

# POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica  
specializzazione in Progettazione Meccanica

Sede di Torino



## Tesi di Laurea di secondo livello

Caratterizzazione meccanica e analisi della microstruttura di acciai laminati  
a caldo

Relatore:

Prof. Ing. Paolo Matteis

Candidato:

Ing. Jgor Bertino

Luglio 2018



# ***INDICE***

1. Premessa.....	5
2. Introduzione.....	6
2.1 Richiami sul processo di laminazione.....	6
2.2 Il laminatoio di Lesegno.....	11
2.2.1 Il forno di risclado.....	11
2.2.2 L'impianto di laminazione.....	13
2.2.3 La placca di raffreddamento.....	14
2.3 Gleeble 3800.....	16
2.3.1 Il sistema termico.....	16
2.3.2 Rilievi di temperatura.....	16
2.3.3 Il sistema meccanico.....	17
2.3.4 La cella di carico.....	17
2.3.5 Il trasduttore di corsa.....	18
2.3.6 Il trasduttore di deformazione laterale.....	18
2.3.7 Dilatometro CCT.....	18
2.3.8 Estensimetri assiali a caldo.....	18
2.3.9 Campioni.....	19
3. Obiettivi e materiali.....	20
3.1 Parametri di processo.....	20
3.1.1 Calcolo del rapporto di riduzione della sezione.....	20
3.1.2 Calcolo della velocità di rotazione dei cilindri di laminazione.....	21
3.1.3 Calcolo dell'area di contatto cilindro – materiale.....	23
3.1.4 Calcolo del tempo di deformazione.....	25
3.1.5 Misura delle temperature e dei tempi di percorrenza della linea.....	26
3.2 La simulazione fisica di processo.....	28
3.2.1 Scelta del provino e parametri di input.....	28
3.2.2 Preparazione del provino.....	29
3.2.3 Le simulazioni effettuate.....	31
3.2.4 La bonifica dei provini.....	41

4. Risultati e discussione.....	42
4.1 Acciaio C45.....	44
4.1.1 Acciaio C45 - simulazione della laminazione.....	44
4.1.2 Acciaio C45 – simulazione con raffreddamento accelerato.....	52
4.2 Acciaio 42CrMoS4.....	60
4.2.1 Acciaio 42CrMos4 – simulazione della laminazione.....	60
4.2.2 Acciaio 42CrMos4 – simulazione con raffreddamento accelerato.....	65
5. Conclusioni.....	72
ALLEGATO A.....	82
ALLEGATO B.....	95
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA .....	102

## ***1. PREMESSA***

Il presente lavoro di tesi è volto al calcolo e all'analisi dei risultati dei processi di laminazione a caldo di acciai e allo studio delle proprietà del materiale che ne conseguono. Grazie alla collaborazione del gruppo Riva Acciaio S.p.A. è stato possibile effettuare tale lavoro nello stabilimento di Lesegno (CN) dove possiedono, nel loro laboratorio d'analisi, il Gleeble 3800, un macchinario all'avanguardia di simulazione termo-meccanica di processo. Grazie a questo simulatore è stato possibile riprodurre tutto il ciclo di laminazione reale, dal riscaldamento alle deformazioni fino al raffreddamento, che si effettua in reparto. Modificando poi alcuni parametri di processo sono state effettuate simulazioni di laminazione, che nella realtà non si effettuano nello stabilimento, allo scopo di studiarne i risultati che ne derivano, aspettandosi di trovare caratteristiche del materiale ovviamente diverse, con l'obiettivo di valutare se tali acciai potrebbero avere degli utilizzi pratici. Questo progetto si collega a un precedente lavoro di tesi effettuato anch'esso nello stabilimento di Lesegno nel 2016 che si poneva l'obiettivo di andare ad analizzare la fase di raffreddamento post laminazione simulando il processo al Gleeble 3800. Limitando poi la velocità di raffreddamento si poteva potenzialmente ottenere un acciaio più duttile e resiliente rispetto a quello ottenuto con il raffreddamento reale in reparto, caratteristica che rende il materiale più lavorabile nelle fasi successive di taglio in cesoia oppure per lavorazioni a freddo a valle in altri stabilimenti. Si può quindi pensare a tali lavori inseriti in un'ottica di possibile produzione futura di acciai laminati a caldo con un processo completamente controllato in ogni fase in modo da ottenere acciai, a valle della laminazione, con caratteristiche ottimali a seconda del loro impiego successivo.

## 2. INTRODUZIONE

Di seguito saranno illustrati alcuni concetti generali sulla laminazione e sugli impianti presenti nello stabilimento di Leseigno nonché sul simulatore di processo termo-meccanico Gleeble 3800 in modo tale da avere una panoramica sugli argomenti trattati per poi arrivare alla descrizione del lavoro di tesi.

### 2.1 RICHIAMI SUL PROCESSO DI LAMINAZIONE

La laminazione è un processo di lavorazione meccanica plastica volta a ridurre lo spessore o il diametro di un semilavorato, avente una determinata geometria iniziale, proveniente da una colata continua o da un lingotto. Questo si ottiene grazie al cambiamento di forma del materiale generato dal passaggio del laminato tra due cilindri contrapposti che ruotano i quali sono posti a una distanza inferiore all'altezza del materiale in ingresso. Per ottenere il risultato finale si compiono solitamente più passaggi diminuendo gradualmente la distanza tra i cilindri perché, se l'altezza del materiale in ingresso è troppo grande rispetto a quella della sagoma di passaggio, le forze di contatto tra il laminato e i rulli diventano troppo elevate e i cilindri rifiutano il materiale.

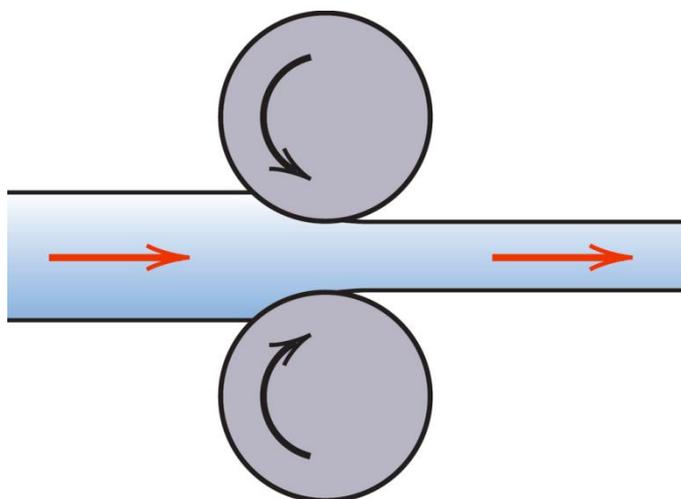


Fig.1 – schema semplificato della laminazione

I semilavorati iniziali si classificano a seconda della forma e della dimensione della sezione:

- bramma: ha una sezione trasversale rettangolare con superficie superiore ai 14400 mm<sup>2</sup> e un rapporto lato maggiore su lato minore inferiore a 4. Se tale rapporto è superiore si parla di bramma piatta. Viene laminata per ottenere generalmente delle lamiere;

- blummo: ha una sezione trasversale quadrata con superficie superiore ai 14400 mm<sup>2</sup> e lato di almeno 120 mm. Viene laminato per ottenere generalmente delle barre;
- billetta: ha una sezione trasversale che può essere quadrata con lato compreso tra i 50 e i 120 mm oppure rettangolare con rapporto tra i lati di almeno 4. In entrambi i casi la sezione ha un'area inferiore ai 14400 mm<sup>2</sup>. Viene laminata per ottenere generalmente delle barre, fili o profilati;
- bidone: ha una sezione trasversale rettangolare con lato inferiore di lunghezza minore ai 50 mm e rapporto tra i lati minore di 4.

La laminazione si divide in due principali categorie:

- laminazione a caldo;
- laminazione a freddo.

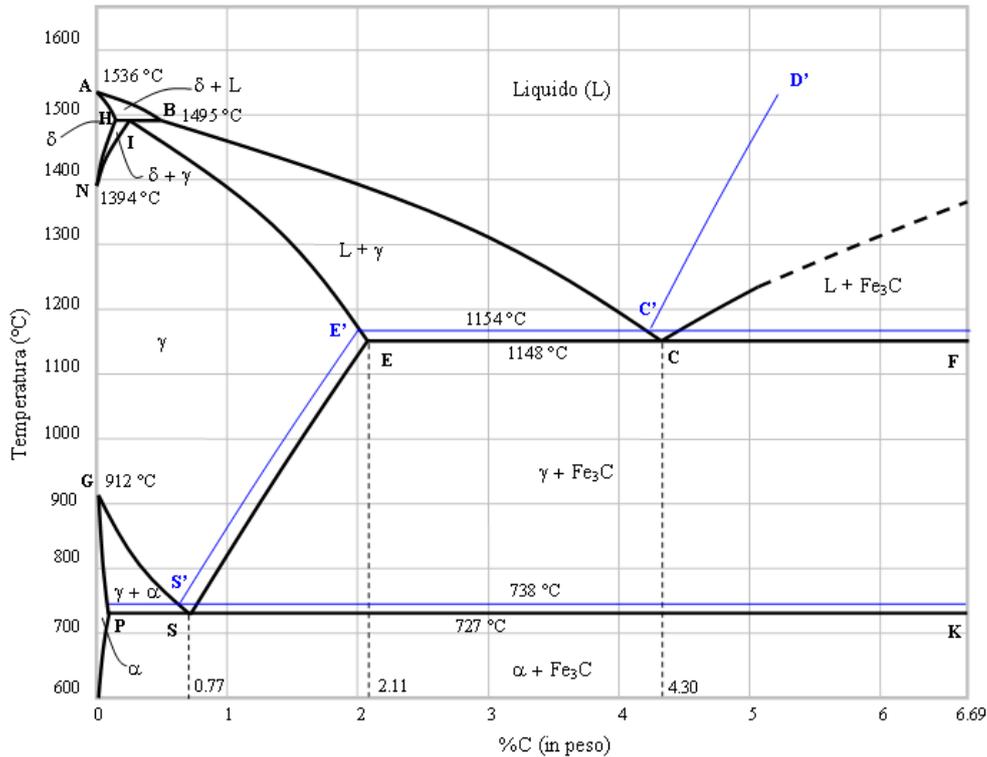
Nel primo caso, l'elevata temperatura diminuisce la resistenza allo scorrimento plastico grazie ai processi di attivazione termica per i quali la temperatura aumenta l'energia del sistema diminuendo la quota energetica da fornire dall'esterno per attivare i meccanismi di deformazione plastica, per cui diventa più semplice deformare plasticamente l'acciaio. Inoltre, aumenta la velocità di ricristallizzazione, per cui il materiale subisce recovery e diminuisce l'incrudimento derivato dalla deformazione plastica subita precedentemente, altro fattore che facilita la deformazione plastica del laminato. Per contro l'elevata temperatura darà luogo a fenomeni di ossidazione della superficie del materiale per cui si avrà una precisione minore sulla dimensione del laminato a freddo e una peggiore finitura superficiale.

Nel secondo caso, al contrario, sarà di per se più difficile deformare plasticamente il materiale per mancanza dell'attivazione termica e non si avranno fenomeni di recovery per cui a seguito della deformazione plastica si verificherà incrudimento il quale aumenterà la resistenza allo scorrimento plastico durante le deformazioni successive. I vantaggi di tale lavorazione sono invece la precisione dimensionale e una finitura superficiale migliore data l'assenza di ossidazione.

Il processo di laminazione a caldo prevede sostanzialmente tra fasi:

- il riscaldamento;
- la deformazione plastica;
- il raffreddamento.

Durante il riscaldamento il semilavorato, che arriva dai processi di colata continua o in lingotto, viene scaldato in un forno a una temperatura che di solito si aggira intorno ai 2/3 della temperatura di fusione, la quale corrisponde alla temperatura di massima plasticità del materiale. Tale temperatura deve comunque portare l'acciaio in campo austenitico, che per il ferro puro si trova compreso tra i 912°C e i 1394°C ma varia a seconda del tenore di carbonio nella lega seguendo il diagramma di stato Fe-C.



**Fig.2 – diagramma di stato Ferro-Carbonio**

Raggiunta la temperatura desiderata il materiale viene deformato progressivamente passando in una serie di gabbie di laminazione, ovvero l'insieme di motore elettrico, sistema di riduzione, cilindri, ecc. Le gabbie di laminazione possono essere messe in serie e quindi si parla di treno di laminazione oppure una stessa gabbia può effettuare più laminazione in quanto il laminato viene fatto avanzare e poi torna indietro e così via e in tal caso si parla di laminazione reversibile. In caso di laminazione di barre in un treno di laminazione generalmente le gabbie hanno cilindri che si alternano orizzontali e verticali in modo tale il materiale non si allarghi soltanto in una direzione ma prenda la forma desiderata in entrambe le direzioni. I cilindri possono essere sagomati o meno a seconda della forma che si vuole imprimere al laminato.



**Fig.3 – gabbie di laminazione**



**Fig.4 – cilindro di laminazione sagomato**

Il concetto fondamentale che sta alla base della laminazione è la conservazione del volume. La deformazione del laminato si compone di una parte di deformazione elastica e di una parte di deformazione plastica. La deformazione elastica è interessata dalla variazione della posizione di equilibrio degli atomi del materiale e quindi un materiale conserva la propria forma ma non il proprio volume. La deformazione plastica è interessata principalmente dallo scorrimento delle dislocazioni causata dalla componente deviatorica del tensore delle tensioni la quale è responsabile del cambiamento di forma del materiale ma non del cambiamento di volume. Durante il processo di laminazione la componente plastica della deformazione è di gran lunga superiore alla componente elastica, per cui si può approssimare l'intera deformazione a una deformazione plastica alla quale è associato il concetto di conservazione del volume. Se il volume si conserva è vero che una diminuzione della sezione trasversale del laminato corrisponde a un allungamento dello stesso.

Infine vi è la fase di raffreddamento a valle della deformazione. Essa avviene generalmente su delle placche dove il laminato viene fatto riposare e poi evacuato. Il raffreddamento di solito è controllato, ovvero le placche possono essere costruite con materiali refrattari in modo che la dispersione di calore non sia troppo veloce. In questo modo si vuol evitare di ottenere microstrutture indesiderate, come quelle bainitiche o martensitiche, che porterebbero a problemi di lavorazione successiva in quanto strutture molto dure e poco lavorabili.

## ***2.2 IL LAMINATOIO DI LESEGNO***

Il reparto laminatoio dello stabilimento Riva di Leseugno lamina barre e tondi. Esso si trova a valle del reparto acciaieria. E' costituito da:

- un forno di riscaldamento;
- un impianto di laminazione;
- una placca di raffreddamento;
- una cesoia;
- due raddrizzatrici;
- una sabbiatrice;
- un forno di ricottura.

### ***2.2.1 IL FORNO DI RISCALDO***

Il forno di riscaldamento accoglie i blumi che arrivano dalla colata continua dell'acciaieria. Il semilavorato di partenza ha geometrie che variano a seconda del prodotto che si vuole ottenere, nel caso esaminato nella presente tesi sono blumi 161 x 161 a freddo. Essi vengono inseriti nel forno attraverso una via a rulli e, una volta dentro la camera, spinti in sede attraverso un sistema oleodinamico. Il forno può accogliere fino a 90 blumi. Essi percorrono la camera interna fino al lato opposto grazie a un sistema di longheroni mobili che fanno scorrere il materiale attraverso un movimento periodico della base del forno su di un piano inclinato. Una volta portato il blummo al lato opposto esso viene prelevato e posto su una seconda via a rulli che provvede a evacuarlo verso l'impianto di laminazione. Il forno scalda il materiale dalla temperatura ambiente fino ad arrivare in campo austenitico, nel caso in esame si arriva a una temperatura di 1150°C. Le temperature in ingresso e in uscita sono monitorate attraverso dei pirometri ottici. All'interno, la camera è suddivisa in 10 zone termiche e ciascuna zona ha un controllo sulla temperatura grazie a termocoppie installate sulle pareti del forno. Il riscaldamento della carica è bilaterale e avviene grazie a una serie di coppie di bruciatori rigenerativi con funzionamento impulsivo di tipo ON – OFF. La combustione avviene a potenza costante durante i tempi di ON determinati dal sistema di controllo in feedback della temperatura in base alla zona termica. Il funzionamento impulsivo genera una buona turbolenza all'interno della camera per cui lo scambio termico risulta essere omogeneo e avviene prevalentemente per irraggiamento. I bruciatori sono in materiale ceramico refrattario e hanno una camera di accumulo che permette di effettuare la combustione tra il carburante, metano, e il comburente, aria, prima di essere mandato all'interno del forno nei tempi

di ON e, nei tempi di OFF, aspirano i gas combusti dalla camera. Il calore di questi ultimi viene utilizzato per riscaldare l'aria comburente in modo da massimizzare l'efficienza energetica. Successivamente vengono rilasciati attraverso la canna fumaria. Il controllo della pressione in camera avviene automaticamente grazie al funzionamento dei bruciatori rigenerativi che aspirano ciò che hanno prima inserito dentro il forno, tuttavia vi è una valvola a farfalla di sicurezza che evacua, in caso di necessità, parte dei gas combusti direttamente in canna fumaria se la pressione all'interno della camera deve essere abbassata.



**Fig.5 – forno di riscaldamento**

Le altre caratteristiche principali del forno sono:

- larghezza: 8.9 m;
- lunghezza: 19 m;
- temperatura max: 1250°C;
- differenza temperatura massima garantita dal sistema di controllo tra le due facce del blummo: 30°C;
- differenza di temperatura massima garantita dal sistema di controllo tra il centro e la testa del blummo: 20°C;
- potenza termica massima: 64 MW;

- potenza termica di funzionamento: 58 MW.

## ***2.2.2 L'IMPIANTO DI LAMINAZIONE***

L'impianto di laminazione a valle del forno di riscaldamento si compone di:

- sbozzatore;
- treno intermedio;
- treno finitore.

Lo sbozzatore è composto da una gabbia di laminazione reversibile dove il semilavorato in uscita dal forno di riscaldamento viene laminato dalle 3 alle 5, volte a seconda del risultato che si vuole ottenere, passando avanti e indietro sempre nella stessa gabbia. Il sistema automatico fa sì che, ogni volta effettuata una laminazione, il materiale viene girato di 90° in modo tale da essere laminato nella direzione ortogonale alla passata precedente. Questo perché il laminatoio di Lesegno lavora barre e tondi e non lastre per cui è necessario alternare sempre la laminazione nelle due direzioni al fine di ottenere la sezione voluta. I cilindri dello sbozzatore sono sagomati in modo tale da ottenere sezioni di forma rettangolare.

Il treno intermedio è composto da una serie di gabbie di laminazione in serie con cilindri alternati orizzontali e verticali. Tale soluzione qui è stata preferita alla rotazione del semilavorato in quanto risulta difficile ruotare il materiale all'uscita da ogni gabbia data la lunghezza che raggiunge. In questo modo si permette anche la lavorazione della gabbia successiva prima ancora che il semilavorato esca da quella precedente con un netto vantaggio di spazio occupato dall'impianto e il risparmio di tempo. Il treno intermedio ha cilindri sagomati per sezioni alternate ovali e tonde oppure rombo e quadro. Vi è, inoltre, una piccola cesoia rotante che provvede a tagliare la testa del semilavorato perché si trova a una temperatura più bassa rispetto alla restante parte del materiale. Ciò comporta la formazione di difetti a livello micro strutturale nell'acciaio e a un problema di lavorabilità nelle gabbie successive.

### **2.2.3 LA PLACCA DI RAFFREDDAMENTO**

A valle dell'impianto di laminazione il semilavorato viene fatto riposare sulla placca di raffreddamento. Essa è lunga 104 metri ed è larga 15 metri. In ingresso alla placca il materiale viene fatto passare attraverso un dispositivo di controllo ottico geometrico dimensionale in modo tale da controllare che siano garantite le tolleranze geometriche e dimensionali del pezzo. Se una barra non rispetta le tolleranze il sistema di controllo avvisa il personale addetto alla supervisione il quale interviene rimuovendo la barra dalla placca di raffreddamento. Il letto della placca è costituito da una serie di rastrelli fissi che, formando tra loro un intaglio a "v", accolgono la singola barra e da una serie di rastrelli mobili che, attraverso un moto periodico di forma quadra, permettono al materiale di scorrere fino ad arrivare al lato opposto del letto dove, grazie a una via a rulli, vengono evacuati verso la cesoia. Il moto dei rastrelli mobili è suddiviso in 4 fasi:

- arretramento;
- salita;
- avanzamento;
- discesa.

Il materiale arriva in placca a una temperatura che varia a seconda delle dimensioni del laminato ma che si aggira attorno ai 1000°C. Il tempo di permanenza del materiale nel letto viene imposto in modo tale che, in uscita, le singole barre abbiano una temperatura non inferiore ai 500°C. Questo per poter essere ancora tagliate dalla cesoia in maniera funzionale. Per evitare velocità di raffreddamento troppo elevate, che porterebbe alla formazione di microstrutture indesiderate e troppo dure, quali quelle bainitiche e martensitiche, la prima parte della placca di raffreddamento è costituita da lamiera coibentate e il passo tra le singole barre è basso per minimizzare lo scambio termico.



**Fig.6 – placca di raffreddamento**

A valle della placca di raffreddamento il materiale viene tagliato in cesoia secondo le richieste del cliente e, se necessario, anche raddrizzato, sabbiato e/o ricotto. terminate le varie lavorazioni meccaniche e termiche si confeziona il prodotto in fasci e tramite un carro ponte con elettrocalamita lo si stocca in magazzino pronto per essere spedito.

## **2.3 GLEEBLE 3800**

Il simulatore siderurgico Gleeble 3800 è un macchinario all'avanguardia per le simulazioni termomeccaniche ad anello chiuso.

Le specifiche tecniche del Gleeble 3800 sono:

- max velocità di riscaldamento: 10000 °C/s;
- max velocità di corsa: 2000 mm/s;
- max avanzamento: 100 mm;
- max forza: 10 tonnellate in trazione e 20 tonnellate in compressione.

### **2.3.1 IL SISTEMA TERMICO**

Il sistema di riscaldamento a resistenza diretta del Gleeble può riscaldare i campioni a una velocità superiore ai 10000 °C/s e può mantenere costante la temperatura di equilibrio. Delle morse ad alta conduttività termica afferrano il campione, rendendo il Gleeble capace di alte velocità di raffreddamento. All'occorrenza il sistema di raffreddamento può essere integrato con un paio di "quench" ad acqua oppure a olio.

Quattro possibili termocoppie provvedono a fornire segnali per un accurato feedback sul controllo della temperatura dei provini.

### **2.3.2 RILIEVI DI TEMPERATURA**

La temperatura dei provini durante il riscaldamento e il raffreddamento è monitorata mediante termocoppie, che offrono una risposta termica veloce.

La temperatura del provino è misurata quando la corrente non sta attraversando il provino usando una tecnica di time 160l a, così la corrente di riscaldamento non influisce la misura della temperatura. Ci sono 4 canali di dati disponibili per la misura della temperatura, ognuno di questi può essere cambiato verso la termocoppia desiderata (tipo E, K, R, S, B). Le termocoppie utilizzate sono generalmente da 0,2 mm di diametro.

Il filo della termocoppia deve essere saldato in corrispondenza della metà del provino. I fili sono saldati uno alla volta in modo da formare una giunzione intrinseca che da una risposta termica veloce per la misura della temperatura, sia nel caso di una normale termocoppia, che nel caso di una termocoppia di spessore maggiore.

I due fili della termocoppia devono essere saldati a 1 mm di distanza nella stessa sezione trasversale all'asse del provino, altrimenti la differenza di potenziale lungo l'asse del provino condurrà ad un errore sulla misura della temperatura.

Ci sono diversi tipi di termocoppie che possono essere usate per i test.

La tipologia più usata è la K, ma anche S, R e B (le ultime 3 sono termocoppie al PtRh-Pt). Le tipologie di termocoppie disponibili sono:

TIPOLOGIA	RANGE DI FUNZIONAMENTO
K	0-1250°C
S	0-1450°C
R	0-1450°C
B	0-1700°C
E	0-900°C

**Tab.1 – tipologie di termocoppie**

### ***2.3.3 IL SISTEMA MECCANICO***

Il sistema meccanico del Gleeble 3800 è un servo sistema idraulico capace di esercitare 10 tonnellate di forza statica in trazione e 20 tonnellate in compressione. Possono essere raggiunte velocità di spostamento di 2000 mm/s. Gli spostamenti possono essere misurati con trasduttori LVDT, celle di carico, oppure estensimetri a laser.

I modi di controllo disponibili includono corsa, forza, estensimetri, tensioni e deformazioni reali, tensioni e deformazioni ingegneristiche. Il sistema meccanico consente all'operatore di programmare cambi da un controllo all'altro durante i test.

### ***2.3.4 LA CELLA DI CARICO***

La cella di carico è usata per misurare la forza esercitata sul provino. E' installata sul lato fisso della cavità della ganaschia, perciò, l'attrito sulla parte mobile del provino non è misurata eccetto quando il provino è in espansione termica oppure in contrazione. Le aste di guida sono principalmente usate per i test in compressione, perciò, è utile minimizzare l'attrito rimuovendo le aste di guida quando si stanno facendo dei test in tensione oppure degli studi sulle trasformazioni di fase.

### ***2.3.5 IL TRASDUTTORE DI CORSA***

E' installato dietro il sistema idraulico. Con una misurazione massima di 100 mm, misura il moto del pistone. Quando si utilizza la misura della corsa come variazione della lunghezza del campione, la misura della corsa include, inoltre, la cedevolezza della macchina. Perciò, non è raccomandato usare il trasduttore di corsa per misurare il modulo elastico dei provini.

### ***2.3.6 IL TRASDUTTORE DI DEFORMAZIONE LATERALE***

Il trasduttore di deformazione laterale è usato per misurare il cambiamento di sezione trasversale di un campione.

Può misurare la variazioni di diametro e di larghezza. E' spesso usato per calcolare la tensione e per realizzare le curve dilatometriche. La forza della molla dello strumento deve essere regolata correttamente. Se la forza della molla è troppo elevata, potrebbe segnare la superficie calda del campione, se è troppo bassa il trasduttore potrebbe separarsi dal campione durante il test. Quando il campione viene esposto per tempi lunghi alle alte temperature il corpo del trasduttore deve essere protetto e raffreddato.

### ***2.3.7 DILATOMETRO CCT***

Il dilatometro CCT è un trasduttore più accurato per lo studio delle trasformazioni di fase usando il metodo di dilatazione. Misura un massimo di +/- 0,6mm che è circa 10 volte più accurato che un dilatometro normale. Riesce a captare un segnale di piccola entità con molta più facilità.

### ***2.3.8 ESTENSIMETRI ASSIALI A CALDO***

Gli estensimetri assiali a caldo misurano la variazione di lunghezza nella zona calda del campione. E' buono per la proprietà elastiche come modulo elastico e tensione di snervamento a differenti temperature. Ci sono due tipi di trasduttori per deformazioni a caldo nel sistema Gleeble. Uno è il LVDT che è buono per misure di allungamento al di sopra della tensione di rottura. La lunghezza calibrata può essere aggiustata con 10mm o 25mm. La distanza totale di lavoro è 25mm. L'altro tipo è l'estensimetro. La scelta di uno dei tre modelli iniziali dipende dalla distanza calibrata iniziale e dalla distanza di lavoro. L'estensimetro è più adatto per la misura di proprietà elastiche.

### **2.3.9 CAMPIONI**

I campioni sono normalmente standardizzati per quanto riguarda i test sui materiali perché seguono degli standard come ad esempio ASTM. Comunque, nelle simulazioni fisiche, i provini possono essere arbitrari per raggiungere gli obiettivi della prova. Perciò, è importante progettare il provino in modo corretto per la simulazione fisica nel Gleeble. Ci sono diversi tipi di provino che possono essere utilizzati nelle simulazioni fisiche al Gleeble. Generalmente, si possono usare tutti i tipi di provini ad eccezione delle seguenti limitazioni:

- il materiale di cui è composto il campione deve condurre elettricità, a meno che vengano usate tecniche speciali per riscaldare il campione;
- le dimensioni del provino devono rientrare dentro il limite massimo e minimo per la capacità elettrica e termica del sistema. Un campione troppo grande o troppo piccolo è difficile da riscaldare;
- La dimensione del provino dipende anche dalla capacità di carico del sistema. Il campione deve essere dimensionato in modo da non superare la capacità di forza nominale del Gleeble.

Molti provini sono di forma tonda, quadrata, piana, rettangolare o tubolare. Possono essere adottati altri tipi di provino per test con scopi speciali. Nelle simulazioni Gleeble, per le prove di trazione, è normalmente usato un provino 10 x 120 mm con filettatura in entrambi gli estremi. Questa tipologia di provino è usata per gli studi sulla saldabilità, duttilità, 190l abilità ecc.. Per curve di lavoro CCT dinamiche, quando la massima velocità di raffreddamento è bassa (tipicamente minore di 5°C/s), si usano provini 10 x 15 mm. I provini a forma di lamiera vengono usati per la simulazione della ricottura. Per il SICOTM test, utile per gli studi sulla lavorabilità e forgiabilità a caldo, vengono usati provini 10 x 90 mm.

### **3. OBIETTIVI E MATERIALI**

Il lavoro della presente tesi prevede di simulare, con l'unità Hydrawedge del Gleeble 3800, il processo di laminazione che viene effettuato in reparto su due acciai da bonifica: il C45 e il 42CrMoS4. In Tab.2 e Tab.3 le rispettive analisi chimiche. Verificata la possibilità di simulare con precisione tale processo, si modificheranno i parametri più significativi. In particolare saranno modificate le temperature sulle ultime fasi della laminazione allo scopo di analizzare le caratteristiche meccaniche e la microstruttura dell'acciaio ottenuto. L'obiettivo finale sarà verificare se la microstruttura ottenuta, e le conseguenti caratteristiche meccaniche, sia simile o meno a quella che avrebbero gli stessi acciai in esame dopo un processo di bonifica a valle della laminazione.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V	Nb	Ti	Ca
0.42	0.71	0.24	0.012	0.015	0.13	0.06	0.01	0.22	0.009	0.022	0.001	0.001	0.008	0.0031

**Tab.2 – analisi chimica del C45**

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V	Nb	Ti	Ca	Sb
0.41	0.82	0.26	0.02	0.028	1.12	0.1	0.19	0.22	0.011	0.025	0.004	0.003	0.02	0.0015	0.001

**Tab.3 – analisi chimica del 42CrMoS4MoS4**

#### **3.1 PARAMETRI DI PROCESSO**

Al fine di simulare la laminazione che si effettua in reparto bisogna conoscere alcuni parametri di processo da fornire in input al Gleeble. In particolare, è necessario ricavarsi la deformazione, la velocità di deformazione e la temperatura dell'acciaio per ogni gabbia di laminazione e il tempo che intercorre tra una gabbia e la successiva.

##### **3.1.1 CALCOLO DEL RAPPORTO DI RIDUZIONE DELLA SEZIONE**

I due acciai in esame vengono laminati, a partire da un blummo di sezione quadrata 161 x 161 a freddo, attraverso 11 gabbie di laminazione. Le prime 3 passate sono di sbazzatura e le sagome dei cilindri sono di forma rettangolare, per poi passare al treno intermedio composto da 6 gabbie dove

si alternano le sagome ovali a quelle rotonde fino ad arrivare alle ultime due passate del treno finitore, prima ovale e poi tondo, per ottenere la barra finale di diametro 50 mm a freddo. In ordine le 11 gabbie di laminazione vengono chiamate GR1, GR2, GR3, GN2, GN3, GN4, GN5, GN6, GN7, G4, G5.

Sapendo le geometrie e le dimensioni delle sezioni delle barre passanti in ogni sagoma ci si può calcolare l'area della sezione del materiale per ogni gabbia. Per il calcolo dell'area della sezione iniziale si prende in considerazione una dilatazione lineare dell'acciaio a caldo pari a 1,0165. Facendo quindi il rapporto tra la sezione precedente e quella successiva si ottiene il rapporto di riduzione della sezione "rrs". Il rapporto di riduzione totale si calcola moltiplicando tra loro i singoli rapporti. L'inverso del rapporto di riduzione della sezione servirà per il calcolo della deformazione richiesta dal Gleeble.

	sezione [mm <sup>2</sup> ]	rrs	rrs tot	rrs <sup>(-1)</sup>
iniziale	26783			
GR1	20542	1.304		0.767
GR2	16126	1.274		0.785
GR3	13368	1.206		0.829
GN2	10825	1.235		0.810
GN3	7853	1.378		0.725
GN4	5547	1.416		0.706
GN5	4622	1.200		0.833
GN6	3507	1.318		0.759
GN7	3009	1.166		0.858
G4	2572	1.170		0.855
G5	2021	1.273	13.252	0.786

**Tab.4 – rapporti di riduzione della sezione**

### ***3.1.2 CALCOLO DELLA VELOCITA' DI ROTAZIONE DEI CILINDRI DI LAMINAZIONE***

Al fine del calcolo del tempo che impiega il materiale a essere deformato in ogni gabbia è necessario conoscere la velocità di rotazione dei cilindri di laminazione.

Si parte con il calcolo del fattore di forma, ff:

$$ff = \frac{\text{area sezione materiale dentro sagoma}}{\text{larghezza sezione materiale dentro sagoma}}$$

Quindi, noto il diametro esterno del cilindro,  $D_c$ , dato che esso in opera non è pieno ma è sagomato, si calcola il diametro di lavoro,  $D_w$ , ovvero un valore medio efficace, tenendo così in considerazione l'effettivo diametro del cilindro correggendolo con il fattore di forma conseguenza della sagoma ricavata dalla tornitura del profilo del cilindro stesso, e il conseguente raggio di lavoro,  $R_w$ :

$$D_w = D_c - ff$$

$$R_w = \frac{D_w}{2}$$

Sapendo che la velocità lineare di laminazione nello sbozzatore, ovvero i primi tre passaggi GR1, GR2 e GR3, è imposta a 3 m/s per tutti e tre i passaggi, in quanto lo sbozzatore è un'unica gabbia azionata da un unico gruppo motore-riduttore, mentre quella del treno deve garantire la costanza della portata, ovvero il prodotto velocità per sezione, si ottiene la velocità di rotazione del cilindro di laminazione. Per precisione si sottolinea che la velocità lineare,  $V$ , riportata in tabella, è stata misurata durante la laminazione per cui, a causa di spinte o tiri in fase di laminazione, il prodotto velocità per sezione non è proprio costante ma varia in un range del 5%.

$$w_{cil} = \frac{V}{R_w}$$

	larghezza [mm]	V [m/s]	D c [mm]	ff	D w [mm]	R w [m]	w cil [rad/s]
GR1	170.3	3.00	780	120.6	659.4	0.33	9.10
GR2	131.9	3.00	780	122.3	657.7	0.33	9.12
GR3	135.0	3.00	780	99.0	681.0	0.34	8.81
GN2	151.0	0.57	600	71.7	528.3	0.26	2.16
GN3	99.7	0.77	600	78.8	521.2	0.26	2.95
GN4	121.0	1.13	600	45.8	554.2	0.28	4.08
GN5	75.6	1.46	600	61.1	538.9	0.27	5.42
GN6	82.6	1.76	600	42.5	557.5	0.28	6.31
GN7	61.0	2.13	600	49.3	550.7	0.28	7.74
G4	71.2	2.66	600	36.1	563.9	0.28	9.43
G5	51.0	3.17	600	39.7	560.3	0.28	11.31

**Tab.5 – velocità di rotazione dei cilindri di laminazione**

### 3.1.3 CALCOLO DELL'ARCO DI CONTATTO CILINDRO – MATERIALE

Al fine del calcolo del tempo che impiega il materiale a essere deformato in ogni gabbia è necessario conoscere quanto misura l'arco di contatto medio tra il cilindro di laminazione e il materiale.

