

Università degli studi di Padova

Scuola di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica
Curriculum Meccanico
A.A. 2014/2015

VALUTAZIONE DEI PARAMETRI OTTIMALI DI UN TRATTAMENTO DI TEMPRA AD INDUZIONE

Relatore:

Prof. Bonollo Franco

Laureando:

Zine Simohamed

Anno Accademico 2014-2015

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della mia Tesi:

Ringrazio il prof. F. Bonollo per avermi dato la possibilità di svolgere questa esperienza. Devo un sentito ringraziamento ai tecnici del laboratorio di metallurgia e in particolare a Giacomo Mazzacavallo che mi ha seguito durante tutta esperienza. Ringrazio anche la dottoranda Elena Fiorese che mi ha corretto ed aiutato più volte durante la stesura di questo elaborato.

Dedico questo lavoro ai miei genitori: I loro sacrifici e la loro pazienza sono stati indispensabili per raggiungere questo traguardo. Ringrazio inoltre Giulia, una persona davvero speciale che mi ha affiancato e motivato in quest'ultimo periodo.....senza di lei sarebbe stato diverso.

VALUTAZIONE DEI PARAMETRI OTTIMALI DI UN TRATTAMENTO DI TEMPRA AD INDUZIONE

INDICE

RINGRAZIAMENTI

<i>INTRODUZIONE</i>	1
---------------------	---

Capitolo 1

TRATTAMENTI TERMICI

1.1	INTRODUZIONE	2
1.2	RICOTTURA	4
1.3	NORMALIZZAZIONE	5
1.4	TEMPRA	6
1.5	RICOTTURA DI ADDOLCIMENTO	8
1.6	RINVENIMENTO	8
1.7	RICOTTURA DI COALESCENZA O DI GLOBULIZZAZIONE	9
1.8	TEMPRA SUPERFICIALE	10
1.9	TEMPRA DEGLI ACCIAI AUSTENITICI O DI SOLUBILIZZAZIONE	11
1.10	TEMPRA DI SOLUZIONE	11
1.11	CEMENTAZIONE	13
1.12	NITRURAZIONE	15

Capitolo 2

TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE DELL'ACCIAIO

1.1	INTRODUZIONE	17
1.2	PRINCIPI DEL RISCALDAMENTO AD INDUZIONE	18
1.3	CARATTERISTICHE DELLE CORRENTI INDOTTE E PROFONDITA' DI PENETRAZIONE	19
1.4	RISCALDAMENTO E MODELLAZIONE DEL FLUSSO	20

1.5	RISPOSTA DELL'ACCIAIO AD UN TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE	21
1.6	PROPRIETA' ELETTRICHE E MAGNETICHE DELL'ACCIAIO	22
1.7	TRATTAMENTI TERMICI AD INDUZIONE: SISTEMI DI TEMPRA	23
1.8	APPLICAZIONI	25
1.9	VANTAGGI E SVANTAGGI	26
1.10	FATTORI DI COSTO DEL TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE	27

Capitolo 3

SISTEMA DI TEMPRA AD INDUZIONE: PROCESSO E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

1.1	INTRODUZIONE	28
1.2	SISTEMA DI TEMPRA AD INDUZIONE	28
1.3	CARATTERISTICHE DEL MATERIALE PRIMA DEL TRATTAMENTO DI TEMPRA	30
1.4	ATTIVITA' PRELIMINARI	36
1.5	PROVE DI TEMPRA AD INDUZIONE E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI	39

Capitolo 4

	<i>CONCLUSIONI</i>	59
--	---------------------------	-----------

INTRODUZIONE

La presente tesi si pone come obiettivo l'analisi della correlazione tra proprietà meccaniche ottenute in un acciaio in seguito ad un trattamento di tempra ad induzione e relativi parametri del circuito con la quale avviene il processo.

Verranno descritti i tentativi di trattamento superficiale effettuati sui vari provini allo scopo di ottenere uno spessore di tempra ed una durezza superficiale accettabili.

Si analizzeranno in particolare l'influenza della frequenza di alimentazione del circuito e della velocità di scorrimento del pezzo nell'induttore sulla profondità di tempra.

CAPITOLO 1

TRATTAMENTI TERMICI

1. INTRODUZIONE

Per trattamento termico si intende un'operazione o successione di operazioni termiche alle quali vengono sottoposti i metalli allo scopo di ottenere una determinata microstruttura e determinate proprietà meccaniche finali con variazioni più o meno accentuate rispetto a quelle di partenza. Il procedimento si compone essenzialmente di uno o più riscaldamenti ad una determinata temperatura T , un mantenimento a tale temperatura e un raffreddamento a velocità imposta.

Si fornirà nei successivi paragrafi una breve panoramica dei principali trattamenti termici cui vengono sottoposti metalli o leghe metalliche, con particolare riferimento agli acciai.

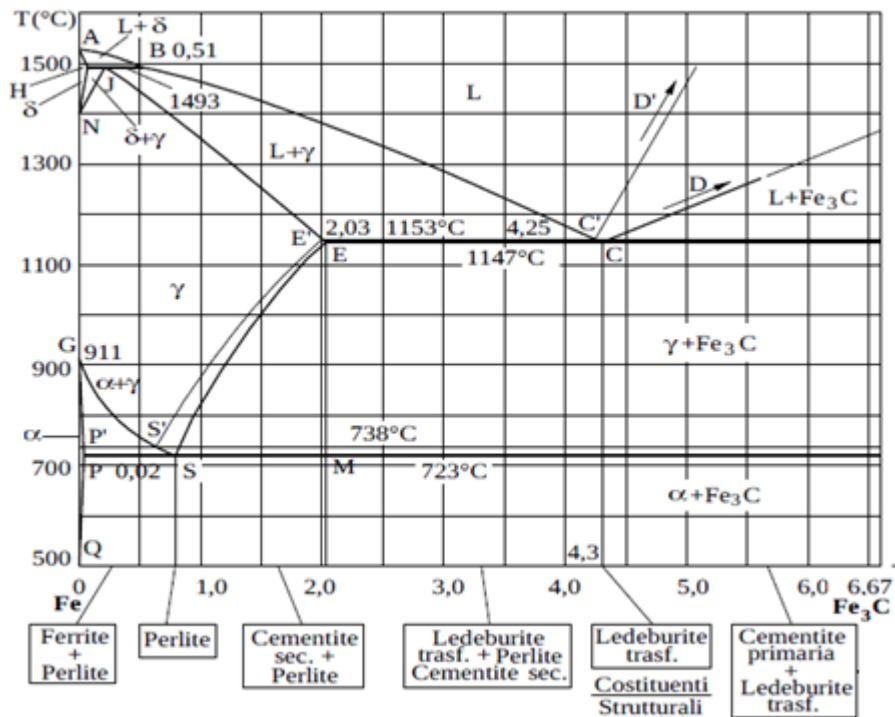


Figura 1.1- Diagramma Fe-C

Preliminarmente si fornisce una indicazione dei punti critici di cui si farà cenno durante la descrizione dei vari processi avendo allegato il diagramma ferro-carbonio (fig.1.1), così da rendere più chiara la comprensione delle temperature che verranno citate.

Come punto critico s'intende la temperatura alla quale avviene la trasformazione della struttura del materiale da una varietà allotropica ad un'altra.

Per il ferro puro si hanno:

- A_4 : Temperatura della trasformazione $Fe - \delta \rightarrow Fe - \gamma$ (1392°)
- A_3 : Temperatura della trasformazione $Fe - \alpha \rightarrow Fe - \gamma$ (911°)

Per le leghe Fe-C si hanno:

- A_4 : Temperatura corrispondente all'equilibrio fase δ con tracce di fase γ (*linea NJ*)
- A_3 : Temperatura corrispondente all'equilibrio fase γ con tracce di fase α (*linea GSM*)
- A_1 : Temperatura corrispondente all'equilibrio austenite eutettoidica – perlite (723°C; *linea PM*)
- A_{cm} : Temperatura corrispondente all'equilibrio austenite con tracce di cementite (*linea SE*)
- M_s : Temperatura di inizio trasformazione martensitica
- M_f : Temperatura di fine trasformazione martensitica

I trattamenti termici si possono suddividere come segue:

- *Trattamenti con temperature superiori all'intervallo critico $A_1 - A_3$:*
 - Ricottura
 - Normalizzazione
 - Tempra
- *Trattamenti con riscaldamento a temperature inferiori ad A_1 :*
 - Ricottura di addolcimento
 - Rinvenimento
 - Altri
- *Trattamenti particolari:*
 - Ricottura di coalescenza
 - Tempra superficiale
 - Tempra degli acciai austenitici
 - Tempra di soluzione
 - Malleabilizzazione
 - Altri
- *Trattamenti termochimici di diffusione:*
 - Cementazione

- Nitrurazione
- Altri

Si procede ora ad una breve analisi dei trattamenti principali fra quelli citati.

2. RICOTTURA

Questo trattamento, detto più propriamente “ricottura completa” (fig.1.2), consiste in:

1. Riscaldamento progressivo sino a raggiungere circa 50°C sopra A_3 ;
2. Mantenimento a questa temperatura per un tempo tale da garantire che tutto il pezzo abbia raggiunto la struttura della soluzione solida γ ;
3. Raffreddamento lento che permette una solidificazione secondo condizioni prossime a quelle di equilibrio.

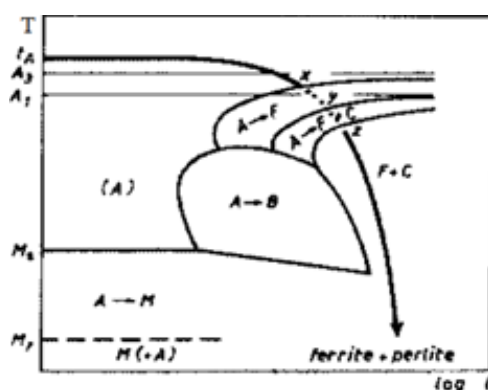


Figura 1.2- Schema di una ricottura completa

Si ottiene:

- ⇒ Un addolcimento del materiale
- ⇒ Una omogeneizzazione
- ⇒ L’annullamento della precedente struttura
- ⇒ L’annullamento di incrudimenti
- ⇒ L’eliminazione delle tensioni interne
- ⇒ L’eliminazione degli effetti della saldatura, della deformazione plastica, di un trattamento termico

Gli svantaggi del processo in oggetto sussistono nell’elevato costo richiesto sia dall’uso di temperature superiori ad A_3 che dall’impiego considerevole di tempo e mezzi; inoltre il trattamento comporta la formazione di una struttura a grossi grani

che mal si adatta alla lavorazione per asportazione di truciolo o ad eventuali trattamenti successivi.

E' possibile attuare una variante al processo studiata per renderlo più conveniente: la fase di riscaldamento non cambia mentre si agisce in altro modo durante la fase di raffreddamento. Quest'ultima avviene portando il pezzo più o meno rapidamente fino ad una temperatura di poco inferiore ad A_1 , quindi lasciandolo in queste condizioni per il tempo necessario a trasformare l'austenite in ferrite e perlite, infine raffreddandolo fino alla temperatura ambiente in aria o con un mezzo più rapido.

Tale processo, chiamato "ricottura isoterma", consente di ridurre sensibilmente il tempo necessario al trattamento (fig.1.3).

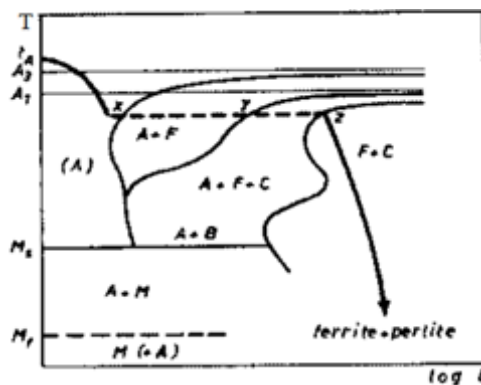


Figura 1.3- Schema di una ricottura isoterma

3. NORMALIZZAZIONE

Processo spesso usato in sostituzione del trattamento di ricottura completa, la normalizzazione consiste in:

1. Riscaldamento sino a raggiungere circa 70°C sopra A_3 ;
2. Mantenimento a tale temperatura per un tempo sufficiente alla realizzazione della trasformazione $\alpha \rightarrow \gamma$;
3. Estrazione del pezzo dal forno e raffreddamento dello stesso in aria tranquilla.

Si ottiene:

- ⇒ Struttura a grana fine e regolare
- ⇒ Maggiore durezza rispetto ad un acciaio ricotto

A ciò si aggiunge il vantaggio di un'operazione più rapida ed economica rispetto alla ricottura, poiché consente un minor immobilizzo di forni.

Al trattamento di normalizzazione può conseguire una ricottura di addolcimento che consente di attenuare l'eventuale eccessiva durezza dipendente dalla composizione chimica e dalle dimensioni del pezzo

4. TEMPRA

Il procedimento di tempra consiste in:

1. Riscaldamento sino a raggiungere circa 50°C sopra A_3 ;
2. Mantenimento a tale temperatura per un tempo sufficiente alla realizzazione della trasformazione $\alpha \rightarrow \gamma$ fino al cuore del pezzo;
3. Raffreddamento a velocità superiore a quella critica così da ottenere a temperatura ambiente una struttura martensitica.

Per ottenere una struttura completamente martensitica è necessario che, durante il mantenimento a temperatura di austenitizzazione, tutto il pezzo subisca la trasformazione $\alpha \rightarrow \gamma$; inoltre le trasformazioni devono iniziare e terminare a basse temperature.

Il rapido raffreddamento si ottiene immergendo il pezzo in un mezzo temprante; tali possono essere acqua, soluzioni saline, olio, metalli fusi, aria, proposti in ordine decrescente secondo la velocità di raffreddamento che consentono. Il mezzo di tempra è condizionato dall'attitudine del materiale alla tempra, che dipende dalla quantità di carbonio e di elementi in lega presenti nella composizione chimica del materiale stesso.

Il trattamento di tempra può indurre nel materiale elevate tensioni tali da produrre deformazioni, cricche di tempra e a volte la rottura del pezzo. Il fenomeno si spiega ricordando che la trasformazione da austenite a martensite avviene con aumento di volume e che la superficie raggiunge la temperatura M_s precedentemente rispetto al cuore, quindi l'espansione della zona interna è ostacolata dal materiale dello strato esterno già martensitico. Per ridurre il pericolo di distorsioni o di cricche di tempra negli acciai particolarmente sensibili a tali fenomeni è stato messo a punto il trattamento di tempra martensitica differite. Esso consiste nel temprare il materiale fino ad una temperatura di poco superiore a M_s attendere che sia raggiunto l'equilibrio termico del pezzo, quindi procedere al raffreddamento fino a temperatura ambiente prima che avvenga la trasformazione fase $\gamma \rightarrow \text{bainite}$: poiché la

temperatura dell'acciaio all'atto della trasformazione martensitica risulta in questo modo uniforme non si verifica lo stato di sforzi interni sopra citato (fig. 1.4).

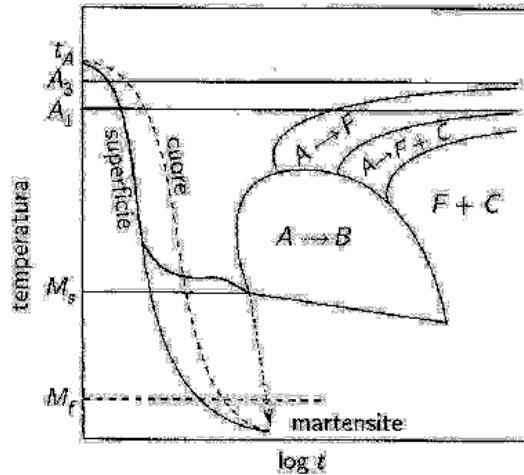


Figura 1.4- Traiettorie di raffreddamento del materiale appartenete alla superficie e al cuore dei pezzi a confronto con la curva di raffreddamento di una tempra martensitica differita (martempering).

Per alcune applicazioni può risultare preferibile che il materiale sia di struttura bainitica anziché martensitica; per queste esigenze esiste il trattamento di tempra bainitica che consiste in:

1. Riscaldamento sino a raggiungere temperature superiori ad A_3 (austenitizzazione)
2. Raffreddamento sufficientemente rapido tale da evitare l'inizio della trasformazione dell'austenite in perlite
3. Attraversamento del campo bainitico, cioè della zona di temperature superiori a M_s , secondo una delle varianti sotto citate:
 - a. Rallentamento sino a che la trasformazione intermedia sia sufficientemente progredita, quindi un raffreddamento sino a temperatura ambiente \Rightarrow si ottiene una struttura formata da bainite e martensite
 - b. Permanenza a temperatura costante sino a trasformazione ultimata, quindi un raffreddamento sino a temperatura ambiente \Rightarrow si ottiene una struttura con sola bainite

La prima variante è generalmente seguita da un rinvenimento per ottenere durezza e tenacità desiderate, nel secondo caso invece la durezza è controllata attraverso una opportuna variazione della temperatura di trasformazione (fig. 1.5 a-b).

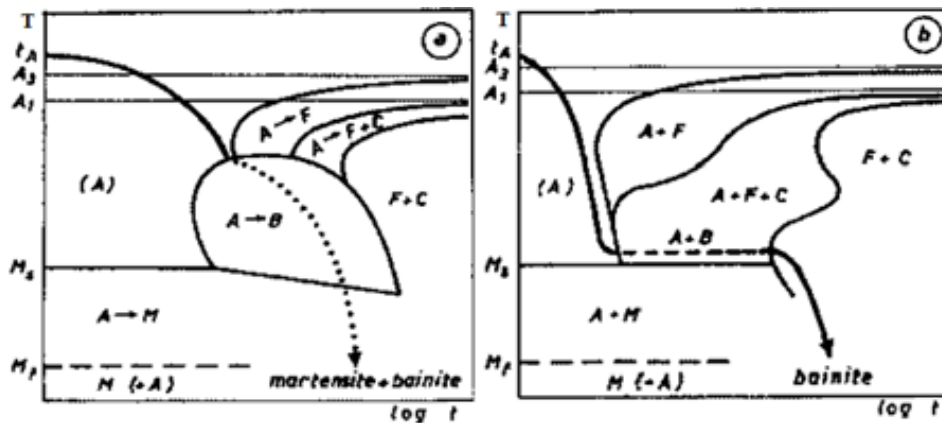


Figura 1.5- a) *tempra bainitica con raffreddamento continuo*, b) *tempra bainitica con mantenimento isoterma*

5. RICOTTURA DI ADDOLCIMENTO

La ricottura di addolcimento è un trattamento a temperature inferiori all'intervallo critico $A_1 - A_3$, per cui non induce trasformazioni di fase. Consiste in:

1. Riscaldamento ad una temperatura di poco inferiore ad A_1
2. Mantenimento a tale temperatura per un tempo conveniente
3. Raffreddamento piuttosto lento

Questo trattamento è eseguito allo scopo di facilitare la lavorazione a freddo del materiale, di eliminare eventuali tensioni interne, di ridurre la durezza negli acciai fortemente legati.

6. RINVENIMENTO

Come il trattamento precedentemente descritto, il rinvenimento non comporta trasformazioni di fase. Esso consiste in:

1. Riscaldamento ad una temperatura inferiore ad A_1
2. Mantenimento a tale temperatura per un tempo conveniente
3. Raffreddamento in un mezzo adeguato o secondo una legge prefissata fino a temperatura ambiente

Comunemente tale processo è realizzato su pezzi allo stato temprato per ridurre la durezza nonché lo stato di tensione residuo, conseguendo una diminuzione della fragilità (fig. 1.6). Questo trattamento consente alla struttura martensitica, instabile, del materiale di avvicinarsi a quella di equilibrio in misura proporzionale all'energia fornita dal riscaldamento alla temperatura di rinvenimento.

Il processo è regolato attraverso due variabili operative: temperatura e durata del rinvenimento. Attraverso l'esecuzione di una tempra seguita da un rinvenimento ad alta temperatura si ottiene un trattamento di bonifica che consente di raggiungere un grano fine e caratteristiche adatte all'impiego previsto.

