



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

**INFLUENZA DEL RAFFREDDAMENTO IN PLACCA  
SULLA RESILIENZA DI LAMINATI MERCANTILI  
IN ACCIAIO AL CARBONIO**

Relatore: Prof. Dabalà Manuele

Correlatori: Ing. Luca Pezzato

Ing. Denise Hanoz

Riccardo Rossato, 1153062

Anno Accademico 2018/2019



# Indice

<b>Indice</b>	<b>2</b>
<b>Riassunto</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>Capitolo 1</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b> <b>Gli acciai al carbonio</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b> <b>Acciai speciali da costruzione</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b> <b>Normativa UNI EN 10025-2</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b> <b>Laminazione a caldo</b>	<b>17</b>
1.4.1    Generalità	17
1.4.2    Influenza della laminazione sulla microstruttura di acciaio al carbonio	17
1.4.3    Tipologia di laminatoio	19
<b>1.5</b> <b>Deformazione plastica a caldo</b>	<b>22</b>
<b>1.6</b> <b>Ricristallizzazione dell'acciaio al carbonio</b>	<b>22</b>
<b>Capitolo 2</b>	<b>25</b>
<b>Materiali e metodi</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b> <b>Materiale analizzato</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b> <b>Software JMP per analisi statistica, variabilità di resilienza di profili laminati</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b> <b>La prova di resilienza</b>	<b>32</b>
<b>2.4</b> <b>Tecniche metallografiche</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b> <b>Microscopio ottico metallografico</b>	<b>37</b>
<b>2.6</b> <b>SEM (scanning electron microscope)</b>	<b>38</b>
<b>2.7</b> <b>Termocamera</b>	<b>40</b>
<b>2.8</b> <b>Diffrattometro XRD</b>	<b>41</b>
<b>Capitolo 3</b>	<b>44</b>
<b>Risultati sperimentali</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b> <b>Analisi statistica</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b> <b>Tentativo di modellizzazione della variabilità della resilienza applicando la tecnica di Multiple Regression</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b> <b>Temperatura di laminazione</b>	<b>50</b>
<b>3.4</b> <b>Placca di raffreddamento</b>	<b>52</b>
<b>3.5</b> <b>Analisi del raffreddamento termico con JMatPro</b>	<b>54</b>
<b>3.6</b> <b>Analisi micrografie e superficie di frattura dei provini Charpy</b>	<b>64</b>
3.5.1    Profili angolari LST	65
3.5.2    Profili piatti PIA	71

3.5.3	Profili angolari ANG	77
<b>3.7</b>	<b>Analisi inclusionale SEM</b>	<b>81</b>
<b>3.8</b>	<b>Analisi tensioni residue relative al profilo AFV21</b>	<b>85</b>
	<b>Conclusioni</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>90</b>

# Riassunto

*Nel seguente lavoro di tesi è stata affrontata la problematica della variabilità di resilienza nei prodotti laminati a caldo, focalizzando l'attenzione nella fase finale di raffreddamento in placca.*

*In un primo momento si è resa necessaria l'analisi statistica per dare una dimensione della dispersione ai valori delle prove di resilienza. I dati delle suddette prove riguardano profili laminati nell'ultimo anno di produzione, permettendo quindi di inquadrare meglio la problematica.*

*In un secondo momento è stata posta l'attenzione alle temperature. Sono stati utilizzati strumenti già presenti in linea e il relativo software di gestione Ibanalyzer per osservare la variazione delle temperature del semiprodotto all'uscita delle gabbie sbozzatrici, fino all'uscita del treno di laminazione. Per quanto riguarda il raffreddamento durante l'attraversamento della placca, ossia fino al raggiungimento della via rulli, è stato necessario rilevare le temperature manualmente tramite termocamera.*

*In ultima istanza è stato utilizzato un approccio sperimentale. La parte di test di resilienza è stata conseguita presso il Laboratorio controllo qualità dell'Acciaieria AFV Beltrame. Qui sono stati testati i provini Charpy dei 15 spezzoni di laminati, noti dal punto di vista termico. La fase di preparazione e lucidatura dei campioni, produzione di micrografie e la relativa parte di analisi strumentale è stata invece effettuata presso il Laboratorio di metallurgia del Dipartimento di Ingegneria industriale dell'Università di Padova.*



# Abstract

The following thesis deals with the set of problems about resilience variability in hot rolled products, focusing mainly on the final cooling phase of the plate.

At first, the values from resilience tests were analysed with statistical methods to quantify their dispersion. These data were obtained from hot rolled profiles produced during last year; such a period of analysis allows understanding better the problem and its different causes.

Later on, process temperatures were considered, standard tools already set along the production line were used for the measurements between the exit from roughing cages and the exit of the rolling mill the results were processed with Ibanalyzer software. During the crossing of the plate, until the Runout table, a thermal imaging camera makes it possible to detect temperatures where there were not any other tools available.

Finally, 15 Charpy hot rolled samples with defined thermal history underwent resilience tests in quality control laboratory at AFV Beltrame, whereas pieces preparation, polishing, micrographic and instrumental analysis were carried on in at the metallurgy lab of Industrial Engineering Department in Padova.



# Introduzione

Il settore siderurgico in Italia svolge da sempre un ruolo di primaria importanza per l'economia nazionale. L'acciaio è considerato un materiale insostituibile per diversi settori come: l'industria automobilistica, il settore delle costruzioni, Oil and Gas, il settore navale, dei trasporti e molti altri ancora.

La metallurgia secondaria è il processo più diffuso per la produzione di acciaio, che avviene mediante la fusione del rottame di ferro tramite forno fusorio elettrico (EAF). Questa tipologia di produzione di acciaio dà origine, inoltre, al riciclo del materiale ferroso e quindi alla raccolta capillare di scarti di natura metallica. Al fine di mantenere la produzione costante, pertanto, le acciaierie acquistano in anticipo il rottame di ferro e lo depositano negli stoccaggi del parco rottame, così evitando eventuali fluttuazioni di prezzo.

In tale ambito la tecnologia più diffusa per dare forma ai semiprodotto di acciaio consiste nella deformazione plastica a caldo, che consente di produrre sia prodotti piani, come lamiere e coils, che prodotti lunghi, come barre e profili di varia forma e dimensione.

La produzione di acciaio in Italia è piuttosto massiccia. Nel 2018 sono state complessivamente prodotte dal comparto siderurgico italiano circa 24 milioni di tonnellate, posizionando l'Italia al secondo posto a livello europeo per quantità prodotta, dietro alla Germania. La I quantitativi prodotti da Francia e Spagna sono inferiori a quelli italiani e non vanno oltre alle 14 - 15 tonnellate all'anno. Ciò dimostra che, in un settore così delicato ed esposto alla concorrenza cinese, l'Italia mantiene un ruolo competitivo sul mercato.

In questo contesto si colloca l'azienda AFV Beltrame di Vicenza, da più di un cent'anni specializzata nella produzione di acciaio al carbonio partendo dal rottame. Qui la formatura dell'acciaio viene fatta tramite laminazione a caldo di due laminatoi di diversa conformazione per la produzione di travi e laminati mercantili di varia forma e sezione. Ciò che viene prodotto è destinato in prevalenza al settore edilizio, dei trasporti e metalmeccanico, i quali richiedono specifiche prestazioni sia di tipo meccanico che di tipo chimico.

Risulta pertanto fondamentale all'interno di un impianto di produzione come quello appena descritto un costante monitoraggio delle prestazioni della produzione dell'acciaio: elevate prestazioni consentono, infatti, una produzione più efficiente in termini di affidabilità del prodotto e di risparmio economico.

I prodotti lunghi laminati a caldo in acciaio sono suddivisi sul mercato in due macro-categorie: travi e laminati mercantili e la differenza è sostanzialmente di tipo geometrico. Le travi sono largamente utilizzate in edilizia sia per le strutture principali che quelle secondarie, la cui sezione retta di tali profili ricorda quella delle lettere H, I, U e la cui anima ha un'altezza uguale o superiore a 80mm. I laminati mercantili invece, comprendono una più ampia gamma di forme tra cui, barre a sezione piatta, tonda, poligonale, non destinate all'armatura del cemento e profili, con sezione a L, T, I, U, H del tutto identici alle "travi" tranne che per l'altezza dell'anima che è inferiore a 80mm, quindi non tutti i laminati mercantili trovano impiego in edilizia.

La seguente tesi ha lo scopo di rintracciare alcune delle cause che provocano la variabilità della resilienza in seguito al diverso raffreddamento in placca che i prodotti laminati subiscono per la loro geometria diversa.

In primo luogo, quindi, si sono eseguite alcune misurazioni di temperatura direttamente sui prodotti scaricati nella placca al fine di calcolare i tempi di raffreddamento. In un secondo momento, sono state effettuate analisi metallografiche per indagare le fasi costituenti la microstruttura dell'acciaio, il tutto tramite l'utilizzo di un microscopio ottico metallografico e di software per classificarne le caratteristiche.

# Capitolo 1

## 1.1 Gli acciai al carbonio

L'acciaio da sempre ha svolto un ruolo di primaria importanza per la vastità dei suoi impieghi. Esso infatti, grazie allo sviluppo del comparto siderurgico della metallurgia secondaria, è diventato il materiale predominante in molti settori. Gli acciai si suddividono in classificazioni, gruppi e sottogruppi, in base alla composizione chimica, caratteristiche meccaniche, impiego. Gli acciai a basso tenore di carbonio prendono la denominazione di acciaio dolce ( $C < 30\%$ ) o extra dolce ( $C < 15\%$ ), a seconda della percentuale di carbonio contenuta, e sono quelli più richiesti dal mercato: in termini quantitativi, circa l'80% degli acciai.

## 1.2 Acciai speciali da costruzione

Gli acciai speciali da costruzione S355JR sono caratterizzati dal basso tenore di carbonio e devono garantire proprietà meccaniche entro certi valori specifici, relativamente alla resistenza meccanica a trazione, snervamento e resilienza. Questa tipologia di acciaio può infatti essere messa in opera (as rolled), senza trattamenti termici; per alcuni utilizzi specifici può essere necessario eseguire una distensione o una normalizzazione, al fine di uniformare la microstruttura o agire sullo stato tensionale interno del prodotto laminato. Sia per la lavorabilità che economicità, questa tipologia di acciai è adatta a molte applicazioni. Non è difficile trovare sul mercato una vasta gamma di prodotti laminati, come piatti, lamiere, nastri, barre, tubi, forgiati.