Nella seguente figura è riportato uno schema semplificato della zona in esame:

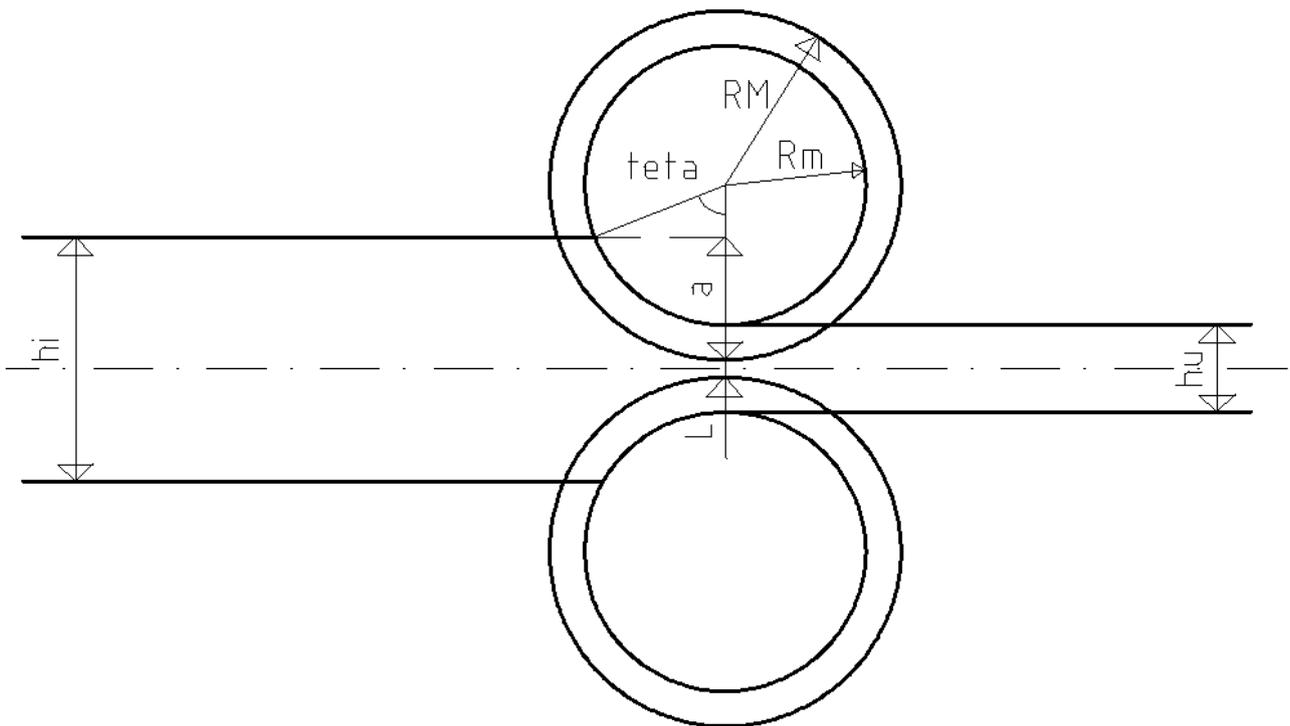


Fig.7 – schema dei cilindri e materiale in gabbia di laminazione

Grazie alla trigonometria è possibile scrivere la relazione tra il raggio esterno,  $R_M$ , il raggio interno,  $R_m$ , e l'arco di contatto,  $\theta$ :

$$R_m \cos \theta = R_M - a$$

da cui:

$$\cos \theta = \frac{R_M - a}{R_m}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{R_M - a}{R_m}\right)$$

dove, nota l'altezza della barra in ingresso,  $h_i$ , l'altezza della barra in uscita,  $h_u$ , e la luce tra i cilindri,  $L$ :

$$R_M = \frac{D_c}{2}$$

$$a = \frac{h_i}{2} - \frac{L}{2}$$

$$R_m = R_M - \frac{h_u}{2} + \frac{L}{2}$$

E' da sottolineare che il raggio interno,  $R_m$ , non corrisponde al raggio di lavoro,  $D_w$ , ma differisce da esso della metà della luce tra i cilindri.

Lo stesso risultato si può ottenere da altre relazioni trigonometriche, come ad esempio la seguente:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{R_m - \frac{(h_i - h_u)}{2}}{R_m}\right)$$

	$h_i$ [mm]	$h_u$ [mm]	luce [mm]	$R_M$ [mm]	$R_m$ [mm]	$a$ [mm]	teta [°]	teta [rad]
GR1	163.00	120.61	10.0	390	334.70	76.50	20.50	0.36
GR2	170.32	122.26	10.0	390	333.87	80.16	21.87	0.38
GR3	131.90	99.00	10.0	390	345.50	60.95	17.75	0.31
GN2	135.04	88.18	3.4	300	257.61	65.82	24.63	0.43
GN3	151.00	99.70	5.7	300	253.00	72.65	26.02	0.45
GN4	99.70	57.45	3.5	300	273.03	48.10	22.69	0.40
GN5	121.00	75.60	5.0	300	264.70	58.00	23.90	0.42
GN6	75.60	49.47	6.0	300	278.27	34.80	17.63	0.31
GN7	82.60	61.00	6.0	300	272.50	38.30	16.18	0.28
G4	61.00	47.70	3.2	300	277.75	28.90	12.56	0.22
G5	71.22	50.95	3.0	300	276.03	34.11	15.57	0.27

**Tab.6 – arco di contatto cilindro-materiale**

Dalla tabella 6 si nota come l'altezza della sezione in entrata sia sempre pari alla larghezza della sezione nel passo precedente perché la deformazione si alterna a 90° dato che, nei tre passaggi dello sbozzatore la barra viene ruotata con un sistema automatico mentre, nel treno intermedio e nel finitore, si alternano gabbie verticali e orizzontali. Si sottolinea che la barra nello sbozzatore abbia sezione rettangolare-quadrata, per questo l'altezza della sezione in uscita corrisponde con il fattore di forma mentre ciò non avviene dal treno intermedio in poi dato che le sezioni si alternano ovali-tonde.

### 3.1.4 CALCOLO DEL TEMPO DI DEFORMAZIONE

Nota l'arco di contatto tra il cilindro e il materiale e la velocità di rotazione del cilindro è possibile calcolare il tempo che impiega la gabbia di laminazione a deformare il materiale:

$$t = \frac{\theta}{w_{cil}}$$

	tempo [s]
GR1	0.039
GR2	0.042
GR3	0.035
GN2	0.199
GN3	0.154
GN4	0.097
GN5	0.077
GN6	0.049
GN7	0.037
G4	0.023
G5	0.024

**Tab.7 – tempi di deformazione**

### **3.1.5 MISURA DELLE TEMPERATURE e DEI TEMPI DI PERCORRENZA DELLA LINEA**

Mediante l'utilizzo di un pirometro ottico sono state misurate le temperature del materiale all'ingresso e all'uscita di ogni gabbia di laminazione. Data l'elevata velocità di passaggio del materiale all'interno della gabbia, la barra non ha il tempo di modificare in maniera significativa la sua temperatura, per cui si riporta in seguito solo un singolo valore di temperatura rappresentativo di ogni singola gabbia misurato in uscita della stessa. Inoltre, a ogni minuto, si sono misurate le temperature della barra laminata in placca di raffreddamento.

Analogamente, grazie a un semplice cronometro, si sono misurati i tempi di percorrenza del materiale sulla linea di laminazione, prendendo come riferimento il momento in cui la punta della barra entra nella gabbia o in placca, e il tempo di giacenza della barra laminata sulla placca di raffreddamento. Si nota come il tempo tra le gabbie del treno intermedio (GN2 – GN7) sia sempre di 8 secondi in quanto, a fronte di un aumento della velocità lineare della barra le gabbie sono messe sempre più vicine tra loro.

	GR1	GR2	GR3	GN2	GN3	GN4	GN5	GN6	GN7	G4	G5	placca
T [°C]	1100	1100	1100	1070	1064	1058	1052	1046	1040	1030	1030	1027
t linea [s]	0	17.5	35	40	48	56	64	72	80	112	120	145

**Tab.8 – temperature e tempi della linea di laminazione**

t placca [s]	T placca [°C]
0	1027
60	930
120	855
180	790
240	735
300	680
360	655
420	635
480	615
540	590
600	570
660	550

**Tab.9 – temperature a ogni minuto in placca di raffreddamento**

Ci si ferma a 550°C con la misurazione della temperatura perché a questo punto le barre vengono evacuate dalla placca di raffreddamento verso la cesoia e dopo di che raggruppate in fasci e stoccate in magazzino in attesa di successivi trattamenti termici e/o meccanici oppure in attesa di essere spediti. Risulta complicato, quindi, rilevare una curva generale di raffreddamento a seguito del taglio in cesoia perché ciascuna barra può finire in una posizione diversa all'interno del fascio e il fascio stesso in una diversa posizione nel magazzino oppure potrebbe capitare che subisca subito o meno gli altri trattamenti.

Di seguito il grafico di raffreddamento in placca tempo – temperatura:

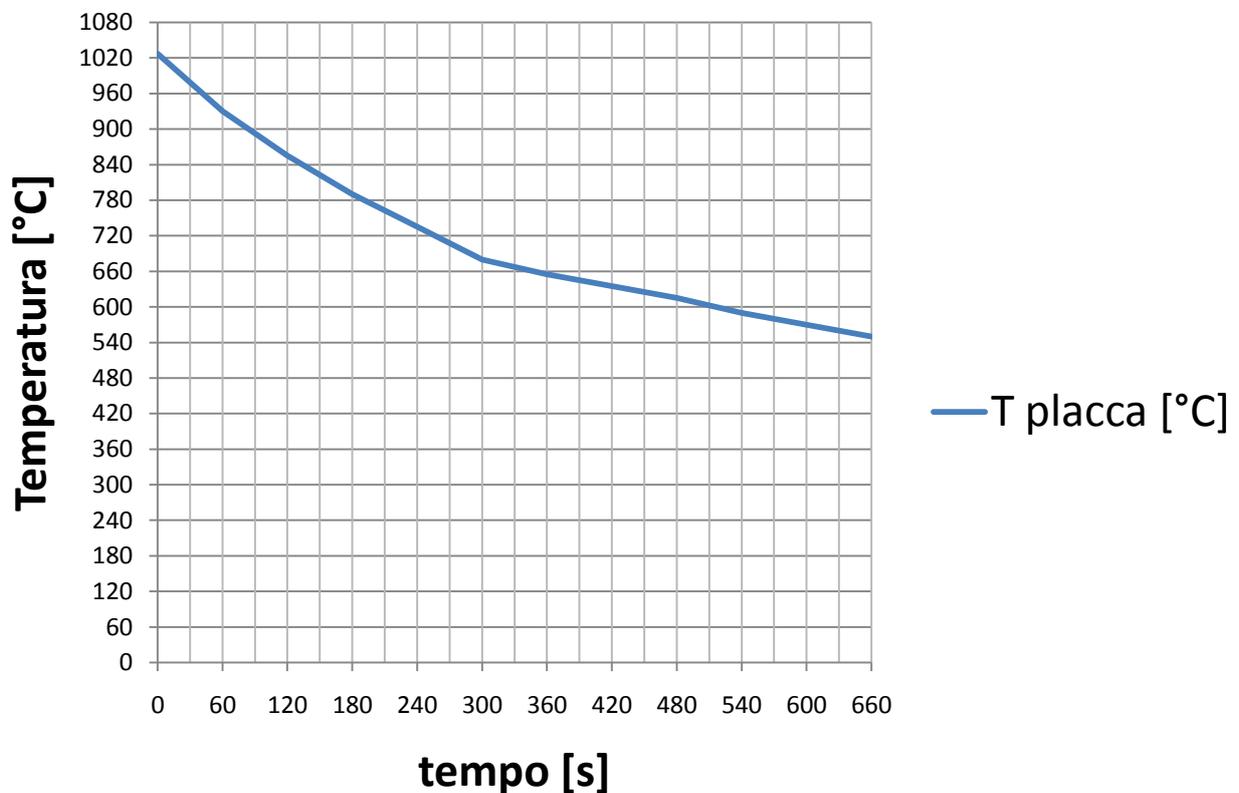


Grafico 1 – curva di raffreddamento in placca

## **3.2 LA SIMULAZIONE FISICA DI PROCESSO**

Come già anticipato il lavoro della presente tesi prevede una campagna di simulazioni con l'unità Hydrawedge del simulatore siderurgico Gleeble 3800 allo scopo di riprodurre la laminazione reale che si effettua in reparto sui due acciai in esame, C45 e 42CrMoS4, per poi simulare vari cicli di laminazione modificati al fine di valutare i risultati ottenuti dal punto di vista micro strutturale e meccanico.

### **3.2.1 SCELTA DEL PROVINO e PARAMETRI DI PROCESSO**

L'unità Hydrawedge di tale macchinario permette di utilizzare provini di diverse dimensioni. Allo scopo di riuscire a simulare le 11 deformazioni che si effettuano nella realtà in reparto, e quindi di ridurre la dimensione caratteristica del provino di 13,25 volte pari alla riduzione di sezione totale effettiva delle barre laminate mostrato in tab.2, e allo stesso tempo ottenere una trasmissione termica ottimale per avere una distribuzione omogenea della temperatura, è stato utilizzato un provino parallelepipedo di dimensioni 20 x 35 x 55. Questa scelta ha portato però al primo limite di simulazione ovvero, con tale riduzione, lo spessore del provino risulta essere eccessivamente basso e non si riuscirebbe più ad analizzarlo a valle delle deformazioni. Per questo motivo si è scelto di ridurre la simulazione solo alle ultime 6 gabbie di laminazione. In tal modo si ottiene un provino deformato con uno spessore finale adeguato per essere analizzato.

In input al software bisogna fornire il valore della deformazione. E' importante sottolineare che, nella laminazione reale, la deformazione si riferisce alla sezione della barra di acciaio mentre, al simulatore, la deformazione si riferisce alla sola dimensione dello spessore del provino. Per cui è stato utilizzato il rapporto di riduzione della sezione calcolato per arrivare al valore della deformazione unidimensionale richiesta dal Gleeble per ogni "hit". Lo spessore iniziale del provino è quindi di 20 mm e con 6 deformazioni si arriva a ottenere uno spessore finale di circa 5 mm.

$$spessore_{i\ esimo} = \frac{spessore_{i-1}}{rrs_{i\ esimo}}$$

$$delta\ spessore_{i\ esimo} = spessore_{i-1} - spessore_{i\ esimo}$$

$$deformazione_{i\ esimo} = \frac{delta\ spessore_{i\ esimo}}{spessore_{i\ esimo}}$$

Con il valore della deformazione e del tempo di deformazione calcolato in tab.4 è possibile calcolare la velocità di deformazione:

$$velocità\ di\ deformazione_{i\ esima} = \frac{deformazione_{i\ esima}}{t_{i\ esimo}}$$

	s [mm]	delta s [mm]	deformazione	velocità di deformazione [1/s]
	20.00			
HIT 1 (GN4)	14.13	5.87	0.42	4.28
HIT 2 (GN5)	11.77	2.36	0.20	2.60
HIT 3 (GN6)	8.93	2.84	0.32	6.52
HIT 4 (GN7)	7.66	1.27	0.17	4.53
HIT 5 (G4)	6.55	1.11	0.17	7.31
HIT 6 (G5)	5.15	1.40	0.27	11.35

**Tab.10 – parametri di input al Gleeble**

Inoltre bisogna indicare la sequenza temporale dei riscaldamenti, raffreddamenti e deformazioni che si vogliono effettuare seguendo la cadenza temporale degli avvenimenti che avvengono realmente in reparto secondo le tabelle 6 e 7, nonché il ciclo termico che si vuole ottenere e altri parametri correttivi.

### **3.2.2 PREPARAZIONE DEL PROVINO**

Ciascun provino, prima della prova, deve essere carteggiato e pulito. Inoltre, nella zona di contatto incudine – provino, si devono mettere, in ordine partendo dal provino:

- uno strato di lubrificante a base di grafite;
- un foglio di grafite;
- un secondo strato di lubrificante a base di grafite;
- un foglio di tantalio.

Il lubrificante a base di grafite serve a tenere i fogli di grafite e tantalio incollati tra loro e con il provino. Il foglio di grafite aumenta e rende omogenea la conducibilità termo elettrica tra incudine

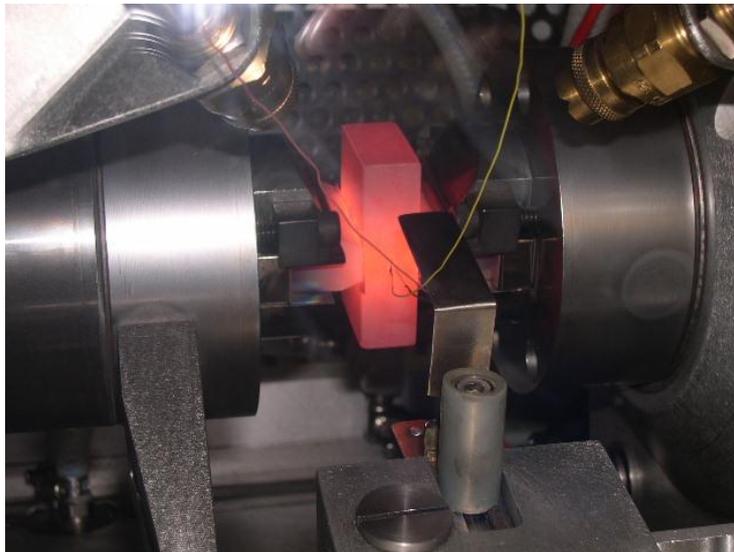
e provino. Il foglio di tantalio serve a proteggere le incudini le quali, altrimenti, si salderebbero insieme al provino rendendole inutilizzabili dopo la prova.

Successivamente bisogna saldare le termocoppie in Cromo – Alluminio sul provino in modo tale da avere un feedback di controllo sul ciclo termico che si vuole effettuare.

Il provino, infine, viene posizionato all'interno della camera dell'unità Hydrawedge del Gleeble.



**Fig.8 – provino e incudini prima e dopo la deformazione**



**Fig.9 – camera Hydrawedge del Gleeble durante la prova**

### 3.2.3 LE SIMULAZIONI FISICHE

Nel primo step di simulazioni sono state eseguite 15 prove valide. Ogni prova è stata effettuata con le stesse deformazioni, velocità di deformazioni e tempi ricavati dalla laminazione in reparto, approssimando riscaldamenti e raffreddamenti con andamenti lineari corrispondenti alle velocità medie della linea di laminazione. La variabile di queste simulazioni è il ciclo termico. Nelle simulazioni a ciclo termico modificato è stata abbassata la temperatura prima delle ultime due gabbie di laminazione, ovvero tra l'uscita del treno intermedio GN7 e l'entrata al treno finitore G4, dapprima a 930°C e poi a 830°C in modo tale da avvicinarsi alla temperatura di transizione austenite – ferrite di tali acciai. La restante parte del ciclo termico delle simulazioni resta invariata, quindi il riscaldamento e le prime 4 deformazioni.

- 3 prove C45 ciclo termico laminazione;
- 2 prove C45 ciclo termico modificato a 930°C;
- 2 prove C45 ciclo termico modificato a 830°C;
- 3 prove 42CrMoS4 ciclo termico laminazione;
- 3 prove 42CrMoS4 ciclo termico modificato a 930°C;
- 2 prove 42CrMoS4 ciclo termico modificato a 830°C.

A seguito i dettagli delle simulazioni effettuate. In verde i valori che cambieranno da simulazione a simulazione, mentre in bianco quelli che non varieranno. Nelle prime deformazioni è stato necessario allungare leggermente i tempi, tra una e l'altra, rispetto a quelli rilevati sulla linea (tab.8), per permettere al sistema di stabilizzare la temperatura e riportarsi a quelle impostata.

	spessore [mm]	delta spessore [mm]	def	tempo di def [s]	velocità di def [1/s]	T [°C]	tempo [s]
inizio	20	-	-	-	-	20	0
Riscaldamento	20	-	-	-	-	1058	353
HIT 1	14.13	5.87	0.42	0.097	4.28	1058	373
HIT 2	11.77	2.36	0.20	0.077	2.60	1052	383
HIT 3	8.93	2.84	0.32	0.049	6.52	1046	393
HIT 4	7.66	1.27	0.17	0.037	4.53	1040	403
HIT 5	6.55	1.11	0.17	0.023	7.31	1030	435
HIT 6	5.15	1.40	0.27	0.024	11.35	1030	443
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	1027	468
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	550	1128
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	20	inf

Tab.11 – simulazione a ciclo termico laminazione

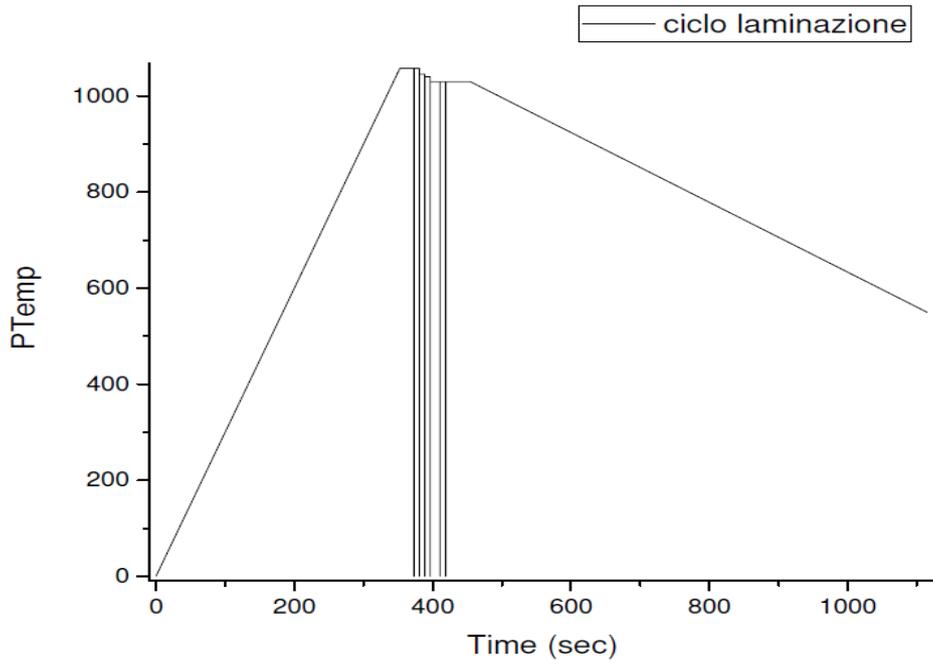
	spessore [mm]	delta spessore [mm]	def	tempo di def [s]	velocità di def [1/s]	T [°C]	tempo [s]
inizio	20	-	-	-	-	20	0
Riscaldamento	20	-	-	-	-	1058	353
HIT 1	14.13	5.87	0.42	0.097	4.28	1058	373
HIT 2	11.77	2.36	0.20	0.077	2.60	1052	383
HIT 3	8.93	2.84	0.32	0.049	6.52	1046	393
HIT 4	7.66	1.27	0.17	0.037	4.53	1040	403
HIT 5	6.55	1.11	0.17	0.023	7.31	930	435
HIT 6	5.15	1.40	0.27	0.024	11.35	930	443
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	930	468
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	550	1021
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	20	inf

**Tab.12 – simulazione a ciclo termico modificato 930°C**

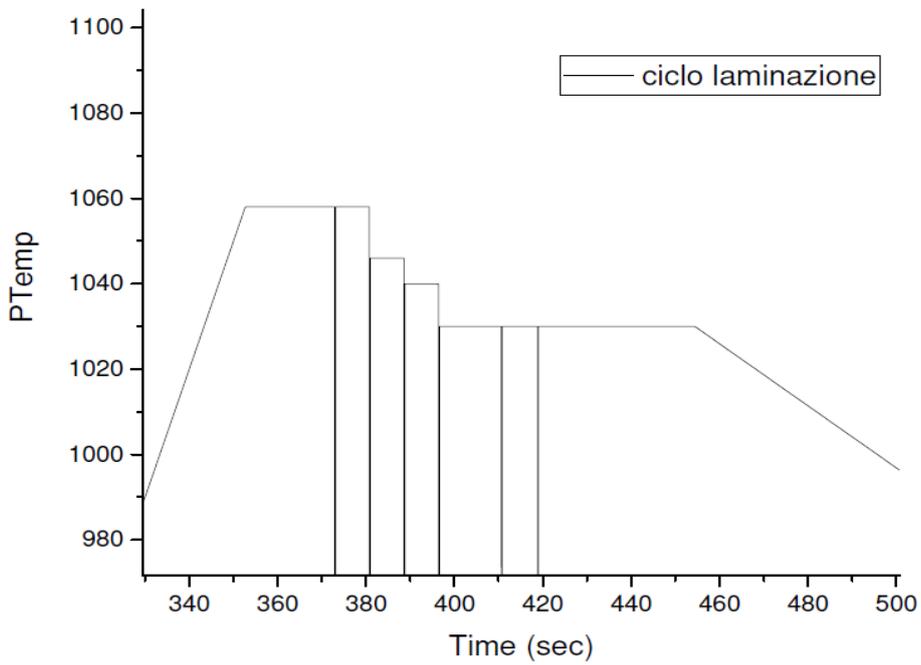
	spessore [mm]	delta spessore [mm]	def	tempo di def [s]	velocità di def [1/s]	T [°C]	tempo [s]
inizio	20	-	-	-	-	20	0
Riscaldamento	20	-	-	-	-	1058	353
HIT 1	14.13	5.87	0.42	0.097	4.28	1058	373
HIT 2	11.77	2.36	0.20	0.077	2.60	1052	383
HIT 3	8.93	2.84	0.32	0.049	6.52	1046	393
HIT 4	7.66	1.27	0.17	0.037	4.53	1040	403
HIT 5	6.55	1.11	0.17	0.023	7.31	830	435
HIT 6	5.15	1.40	0.27	0.024	11.35	830	443
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	830	468
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	550	853
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	20	inf

**Tab.13 – simulazione a ciclo termico modificato 830°C**

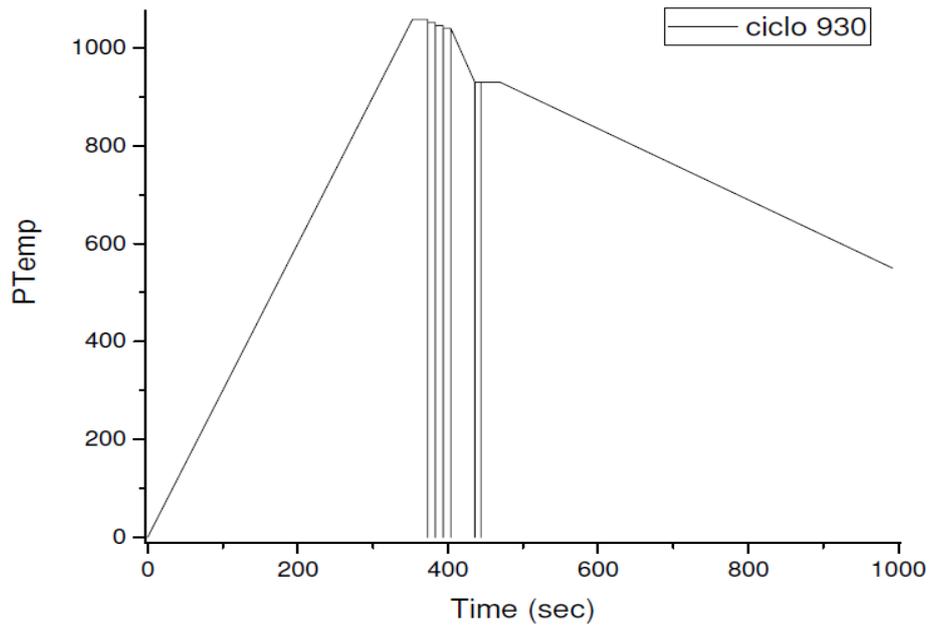
Dalle tabelle sopra riportate si può vedere come il raffreddamento, dalla temperatura di laminazione ai 930°C prima e agli 830°C poi, venga effettuato in 32 secondi e il raffreddamento post laminazione segua, dalla temperatura di uscita dell'ultima gabbia, una rampa di raffreddamento costante, per semplificare la programmazione della simulazione, ma che comunque si avvicina alla rampa di raffreddamento media reale in placca in reparto.



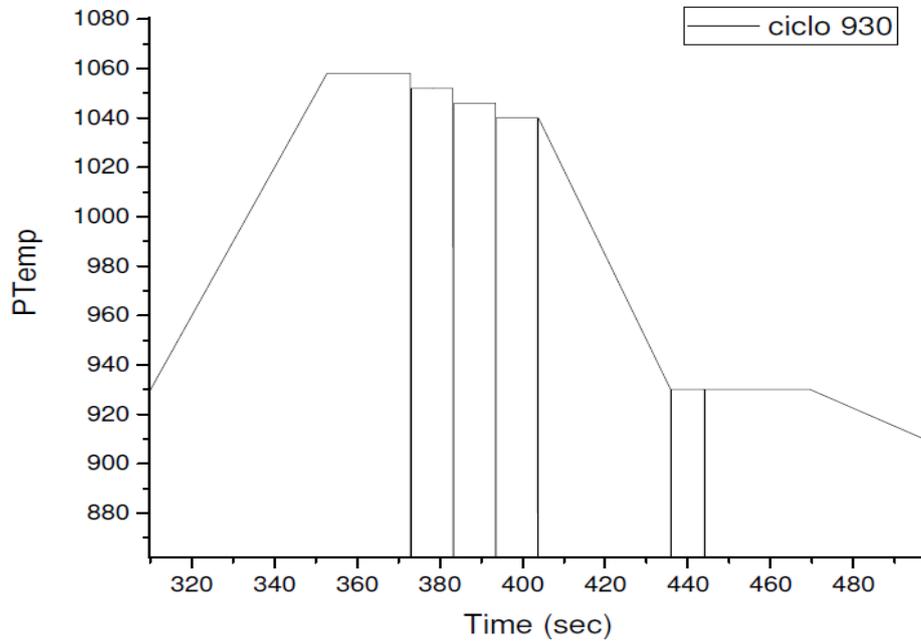
**Fig.10 – ciclo termico laminazione**



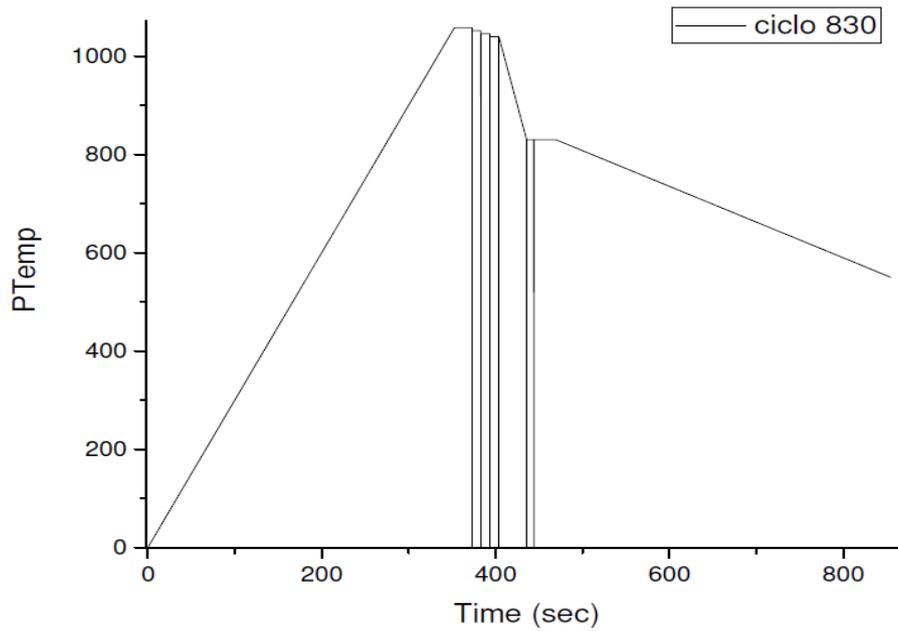
**Fig.11 – ciclo termico laminazione dettaglio**



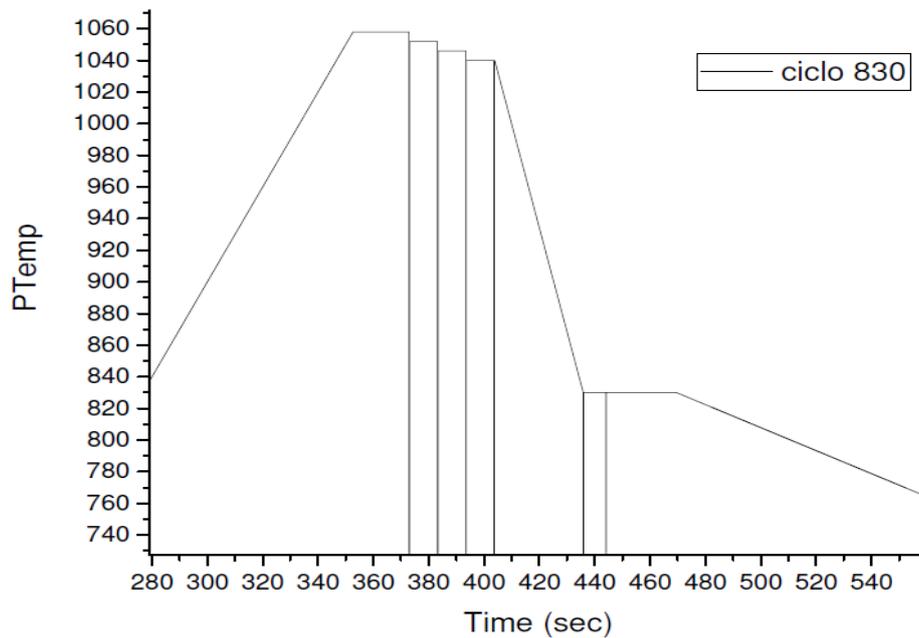
**Fig.12 – ciclo termico 930°C**



**Fig.13 – ciclo termico 930°C dettaglio**



**Fig.14 – ciclo termico 830°C**



**Fig.15 – ciclo termico 830°C dettaglio**

I grafici sopra riportati rappresentano gli andamenti delle temperature programmate per la simulazione. Le linee verticali sono cadute di temperatura programmate dal sistema dovute allo spegnimento del forno del Gleeble nel momento delle deformazioni, per cui indicano il momento in

cui è avvenuta la hit. I dati sono presenti solo fino a 550°C, cioè il momento del termine della simulazione.

