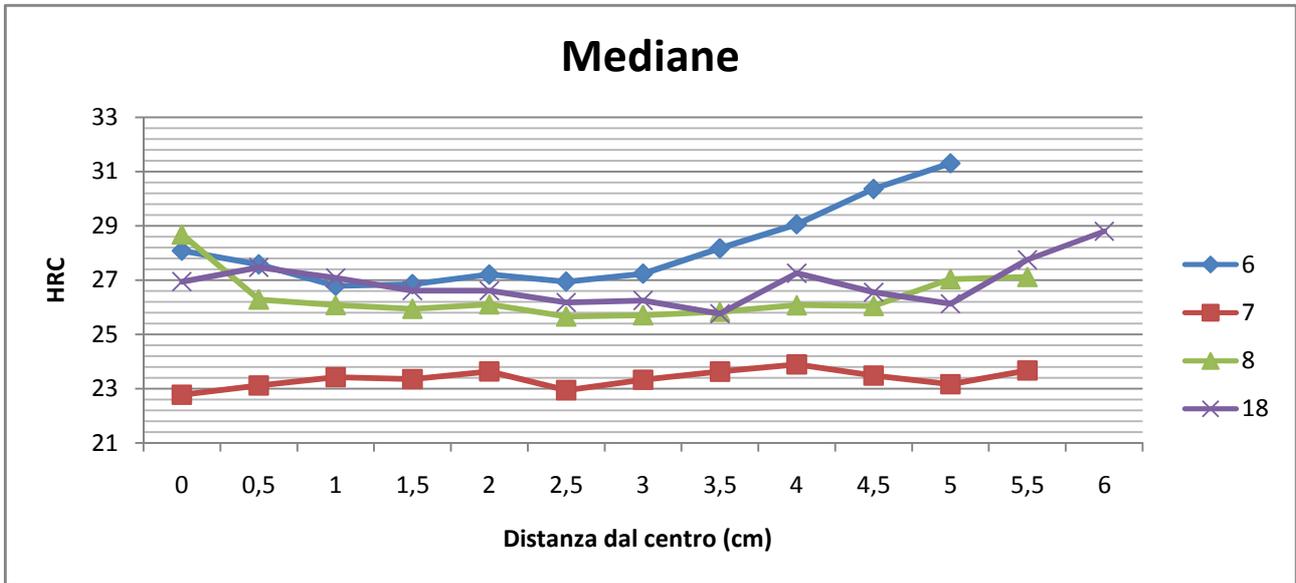


Figura 8.5. (a) Profili di durezza Rockwell lungo le mediane dei quattro simulacri. Il grafico è in funzione della distanza dal centro, a partire dal centro fino a giungere al bordo.

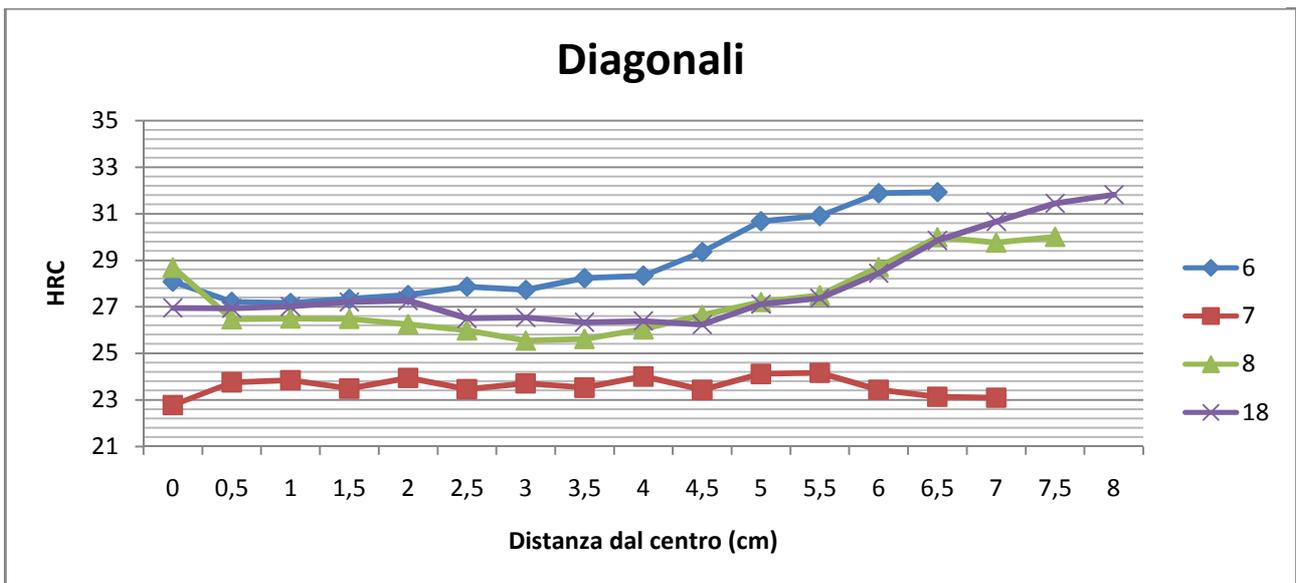


Figura 8.5. (b) Profili di durezza Rockwell lungo le mediane dei quattro simulacri. Il grafico è in funzione della distanza dal centro, a partire dal centro fino a giungere al bordo.

Una prima osservazione da fare è come lungo le diagonali i pezzi si siano temprati mediamente di più, essendo più vicini alle superfici esterne.

Analizzando l'andamento dei profili invece, la prima cosa evidente è come il pezzo n.7, rinvenuto a 660°C abbia ormai praticamente perso il profilo di durezza di tempra, ancora evidente nel pezzo n.8, temprato nelle stesse condizioni e rinvenuto a 580°C.

Per quel che riguarda la differenza fra mezzo temprante, osserviamo i profili 6 ed 8.

Notiamo che ovviamente il profilo 6, ottenuto con la tempra in acqua, presenta una durezza maggiore, ed anche che la tempra in polimero non sembra avere una grande capacità di penetrazione: ciò è particolarmente evidente confrontando i profili ricavati sulle mediane. La durezza al centro invece, leggermente inferiore del pezzo n.6 rispetto al pezzo n.8, si può spiegare con le dimensioni maggiori di quest'ultimo, che probabilmente ha risentito meno dell'effetto del rinvenimento.

Per quel che concerne infine la sgrassatura, notiamo che, fatto salvo diverse dimensioni dei pezzi, i profili hanno lo stesso andamento, anche se quello del pezzo grezzo (18) è un po' più dolce. Sarebbe stato interessante al riguardo, ma ciò interessa tutti e quattro i pezzi, eseguire i profili di durezza subito dopo tempra.

Su richiesta dell'azienda sono stati convertiti i grafici anche in durezza Brinell, e si sono quindi confrontati i valori del profilo con le durezze Brinell raccolte dopo rinvenimento.

Per le conversioni si è fatto riferimento alla tabella presente al sito internet

<http://www.carbidedepot.com/formulas-hardness.htm>, interpolando linearmente fra i valori riportati nel caso di valori di durezze Rockwell decimali.

Presupposta la bontà della conversione, dal confronto emerge una buona corrispondenza fra le durezze raccolte.

La durezza Rockwell convertita del pezzo n.7 è mediamente più alta della Brinell misurata, ma per durezze così basse della scala Rockwell la conversione può essere non accurata.

Notiamo invece che per il pezzo n.18 le misure in superficie non sono precise, mentre lo sono quelle a cuore e a pelle. Probabilmente l'errore si è verificato perché non è stato abraso sufficientemente materiale in superficie.