Tra le varie categorie di acciai da costruzione vengono considerati quelli del **Gruppo 1** secondo la normativa **UNI EN 10027-1**, acciai designati in base al loro impiego e alle loro caratteristiche meccaniche e fisiche. Fanno parte di questo gruppo gli **ACCIAI SPECIALI DA COSTRUZIONE** per impieghi strutturali indicati con la lettera "S". La classificazione e la designazione degli acciai sono regolamentate da norme europee; le più recenti, fatte proprie in Italia dall'Ente Nazionale di Unificazione per l'Industria, sono:

UNI EN 10027-parte 1 per quanto riguarda la *designazione alfanumerica*

UNI EN 10027-parte 2 per quanto riguarda la *designazione numerica*

La parte 1 della normativa UNI EN 10027, *alfanumerica* descrive gli acciai del 1° gruppo: **designati in base al loro impiego o alle caratteristiche meccaniche o fisiche**; vengono identificati nel modo seguente:

**[G] + Simbolo impiego + caratteristiche + simbolo per ulteriori indicazioni**

Acciai del 1° gruppo		
Impiego	Caratteristiche	Ulteriori indicazioni
S (per impieghi strutturali)	Carico unitario di snervamento	N normalizzato C adatto alla formatura a freddo Q bonificato JR resilienza >27J a 20 °C J0 resilienza >27J a 0 °C JR resilienza >27J a -20 °C KR resilienza >40J a 20 °C K0 resilienza >40J a 0 °C KR resilienza >40J a -20 °C LR resilienza >60J a 20 °C L0 resilienza >60J a 0 °C LR resilienza >60J a -20 °C G1 acciaio effervescente G2 acciaio calmato G3 stato di disossidazione non definito
P (impieghi sotto pressione)		
L (tubi di condutture)		
E (per costruzioni meccaniche)		
B (per cemento armato)		
Y (per cemento armato precompresso)	Carico unitario di rottura	
R (per rotaie)	Carico unitario di rottura	
H (prodotti piani laminati a freddo ad alta resistenza per imbutitura a freddo)		
D (prodotti piani per formatura a freddo)		
T (banda nera, stagnata e cromata per imballaggi)		
M (acciai magnetici)		

Figura 1 prospetto normativa uni en 10027

NB: G è presente solo negli acciai per getti.

Un esempio di acciaio speciale da costruzione è **S355J2**:

S acciaio per impieghi strutturali

355 carico unitario di snervamento = 355 N/mm<sup>2</sup>

J2 resilienza > 20J con provino raffreddato a -20 °C

### 1.3 Normativa UNI EN 10025-2

La normativa specifica le condizioni tecniche di fornitura per i prodotti piani e lunghi, di acciai non legati laminati a caldo.

La norma UNI EN 10025 è composta in 6 parti:

Parte 1: Condizioni tecniche generali di fornitura

Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali

Parte 3: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato, normalizzato laminato

Parte 4: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grani fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica

Parte 5: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica

Parte 6: Condizioni tecniche di fornitura per prodotti piani di acciaio per impieghi strutturali ad alto limite di snervamento, bonificati.

La normativa tecnica a cui fanno riferimento i laminati a caldo nella seguente tesi sono descritti dalla UNI EN 10025, e in particolar modo le condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati.

Nello specifico vi sono riportate informazioni riguardo alla classificazione, alla designazione e quindi alla tipologia e alla qualità dell'acciaio a cui la norma fa riferimento, e precisamente gli acciai: S185,S235,S275,S355,S355,S450,E295,E355, e E360, tutti differenti tra loro nelle caratteristiche meccaniche.

Gli acciai S235 e S275 secondo la normativa, possono essere forniti nelle qualità JR, J0 e J2 mentre l'S355 può essere fornito nelle qualità JR, J0, J2, K2; l'acciaio S450, invece è fornito nella qualità J0.

La designazione deve essere composta da una serie di informazioni;

- numero del presente documento (EN 10025-2);
- designazione alfanumerica dell'acciaio;

Con riferimento a tale ultimo punto la designazione dell'acciaio deve essere costituita da:

- simbolo S (per acciai per impieghi strutturali) o E (per costruzioni meccaniche);
- indicazione del carico unitario minimo specificato di snervamento per spessori  $\leq 16$  mm espresso in MPa;
- se applicabile, la designazione della qualità (vedere punto 4.1.2) relativamente ai valori di resilienza prescritti;
- se applicabile, il simbolo addizionale C relativo all'idoneità per un particolare impiego (vedere prospetti 10, 11, 12 e 13);
- indicazione "+N o +AR", qualora i prodotti siano ordinati e forniti nella condizione +N o +AR (vedere punti 3.1, 3.2 e 6.3). L'indicazione "+N o +AR" deve essere aggiunta anche alla designazione numerica dell'acciaio.

Ad esempio; un acciaio per impiego strutturale (S) con un carico unitario minimo specificato di snervamento a temperatura ambiente di 355 MPa, con un valore minimo di resilienza di 27 J a 0 °C (J0) e adatto alla bordatura a freddo (C), condizione di fornitura in laminazione di normalizzazione (o laminato).

Nella sopracitata normativa sono specificate inoltre anche tutte le caratteristiche che riguardano la natura dell'acciaio stesso dal punto di vista chimico, meccanico e dei controlli, i test da effettuare e la frequenza con cui devono essere effettuati al fine di garantire la fornitura corretta e costante per lo scopo specifico dell'acciaio descritto.

I requisiti sono inerenti alla composizione chimica, la quale, l'acciaio S355J2 deve fare riferimento al seguente prospetto:

prospetto 2 **Composizione chimica all'analisi di colata per prodotti lunghi e piani dei tipi e delle qualità di acciai con valori di resilienza<sup>a)</sup>**

Designazione		Metodo di deossidazione <sup>b)</sup>	C in % max. per spessori nominali di prodotto in mm			Si % max.	Mn % max.	P % max. <sup>d)</sup>	S % max. <sup>d) e)</sup>	N % max. <sup>f)</sup>	Cu % max. <sup>g)</sup>	Altri % max. <sup>h)</sup>
In conformità alla EN 10027-1 e CR 10260	In conformità alla EN 10027-2		≤16	>16 ≤40	>40 <sup>c)</sup>							
S235JR	1.0038	FN	0,17	0,17	0,20	-	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S235J0	1.0114	FN	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S235J2	1.0117	FF	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,025	0,025	-	0,55	-
S275JR	1.0044	FN	0,21	0,21	0,22	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S275J0	1.0143	FN	0,18	0,18	0,18 <sup>l)</sup>	-	1,50	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S275J2	1.0145	FF	0,18	0,18	0,18 <sup>l)</sup>	-	1,50	0,025	0,025	-	0,55	-
S355JR	1.0045	FN	0,24	0,24	0,24	0,55	1,60	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S355J0	1.0553	FN	0,20 <sup>j)</sup>	0,20 <sup>k)</sup>	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S355J2	1.0577	FF	0,20 <sup>j)</sup>	0,20 <sup>k)</sup>	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S355K2	1.0596	FF	0,20 <sup>j)</sup>	0,20 <sup>k)</sup>	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S450J0 <sup>l)</sup>	1.0590	FF	0,20	0,20 <sup>k)</sup>	0,22	0,55	1,70	0,030	0,030	0,025	0,55	m)

a) Vedere punto 7.2.  
b) FN = acciai effervescenti non ammessi; FF = acciaio interamente calmato (vedere punto 6.2.2).  
c) Per i profilati con uno spessore nominale >100 mm, tenore di C secondo accordo. Vedere opzione 26.  
d) Per i prodotti lunghi, il tenore di P e S può essere maggiore dello 0,005%.  
e) Per i prodotti lunghi, il tenore massimo di S può essere aumentato per migliorare l'attitudine alla lavorazione di macchina dello 0,015% secondo accordo, se l'acciaio è trattato per modificare la morfologia solforica e la composizione chimica presenta un tenore minimo di Ca dello 0,0020%. Vedere opzione 27.  
f) Il valore massimo relativo all'azoto non trova applicazione se la composizione chimica comporta un tenore minimo totale di Al dello 0,020% oppure in alternativa un tenore minimo dello 0,015% di Al solubile in acido oppure se sono presenti altri elementi che fissano l'azoto in quantità sufficienti. In questo caso, gli elementi che fissano l'azoto devono essere indicati nel documento di controllo.  
g) Il tenore di Cu maggiore dello 0,40% può causare un accorciamento durante la formatura a caldo.  
h) Se si aggiungono altri elementi, essi devono essere indicati nel documento di controllo.  
i) Per spessore nominale >150 mm: C = 0,20% max.  
j) Per tipi adatti alla formatura a rulli a freddo (vedere punto 7.4.2.2.3): C = 0,22% max.  
k) Per spessore nominale >30 mm: C = 0,22% max.  
l) Applicabile solo ai prodotti lunghi.  
m) L'acciaio può presentare un tenore massimo di Nb dello 0,05%, un tenore massimo di V dello 0,13% e un tenore massimo di Ti dello 0,05%.

Figura 2 Prospetto 2 della normativa uni en 10025-2

Il punto 7.2.5 della norma contiene altre prescrizioni chimiche, relative ai prodotti S275 e S355 e riguardanti al controllo sul quantitativo di Si e quindi l'influenza sul ricoprimento superficiale come la zincatura a caldo. Sono riportati inoltre i quantitativi di CEV in base al quantitativo di Si, come determinabili dal prospetto 6.

Si evidenzia la parte della normativa relativa alle caratteristiche meccaniche del prodotto, nello specifico al punto 7.3.2.1 si viene rimandati alla parte 1 della norma UNI EN 10025-1 per la parte inerente alla verifica del valore di resilienza in base allo spessore, nel punto 7.3.2.1 e testualmente: “Utilizzando provini con una larghezza minore di 10 mm, i valori minimi indicati nelle norme da EN 10025-2 ad EN 10025-6 devono essere ridotti in modo direttamente proporzionale all’area della sezione trasversale del provino. Le prove di resilienza non devono essere richieste per lo spessore nominale <math><6\text{ mm}</math>”.

Nella norma UNI EN 10025-1 viene inoltre specificata la preparazione dei campioni per il test di resilienza e nello specifico la posizione del prelievo. In seguito viene riportata l’appendice A della suddetta normativa: “*Posizione dei campioni e dei provini*”

**APPENDICE A POSIZIONE DEI CAMPIONI E DEI PROVINI**  
(normativa)

Sono considerate le seguenti tre categorie di prodotti:

- travi, profilati a U, angolari, profilati a T e profilati a Z (figura A.1);
- barre e vergella (figura A.2);
- prodotti piani (figura A.3).

figura A.1 **Travi, profilati a U, angolari, profilati a T e profilati a Z**

Legenda

- 1 Posizione dei campioni<sup>b)</sup>
- a) A seguito di accordi, il campione può essere prelevato dall’anima, in corrispondenza di un quarto dell’altezza totale
- b) I provini devono essere prelevati dal campione in base a quanto indicato nella figura A.3. Per i profilati con ali a facce inclinate, è consentita la lavorazione della superficie inclinata allo scopo di renderla parallela all’altra superficie