Successivamente è stata effettuata una seconda campagna di simulazioni, sia per il C45 che per il 42CrMoS4, nella quale, partendo dal ciclo termico modificato a 830°C, si è aumentata la velocità di raffreddamento post deformazione. Dopo l'ultima deformazione, quindi, il materiale viene raffreddato rapidamente in circa 6 secondi, dalla temperatura di 830°C, attraverso aria e acqua. Il tempo di raffreddamento è dettato dal tempo che impiega una barra in laminazione a raggiungere l'ingresso della placca una volta uscita dal finitore. Diverso è invece il tempo di 25 secondi, prima indicato tra finitore e placca, che rappresenta il tempo impiegato dalla barra a posizionarsi ferma in placca. Si sono cercate di raggiungere, con il raffreddamento, le temperature di 600°C e di 500°C. Dopo di che il raffreddamento fino a temperatura ambiente è stato lasciato libero in aria all'interno della camera Gleeble. Le prove valide effettuate sono state:

- 1 prova C45 quench a 600°C;
- 1 prova C45 quench a 500°C;
- 1 prova 42CrMoS4 quench a 600°C;
- 1 prova 42CrMoS4 quench a 500°C.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i dettagli delle simulazioni.

	spessore [mm]	delta spessore [mm]	def	tempo di def [s]	velocità di def [1/s]	T [°C]	tempo [s]
inizio	20	-	-	-	-	20	0
Riscaldamento	20	-	-	-	-	1058	353
HIT 1	14.13	5.87	0.42	0.097	4.28	1058	373
HIT 2	11.77	2.36	0.20	0.077	2.60	1052	383
HIT 3	8.93	2.84	0.32	0.049	6.52	1046	393
HIT 4	7.66	1.27	0.17	0.037	4.53	1040	403
HIT 5	6.55	1.11	0.17	0.023	7.31	830	435
HIT 6	5.15	1.40	0.27	0.024	11.35	830	443
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	600	449
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	20	inf

**Tab.14 – simulazione a ciclo termico modificato 830°C più quench a 600°C**

	spessore [mm]	delta spessore [mm]	def	tempo di def [s]	velocità di def [1/s]	T [°C]	tempo [s]
inizio	20	-	-	-	-	20	0
Riscaldamento	20	-	-	-	-	1058	353
HIT 1	14.13	5.87	0.42	0.097	4.28	1058	373
HIT 2	11.77	2.36	0.20	0.077	2.60	1052	383
HIT 3	8.93	2.84	0.32	0.049	6.52	1046	393
HIT 4	7.66	1.27	0.17	0.037	4.53	1040	403
HIT 5	6.55	1.11	0.17	0.023	7.31	830	435
HIT 6	5.15	1.40	0.27	0.024	11.35	830	443
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	500	449
Raffreddamento	5.15	-	-	-	-	20	inf

Tab.15 – simulazione a ciclo termico modificato 830°C più quench a 500°C

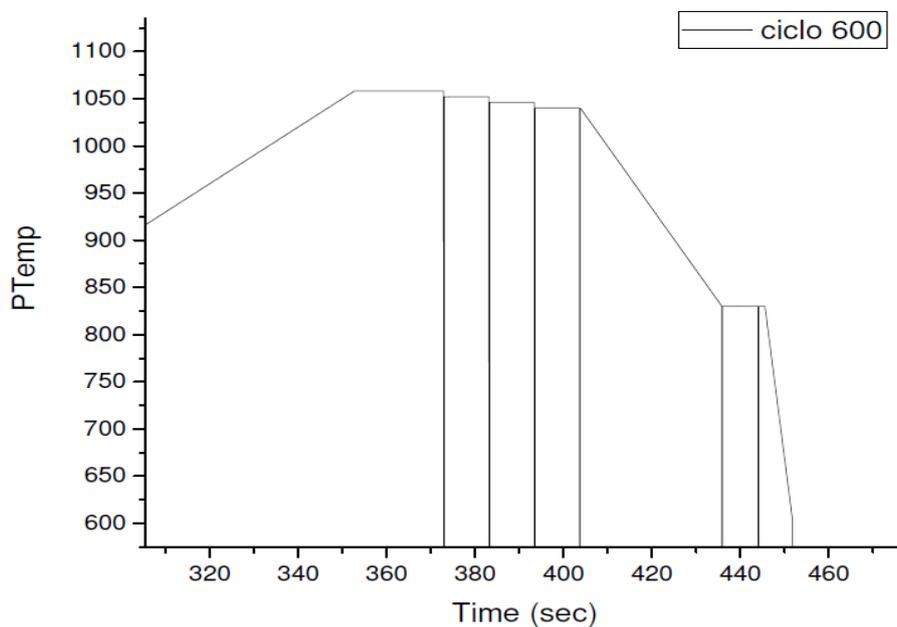
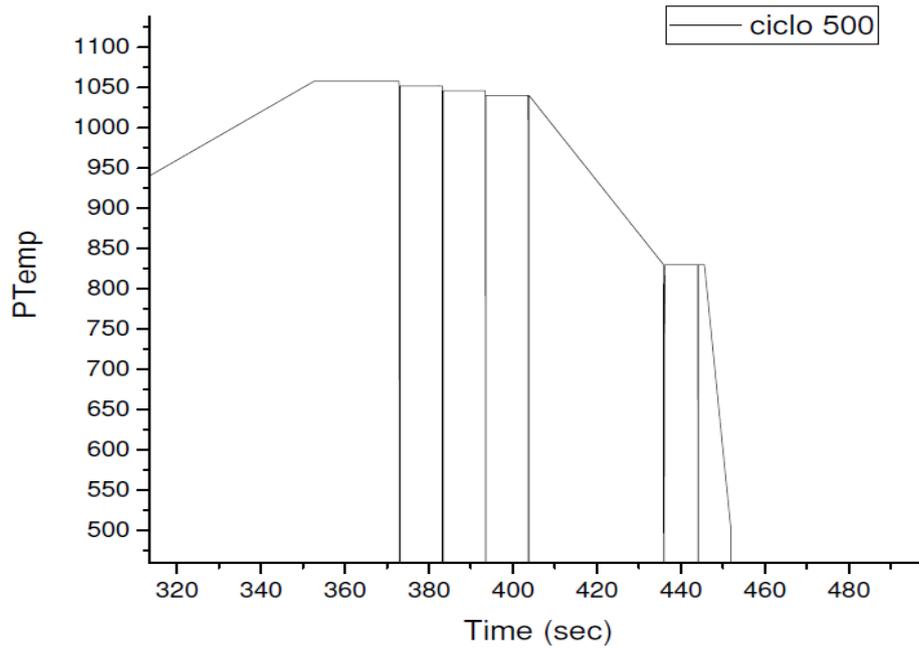
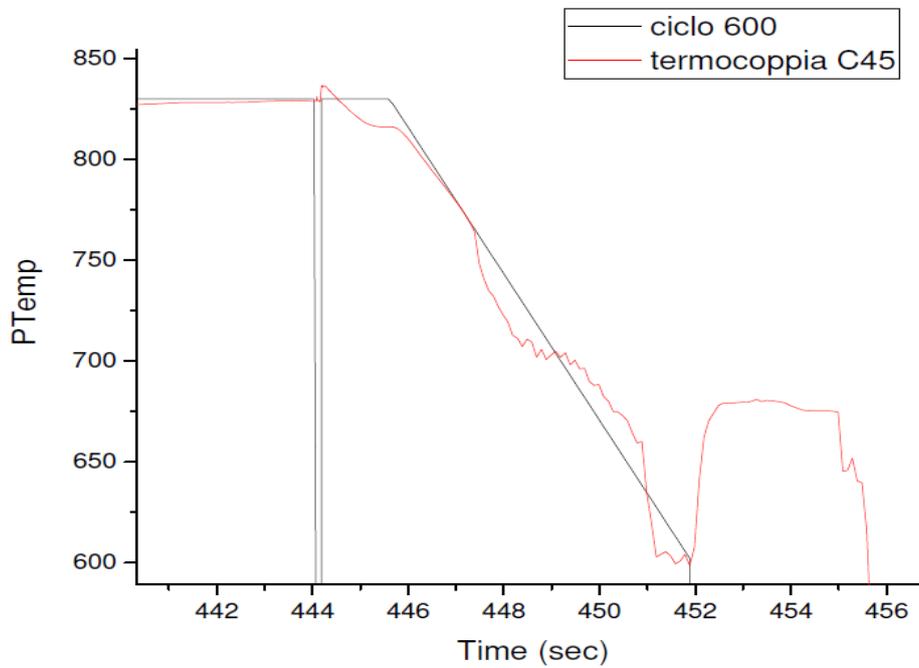


Fig.16 – ciclo termico 830°C più quench a 600°C dettaglio

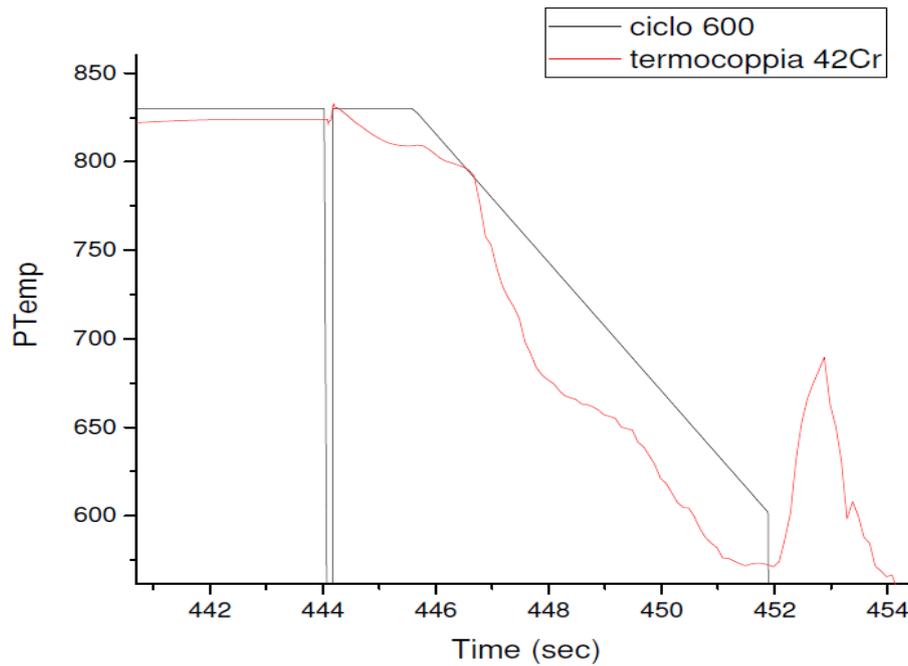


**Fig.17 – ciclo termico 830°C più quench a 500°C dettaglio**

Di seguito i risultati termici ottenuti:

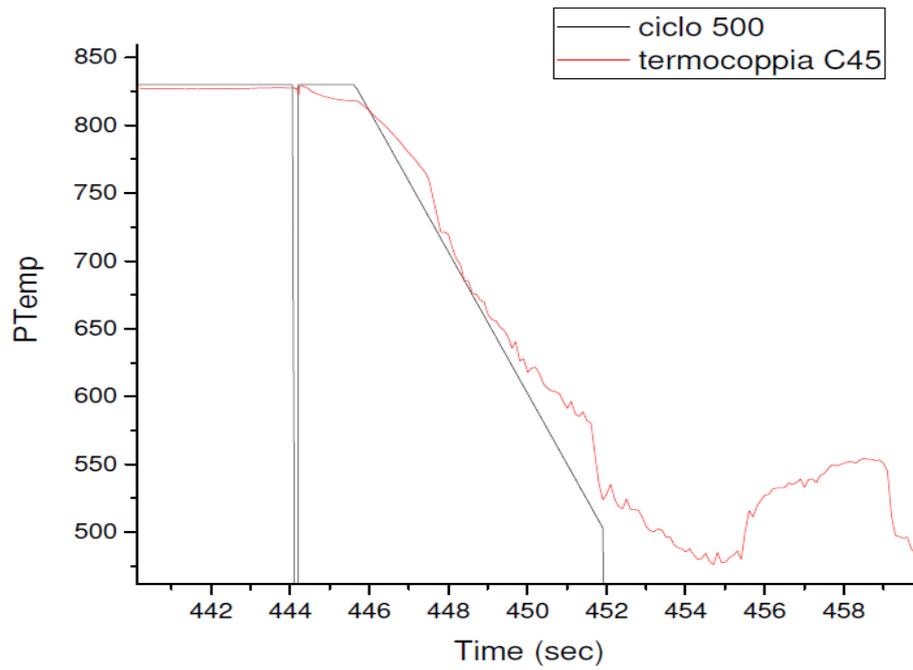


**Fig.18 – ciclo termico 830°C più quench a 600°C dettaglio con termocoppia del C45**

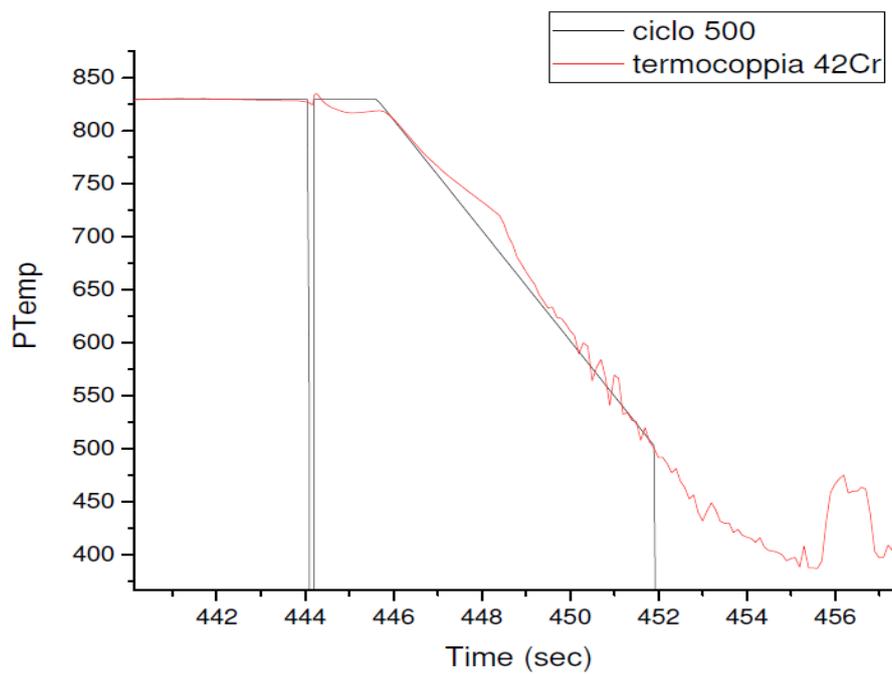


**Fig.19 – ciclo termico 830°C più quench a 600°C dettaglio con termocoppia del 42CrMoS4**

Per entrambi i materiali è stato raggiunto in maniera accettabile l'obiettivo di raffreddamento a 600°C in 6 secondi con una velocità di 36°C/s. In particolare per il C45 si è raggiunta l'esatta temperatura impostata mentre per il 42CrMoS4 si sono raggiunti i 575°C. Si nota un rapido aumento della temperatura subito dopo il termine del raffreddamento, ma questa è una naturale conseguenza del rilascio termico dal cuore del materiale, più caldo, verso l'esterno più freddo.



**Fig.20 – ciclo termico 830°C più quench a 500°C dettaglio con termocoppia del C45**



**Fig.21 – ciclo termico 830°C più quench a 500°C dettaglio con termocoppia del 42CrMoS4**

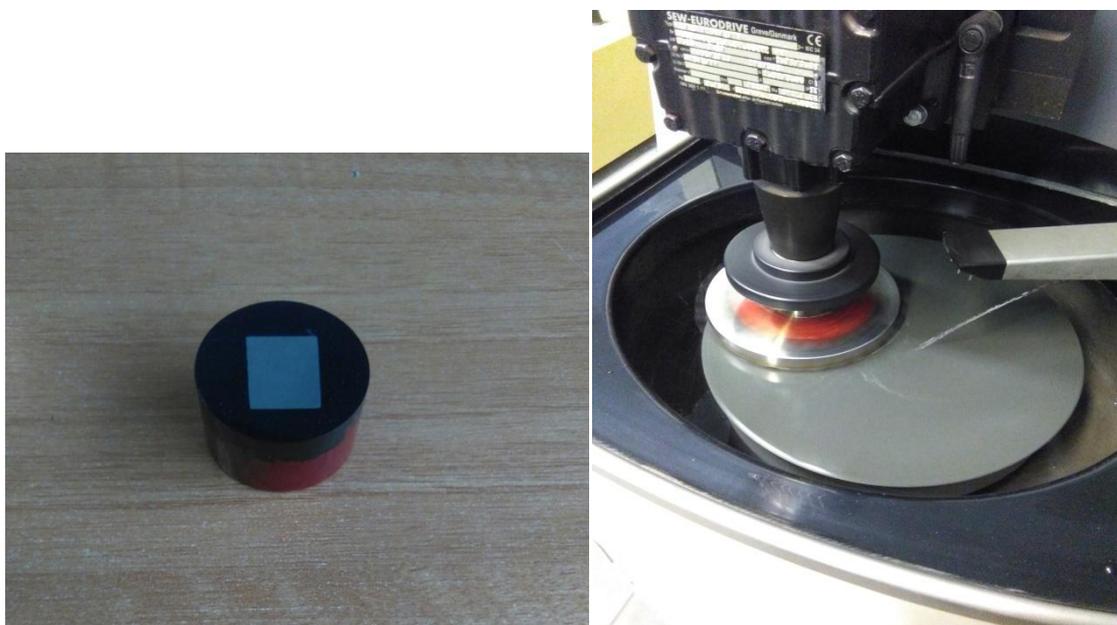
Anche nel caso del raffreddamento a 500°C in 6 secondi con una velocità di 52°C/s si è raggiunto ragionevolmente l'obiettivo per entrambi i materiali. In questo caso, data l'elevata velocità di raffreddamento, dopo aver raggiunto i 500°C, a causa dell'inerzia termica, il materiale ha continuato a raffreddarsi per ancora 3 secondi circa raggiungendo i 475°C, per il C45, e i 400°C per il 42CrMoS4. Dopo di ch , come nel caso precedente, la temperatura si   innalzata a causa del calore espulso dal cuore del materiale.

### ***3.2.4 LA BONIFICA DEI PROVINI***

Al fine di confrontare i risultati ottenuti dalle simulazioni si   deciso di bonificare i due acciai in esame. Per cui dalle barre laminate in reparto sono stati prelevati due provini, ciascuno di forma parallelepipedo di dimensioni 20 x 35 x 55, uno di C45 e uno di 42CrMoS4, i quali hanno subito il trattamento termico della bonifica secondo le rispettive normative UNI EN 10083-2 "Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati" e UNI EN 10083-3 "Condizioni tecniche di fornitura di acciai legati". Entrambi sono stati quindi riscaldati in campo austenitico per 30 minuti alla temperatura di 850°C per poi essere temprati in olio ed infine rinvenuti per 60 minuti alla temperatura di 610°C. I due acciai bonificati sono stati quindi analizzati come gli altri in modo da avere un "target" di riferimento.

## 4. ***RISULTATI E DISCUSSIONI***

A valle della simulazione al Gleeble i provini deformati sono stati tagliati per essere analizzati al microscopio ottico. Per ogni tipologia di prova e materiale sono stati ricavati i tagli longitudinali e trasversali alla direzione di deformazione e analoghi tagli per i due acciai laminati in reparto. I campioni sono stati inglobati con apposita resina e lucidati a specchio con un ciclo di lucidatura a 7 passate di carta abrasiva a grana sempre più fine e con lubrificazione adeguata. Infine i campioni sono stati sottoposti ad attacco con la soluzione “Nital” la quale, corrodendo i bordi grano del materiale, rende evidente la microstruttura dell'acciaio.



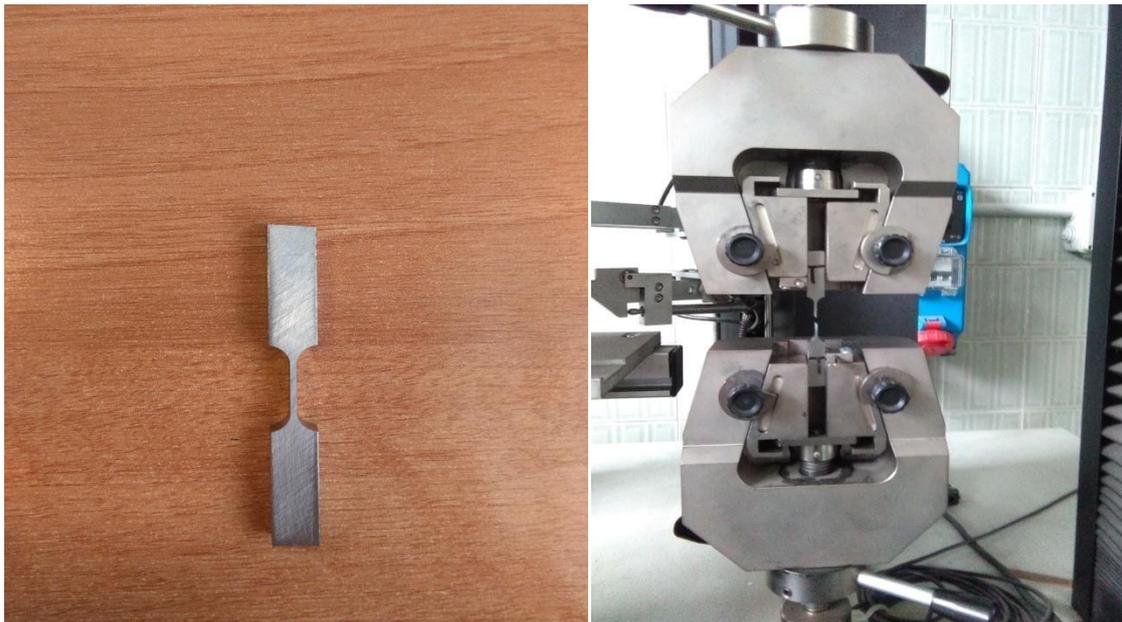
**Fig.22 – campione inglobato per le micro a sx e campioni in lucidatura a dx**

Parallelamente alle micrografie, i provini sono stati tagliati mediante una fresa a controllo numerico ottenendo così i campioni per la prova di trazione al macchinario “Sun 1000”. I campioni sono a “osso di cane” con zona utile a sezione rettangolare 1 x 6 mm e 1 x 5 mm. Le dimensioni della sezione sono state scelte ipotizzando una tensione di rottura e sapendo che la macchina di trazione può arrivare a 1000 Kgf di carico. Dato che il campione da noi realizzato, partendo dal provino Gleeble, non è un campione normalmente utilizzato dalle classiche prove di trazioni che vengono eseguite in stabilimento abbiamo, prima di tutto, confrontato i risultati delle trazioni eseguite sui campioni per il Sun 1000 con quelli delle trazioni eseguite sui campioni a “osso di cane” diametro 10 mm, di C45 e 42CrMoS4, sia per il laminato che per il laminato e bonificato.

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
C45 LAMINATO PROVINO DIAMETRO 10 mm	370	647	25.7
C45 LAMINATO PROVINO PIATTO 6 x 1 mm	343	656	30.5
C45 BONIFICATO PROVINO DIAMETRO 10 mm	515	735	25
C45 BONIFICATO PROVINO PIATTO 6 x 1 mm	503	768	27.5
42CrMoS4 LAMINATO PROVINO DIAMETRO 10 mm	716	980	11.9
42CrMoS4 LAMINATO PROVINO PIATTO 6 x 1 mm	756	1023	17
42CrMoS4 BONIFICATO PROVINO DIAMETRO 10 mm	948	1105	13.5
42CrMoS4 BONIFICATO PROVINO PIATTO 6 x 1 mm	979	1104	18.5

**Tab.16 – confronto trazioni provini normati con provini Sun 1000**

Dalla tabella si può vedere che i valori confrontati restano all'interno di una variazione massima del 7,3% per lo snervamento e del 4,5% per la rottura, per cui si ritengono attendibili i risultati delle trazioni con i provini ricavati per il Sun 1000. In tutte le prove di trazione l'allungamento è stato misurato con un estensimetro fin dopo lo snervamento del materiale e attraverso lo spostamento della traversa in campo plastico fino a rottura.



**Fig.23 – campione per la prova di trazione a sx e macchina di trazione “Sun 1000” a dx**

## ***4.1 ACCIAIO C45***

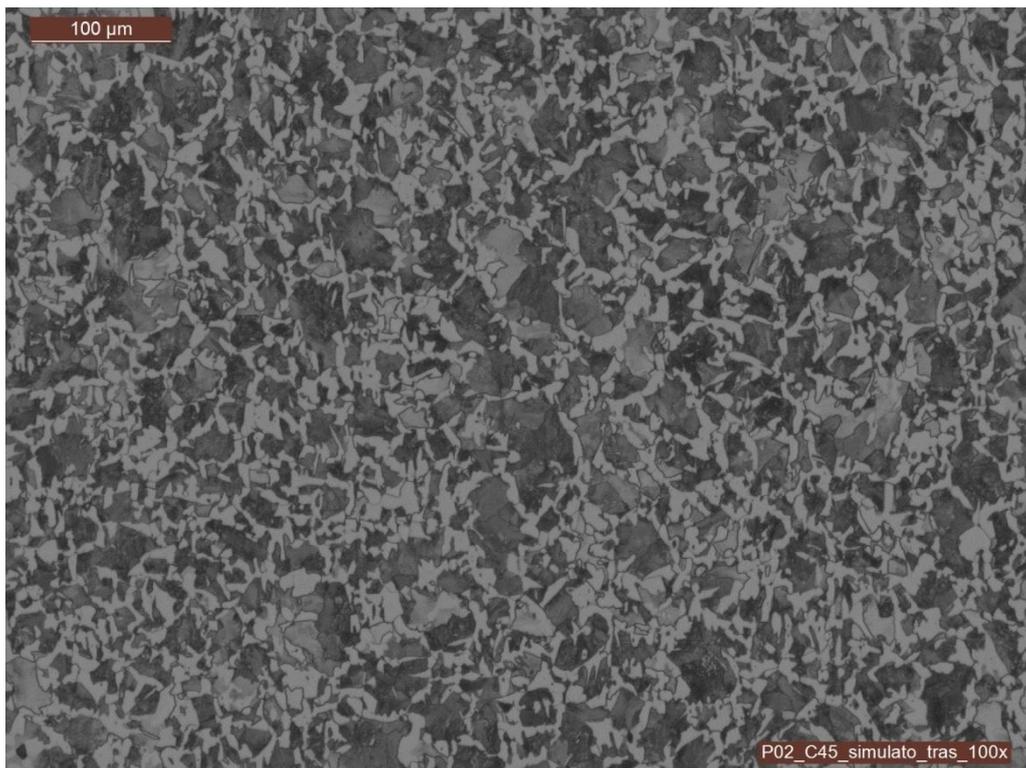
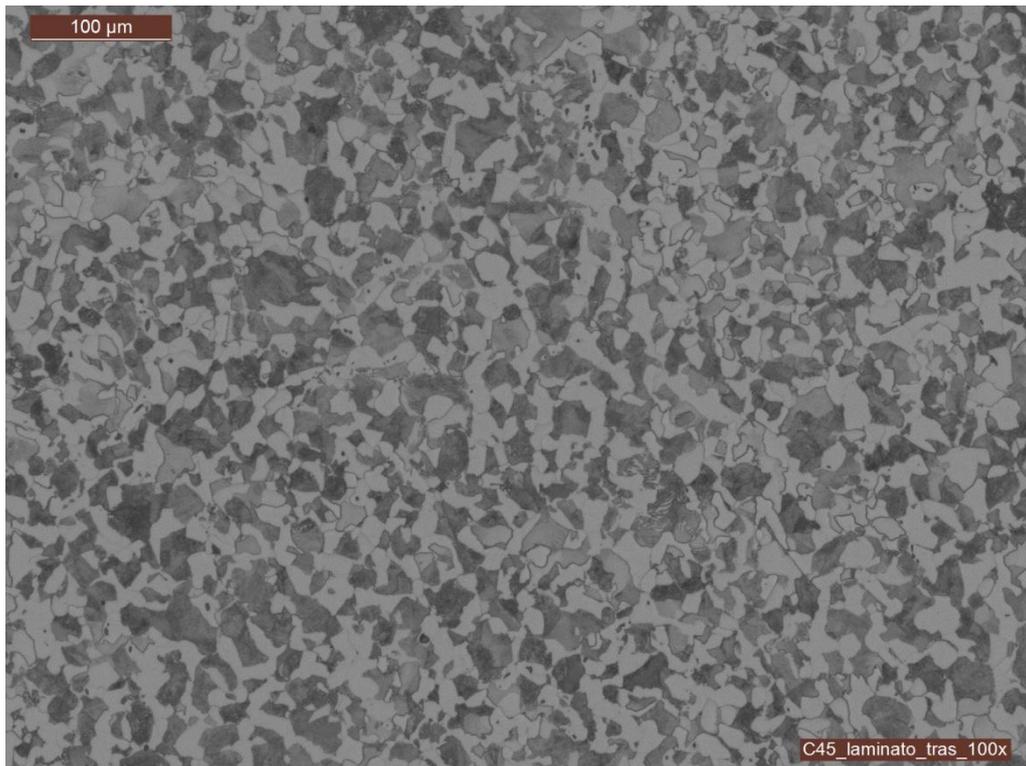
In allegato A verranno esposte tutte le micrografie ottenute per il C45 per ogni campione a diversi ingrandimenti: 100x e 500x.

In allegato B verranno esposte tutte le curve tensione allungamento ricavate per il C45 dalle prove di trazione.

Per una più chiara esposizione, nel seguito, verranno invece esposte alcune micrografie e curve tensione allungamento considerate esemplificative per l'analisi dei risultati ottenuti.

### ***4.1.1 ACCIAIO C45 – SIMULAZIONE DELLA LAMINAZIONE***

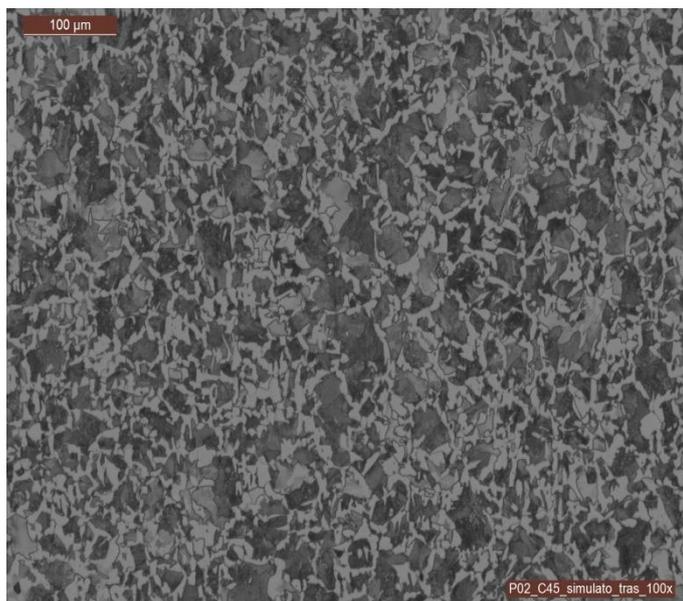
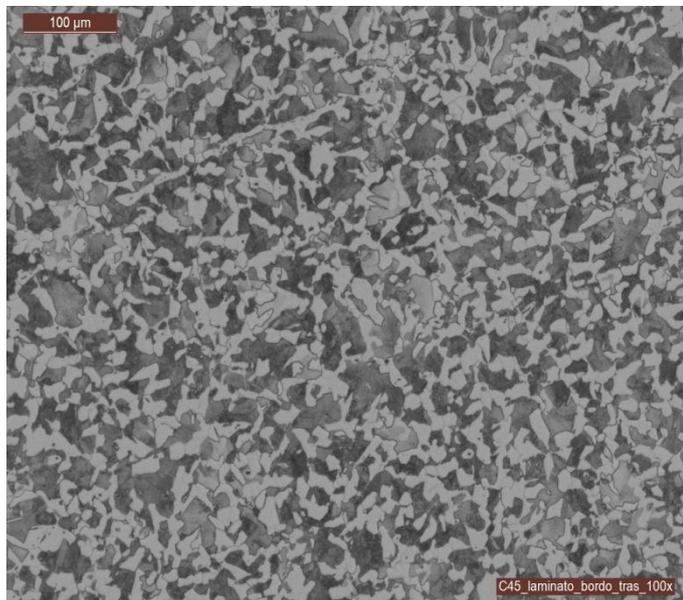
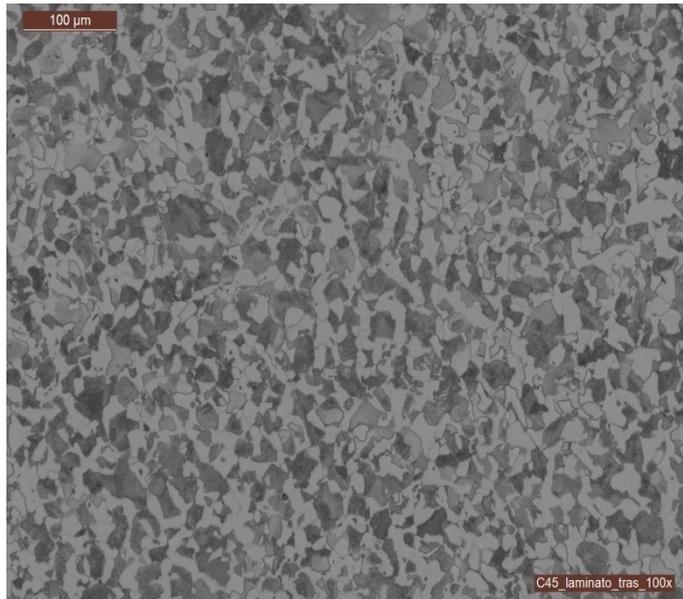
La figura 24 in alto mostra la micrografia del C45 laminato in reparto mentre quella in basso mostra la micrografia del provino di C45 che ha subito la simulazione di laminazione al Gleeble.



**Fig.24 – C45 trasversale 100x – confronto laminato con simulato**

Le fasi presenti in entrambe le micro sono ferrite e perlite. Ci si aspetta, dato il tentativo di simulazione del processo di laminazione, uguale microstruttura. Si nota invece, nel C45 simulato, la presenza maggiore di perlite e minore dimensione del grano. Questo si può giustificare in diversi modi:

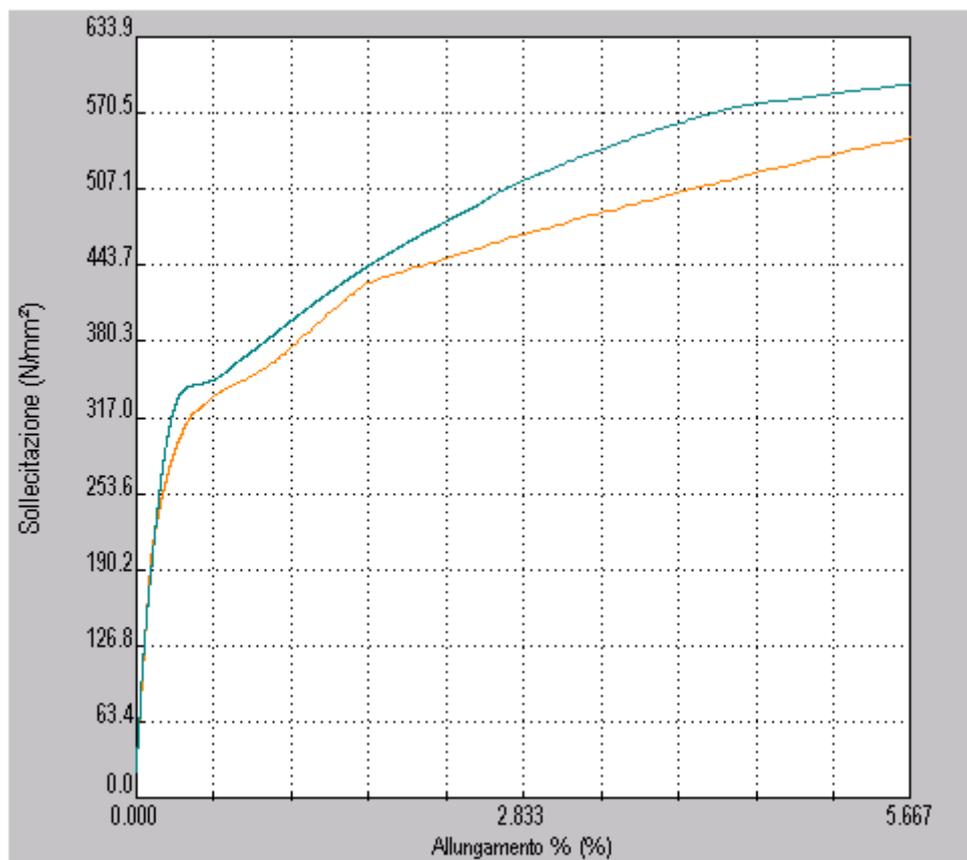
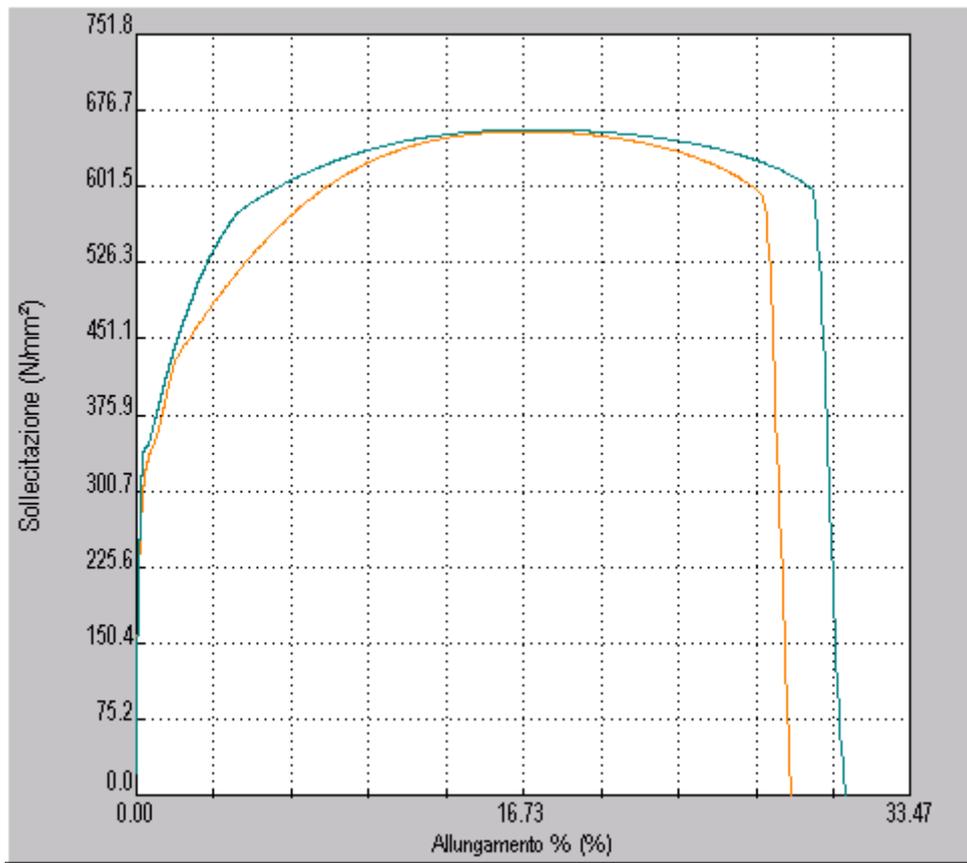
- il provino utilizzato al Gleeble ha dimensioni ridotte rispetto alla barra in laminazione, per cui sarà interessato da un raffreddamento più rapido rispetto all'interno della barra di acciaio che si raffredda in reparto dalla quale è stato ricavato il campione analizzato. Il ciclo di raffreddamento imposto al provino infatti, corrisponde al ciclo di raffreddamento della pelle della barra in reparto ricavato con il pirometro ottico. Per la precisione il campione dal laminato è stato ricavato da una barre di 50 mm di diametro a una profondità di 10 mm evitando il bordo, dove si trovano i difetti di laminazione e le inclusioni, e il cuore, dove vengono segregate le impurezze essendo l'ultima parte del materiale a solidificarsi. A conferma di questa ipotesi abbiamo analizzato la micrografia di un campione di C45 laminato prelevato dal bordo della barra. Le immagini seguenti mostrano come, tra l'interno del laminato e la pelle del laminato ci sia differenza. Il grano del materiale al bordo è maggiormente orientato rispetto a quello del materiale all'interno, ciò ovviamente perché la pelle della barra risente maggiormente della deformazione plastica lungo una sola direzione. Questo comporta che la micro al bordo si avvicini di più alla micro del simulato ma solo dal punto di vista della forma del grano. Il fatto che a bordo barra non sia evidente un aumento della perlite rispetto al centro potrebbe essere giustificato, a sua volta, pensando che le barre, dopo essere state laminate e cesoiate, sono raggruppate in fasci e stoccate in magazzino l'una vicino all'altra. In questa situazione permangono per delle ore a temperature elevate. Questo potrebbe significare che il materiale abbia un certo rinvenimento e questo porta a un accrescimento del grano e a una omogeneizzazione generale della struttura per diffusione. Per cui la micro al bordo risulta essere comunque simile a quella a cuore. Ciò non accade al provino Gleeble il quale, sicuramente, a basse temperature segue un raffreddamento nettamente più veloce: si parla di minuti e non di ore;



**Fig.25 – C45 trasversale 100x – confronto laminato, laminato al bordo e simulato**

- la temperatura misurata dal pirometro ottico all'uscita delle gabbie di laminazione si riferisce alla barra già laminata, quindi qualche istante dopo la reale deformazione, per cui, l'effettiva temperatura di laminazione, dovrebbe essere più alta. Quindi le deformazioni simulate al Gleeble potrebbero essere a temperature inferiori rispetto alle reali e questo giustificerebbe una diminuzione delle dimensioni del grano austenitico. Tuttavia c'è da dire che, durante le deformazioni al Gleeble, nell'esatto momento in cui si sta svolgendo la deformazione plastica, la temperatura rilevata dalle termocoppie sul materiale sale. L'innalzamento della temperatura è dovuto ovviamente all'energia di deformazione plastica: è noto infatti che circa il 90% dell'energia di deformazione plastica venga dissipata in calore e, dato che le deformazioni in gioco sono molto rapide, tale calore non viene evacuato all'esterno del materiale ma ne rimane all'interno comportando l'aumento della temperatura. Per cui si può approssimare che l'innalzamento della temperatura del provino durante la deformazione sia lo stesso che subisce la barra all'interno della gabbia di laminazione e che quindi questa ipotesi non sia rilevante nel giustificare la differenza di grandezza del grano;
- per ragioni pratiche, come già detto, non sono state effettuate le 11 deformazioni che si eseguono in reparto ma solo le ultime 6 deformazioni, per cui le condizioni di prova si differenziano dalle reali anche sotto questo aspetto. Questo potrebbe significare che nella realtà, eseguendo più deformazioni, il materiale è mantenuto più tempo alla temperatura di austenitizzazione, per cui, ha a disposizione più tempo per far crescere il grano austenitico rispetto al provino simulato con meno deformazioni e quindi con meno tempo passato ad alta temperatura.
- inoltre i tempi tra una deformazione e l'altra, nelle simulazioni, sono stati leggermente modificati.