Quando il rinvenimento è eseguito a temperature molto basse rispetto ad A_1 prende il nome di distensione (T a 150° - 180° C), usata per ridurre le tensioni interne senza diminuire la durezza.

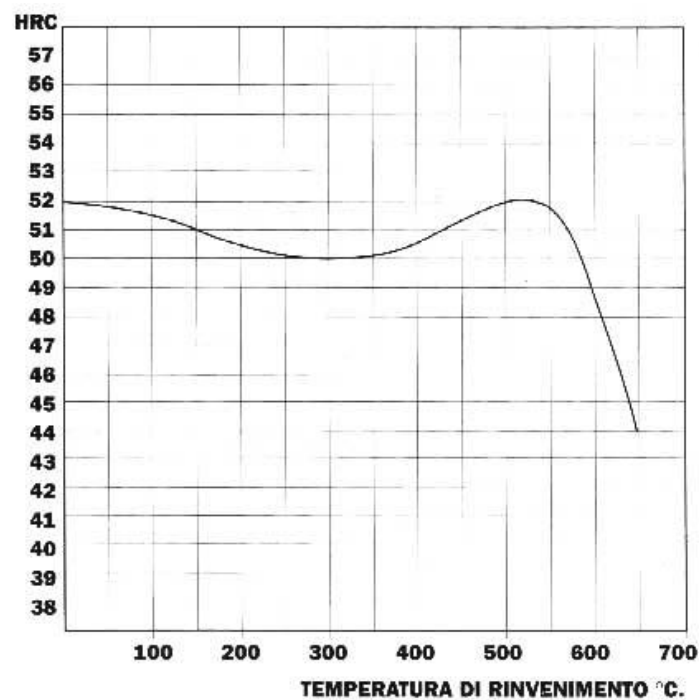


Figura 1.6- Curva durezza-parametro di rinvenimento per un acciaio da utensili per lavorazioni a caldo

7. RICOTTURA DI COALESCENZA O DI GLOBULIZZAZIONE

La ricottura di coalescenza o di globulizzazione è un trattamento termico particolare e consiste in:

1. Riscaldamento ad una temperatura leggermente inferiore o di poco superiore ad A_1 o talvolta oscillante attorno a tale valore (ricottura pendolare)
2. Mantenimento a tale temperatura per un tempo conveniente
3. Raffreddamento lento

Questo processo ha lo scopo di indurre la struttura verso un equilibrio caratterizzato da ferrite a grani equiassici in cui siano dispersi carburi di forma tondeggianti (sferoidi di cementite).

Si ottiene:

- ⇒ Migliore lavorabilità alle macchine utensili
- ⇒ Ottima deformabilità plastica a freddo
- ⇒ Rottura del truciolo facilitata da globuli di cementite dispersi nella matrice

In genere esso si applica ad acciai ad alto tenore di carbonio ed è tipico per quelli da cuscinetti, che devono essere lavorati alle macchine automatiche.

8. TEMPRA SUPERFICIALE

La tempra superficiale è usata quando si ha la necessità di produrre un pezzo che presenti una elevata durezza superficiale unita ad una buona tenacità a cuore. Il processo consiste in:

1. Riscaldamento della sola superficie del pezzo al di sopra di A_3 lasciando il cuore ad una temperatura inferiore ad A_1
2. Raffreddamento attraverso un mezzo refrigerante della superficie riscaldata

Esistono due modalità per realizzare il riscaldamento della superficie lasciando il cuore freddo: il primo, metodo ad induzione a media frequenza, utilizza la proprietà delle correnti parassite di distribuirsi solo nello strato sottostante alla superficie di un materiale metallico e consiste nel far muovere il pezzo in una bobina induttrice opportunamente sagomata; il secondo opera il riscaldamento superficiale tramite fiamme ossiacetileniche. Nel primo caso la profondità dello strato temprato dipende dalla potenza elettrica specifica e dal tempo, mentre nel secondo dalla velocità di rotazione del pezzo di fronte al dardo.

Per applicare questo trattamento è necessario che il materiale sia stato preventivamente trattato e rinvenuto così da conferire al cuore le prefissate proprietà; inoltre è importante tenere sempre in considerazione la forma e il materiale del pezzo prima di scegliere il processo da effettuare.

9. TEMPRA DEGLI ACCIAI AUSTENITICI O DI SOLUBILIZZAZIONE

Trattamento eseguito su particolari categorie di acciai e leghe, la tempra degli acciai austenitici o di solubilizzazione ha lo scopo di ottenere una struttura austenitica a temperatura ambiente. Tale stato del materiale si raggiunge impedendo qualsiasi trasformazione in fase di raffreddamento ed è una possibilità limitata ai casi in cui la temperatura di inizio trasformazione martensitica sia inferiore a quella ambiente.

Il processo in esame consiste in:

1. Riscaldamento a temperatura notevolmente elevata tale da rimuovere le alterazioni strutturali dovute ai processi di fabbricazione
2. Permanenza in tali condizioni per il tempo necessario a mandare in soluzione eventuali costituenti
3. Raffreddamento veloce

10. TEMPRA DI SOLUZIONE

Trattamento di particolare interesse nel campo dei materiali metallici non ferrosi, la tempra di soluzione permette di realizzare un indurimento per precipitazione a seguito di un invecchiamento artificiale o naturale del materiale.

Tale tempra è applicabile a tutte quelle leghe che presentano una soluzione stabile a temperature elevate con diminuzione di solubilità al diminuire della temperatura: si prenda l'esempio tipico della lega alluminio-rame, di cui si consideri il caso con il 3% di rame.

Il trattamento consiste in:

1. Riscaldamento ad una temperatura t_0 superiore alla curva limite di solubilità ($>500^\circ\text{C}$) così da ottenere solo soluzione solida k
2. Mantenimento a tale temperatura per il tempo necessario a garantire il completo passaggio in soluzione della fase θ (Cu-Al₂) (fig.1.7)
3. Raffreddamento veloce

Il raffreddamento veloce non permette agli atomi di rame di diffondere a bordo grano per precipitare come fase θ ; rimane, invece, una soluzione solida come fase k il cui reticolo presenta elevate distorsioni attorno ai punti ricchi di rame. Questa struttura impedisce drasticamente il movimento delle dislocazioni e lo scorrimento dei piani così che il materiale acquisisce notevoli proprietà di resistenza e di durezza mentre risulta meno deformabile.

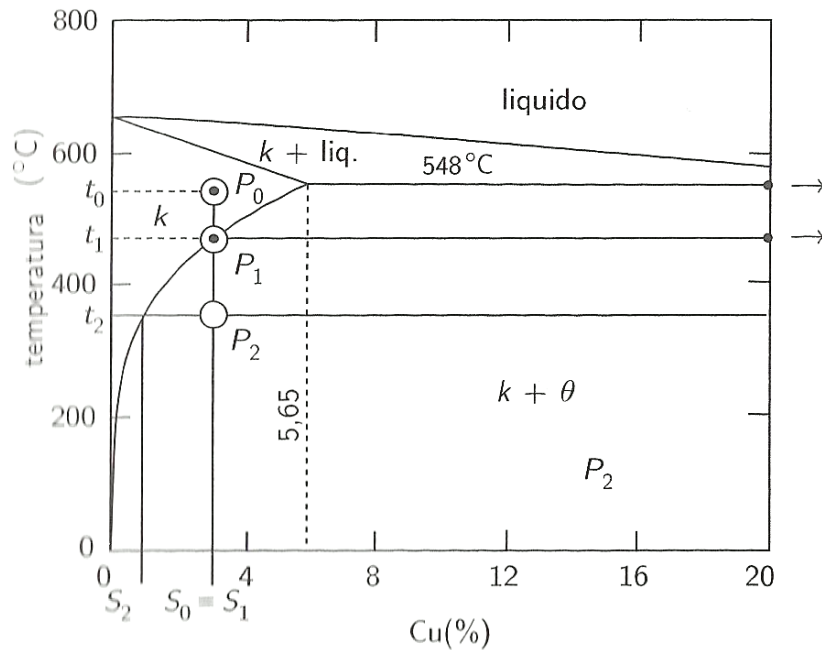


Figura 1.7- Porzione di diagramma Al-Cu

A temperatura ambiente questa struttura tende a modificarsi nel tempo nel tentativo di rigettare gli atomi di Cu e di formare il composto intermetallico Cu-Al₂: tale effetto è così lento da risultare trascurabile. Se invece si sottopone la lega ad un trattamento di rinvenimento, per esempio a 130°C, questo movimento degli atomi è facilitato e comporta addensamenti di rame nel reticolo cubico a facce centrate dell'alluminio; le zone così formate non possiedono un reticolo cristallino proprio e sono coerenti con la matrice (continuità tra i piani cristallini). La zona di addensamento citata è detta zona Guinier-Preston o G.P.1 ed è caratterizzata da una distorsione elastica del reticolo dovuta alla dimensione degli atomi di rame, minore rispetto a quelli di alluminio di circa il 12%. Mantenendo la lega alla temperatura di rinvenimento per tempi più lunghi, in tali punti si forma un vero e proprio precipitato, sebbene ancora coerente con la matrice, detto G.P.2 o θ'', che provoca una estesa distorsione elastica del reticolo circostante; proseguendo con l'invecchiamento si verificano i primi precipitati θ' non più del tutto coerenti, ottenendo infine la formazione delle particelle θ incoerenti del composto Cu-Al₂. Esiste una diretta relazione tra l'andamento della durezza e la successione di questi stadi: si osserva come i valori della durezza siano massimi in corrispondenza della presenza di θ'' e in minor misura di θ' mentre diminuiscono con la comparsa delle particelle incoerenti θ (fig.1.8).

Il tempo e la temperatura di rinvenimento variano con la composizione chimica e vanno determinate sperimentalmente.

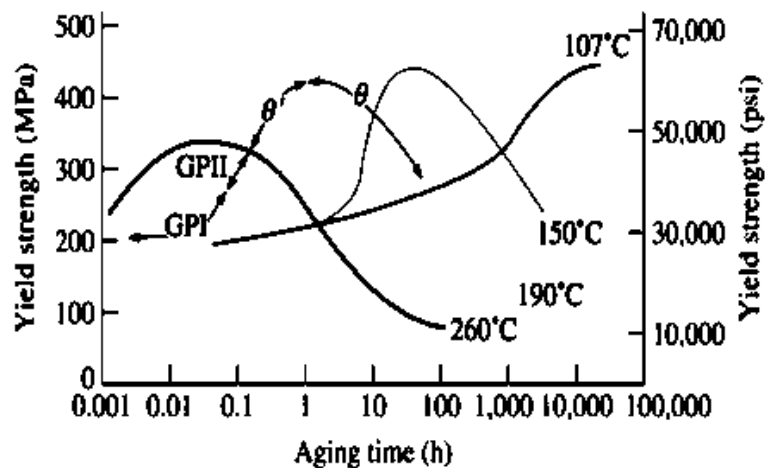


Figura 1.8- Effetto delle temperature e dei tempi di invecchiamento nelle leghe 2017 (Al-4% Cu)

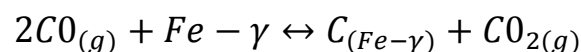
11. CEMENTAZIONE

La cementazione è un trattamento termochimico di diffusione studiato per quelle applicazioni in cui si richiede l'uso di un materiale resistente all'usura ma dotato contemporaneamente di elevata tenacità.

Queste caratteristiche sono ottenibili attraverso un processo che si sviluppa in quattro fasi:

1. Si riscalda un acciaio con tenore di carbonio inferiore allo 0,2% portandolo ad una temperatura di austenitizzazione di 900°-950°C
2. Lo si mette a contatto con una atmosfera carburante in grado di aumentare il tenore di carbonio dello strato superficiale
3. Si mantiene il pezzo in queste condizioni sino al raggiungimento dello spessore che si desidera trattare
4. Si esegue una tempra diretta o alternativamente si lascia raffreddare lentamente e si tempra successivamente

La reazione responsabile della cementazione è:



Esistono tre diversi tipi di cementazione a seconda del tipo di agente cementante utilizzato:

- Cementazione solida o in cassetta
- Cementazione liquida
- Cementazione gassosa

La cementazione solida viene eseguita immettendo nel forno una cassetta di ghisa contenente sia l'agente cementante solido (carbone di legna, carbonato di sodio e carbonato di bario) che il pezzo; ha il vantaggio di permettere l'isolamento di alcune parti del pezzo dal trattamento.

La cementazione liquida viene eseguita in un bagno (cianuro di sodio, carbonato di sodio o di bario e cloruro di sodio o di bario) contenuto in una vasca d'acciaio, che viene portata a 870°-950°C, in cui vengono immersi per pochi minuti i pezzi. Presenta numerosi vantaggi come la rapidità del processo, la facilità di controllo della temperatura del bagno, la possibilità di eseguire una tempra diretta, l'ottenimento di superfici non ossidate, la realizzazione anche su grandi pezzi, la possibilità di lavorare con temperature più basse. Gli svantaggi sorgono dalla produzione di azoto nel caso di contatto del bagno con l'aria (con trasformazione del processo in una carbonitrurazione indesiderata), inoltre è necessario disporre di mezzi di protezione per evitare l'inalazione dei vapori velenosi e dei fumi da parte degli addetti.

La cementazione gassosa viene eseguita in forni a caricamento continuo o discontinuo riscaldati a circa 900°C in cui i pezzi sono messi a contatto con la miscela gassosa (ossido di carbonio, idrocarburi, idrogeno o gas inerti) per tre o quattro ore. Viene usata principalmente per pezzi di piccole e medie dimensioni così da rendere il processo controllabile e veloce. L'impianto è costoso.

Dopo la cementazione viene eseguito un trattamento di tempra e infine un rinvenimento.

La tempra è effettuata allo scopo di donare al materiale durezza in superficie e tenacità al cuore, ridimensionando la grandezza del grano che ha subito un ingrossamento durante l'esposizione prolungata alle alte temperature; in questa fase si deve considerare che la superficie può avere una temperatura di austenitizzazione notevolmente inferiore rispetto a quella del cuore, causata dal diverso tenore di carbonio, così si procede mediante una doppia tempra: una prima tempra per affinare la struttura del cuore, una seconda per affinare il grano dello strato cementato.

Il sistema a doppia tempra ha lo svantaggio di essere costoso, per questo spesso viene sostituito da:

- Tempra diretta a partire dalla temperatura di cementazione per quegli acciai la cui composizione chimica ostacola un ingrossamento eccessivo del grano
- Tempra da una temperatura di poco al di sopra di A_1 realizzata in seguito al raffreddamento lento succeduto alla cementazione; si ottiene così uno strato superficiale indurito su un cuore abbastanza resistente e tenace.
- Tempra da una temperatura tra il punto critico A_3 del cuore e A_1 dello strato cementato realizzata in seguito al raffreddamento lento succeduto alla cementazione; si ottiene così in tal modo uno strato superficiale indurito più fragile del precedente su un cuore più resistente ma meno tenace.

Il rinvenimento è realizzato ad una temperatura di circa 180°C con lo scopo di annullare lo stato interno di sollecitazione presente nello strato indurito.

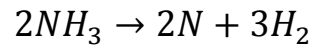
12. NITRURAZIONE

La nitrurazione è un trattamento termochimico di diffusione che si effettua per assorbimento di azoto ed ha lo scopo di attribuire ai pezzi una durezza superficiale molto elevata. Tale trattamento si usa negli acciai a medio tenore di carbonio contenenti determinati elementi in lega quali alluminio, cromo, vanadio, molibdeno che permettono la formazione dei nitruri responsabili dell'aumento delle proprietà meccaniche richieste.

Il processo consiste in:

1. Riscaldamento in una camera a tenuta di gas a circa 500°C
2. Permanenza in tali condizioni con esposizione ad una corrente di ammoniacca per un tempo variabile da 40 a 100 ore in funzione della penetrazione dello strato nitrurato che si desidera ottenere.

Il meccanismo alla base della nitrurazione è complesso, in questa sede, se ne propone in breve solo un accenno. Poiché l'azoto molecolare è insolubile nel ferro anche in condizioni di temperatura e pressione elevate, si ricorre a particolari condizioni sperimentali e all'uso di una corrente di ammoniacca NH_3 per ottenere la diffusione dell'azoto all'interno dello strato superficiale del pezzo. Si opera in modo che oltre alla reazione di dissociazione termica dell'ammoniaca avvengano anche altre reazioni come quella che porta alla formazione di una particolare fase del sistema FeN. L'ammoniaca si dissocia per azione catalitica del Fe- α secondo la reazione



fornendo l'azoto atomico che diffonde, dando origine ai nitruri di ferro, di alluminio e di cromo. Per creare le condizioni favorevoli alla reazione dell'azoto con il ferro per la produzione di Fe_4N occorre operare in un intervallo di temperature molto ristretto attorno ai 520°C. Il fenomeno responsabile dell'incremento della durezza è la precipitazione di nitruri e carbonitruri.

La nitrurazione permette di raggiungere una durezza di 1200 Vickers, maggiore rispetto a quella di circa 700 Vickers conseguibile con la cementazione.

Lo spessore di nitrurazione ottenibile è al massimo di qualche decimo di millimetro.

Il trattamento viene eseguito dopo un processo di bonifica ed è l'ultima operazione del ciclo produttivo, salvo una eventuale lucidatura.

CAPITOLO 2

TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE

DELL'ACCIAIO

1. INTRODUZIONE

Il riscaldamento tramite induzione elettromagnetica viene utilizzato per fornire calore a materiali conduttori servendosi di un campo magnetico variabile le cui linee di forza entrino nel pezzo. Il campo elettrico indotto da questo processo crea una differenza di potenziale che induce una corrente elettrica all'interno del materiale dipendente dalla forma e dalle caratteristiche dello stesso. Tali correnti indotte, fluendo in opposizione alla resistenza di un conduttore per natura imperfetto, dissipano energia per effetto Joule producendo calore.

Numerose operazioni per la lavorazione di metalli possono essere eseguite tramite riscaldamento ad induzione, ossia fusione, saldatura, brasatura, trattamenti termici, riscaldamento in preparazione ad una lavorazione a caldo, rifinitura. L'uso prevalente si riscontra nel trattamento termico eseguito per l'indurimento della superficie dell'acciaio e della ghisa.

A confronto con le tecniche che si servono del forno come fonte di calore questo sistema risalta per il risparmio di energia e per le elevate temperature che consente di raggiungere. Questo metodo senza contatto e con generazione del calore all'interno del pezzo presenta altri vantaggi: la facilità di automazione e controllo del processo, una ridotta richiesta di spazio nel piano, condizioni di lavoro calme e pulite, idoneità all'integrazione del sistema all'interno di una produzione in linea, capacità di automonitoraggio.

In questo capitolo si vuole fornire una breve panoramica sull'uso dell'induzione elettromagnetica per la realizzazione di trattamenti termici sull'acciaio.

2. PRINCIPI DEL RISCALDAMENTO AD INDUZIONE

Il sistema di riscaldamento ad induzione è costituito schematicamente da una spira induttrice, un alternatore di corrente, che fornisce la potenza, e dal pezzo di lavoro stesso. La spira si presenta in diverse forme dipendenti dal modello di riscaldamento che si vuole ottenere (fig. 2.1) ed è connessa al generatore di potenza, che le fornisce il flusso di corrente alternata responsabile della creazione del campo magnetico. L'intensità di quest'ultimo dipende dal numero di spire dell'avvolgimento all'interno del quale viene posto l'oggetto conduttore (fig. 2.2).