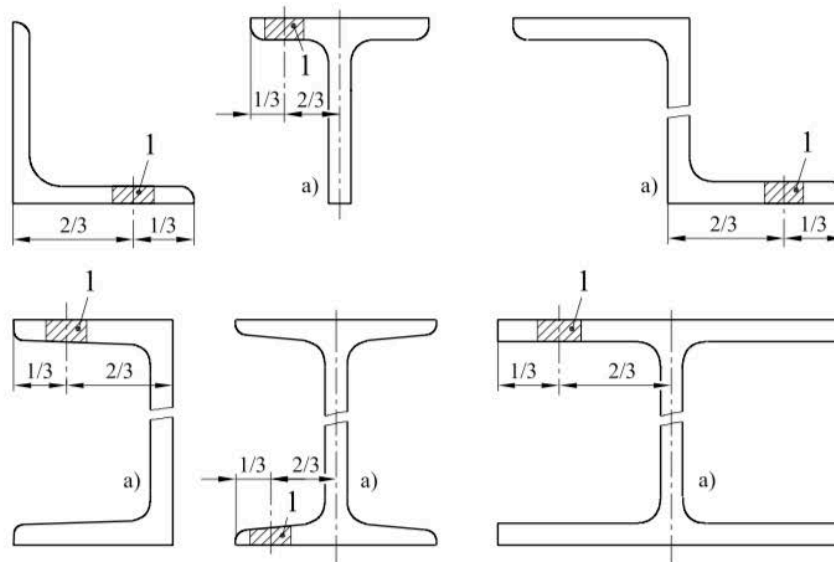
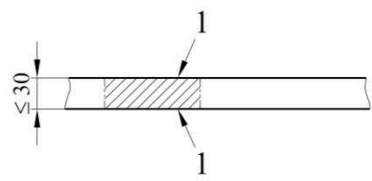
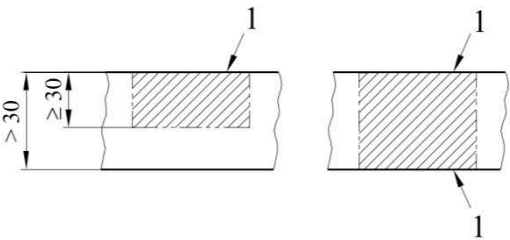



Figura 3 appendice A “posizione dei campioni e dei provini” UNI EN 10025-1

Per quanto riguarda la posizione del prelievo dei campioni nei prodotti piatti si fa seguito alla figura 3 nella seconda parte del prospetto.

figura A.3 **Prodotti piani**  
Dimensioni in millimetri

Tipo di prova	Spessore del prodotto	Orientamento dei provini per prodotti di larghezza di		Distanza del provino dalla superficie di laminazione
		<600	≥600	
Trazione <sup>a)</sup>	≤30	longitudinale	trasversale	Legenda 1 Superficie laminata 
	>30			oppure Legenda 1 Superficie laminata 
Resilienza <sup>b) d)</sup>	>12 <sup>c)</sup>	longitudinale	longitudinale	

a) In caso di dubbio o di contestazione per prodotti di spessore ≥3 mm, occorre utilizzare provini proporzionali con lunghezza tra i riferimenti  $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ . Per prove correnti, per ragioni di economia, possono essere utilizzati provini con lunghezza tra i riferimenti costante, a condizione che il risultato ottenuto per l'allungamento dopo rottura sia convertito mediante una formula riconosciuta (vedere EN ISO 2566-1). Per prodotti di spessore >30 mm, può essere utilizzato un provino tondo con l'asse longitudinale pari a 1/4 dello spessore.

b) L'asse dell'intaglio deve essere perpendicolare alla superficie del prodotto.

c) Per prodotti di spessori ≤12 mm, vedere punto 7.3.2.1.

d) Per prodotti ordinati in conformità alla EN 10025-3, EN 10025-4 ed EN 10025-6 e per spessore ≥40 mm, i provini della prova di resilienza devono essere prelevati dalla posizione 1/4 t.

figura 4 posizione dei campioni e dei provini per prodotti piani uni en 10025-1

Al punto 9 della parte 1 si trova la parte relativa alla “preparazione dei campioni e dei provini” e al sotto capitolo 9.2.3.3 quella relativa ai “provini per la prova di resilienza”. Testualmente: “Provini per la prova di resilienza

I provini devono essere lavorati di macchina e preparati in conformità alla EN 10045-1. Inoltre, si applicano i seguenti requisiti:

- a) per spessori nominali  $>12$  mm, i provini unificati  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  devono essere lavorati di macchina in modo tale che un lato del provino venga a trovarsi ad una distanza non maggiore di 2 mm dalla superficie di laminazione, salvo diversamente specificato nelle norme da EN 10025-2 ad EN 10025-6;
- b) per spessori nominali  $\leq 12$  mm, nel caso in cui vengano utilizzati provini di larghezza ridotta, la larghezza minima deve essere 5 mm”.

Al punto 10 nella parte 1 della norma UNI EN 10025 sono specificati i metodi di prova relativi all’analisi chimica e alle prove meccaniche.

La prova di resilienza è descritta al punto 10.2.2, che recita:

“Il valore medio dei tre risultati di prova deve corrispondere al requisito specificato. Un singolo valore può risultare minore del valore medio minimo prescritto, a condizione che non risulti minore del 70% di tale valore.

Tre provini addizionali devono essere prelevati dallo stesso campione in conformità al punto 9.2.2.1 e sottoposti a prova in uno dei seguenti casi:

- se la media dei tre valori di resilienza risulta minore del valore medio minimo prescritto;
- se il valore medio corrisponde al requisito specificato, ma due valori individuali risultano minori del valore medio minimo prescritto;
- se uno qualsiasi dei valori è minore del 70% del valore medio minimo prescritto.

Il valore medio delle sei prove non deve risultare minore del valore medio minimo prescritto. Non più di due valori individuali possono risultare minori del valore medio minimo prescritto e non più di un valore può risultare minore del 70% di tale valore. ”

## 1.4 Laminazione a caldo

### 1.4.1 Generalità

La Laminazione è un processo di lavorazione dell'acciaio grazie al quale si ottiene una riduzione di spessore e una variazione della sezione trasversale partendo da una billetta (o bramma). La laminazione può essere eseguita a caldo o a freddo: in entrambi i casi si sfruttano le proprietà plastiche dell'acciaio cioè la **capacità di deformarsi in modo permanente** quando sottoposto ad opportune forze esterne.

Il processo di laminazione a caldo necessita di forze minori rispetto alla laminazione a freddo infatti, ad ogni passaggio si possono avere riduzioni di spessore notevoli, senza troppo incorrere a rotture o fessurazioni del materiale. Nel processo di laminazione a freddo invece si deve ricorrere a forze ingenti per imprimere piccole deformazioni. La laminazione a freddo (cold rolling), ha effetto sia sullo stato tensionale del laminato, sia sul livello di finitura superficiale, ottenendo così un duplice effetto, prodotti con basse tolleranze geometriche e alta precisione dimensionale (near net shape). È possibile sottoporre a laminazione solamente metalli con determinate caratteristiche in termini di malleabilità, duttilità, piegabilità, in quanto l'impiego di forze di deformazione da parte dei rulli deve essere tale da deformare l'acciaio e parallelamente evitare difetti superficiali o nel peggiore dei casi provocare la rottura del semilavorato compromettendo definitivamente il prodotto finale.

Il prodotto da fusione viene convenientemente riscaldato, tramite una serie di coppie di rulli ad alta rigidità che esercitano forze di compressione sul metallo. Il 90% di tutti i processi di deformazione dei metalli sono circoscritti proprio alla laminazione che producono 3 tipologie di prodotti, piatti, lamiere e barre. Per quanto riguarda i profili strutturali possono essere forniti al cliente senza ulteriori trattamenti termici e forniti al cliente "as rolled", dopo la sola laminazione e messi in opera con operazioni minime come foratura e taglio.

### 1.4.2 Influenza della laminazione sulla microstruttura di acciaio al carbonio

Al fine di ottenere un prodotto performante, di buona qualità, è necessario seguire scrupolosamente il processo fin dalle fasi iniziali. La billetta viene forzata a passare una prima serie di gabbie sbozzatrici che hanno come obiettivo quello di togliere la scaglia di ossido

formatasi nel forno di riscaldamento e di modellare una forma adatta ad accogliere il materiale dalle successive gabbie del treno di laminazione. Il treno di laminazione è composto da una serie di gabbie di laminazione, ove ad ogni gabbia percorsa il materiale inizia ad assumere la sezione finale, impressa dall'ultima gabbia finitrice che ha il compito di dare la forma finale entro le tolleranze specificate nella norma **UNI 10025-6**.

La lavorazione plastica dell'acciaio ha la seguente doppia funzione:

1. ridurre la sezione delle billette di partenza, allungandole e trasformandole in semilavorati.
2. Migliorare la resistenza del materiale nella direzione longitudinale della billetta, ovvero lungo la direzione di laminazione. La microstruttura cambia drasticamente di forma, conseguentemente anche la dimensione del grano cristallino e l'orientamento dei cristalli segue la direzione di laminazione.

Il range delle temperature per questa tipologia di lavorazione a caldo risulta essere vincolata sia dalle caratteristiche fisiche e chimiche dell'acciaio, sia dai parametri del processo stesso, come il tempo e la velocità di laminazione, i rapporti di riduzione di ogni gabbia, la trasmissione termica. La temperatura iniziale dell'intervallo si riferisce al momento in cui la billetta esce dal forno e viene scelta in modo tale da evitare la bruciatura a bordo grano o il surriscaldamento dell'acciaio, ma che comunque tale da consentire il completamento della laminazione, che termina con l'arrivo del prodotto in placca di raffreddamento. Come sopra anticipato, il range di lavorazione dell'acciaio dipende infatti dalla sua composizione chimica e, nello specifico, dal tenore di carbonio contenuto in esso. L'incremento del tenore di C ha un duplice effetto sul comportamento a caldo dell'acciaio: implica sia la diminuzione della temperatura di fusione sia la riduzione della plasticità a caldo, quindi diminuisce la lavorabilità dell'acciaio stesso richiedendo forze di laminazione maggiori da parte dei cilindri. Le forze di compressione impresse al materiale in fase di laminazione vengono accuratamente prese in esame per una corretta progettazione geometrica e resistenziale dei cilindri e degli apparati accessori. Gli elementi in lega hanno un effetto simile a quello del carbonio ma di minore entità. È di primaria importanza effettuare un corretto riscaldamento delle billette fino alla temperatura di inizio lavorazione: in particolar modo deve avvenire il più uniforme possibile, rispettando le rampe di riscaldamento e il tempo di mantenimento a temperatura prestabilita, così da consentire l'idonea temperatura anche a cuore delle billette. Nella pratica sarebbe vantaggioso terminare la fase finale della lavorazione a caldo alla temperatura più bassa possibile del range di lavorazione,

questo permetterebbe di ottenere nel prodotto una tessitura cristallina più fine, quindi valori di resilienza e resistenza più elevate, con un generale miglioramento delle proprietà meccaniche. Quanto esplicitato precedentemente è particolarmente importante per gli acciai inox ferritici e austenitici per i quali non è più possibile affinare ulteriormente la grana cristallina tramite trattamenti termici o affinanti aggiunti, mentre per gli acciai da costruzione risulta essere antieconomico effettuare trattamenti termici aggiuntivi (se non esplicitamente espressi dalla norma o dal committente).

### 1.4.3 Tipologia di laminatoio

La produzione di barre laminate a caldo prevede a monte una serie di impianti e apparati in forte relazione tra di loro. Il laminatoio è un complesso impianto composto da una serie di macchine chiamate “gabbie”. Le gabbie di laminazione sono un’incastellatura meccanica su cui sono montate le coppie di cilindri e sono composte da un telaio attrezzato, il quale permette la movimentazione stessa e svolge una funzione di supporto per la taratura dei cilindri in base ai parametri di laminazione. Il metallo riscaldato alla temperatura di lavorazione viene fatto passare tra i due cilindri ad assi paralleli e orizzontali situati sullo stesso piano verticale, ruotanti in verso opposto e alla stessa velocità.