Si conclude che, la differenza nelle micro del C45 tra laminato e simulato è conseguenza dei naturali limiti della simulazione. Tuttavia, tali differenze sono minime e quindi si può, in modo abbastanza ragionevole essere soddisfatti dei risultati della simulazione per quanto riguarda il C45. Tutto ciò viene confermato dalle curve tensione allungamento delle trazioni riportate in seguito.



**Fig.26 – trazione C45 laminato (blu) e simulato (arancione) – dettaglio in basso**

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
C45 LAMINATO	343	656	30.5
C45 SIMULATO	312	655	28.3

Tab.17 – caratteristiche meccaniche C45 laminato e simulato

La differenza è del 9% per lo snervamento mentre praticamente nulla sulla rottura e del 7,2% sull'allungamento a rottura. Il risultato è quindi da considerarsi accettabile.

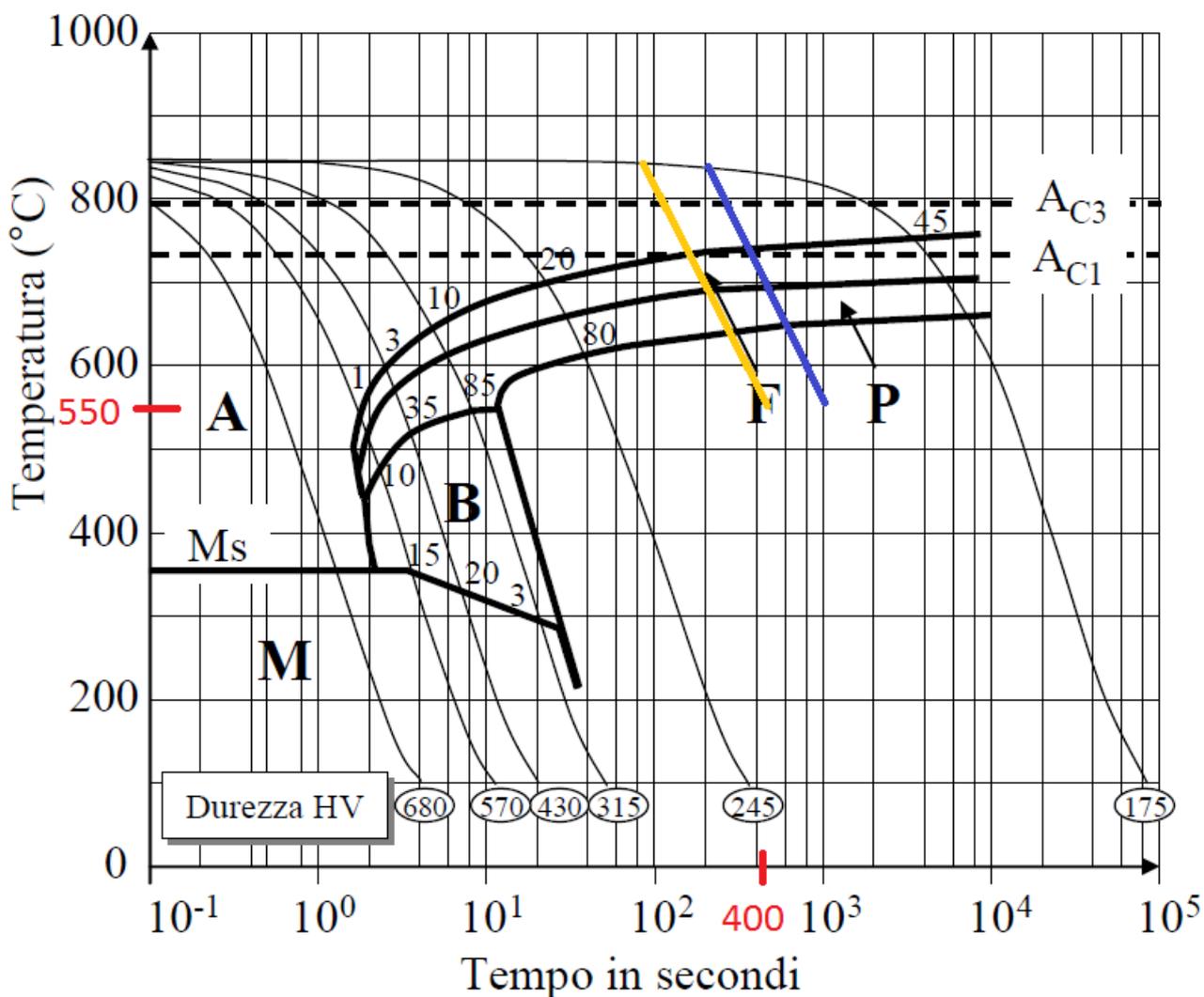


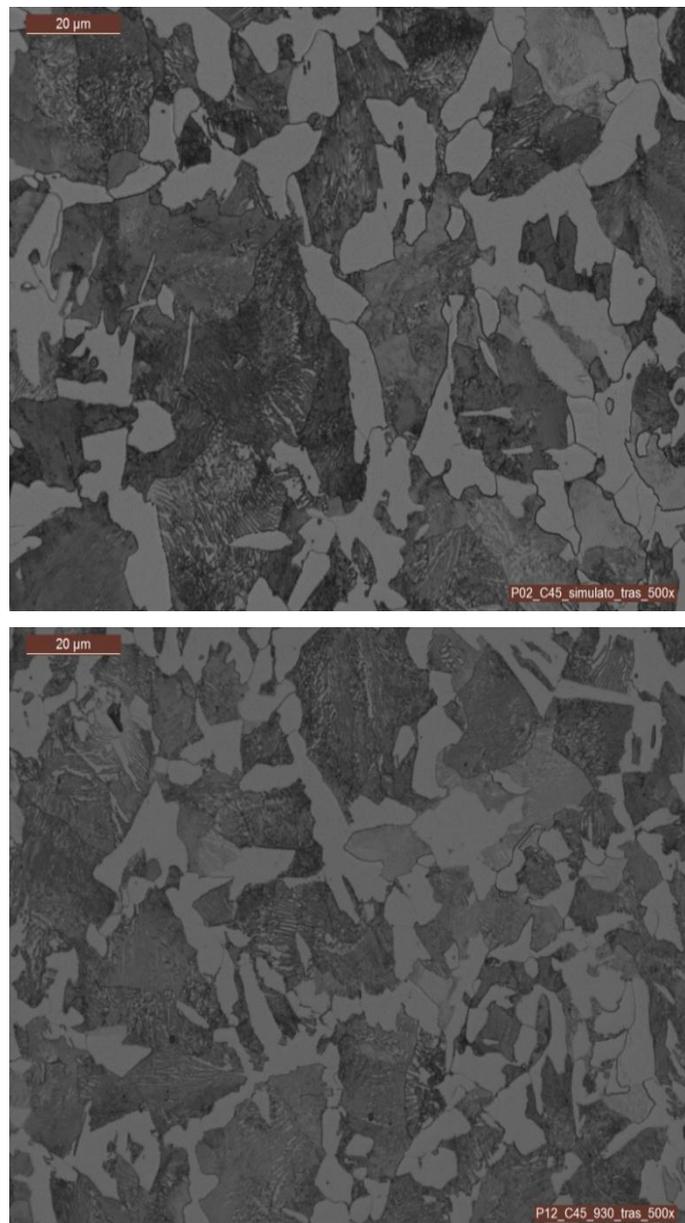
Fig.27 – CCT C45 e curve di raffreddamento approssimate del laminato (blu) e del simulato (arancione)

Nel diagramma CCT del C45, Fig.27, sono riportate in modo approssimato le possibili curve di raffreddamento seguite dal simulato (arancione) e dal laminato (blu). La temperatura di 550°C è la temperatura di fine simulazione mentre 400 secondi è il tempo necessario per passare dagli 850°C ai 550°C durante il raffreddamento. La curva del simulato segue fedelmente quella imposta durante la simulazione ovvero un raffreddamento fino a 550°C a 0,72°C/s. In accordo con la

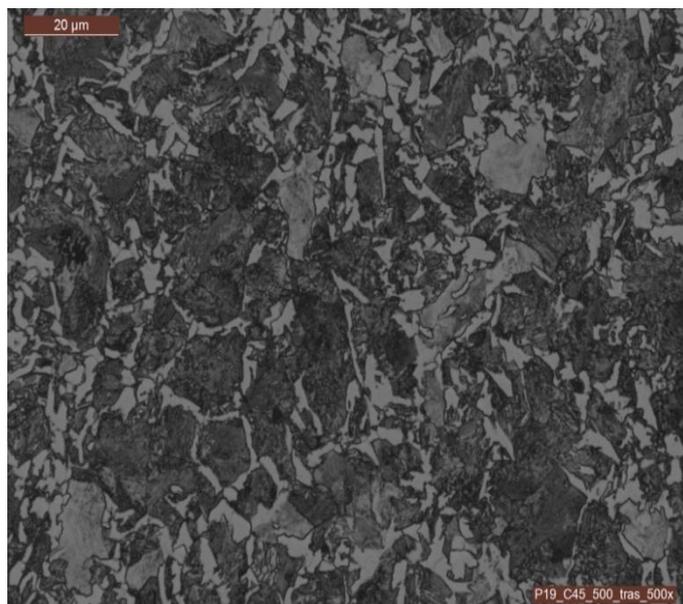
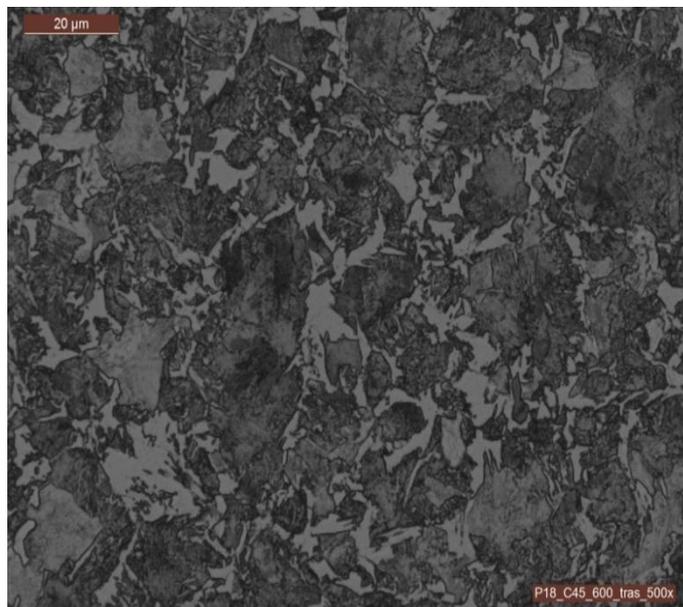
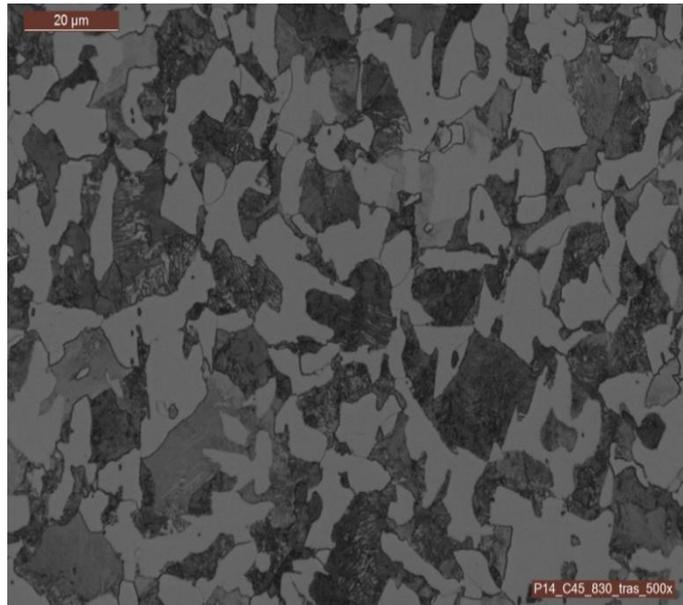
microstruttura ferritica perlitica. La curva del laminato, è stata ipotizzata leggermente più a destra, in accordo con il fatto che il cuore della barra raffredda più lentamente rispetto al bordo e quindi più lentamente rispetto al simulato. Ciò giustifica una maggiore presenza di ferrite a discapito della perlite nella microstruttura. Al di sotto dei 550°C il raffreddamento è libero, come già detto, e sarà più veloce per il simulato e più lento per la barra. La zona del CCT interessata da entrambe le curve resta tuttavia la stessa, in accordo con le simili caratteristiche meccaniche.

## **4.1.2 ACCIAIO C45 – SIMULAZIONE CON RAFFREDDAMENTO ACCELERATO**

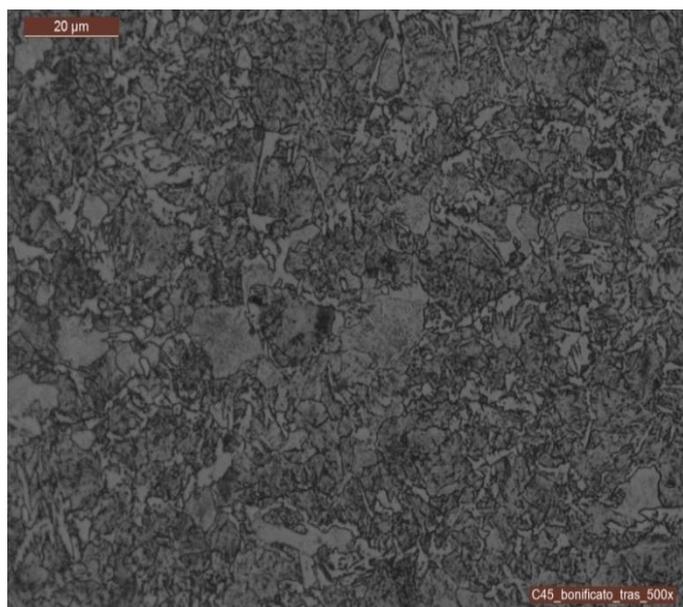
In figura 28 a-b-c dall'alto si vedono: la micrografia del provino C45 con laminazione simulata al Gleeble, la micrografia del provino C45 simulato con ciclo termico modificato a 930°C, la micrografia del provino C45 simulato con ciclo termico modificato a 830°C, la micrografia del provino C45 simulato con ciclo termico modificato a 830°C più quench a 600°C, la micrografia del provino C45 simulato con ciclo termico modificato a 830°C più quench a 500°C e la micrografia del C45 bonificato in laboratorio.



**Fig.28 a – C45 trasversale 500x – simulato e ciclo 930°C**



**Fig.28 b – C45 trasversale 500x –ciclo 830°C,600°C e 500°C**



**Fig.28 c – C45 trasversale 500x – bonificato**

Nelle prime tre micrografie, ovvero Fig. 28a e la prima immagine della Fig. 28b, le fasi presenti sono ferrite e perlite. Si nota come, abbassando la temperatura di laminazione, la dimensione del grano si riduce, poco a 930°C fino a quasi dimezzarsi a 830° e inoltre si ha un aumento della ferrite primaria. Questo è un risultato atteso in quanto, raffreddando in campo austenitico da 1030°C fino a 830°C e deformando quindi a temperatura minore, la dimensione del grano austenitico diminuisce, aumentano di conseguenza i bordi di grano i quali sono punti di nucleazione per la ferrite primaria a raffreddamento in campo bifasico ferrite austenite. La zona interessata del CCT fino a 550°C non cambia rispetto al simulato normale in quanto la velocità di raffreddamento al di sotto di Ac<sub>3</sub> non cambia, si veda Fig.27. Ciò che cambia è il raffreddamento incontrollato sotto i 550°C: facendo partire il raffreddamento da una temperatura più bassa una volta al di sotto dei 550°C, ovvero quando il raffreddamento non è più controllato dal Gleeble, sarà più veloce rispetto al simulato normale. Questo fatto si può spiegare pensando che oltre al provino anche le incudini partono da una temperatura più bassa per cui, a raffreddamento incontrollato, assorbiranno calore più velocemente. Ciò, in realtà, non ha importanza perché in questo caso la trasformazione della perlite e della ferrite si conclude a temperature più elevate della zona incontrollata. L'aumento della resistenza meccanica e della durezza è da attribuirsi quindi alla minor dimensione del grano.

Per capire cosa succede nella quarta e quinta micro, ovvero nei cicli simulati con quench a 600°C e 500°C, si devono individuare le curve di raffreddamento sul CCT.

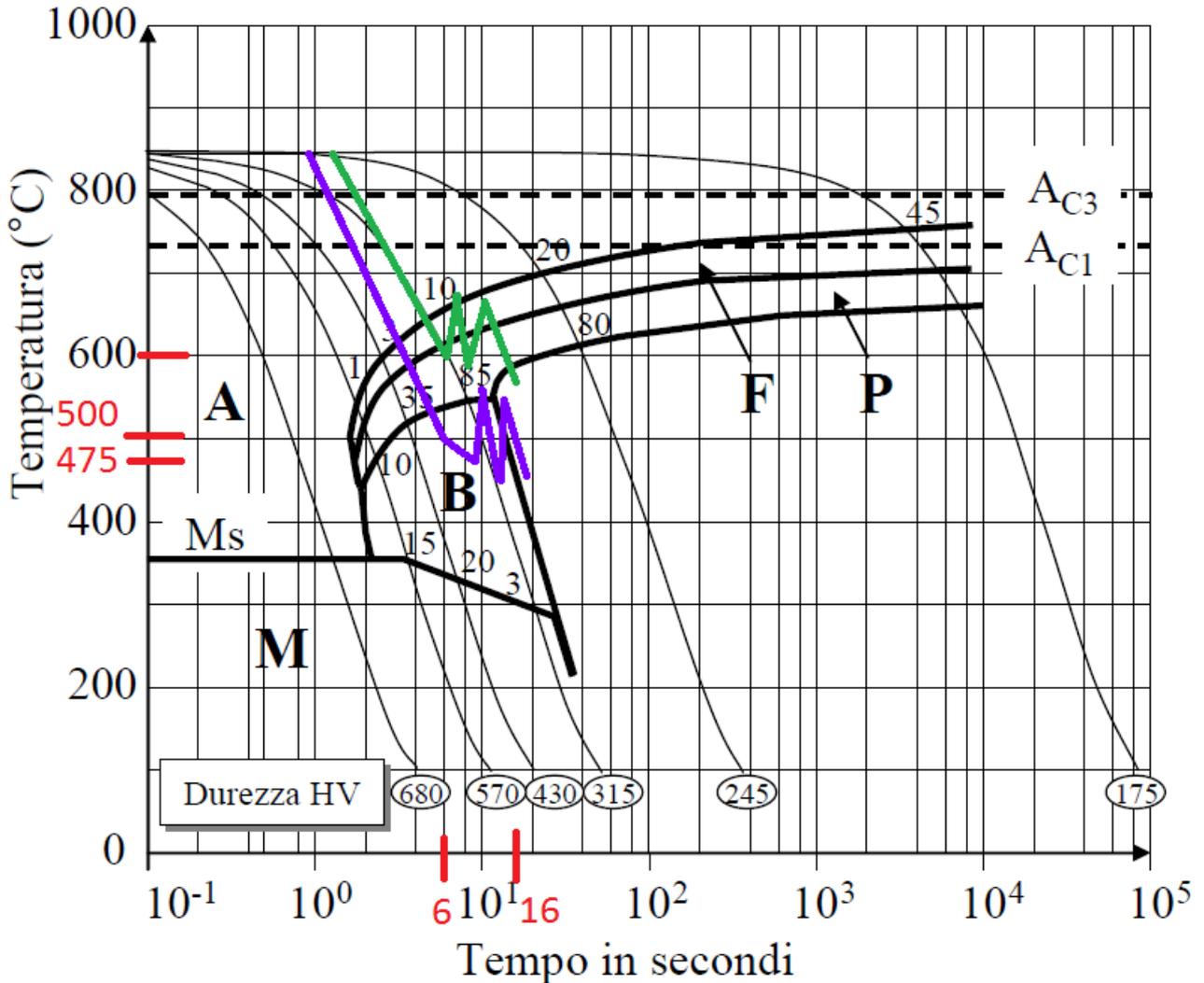
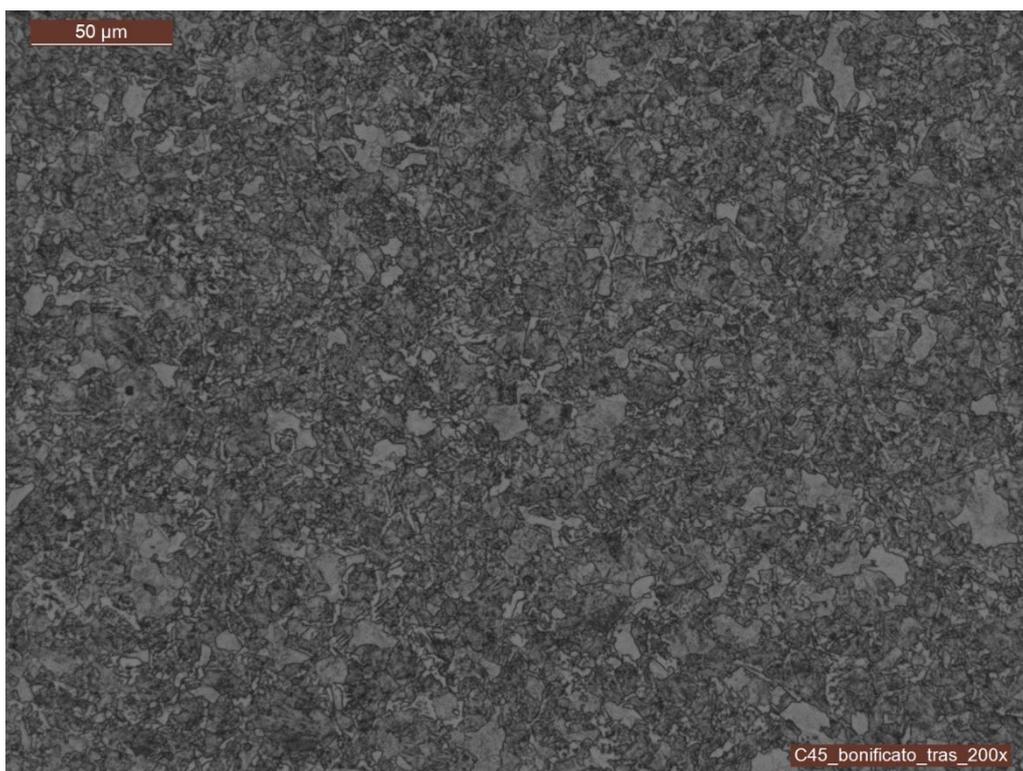
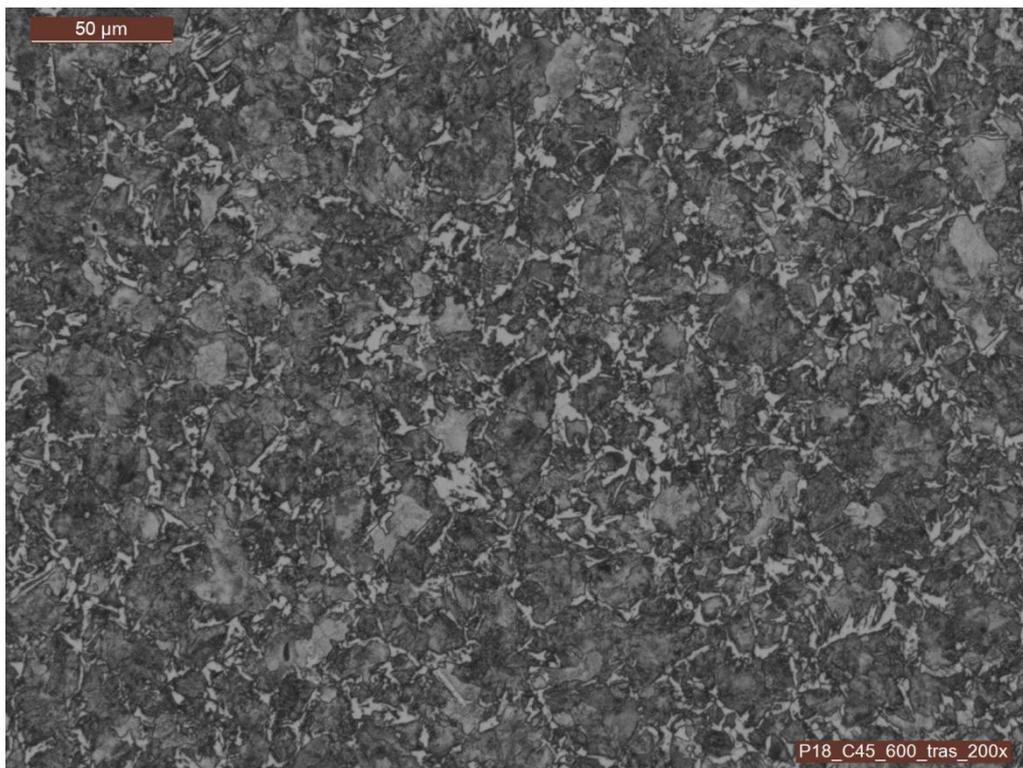


Fig.29 – CCT C45 ciclo 600°C (verde) e ciclo 500°C (violetto)

Nel caso di ciclo a 600°C (curva verde), il materiale viene raffreddato in 6 secondi da 830°C fino a 600°C esatti, poi, per la fuoriuscita di calore dal cuore e dal calore stesso della camera di simulazione che continua a essere a temperature più elevate del provino, si ha una fluttuazione di temperatura tra 575°C e i 675°C fino a circa 16 secondi, dopo di che la termocoppia si spegne e il raffreddamento è lasciato libero all'aria dentro la camera di prova chiusa. Si nota quindi, tracciando le curve sul grafico, che la quarta micrografia è in accordo con la stima della microstruttura ottenibile dal diagramma CCT ovvero 10% ferrite, 85% perlite e tracce di bainite.

Analogamente per il ciclo a 500°C (curva violetta) si raffredda in 6 secondi a 500°C, poi per inerzia termica in altri 3 secondi si arriva a 475°C, dopodiché si ha una fluttuazione per qualche secondo tra i 450°C e i 550°C. In accordo con le micrografie si può affermare di avere tracce di ferrite, un 75-80% di perlite e tracce di bainite. La bassa percentuale di ferrite è una logica conseguenza del rapido raffreddamento attraverso il campo bifasico, infatti non si dà il tempo alla ferrite primaria di nuclearsi dai bordi grano austenitici. Il raffreddamento incontrollato successivo cade in una zona del diagramma che giustifica la resistenza a rottura del materiale, intorno agli 850 MPa. La maggiore resistenza del materiale raffreddato più velocemente può essere dovuta alle diverse percentuali dei diversi costituenti ma anche alla distanza interlamellare della perlite, che non è apprezzabile al microscopio ottico, ma con ogni probabilità sarà inferiore dopo il raffreddamento rapido.

Per completezza in figura 30 due dettagli a 200x per il confronto delle microstrutture del ciclo 600°C e del bonificato.



**Fig.30 – C45 trasversale 200x – confronto ciclo 600°C con bonificato**

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
C45 SIMULATO	312	655	28.3
C45 930	384	699	29.6
C45 830	417	719	24.8
C45 600	567	853	21.7
C45 500	555	844	21.7
C45 BONIFICATO	503	768	27.5

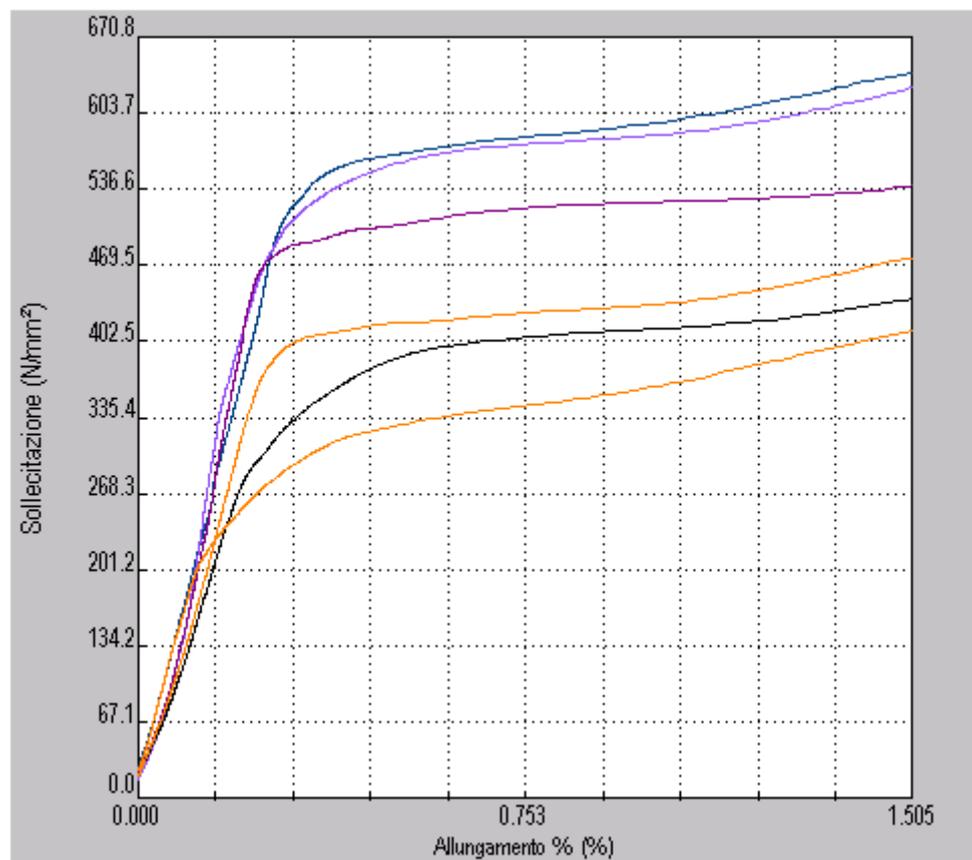
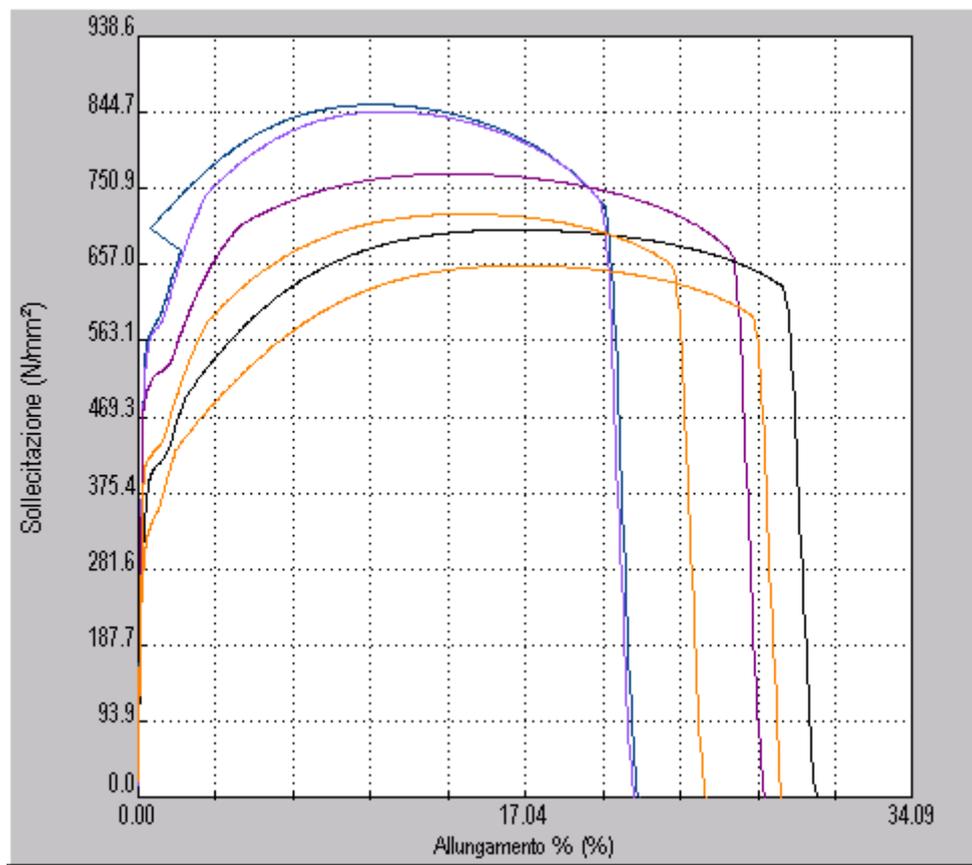
**Tab.18 – caratteristiche meccaniche C45**

Dalle trazioni si vede che, passando dal simulato ai vari cicli modificati, si aumenta la resistenza meccanica e si riduce la duttilità portandosi verso il target del bonificato. Secondo la UNI EN 10083-2 “Condizioni tecniche di fornitura per acciai non legati”, le proprietà meccaniche a temperatura ambiente nello stato bonificato per un piano di spessore inferiore agli 8 mm, come provino da noi creato, sono:

	Rp02 min[Mpa]	Rm [Mpa]	A min[%]
LIMITI C45 BONIFICATO	490	700 – 850	14

**Tab.19 – limiti C45 bonificato secondo UNI EN 10083-2**

Si conclude che dal punto di vista delle proprietà meccaniche, il C45 con ciclo a 500°C rientra nei range previsti dalla norma come acciaio bonificato e con un errore dello 0,35% sulla resistenza a rottura anche il C45 con ciclo a 600°C. Rimane da sottolineare il fatto che, benché nei limiti della norma, tali acciai risultano essere leggermente più resistenti e meno duttili dell'acciaio bonificato.



**Fig.31 – trazione C45: simulato (arancione), 930°C (nero), 830°C (arancione in alto), bonificato (lilla), 500°C (violetto) e 600°C (verde) – dettaglio in basso**

## ***4.2 ACCIAIO 42CrMoS4***

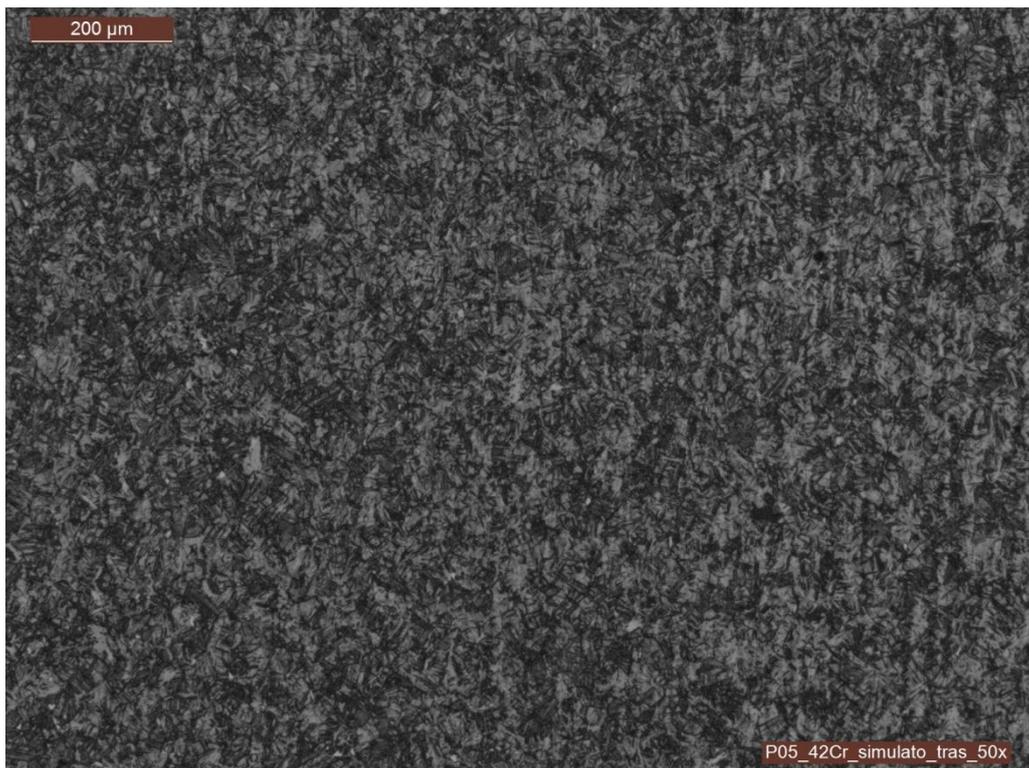
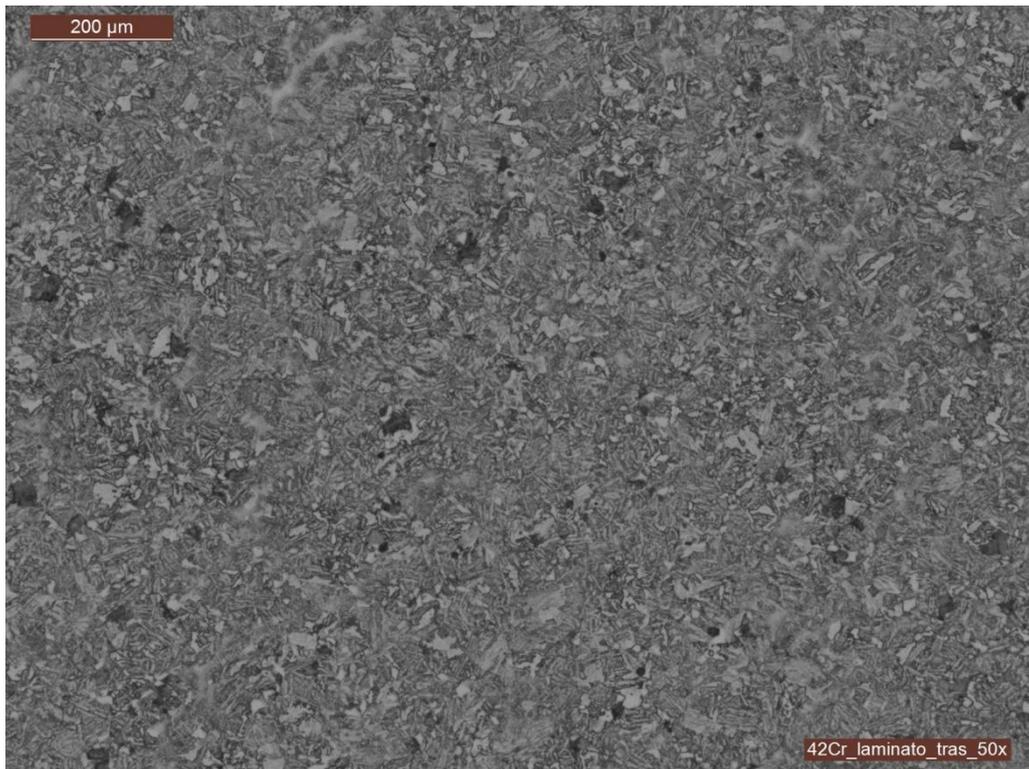
In allegato A verranno esposte tutte le micrografie ottenute per il 42CrMoS4 per ogni campione a diversi ingrandimenti: 100x e 500x.