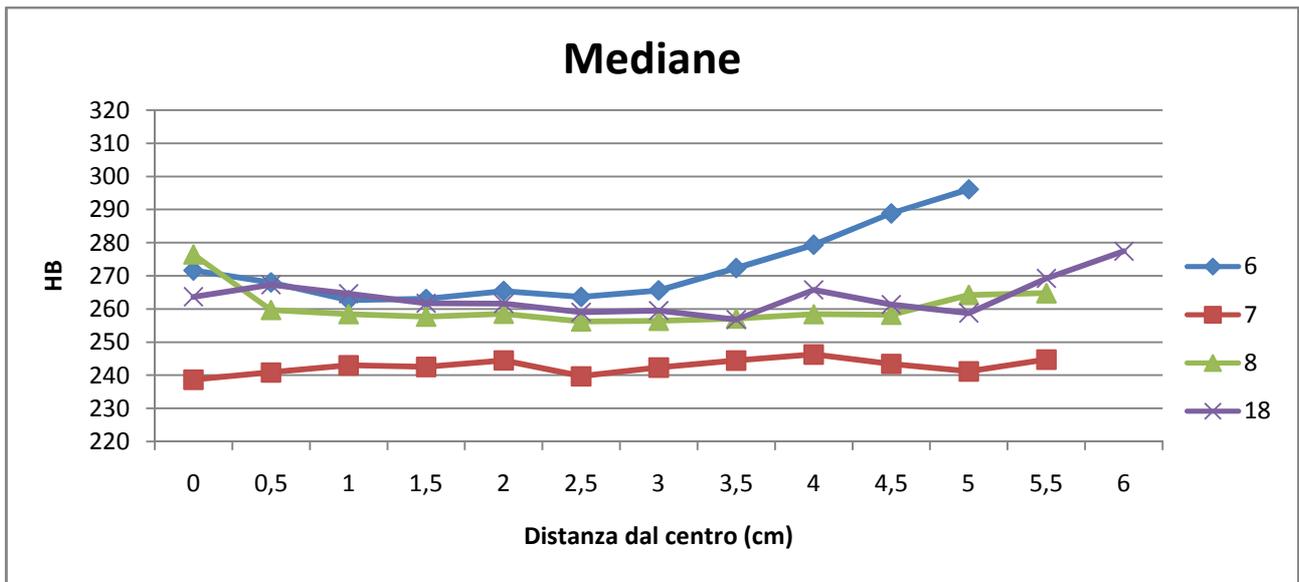


Figura 8.6. (a) Profilo di durezza Rockwell lungo le mediane dei quattro simulacri convertito nei corrispondenti valori Brinell. Nel dominio è sempre indicata la distanza dal centro.

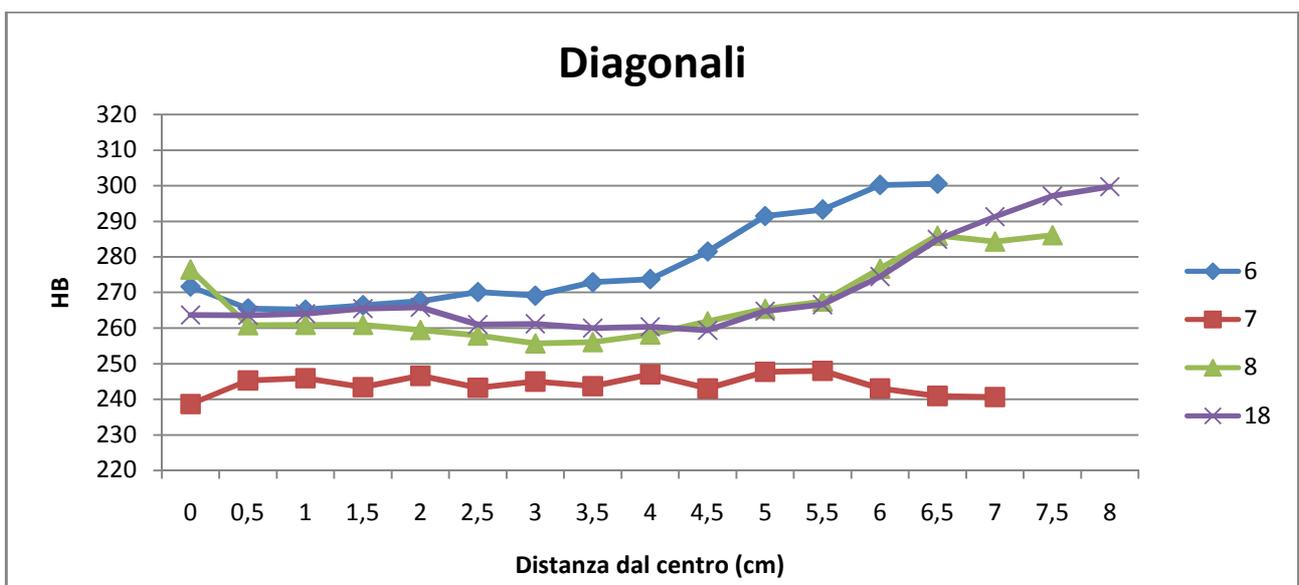


Figura 8.6. (b) Profilo di durezza Rockwell lungo le diagonali dei quattro simulacri convertito nei corrispondenti valori Brinell. Nel dominio è sempre indicata la distanza dal centro.

Numero barrotto	Sgrossatura	Mezzo temprante	Temperatura di rinvenimento	HB superficie spigolo	HB superficie centro	HB a pelle	HB a cuore
6	sgrossato	Acqua	580	285	293	302	269
7	sgrossato	Polimero	660	229	229	217	229
8	sgrossato	Polimero	580	285	277	262	255
18	grezzo	Acqua	580	241	269	302	269

Tabella 8.1. Durezze Brinell raccolte dopo il rinvenimento dei quattro simulacri di cui è stato studiato il profilo di durezza HRC

8.1 Prova Jominy

Per caratterizzare infine i tre materiali è stata effettuata una prova Jominy su tre provini ricavati dal materiale avanzato dai campioni: il n.1 per il 30CrMo4 modificato, il n.5 per il 30CrMo4 standard e il n.11 per il 30CrMoV4.

La prova Jominy è il più semplice ed efficace metodo di misura della capacità di un acciaio di acquisire struttura di tempra a cuore, in altre parole della temprabilità.

Consiste nel raffreddare, dalla temperatura d'austenitizzazione, un opportuno campione a forma cilindrica con un getto d'acqua calibrato in testa e nel misurare poi la durezza del campione, lungo



Figura 8.6. Apparecchio della "Remet" utilizzato per la prova della temprabilità Jominy

le generatrici del cilindro, dall'estremità raffreddata bruscamente verso l'altra estremità raffreddata in aria.

La prova è stata eseguita con l'apposito apparecchio della Remet (modello AN2), che si compone di un basamento in lamiera d'acciaio contenente il sistema di raffreddamento con, al di sopra, un forno elettrico per il riscaldamento del provino, con massima temperatura raggiungibile di 1100°C (tratto dal manuale dello strumento).

I tre acciai studiati sono stati austenitizzati a 880°C e quindi temprati con getto d'acqua come da normativa ASTM A255.

Dopodiché, lungo due generatrici diametralmente opposte, sono state ricavate due piste rettificate (indicate come facce A e B in

Tabella D.3) ove eseguire le durezze HRC alle distanze opportune.

I profili di durezza ottenuti sono stati i seguenti (**Figura 8.7**):

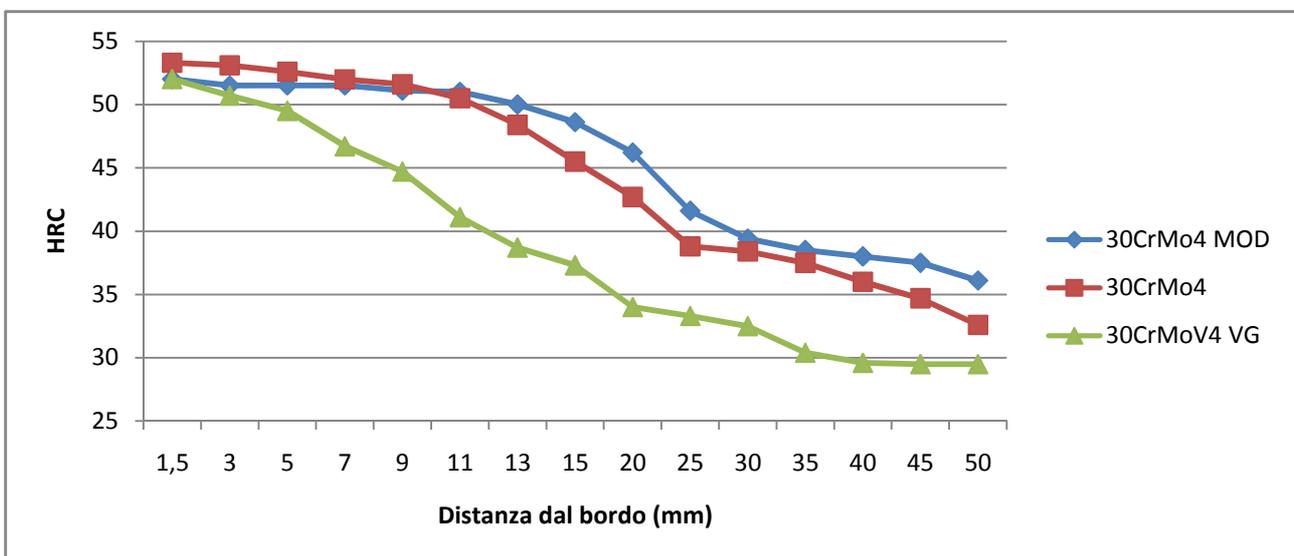
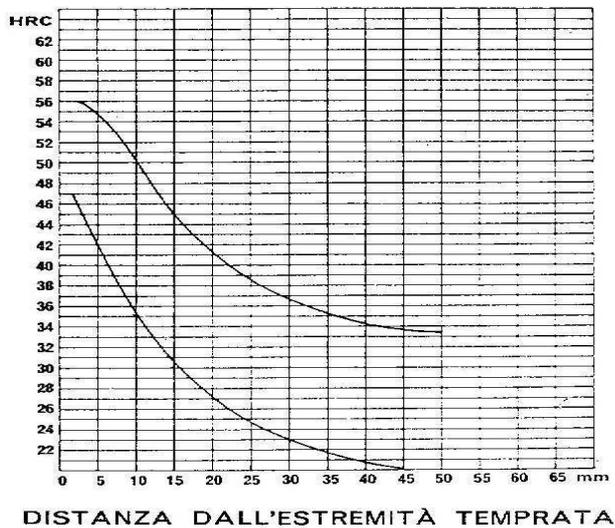