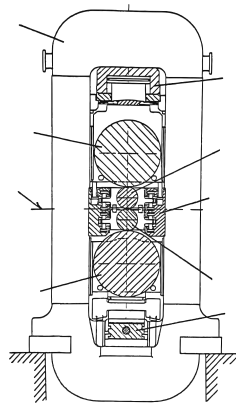


Figura 5 Gabbia di laminazione

Con apposite regolazioni automatiche o semi automatiche si riesce a variare la luce tra il cilindro inferiore e quello superiore, e quindi a modificare lo spessore del semilavorato finale. La trasmissione meccanica avviene per mezzo delle allunghe interposte tra i cilindri e i motori a corrente continua.

Il laminatoio prende il nome di “treno di laminazione” se è composto da un insieme di gabbie di laminazione disposte in asse una di seguito all’altra e connesse da attrezzature accessorie per guidare il semiprodotto nella corretta direzione. In base alla disposizione delle gabbie i treni possono essere di due tipologie, continui o semicontinui. Sono semicontinui se le gabbie sono disposte una di seguito all’altra ma il materiale in laminazione non è mai lavorato da due gabbie nello stesso istante, infatti la laminazione avviene in successione. La distanza tra le gabbie è via via maggiore, in quanto  $L_2 > L_1$  per permettere la deformazione di allungamento che genera il passaggio attraverso ogni coppia di cilindri.

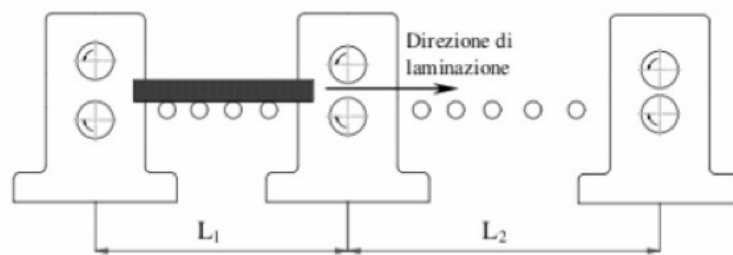


Figura 6 treno di laminazione

I treni di laminazione si possono definire continui se il materiale viene laminato contemporaneamente da due o più gabbie nello stesso momento. Per questo motivo le velocità di rotazione dei cilindri di ogni gabbia va scrupolosamente calcolata. La velocità di ogni gabbia dovrà aumentare in proporzione all’allungamento impresso nella barra ad ogni passaggio. Deve essere inoltre rispettata la condizione che tra due gabbie in sequenza non vi deve essere né accumulo e né mancanza di materiale, ossia il volume che passa nell’unità di tempo deve essere costante.

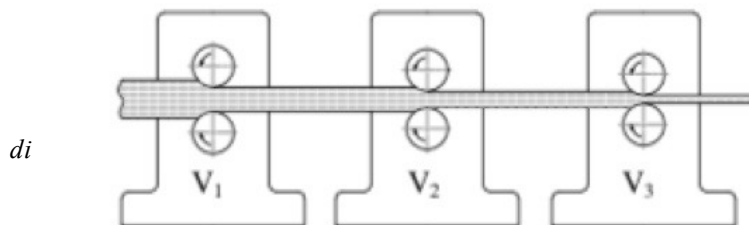


Figura 7  
Treno  
continuo

*laminazione*



## 1.5 Deformazione plastica a caldo

Questa lavorazione appartiene ai processi di formatura plastica a caldo dove è necessario riscaldare il pezzo di acciaio alla temperatura circa 0,6 volte la temperatura di fusione  $T_f$ . Tali condizioni portano il metallo alla massima deformabilità.

Il range di temperatura di riscaldamento, per quanto riguarda gli acciai a basso carbonio, va dai 900°C ai 1200°C in modo tale da raggiungere elevati livelli di deformazione senza sollecitare eccessivamente i rulli di laminazione, limitando l'usura meccanica sugli organi di trasmissione e inoltre anche i consumi energetici dei motori risultano inferiori.

## 1.6 Ricristallizzazione dell'acciaio al carbonio

La deformazione plastica a caldo comporta uno stato di sollecitazione tensionale e un innalzamento di temperatura in grado di spaccare la grana cristallina originaria e di generarne una di nuova molto rapidamente. Questo meccanismo di rigenerazione è detta ricristallizzazione dinamica. Tale effetto è tanto marcato, tanto maggiore è il fattore di riduzione imposto dalla laminazione e il prodotto finale presenterà una grana cristallina più piccola. La ricristallizzazione rimpiazza la struttura cristallina grossolana del prodotto da fusione a grani deformati con una nuova serie di grani esenti da tensioni e distorsioni.

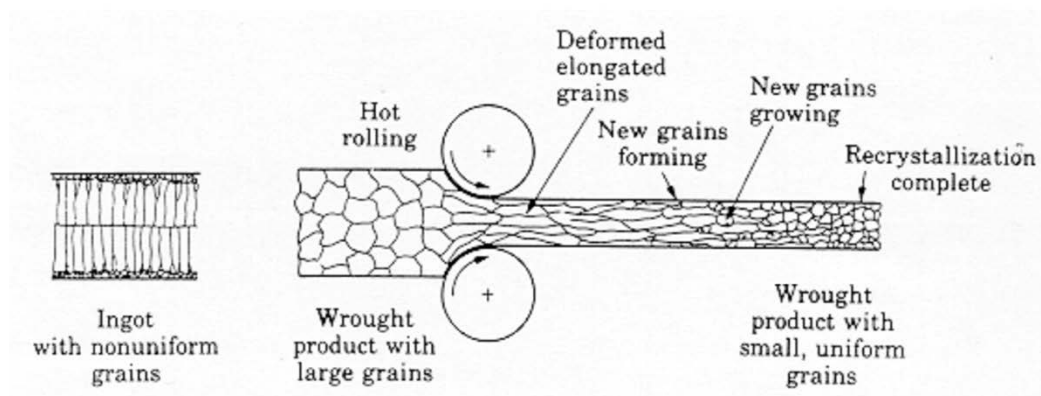
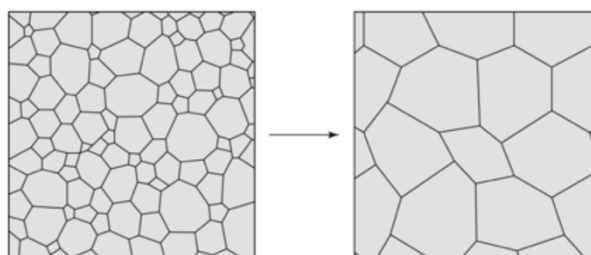


Figura 8 Schema ricristallizzazione

Risulta di primaria importanza calibrare il range di temperatura nella quale effettuare la laminazione. Nel caso di laminati mercantili si può definire il limite inferiore che coincide con la temperatura che è ancora in grado di deformare la billetta e provocare un livello di ricristallizzazione sufficiente per non causare l'incrudimento del materiale.

Il limite superiore invece deve rispettare le tre condizioni seguenti:

1. è necessario evitare bruciature del grano austenitico, quindi la temperatura deve essere tarata almeno  $50^{\circ}\text{C}$  al di sotto della temperatura di fusione teorica di eventuali metalli bassofondenti. Questo comporterebbe la generazione di un sottile strato liquido di metallo basso fondente intergranulare che porterebbe alla coesione tra grani della struttura proprio in fase di lavorazione plastica con conseguenze di fermo macchina per il ripristino delle gabbie di laminazione;
2. evitare la marcata decarburazione del prodotto laminato, che è un fenomeno superficiale che consiste nell'impoverimento di carbonio nei materiali ferrosi e si verifica in quei prodotti che una volta deformati a caldo vengono a contatto con l'ossigeno atmosferico. I materiali ferrosi sottoposti alle alte temperature presentano infatti una spiccata tendenza a reagire con l'ambiente esterno. Poiché l'ossidazione comporta la perdita di materiale, e quindi una diminuzione della resistenza meccanica, a volte potrebbe essere necessaria l'asportazione degli strati superficiali, incrementando i costi di produzione, così rendendo meno competitivo il prodotto nel mercato. L'ossidazione spesso infatti causa una cattiva finitura superficiale nei laminati mercantili se la scaglia di ossido superficiale non viene accuratamente rimossa all'ingresso delle gabbie sbozzatrici, e frammenti di esse possono rimanere inglobati all'interno del materiale provocando discontinuità all'interno del prodotto finito;
3. conservare la dimensione media del grano cristallino quanto più piccola possibile dopo la ricristallizzazione dinamica. Temperature elevate provocano infatti l'ingrossamento della grana cristallina con un discreto calo generalizzato delle prestazioni meccaniche. Ciò avviene a causa dell'accrescimento dei cristalli che hanno già una dimensione media. Essi infatti si ingrandiscono ancora di più inglobando quelli più piccoli, quindi i cristalli più piccoli diminuiscono di quantità come ne nella figura.



*Figura 9 Accrescimento del grano cristallino*

4. Questo problema viene identificato come *ricristallizzazione secondaria* o pseudo ricristallizzazione, nel linguaggio scientifico, oppure *surriscaldamento* nel linguaggio industriale. La spinta termodinamica che conduce all'ingrossamento del grano deriva dalla diminuzione di energia libera del sistema, cioè dalla minore energia interfacciale dei giunti, associata a una grana cristallina più grossa. Nelle fasi finali della laminazione, quando il materiale attraversa le ultime gabbie del treno, è consigliato abbassare la temperatura per mantenere l'affinamento della grana appena impresso, evitando il surriscaldamento.

# Capitolo 2

## Materiali e metodi

### 2.1 Materiale analizzato

L'acciaio oggetto di studio è denominato S355J2, ossia un acciaio strutturale, con carico unitario di snervamento  $355 \text{ N/mm}^2$  e resilienza  $> 27\text{J}$  con provino raffreddato a  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La laminazione inizia con il prodotto dell'acciaieria Per mezzo del forno elettrico fusorio EAF vengono colate billette  $140\text{mm} \times 140\text{mm}$  oppure bramme da  $160 \times 200$  per una lunghezza di  $9000\text{mm}$  e sono prodotti da colata continua (continuous casting) con una produttività che si attesta intorno a  $130\text{ton/h}$ .