Come espresso dalla legge di Faraday sull'induzione elettromagnetica, all'interno del pezzo nascono delle correnti parassite; La suddetta legge mette in relazione il potenziale indotto (e) con la variazione nel tempo del flusso del campo magnetico concatenato e il numero di spire N :

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



Figura 2.1- Esempi di forma della spira conduttrice

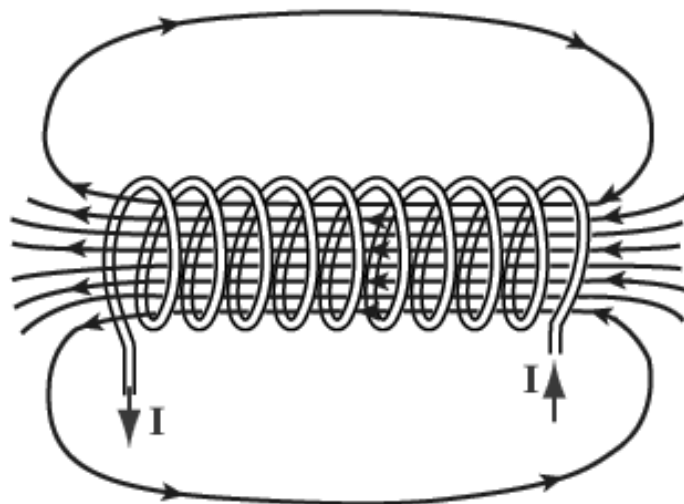


Figura 2.2- Esempio di avvolgimento con visualizzazione delle linee del campo

3. CARATTERISTICHE DELLE CORRENTI INDOTTE E PROFONDITA' DI PENETRAZIONE

Le correnti indotte fluiscono in direzione contraria rispetto alla direzione della corrente percorsa nella spira descrivendo una sorta di "immagine ombra" dell'avvolgimento conduttore (fig. 2.3).

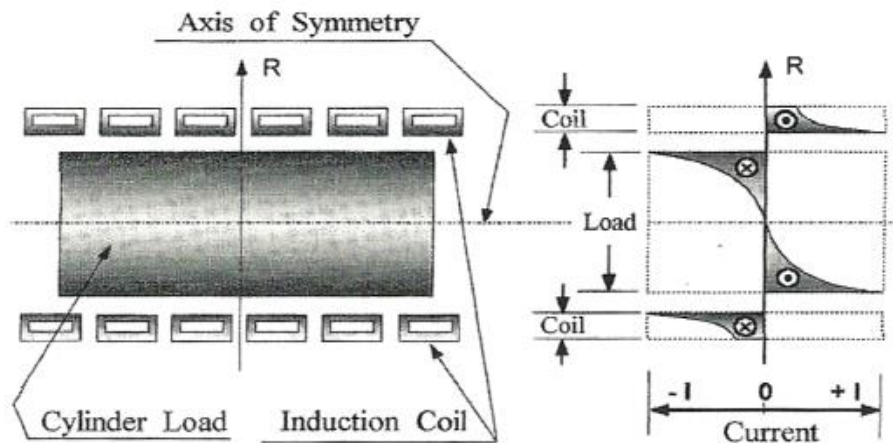


Figura 2.3- Distribuzione delle correnti indotte rispetto alla corrente nell'induttore

Per il verificarsi di un effetto analogo a quello che le ha create, tali correnti inducono a loro volta un campo magnetico che si manifesta in opposizione a quello generato dall'avvolgimento: è questo fenomeno che previene la penetrazione all'interno del pezzo, realizzando il così detto "skin effect", che consiste nella maggior concentrazione delle correnti nelle zone più vicine alla superficie.

Una formula descrivente approssimativamente la profondità di penetrazione (dove la densità della corrente assume il valore di $\sim \frac{1}{e}$)

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu f}}$$

Dove ρ è la resistività del pezzo, μ_0 la permeabilità magnetica nel vuoto, μ la permeabilità magnetica nel pezzo, f la frequenza del campo magnetico alternato.

A causa dell'effetto pelle è possibile dimostrare che le correnti indotte, in un oggetto piano largo e di spessore maggiore rispetto alla profondità di penetrazione, decrescono esponenzialmente dalla superficie al centro del pezzo (fig. 3.2).

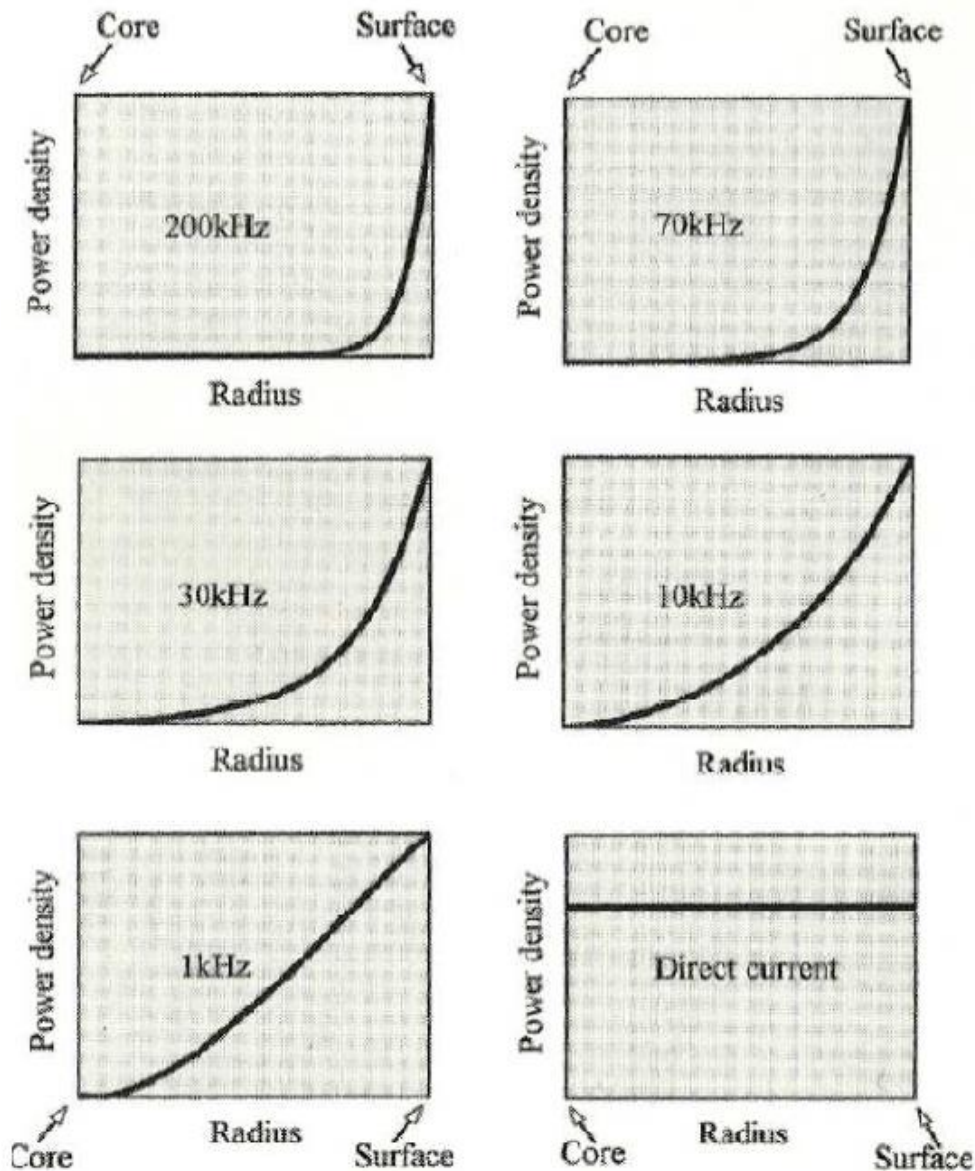


Figura 2.4- Distribuzione della corrente nella sezione di un conduttore (pezzo cilindrico) al variare della frequenza

4. RISCALDAMENTO E MODELLAZIONE DEL FLUSSO

Gran parte del riscaldamento in termini di potenza in termini di calore sviluppato per effetto Joule; il resto deriva da perdite per isteresi nei materiali ferromagnetici durante l'inversione del campo magnetico. Le variabili che influenzano significativamente il riscaldamento possono essere riassunte come segue:

- Intensità del campo magnetico
- Vicinanza del pezzo all'avvolgimento
- Proprietà magnetiche ed elettriche del materiale quali la permeabilità magnetica (μ) e la resistività elettrica (ρ)

L'andamento del riscaldamento varia secondo l'applicazione utilizzata e l'analisi matematica del procedimento è generalmente complessa, eccetto per alcuni casi di geometria semplice come pezzi cilindrici o piastre. Tale difficoltà è conseguenza di una generazione di calore non uniforme attraverso il pezzo, della presenza di trasferimento del calore stesso (attraverso la conduzione) e, fattore molto importante, del fatto che le proprietà elettriche e magnetiche del pezzo subiscono, per la maggior parte dei materiali, una forte dipendenza dalla temperatura.

Il grado di accoppiamento tra il pezzo e il campo magnetico dell'avvolgimento è determinato dal numero di linee di flusso magnetico che entrano nel pezzo. Questa densità di flusso è proporzionale alla corrente che percorre le spire e la quantità di energia trasferita dipende dal quadrato del numero di linee di flusso intercettate dal pezzo. In particolare è la frequenza della corrente dell'avvolgimento ad influenzare il modello di correnti indotte, poiché le linee di flusso tendono a rimanere più vicine al conduttore quanto maggiore è il suo valore. Tale effetto provoca una perdita di flusso a causa dello spazio situato tra l'oggetto e l'avvolgimento: in questa zona, detta "air gap", si concentrano un quantitativo crescente di linee all'aumentare della frequenza. E' possibile utilizzare dei materiali ferromagnetici opportunamente posizionati, fungenti da concentratori di flusso, in modo tale da guidare le linee nelle zone desiderate.

5. RISPOSTA DELL'ACCIAIO AD UN TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE

Analogamente ai casi di riscaldamento convenzionali, la durezza e il profilo di durezza della zona trattata termicamente dipendono solamente dalla composizione chimica dell'acciaio e dal mezzo di tempra. La questione principale da considerare risulta pertanto la fase di austenitizzazione, i cui parametri fondamentali da controllare sono temperatura e tempo.

Per trasformare completamente un acciaio nella fase austenite è necessario che esso permanga per un determinato tempo ad una temperatura superiore al punto critico A_3 . Tale valore dipende dalla struttura iniziale del materiale ma anche dall'entità del superamento della temperatura di inizio trasformazione austenitica.

Il riscaldamento ad induzione permette il raggiungimento di temperature più elevate rispetto a quelle ottenibili nei processi convenzionali in forno. Si osserva che il riscaldamento rapido richiede temperature di austenitizzazione più alte, consentendo tuttavia di completare la trasformazione mantenendo tale temperatura per un tempo inferiore. Generalmente le temperature raccomandate, per ridurre o eliminare il tempo di austenitizzazione durante il ciclo di riscaldamento continuo a induzione,

sono approssimativamente di 100°C al di sopra del valore superiore critico di equilibrio. In ogni caso si rimane al di sotto dei valori in cui possa avvenire una crescita indesiderata della dimensione del grano. Un ulteriore innalzamento della temperatura può rendersi necessario nel caso di acciai con un contenuto di elementi in lega che stabilizzino la cementite (per esempio titanio, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tungsteno, ecc.), mentre un aumento del tempo di esposizione può essere richiesto in presenza di carburi come NbC, TiC e VC, a causa della loro dissoluzione più lenta.

Per queste ragioni è sempre bene disporre della composizione chimica completa per ogni lotto impiegato in processi di trattamento ad induzione; quando questo non sia possibile sarà opportuno determinare la temperatura di austenitizzazione attraverso analisi sperimentali.

Ulteriore vantaggio dell'uso di trattamenti termici ad induzione è la loro capacità di impartire al materiale una durezza superiore rispetto a quella raggiunta convenzionalmente in forno. Tale importante caratteristica è attribuibile a tre sorgenti: tensioni residue, piccole quantità di austenite residua, segregazioni di carbonio. Tensioni di compressione nascono nella superficie indurita per effetto del maggior volume specifico caratteristico della martensite rispetto a quello della bainite e della perlite. L'incremento di durezza dovuto alla presenza di segregazioni deriva dal fatto che, nel rapido riscaldamento con brevi tempi di mantenimento, si determinano variazioni del contenuto di carbonio entro i grani di austenite; questo fenomeno fa sì che durante la tempra si formi una miscela di martensite ricca e povera di carbonio: l'effetto decresce nel caso di acciai il cui contenuto di carbonio superi lo 0,6-0,8%, oltre il quale la durezza non cambia.

6. PROPRIETA' ELETTRICHE E MAGNETICHE DELL'ACCIAIO

Si è accennato precedentemente a quanto siano importanti, per il successo di un riscaldamento ad induzione, le proprietà del materiale quali la permeabilità magnetica e la resistività elettrica. Entrambi i fattori, infatti, entrano nella formula della profondità di penetrazione; una volta che essi siano stati fissati si è in grado di agire sulla profondità stessa unicamente modificando la frequenza. In genere le frequenze elevate sono usate per ottenere un rafforzamento superficiale, mentre quelle più basse sono impiegate per indurire completamente la struttura.

Le proprietà magnetiche ed elettriche del materiale sono fortemente dipendenti dalla temperatura e il loro comportamento subisce una variazione di pendenza in

corrispondenza a quei valori in cui avviene la trasformazione di fase $\alpha \rightarrow \gamma$. Spesso può essere rappresentata come funzione lineare della temperatura

$$\rho(t) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Dove ρ_0 è la resistività a temperatura ambiente T_0 ; ρ è la resistività alla temperatura T , α è il coefficiente di temperatura della resistività elettrica. Per materiali come acciai, la resistività elettrica α è una funzione non lineare della temperatura (varia in base alla struttura allotropica del Fe).

7. TRATTAMENTI TERMICI AD INDUZIONE: SISTEMI DI TEMPRA

L'induzione elettromagnetica costituisce una modalità di riscaldamento impiegata in differenti operazioni di trattamento termico, ovvero:

- Rafforzamento superficiale completo
- Ricottura e distensione
- Normalizzazione e tempra
- Indurimento per precipitazione e invecchiamento
- Affinamento del grano

Procediamo alla descrizione dell'operazione di tempra.

Per determinare il sistema di tempra adeguato alla realizzazione del profilo di indurimento desiderato nel materiale è necessario prendere in considerazione alcuni fattori:

- Dimensioni e geometria della parte da trattare
- Tipologia di operazioni di austenitizzazione conseguita (superficiale o completa)
- Modalità di riscaldamento con induttore fermo o in movimento
- Temprabilità

I due sistemi più comuni adottati per il raffreddamento veloce, che consente di ottenere la tempra del materiale, consistono nella tecnica spray ad anelli e in quella ad immersione.

La prima si serve di uno o più anelli coassiali con la spira conduttrice: essi possono essere posizionati immediatamente sotto, di fianco oppure concentrici rispetto al conduttore (fig. 2.5). Nel caso di oggetti non simmetrici l'apparato temprante, simile alla spira, riproduce generalmente la stessa forma della parte da temprare.



Figura 2.5- *Esempio di sistema di raffreddamento ad ugelli posto in seguito alle spire dell'induttore (sistema con pezzo-induttore in movimento)*

I mezzi tempranti più frequentemente utilizzati nella pratica dei trattamenti termici ad induzione, analogamente alle tecniche in forno, sono acqua e olio. L'olio è tipicamente impiegato quando il trattamento termico deve essere eseguito su acciai ad elevata temprabilità o su parti soggette più facilmente a rotture o distorsioni. L'uso dell'acqua è molto diffuso, tuttavia richiede una particolare attenzione sia alla temperatura che alla pulizia della stessa:

- la temperatura risulta fondamentale per limitare eventuale distorsioni sul pezzo in fase in tempra
- la purezza dell'acqua influisce sull'integrità del sistema del circuito di raffreddamento evitando ostruzioni e depositi

Per le applicazioni di indurimento ad induzione sono comuni anche mezzi tempranti come soluzioni di alcool polivinile e aria compressa. Il primo è usato per ottenere l'indurimento di materiali con limitate capacità di rafforzarsi: in essi l'uso dell'olio non eserciterebbe un'azione temprante di entità sufficiente al raggiungimento del rafforzamento desiderato, mentre l'acqua porterebbe ad un raffreddamento troppo drastico, responsabile della formazione di distorsioni o cricche. L'alcool polivinile è uno dei così detti polimeri tempranti e presenta il vantaggio, rispetto agli oli, di non essere infiammabile.

L'aria compressa viene utilizzata per gli acciai con elevata temprabilità che presentino un calore da rimuovere dalla superficie relativamente basso. Un'applicazione tipica è il raffreddamento di denti di ingranaggi (fig. 2.6).



Figura 2.6- *Esempio trattamento di indurimento per induzione di denti di ruota dentata*

A seguito di una tempra inadeguata possono presentarsi alcuni problemi, tra i quali cricche di tempra, punti deboli, distorsioni. Punti deboli talvolta si verificano nel caso in cui venga usato come mezzo temprante l'acqua: l'elevata temperatura del pezzo può indurre la formazione di uno strato di vapore acqueo a contatto con la superficie e se, per effetto della scarsa pressione, il fluido stesso non è in grado di rimuoverlo, tale fenomeno impedisce la realizzazione di un efficace scambio termico, ostacolando così la formazione della struttura martensitica. L'effetto è più grave negli acciai dotati di scarsa temprabilità e si può attenuare migliorando il progetto dell'anello di tempra o modificando la configurazione dell'intero dispositivo di raffreddamento.

Le cricche di tempra sono tipicamente una conseguenza dei seguenti fattori:

- Eccessiva severità di tempra (particolarmente critica negli acciai ad elevato contenuto di carbonio)
- Mancata uniformità del trattamento
- Modifiche dei profili di tempra sulla parte da trattare con aree di transizione insufficienti
- Rugosità superficiale

Distorsioni del pezzo lavorato sono causate dalla presenza di tensioni residue, di riscaldamento irregolare o raffreddamento non uniforme e dalla particolare geometria dell'oggetto stesso; esse possono sempre essere controllate modificando le modalità di riscaldamento e di tempra.

8. APPLICAZIONI

I trattamenti termici ad induzione sono stati introdotti nel 1930 e applicati ad un'ampia varietà di produzioni in serie. Inizialmente l'uso prevalente fu il riscaldamento di superfici assialsimmetriche di oggetti in acciaio, come assi e alberi;

in seguito sono state sviluppate tecniche di indurimento superficiale per pezzi di geometria più complessa. Di recente, indurimento ad induzione e tecniche di ricottura sono state studiate per ottenere una profondità elevata e trattamenti di intere sezioni trasversali.

Si riportano esempi di componenti in cui è comunemente applicata l'induzione:

Applicazioni di rafforzamento superficiale:

- ⇒ Campo dei trasporti: alberi a gomito, alberi a camme, alberi di trasmissione, giunti universali, ingranaggi, sedi di valvole, ecc.
- ⇒ Campo delle macchine utensili: dispositivi di trasmissione e alberi, ecc.
- ⇒ Fabbricazione oggetti metallici e utensili a mano: rullo da laminatoio, pinze, martelli, ecc.

Applicazioni di rafforzamento completo:

- ⇒ Componenti strutturali
- ⇒ Molle di acciaio
- ⇒ Anelli da catena, ecc.

9. VANTAGGI E SVANTAGGI

L'utilizzo del trattamento termico ad induzione permette di evitare molti dei problemi associati al procedimento eseguito in forno. Tra i vantaggi risalta la rapidità del riscaldamento, che rende il metodo particolarmente conveniente nelle operazioni di trattamento termico continuo ad elevato volume di produzione. Grazie all'introduzione di tecnologie a microprocessore i controlli necessari a questo tipo di tecniche sono diventati facilmente disponibili. Inoltre i difetti di decarburazione e scagliatura, uniti alla necessità di atmosfere protettive, possono essere evitati. Infine si tratta di processi che non inquinano e che consentono un uso efficiente dell'energia fornita (con un'appropriata progettazione della spira e selezione dell'attrezzatura può essere convertita in calore, all'interno del pezzo, più dell'80% dell'energia elettrica di output). Simili livelli di efficienza non sono raggiungibili con i metodi convenzionali in forno, in cui una rilevante porzione del consumo di energia viene perduta attraverso la liberazione dei gas caldi.

Tra gli svantaggi dell'induzione si considerano le difficoltà nella progettazione dell'avvolgimento conduttore e nella selezione dell'attrezzatura, che devono essere adeguati alla specifica parte da trattare, adattandosi alla geometria e alla

temperatura a cui viene ad essere effettuato il trattamento. Questa tecnica è generalmente da escludersi nei casi in cui il volume di produzione sia basso in quanto il trattamento risulta economicamente svantaggioso.