Figura 8.7. Profili di durezza dei tre acciai ottenuti con la prova Jominy

Dal grafico è evidente la maggior penetrazione di tempra nel 30CrMo4 modificato, dovuta essenzialmente all'effetto austenitizzante del nickel, effetto amplificato dalla presenza di cromo e molibdeno (pag.261 *Lezioni di Metallurgia per la laurea in Ingegneria Meccanica*, G.M. Paolucci). Di contro si nota la minor temprabilità del 30CrMoV4 rispetto agli altri due materiali, causata, come detto (§ 4.1), dall'effetto alfa-geno del vanadio e dalla formazione di carburi VC, i quali

precipitano facilmente non appena ci si allontana dalla superficie addentrandosi verso il centro del barrotto, ove il raffreddamento è meno violento.

Dalla letteratura (*Catalogo Generale Valbruna*) inoltre, è possibile avere il profilo di durezza tipico del 30CrMo4 dopo tempra (**Figura 8.8**).



DISTANZA DALL'ESTREMITÀ TEMPRATA

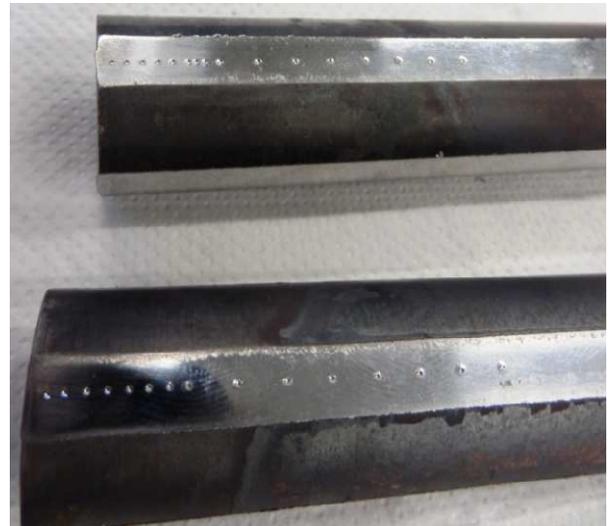


Figura 8.9. Durezze Rockwell su una delle due facce dei provini Jominy

E' possibile inserire le due curve riportate in figura nel nostro grafico con i profili di durezza dei pezzi.

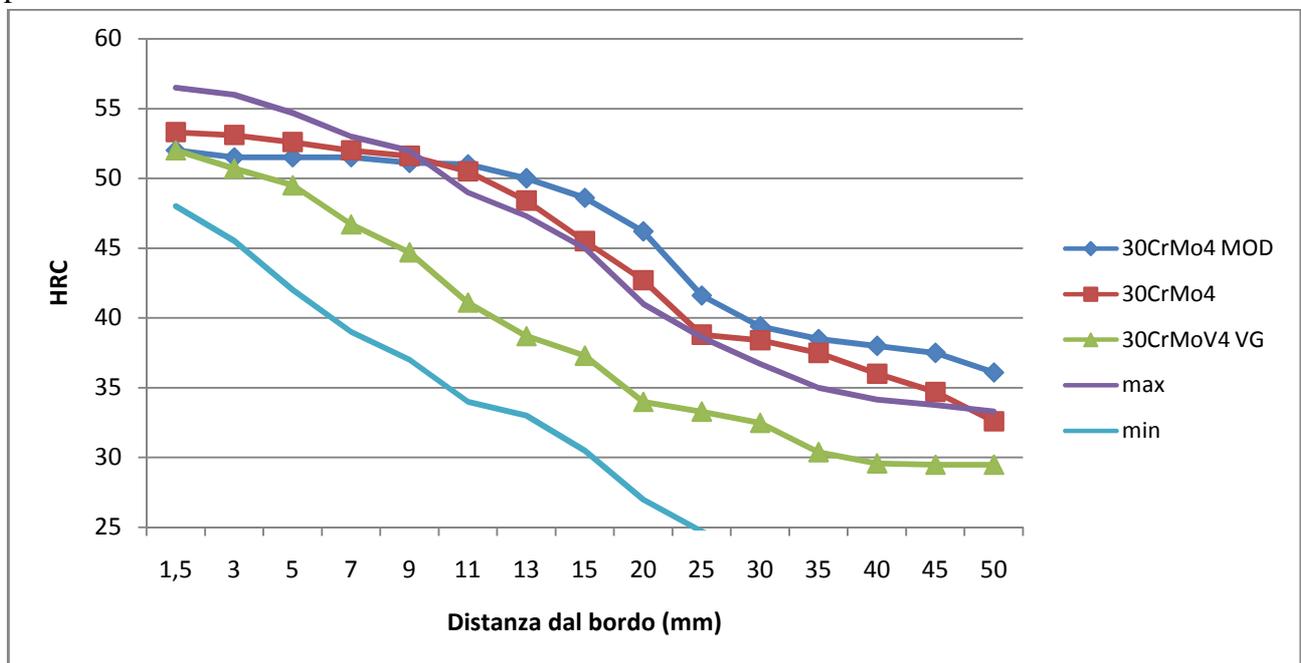


Figura 8.9. Profili di durezza ottenuti con la prova Jominy confrontati con le curve presenti in letteratura

Notiamo che, rispetto ai dati del *Catalogo generale Valbruna*, il 30CrMo4 "standard" e quello modificato al nickel hanno durezza molto elevata ed in alcuni punti superiore alla curva di massimo. Il 30CrMoV4/VG invece, in quanto a durezza, rientrerebbe appieno nei parametri forniti.

Conclusioni

- Per quel che riguarda le micrografie, sono state ritrovate strutture conseguenti significative segregazioni di carbonio, meno evidenti nell'acciaio al vanadio a causa del grano di dimensioni più contenute. Sono però presenti a cuore di quest'ultimo ben evidenti isole ferritiche, la cui insolita presenza si può supporre dovuta ad un raffreddamento troppo lento, forse nei primi istanti nel passaggio dal forno alle vasche di tempra. L'affinamento del grano provocato dalla presenza del vanadio è stato verificato con la misura del grano austenitico. L'effetto della sgrossatura è visibile soprattutto per i campioni ricavati in pelle, mentre non è visibile per quelli provenienti dal cuore del simulacro. Ugualmente non visibili sono grosse differenze fra pezzi temprati in acqua e *aquaquench 352*.
- Ai fini delle prove di durezza si hanno un effetto modesto della sgrossatura ed una durezza maggiore con tempra in acqua rispetto a quella in soluzione di polimero. Le differenze fra i tre materiali sono la maggior durezza anche a cuore del 30CrMo4 al nickel e quella inferiore (minor temprabilità) dell'acciaio con il vanadio. All'aumentare della temperatura di rinvenimento ovviamente si perde questa proprietà ottenuta mediante la tempra.
- Studiando invece i profili di durezza Rockwell, dopo rinvenimento è stato osservato che, mentre dopo rinvenimento a 660°C la durezza è distribuita uniformemente sulla sezione del pezzo, nei simulacri rinvenuti a 580°C, invece, è ancora ben riconoscibile l'effetto della tempra, in particolare nel pezzo sgrassato e temprato in acqua, mentre si nota un po' meno in quello grezzo od in quello temprato in *aquaquench 352*.
- La prova Jominy ha messo in risalto un'elevata durezza dei due acciai 30CrMo4 e 30CrMo4/MOD rispetto agli standard. Ha evidenziato inoltre la minor temprabilità del 30CrMoV4 e quella maggiore del 30CrMo4 modificato al nickel.