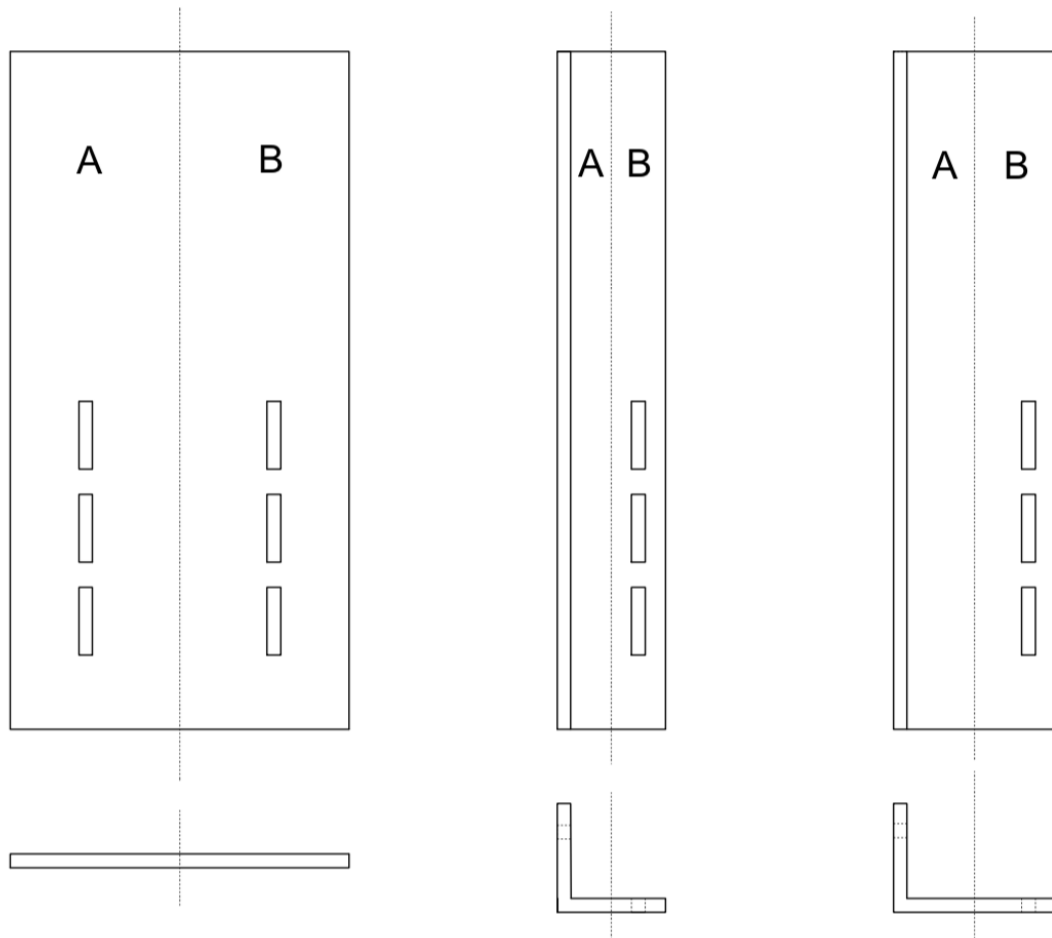
I prodotti finali di Acciaierie AFV Beltrame sono profilati come PIATTI (PIA), LARGHI PIATTI, ANGOLARI AD ALI UGUALI (ANG), ANGOLARI AD ALI INEGUALI (LST), profili a T, UPN, IPN di svariate dimensioni.

Sono stati prelevati 15 spezzoni di barre di circa un metro della tipologia PIA, ANG e LST. Il prelievo di questi spezzoni viene effettuato dopo che il profilo ha percorso tutta la placca di raffreddamento e una volta giunto alla via rulli la trancia meccanica dell'impianto posta in linea effettua il prelievo. Lo spezzone viene inviato al reparto officine per la produzione dei provini Charpy.

Data la grande varietà di dimensioni e forme dei profilati che viene prodotta nello stabilimento di Vicenza, viene posta grande attenzione sulle regolazioni dei rulli di laminazione e ai parametri di processo in fase di deformazione del materiale ancora in fase austenitica.

Per quanto riguarda il raffreddamento fino a temperatura ambiente viene utilizzata una placca di raffreddamento a geometria fissa, quindi è stato deciso che per ogni spezzone venga fatto il doppio prelievo per ogni profilo così come da Figura 1.

Sono stati prelevati sei campioni Charpy, tre dal lato A e tre dal lato B. La nomenclatura utilizzata per queste prove sarà quindi AFV+N+(A oppure B).



*Figura 10 profili laminati piatti e angolari con indicazione di prelievo dei provini charpy*

La numerazione attribuita inizia con AFV15A e AFV15B e termina con AFV30A e AFV30B in quanto sono stati scelti provini corredati con tutti i dati e scartati quelli parzialmente completi.

I dati relativi ad un campione sono disposti lungo ogni riga in un foglio elettronico, come da tabella sottostante. Nella prima colonna viene riportato il nome identificativo dei campioni, mentre nella prima riga c'è il testo dei dati riportati: nome campione, numero di colata appartenente, dimensioni geometriche della sezione del laminato, valori delle tre prove di resilienza e i valori percentuali della chimica.

L'analisi chimica è stata conseguita dall'ufficio qualità con lo spettrometro ad emissione ottica in dotazione all'azienda, e fornito assieme al numero identificativo di colata. L'analisi chimica del contenuto deve essere eseguita sul prodotto in conformità al punto 10.1 della EN 10025-1:2004. Il contenuto dei seguenti elementi deve essere determinato e registrato: C, Si, Mn, P, S, Cu, Cr, Ni, V, Mo, Ti, Pb, Nb, Ca, Zn, A e qualsiasi altro elemento aggiunto intenzionalmente.

provino	COLATA	spesi	profilo	reS1	res2	res3	ResMed	C	Si	MN	P	S	CU
AFV15/A	191493	LST 120X80X10	LST	125	70	90	95,0	0,1038	0,195	1,0718	0,0273	0,0119	0,4142
AFV15/B	191493	LST 120X80X10	LST	88	110	72	90,0	0,1038	0,195	1,0718	0,0273	0,0119	0,4142
AFV16/A	191494	LST 120X80X10	LST	46	74	66	62,0	0,1167	0,1954	1,0553	0,0315	0,0134	0,4021
AFV16/B	191494	LST 120X80X10	LST	78	68	78	74,7	0,1167	0,1954	1,0553	0,0315	0,0134	0,4021
AFV17/A	191491	LST 120X80X10	LST	109	80	30	73,0	0,1237	0,17	1,07	0,031	0,009	0,38
AFV17/B	191491	LST 120X80X10	LST	75	75	153	101,0	0,1237	0,17	1,07	0,031	0,009	0,38
AFV18/A	191488	LST 120X80X8	LST	128	136	113	125,7	0,1163	0,19	1,08	0,027	0,011	0,42
AFV18/B	191488	LST 120X80X8	LST	68	80	97	81,7	0,1163	0,19	1,08	0,027	0,011	0,42
AFV19/A	191487	LST 120X80X8	LST	73	73	82	76,0	0,1430	0,19	1,10	0,028	0,013	0,42
AFV19/B	191487	LST 120X80X8	LST	81	61	57	66,3	0,1430	0,19	1,10	0,028	0,013	0,42
AFV21/A	191089	PIA 250X10	PIA	107	126	109	114,0	0,1352	0,2139	1,1734	0,0176	0,0152	0,3038
AFV21/B	191089	PIA 250X10	PIA	62	81	90	77,7	0,1352	0,2139	1,1734	0,0176	0,0152	0,3038
AFV22/A	191883	PIA 80X30	PIA	145	130	142	139,0	0,1499	0,2169	1,0666	0,0227	0,0097	0,3598
AFV22/B	191883	PIA 80X30	PIA	130	148	139	139,0	0,1499	0,2169	1,0666	0,0227	0,0097	0,3598
AFV23/A	191882	PIA 60X30	PIA	155	128	149	144,0	0,1494	0,2193	1,0724	0,0231	0,0092	0,3589
AFV23/B	191882	PIA 60X30	PIA	143	142	95	126,7	0,1494	0,2193	1,0724	0,0231	0,0092	0,3589
AFV24/A	191881	PIA 70x20	PIA	149	143	152	148,0	0,1292	0,2001	1,0311	0,0257	0,0082	0,4544
AFV24/B	191881	PIA 70x20	PIA	139	129	102	123,3	0,1292	0,2001	1,0311	0,0257	0,0082	0,4544
AFV25/A	191100	PIA 100X20	PIA	150	150	161	153,7	0,1431	0,19	1,12	0,036	0,012	0,47
AFV25/B	191100	PIA 100X20	PIA	169	148	149	155,3	0,1431	0,19	1,12	0,036	0,012	0,47
AFV26/A	191099	PIA 100X20	PIA	62	126	116	101,3	0,1422	0,2031	1,0576	0,0202	0,008	0,3336
AFV26/B	191099	PIA 100X20	PIA	151	121	141	137,7	0,1422	0,2031	1,0576	0,0202	0,008	0,3336
AFV27/A	192167	ANG 80x10	ANG	180	200	240	206,7	0,1139	0,2208	1,0853	0,0292	0,0057	0,4364
AFV27/B	192167	ANG 80x10	ANG	130	132	160	140,7	0,1139	0,2208	1,0853	0,0292	0,0057	0,4364
AFV28/A	192139	ANG 70x6	ANG	86	94	103	94,3	0,1341	0,2566	1,0546	0,0292	0,0077	0,3835
AFV28/B	192139	ANG 70x6	ANG	131	108	92	110,3	0,1341	0,2566	1,0546	0,0292	0,0077	0,3835
AFV29/A	192095	ANG 70x6	ANG	120	108	115	114,3	0,1290	0,2523	1,053	0,0304	0,0075	0,3919
AFV29/B	192095	ANG 70x6	ANG	90	98	114	100,7	0,1290	0,2523	1,053	0,0304	0,0075	0,3919
AFV30/A	192095	ANG 70x5	ANG	84	78	82	81,3	0,1272	0,1969	1,0767	0,0314	0,0143	0,4294
AFV30/B	192095	ANG 70x5	ANG	84	104	88	92,0	0,1272	0,1969	1,0767	0,0314	0,0143	0,4294

Tabella 1 Foglio elettronico raccolta dati

### La chimica di questo acciaio S355J2 (BE 52.4 designazione Beltrame)

C%	Si%		Mn%	P%	S%	Al%	Cu%	Ceq%
Max	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0,20	0,14	0,25	1,60	0,025	0,025	0,020	0,55	0,45

Tabella 2 Caratteristiche chimiche acciaio BE52.4

## 2.2 Software JMP per analisi statistica, variabilità di resilienza di profili laminati

Sono resi disponibili i dati storici delle prove meccaniche dal database aziendale e sono state prese in considerazione le prove di resilienza Charpy a partire dal 2018 fino ai primi mesi del 2019.