10. FATTORI DI COSTO DEL TRATTAMENTO TERMICO AD INDUZIONE

I costi energetici del trattamento ad induzione lo rendono scarsamente concorrenziale rispetto ad altri basati sull'utilizzo di fonti combustibili. Tuttavia la capacità del trattamento in oggetto di eseguire un riscaldamento rapido del metallo permette di ottenere risparmi connessi al ridotto tempo del processo, all'incremento della produzione, alla riduzione del lavoro necessario; da sottolineare inoltre l'opportunità di effettuare il trattamento all'interno di una linea di produzione automatizzata.

Infine, consentendo il riscaldamento di piccole porzioni di metallo, tale modalità diventa competitiva nell'ambito di rafforzamenti superficiali e selettivi.

Il trattamento termico ad induzione consente inoltre inferiori costi collegati alla scelta dei materiali, potendosi utilizzare acciai comuni al carbonio al posto di costosi acciai in lega. Infatti, unitamente al breve tempo di riscaldamento, esso permette il raggiungimento di temperature di austenitizzazione più elevate, ottenendo così durezze superiori rispetto a quelle conseguibili tramite processi convenzionali con acciai a basso contenuto di carbonio.

CAPITOLO 3

SISTEMA DI TEMPRA AD INDUZIONE: PROCESSO E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

1. INTRODUZIONE

Il seguente capitolo è strutturato in 4 sottosezioni:

- La prima sottosezione descrive il sistema i tempra ad induzione utilizzato
- La seconda sottosezione descrive le caratteristiche iniziali del materiale analizzato
- La terza sottosezione descrive le attività preliminari necessarie per mettere a punto il sistema
- La quarta sottosezione descrive le prove di tempra ad induzione effettuate e le analisi dei dati ottenuti

2. SISTEMA DI TEMPRA AD INDUZIONE

Il sistema utilizzato nel laboratorio del DTG (dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali) per effettuare il trattamento di tempra superficiale sui provini forniti è costituito dagli elementi riportati di seguito.

⇒ *Circuito RLC in parallelo*

In realtà si tratta di un circuito con condensatori in parallelo al gruppo induttore e resistore, in quanto l'induttore ha una resistenza elettrica intrinseca (fig. 3.1). L'induttore è costituito da 9 spire di rame tali da coprire una lunghezza di 100 mm ed è raffreddato da un flusso d'acqua mantenuto costante da una pompa a ricircolo.

Si riportano di seguito le grandezze caratteristiche dei bipoli misurate a vuoto alla frequenza $f = 24 \text{ kHz}$ e le relative impedenze:

$$L_{\text{induttore}} = 2 * 10^{-6} [H] \longrightarrow Z_{RL} = 0.004 + 0.30159289474462 i$$

$$R_{\text{induttore}} = 4 * 10^{-3} [\Omega]$$

$$C_{\text{parallelo}} = 2.20 * 10^{-5} [F] \longrightarrow Z_C = -0.300882756903916 i$$

La potenza massima ottenibile dal circuito con la presente configurazione non supera $\sim 24 \text{ kW}$.

⇒ *Sistema di movimentazione provino a velocità controllata*

Il sistema utilizza un motore passo-passo accoppiato ad una vite senza fine (M10) sulla quale è fissato il supporto per il montaggio del pezzo (fig. 3.1). Questo meccanismo permette di far variare la velocità di attraversamento del campo magnetico generato dall'induttore semplicemente facendo variare la frequenza di alimentazione del motore elettrico. Quest'ultimo, regolato ad $\frac{1}{4}$ di passo con alimentazione ad onde quadre, avanza di $5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ con una f_{motore} di 800 Hz .

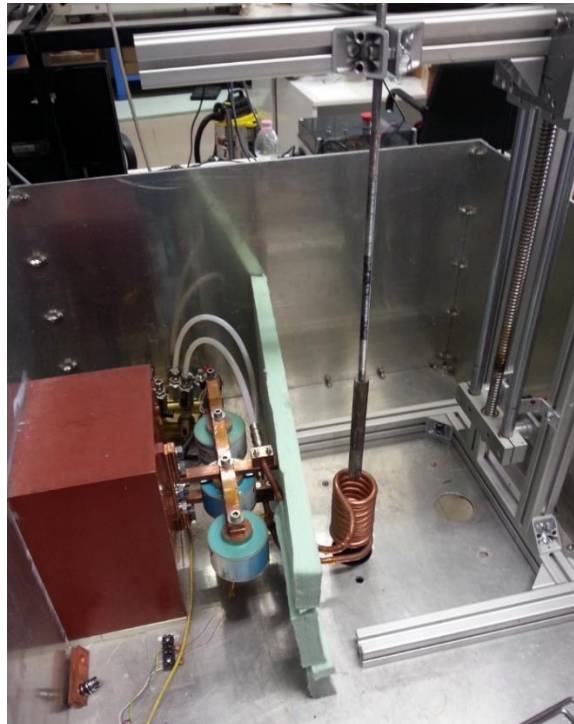


Figura 3.1- *Sistema di tempra ad induzione costituito da condensatori in parallelo all'induttore (circuito RLC) e sistema di movimentazione del provino*

⇒ *Sistema di "spegnimento"*

Il sistema di raffreddamento del provino è costituito da due parti posizionate in successione. La prima è formata da più getti d'acqua fuoriuscenti da ugelli che irrorano radialmente (più o meno uniformemente) la superficie del pezzo (fig. 3.2). La seconda parte prevede l'immersione completa del pezzo nel liquido di raffreddamento (in questo caso acqua a temperatura ambiente). Si noti come il

raffreddamento effettuato dagli ugelli debba garantire un abbassamento di temperatura tale da portare il materiale fuori dal campo austenitico; nel caso in cui ciò non accadesse si riscontrerebbe un'inefficienza del processo.



Figura 3.2- *Getti d'acqua uscenti radialmente dagli ugelli*

3. CARATTERISTICHE DEL MATERIALE PRIMA DEL TRATTAMENTO DI TEMPRA

Per l'esecuzione del trattamento termico sono state usate barre d'acciaio presumibilmente allo stato ricotto di $\varnothing = 20 \text{ mm}$. Da queste barre sono stati ricavati due provini per l'analisi chimica, per le prove di durezza e per l'analisi metallografica allo scopo di definire con precisione il tipo di acciaio. Sono stati ricavati due campioni in modo da verificare l'omogeneità chimica e microstrutturale del materiale. Per prima cosa è stata ricavata la composizione chimica dei due campioni (fig. 3.3) riportata in tabella 3.1 e 3.2.

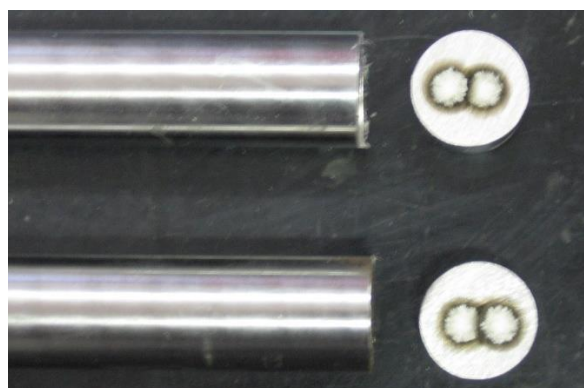


Figura 3.3- *Provino in seguito all'analisi chimica con lo spettrometro di massa*

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
campione 1	0,494	0,716	0,236	0,159	0,105	0,042	bal.

Tabella 3.1- *composizione chimica del provino 1 (% in peso)*

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
campione 2	0,493	0,718	0,236	0,159	0,105	0,042	bal.

Tabella 3.2- *composizione chimica del provino 2 (% in peso)*

Dai dati ottenuti si può notare che il materiale fornito è un acciaio con $C = 0.49\%$. In base alla normativa di riferimento EN 10083-2:2006 l'acciaio è classificato come C45.

Al fine di valutare se il materiale avesse precedentemente subito un eventuale trattamento di ricottura o normalizzazione, sono state effettuate delle prove di durezza Vickers su entrambi i provini (usando un carico di 60 kg). Entrambi i provini hanno una durezza HV 226 e questo è a favore dell'omogeneità chimica del materiale, confermata anche dall'analisi chimica. Nonostante questo valore di durezza sia riconducibile ad un trattamento di normalizzazione, sono necessarie ulteriori analisi metallografiche capire il tipo di trattamento subito dal materiale. Le analisi metallografiche sono state condotte solo in uno dei due provini dal momento che l'omogeneità del materiale è stata confermata sia dall'analisi chimica che dalle prove di durezza.

Dunque, si analizzano le immagini della superficie al microscopio ottico:

Prima dell'attacco chimico (fig. 3.4) è possibile notare la presenza di inclusioni nel materiale prevalentemente addensate verso il cuore e questo fa pensare che la barra sia un prodotto di trafilatura.



Figura 3.4- *Micrografia del campione a CUORE prima dell'attacco chimico con ingrandimento 100x*

Ad ingrandimenti più elevati (fig.3.5) è possibile ipotizzare dal colore delle inclusioni che si tratti di solfuri di manganese, comunemente presenti in questo tipo di materiale.



Figura 3.5- *Micrografia del campione a CUORE prima dell'attacco chimico con ingrandimento 500x*

Dopo aver effettuato l'attacco chimico con la soluzione alcolica di acido nitrico (3%), Nital 3, sono state evidenziate le diverse fasi costituenti il materiale (da fig. 3.6 a fig. 3.9).

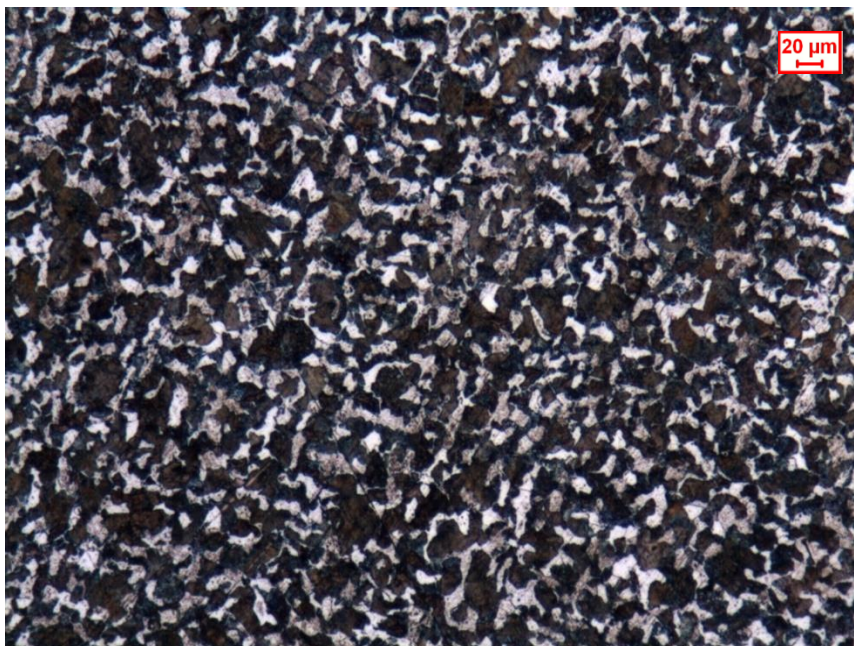


Figura 3.6- *Micrografia del campione a BORDO dopo l'attacco chimico con ingrandimento 100x*

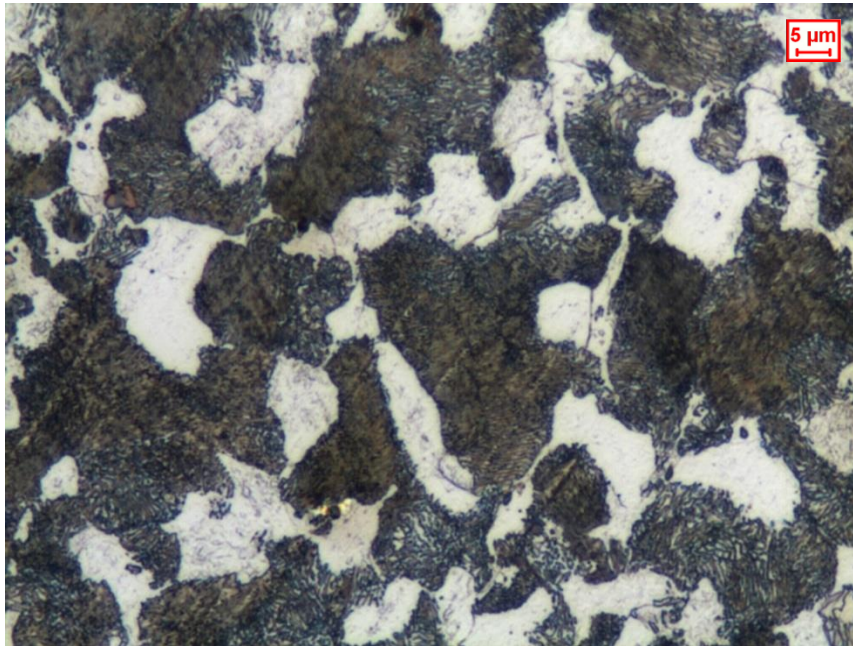


Figura 3.7- *Micrografia del campione a BORDO dopo l'attacco chimico con ingrandimento 500x*

La presenza di perlite fine (fig. 3.9) evidenzia un raffreddamento più critico rispetto a quello previsto da un trattamento termico di ricottura. E' quindi possibile confermare la precedente ipotesi (derivante dalle prove di durezza) secondo la quale le barre avessero precedentemente subito un trattamento termico di normalizzazione (raffreddamento in aria) tale da generare una struttura perlitica con una distanza interlamellare più contenuta.

Oltre a questo, attraverso la binarizzazione di più immagini all'ingrandimento di 500x (analoghe alla fig. 3.7), si riscontra una frazione di ferrite nettamente inferiore rispetto a quella che si otterrebbe nel caso lo stesso acciaio fosse stato ricotto (la frazione di ferrite in un acciaio C45 ricotto sarebbe del ~ 50%).

In tabella 3.3 sono riportate le percentuali di ferrite a bordo e a cuore.

	% ferrite BORDO	% ferrite CUORE
immagine 1	34,63	36,10
immagine 2	32,94	34,92
immagine 3	34,35	34,69
immagine 4	33,43	36,02
immagine 5	31,93	35,77
MEDIA	33,46	35,50
DEV.ST.	1,09	0,65

Tabella 3.3- *percentuale di ferrite a bordo e a cuore*

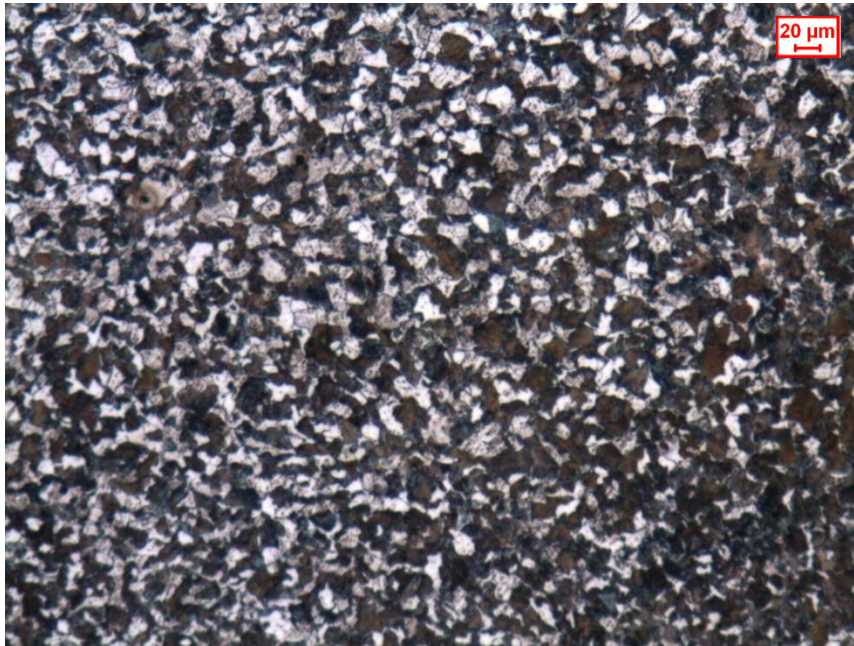


Figura 3.8- Micrografia del campione a CUORE dopo l'attacco chimico con ingrandimento 100x



Figura 3.9- Micrografia del campione a CUORE dopo l'attacco chimico con ingrandimento 500x

In seguito all'analisi dei profili di microdurezza (riportata in tabella 3.4 e in fig 3.10) è stato possibile notare come il provino presenti la stessa durezza sia a cuore che in superficie, confermando ancora una volta l'omogeneità del materiale.

stato di fornitura						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	260	197	244	198	224,75	32,14
500	223	237	194	241	223,75	21,28
1000	227	200	249	206	220,50	22,25
2000	245	280	207	234	241,50	30,23
3000	247	213	220	255	233,75	20,39
4000	225	237	221	224	226,75	7,04
5000	242	219	239	246	236,50	12,01
6000	202	244	243	248	234,25	21,61
7000	229	210	228	212	219,75	10,14
8000	192	228	220	221	215,25	15,90

Tabella 3.4- valori di microdurezza rilevati a determinate distanze dal bordo sul campione di materiale allo stato di fornitura

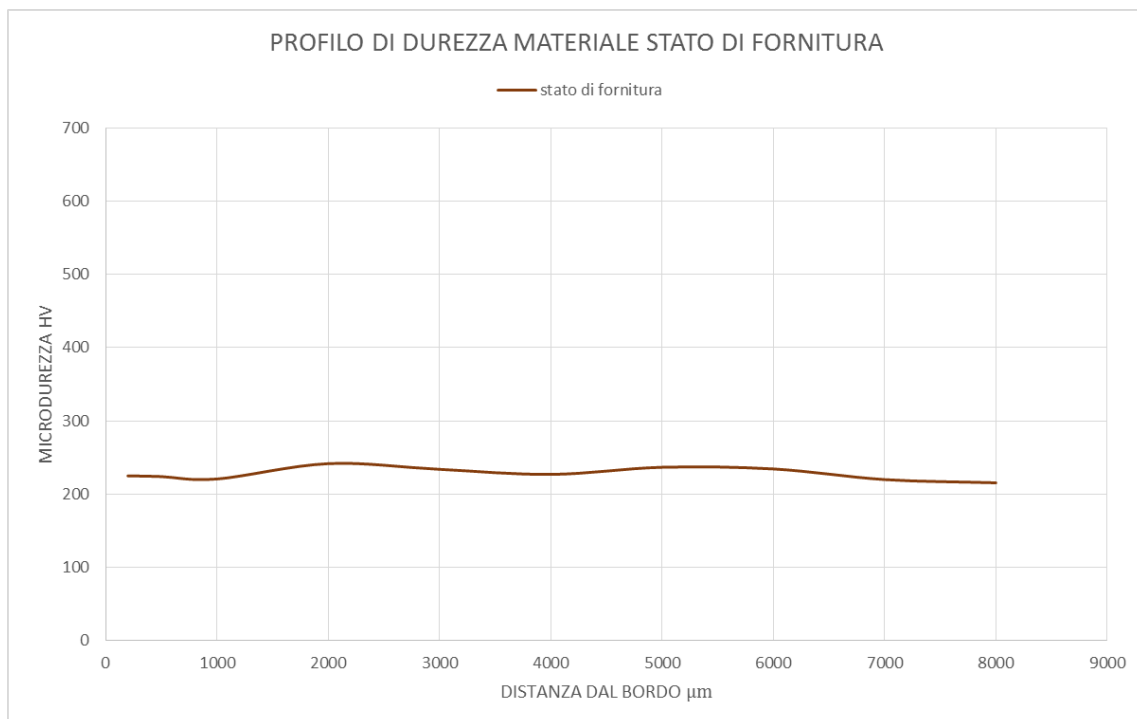


Figura 3.10- Profilo di microdurezza del materiale allo stato di fornitura

In seguito a queste analisi preliminari si può concludere che si tratta di un acciaio C45 normalizzato e trafilato.