Queste osservazioni, nonché le tabelle di dati che seguiranno in **Appendice**, hanno permesso di approfondire la conoscenza del trattamento termico per i tre acciai studiati, risultando utili all'azienda in previsione di futuri anelli da bonificare.

In particolare lo studio porterà ASFO a preferire l'utilizzo del 30CrMo4 modificato al nickel rispetto al 30CrMo4 standard e ad evitare invece quello del 30CrMoV4 a causa della diversa temprabilità emersa. Inoltre grazie alle tabelle potrà appunto valutare se è opportuno sgrassare il pezzo prima della tempra, o se temprare il pezzo in acqua od in *aquaquench 352* per ottenere la durezza richiesta.

Se si è incuriositi da questo lavoro e si è interessati ai risultati delle prove meccaniche, invitiamo a visionare l'elaborato di Pizzato Giovanni, studente in collaborazione del quale è stato svolto lo studio.

Ovviamente l'indagine non sarà comunque esaustiva e lo studio potrà in futuro essere approfondito su diversi acciai, diverse temperature di rinvenimento, diversi fluidi di tempra, ecc.

Si ritiene che tuttavia questo sia un buon inizio.

Appendice

A. Il 30CrMo4

ML30	UNI 30CrMo4	SAE/AISI 4130	AFNOR 30CD4	BS -	DIN 25CrMo4	W. Nr. 7218
-------------	----------------	------------------	----------------	---------	----------------	----------------

TEMPERATURE DI						Stato del materiale	CARATTERISTICHE MECCANICHE						
Fucina- tura	Norma- lizza- zione	Ricot- tura sub- critica	Ricot- tura isoter- mica	Tem- pra	Rinve- nimen- to		HB max.	Diam. o spess. mm.		Rs ≥	R	A ₅ % ≥	KCU KJ/m ² o cal/cm ²
1100 900	860 890	670 720	840 670 1h	850 870 Olio	560 630	Ricottura di lavorab.	220	>	≤	≥			
						Bonificato		16	75	90/105	13	8	
								17	40	65	80/ 95	13	8
								41	100	50	70/ 85	14	8

Tabella A.1. In tabella sono indicate temperature di trattamento termico e proprietà meccaniche tipiche del 30CrMo4. La tabella è tratta dal Catalogo Generale Valbruna.

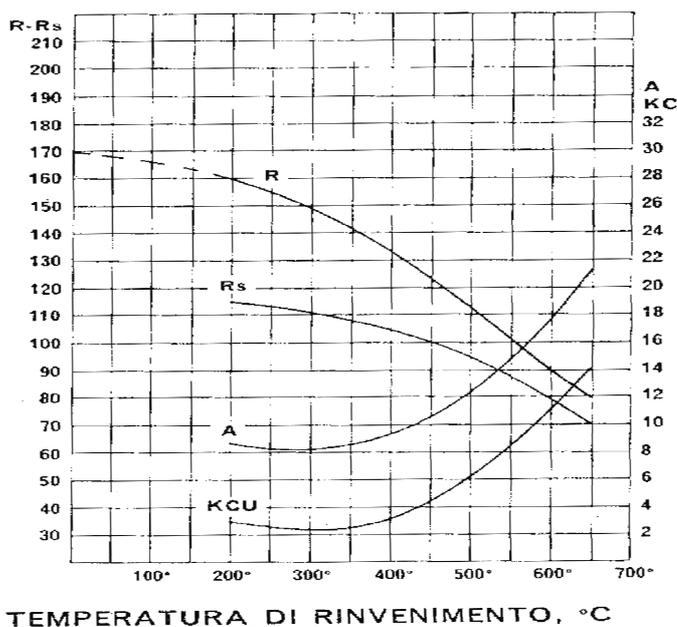


Figura A.2. Tipica curva di rinvenimento del 30CrMo4. Tratta anche questa dal Catalogo Generale Valbruna.

B. L'aquaquench 352

L'aquaquench 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 al posto dell'acqua consente di abbassare la velocità di raffreddamento mitigando le deformazioni e tensioni dopo tempra.

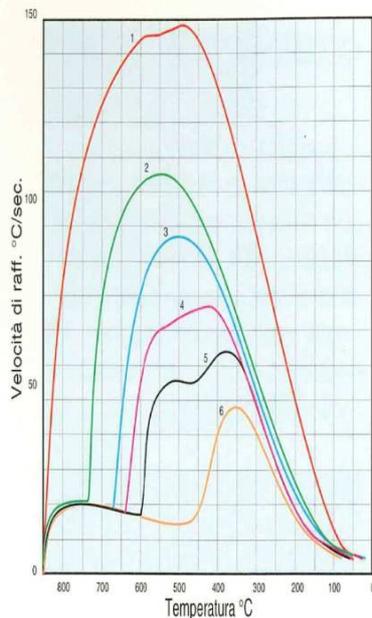
Invece l'utilizzo in alternativa all'olio offre:

- Vantaggi per l'ambiente, in quanto non è infiammabile. L'eliminazione del rischio d'incendio comporta una velocità d'immersione del pezzo meno critica, un risparmio sulle attrezzature protettive o antincendio ed eventualmente la diminuzione del premio assicurativo. Inoltre garantisce l'assenza di fumi durante la tempra.

- Vantaggi per la produzione, poiché il costo è molto più contenuto dell'olio. Inoltre si ha un minor consumo per asporto sempre rispetto all'olio in quanto la viscosità del polimero è inferiore. La minor viscosità garantisce anche una più rapida decantazione delle calamine che non rischiano di essere risucchiate dalle pompe nell'impianto di raffreddamento. L'aquaquench per di più ha un calore specifico circa doppio rispetto a quello dell'olio minerale: ciò consente di accelerare il ritmo di produzione. Infine vi è una maggior pulizia sia degli ambienti che dei pezzi, i quali non richiedono sgrassaggio.

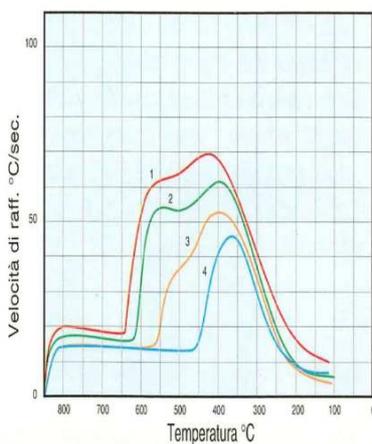
- Vantaggi tecnici in quanto, variando la concentrazione del polimero in soluzione (**Figura B.1**), è possibile scegliere la velocità di raffreddamento ottimale. Un certo inquinamento da acqua è tollerabile prima che la velocità di tempra ne risulti influenzata. Ciò elimina il rischio di punti a minor durezza, distorsioni, e problemi di rottura che invece esistono nei fluidi a base d'olio minerale in presenza d'acqua.

In **Figura B.2** si possono osservare le velocità di raffreddamento di acqua e polimero confrontate con quelle di altri mezzi di spegnimento.



Effetto della concentrazione sulla velocità di tempra con AQUAQUENCH 352.

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



Effetto del parametro temperatura sulla velocità di tempra con una soluzione al 25% di AQUAQUENCH 352.