In allegato B verranno esposte tutte le curve tensione allungamento ricavate per il 42CrMoS4 dalle prove di trazione.

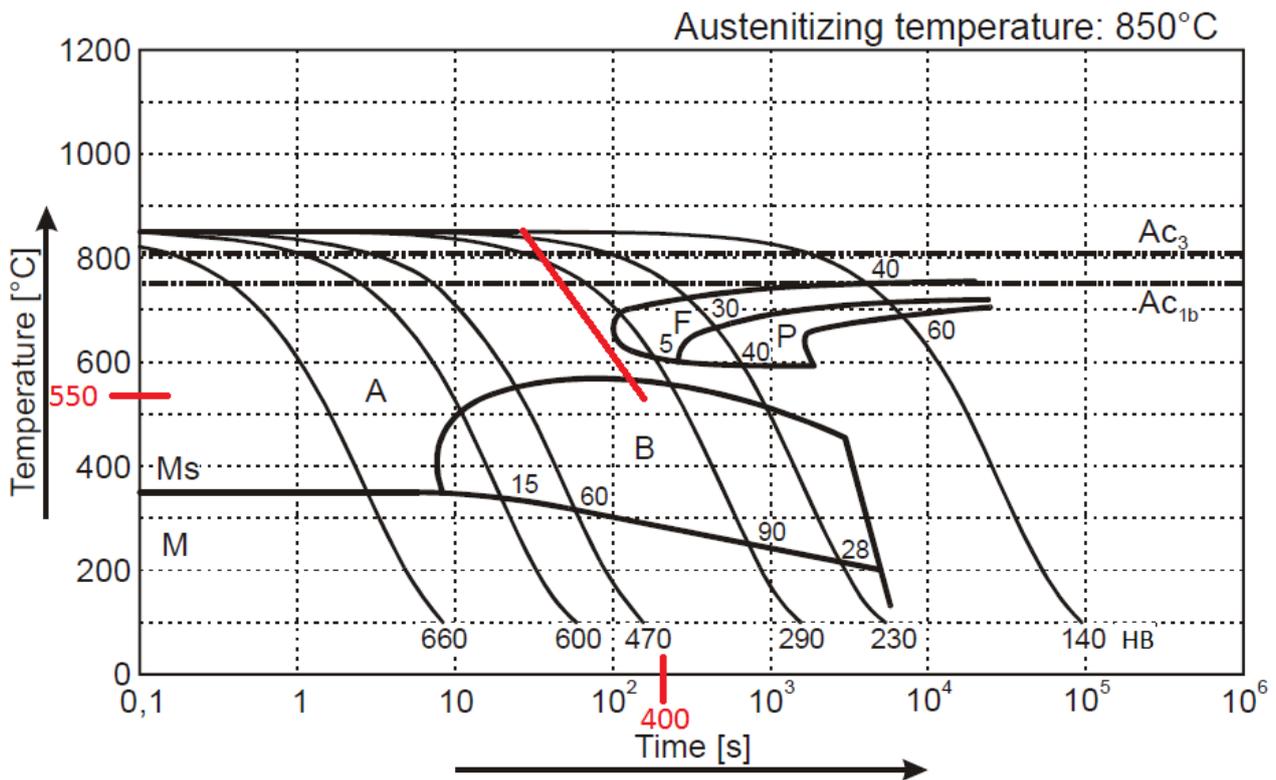
Per una più chiara esposizione, nel seguito, verranno invece esposte alcune micrografie e curve tensione allungamento considerate esemplificative per l'analisi dei risultati ottenuti.

### ***4.2.1 ACCIAIO 42CrMoS4 – SIMULAZIONE DELLA LAMINAZIONE***

In Fig. 32 la micrografia in alto mostra un campione di 42CrMoS4 prelevato in reparto mentre, quella in basso, la micrografia del provino che ha subito la laminazione simulata al Gleeble. Si nota molto bene che le due strutture sono decisamente diverse. Per comprendere meglio la composizione è necessario, quindi, individuare le curve di raffreddamento sul diagramma CCT in Fig.33.



**Fig.32 – 42CrMoS4 trasversale 50x – confronto laminato con simulato**



**Fig.33 – CCT 42CrMoS4**

Il raffreddamento seguito è analogo a quello del C45: controllato fino a 550°C con una velocità di 0,72°C/s e poi libero in aria nella camera Gleeble chiusa. Trascurando il fatto che ci possa essere un raffreddamento più lento nel cuore della barra si può affermare che la curva sia per entrambi, in modo approssimato, quella tracciata in rosso. Secondo il CCT dunque non si dovrebbero avere ferrite e perlite, se non tracce nel laminato, riproponendo l'ipotesi del più lento raffreddamento a cuore e quindi con la curva del CCT leggermente più a destra. In accordo con le micrografie si hanno, quindi, diverse miscele di bainite e martensite. Al di sotto dei 550°C molto probabilmente le curve di raffreddamento diventano nettamente diverse a causa del raffreddamento decisamente più rapido del provino, essendo di ridotte dimensioni rispetto alla barra. Questo giustificherebbe la diversità di struttura tra il laminato e il simulato. Nel primo probabilmente si ha una miscela di circa il 80% di bainite, il 10% di martensite e tracce di perlite, in accordo con la resistenza a rottura riscontrata. Nel simulato, invece, una miscela di bainite e martensite con una netta percentuale in più di martensite. Ciò giustificherebbe la diversità riscontrata nelle caratteristiche meccaniche di Fig.34.

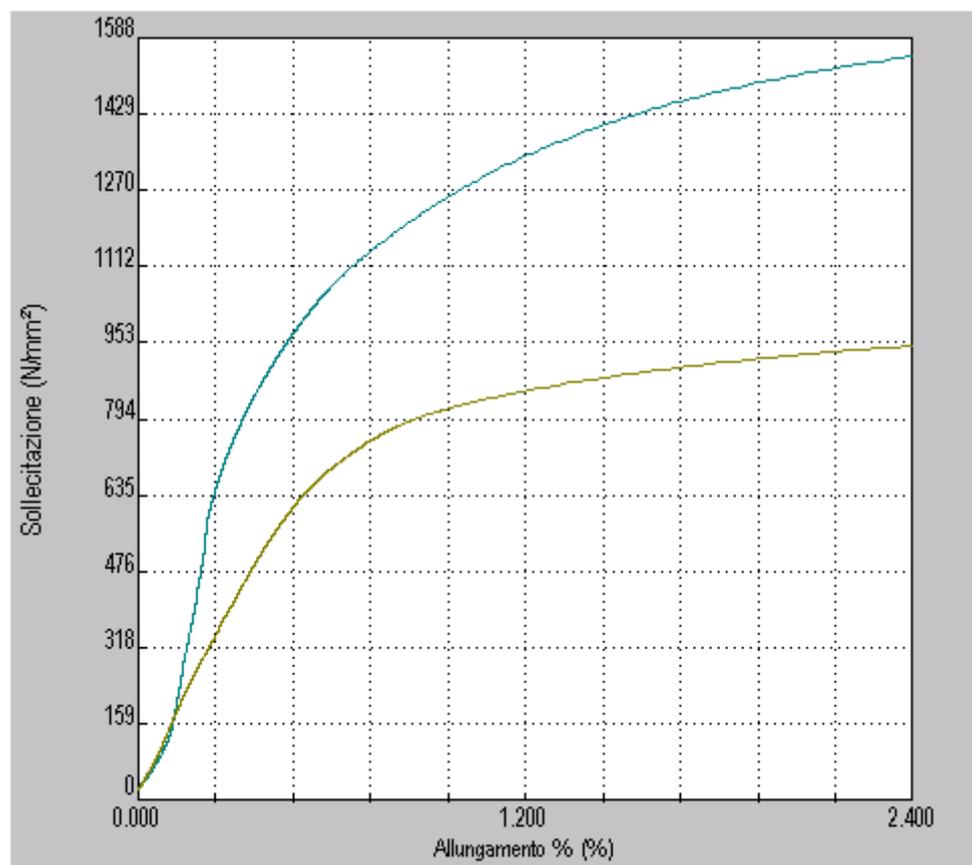
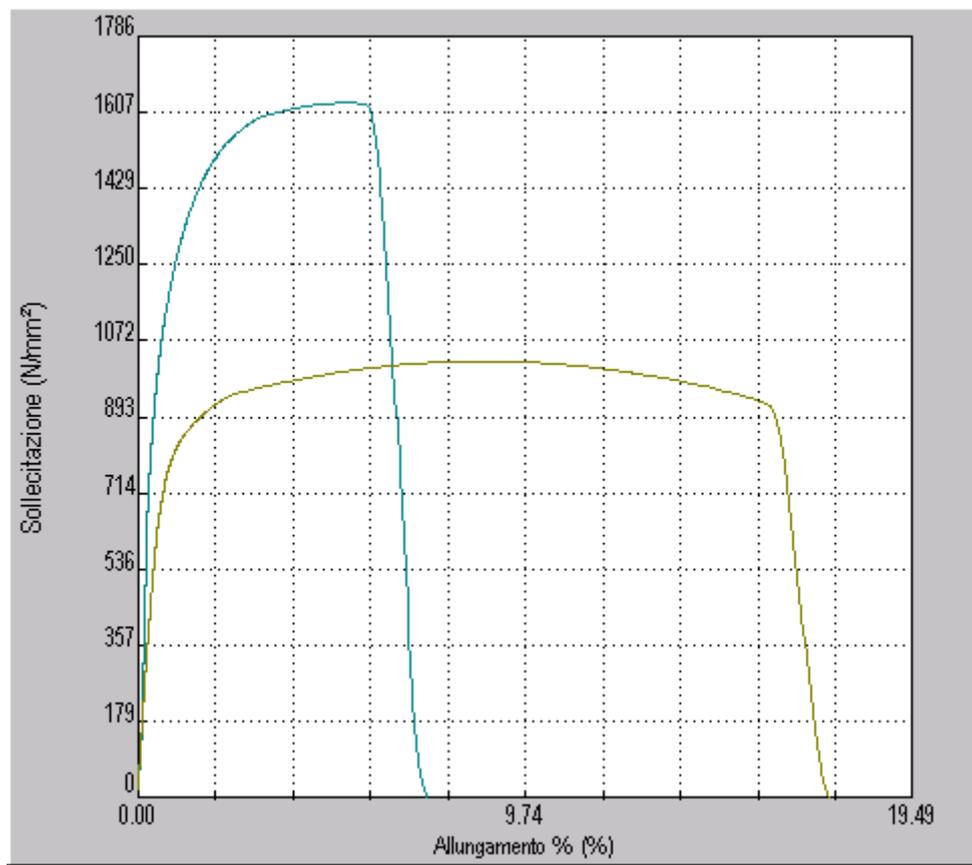


Fig.34 – trazione 42CrMoS4 laminato (verde) e simulato (azzurro) – dettaglio in basso

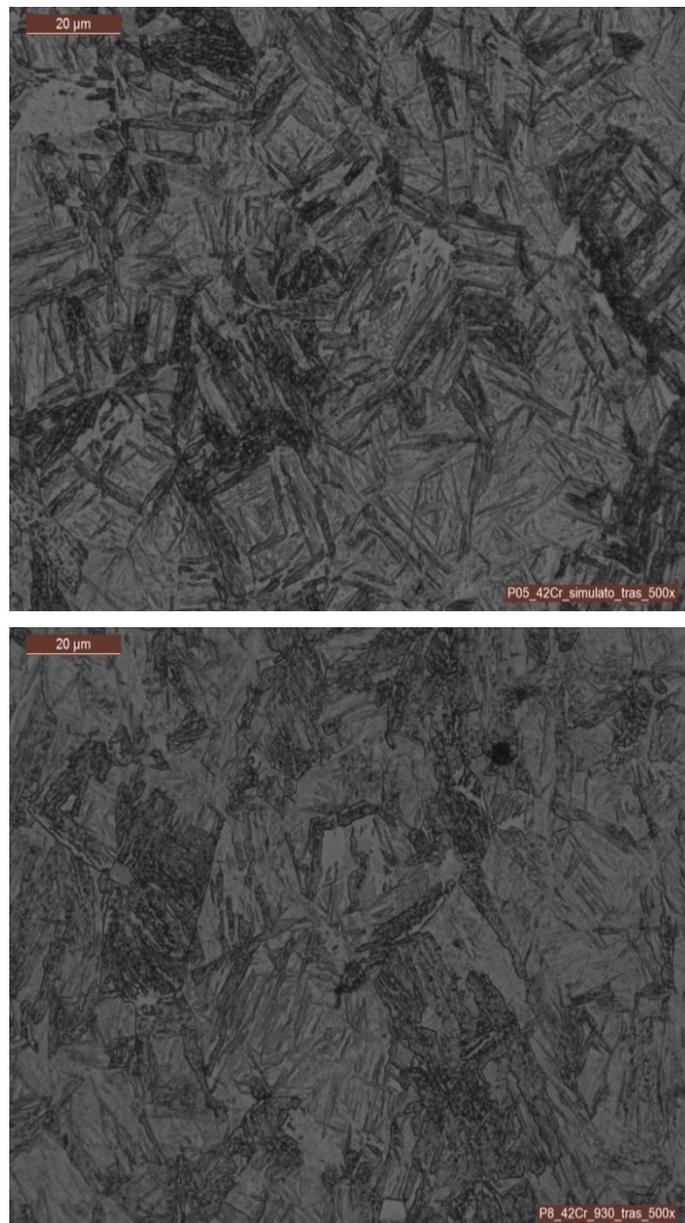
	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
42CrMoS4 LAMINATO	756	1023	17
42CrMoS4 SIMULATO	1106	1627	6.9

**Tab.20 – caratteristiche meccaniche 42CrMoS4 laminato e simulato**

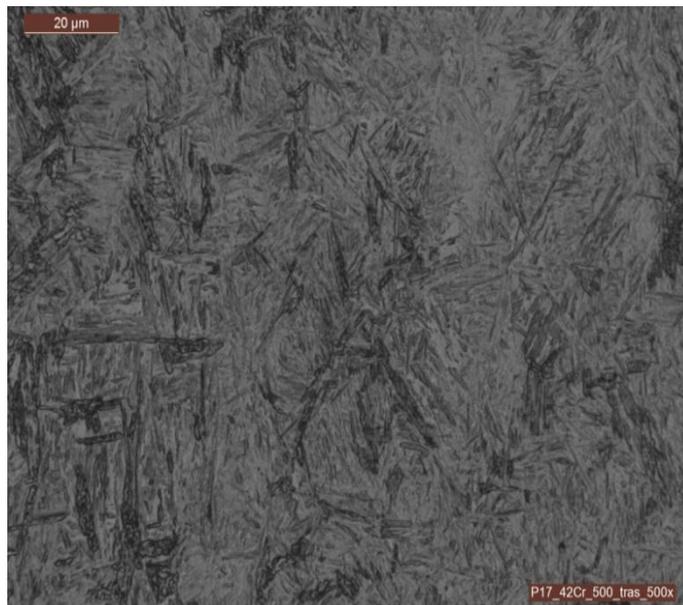
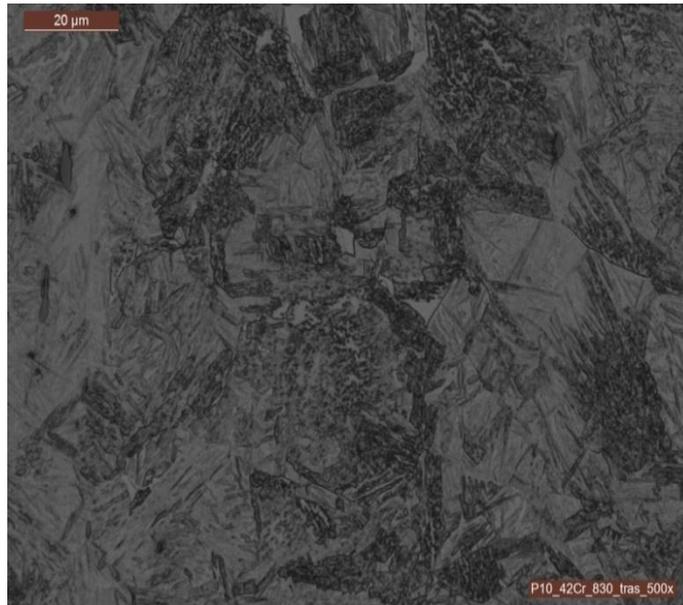
Nel caso del 42CrMoS4 in esame si conclude che non è stato possibile simulare fedelmente la laminazione perché tale acciaio è legato e autotemprante per cui, al di sotto dei 550°C per tali velocità di raffreddamento, non si è ancora formata la microstruttura ed è quindi fondamentale la velocità di raffreddamento almeno fin sotto i 250°C. Questo problema non si è presentato per il C45 perché, sotto i 550°C, la microstruttura è già completamente formata essendo un acciaio non legato.

## **4.2.2 ACCIAIO 42CrMoS4 – SIMULAZIONE CON RAFFREDDAMENTO ACCELERATO**

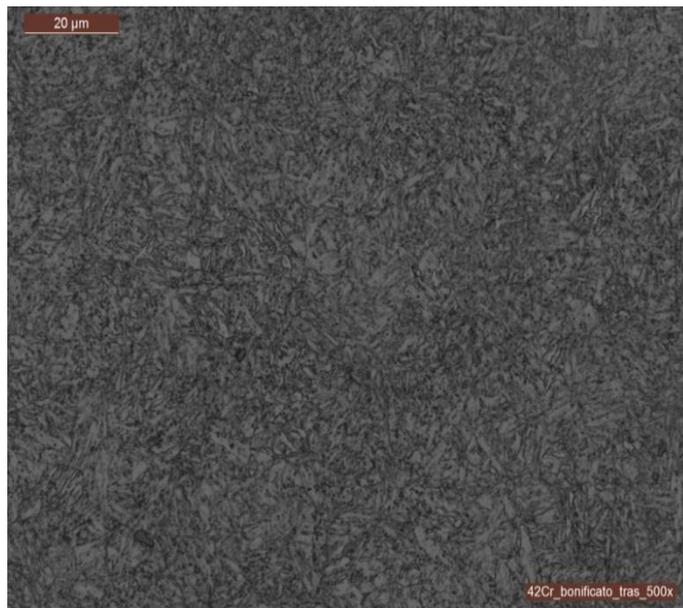
Nella Fig.35 a-b-c in ordine dall'alto: micrografia del 42CrMoS4 con laminazione simulata, micrografia del 42CrMoS4 simulato con ciclo termico modificato a 930°C, micrografia del 42CrMoS4 simulato con ciclo termico modificato a 830°C, micrografia del 42CrMoS4 simulato con ciclo termico modificato a 830°C più quench a 600°C, micrografia del 42CrMoS4 simulato con ciclo termico modificato a 830°C più quench a 500°C e micrografia del 42CrMoS4 bonificato in laboratorio.



**Fig.35 a – 42CrMoS4 trasversale 500x – simulato e ciclo 930°C**



**Fig.35 b – 42CrMoS4 trasversale 500x – ciclo 830°C, 600°C e 500°C**



**Fig.35 c – 42CrMoS4 trasversale 500x – bonificato**

Nelle prime tre micrografie si nota come, abbassando la temperatura di laminazione, aumenti la percentuale di martensite non rinvenuta nella matrice e le dimensioni del grano non subiscano evidenti variazioni. Le differenze sono comunque contenute. L'ipotesi più probabile è che il campione deformato a 930°C prima e 830°C poi sia, come per il C45, raffreddato ulteriormente più in fretta, al di sotto dei 550°C nella fase incontrollata, per cui, secondo CCT, si avrà un aumento della martensite a discapito della bainite da cui un aumento ulteriore della resistenza meccanica.

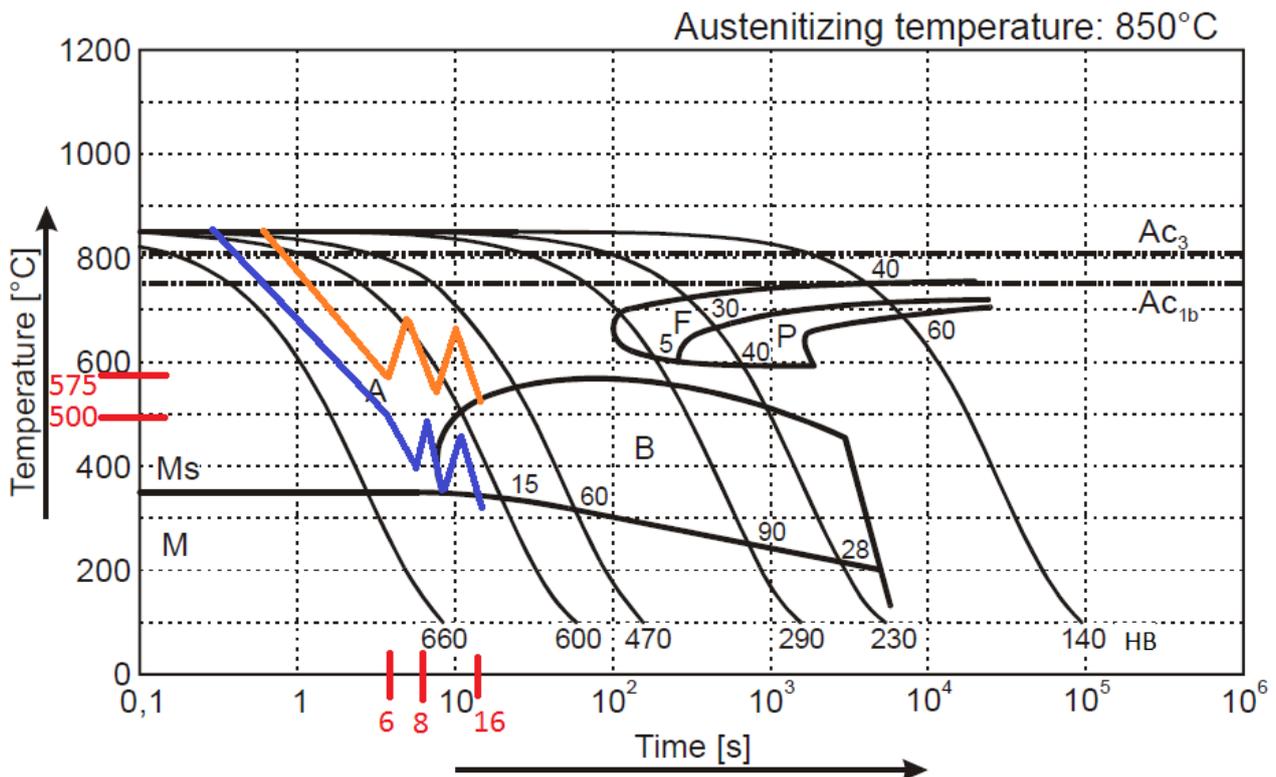
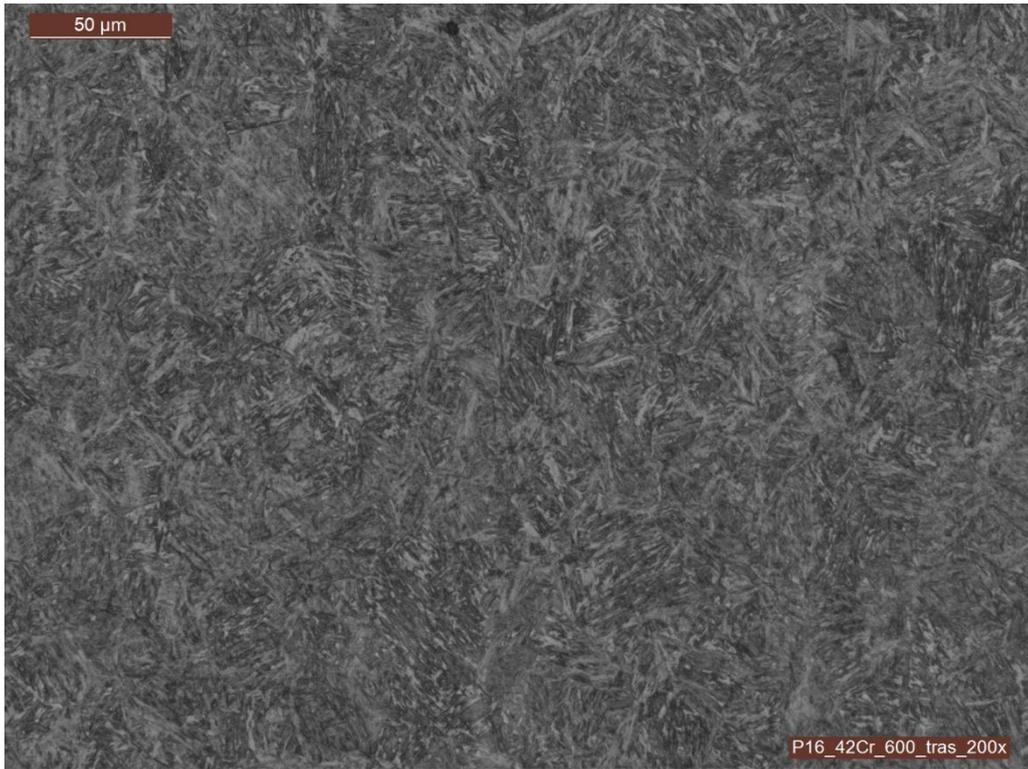


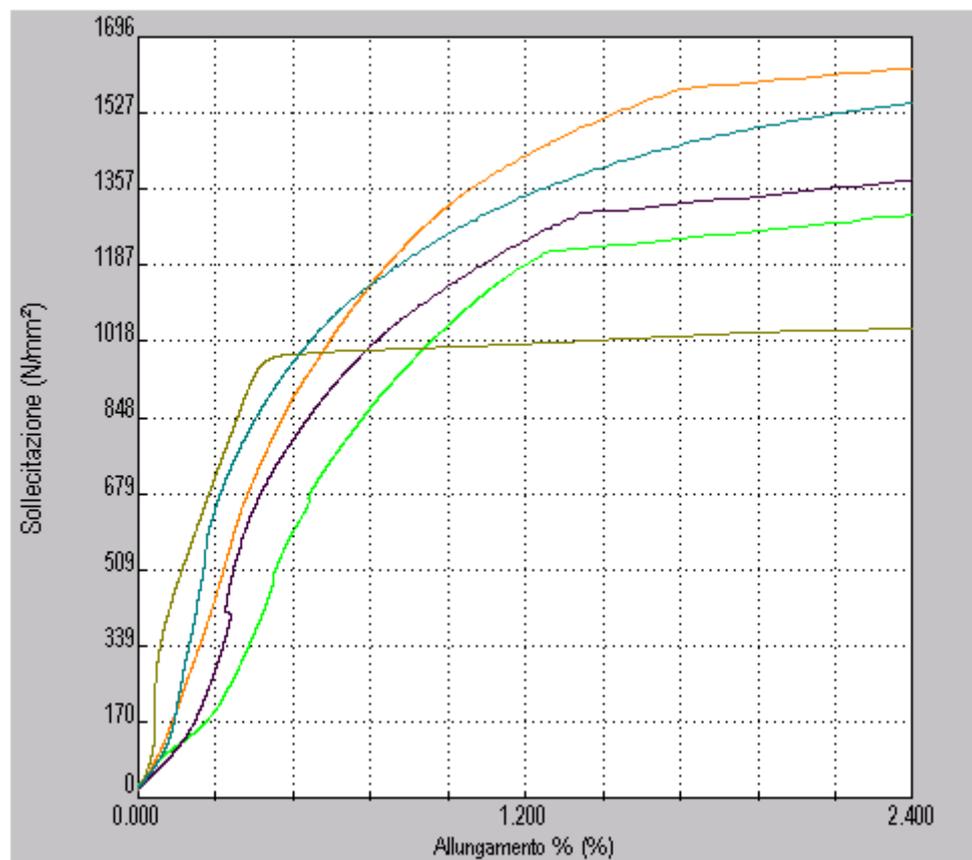
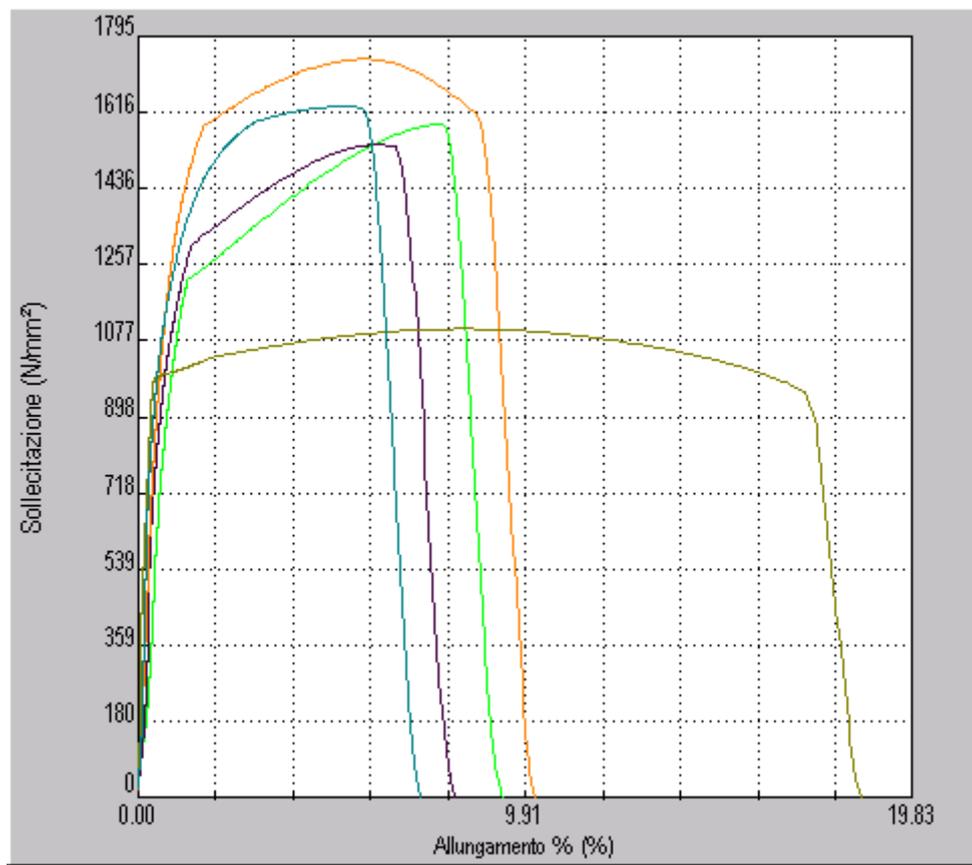
Fig.36 – CCT 42CrMoS4 ciclo 600°C e 500°C

Dalle curve di raffreddamento ricavate sul CCT del 42CrMoS4 per le simulazioni a 600°C e 500°C si può, ancora una volta, risalire alla composizione delle microstrutture. Sapendo che, per il ciclo a 600°C, il materiale è stato raffreddato fino a 575°C in 6 secondi e poi per circa 10 secondi la temperatura ha oscillato tra i 675°C e i 525°C, si può affermare che si è evitata del tutto la formazione di ferrite e perlite e la quarta micrografia è composta probabilmente da un 60% bainite e un 40% martensite, in accordo anche con la resistenza meccanica a rottura ottenuta di 1739 MPa. Per quanto riguarda il ciclo a 500°C, invece, si sono raggiunti i 500°C in 6 secondi, poi in altri 2 secondi la temperatura è ancora scesa a 400°C ed infine ha fluttuato tra i 475°C e 350°C per ulteriori 10 secondi circa. Da questo, probabilmente, si è ottenuto un 90% di martensite e un 10% di bainite, temprando completamente il materiale. Il materiale ottenuto è praticamente martensite non rinvenuta.

Per completezza in Fig.37 un dettaglio della microstruttura del 42CrMoS4 con ciclo a 600°C a 200x.



**Fig.37 – micrografia 42CrMoS4 trasversale ciclo 600°C a 200x**



**Fig.38 – trazione 42CrMoS4: bonificato (marrone), 830°C (verde), 930°C (viola), simulato (azzurro) e 600°C (arancione) – dettaglio in basso**

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
42CrMoS4 SIMULATO	1106	1627	6.9
42CrMoS4 930	1062	1538	7.5
42CrMoS4 830	1158	1586	8.3
42CrMoS4 600	1244	1739	9.5
42CrMoS4 500	>1962	>1962	n.d.
42CrMoS4 BONIFICATO	979	1104	18.5

**Tab.21 – caratteristiche meccaniche 42CrMoS4**

Non è presente la trazione del campione raffreddato a 500°C in quanto troppo resistente per la macchina di trazione utilizzata “Sun 1000”, la quale ha superato il carico massimo nel tentativo di trazione il materiale fermandosi a 1962 Mpa senza ancora aver rotto il provino. Tale valore si accorda, tra l’altro, con la micrografia. Le trazioni confermano nuovamente il problema dell’eccessiva velocità di raffreddamento non controllata del provino al di sopra di martensite start. Infatti, si crea un materiale eccessivamente resistente e poco duttile rispetto al target del bonificato. Nessuna trazione rientra nei limiti imposti dalla norma UNI EN 10083-3 “Condizioni tecniche di fornitura per acciai legati” per gli acciai bonificati con spessore inferiore a 8 mm.

	Rp02 min[Mpa]	Rm [Mpa]	A min[%]
LIMITI 42CrMoS4 BONIFICATO	900	1100 - 1300	10

**Tab.22 – limiti 42CrMoS4 bonificato secondo la UNI EN 10083-3**

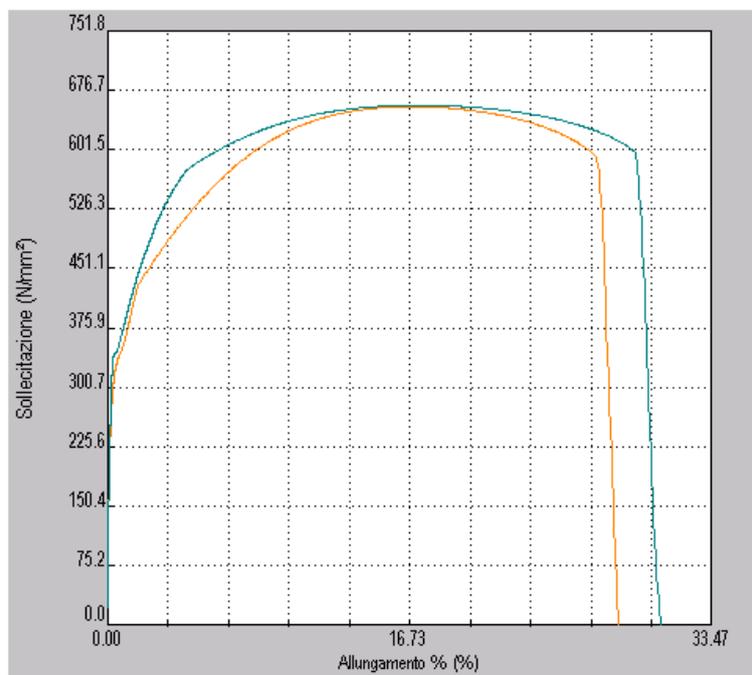
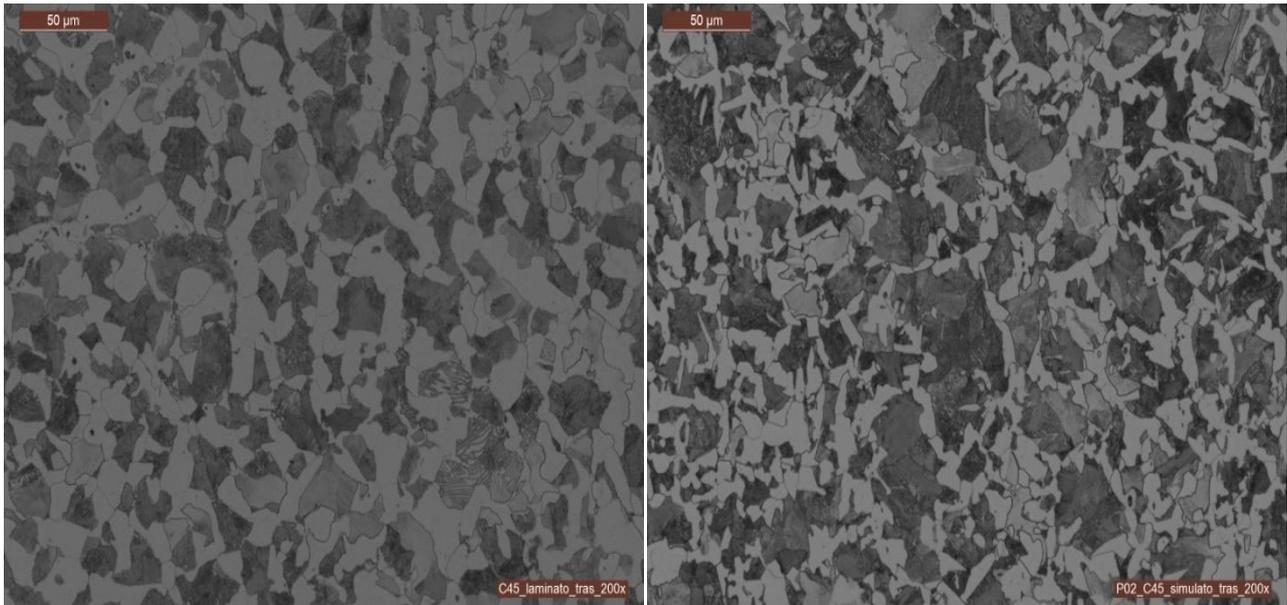
E’ ragionevole pensare che, partendo dal risultato ottenuto per il ciclo a 600°C, mantenendo il materiale sopra martensite start, 350°C circa, per un tempo adeguato, si permetta una cosiddetta tempra bainitica, la quale porterebbe a perdere l’eccessiva resistenza meccanica e ad aumentare l’allungamento a rottura appiattendolo la curva nei limiti previsti dalla norma.