4. ATTIVITA' PRELIMINARI

Dalle barre fornite inizialmente si è proceduto a ricavare spezzoni di lunghezza ~ 200 mm (fig. 3.11) tramite l'utilizzo di una troncatrice con disco all'ossido di silicio.



Figura 3.11- *Campione ricavato dalle barre fornite*

In seguito i campioni sono stati forati (fig. 3.12) e filettati (fig. 3.13) per il successivo montaggio sul supporto di movimentazione del sistema di tempra ad induzione.



Figura 3.12- *Foratura campione con punta \varnothing 9.5 tramite trapano verticale*



Figura 3.13- *Filettatura foro con maschio M10*

Prima di procedere con le prove effettive sono stati svolti alcuni test finalizzati alla calibrazione e alla messa a punto della sensoristica. In particolare, essendo tensione e frequenza di alimentazione del circuito controllati dal generatore, si applica una particolare attenzione alla misurazione della corrente circolante nell'induttore.

Durante l'attraversamento del pezzo nell'induttore si verifica una variazione della permeabilità magnetica μ e una conseguente variazione della corrente indotta; Attraverso l'utilizzo della bobina Rogowski (fig. 3.14, 3.15) si può risalire al valore della corrente indotta.

Il principio di funzionamento della sonda si basa sulla Legge di Ampère: all'interno della bobina sarà, infatti, indotta una tensione proporzionale al tasso di variazione temporale (o derivata temporale) della corrente misurata.

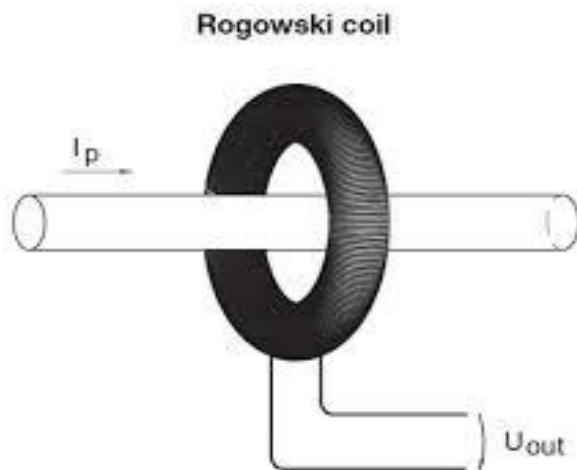


Figura 3.14- Schema di funzionamento della sonda Rogowski



Figura 3.15- Sonda Rogowski utilizzata nel circuito

Nella tabella seguente (tabella 3.5a) si riportano i valori di alcune prove preliminari in cui vengono misurate e calcolate le grandezze elettriche caratterizzanti il circuito nelle varie configurazioni. Si noti come il valore della corrente indotta I_{ind} (A) sia funzione della tensione rilevata dalla sonda Rogowski V_{rog} (V) e della frequenza di alimentazione del circuito $freq.$ (kHz) secondo la relazione:

$$I_{ind}(A) = 430 * \frac{V_{rog}(V)}{freq.(kHz)}$$

MISURE	freq.Motore (kHz)	freq (kHz)	V_ali (V)	V_Rog (V)	P (kW)	I_ind (A)	vel.barra (mm/s)
a vuoto	0,00	22,60	96,50	19,40	1,20	369,12	0,00
barra ferma	0,00	17,80	35,20	5,68		137,21	0,00
a vuoto	0,00	22,60	200,00	40,60		772,48	0,00
barra in movimento	1,00	22,00	150,00	31,00	9,00	605,91	6,25
barra in movimento	1,00	22,00	180,00	37,00	10,50	723,18	6,25
barra in movimento	1,00	22,00	200,00	42,90	11,40	838,50	6,25
barra in movimento	1,00	22,50	150,00	30,00	10,50	573,33	6,25
barra in movimento	1,00	22,50	150,00	30,80	12,00	588,62	6,25
barra in movimento	1,60	22,50	150,00	36,00	15,00	688,00	10,00
barra in movimento	1,60	22,50	180,00	37,00	17,00	707,11	10,00
barra in movimento	1,00	23,00	180,00	35,00	13,50	654,35	6,25

Tabella 3.5a- *test preliminari effettuati sul sistema ad induzione per verificarne il corretto funzionamento*

Dai dati evidenziati in tabella 3.5b risulta chiaro come la potenza $P(kW)$ sia influenzata principalmente dalla velocità di attraversamento del campione nell'induttore e dalla tensione di alimentazione del circuito (la frequenza di alimentazione risulta un parametro piuttosto stazionario in questa disposizione dei bipoli).

MISURE	freq.Motore (kHz)	freq (kHz)	V_ali (V)	V_Rog (V)	P (kW)	I_ind (A)	vel.barra (mm/s)
a vuoto	0,00	22,60	96,50	19,40	1,20	369,12	0,00
barra ferma	0,00	17,80	35,20	5,68		137,21	0,00
a vuoto	0,00	22,60	200,00	40,60		772,48	0,00
barra in movimento	1,00	22,00	150,00	31,00	9,00	605,91	6,25
barra in movimento	1,00	22,00	180,00	37,00	10,50	723,18	6,25
barra in movimento	1,00	22,00	200,00	42,90	11,40	838,50	6,25
barra in movimento	1,00	22,50	150,00	30,00	10,50	573,33	6,25
barra in movimento	1,00	22,50	150,00	30,80	12,00	588,62	6,25
barra in movimento	1,60	22,50	150,00	36,00	15,00	688,00	10,00
barra in movimento	1,60	22,50	180,00	37,00	17,00	707,11	10,00
barra in movimento	1,00	23,00	180,00	35,00	13,50	654,35	6,25

Tabella 3.5b- *test preliminari effettuati sul sistema ad induzione per verificarne il corretto funzionamento*

All'aumentare della velocità di attraversamento della barra è stato riscontrato un innalzamento della potenza erogata dal generatore. La causa va ricercata nella permeabilità del materiale del pezzo e nell'influenza che la temperatura ha sullo stesso. Attraverso i test di configurazione si sono riscontrate potenze superiori nei provini a temperatura ambiente rispetto a quelli che subivano più volte il riscaldamento nell'induttore, a parità velocità di scorrimento.

5. PROVE DI TEMPRA AD INDUZIONE E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

Con lo scopo di trovare i parametri ottimali per il corretto processo di trattamento termico (in questa configurazione di circuito) sono state svolte varie prove facendo variare i valori dei parametri del circuito:

	<i>Velocità attraversamento</i> $[\frac{mm}{s}]$	<i>Tensione</i> $[V]$	<i>Potenza rilevata</i> $[P]$	<i>presenza di ugelli di raffreddamento</i>
1°	6.87	150.00	12.00	No
2°	8.00	150.00	15.00	Si
3°	10.00	150.00	13.50	No
4°	6.87	180.00	13.50	No
5°	8.00	180.00	17.00	Si
6°	10.00	180.00	15.00	No

Tabella 3.6- *test preliminari effettuati sul sistema ad induzione per verificare l'efficacia del trattamento termico*

- Per velocità di attraversamento troppo basse si otteneva un innalzamento della temperatura a cuore per conduzione termica dal materiale a bordo
- È stato notato che operando a tensioni minori di 200 V (massima tensione possibile erogata dal generatore) lo strato interessato dal trattamento manteneva una consistente frazione di ferrite senza raggiungere di conseguenza le durezza attese dal processo.
- Anche la frequenza risulta determinata dal generatore e dalla configurazione dei bipoli e si aggira su un valore di 22~23 kHz. Questo parametro è fondamentale per determinare lo spessore di indurimento del campione e una sua variazione richiederebbe necessariamente di modificare la disposizione dei componenti nel circuito RLC.
- Dopo una serie di test senza raffreddamento a getto si è visto che il trattamento non aveva riscontri efficaci: prima dello spegnimento il provino permaneva in aria un tempo sufficiente da uscire dal campo austenitico ed iniziare la trasformazione ferritico perlitica

- La corrente I dipende dai bipoli e dagli altri parametri di funzionamento, pertanto non è un parametro direttamente controllabile. Essa è influenzata dalla variazione della permeabilità all'interno dell'induttore.

Al fine di ottenere trattamenti accettabili sui provini analizzati è stato necessario mantenere fissi i parametri di tensione e frequenza, facendo variare solamente il parametro della velocità di attraversamento della barra (la potenza P varierà in funzione di questo parametro, fig. 3.16).

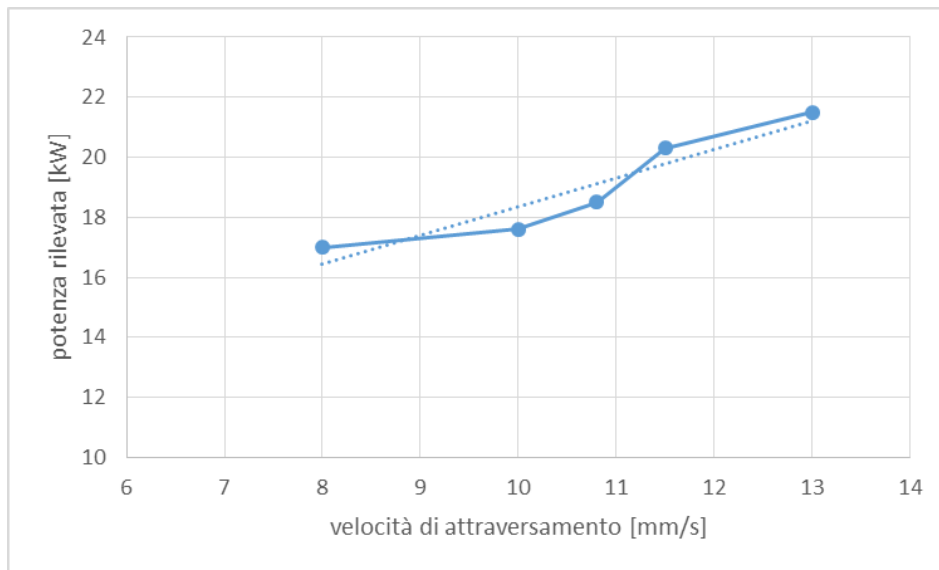


Figura 3.16- *potenza elettrica rilevata in funzione della velocità di attraversamento della barra*



Figura 3.17- *Test di riscaldamento sul provino*

Si elencano i vari parametri di ogni prova e i profili di durezza dei campioni:

- **CAMPIONE 1**

$$f_{motore} = 1280 \text{ Hz} \rightarrow v_{barra} = 8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Valori rilevati:

$$P \cong 17 \text{ kW}$$

$$V_{Rogowski} \cong 30 \text{ V} \rightarrow I_{indotta} \cong 566 \text{ A}$$

Valori delle microdurezze rilevate:

CAMPIONE 1 (8mm/sec)						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	626	542	692	579	609,75	64,72
500	515	537	573	629	563,50	49,78
1000	610	625	668	593	624,00	32,11
2000	629	675	520	584	602,00	66,10
3000	535	509	689	632	591,25	83,95
4000	599	500	622	532	563,25	56,88
5000	506	596	489	545	534,00	47,52
6000	358	368	555	520	450,25	101,84
7000	326	466	391	336	379,75	64,21
8000	452	318	305	316	347,75	69,73

Tabella 3.7- valori di microdurezza rilevati a determinate distanze dal bordo sul campione 1

Profilo di durezza da bordo a cuore:

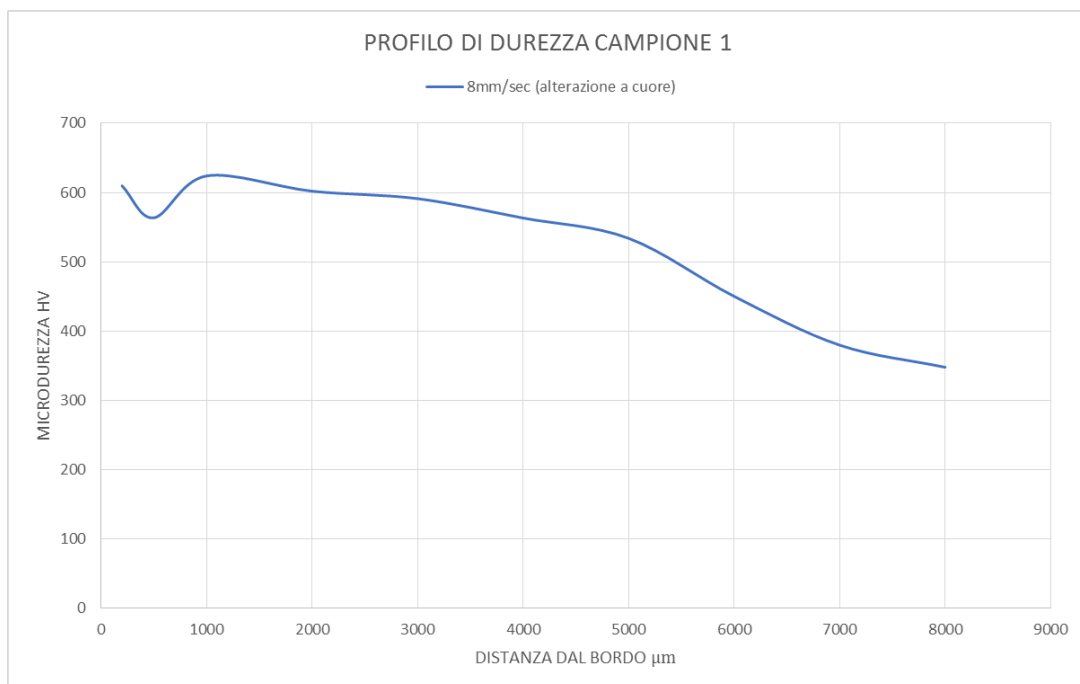


Figura 3.18- Profilo di microdurezza del campione 1

Analizzando le micrografie del primo campione si nota immediatamente come l'alterazione strutturale sia giunta sino a cuore (da fig.3.19 a 3.22); il motivo di tale fenomeno è dovuto all'eccessiva lentezza con la quale la barra ha transitato attraverso l'induttore. L' elevato tempo di permanenza del materiale a bordo in campo austenitico ha portato ad un innalzamento della temperatura anche a cuore del provino per conduzione.

Il profilo di durezza (tab. 3.17 e fig. 3.18) evidenzia l'influenza del trattamento per profondità superiori ai 3 mm (che è la profondità di trattamento desiderata).

La profondità dello stato temprato è considerata generalmente come la distanza dalla superficie della zona con 50% di martensite e 50% di perlite (o altro); in questo caso è possibile notare dal profilo di durezza come il punto di flesso (che indica approssimativamente la profondità di tempra) sia localizzato a ~6 mm dal bordo.

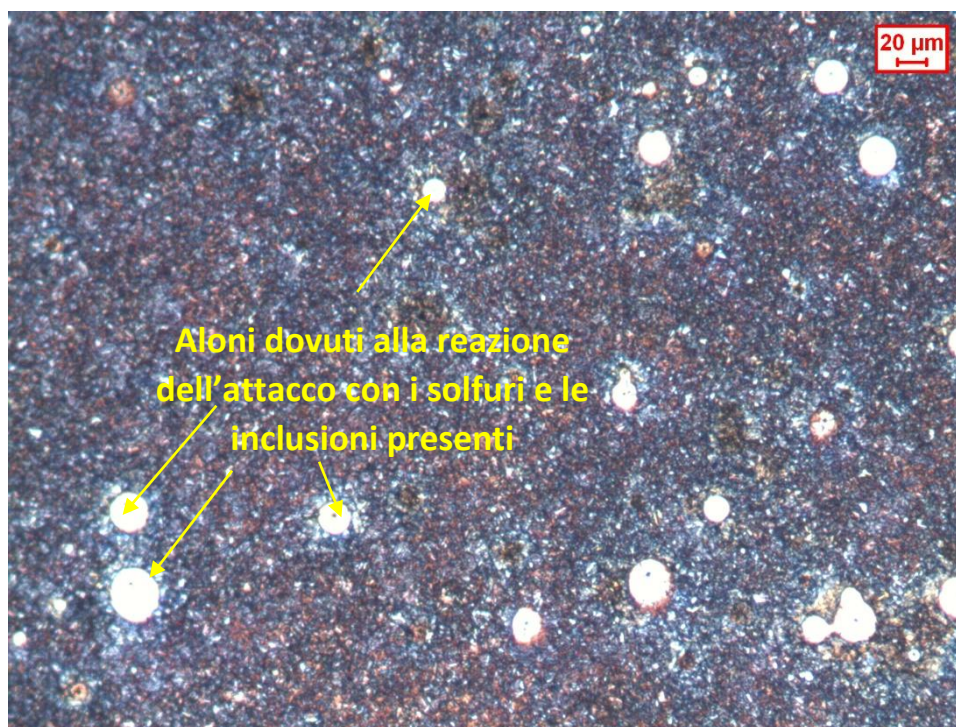


Figura 3.19- *Micrografia del CAMPIONE 1 a BORDO
ingrandimento 100x*

Nella figura 3.19 sono stati evidenziati gli aloni intorno alle inclusioni solforose. Questi aloni sono dovuti alla reazione dei solfuri con la soluzione chimica con la quale è stato effettuato l'attacco sulla superficie dei campioni. Sono distinguibili dalla eventuale ferrite presente a causa della loro forma tondeggianti e la presenza dell'inclusione nel centro.

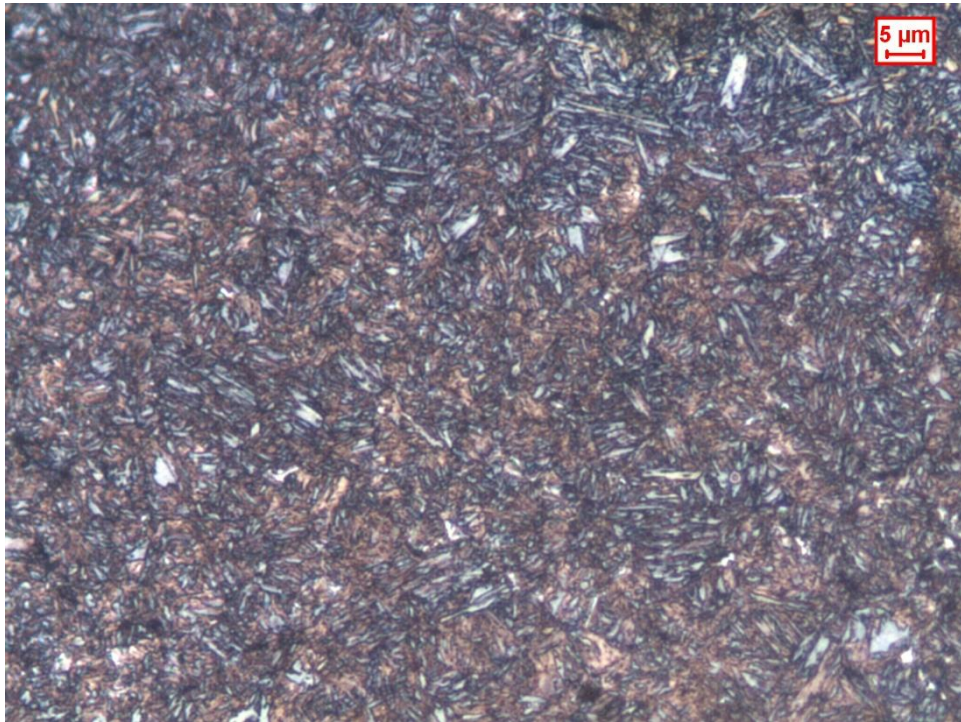


Figura 3.20- *Micrografia del CAMPIONE 1 a BORDO
ingrandimento 500x*

Un ingrandimento più elevato permette l'acquisizione di evitando di includere gli aloni presenti (fig. 3.20).