- | | |
|---------|---------|
| 1) 20°C | 3) 50°C |
| 2) 40°C | 4) 60°C |

Figura B.1. Dipendenza della velocità di raffreddamento dell'aquaquench 352 da temperatura e concentrazione

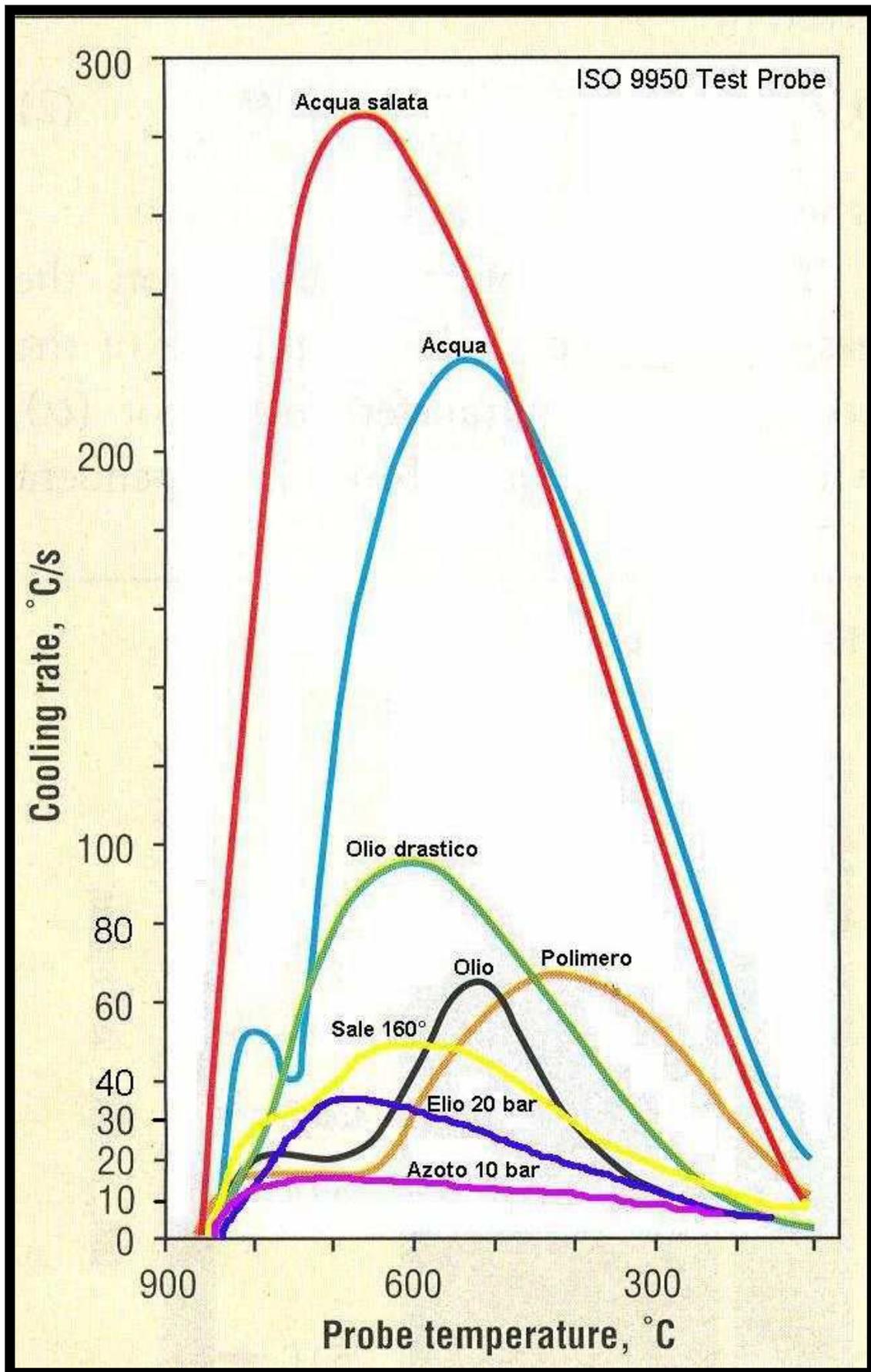
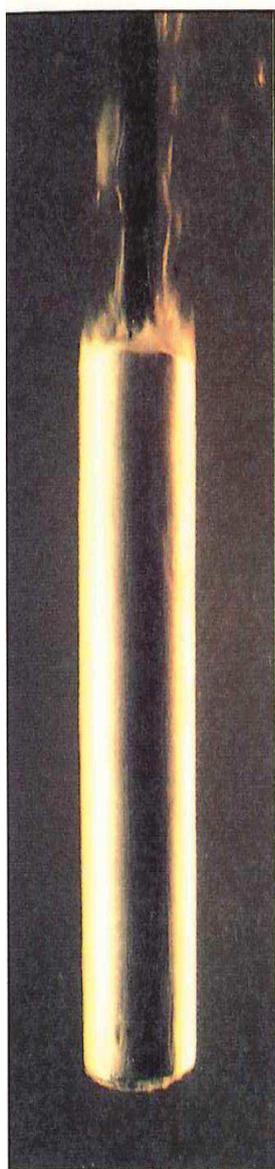
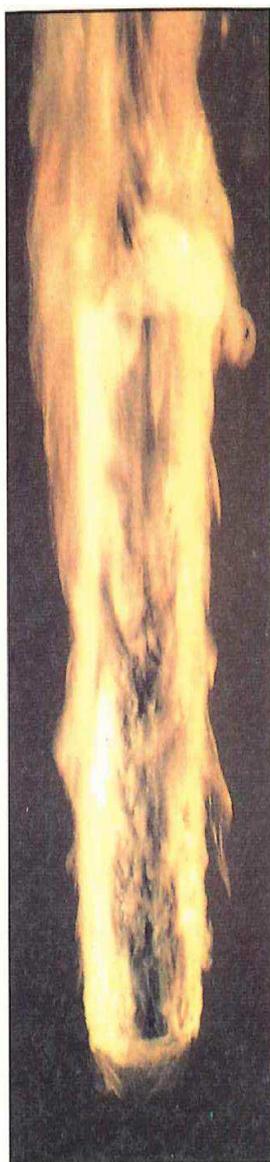


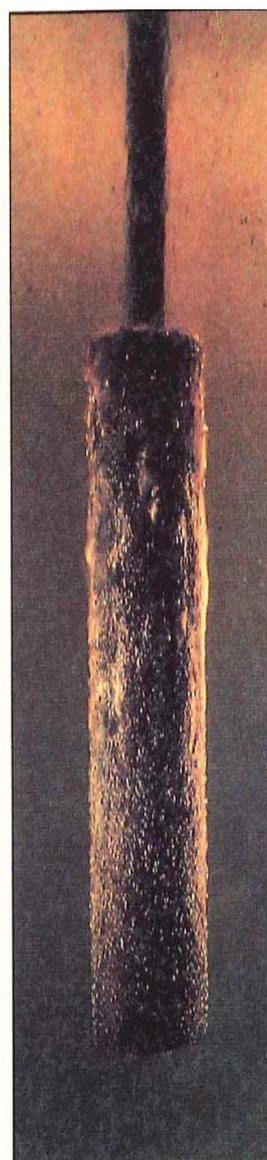
Figura B.2. Velocità di raffreddamento di diverse sostanze a confronto



1) Al momento dell'immersione del particolare nel fluido da tempra la soluzione, a contatto con il metallo, raggiunge temperature ben superiori ai 75°C (temperatura dell'inversione di solubilità). Il polimero diventa insolubile in acqua e deposita uno strato sottile sulla superficie del particolare. Il raffreddamento è lento ed è simile alla fase vapore della tempra con olio.