## 5. *CONCLUSIONI*

Il presente lavoro sperimentale di tesi è nato dall'idea dell'ingegner Paolo Emilio Martini di poter integrare uno specifico trattamento termico sulla reale linea di laminazione presente nel laminatoio Riva di Lesegno, del quale lui ne è il responsabile da più di dieci anni. I due acciai in esame, il C45 e il 42CrMoS4, generalmente, dopo essere stati laminati in stabilimento, vengono mandati a bonificare da stabilimenti sia esterni che interni per poi essere venduti al cliente dalla Riva stessa. Ciò ovviamente comporta degli ingenti costi esterni e interni di produzione. L'idea di poter ottenere, durante la laminazione e il raffreddamento successivo, un acciaio con delle caratteristiche meccaniche e microstruttura simile agli stessi acciai bonificati, comporterebbe potenziali risparmi sia economici sia sul time to market del prodotto. Grazie alla collaborazione con il professor Renzo Valentini, del dipartimento di ingegneria civile e industriale dell'università di Pisa, e del mio relatore professor Paolo Matteis, del dipartimento di scienza applicata e tecnologia del Politecnico di Torino, che mi hanno fornito importanti nozioni sui concetti teorici relativi al tema trattato, nonché al fondamentale aiuto del tecnico responsabile del Gleeble signor Fabio Garelli, è stato possibile intraprendere questo studio.

Come già descritto in queste pagine, si è cercato dapprima di simulare al Gleeble il processo di laminazione reale che viene eseguito in reparto, in modo da validare le successive prove a cicli termici modificati, e successivamente si è cercato di modificare, per l'appunto, il ciclo termico in modo da simulare un possibile trattamento termico da integrare sulla linea di laminazione. La composizione chimica molto differente dei due acciai ha portato a risultati altrettanto differenti, per cui bisogna separare i commenti all'uno rispetto all'altro. Infatti, il C45 è un acciaio non legato mentre il 42CrMoS4 è legato e, come si è visto, autotemprante.

Partendo dal primo obiettivo, ovvero quello di simulare al Gleeble la laminazione reale, per il C45 si può affermare di aver raggiunto il target con un'ottima precisione sia per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche sia per quanto riguarda la microstruttura. Le leggere differenze sono da attribuire ai naturali limiti della simulazione.



	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
C45 LAMINATO	343	656	30.5
C45 SIMULATO	312	655	28.3

**Fig.39 – riassunto confronto C45 laminato e simulato**

Per quanto riguarda il 42CrMoS4, invece, non è stato possibile simulare la laminazione in modo fedele. Questo perché i dati prelevati in reparto, sui tempi e sulle temperature, si fermano al momento in cui la barra esce dalla placca di raffreddamento verso la cesoia, ovvero intorno ai 550°C. A questa temperatura e con la velocità di raffreddamento rilevata, come si può vedere dal CCT dell'acciaio, non si è ancora creata la microstruttura finale. Ne consegue che il raffreddamento seguente al di sotto dei 550°C è fondamentale per le caratteristiche meccaniche finali e tale raffreddamento è diverso dal provino alle barre. La giustificazione di tale differenza sta nel fatto che il provino è di piccole dimensioni rispetto alla barra ovviamente e quindi, a raffreddamento incontrollato, la sua temperatura scende molto più rapidamente, inoltre il provino resta isolato da altri corpi caldi mentre la barra, dopo essere stata tagliata, viene posta in fasci e questi stoccati in magazzino vicino ad altri fasci che possono, o meno, essere ancora caldi. Il risultato di questo discorso è che le barre laminate sotto i 550°C subiscono un raffreddamento molto più lento e variabile a seconda delle condizioni di stoccaggio ma anche dell'ambiente circostante o della loro posizione all'interno del fascio stesso. Basti pensare che il laminato del mattino quando viene controllato visivamente nel pomeriggio è ancora caldo. La conclusione è che sotto i 550°C il provino, lasciato libero di raffreddare, si auto temprava mentre la barra no. Questo giustifica la differenza non trascurabile sia di microstruttura sia di proprietà meccaniche tra il simulato e il laminato. Bisognerebbe, per risolvere il problema, effettuare uno studio dettagliato del raffreddamento in reparto almeno fin sotto a martensite start, che da CCT arriva a 200°C.

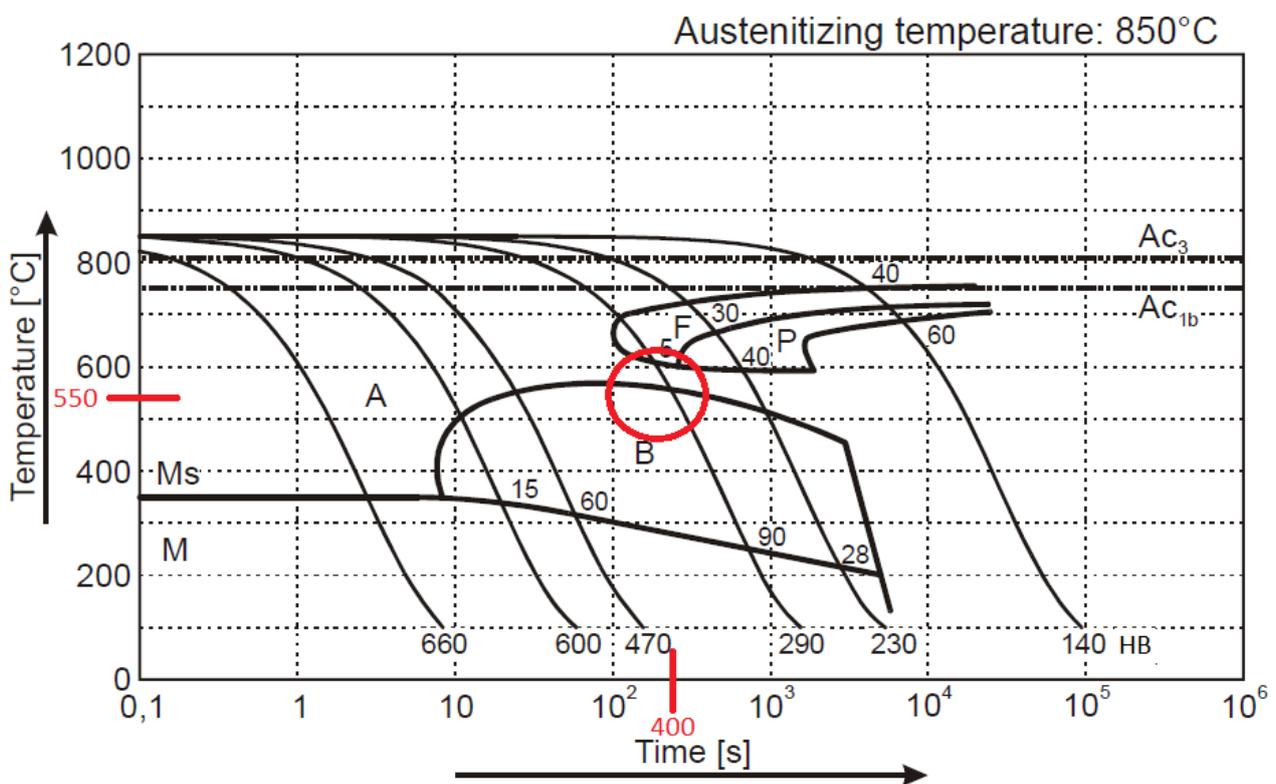
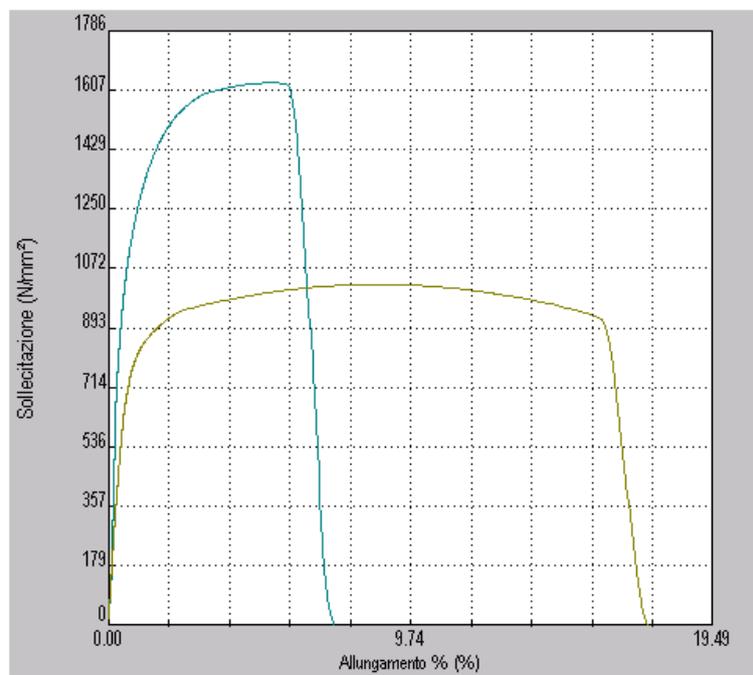
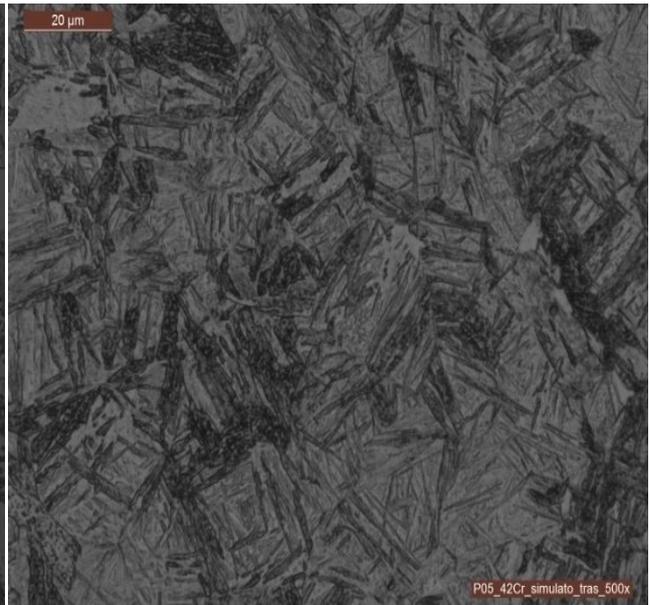


Fig.40 – CCT 42CrMoS4



	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
42CrMoS4 LAMINATO	756	1023	17
42CrMoS4 SIMULATO	1106	1627	6.9

**Fig.41 – riassunto confronto 42CrMoS4 laminato e simulato**

Il problema del 42CrMoS4 non si pone al C45 perché, osservando il CCT di quest'ultimo, si può notare come, al di sotto dei 550°C, la microstruttura si sia già completamente formata per cui non è più importante il raffreddamento fino a temperatura ambiente.

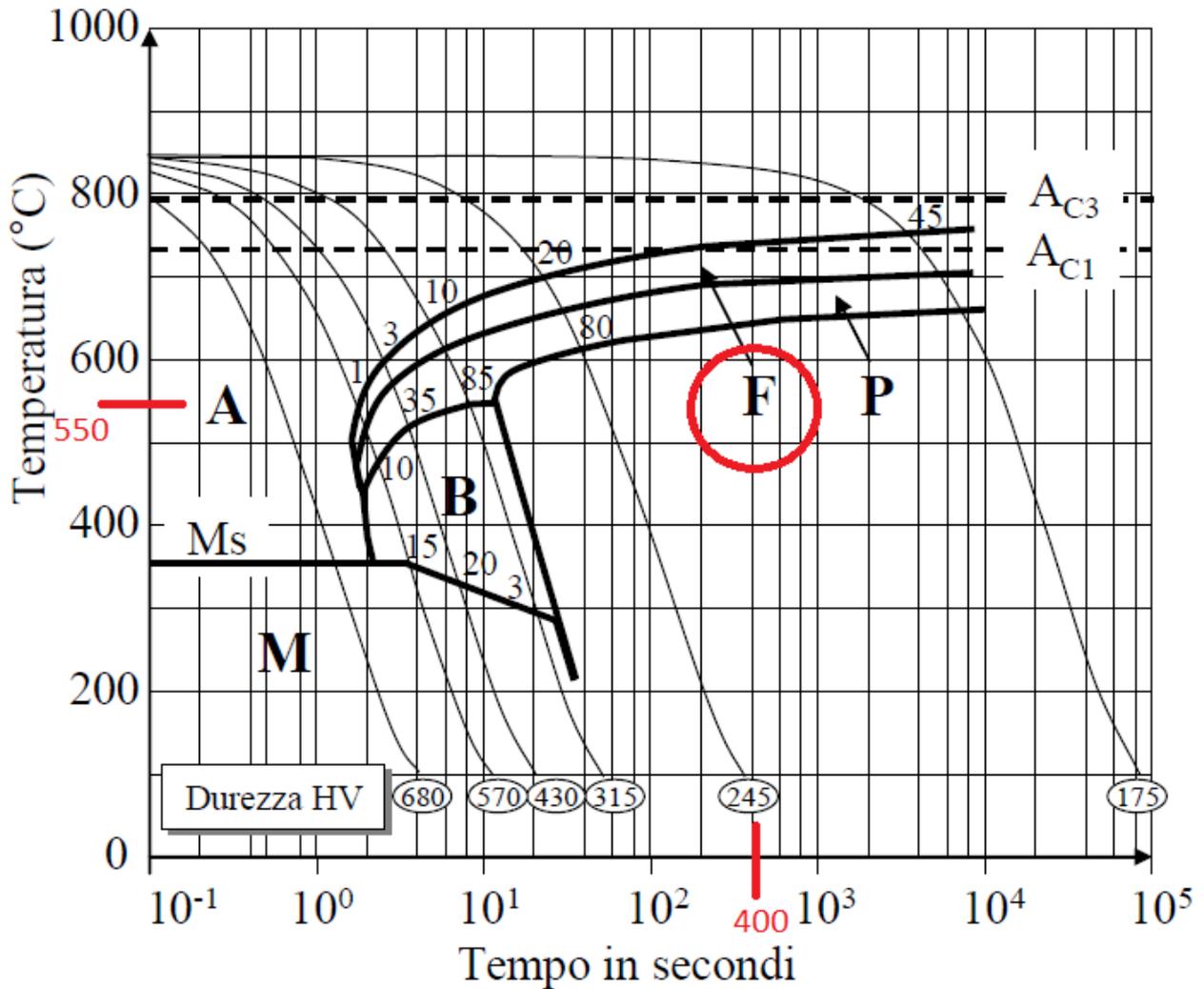


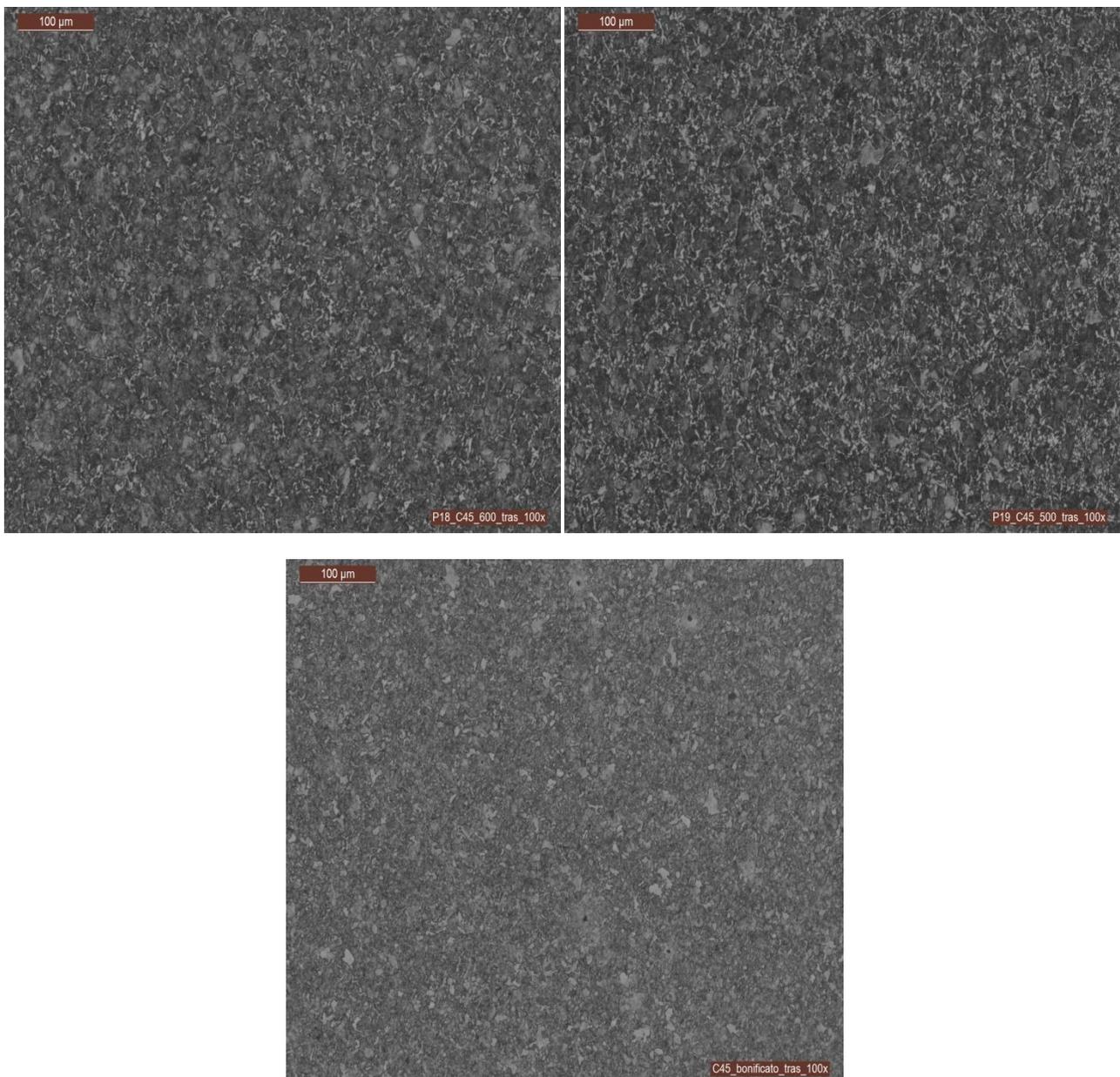
Fig.42 – CCT C45

Per concludere si può affermare che per il C45 le successive simulazioni con ciclo termico modificato saranno rappresentative di ciò che potrebbe accadere realmente in reparto, mentre per il 42CrMoS4 bisognerà, partendo dai risultati delle simulazioni, prendere in considerazione il più lento raffreddamento per poter ipotizzare quel che potrebbe accadere.

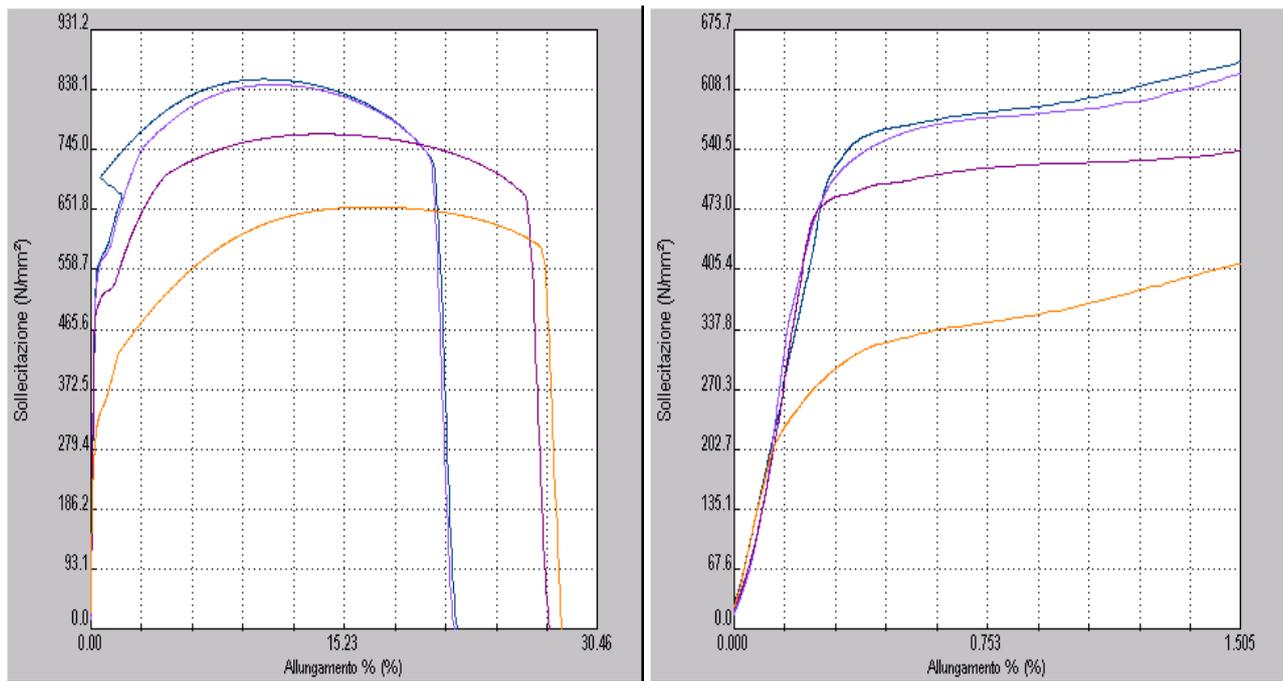
Parlando del secondo obiettivo, abbiamo già discusso nel dettaglio i cicli termici modificati che sono stati simulati. Si vuole sottolineare solo che l'idea di base sta nel raffreddare il materiale nelle

ultime fasi di deformazione e poi ancora dopo l'ultima deformazione prima del raffreddamento finale a temperatura ambiente, nel tentativo di ottenere una combinazione di affinamento del grano austenitico e di tempra parziale e/o interrotta, che comporta una combinazione di proprietà meccaniche equivalenti a quelle di un acciaio bonificato.

Per quanto riguarda il C45 si può affermare di essere soddisfatti del risultato ottenuto: con il ciclo termico a 600°C e a 500°C ci si è avvicinati molto al target del bonificato sia dal punto di vista della microstruttura sia dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche. E' da sottolineare come, tali caratteristiche, rientrano nei range della norma UNI EN 10083-2 "Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati". Quindi l'acciaio ottenuto, facendo appello a tale norma, è da ritenersi equivalente a un bonificato almeno per quanto riguarda i risultati della prova di trazione.



**Fig.43 a – riassunto confronto C45 - micrografie 600°C, 500°C e simulato**



	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
C45 SIMULATO	312	655	28.3
C45 600	567	853	21.7
C45 500	555	844	21.7
C45 BONIFICATO	503	768	27.5

	Rp02 min[Mpa]	Rm [Mpa]	A min[%]
LIMITI C45 BONIFICATO	490	700 - 850	14

**Fig.43 b – riassunto confronto C45 - trazioni simulato (arancione), 600°C (verde), 500°C (violetto) e bonificato (lilla) – limiti del bonificato secondo UNI EN 10083-2**

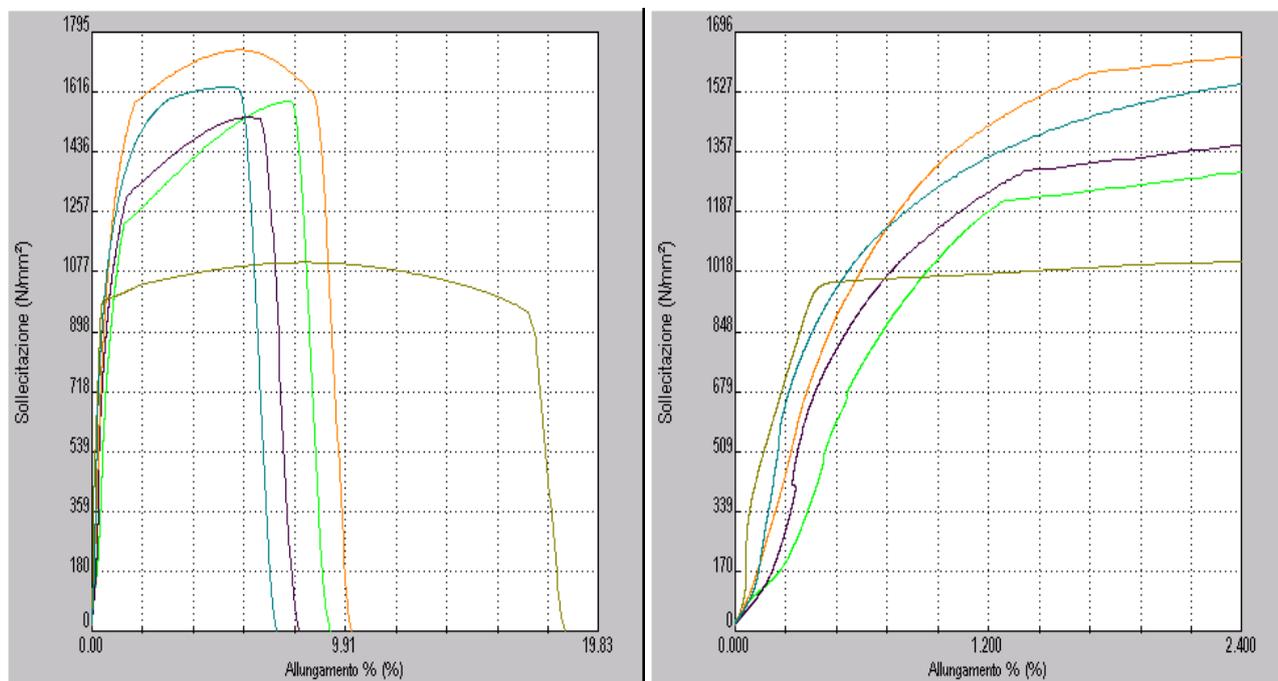
Come già accennato, rimane da sottolineare il fatto che, benché nei limiti della norma, tali acciai risultano essere più resistenti e meno duttili dell'acciaio bonificato ottenuto in laboratorio. Se fosse possibile rallentare il raffreddamento del simulato a 600°C dopo la creazione della microstruttura, per alcune ore tra i 500°C e i 600°C, sarebbe ragionevole un'evoluzione della perlite da lamellare a parzialmente globulare con una conseguente perdita di resistenza e aumento di duttilità cosicché la curva di trazione si appiattirebbe diventando più simile al bonificato. In un'ipotetica applicazione in linea di laminazione di tale ciclo termico è possibile pensare che, dato l'evidente fatto che le barre dopo laminazione accatastate restano a elevata temperatura per molte ore, tale processo sopra descritto potrebbe avvenire naturalmente.

Si può notare anche che il C45 qua ottenuto da tempra parziale/interrotta, che porta ad avere tale microstruttura mista, può essere comparato con il bonificato ottenuto, in quanto, in realtà, il C45

bonificato non si tempra a cuore generando così microstrutture miste. Questo perché, per tale acciaio, il diametro critico di tempra è molto basso.

Infine è importante sottolineare che non è possibile considerare il C45 ottenuto come se fosse bonificato, in quanto bisognerebbe valutare nel dettaglio anche altre caratteristiche meccaniche, come la resilienza, la tenacità a frattura, ecc.

Per il 42CrMoS4, invece, permane il problema dell'autotempra del provino, per cui non è possibile confrontare direttamente il bonificato con quelli simulati. Si può invece procedere con un confronto relativo ai soli provini simulati per capire come i diversi cicli termici abbiano modificato il materiale.



	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
42CrMoS4 SIMULATO	1106	1627	6.9
42CrMoS4 930	1062	1538	7.5
42CrMoS4 830	1158	1586	8.3
42CrMoS4 600	1244	1739	9.5
42CrMoS4 BONIFICATO	979	1104	18.5

	Rp02 min[Mpa]	Rm [Mpa]	A min[%]
LIMITI 42CrMoS4 BONIFICATO	900	1100 - 1300	10

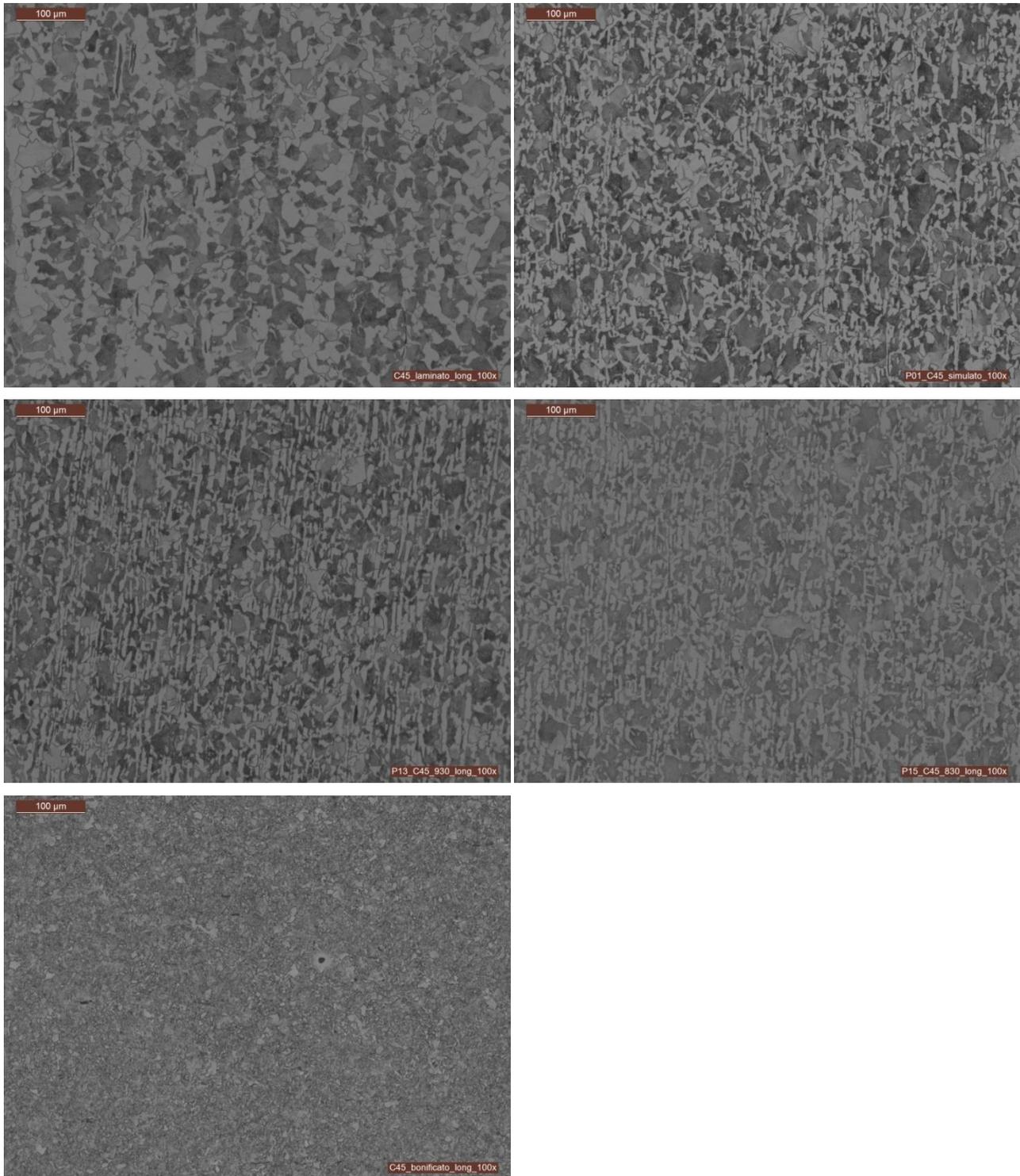
**Fig.44 – riassunto confronto 42CrMoS4 trazioni simulato (azzurro), 930°C (viola), 830°C (verde), 600°C (arancione) e bonificato (marrone) – limiti del bonificato secondo UNI EN 10083-2**

Dall'analisi delle trazioni si vede che, eseguendo i cicli termici modificati, il materiale via via si modifica. In particolare aumenta l'allungamento a rottura ovvero la duttilità, passando da un 6.9% a un 9.5%. Inoltre, con riferimento al ciclo 600°C, si nota che all'aumentare della duttilità non si ha perdita di resistenza, come di solito accade e come accade per i cicli a 930°C e 830°C, ma si ha un ulteriore aumento dello snervamento e del carico di rottura. Si può quindi concludere che, probabilmente, il ciclo termico a 600°C sia una direzione giusta verso il risultato finale, come d'altronde lo è stato per il C45. Ricordando che le barre, dopo il taglio alla cesoia, rimangono

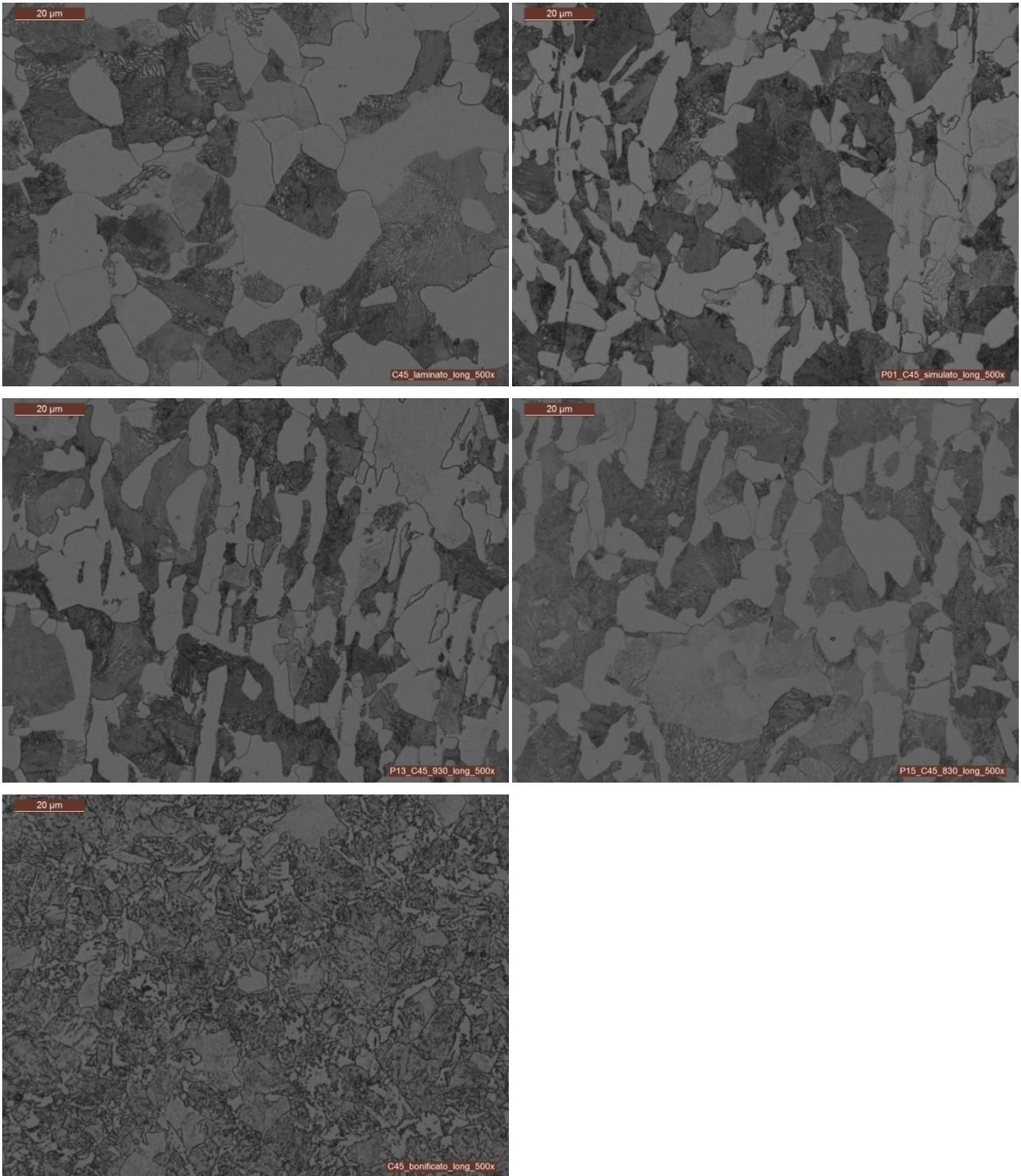
naturalmente ad alta temperatura per diverse ore, si potrebbe pensare ad un processo di tempra bainitica, come teoria già proposta per il c45, con una perdita di resistenza e un aumento di duttilità avvicinandosi ai range del bonificato ottenuto in laboratorio. In particolare, la temperatura di tempra bainitica di questo acciaio si aggira intorno ai 400°C. Tuttavia, questo ragionamento applicato al 42CrMoS4 è azzardato. Bisognerebbe valutare con esattezza la curva tempo-temperatura delle barre dopo il taglio e poi applicarla alla simulazione e studiarne i risultati dato che la microstruttura di tale acciaio si crea ben al di sotto dei 500°C circa di taglio alla cesoia.