COLATA	provino	data	CAMPAGNA	spess	profilo	prodci	stringa_link_d	res1	res2	res3	ResMEd
183327	6022487	12/2/18 0.00	PIA 120 100 90 110	PIA 120X12	PIA	120X12X0X0	183327 PIA 120X12	90	58	81	76,3
183649	6022482	12/2/18 14.40	PIA 100 90	PIA 90X15	PIA	90X15X0X0	183649 PIA 90X15	52	82	50	61,3
183650	6022483	12/2/18 14.43	PIA 100 90	PIA 100X15	PIA	100X15X0X0	183650 PIA 100X15	56	52	60	56,0
183649	6022485	12/2/18 14.46	PIA 120 100 90 110	PIA 120X15	PIA	120X15X0X0	183649 PIA 120X15	155	160	160	158,3
183648	6022489	12/2/18 14.51	PIA 120 100 90 110	PIA 120X12	PIA	120X12X0X0	183648 PIA 120X12	80	57	88	75,0
183648	6022492	12/2/18 14.59	PIA 120 100 90 110	PIA 120X10	PIA	120X10X0X0	183648 PIA 120X10	110	138	48	98,7
183325	6022466	12/2/18 15.37	PIA 120 100 90 110	PIA 120X30	PIA	120X30X0X0	183325 PIA 120X30	71	67	91	76,3
183325	6022467	12/2/18 15.40	PIA 100 90	PIA 100X30	PIA	100X30X0X0	183325 PIA 100X30	115	112	91	106,0
183325	6022468	12/2/18 15.43	PIA 100 90	PIA 90X30	PIA	90X30X0X0	183325 PIA 90X30	75	91	82	82,7
183324	6022469	12/2/18 15.45	PIA 100 90	PIA 90X30	PIA	90X30X0X0	183324 PIA 90X30	125	118	118	120,3
183324	6022470	12/2/18 15.48	PIA 100 90	PIA 90X25	PIA	90X25X0X0	183324 PIA 90X25	165	132	149	148,7
183324	6022471	12/2/18 15.50	PIA 100 90	PIA 100X25	PIA	100X25X0X0	183324 PIA 100X25	95	101	95	97,0
183323	6022472	12/2/18 15.53	PIA 100 90	PIA 100X25	PIA	100X25X0X0	183323 PIA 100X25	132	145	139	138,7
183044	6022473	12/2/18 15.56	PIA 100 90	PIA 100X25	PIA	100X25X0X0	183044 PIA 100X25	149	148	155	150,7
183044	6022474	12/2/18 15.58	PIA 120 100 90 110	PIA 120X25	PIA	120X25X0X0	183044 PIA 120X25	90	133	120	114,3
183212	6022476	12/2/18 16.00	PIA 120 100 90 110	PIA 120X20	PIA	120X20X0X0	183212 PIA 120X20	131	120	62	104,3
183643	6022477	12/2/18 16.03	PIA 100 90	PIA 100X20	PIA	100X20X0X0	183643 PIA 100X20	60	94	69	74,3
183212	6022479	12/2/18 16.04	PIA 100 90	PIA 90X20	PIA	90X20X0X0	183212 PIA 90X20	47	46	52	48,3
183644	6022480	12/2/18 16.06	PIA 100 90	PIA 90X20	PIA	90X20X0X0	183644 PIA 90X20	108	54	70	77,3
183647	6022481	12/2/18 16.09	PIA 100 90	PIA 90X20	PIA	90X20X0X0	183647 PIA 90X20	68	72	72	70,7
183648	6022495	13/2/18 11.38	PIA 120 100 90 110	PIA 120X6	PIA	120X6X0X0	183648 PIA 120X6	66	83	80	76,3

Tabella 3 dati relativi alle prove 2018-2019

Viene eseguita l'analisi statistica per individuare i profili affetti da maggior variabilità delle prove di resilienza al fine di approfondirne le cause. Tramite il software di analisi statistica *Jmp* vengono quindi costruite delle carte di controllo di tutti i profili laminati con la resilienza più variabile. Il database contiene tutti e tre i valori dei provini testati con la prova Charpy dell'acciaio S355. Le prove di resilienza devono essere eseguite in conformità al punto 10.2.2 della EN 10025-1:2004; il metodo di prova è quello descritto nella EN 10045-1.

Il materiale deve essere certificato per garantire le prestazioni meccaniche minime. Per questo viene effettuato il test di trazione e il test di resilienza.

In prima istanza si procede con l'analisi di dispersione dei valori delle singole misurazioni di resilienza dei laminati. Ciò permette di inserirsi nel quadro generale. Successivamente si è approfondito lo studio dei profili più affetti da variabilità tramite lo strumento "carta di controllo" fornito dal software *Jmp*.

La carta di controllo è uno strumento utilizzato nell'ambito dell'analisi statistica per mantenere sotto controllo i vari parametri di un processo

### Carta di controllo KV1:

Nel grafico viene mostrata la carta di controllo relativa al primo valore di resilienza dei prodotti laminati. In questa carta viene riportata la media delle misurazioni fatte, graficamente

rappresentata dalla linea centrale attorno la quale si dispongono le misurazioni effettuate della caratteristica che si vuole analizzare. La media campionaria della prima prova di resilienza è di  $Kv=90,32$  J. È inoltre possibile evidenziare che la deviazione standard è di 36,4 J. Il valore limite dato dalla specifica normativa è di 27J ma si cerca di imporre comunque un limite inferiore più elevato 37J.

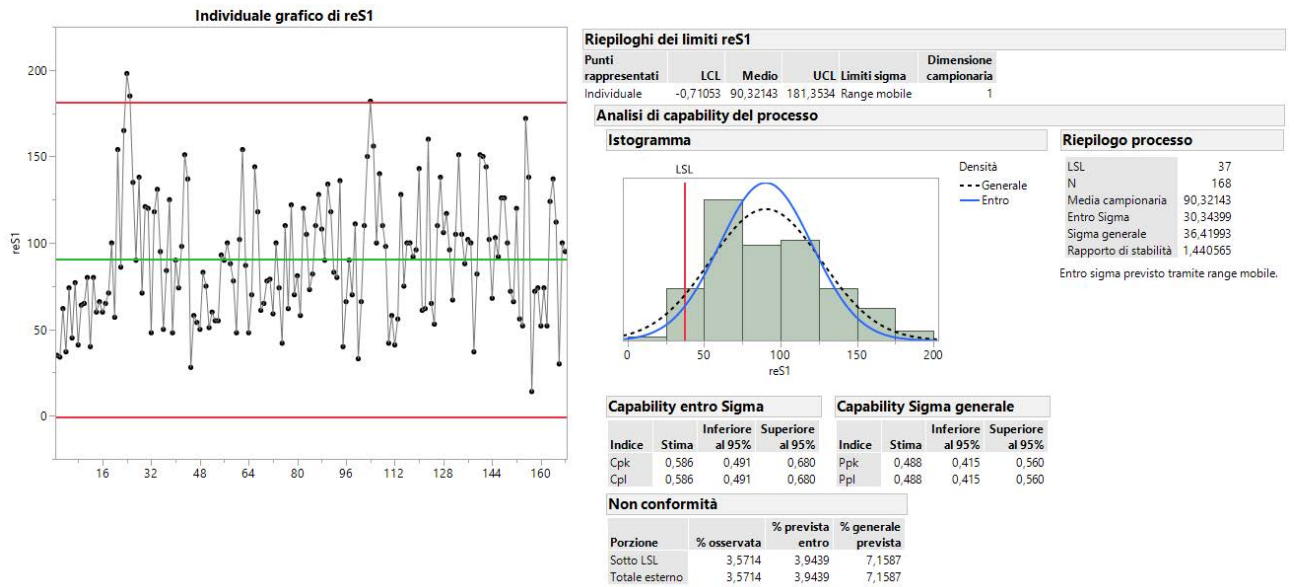


Figura 11: carta di controllo dei valori di resilienza kv1 dei prodotti 2018-19

## Creazione carta di controllo KV2:

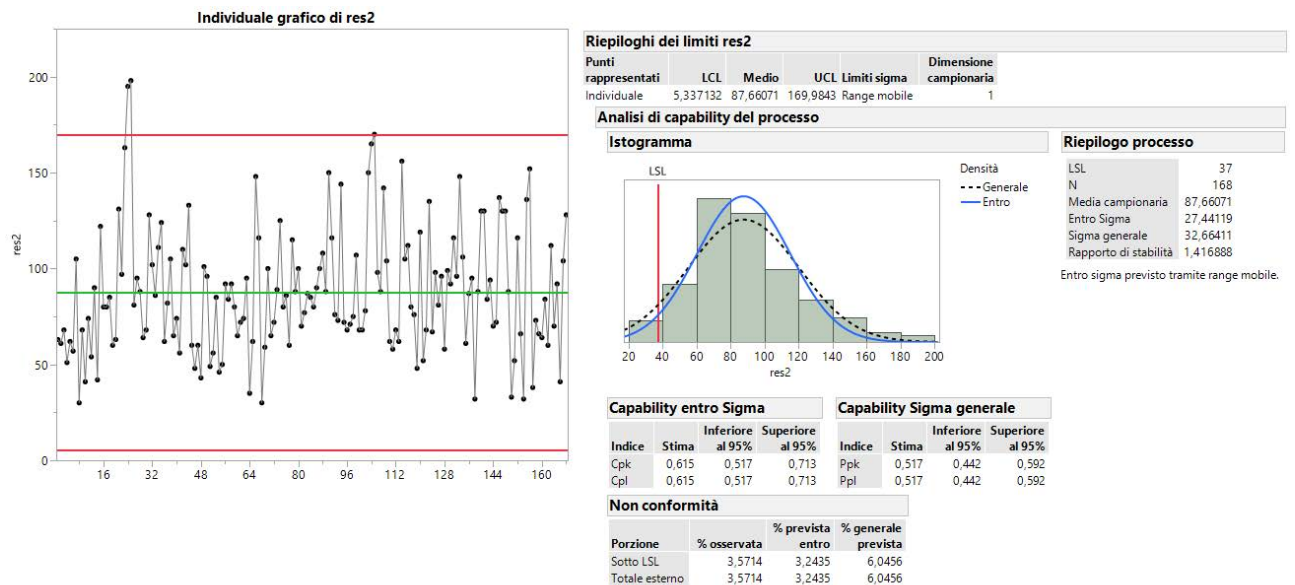


Figura 12: carta di controllo dei valori di resilienza kv2 dei prodotti 2018-19

Per quanto riguarda la carta di controllo dei valori della seconda prova di resilienza dei laminati nell'arco di tempo di cui sopra, la media campionaria è di  $K_v=87,6J$ , la deviazione standard è di  $32,6 J$  e nessun valore segnato è sotto al valore limite inferiore di  $37J$ .

### Creazione carta di controllo KV3:

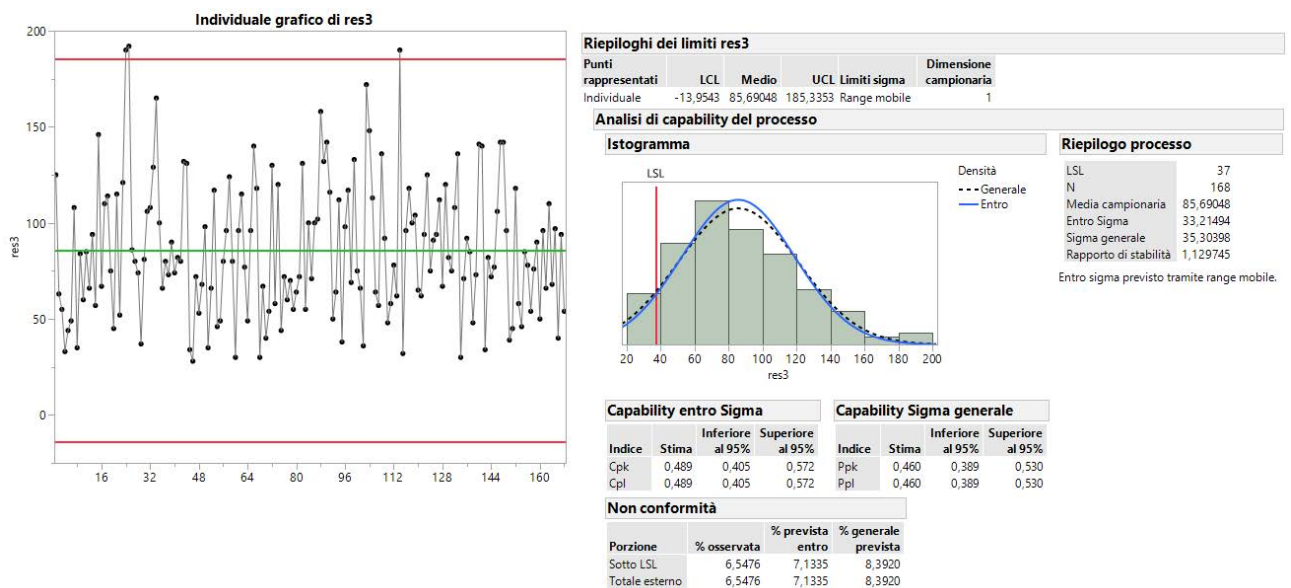


Figura 13: carta di controllo dei valori di resilienza kv2 dei prodotti 2018-19

La carta di controllo della terza prova invece indica come media campionaria il valore  $K_v=85,69$ .