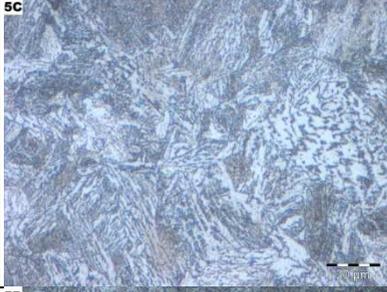
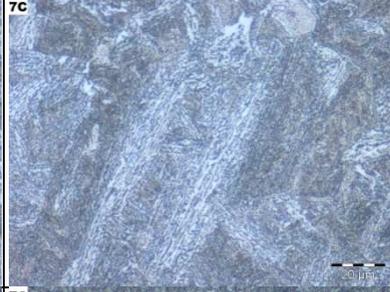
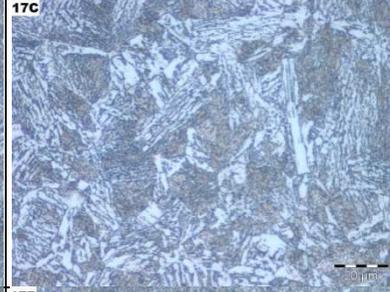
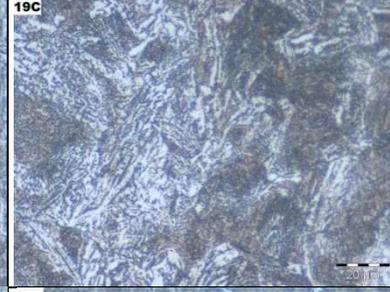
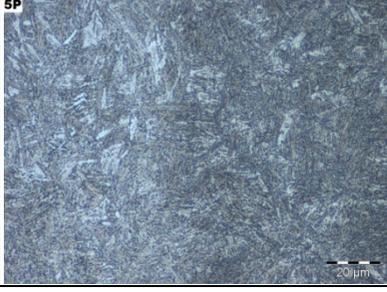
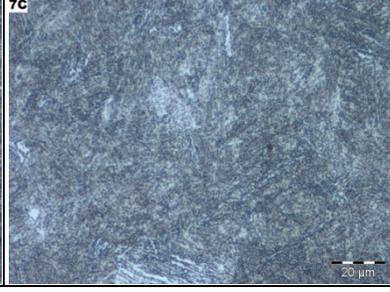
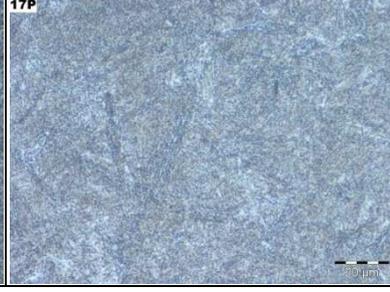
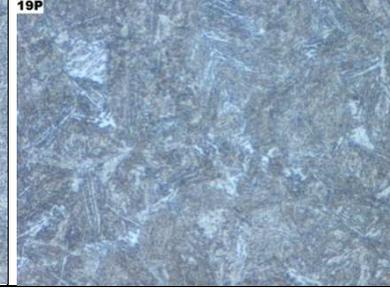
2) Lo strato di polimero diventa attivo e la velocità di raffreddamento aumenta. Nella tempra ad olio ciò corrisponde alla fase di ebollizione.



3) Non appena la temperatura del pezzo scende al di sotto della temperatura di inversione di solubilità del polimero, lo strato si ridiscoglie ed il calore viene asportato dalla soluzione con un meccanismo di raffreddamento convettivo.

Figura B.3. Fasi dello spegnimento in aquaquenck 352 come illustrate nel catalogo di Houghton.

Tabella C.1. Alcune delle micrografie raccolte per il 30CrMo4 ad ingrandimenti 100x e 500x.

30CrMo4		Pezzi sgrassati		Pezzi grezzi	
		Acqua	Polimero	Acqua	Polimero
100x	Cuore				
	Pelle				
500x	Cuore				
	Pelle				

C. Le micrografie

Tabella C.2. Alcune delle micrografie raccolte per il 30CrMo4/MOD ad ingrandimenti 100x e 500x.

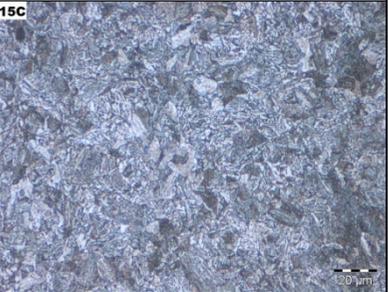
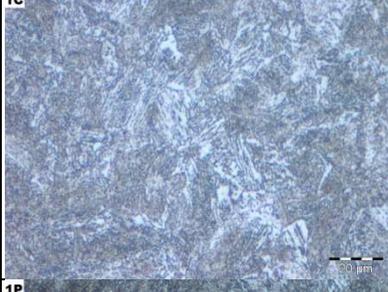
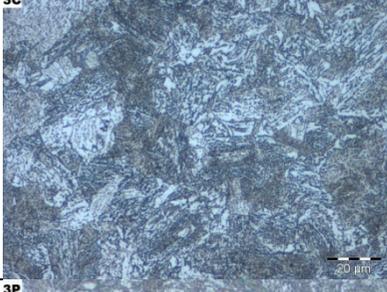
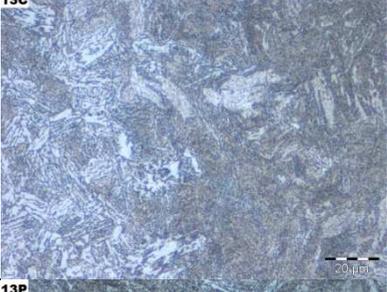
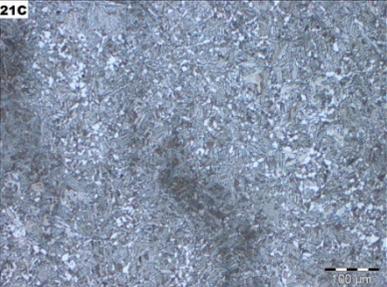
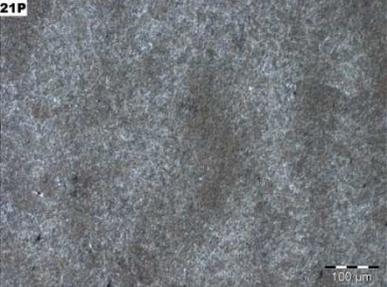
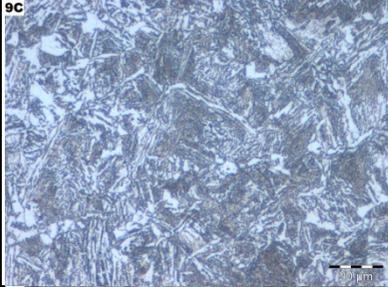
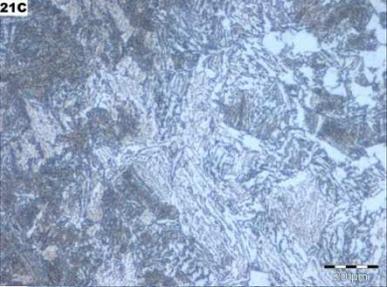
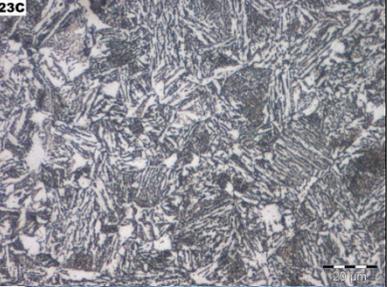
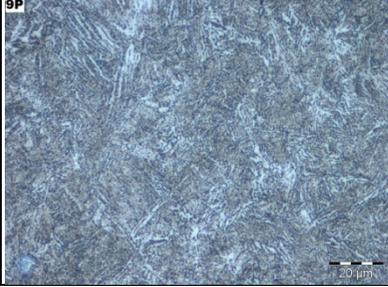
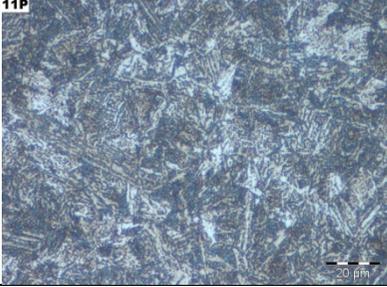
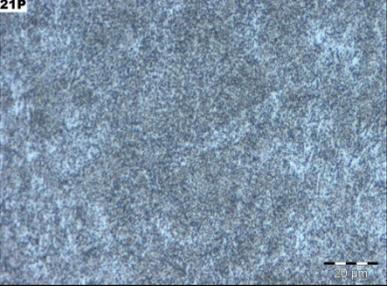
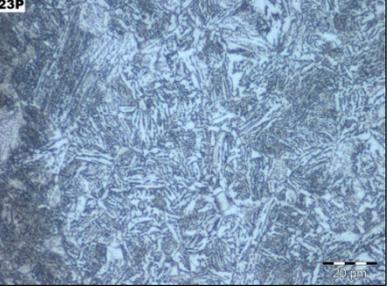
30CrMo4/ MOD		Pezzi sgrassati		Pezzi grezzi	
		Acqua	Polimero	Acqua	Polimero
100x	Cuore				
	Pelle				
500x	Cuore				
	Pelle				

Tabella C.3. Alcune delle micrografie raccolte per il 30CrMoV4/MOD ad ingrandimenti 100x e 500x.