Per concludere posso dire che il mio lavoro di tesi può essere un valido punto di partenza per altri tesisti o per approfondimenti che, spero, mi diano la possibilità di effettuare in futuro qui in stabilimento a Lesegno. Ciò non toglie che dalla simulazione alla realtà industriale ci passano tanti fattori, da quelli tecnologici a quelli logistici, che potrebbero rendere impossibile la realizzazione di tale progetto. Proprio per questo sarebbe interessante continuare a studiare nel dettaglio il processo per essere sicuri dei risultati che si possono ottenere per poi valutare la possibilità concreta di modificare l'impianto di laminazione verso un impianto integrato con la possibilità di eseguire un trattamento termo meccanico mirato ad ottenere proprietà microstrutturali e meccaniche finali adeguate per determinati utilizzi del prodotto a valle della produzione.

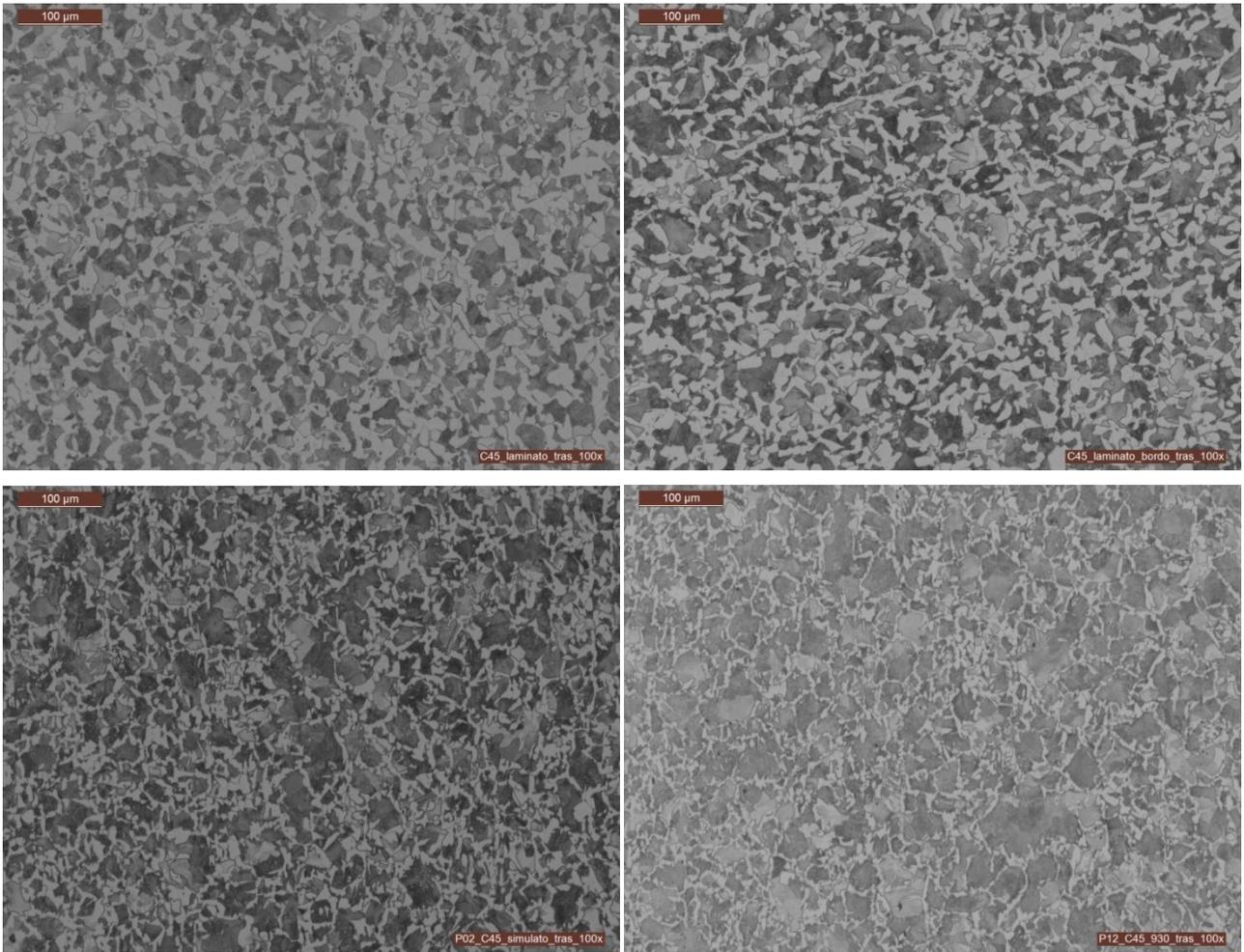
## ***ALLEGATO A – MICROGRAFIE***



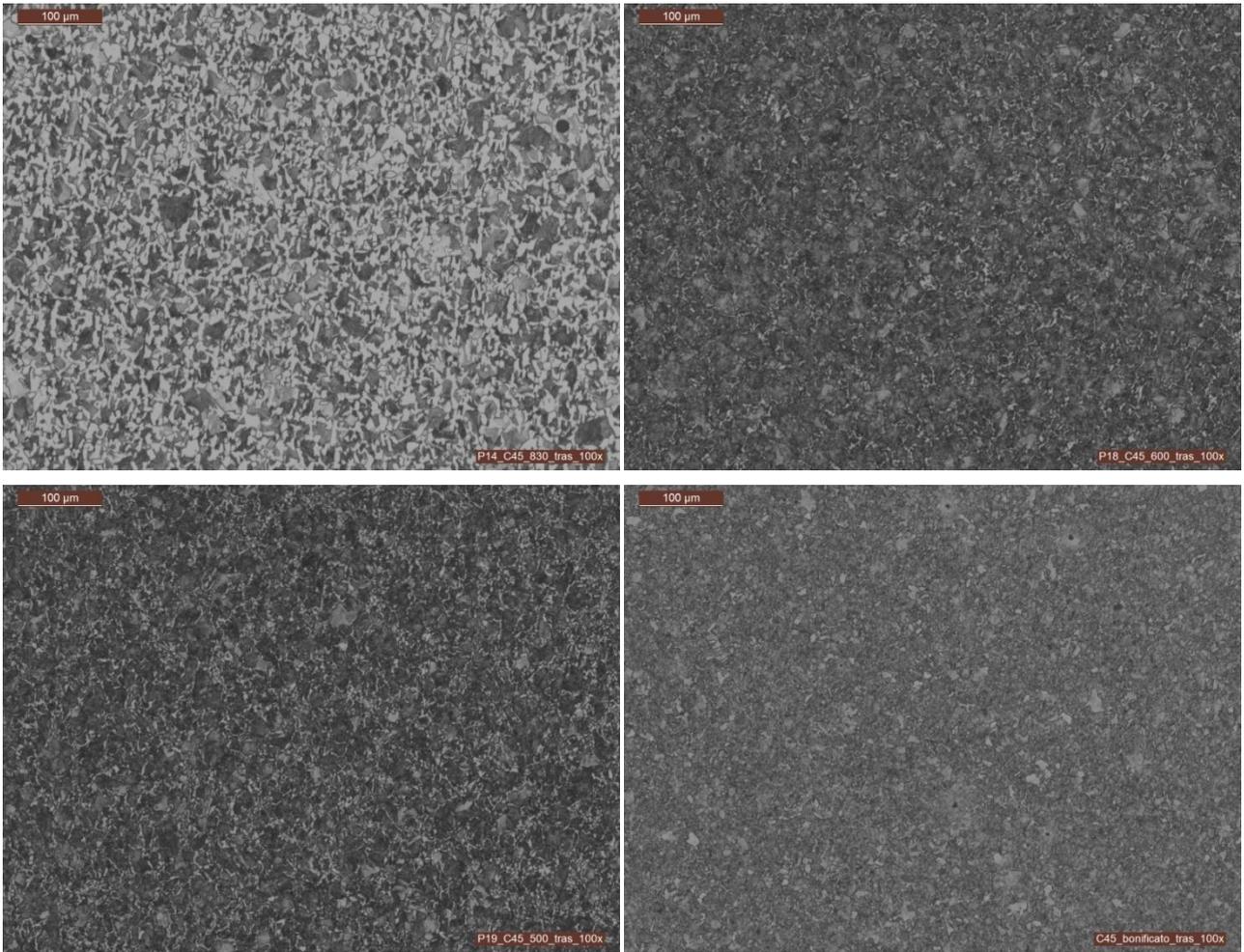
**Fig.45 – C45 longitudinale 100x**



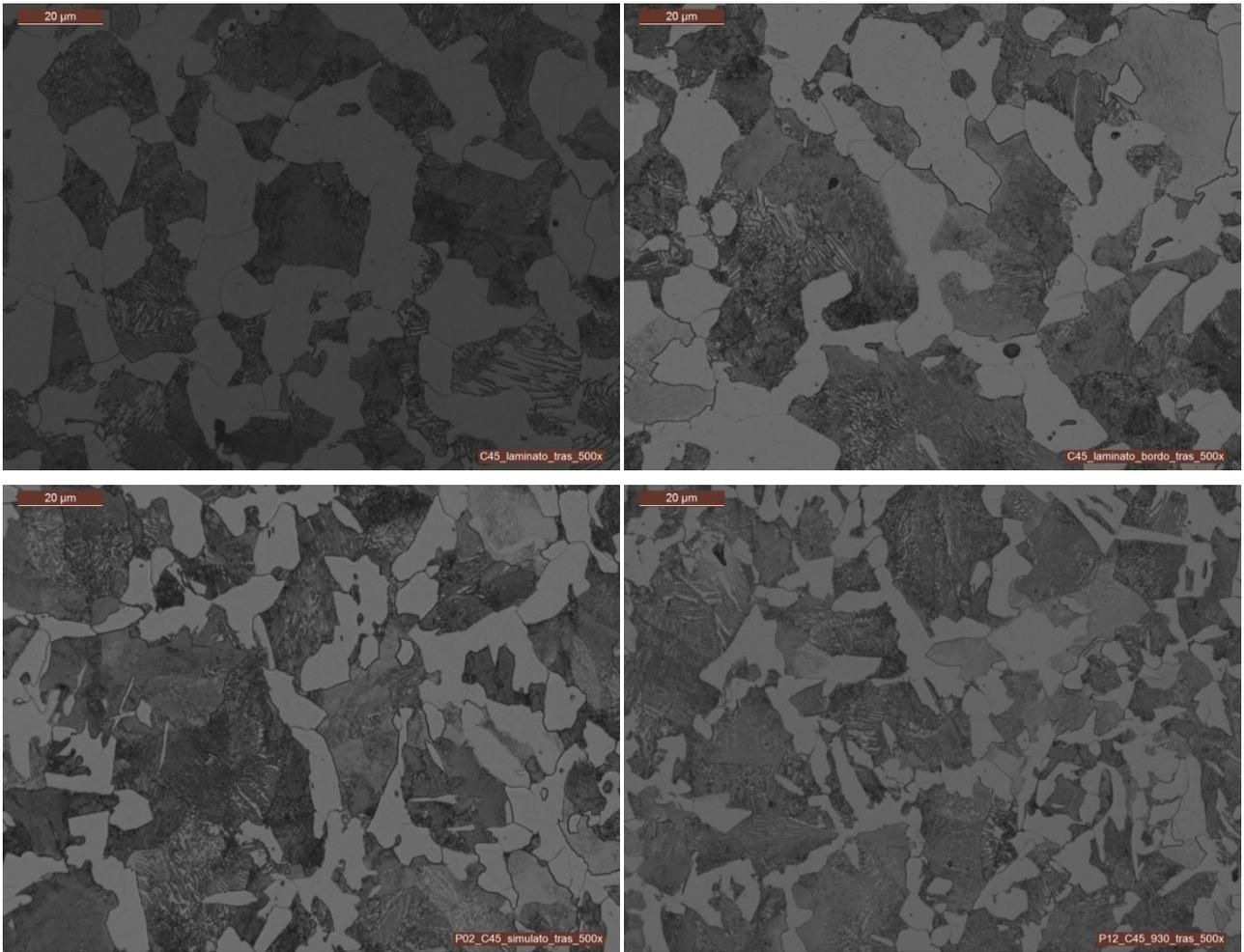
**Fig.46 – C45 longitudinale 500x**



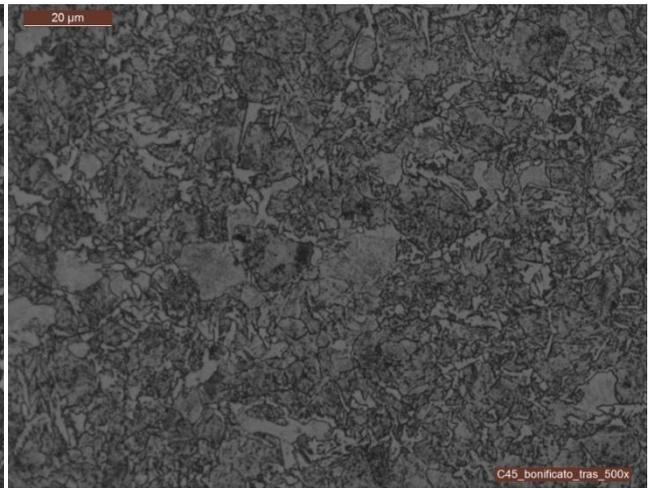
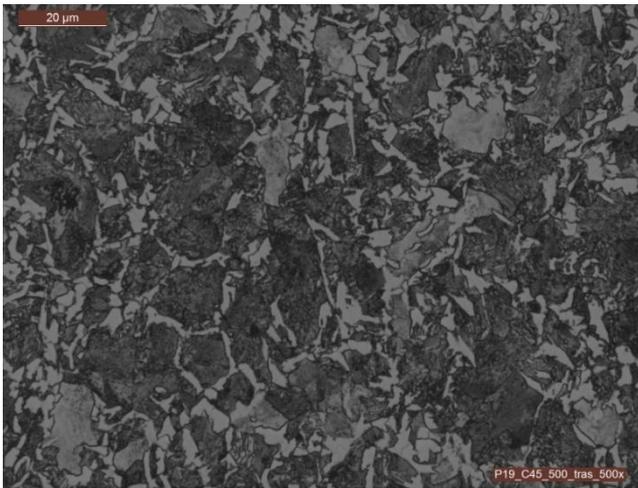
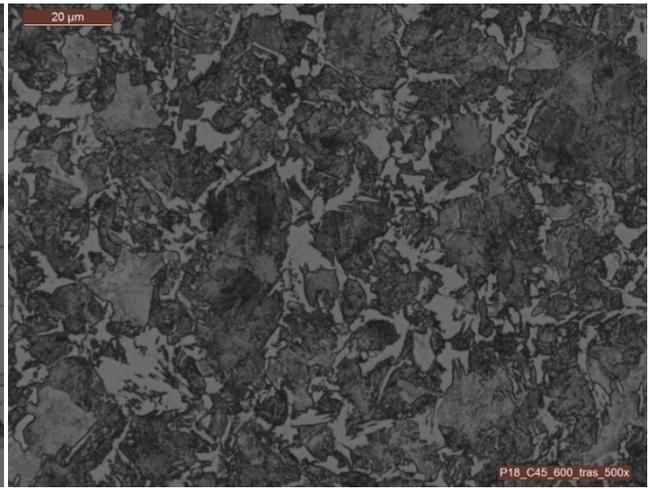
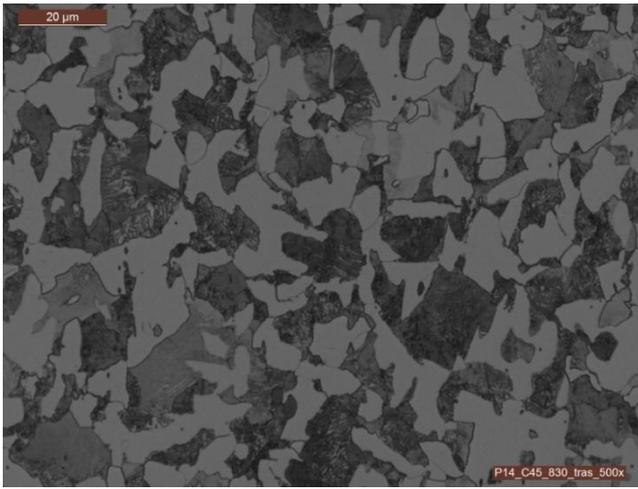
**Fig.47 a – C45 trasversale 100x**



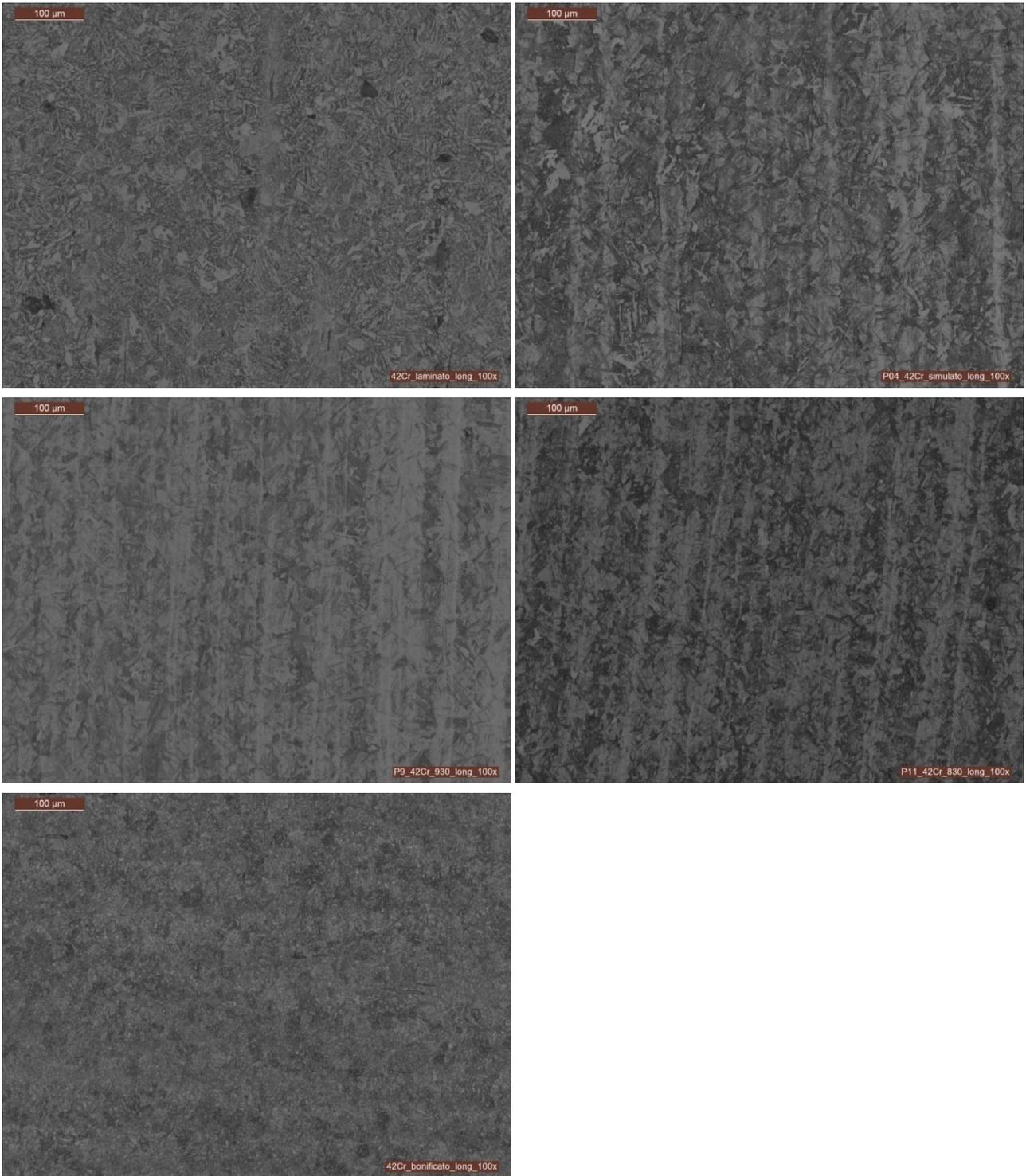
**Fig.47 b – C45 trasversale 100x**



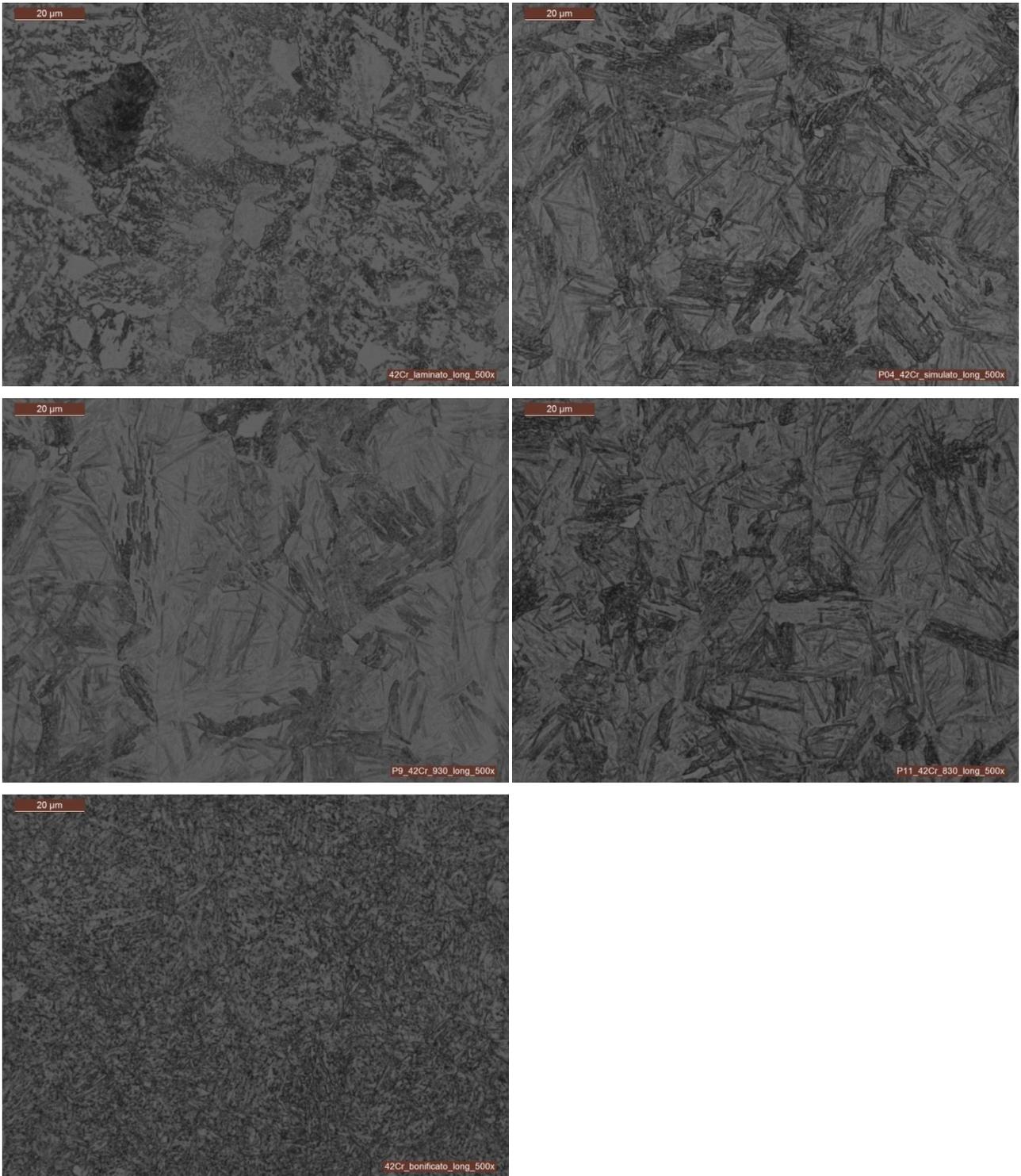
**Fig.48 a – C45 trasversale 500x**



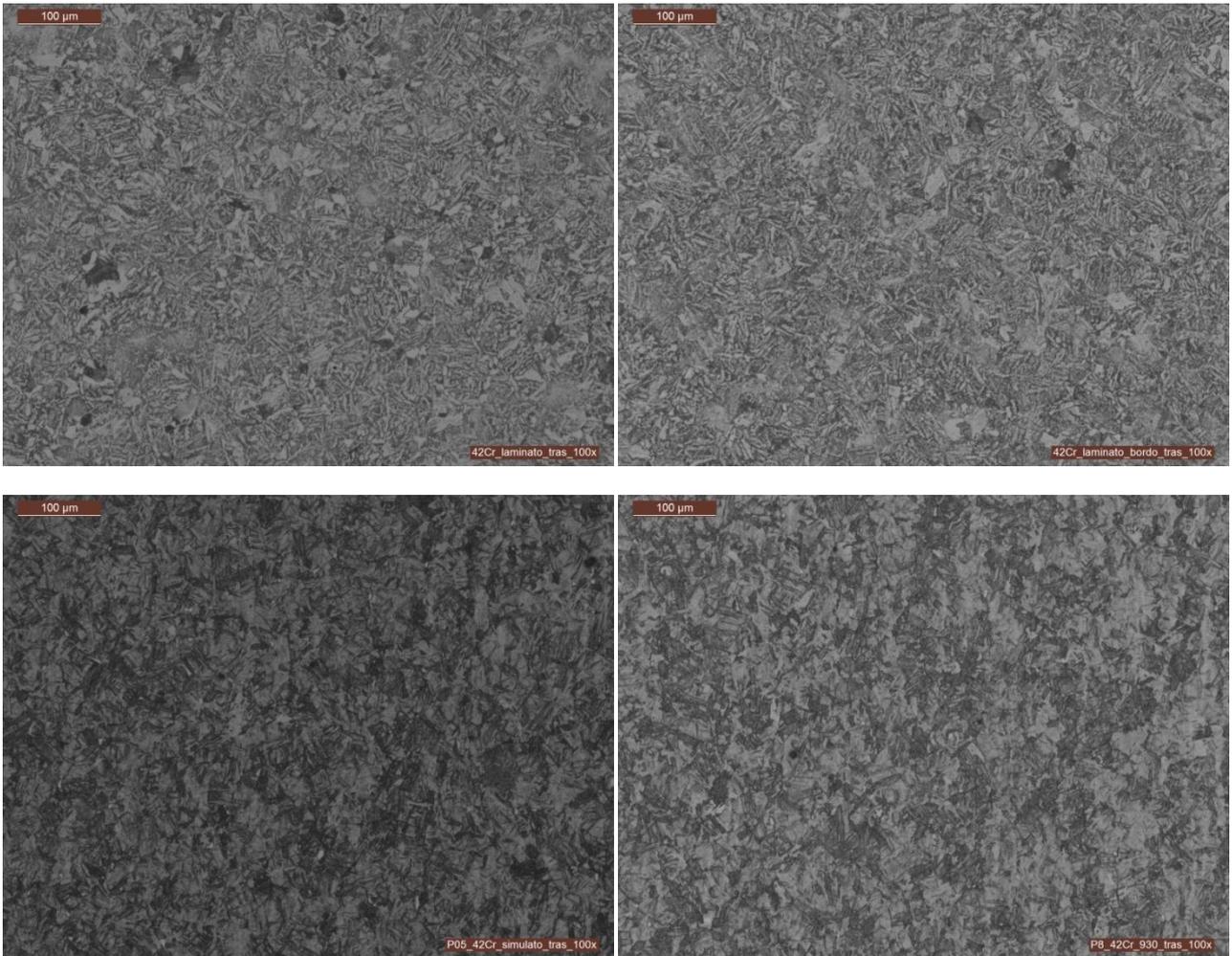
**Fig.48 b – C45 trasversale 500x**



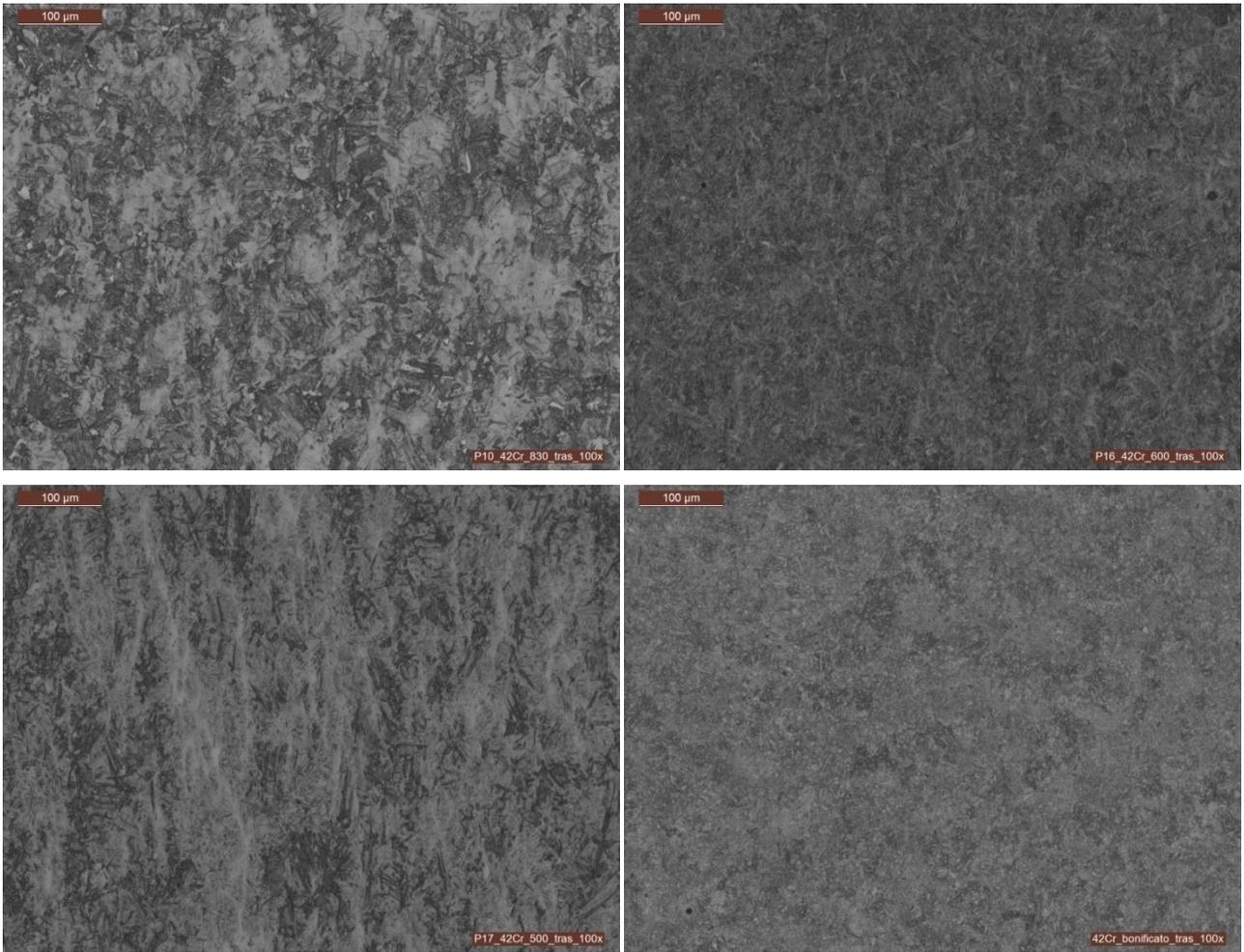
**Fig.49 – 42CrMoS4 longitudinale 100x**



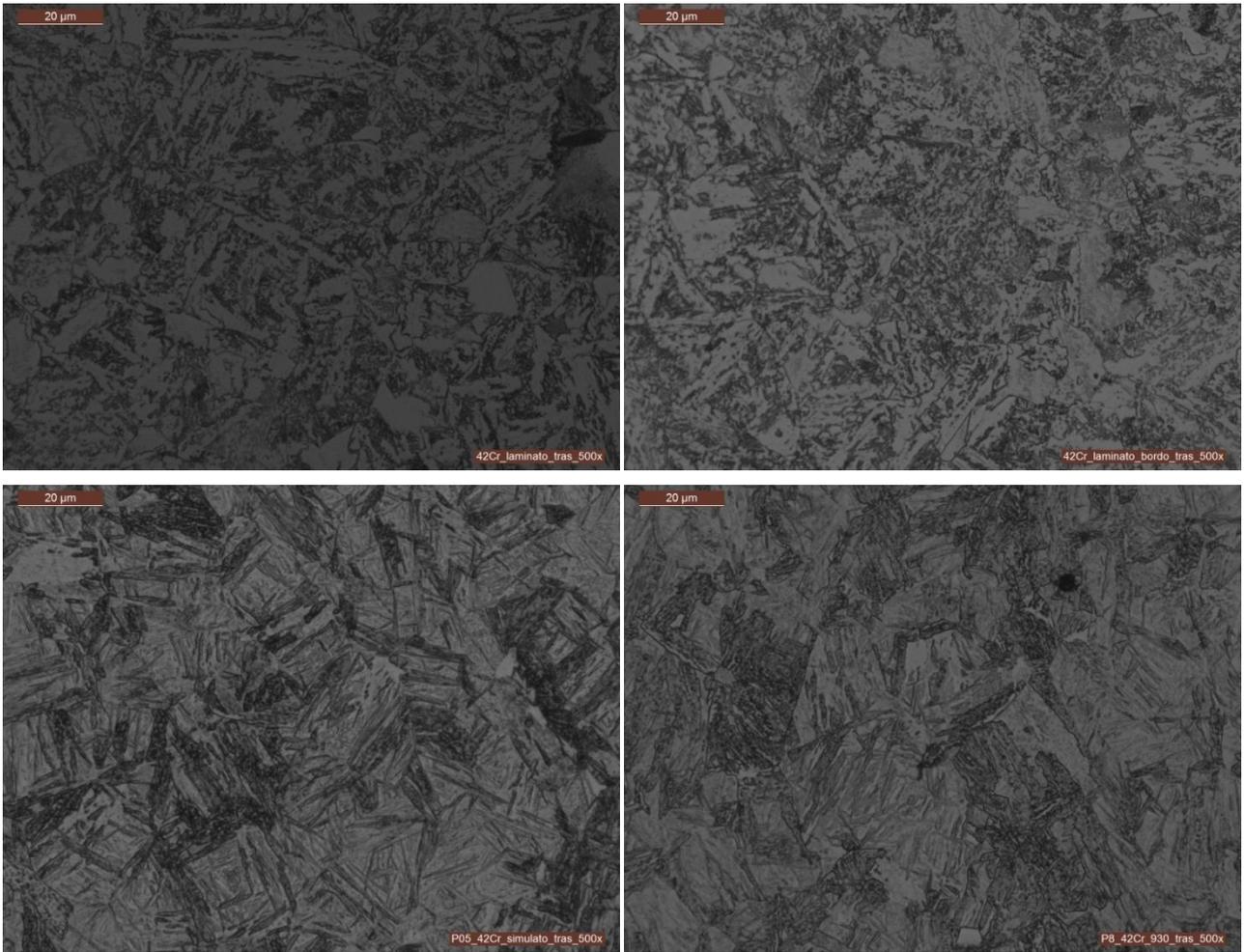
**Fig.50 – 42CrMoS4 longitudinale 500x**



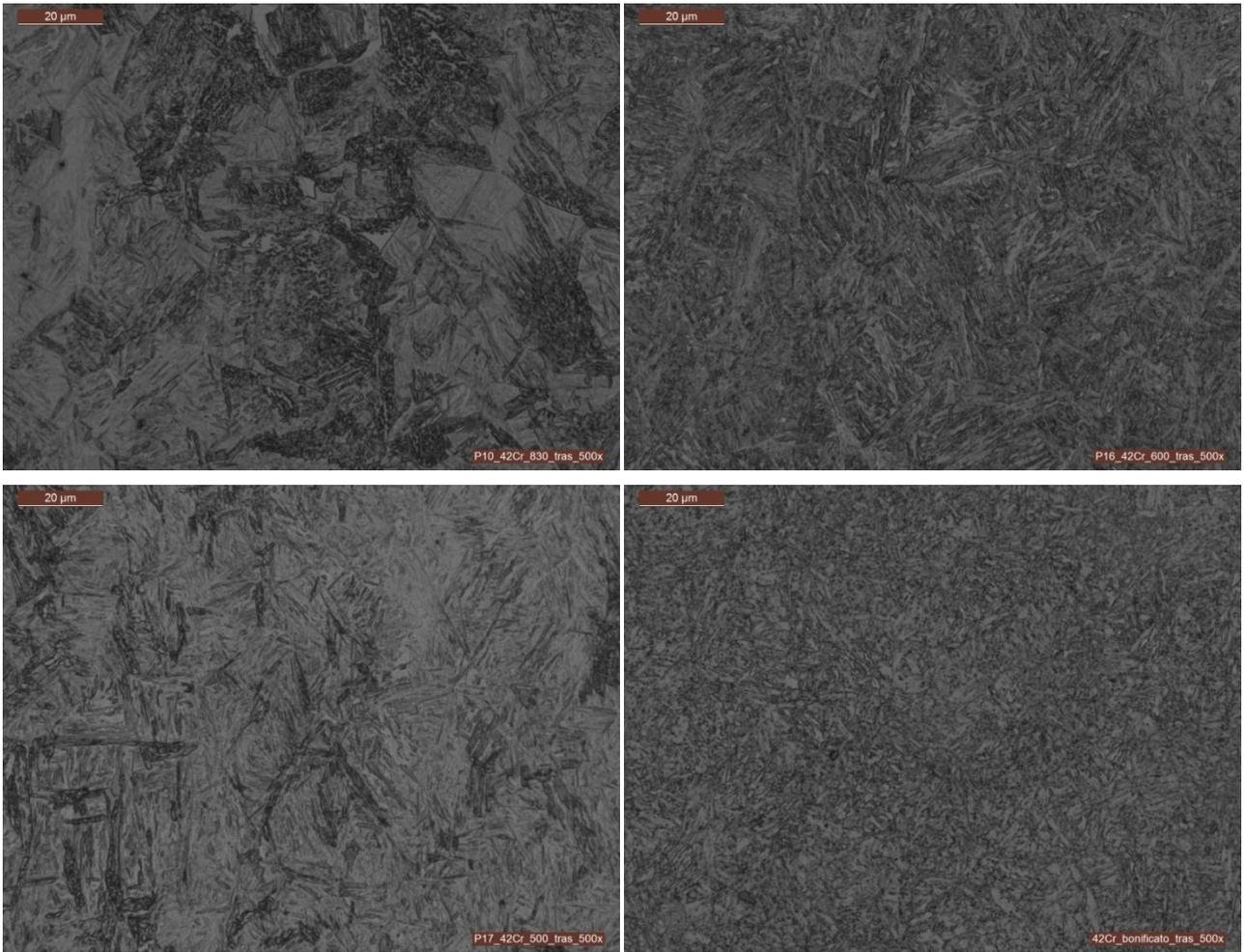
**Fig.51 a – 42CrMoS4 trasversale 100x**



**Fig.51 b – 42CrMoS4 trasversale 100x**



**Fig.52 a – 42CrMoS4 trasversale 500x**



**Fig.52 b – 42CrMoS4 trasversale 500x**

## ALLEGATO B – PROVE DI TRAZIONE

In Fig.59 c'è un errore di andamento della curva per uno scivolamento dell'estensimetro appena dopo lo snervamento.