Da segnalare inoltre la deviazione standard di  $35,3 J$ .

È possibile notare che nota che le medie dei 3 valori di resilienza non si discostano molto l'una dalle altre, mentre per quanto riguarda le prime due serie di valori di prove di resilienza solo il 3,5% dei casi si trova al di sotto del limite inferiore imposto  $37J$ . Sul terzo valore, invece, i casi sono quasi il doppio, ossia 6,5%. Considerando, il punto di prelievo (sequenziale sulla lunghezza del pezzo) al momento si può osservare solo una importante variabilità dei dati.

In un secondo momento, tramite JMP, sono state riprodotte le schede di controllo dei valori di resilienza per ogni tipologia di prodotto laminato e sono stati presi in considerazione tutti e 3 i valori angolari, ipe, pia, lst, upn, ups.

Di seguito si riportano in forma grafica i risultati di tali analisi.

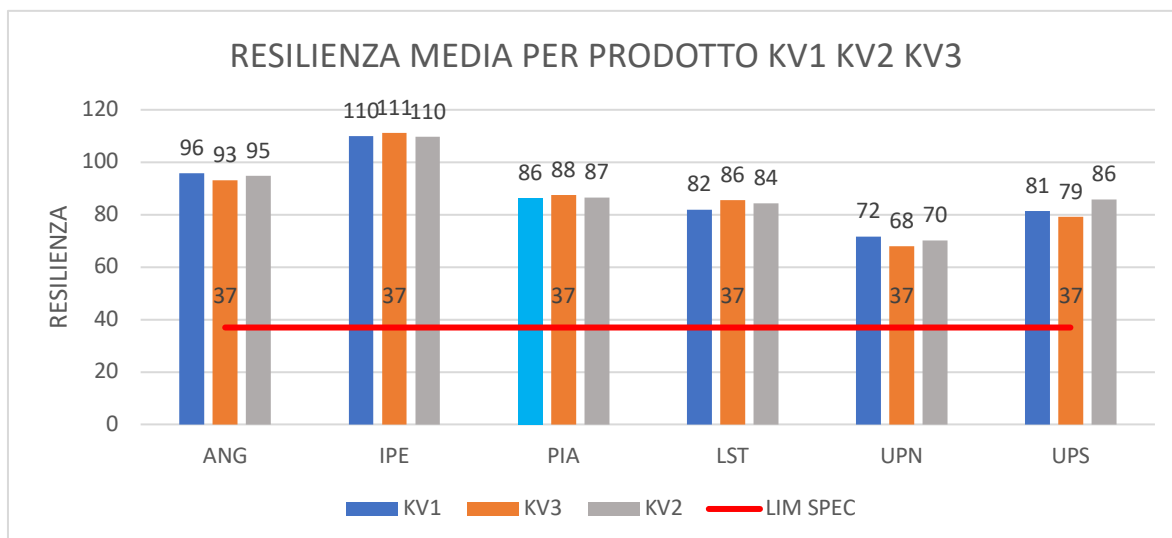


Figura 15: grafico riassuntivo valori medi della resilienza per prodotto

I prodotti di acciaio speciale di qualità S355J2 (BE52.4) laminati maggiormente nel 2018 più affetti da variabilità sono ANG 20.206 Ton e a seguire PIA circa 11.116 Ton, i quali saranno oggetto di indagine successive.

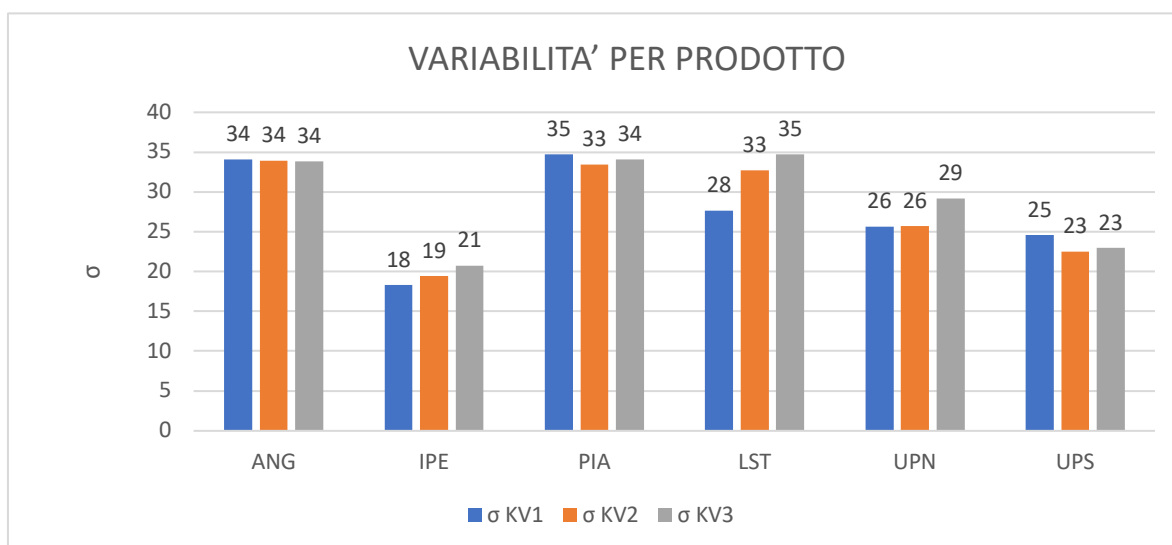


Figura 14: grafico riassuntivo valori dev. standard resilienza per prodotto

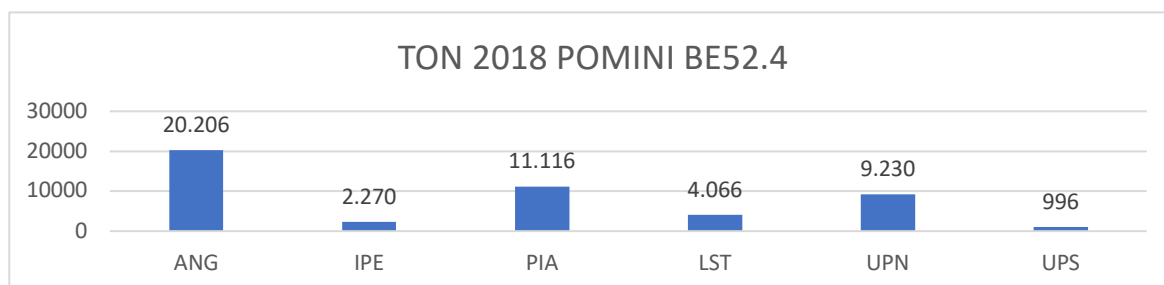


Figura 16: grafico riassuntivo ton prodotte per prodotto (afv beltrame lam. pomini)

## 2.3 La prova di resilienza

Con il termine resilienza si indica la resistenza che un materiale oppone ad una sollecitazione di tipo impulsivo, cioè che tende a romperlo improvvisamente. L'impulsività del carico accentua la fragilità dell'acciaio quindi la prova di resilienza rivela il comportamento dell'acciaio alla frattura. Una lega con scarsa resilienza si romperà in modo fragile, al contrario una lega molto resiliente avrà un comportamento duttile in caso di urto. Al fine di valutare la resilienza dei materiali sono state eseguite le prove con il pendolo tipo Charpy.

La prova prevede di sottoporre a rottura tramite flessione per urto centrale, una provetta. Il pendolo è (una mazza) a caduta libera la cui velocità al momento dell'urto deve raggiungere velocità 5-7 m/s per gli acciai. Si assume come valore di resilienza l'energia assorbita dalla barretta per la rottura, in caso di spessori inferiori alla grandezza standard il valore di resilienza va rapportato all'area della sezione resistente.

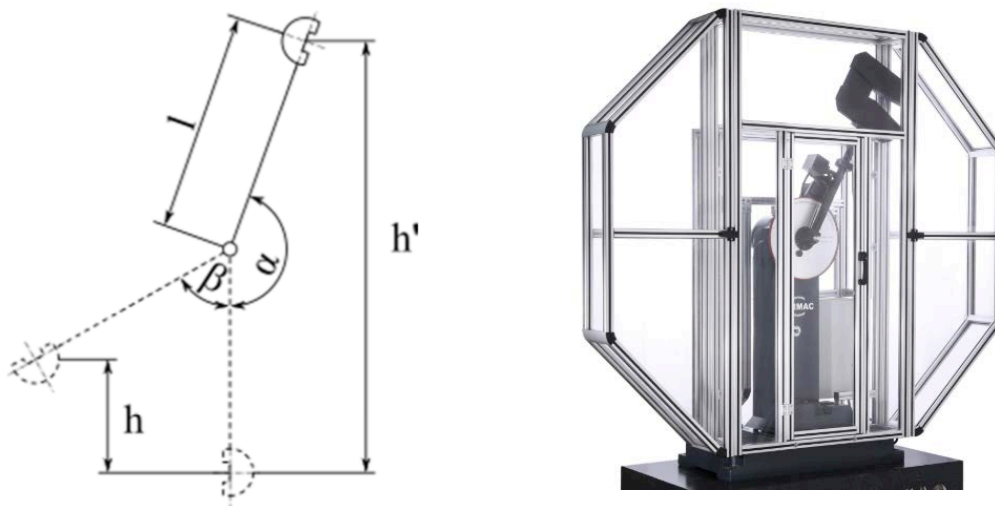


Figura 17: Pendolo per la prova Charpy

Il pendolo Charpy permette di ricavare il bilancio di energia potenziale tra la configurazione del pendolo prima e dopo l'urto tramite la seguente relazione:

$$k = m * g * h' - m * g * h$$

Dove:

- $m$  = massa del peso del pendolo
- $g$  = accelerazione di gravità (pari a 9.81 m/s<sup>2</sup>)

- $h'$  = posizione di partenza del pendolo (altezza iniziale)
- $h$  = posizione di arrivo del pendolo (altezza finale)

da cui:

$$k = m * g * l * (\cos\beta - \cos\alpha)$$

$\alpha$  e  $\beta$  sono gli angoli che fanno riferimento alla posizione del pendolo, come si può notare nella figura sopra.