30CrMoV4/VG		Pezzi sgrassati		Pezzi grezzi	
		Acqua	Polimero	Acqua	Polimero
100x	Cuore				
	Pelle				
500x	Cuore				
	Pelle				

D. I dati raccolti

Numero Barrotto	Sgrossatura	Materiale	Mezzo temprante	Temperatura di rinvenimento	Rs a cuore	Rm a cuore	A% a cuore	Z% a cuore	Rs/Rm a cuore	HB calcolata a cuore	HB misurata a cuore	Media resilienze a cuore
1	Pezzi sgrassati	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660	584,2	748,3	24	73	0,781	222	229	142,6666667
2				580	753,8	898,8	17	62	0,839	266	269	63
3			Polimero	660	582,8	751,0	24	72	0,776	222	229	148
4		30CrMo4/09	Acqua	580	772,4	898,1	17	68	0,860	266	269	58,6666667
5				660	549,8	732,2	21	72	0,751	217	229	62,6666667
6				580	696,2	851,0	19	65	0,818	252	269	40,6666667
7			Polimero	660	548,0	732,5	22	69	0,748	217	229	67,6666667
8				580	678,7	840,0	19	66	0,808	249	255	16,33333333
9		30CrMoV4/V G	Acqua	660	596,9	761,1	21	64	0,784	225	235	82,33333333
10				580	684,3	852,4	17	64	0,803	252	302	18,6666667
11			Polimero	660	611,3	775,8	21	67	0,788	230	229	52,33333333
12				580	720,4	905,8	16	56	0,795	268	269	17
13	Pezzi grezzi	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660	569,6	741,5	20	71	0,768	220	223	149
14				580	703,2	848,7	18	65	0,829	251	269	59,33333333
15			Polimero	660	537,1	712,2	23	71	0,754	211	217	127,6666667
16				580	680,4	830,3	19	63	0,819	246	262	49
17		30CrMo4/09	Acqua	660	538,1	721,9	24	70	0,745	214	217	81
18				580	703,0	869,7	18	58	0,808	258	269	27
19			Polimero	660	532,8	720,9	24	62	0,739	213	217	75,33333333
20				580	651,0	816,0	18	61	0,798	242	269	16,33333333
21		30CrMoV4/V G	Acqua	660	598,5	765,6	21	64	0,782	227	229	72,6666667
22				580	665,7	829,3	18	60	0,803	246	285	21,33333333
23			Polimero	660	554,7	705,6	22	57	0,786	209	229	52,33333333
24				580	715,4	907,6	17	52	0,788	269	285	25,33333333

Tabella D.1 . (a). Tabella riassuntiva con tutte le misure raccolte a cuore sui 24 simulacri

Numero Barrotto	Sgrossatura	Materiale	Mezzo temprante	Temperatura di rinvenimento	Rs a pelle	Rm a pelle	A% a pelle	Z% pelle	RsRm pelle	HB Calcolata pelle	HB superficie spigolo dopo tempratura	HB superficie centro dopo tempratura	HB superficie spigolo centro	HB superficie in pelle	Media resilienze a pelle
1	Pezzi sgrossati	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660	657,8	786,6	22	72	0,836	233	241	241	241	235	166,3333333
2				580	825,4	939,4	17	65	0,879	278	477	477	285	285	119
3			Polimero	660	646,9	781,4	24	73	0,828	231	235	235	235	229	177
4				580	830,9	923,9	16	64	0,899	274	415	415	285	277	269
5		30CrMo4/09	Acqua	660	662,4	796,8	22	73	0,831	236	255	255	255	241	182,3333333
6				580	840,9	953,7	19	70	0,882	282	477	477	285	293	132,3333333
7			Polimero	660	628,6	774,9	25	75	0,811	229	229	229	229	217	176
8				580	733,3	870,9	19	69	0,842	258	388	375	285	277	262
9		30CrMoV4/V G	Acqua	660	604,1	743,8	19	70	0,812	220	235	229	235	229	147,6666667
10				580	831,9	993,5	18	58	0,837	294	388	375	277	269	31
11			Polimero	660	635,8	791,3	19	68	0,803	234	235	229	235	229	98,33333333
12				580	767,2	931,2	17	59	0,824	276	363	362	277	269	30,66666667
13	Pezzi grezzi	30CrMo4 MOD/09	Acqua	660	655,8	794,4	22	71	0,826	235	235	229	235	241	178,3333333
14				580	809,0	922,1	20	68	0,877	273	415	415	277	277	93,66666667
15			Polimero	660	590,5	745,1	20	75	0,793	221	235	229	235	229	186,3333333
16				580	701,9	839,6	16	68	0,836	249	415	401	241	269	81,33333333
17		30CrMo4/09	Acqua	660	592,9	750,7	18	73	0,790	222	229	229	229	229	171,3333333
18				580	712,7	852,8	18	65	0,836	253	461	444	241	269	118
19			Polimero	660	573,1	744,2	24	73	0,770	220	229	229	235	229	156
20				580	659,4	816,8	18	62	0,807	242	444	444	262	285	125,6666667
21		30CrMoV4/V G	Acqua	660	584,3	728,7	20	65	0,802	216	229	229	229	229	119,6666667
22				580	762,5	919,7	16	58	0,829	272	415	401	302	302	26,66666667
23			Polimero	660	579,8	726,3	23	66	0,798	215	241	241	241	217	116
24				580	778,4	913,3	16	58	0,852	271	375	363	302	302	32,66666667

Tabella D.1 .(b) Tabella riassuntiva con tutte le misure raccolte a pelle sui 24 simulacri

Distanza dal centro (cm)	Mediana 1	Mediana 2	Mediana 3	Mediana 4	Media mediana	Media mediana in HB	Diagonale 1	Diagonale 2	Diagonale 3	Diagonale 4	Media diagonali	Media diagonali in HB
0	28,08				28,08	271,64					28,08	271,64
0,5	28,3	27,65	27,27	27,1	27,58	268,06	26,43	27,1	27,45	27,87	27,2125	265,4875
1	28,55	26,33	26,33	25,95	26,79	262,74	27,02	27,73	27,25	26,68	27,17	265,19
1,5	27,2	27,12	26,7	26,38	26,85	263,1	27,95	26,55	27,27	27,6	27,3425	266,3975
2	27,68	26,78	26,85	27,52	27,2075	265,4525	26,98	27,88	27,55	27,62	27,5075	267,5525
2,5	26,88	27,45	25,85	27,6	26,945	263,67	27	27,8	28,2	28,48	27,87	270,09
3	27,65	27,43	25,52	28,35	27,2375	265,6625	27,73	27,77	28,18	27,23	27,7275	269,0925
3,5	28,5	27,18	27,63	29,38	28,1725	272,38	26,65	28,75	28,65	28,88	28,2325	272,86
4	29,65	26,35	27,93	32,3	29,0575	279,4025	27,08	29,52	28,43	28,33	28,34	273,72
4,5	30,95	30,83	27,25	32,4	30,3575	288,86	27,35	30,55	28,9	30,63	29,3575	281,5025
5	31,3	27,98			31,3	296,1	28,02	31,48	32,18	31,03	30,6775	291,42
5,5							29,9	30,1	32,05	31,58	30,9075	293,26
6							32,12	30,02	32,58	32,8	31,88	300,16
6,5							32,12	30,2	32,58	32,8	31,925	300,475
Durezza media					28,14340909	271,64					29,078125	281,5025

Tabella D.2. (a) Misurazioni di durezza Rockwell per il pezzo n.6: 30CrMo4/09 sgrassato, temprato in acqua e rinvenuto a 580°C.. Le dimensioni della sezione analizzata erano 9,5x10,5 cm.

Distanza dal centro (cm)	Mediana 1	Mediana 2	Mediana 3	Mediana 4	Media mediana	Media mediana in HB	Diagonale 1	Diagonale 2	Diagonale 3	Diagonale 4	Media diagonali	Media diagonali in HB
0	22,78				22,78	238,68					22,78	238,68
0,5	23,1	23,18	22,62	23,6	23,125	240,875	23,63	24,23	23,43	23,75	23,76	245,32
1	23,45	23,53	23,18	23,55	23,4275	242,9925	23,78	23,88	24,08	23,65	23,8475	245,9925
1,5	23,4	23,7	23,5	22,85	23,3625	242,5375	23,65	23,45	23,3	23,55	23,4875	243,4125
2	23,33	24,25	24,37	22,63	23,645	244,515	23,85	24,88	23,55	23,5	23,945	246,615
2,5	23,33	22,85	23,85	21,77	22,95	239,7	23,3	23,6	23,45	23,5	23,4625	243,2375
3	22,7	24,04	24,3	22,3	23,335	242,345	24,35	23,83	23,1	23,58	23,715	245,005
3,5	23,78	24,08	23,33	23,35	23,635	244,445	23,1	23,55	24,13	23,33	23,5275	243,6925
4	23,8	24,25	23,7	23,85	23,9	246,3	23,52	24,27	23,72	24,52	24,0075	247,045
4,5	23,58	23,05	23,33	24	23,49	243,43	23,43	22,8	24,05	23,45	23,4325	243,0275
5	23,17				23,17	241,19	24,53	23,76	23,68	24,5	24,1175	247,705
5,5	23,68				23,68	244,76	24,65	24	24,08	23,93	24,165	247,99
6							22,68	24,08	23,48	23,5	23,435	243,045
6,5							22,25	22,88	23,9	23,52	23,1375	240,9625
7							22,13	22,77	23,9	23,58	23,095	240,665
Durezza media					23,375	242,625					23,59433333	244,1603333

Tabella D.2. (b) Misurazioni di durezza Rockwell per il pezzo n.7: 30CrMo4/09 sgrassato, temprato in acquaquen 352 e rinvenuto a 660°C.. Le dimensioni della sezione analizzata erano 10x11.