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]	HB	HV
C45 LAMINATO	343	656	30.5	195	205
C45 SIMULATO	312	655	28.3	195	205
C45 930	384	699	29.6	209	221
C45 830	417	719	24.8	215	227
C45 600	567	853	21.7	260	276
C45 500	555	844	21.7	257	273
C45 BONIFICATO	503	768	27.5	230	244

Tab.23 – caratteristiche meccaniche C45

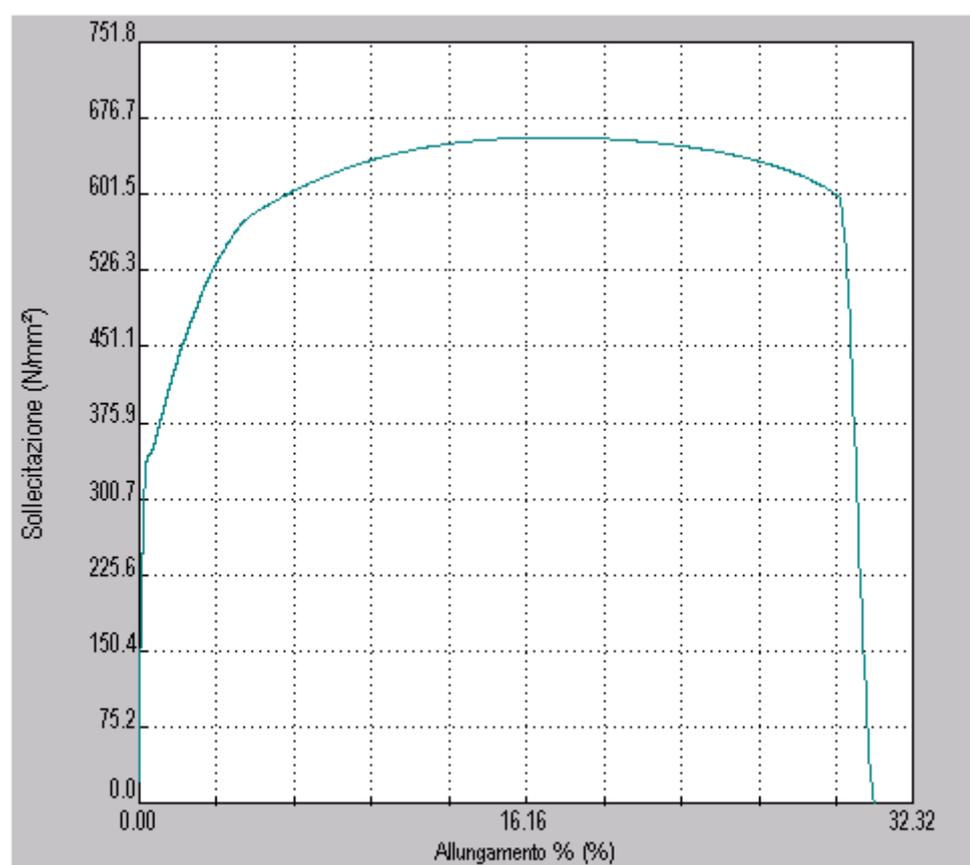
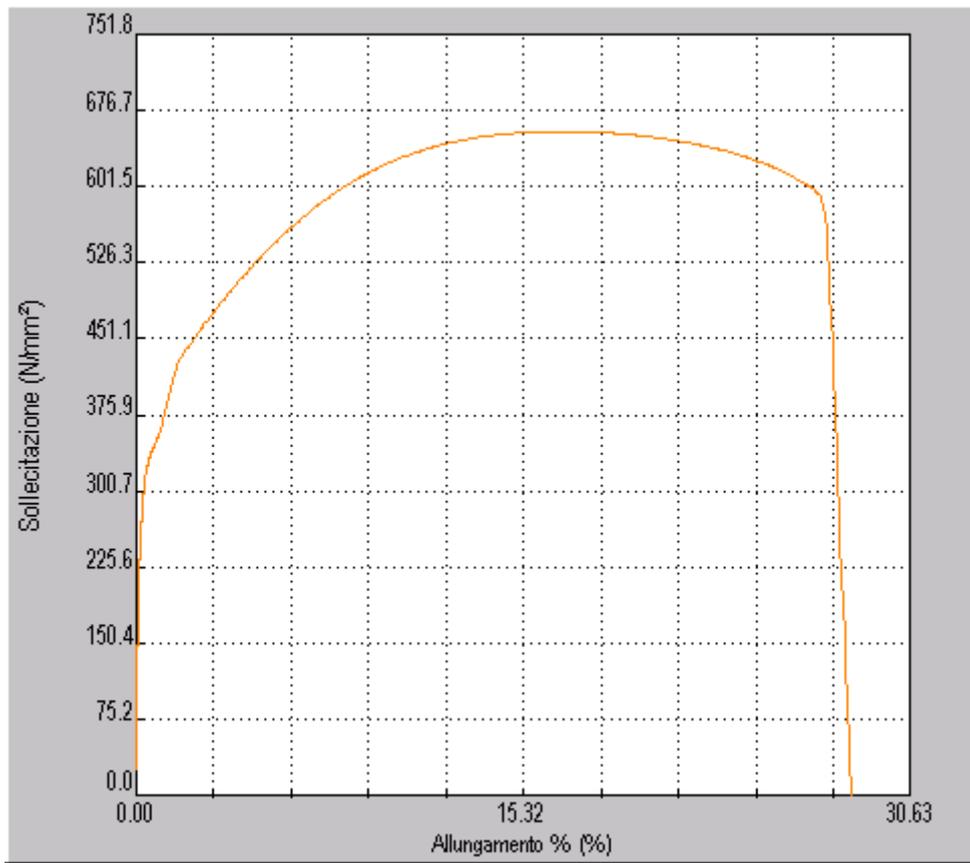
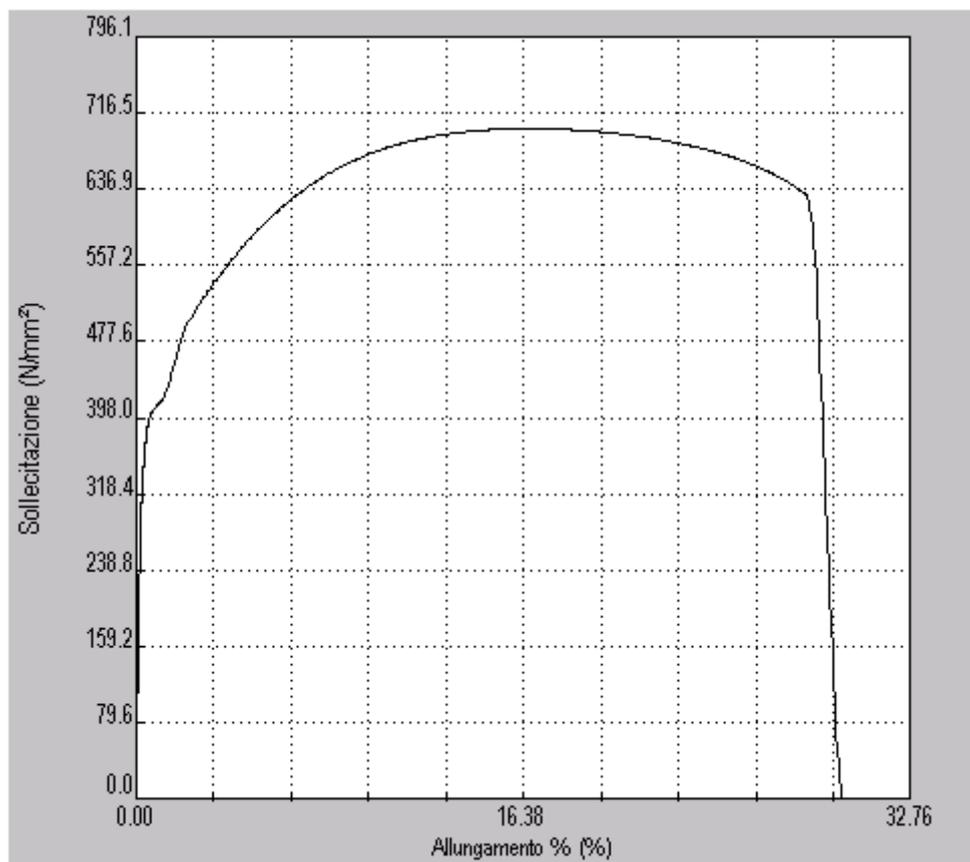


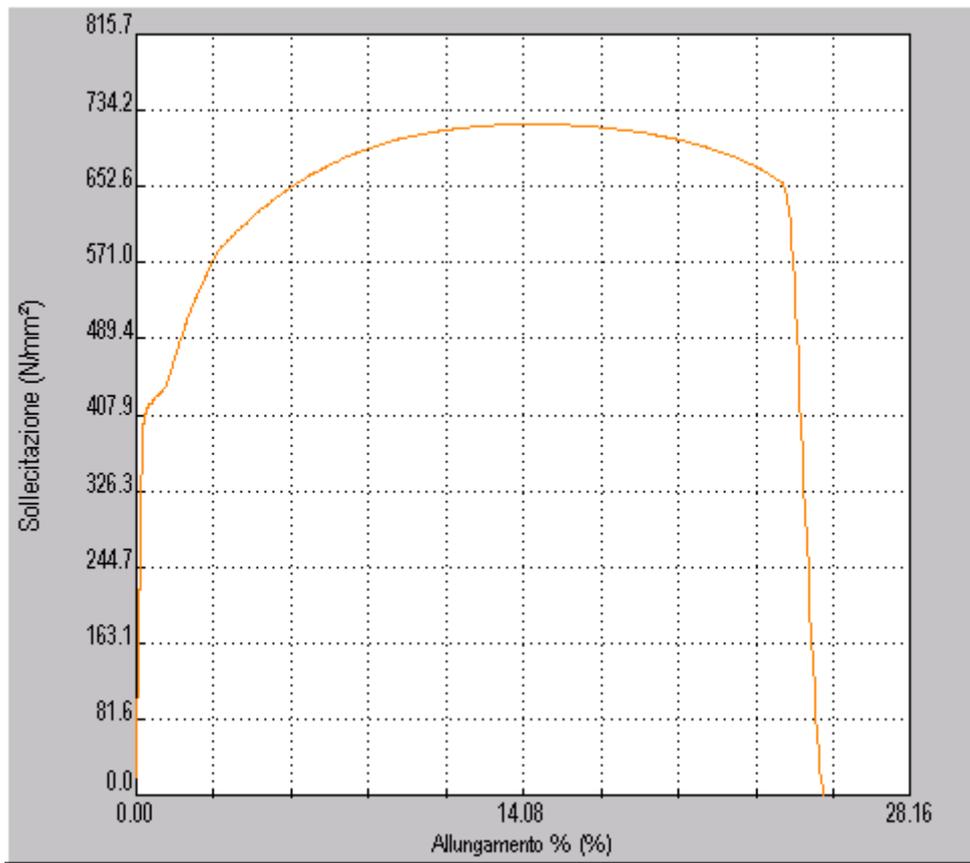
Fig.53 – trazione C45 laminato



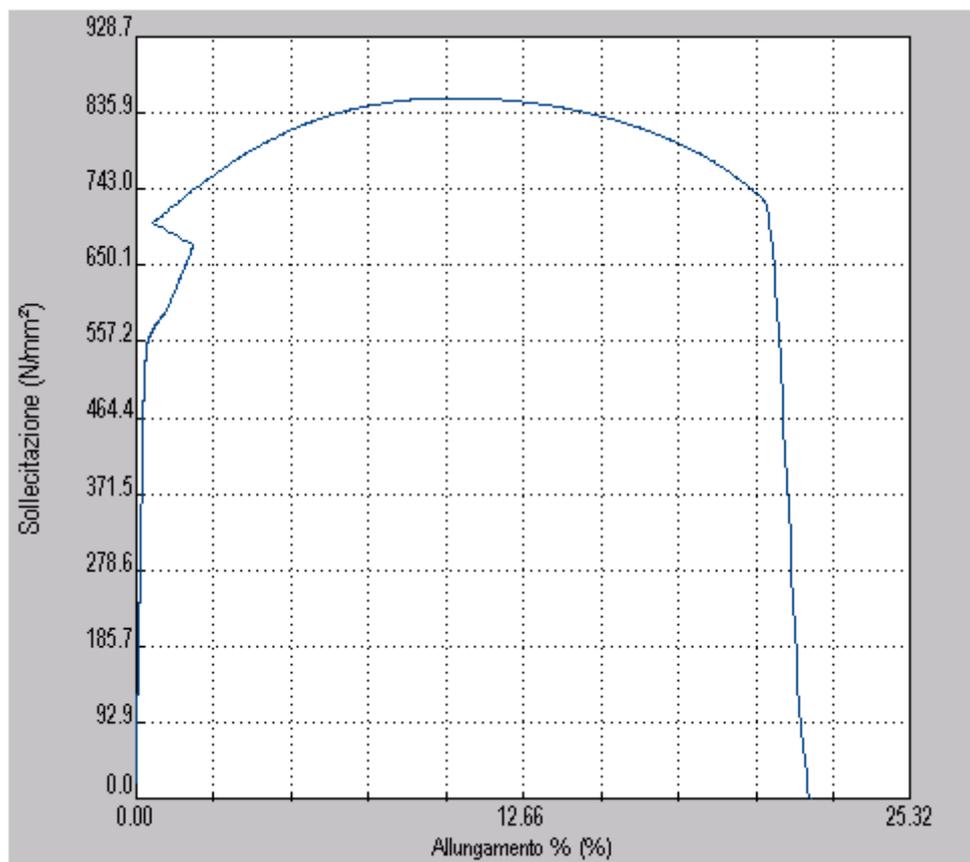
**Fig.54 – trazione C45 simulato**



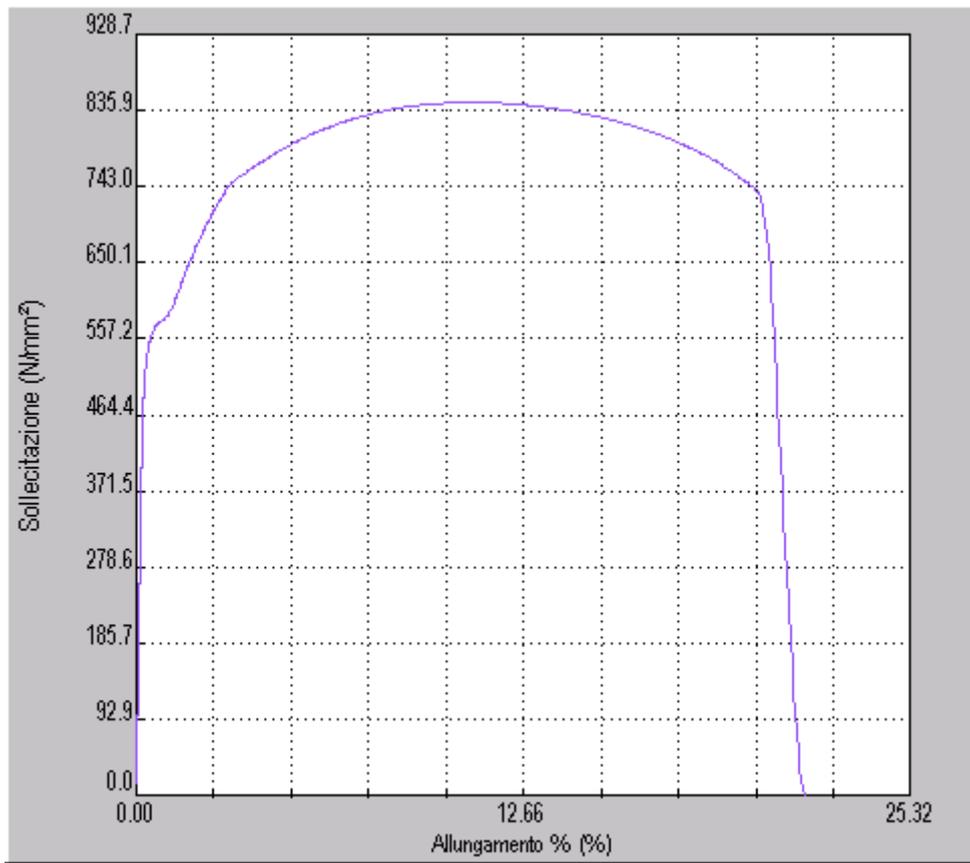
**Fig.55 – trazione C45 ciclo 930°C**



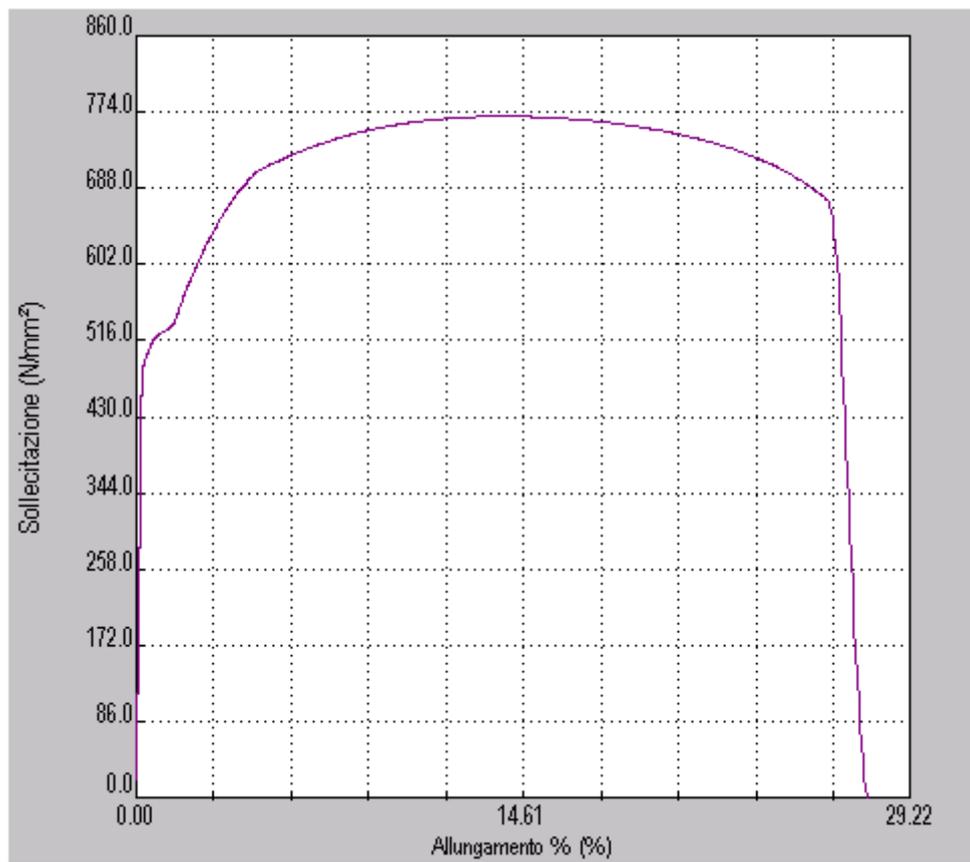
**Fig.56 – trazione C45 ciclo 830°C**



**Fig.57 – trazione C45 ciclo 600°C**



**Fig.58 – trazione C45 ciclo 500°C**



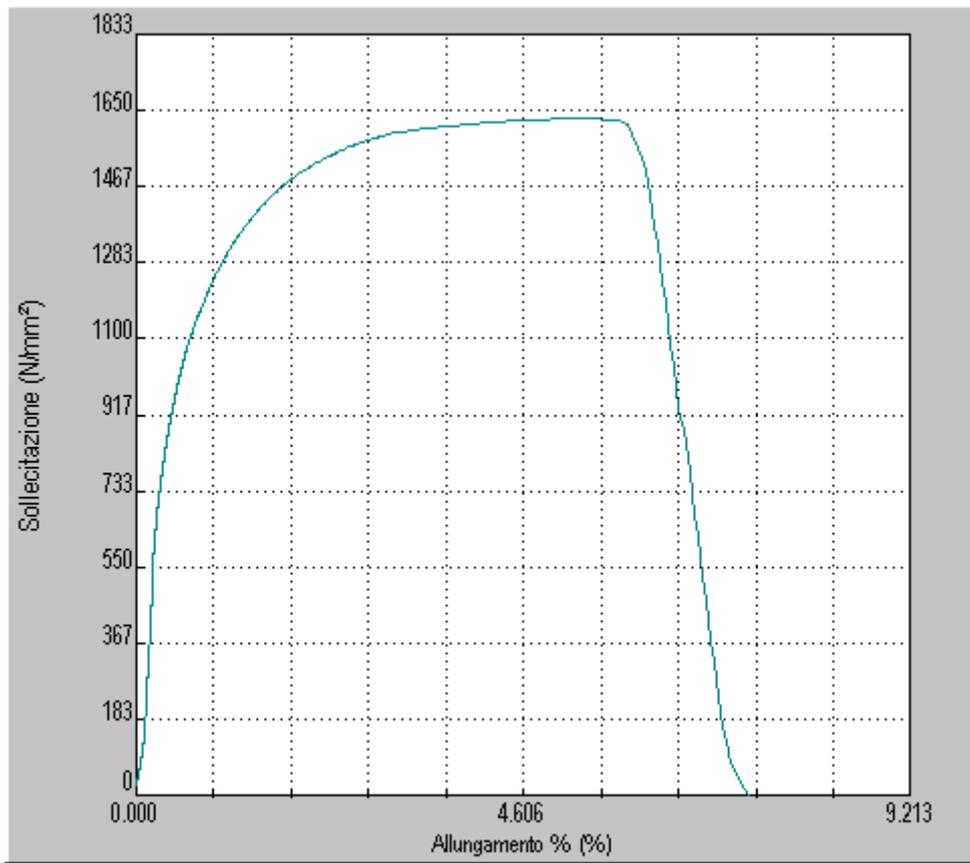
**Fig.59 – trazione C45 bonificato**

	Rp02 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]	HB	HV
42CrMoS4 SIMULATO	1106	1627	6.9	457	488
42CrMoS4 LAMINATO	756	1023	17	308	326
42CrMoS4 930	1062	1538	7.5	438	466
42CrMoS4 830	1158	1586	8.3	448	478
42CrMoS4 600	1244	1739	9.5	485	516
42CrMoS4 BONIFICATO	979	1104	18.5	350	371

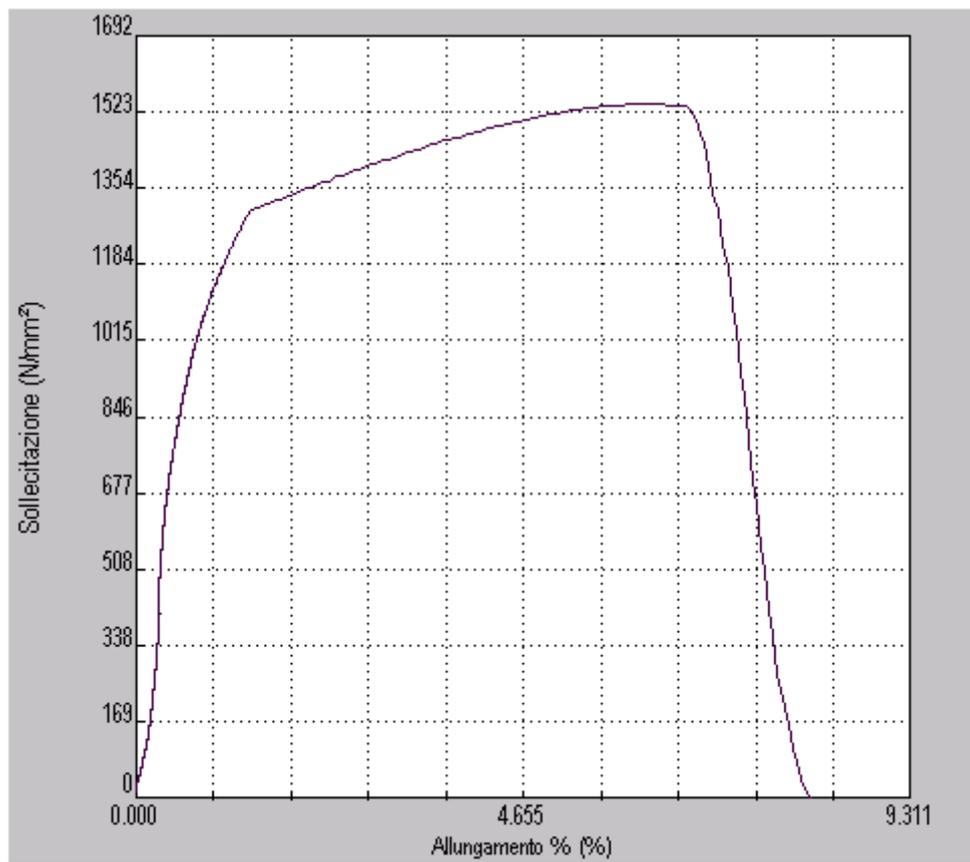
**Tab.24 – caratteristiche meccaniche 42CrMoS4**



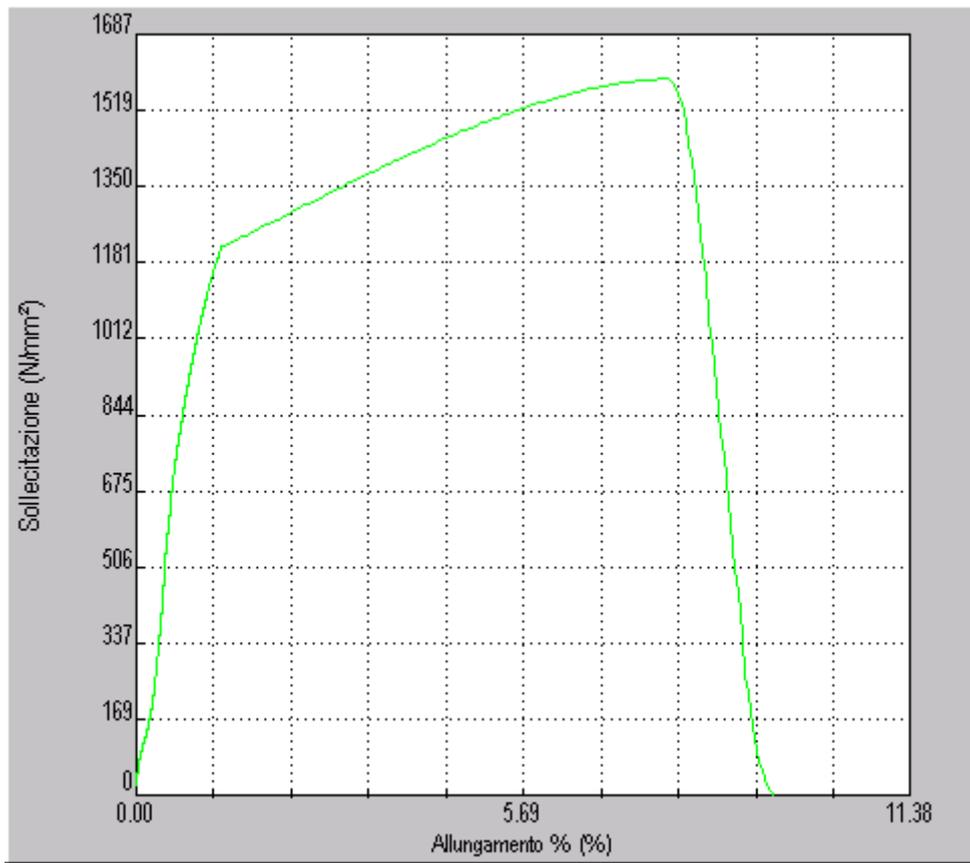
**Fig.60 – trazione 42CrMoS4 laminato**



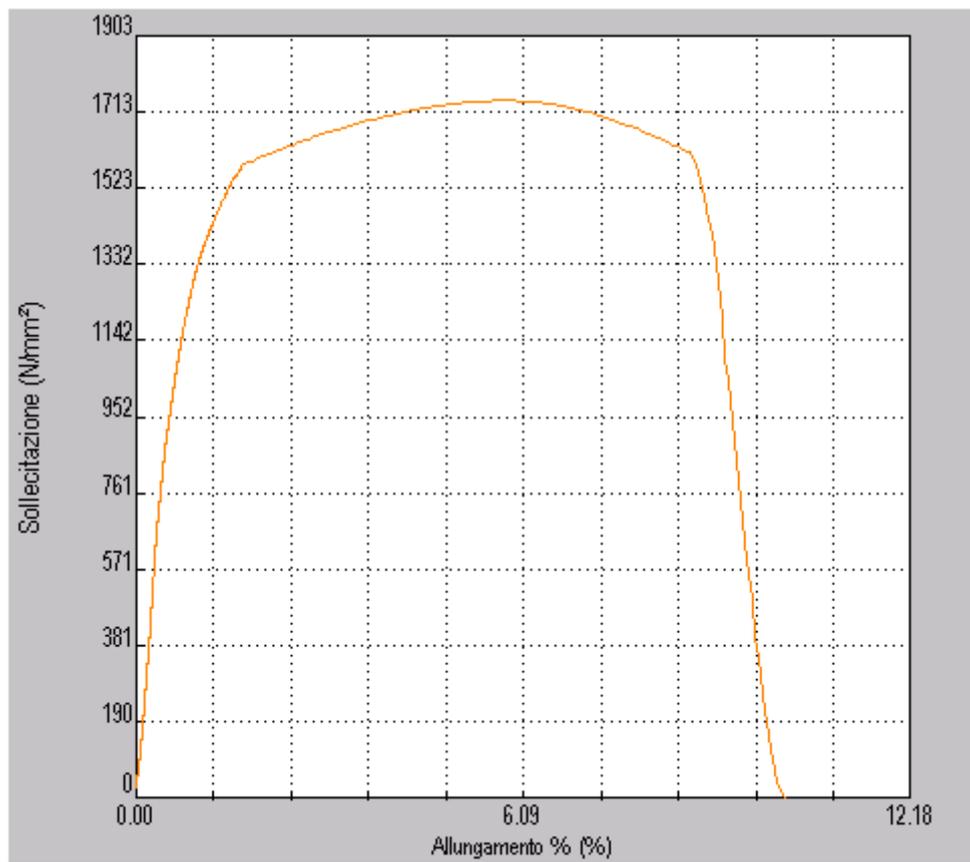
**Fig.61 – trazione 42CrMoS4 simulato**



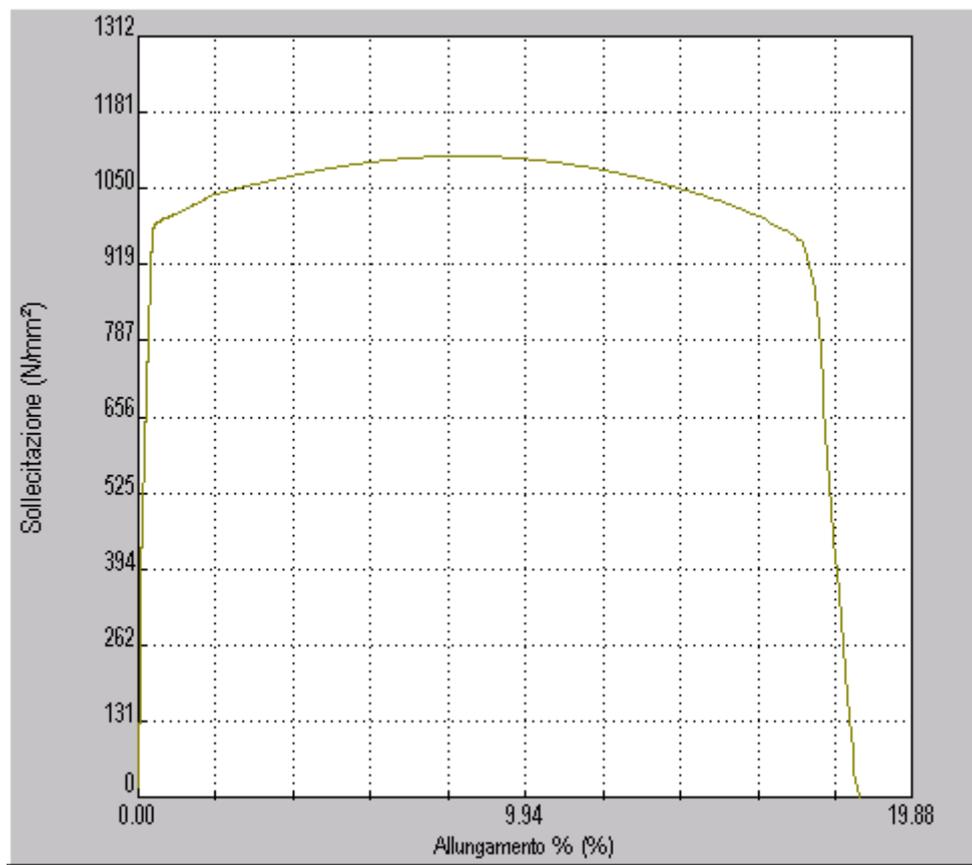
**Fig.62 – trazione 42CrMoS4 ciclo 930°C**



**Fig.63 – trazione 42CrMoS4 ciclo 830°C**



**Fig.64 – trazione 42CrMoS4 ciclo 600°C**



**Fig.65 – trazione 42CrMoS4 bonificato**

## ***BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA***

I - DSI Dynamic Systems Inc., “Gleeble® Users Workshop 2007 - Gleeble® Systems and Applications”, TUDelft, 2007.

II – Zygmunt Wusatowski, “*Foundamentals of rolling*”, Ed. Pergamon Press, 1969.

III - [https://it.wikipedia.org/wiki/Tempra#Tempra\\_bainitica\\_\(austempering\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Tempra#Tempra_bainitica_(austempering))

### *tesi di laurea*

IV - Luca D’Amico, “*Microstruttura e proprietà meccaniche di barre di acciaio laminate a caldo*”, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2016.

V – Milena Viviana Fumarola, “*Linee di produzione siderurgica di acciai bonificati ad induzio: difetti e rimedi*”, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2015.

### *documentazioni tecniche*

VI – Impresa AQM S.r.l., Diagramma CCT dell’acciaio C45 UNI EN ISO 4957, 2002.

VII – Impresa Dorrember Edelstahl, Diagramma CCT dell’acciaio 42CrMoS4Mo4 DIN EN 10083-1, 2006.

### *norme tecniche*

VIII – UNI EN 10083-2 “*Condizioni tecniche di fornitura per acciai non legati*”, 2006.

IX – UNI EN 10083-3 “*Condizioni tecniche di fornitura per acciai legati*”, 2006.

### *comunicazioni private*

X – R. Valentini (Università di Pisa).

XI – P.E. Martini (Riva Acciaio).