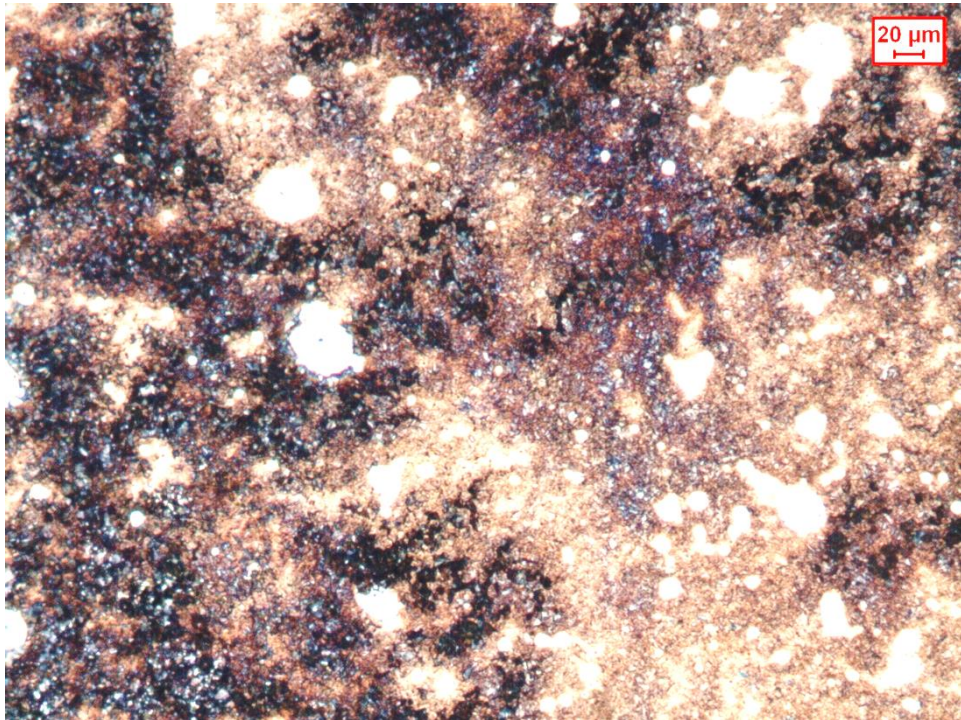


Figura 3.21- *Micrografia del CAMPIONE 1 a CUORE
ingrandimento 100x*

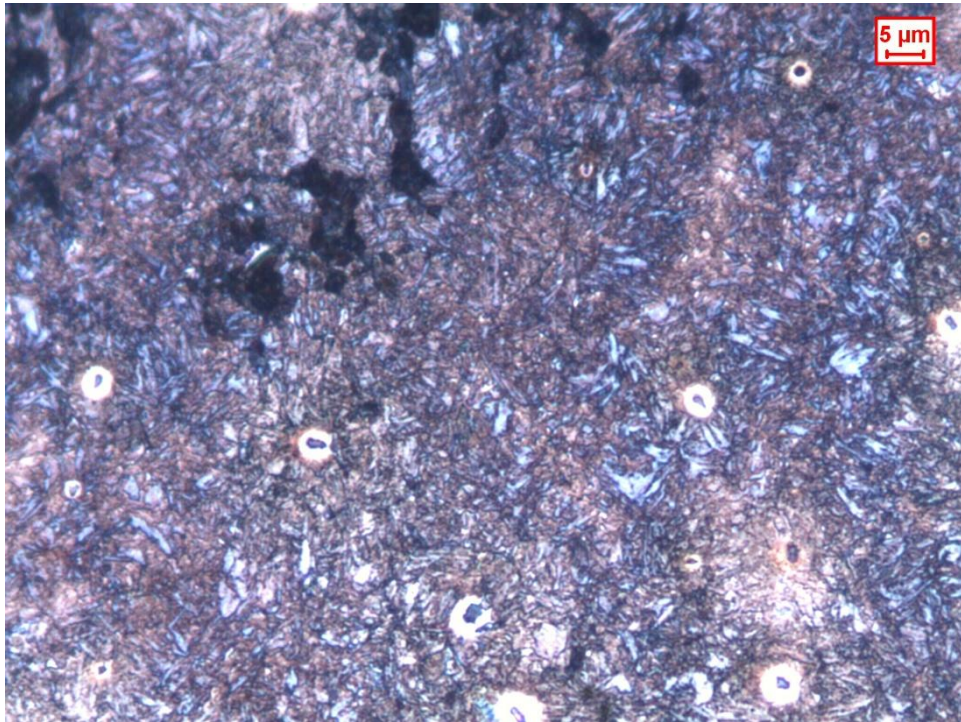


Figura 3.22- *Micrografia del CAMPIONE 1 a CUORE
ingrandimento 500x*

A cuore la durezza diminuisce a causa della presenza di una struttura perlitica molto fine con piccole frazioni di ferrite: dalla figura 3.22 si notano piccole isole di perlite fine formate a seguito di un sottoraffreddamento insufficiente alla trasformazione martensitica. La struttura a cuore concorda con i valori di durezza rilevati dal profilo in figura 3.18.

- **CAMPIONE 2**

$$f_{motore} = 1600 \text{ Hz} \rightarrow v_{barra} = 10 \frac{mm}{s}$$

Valori rilevati:

$$P \cong 17.6 \text{ kW}$$

$$V_{Rogowski} = 40 \text{ V} \rightarrow I_{indotta} = 756 \text{ A}$$

Valori delle microdurezze rilevate:

CAMPIONE 2 (10 mm/sec)						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	659	658	661	610	647,00	24,70
500	658	638	584	616	624,00	31,71
1000	532	539	557	622	562,50	41,04
2000	544	539	604	534	555,25	32,76
3000	521	584	530	491	531,50	38,77
4000	369	622	423	478	473,00	108,85
5000	422	345	450	358	393,75	50,39
6000	386	399	373	424	395,50	21,76
7000	301	278	262	231	268,00	29,41
8000	318	322	292	200	283,00	56,91

Tabella 3.8- valori di microdurezza rilevati a determinate distanze dal bordo sul campione 2

Profilo di durezza da bordo a cuore:

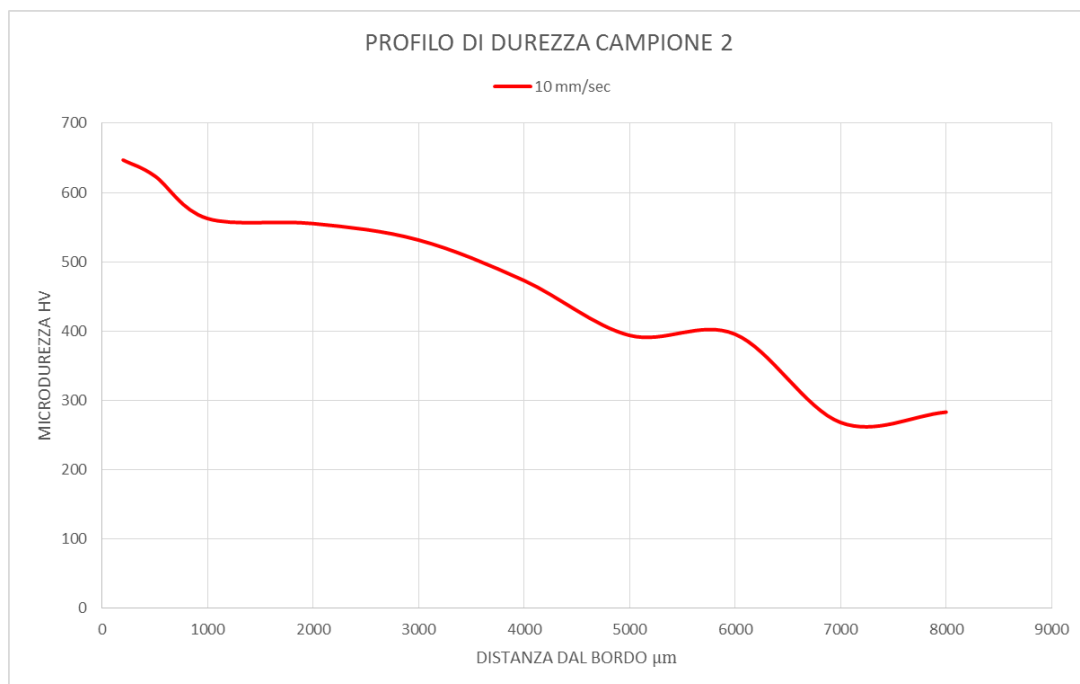


Figura 3.23- Profilo di microdurezza del campione 2

Dal profilo in figura 3.23 si nota una durezza a bordo molto elevata che si mantiene tale fino ad una profondità di ~ 3 mm:

L'aumento della velocità di attraversamento ha fatto sì che lo spessore influenzato dall'indurimento non fosse soggetto a conduzione termica, ma avesse raggiunto la temperatura di austenitizzazione prevalentemente per effetto delle correnti parassite.

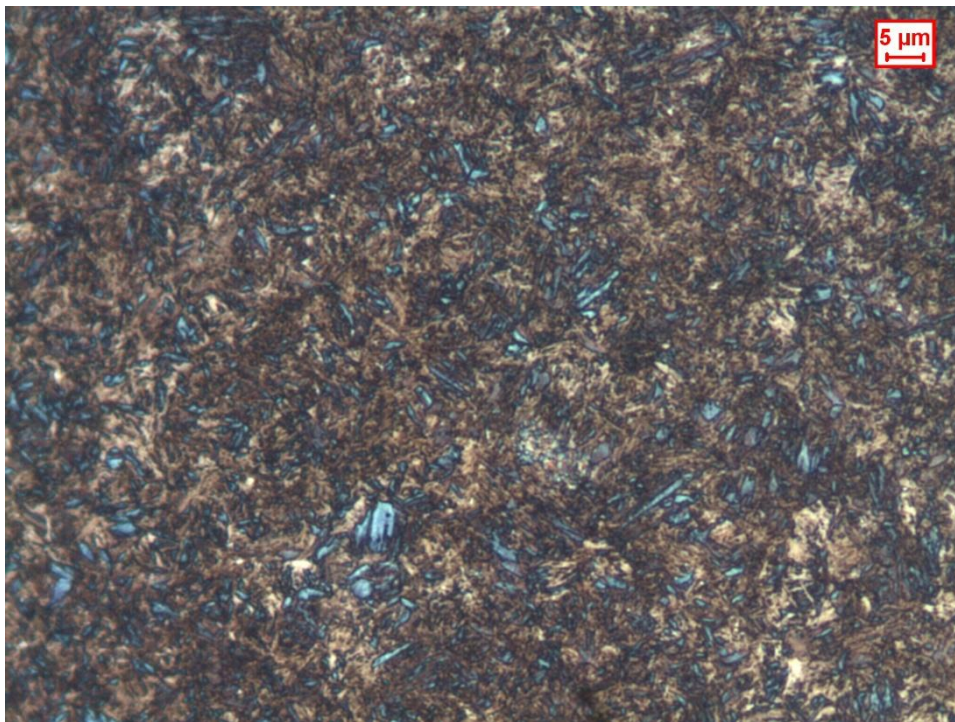


Figura 3.24- *Superficie del CAMPIONE 2 a BORDO
ingrandimento 500x*

Dalla micrografia a bordo (fig. 3.24) si nota una struttura martensitica completa senza evidenza di ferrite. Il tempo di permanenza in campo austenitico è stato sufficiente a garantire una diffusione efficace e completa del carbonio tale da permettere l'ottenimento di una trasformazione completa evitando la formazione di zone ferritiche (dalle panoramiche poste a fine capitolo si potrà osservare l'incremento della frazione ferritica spostandosi verso il cuore del provino).

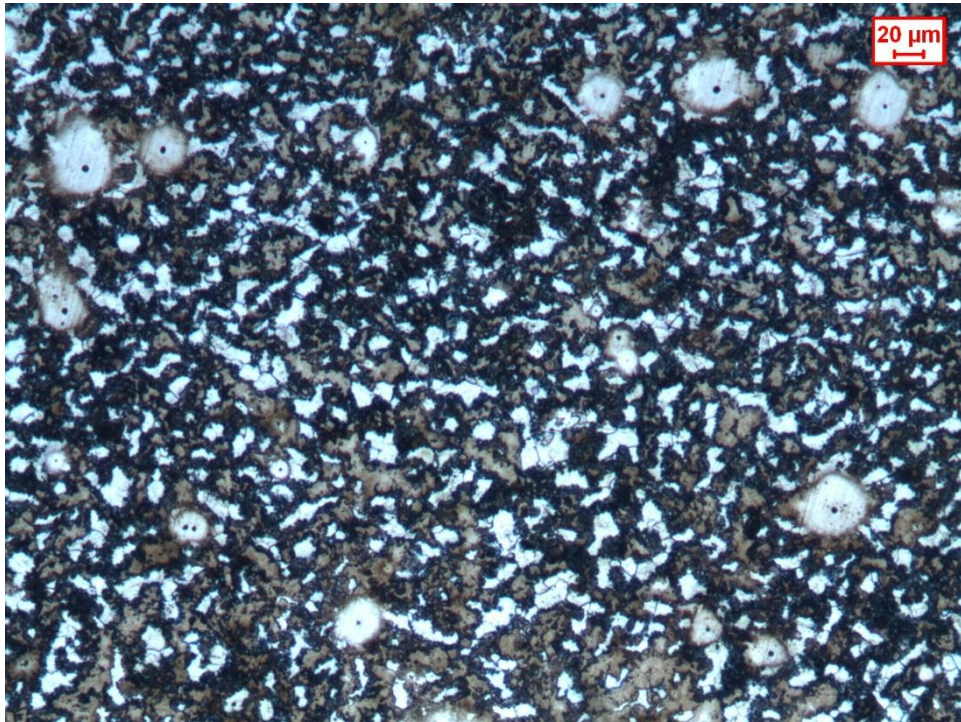


Figura 3.25- *Micrografia del CAMPIONE 2 a CUORE
ingrandimento 100x*

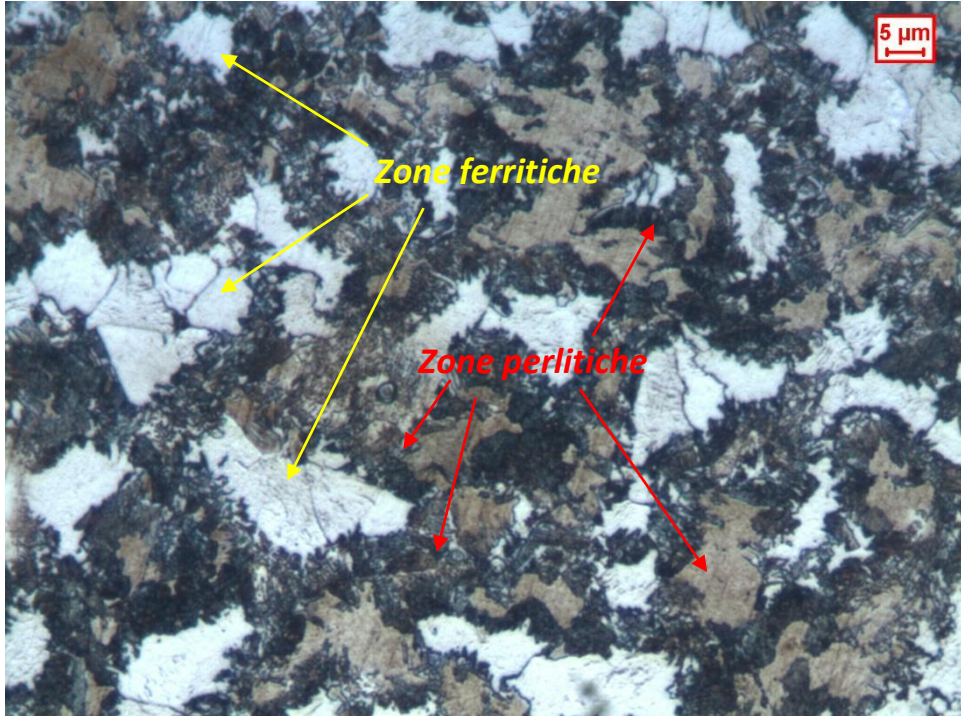


Figura 3.26- *Micrografia del CAMPIONE 2 a CUORE
ingrandimento 500x*

La struttura a cuore risulta meno alterata rispetto al campione 1 (fig. 3.25 e 3.26).

- **CAMPIONE 3**

$$f_{motore} = 1730 \text{ Hz} \rightarrow v_{barra} = 10.8 \frac{mm}{s}$$

Valori rilevati:

$$P \cong 18.5 \text{ kW}$$

$$V_{Rogowski} \cong 40 \text{ V} \rightarrow I_{indotta} \cong 756 \text{ A}$$

Valori delle microdurezze rilevate:

Campione 3 (10,8 mm/sec)						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	550	734	587	661	633,00	81,63
500	532	537	571	618	564,50	39,65
1000	632	581	525	479	554,25	66,53
2000	498	540	675	568	570,25	75,53
3000	497	525	489	619	532,50	59,70
4000	425	385	399	420	407,25	18,63
5000	292	308	408	267	318,75	61,85
6000	276	271	282	266	273,75	6,85
7000	284	244	274	231	258,25	24,88
8000	195	224	238	243	225,00	21,56

Tabella 3.8- valori di microdurezza rilevati a determinate distanze dal bordo sul campione 3

Profilo di durezza da bordo a cuore:

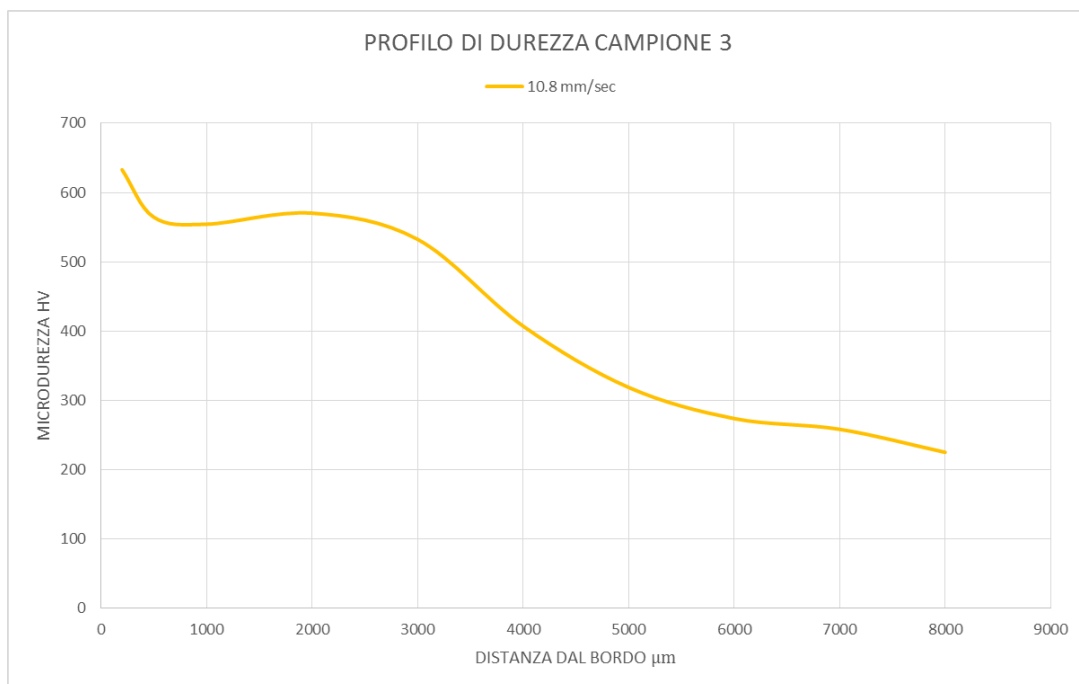


Figura 3.27- Profilo di microdurezza del campione 3

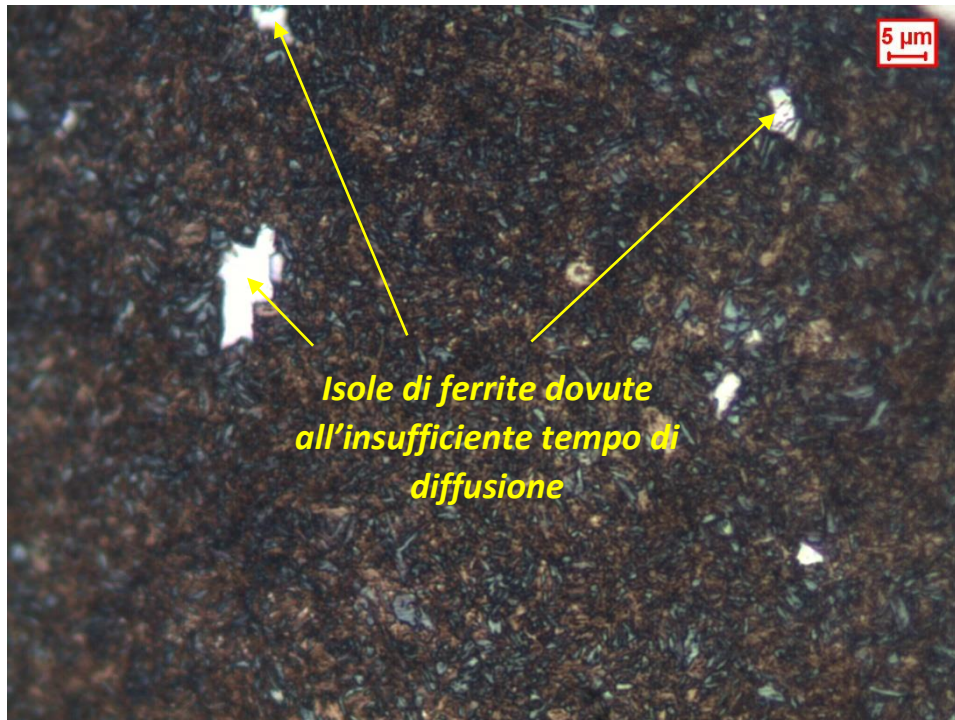


Figura 3.28- *Superficie del CAMPIONE 3 a BORDO
ingrandimento 500x*

Dopo aver aumentato di poco la velocità di attraversamento della barra nell'induttore si nota dalla micrografia a bordo (fig. 3.28) la formazione di ferrite nella matrice martensitica. La causa è da attribuirsi ad un tempo di diffusione insufficiente in campo austenitico:

La velocità di traslazione del campione è stata troppo elevata per permettere una diffusione completa del carbonio durante la permanenza in zona γ stabile.