Distanza dal centro (cm)	Mediana 1	Mediana 2	Mediana 3	Mediana 4	Media mediana	Media mediana in HB	Diagonale 1	Diagonale 2	Diagonale 3	Diagonale 4	Media diagonali	Media diagonali in HB
0	28,68				28,68	276,44					28,68	276,44
0,5	26,6	25,5	26,45	26,6	26,2875	259,775	28,2	26,3	26,08	25,27	26,4625	260,775
1	26,08	25,88	26,13	26,23	26,08	258,48	27,05	26,45	25,78	26,68	26,49	260,94
1,5	25,7	26,3	25,43	26,35	25,945	257,775	26,13	26,65	26,15	27	26,4825	260,895
2	26	26,78	25,05	26,58	26,1025	258,615	26,25	26,38	25,6	26,75	26,245	259,47
2,5	26,18	26,03	25,28	25,15	25,66	256,3	26,58	25,98	26,05	25,33	25,985	257,925
3	25,08	25,78	25,72	26,25	25,7075	256,5375	25,28	25,58	26,48	24,83	25,5425	255,7125
3,5	25,4	25,9	25,6	26,43	25,8325	257,1625	25,98	26,22	25,45	24,8	25,6125	256,0625
4	26,4	25,8	25,43	26,68	26,0775	258,465	26,43	26,63	25,93	25,13	26,03	258,18
4,5	27,63	25,45	25,38	25,75	26,0525	258,315	25,43	27,08	26,5	27,58	26,6475	261,885
5	29,88	25,73	27,02	25,52	27,0375	264,2625	25,9	28,55	26,08	28,27	27,2	265,4
5,5	29,88	25,73	27,02	25,83	27,115	264,805	26,53	28,6	27,38	27,45	27,49	267,43
6							27,2	30,95	29,35	27,33	28,7075	276,66
6,5							28,85	31,83	31,38	27,9	29,99	285,93
7							30,1	30,5	31,37	27,05	29,755	284,285
7,5							31,1	30,5	31,37	27,05	30,005	286,04
Durezza media					25,986875	257,775					26,56133333	261,368

Tabella D.2. (c) Misurazioni di durezza Rockwell per il pezzo n.8: 30CrMo4/09 sgrassato, temprato in acquaquench 352 e rinvenuto a 580°C.. Le dimensioni della sezione erano 10x11 cm.

Distanza dal centro (cm)	Mediana 1	Mediana 2	Mediana 3	Mediana 4	Media mediane	Media mediane in HB	Diagonale 1	Diagonale 2	Diagonale 3	Diagonale 4	Media diagonali	Media diagonali in HB
0	26,95				26,95	263,7					26,95	263,7
0,5	26,98	28,47	27	27,45	27,475	267,325	27,25	26,33	26,35	27,78	26,9275	263,565
1	26,4	27,55	27,5	26,9	27,0875	264,6125	27,05	27,18	27,2	26,6	27,0075	264,0525
1,5	27,02	26,03	27,38	26,05	26,62	261,72	27	27,7	26,83	27,3	27,2075	265,4525
2	26,37	25,38	27,45	27,25	26,6125	261,675	27,6	27,15	27,43	26,85	27,2575	265,8025
2,5	26,8	25,88	25,9	26,13	26,1775	259,065	26,83	26,15	27	26,02	26,5	261
3	27,43	27,2	25,15	25,25	26,2575	259,545	25,45	26,98	27,28	26,43	26,535	261,21
3,5	24,75	25,95	25,8	26,58	25,77	256,85	24,83	28,95	25,85	25,7	26,3325	259,995
4	26,55	26,1	26,48	29,9	27,2575	265,8025	27,8	25,18	26,45	26,13	26,39	260,34
4,5	25,62	25,1	26,58	28,93	26,5575	261,345	26,83	25,22	27,33	25,55	26,2325	259,395
5	26,38	25,22	25,95	26,98	26,1325	258,795	27,03	27,65	27,95	25,8	27,1075	264,7525
5,5	29,95	27,33	25,98	27,75	27,7525	269,2675	27,88	26,9	28,63	26,08	27,3725	266,6075
6	29,43	30,05	25,98	29,75	28,8025	277,42	29,43	29,65	28,48	26,18	28,435	274,48
6,5							31,98	30,83	29,4	27,18	29,8475	284,9525
7							31,43	30,65	31,38	29,18	30,66	291,28
7,5							31,5	30,73	32,25	31,3	31,445	297,115
8							31,2	32,33	31,85	31,87	31,8125	299,6875
Durezza media					26,88096154	263,2857692					27,88352941	264,7525

Tabella D.2. (d) Misurazioni di durezza Rockwell per il pezzo n.18: 30CrMo4/09 grezzo, temprato in acqua e rinvenuto a 580°C. Le dimensioni della sezione analizzata erano 12x12 cm.

Distanza dal centro (mm)	CAMPIONE 1				CAMPIONE 5				CAMPIONE 11				TABELLA	
	Faccia A	Faccia B	Media AB		Faccia A	Faccia B	Media AB		Faccia A	Faccia B	Media AB		Minimo	Massimo
1,5	51,5	52,4	52		53,7	53	53,3		52,3	51,7	52		48	56,5
3	51	52	51,5		53,4	52,8	53,1		50,7	50,7	50,7		45,5	56
5	51,5	51,5	51,5		53	52,3	52,6		48,9	50,1	49,5		42	54,7
7	51	52	51,5		52,3	51,8	52		45,7	47,7	46,7		39	53
9	50,9	51,3	51,1		52,2	51,1	51,6		42,5	44	44,7		37	52
11	50,5	51,5	51		50,6	50,5	50,5		40,5	41,8	41,1		34	49
13	49,5	50,6	50		48,1	48,6	48,4		38	39,5	38,7		33	47,3
15	48,9	48,4	48,6		45,5	45,6	45,5		36,6	38	37,3		30,5	45
20	46,7	45,8	46,2		43,1	42,3	42,7		33,6	34,4	34		27	41
25	42,1	41,1	41,6		38,9	38,7	38,8		33,1	33,6	33,3		24,7	38,6
30	39,1	39,7	39,4		38,5	38,4	38,4		32,3	32,8	32,5		23	36,7
35	38,1	39	38,5		38,1	37,1	37,5		30,1	30,8	30,4		21,8	35
40	37,9	37,6	38		36,5	35,5	36		29,3	30	29,6		20,85	34,15
45	37,8	37,3	37,5		34,6	34,8	34,7		29,1	30	29,5		20	33,75
50	35,9	36,4	36,1		33,6	31,6	32,6		29	29,9	29,5			33,3

Tabella D.3. Risultati delle prove Jominy eseguite sui pezzi n.1 in 30CrMo4 /MOD, n.5 in 30CrMo4 standard e n.11 in 30CrMoV4/VG. Nelle ultime colonne sono riportati i limiti di durezza del 30CrMo4 ritrovati in letteratura.

Bibliografia

-*Lezioni di Metallurgia per la Laurea in Ingegneria Meccanica vol. 1 e 2*, G.M. Paolucci

-*Acciai speciali*, Guido Gozzi

-Normative ASTM

-Catalogo generale Valbruna

-Catalogo Houghton

-Manuali delle strumentazioni a disposizione in ASFO

Siti web

<http://it.wikipedia.org>

http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=867

http://www.ing.unitn.it/~colombo/Ag-Cu_diploma/PROVE%20DI%20DUREZZA%20BRINNEL.htm

http://www.metalgoods.it/media/pdf/_tabella_materiali.pdf

http://www.gianottielio.it/syntax_files/tbl_documenti_allegato_ita_id_documento25.pdf

<http://www.carbidedepot.com/formulas-hardness.htm>