Confrontando il profilo di durezza del campione 2 (fig. 3.23) con quello del campione 3 (fig. 3.27) si nota come la durezza di quest'ultimo si mantenga per uno spessore inferiore rispetto al campione precedente.

Nelle figure seguenti (fig. 3.29 e 3.30) si vede come la struttura a cuore non ha subito alcuna alterazione.

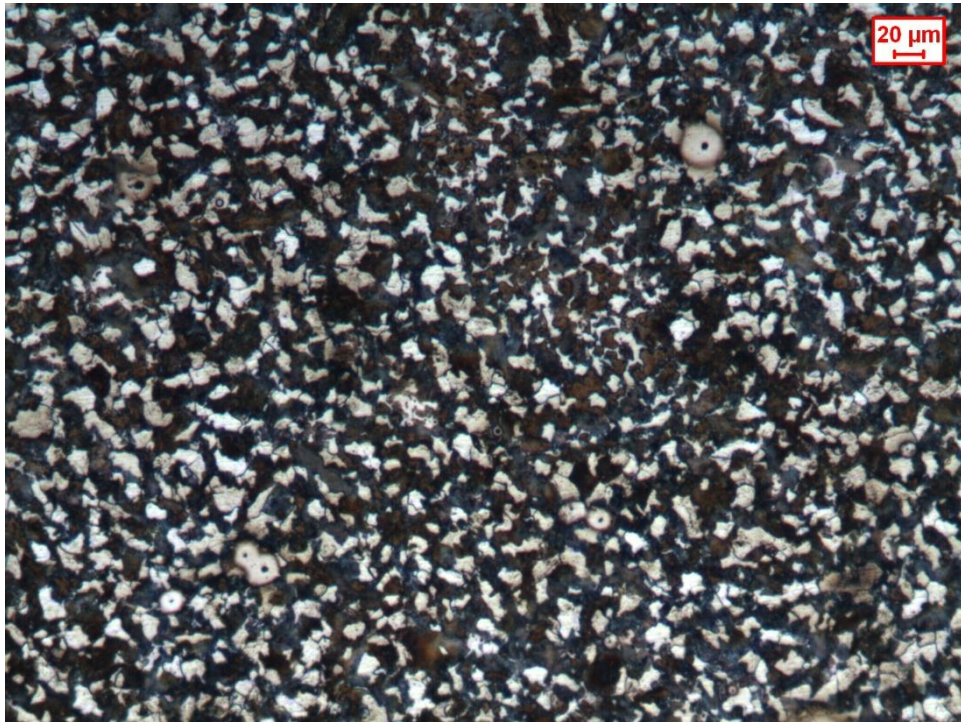


Figura 3.29- *Micrografia del CAMPIONE 3 a CUORE
ingrandimento 100x*

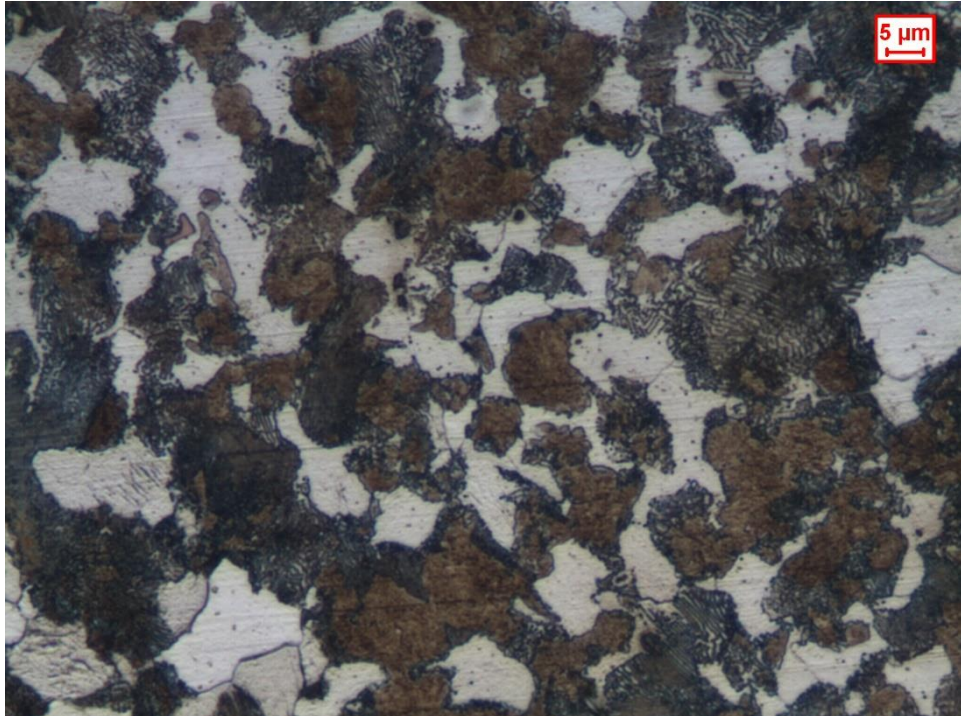


Figura 3.30- *Micrografia del CAMPIONE 3 a CUORE
ingrandimento 500x*

- **CAMPIONE 4**

$$f_{motore} = 1840 \text{ Hz} \rightarrow v_{barra} = 11.5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Valori rilevati:

$$P \cong 20.3 \text{ kW}$$

$$V_{Rogowski} = 41 \text{ V} \rightarrow I_{indotta} = 758 \text{ A}$$

Valori delle microdurezze rilevate:

CAMPIONE 4 (11,5 mm/sec)						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	547	560	629	562	574,50	36,94
500	540	648	530	600	579,50	55,15
1000	590	541	536	551	554,50	24,47
2000	555	511	557	522	536,25	23,26
3000	437	518	532	576	515,75	58,03
4000	411	518	400	338	416,75	74,76
5000	277	293	232	303	276,25	31,38
6000	267	247	218	257	247,25	21,14
7000	234	223	215	238	227,50	10,47
8000	200	219	227	217	215,75	11,35

Tabella 3.9- valori di microdurezza rilevati a determinate distanze dal bordo sul campione 4

Profilo di durezza da bordo a cuore:

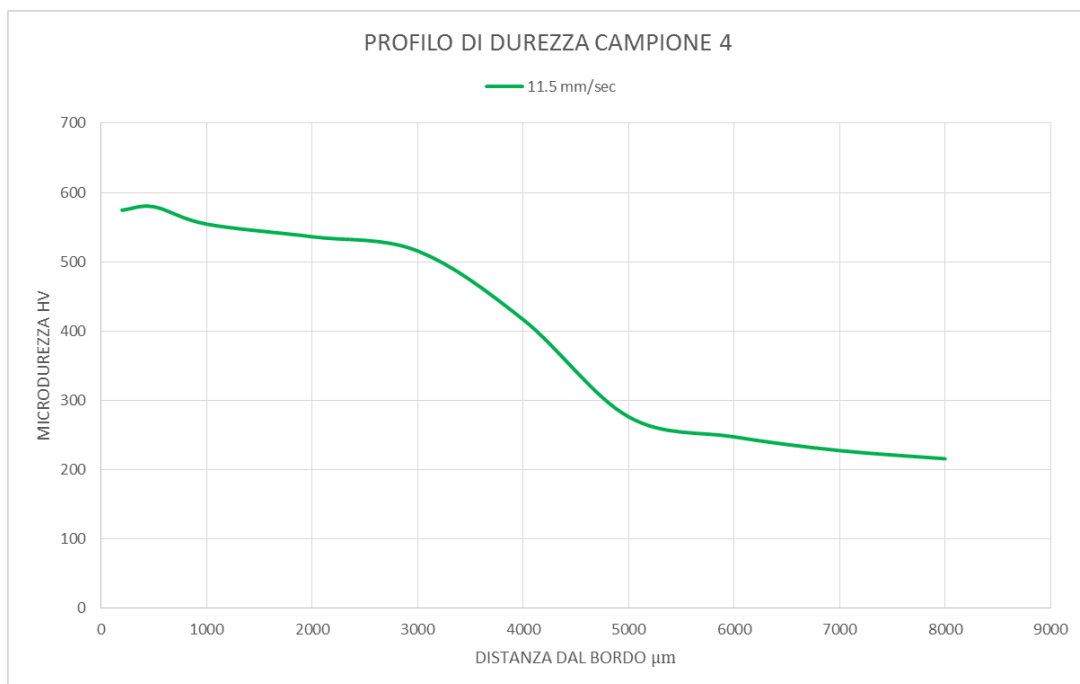


Figura 3.31- Profilo di microdurezza del campione 4

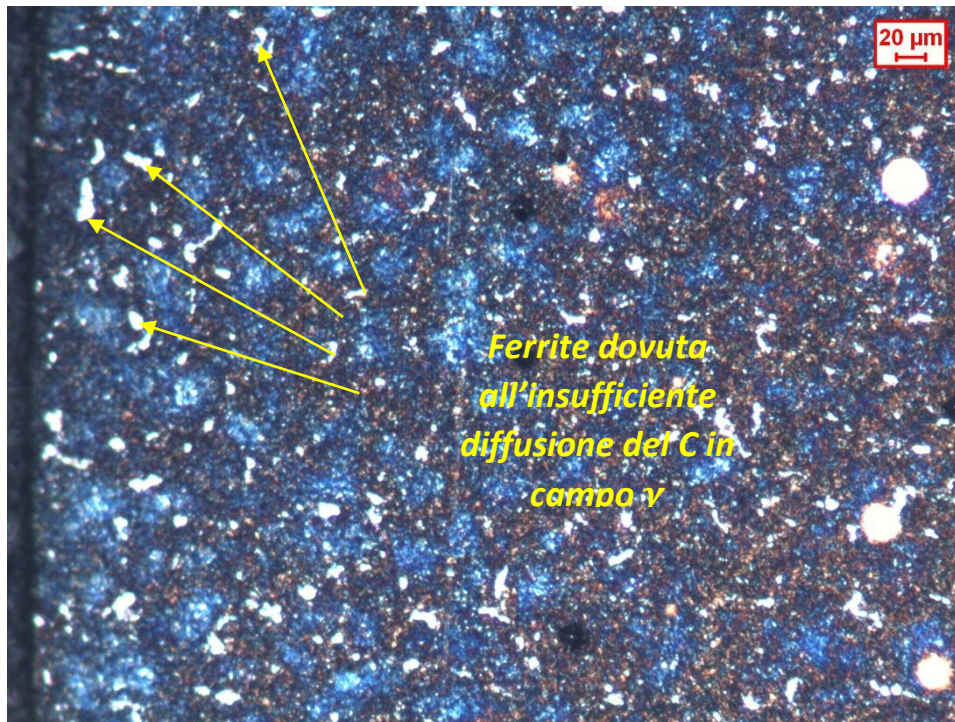


Figura 3.32- *Micrografia del CAMPIONE 4 a BORDO
ingrandimento 100x*

Dalla micrografia rappresentata in figura 3.32 risulta evidente una consistente frazione di ferrite nella matrice martensitica:

L'innalzamento della velocità di transazione della barra ha portato ad una riduzione ulteriore del tempo di diffusione del carbonio in campo austenitico.

Già da questo campione si può dedurre come la velocità di attraversamento nell'induttore risulti troppo elevata affinché il trattamento termico abbia un riscontro positivo.

Dalle figure 3.33 e 3.34 si osserva come il cuore del campione non sia stato alterato, mantenendo di conseguenza i valori di durezza del materiale i partenza.

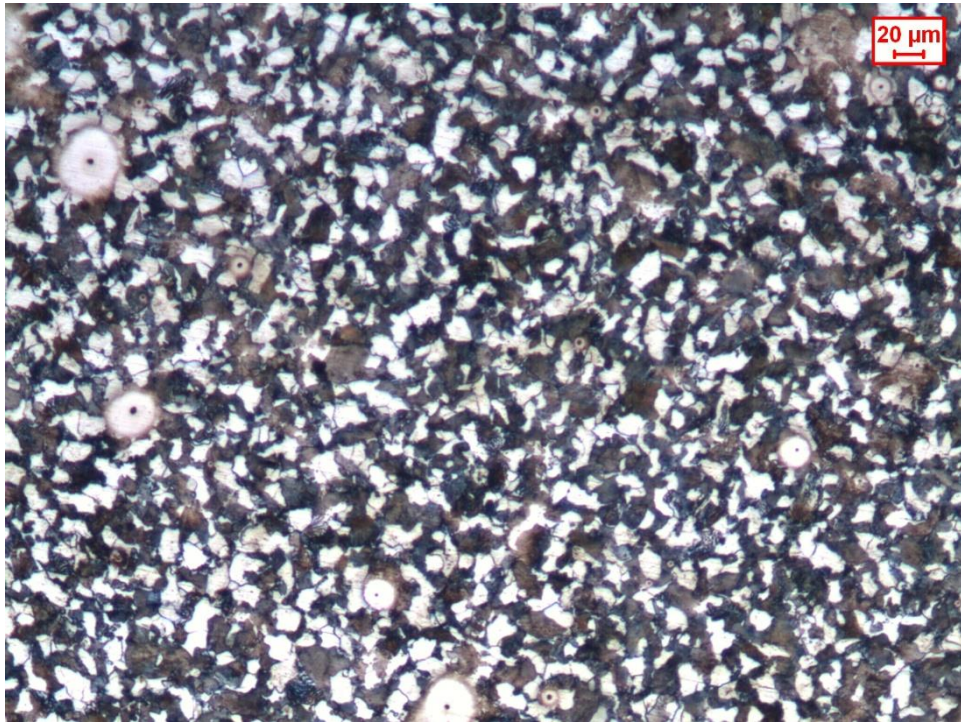


Figura 3.33- *Superficie del CAMPIONE 4 a CUORE
ingrandimento 100x*

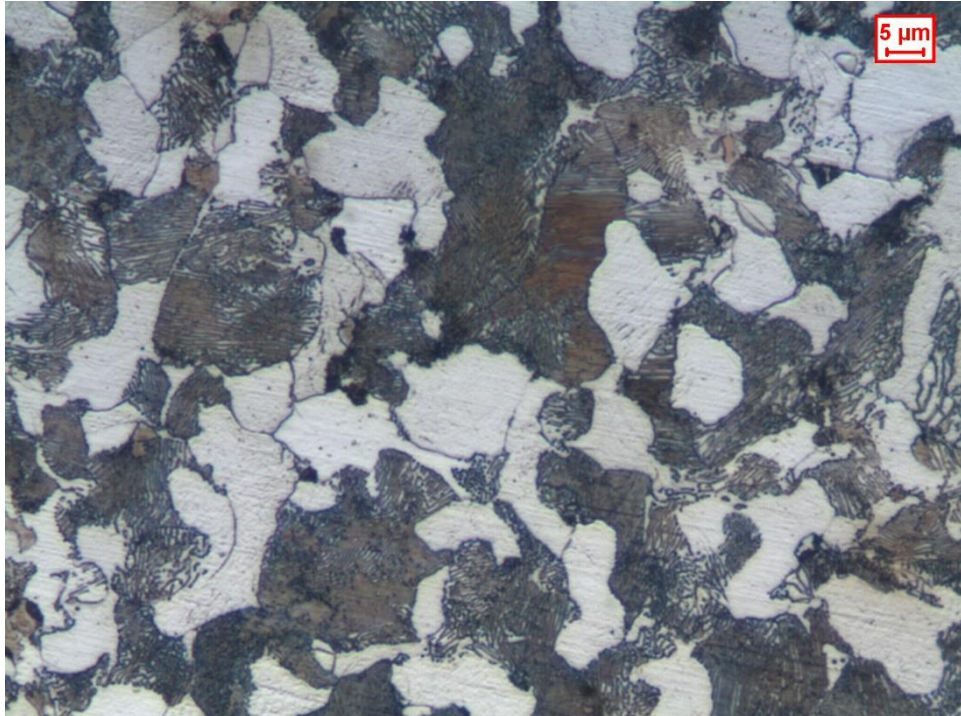


Figura 3.34- *Superficie del CAMPIONE 4 a CUORE
ingrandimento 500x*

- **CAMPIONE 5**

$$f_{motore} = 2080 \text{ Hz} \rightarrow v_{barra} = 13 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Valori rilevati:

$$P \cong 21.5 \text{ kW}$$

$$V_{rogowski} = 41.5 \text{ V} \rightarrow I_{indotta} = 759 \text{ A}$$

Valori delle microdurezze rilevate:

CAMPIONE 5 (13 mm/sec)						
Distanza	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Media	DEV. ST.
μm	HV	HV	HV	HV	HV	HV
200	629	484	474	574	540,25	74,32
500	675	604	400	539	554,50	117,02
1000	664	544	423	525	539,00	98,83
2000	648	470	484	428	507,50	96,64
3000	336	557	418	410	430,25	92,21
4000	280	279	219	309	271,75	37,82
5000	241	233	234	235	235,75	3,59
6000	234	200	232	225	222,75	15,65
7000	184	247	191	214	209,00	28,39
8000	209	165	198	156	182,00	25,50

Tabella 3.10- valori di microdurezza rilevate a determinate distanze dal bordo sul campione 5

Profilo di durezza da bordo a cuore:

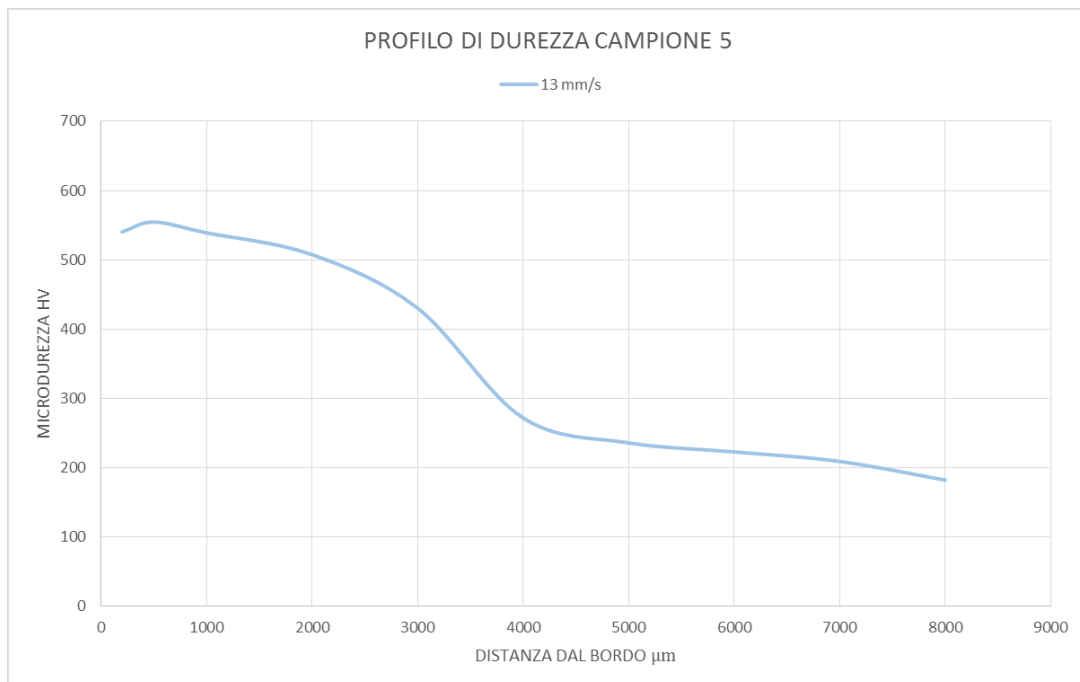


Figura 3.35- Profilo di microdurezza del campione 5

Con una velocità di attraversamento di 13 mm/s la micrografia riporta una consistente presenza di ferrite a bordo del campione (fig. 3.36 e 3.37).

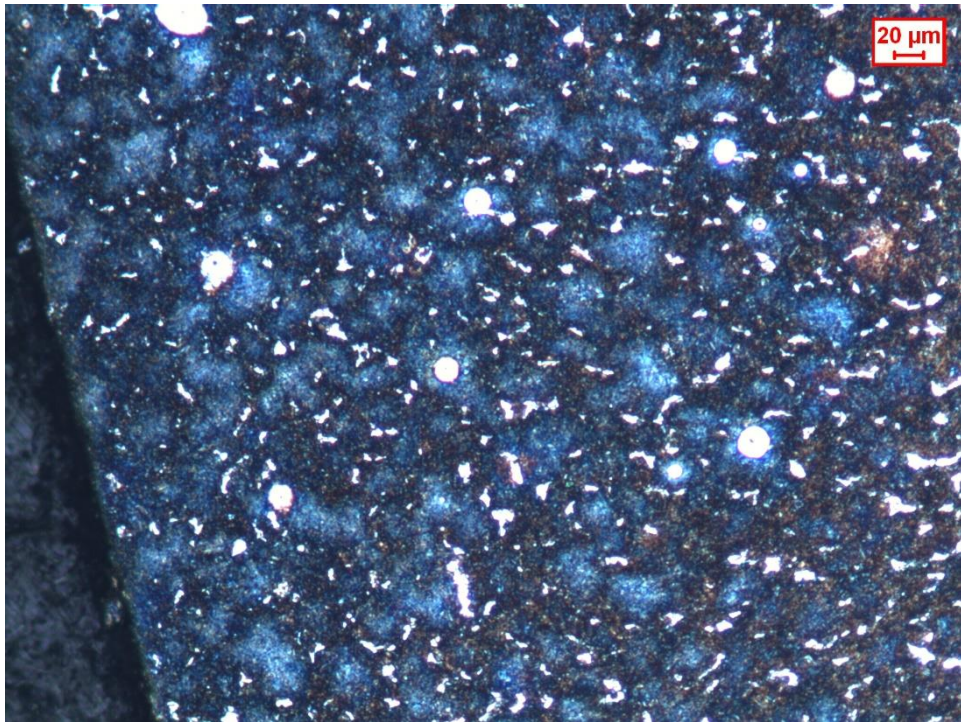


Figura 3.36- *Superficie del CAMPIONE 5 a BORDO
ingrandimento 100x*

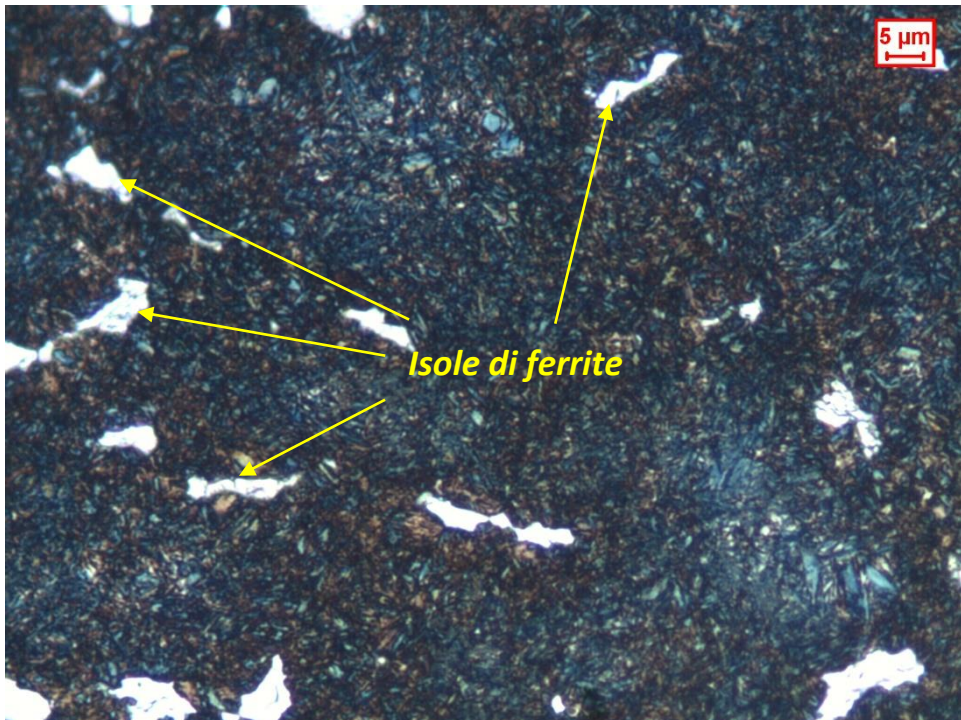


Figura 3.37- *Superficie del CAMPIONE 5 a BORDO
ingrandimento 500x*

Analogamente ai campioni 3 e 4, il cuore del provino risulta inalterato (fig. 3.38 e 3.39) e mantiene gli stessi valori di durezza del materiale allo stato di fornitura.

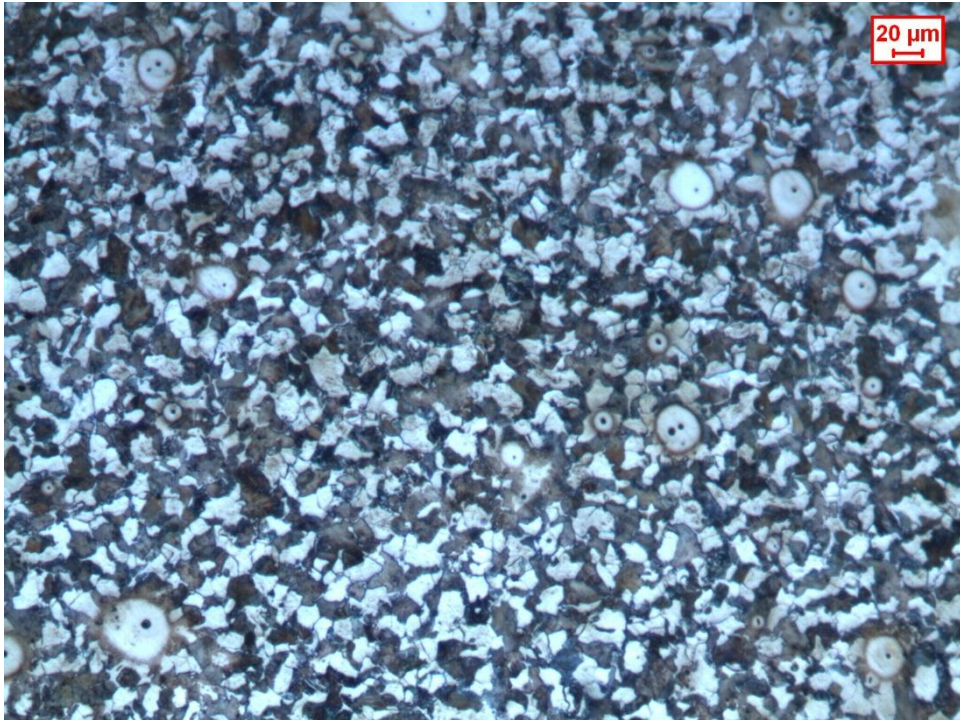


Figura 3.38- *Superficie del CAMPIONE 5 a CUORE
ingrandimento 100x*

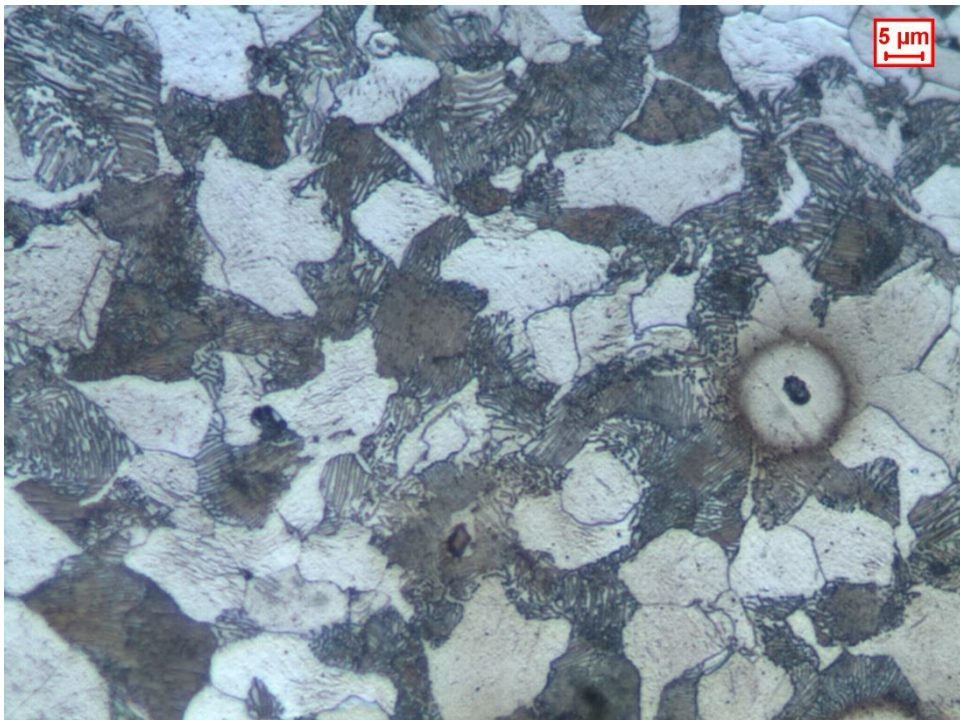


Figura 3.39- *Superficie del CAMPIONE 5 a CUORE
ingrandimento 500x*

- **CONFRONTO TRA CAMPIONI**

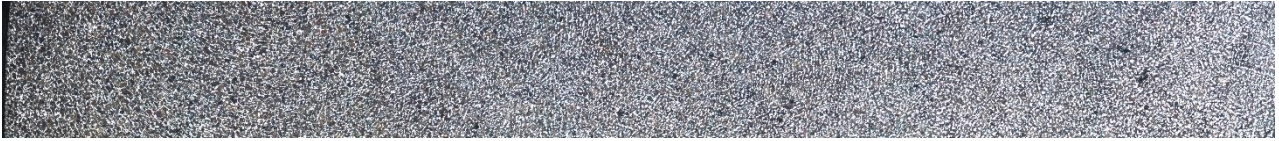


Figura 3.40- *Panoramica BORDO-CUORE del campione allo stato di fornitura*



Figura 3.41- *Panoramica BORDO-CUORE del campione 1*



Figura 3.42- *Panoramica BORDO-CUORE del campione 2*



Figura 3.43- *Panoramica BORDO-CUORE del campione 3*



Figura 3.44- *Panoramica BORDO-CUORE del campione 4*



Figura 3.45- *Panoramica BORDO-CUORE del campione 5*

Dopo aver effettuato le panoramiche BORDO-CUORE di ciascun campione (da fig. 3.40 a 3.45) si ottiene un riscontro visivo immediato sulle profondità di penetrazione del trattamento e sulle frazioni ferritiche presenti nella matrice. Dalle immagini precedenti si evidenzia come all'aumentare della velocità di attraversamento della barra si ottenga una maggiore presenza di ferrite e una progressiva diminuzione dello spessore interessato dall'indurimento.

Un secondo confronto si può ottenere sovrapponendo i profili di durezza di ciascun provino come illustrato in figura 3.46 (la linea tratteggiata interseca i profili in corrispondenza della profondità di indurimento).

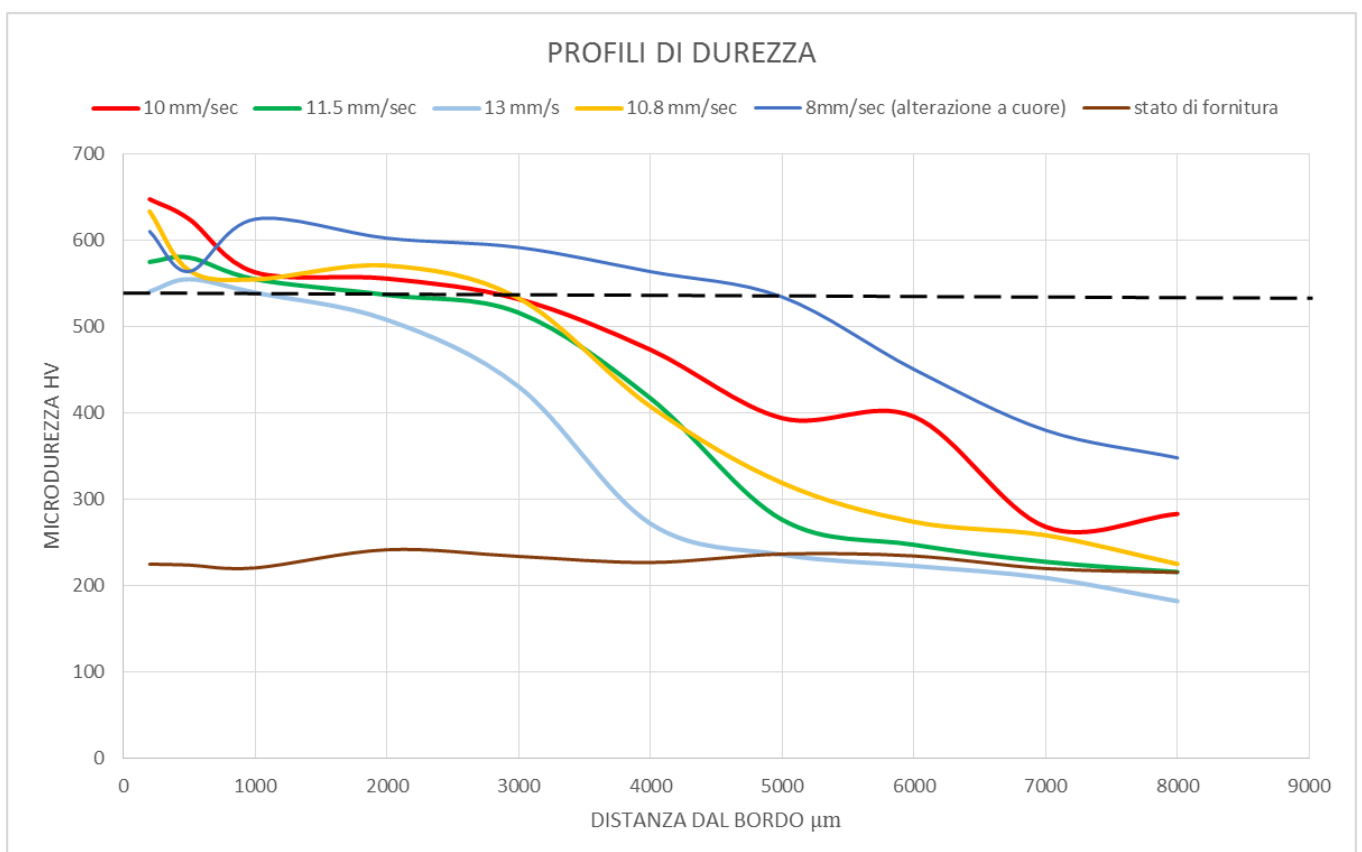


Figura 3.46- Sovrapposizione dei profili di durezza dei campioni

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di determinare i parametri ottimali per l'ottenimento di un trattamento di tempra superficiale su un acciaio C45 utilizzando il sistema ad induzione presso il laboratorio del DTG.

I risultati sperimentali ottenuti analizzando i vari campioni sottoposti al trattamento permettono di evidenziare la correlazione diretta tra profondità di indurimento e velocità di attraversamento dell'induttore.

In particolare si nota come le caratteristiche rilevate sul campione 3, il quale è stato ottenuto con una velocità di attraversamento di 10.8 mm/s, sono quelle che si avvicinano di più alle migliori apportate da un processo ideale. Il profilo di durezza del campione 3 (fig. 3.27) riporta una profondità di penetrazione di circa 3mm in cui i valori sono caratteristici di una struttura martensitica. Le micrografie (fig. 3.28 e 3.29) confermano la presenza di tale fase.

Il campione 1 (fig. 3.18) presenta una penetrazione di trattamento troppo elevata (di circa 5mm) causata da una velocità di scorrimento insufficiente (di 8 mm/s) ad evitare l'innalzamento della temperatura a cuore per conduzione termica. Il campione 3, rispetto al campione 2 (che meno si discostano dalla velocità di attraversamento del campione 3), presenta ancora piccole frazioni di ferrite. Ciò è dovuto ad un tempo di permanenza in campo austenitico non del tutto sufficiente all'ottenimento di una diffusione completa del carbonio nella fase γ . La velocità di attraversamento del terzo campione risulta comunque idonea ad evitare alterazioni della struttura a cuore.

Aumentando ulteriormente la velocità di attraversamento da 11.5 a 13 mm/s (campioni 4 e 5), la frazione di ferrite diventa sempre più

consistente portando di conseguenza ad una diminuzione della profondità di tempra.

Come ulteriore conferma di quanto detto, è possibile confrontare i profili di durezza dei campioni in fig. 3.46 e le panoramiche da fig. 3.40 a 3.45 (si confrontino i profili di durezza in fig. 3.46 e si osservi l'incremento della fase ferritica nelle panoramiche da fig. 3.40 a 3.45).

In conclusione, si può affermare che i parametri di processo utilizzati per il terzo campione sono i più efficaci per l'ottenimento di un trattamento adeguato per questo tipo di acciaio.

Utilizzando differenti tipologie di circuito, raffreddamenti più efficaci, generatori che forniscano potenze più elevate, e spire induttive con tolleranze geometriche che garantiscano un'omogeneità maggiore, sarebbe possibile ottenere caratteristiche di trattamento migliori. E' opportuno evidenziare come i risultati ottenibili siano soggetti alle difficoltà e ai limiti del procedimento sperimentale, oltre che alle caratteristiche dei singoli componenti costituenti il sistema di tempra.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- *Dispensa di "MATERIALI METALLICI e TRATTAMENTI TERMICI", Prof. Bonollo Franco, Prof. Timelli Giulio*
- *Tesi "MODELLAZIONE DI UN TRATTAMENTO DI TEMPRA SUPERFICIALE", Ilenia Magnabosco*
- *Tesi "SIMULAZIONE DELLA TEMPRA DI UN CILINDRO SPESSO", Paolo Tommasini*
- *www.ciasacciai.it/acciai/acciaio-C45.html*
- *www.ims.it*
- *<http://it.wikipedia.org>*
- *www.termomacchine.com*
- *www.lucefin.com/wp-content/files_mf/temprainduzione_ita.pdf*
- *www.tibsrl.it/Tempra_ad_Induzione.aspx*
- *<http://www.sapere.it>*