La resilienza si misura in joule [J] e indica l'energia trasferita nell'impatto dal pendolo al provino per provocare la rottura. Come già anticipato, il valore viene calcolato sperimentalmente tramite la differenza di energia tra la configurazione iniziale e quella finale che corrisponde ad energia cinetica pari a zero, ossia il massimo percorso fatto dopo l'impatto. I provini delle prove di resilienza hanno una sezione quadrata di lato 10 mm e lunghezza 55 mm e sono caratterizzate dall'intaglio centrale a forma di V di profondità 2 mm. L'intaglio consente di esercitare la triassialità degli sforzi ed è perpendicolare all'asse longitudinale della provetta; può essere ad U o a V a seconda della prova che si intende eseguire.

Nel lavoro di tesi è stata presa a riferimento la norma UNI EN ISO 148-1 : 2016 che descrive la preparazione dei provini 10mm x 55mm con intaglio a V così come illustrato in Figura 9.

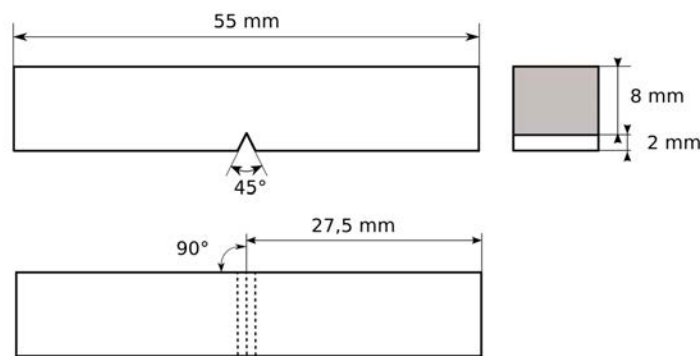


Figura 18 vista laterale e dall'alto del provino Charpy

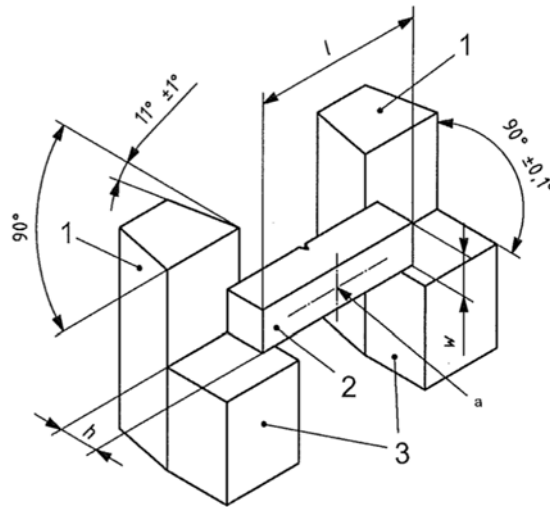


Figura 19: alloggiamento provino Charpy UNI EN ISO 148-1:2016

Prima di essere sottoposti a prova di resilienza, i provini sono stati posti in una cella termostata a  $-20^{\circ}\text{C}$  per circa 20 minuti,. In un secondo momento ogni terna di provini rotti sono stati catalogati per eseguire le analisi sulla microstruttura e sulla superficie di frattura.

## 2.4 Tecniche metallografiche

L'analisi microstrutturale viene effettuata esaminando una metà del provino utilizzato per la prova Charpy, portando ad osservazione sia la sezione parallela che la sezione trasversale all'asse del provino che coincide con la direzione di laminazione in modo da poter osservare la microstruttura da entrambe le prospettive. Per ogni prelievo di spezzone di barra verrà analizzata la microstruttura sia di un provino rotto del lato A, sia un provino rotto del lato B. Si è reso necessario procedere ad inglobare tali campioni nella resina, poiché la ridotta dimensione degli stessi avrebbe comportato grandi difficoltà nel maneggiarli nella successiva fase di spianatura e lucidatura. L'inglobamento nella resina termoindurente è stato realizzato con una macchina che sfrutta l'effetto combinato di temperatura e pressione per far reticolare una resina in granuli attorno al doppio campione metallico (vista parallela e vista perpendicolare all'asse del provino). I due campioni vengono posti nella camera di riscaldamento con la faccia da sottoporre ad analisi rivolta verso il basso e poi ricoperti dalla resina granulare. La quantità deve essere tale da ricoprire i campioni. La camera viene quindi chiusa ermeticamente e per effetto della temperatura ( $160^{\circ}\text{C}$ ) e della pressione la resina si fonde e solidifica creando alla fine della procedura un dischetto di resina. La procedura richiede 15 minuti per ogni campione.



*Figura 20 Esempio di campione metallico inglobato nella resina*

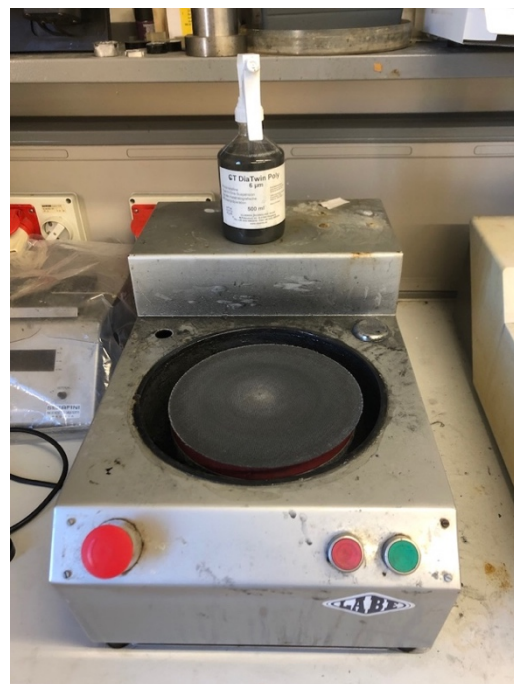
L'osservazione al microscopio ottico avviene per riflessione della luce sul campione. Per questo motivo è fondamentale che la superficie sia liscia e più perpendicolare possibile alla luce incidente.

La procedura di spianatura dei 30 campioni è stata effettuata con una lucidatrice automatica, costituita da un foglio di carta abrasiva, un disco rotante e un portacampioni. Impostato il timer di 3 minuti sono stati fatti 4 passaggi con 4 diverse carte, dalla granulometria più grossolana a quella più fine, precisamente le carte da 320, 500, 800, 1200.

Ciascun campione è stato lucidato a mano per mezzo di panni posti su dischi rotanti, dove su ciascun panno è stata depositata una pasta diamantata che svolge la funzione di abrasivo. Sono state utilizzate in modo successivo le paste diamantate da  $6\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  al fine di ottenere la lucidatura a specchio per campione.



*Figura 21 Lucidatrice automatica*



*Figura 22 Lucidatrice a panni*

Il campione così trattato non consente l'osservazione dei costituenti al microscopio, ma solamente l'evidenziazione di eventuali inclusioni non metalliche o composti che riflettono una luce di colore differente da quella dell'acciaio lucidato.

Si procede quindi con l'attacco chimico per il tempo necessario. Il reagente chimico impiegato è il Nital 3% particolarmente adatto per gli acciai al carbonio o debolmente legati, costituito dal 3% di acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ) e dal 98% di etanolo.

Il campione trattato è pronto per essere osservato al microscopio ottico per la rilevazione delle immagini. Tramite la telecamera posta sopra l'oculare vengono scattate foto alle micrografie a 200x e 500x sia per la sezione trasversale che per la sezione parallela alla direzione di laminazione.

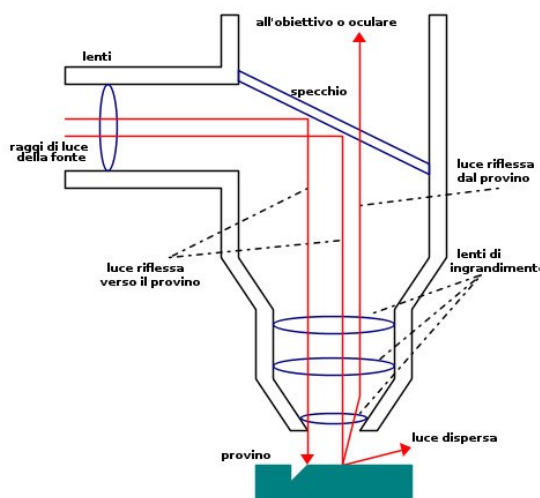
## 2.5 Microscopio ottico metallografico

I microscopi ottici utilizzano le lunghezze d'onda della luce visibile. Sono costituiti da un sistema di lenti adatto a focalizzare la luce nell'occhio o nella telecamera digitale. L'ingrandimento tipico dei microscopi ottici, all'interno dello spettro di luce visibile, è fino a 1000x, con un limite di risoluzione teorica di circa  $0,2 \mu\text{m}$ .

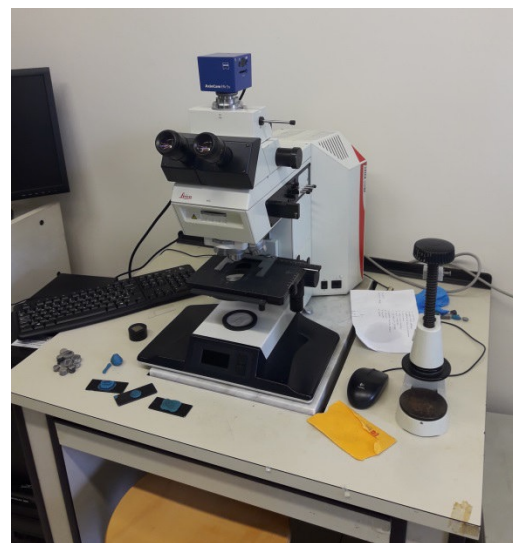
L'osservazione dei campioni è stata effettuata utilizzando il microscopio ottico metallografico, che sfrutta la luce riflessa sul campione. Il campione attaccato chimicamente con Nital 3% ha messo in risalto tutta la microstruttura dell'acciaio laminato, e nello specifico la conformazione e la disposizione della fase perlitica e dei bordi grano.

Il microscopio ottico è composto da un tavolino portacampioni dove è possibile posizionare la superficie da osservare. La luce proveniente dalla sorgente luminosa, posta nella parte retrostante al corpo del microscopio, viene fatta collimare attraverso diaframmi e diretta attraverso uno specchio alla superficie del provino dopo aver attraversato l'obiettivo. La luce riflessa si concentra nuovamente nell'obiettivo dove il segnale luminoso è deviato dal prisma verso la lente oculare da dove è possibile osservare la superficie da analizzare a diversi livelli di ingrandimento. Per proseguire le analisi quantitative e qualitative delle diverse microstrutture, è stata necessaria l'acquisizione delle immagini tramite videocamera digitale.

Per ogni provino AFV vengono acquisite 2 immagini per la vista perpendicolare al senso di laminazione, una a 200x e l'altra a 500x, e altre due, con gli stessi ingrandimenti, per la vista parallela al senso di laminazione.



*figura 24 schema di funzionamento del microscopio ottico metallografico*



*Figura 23: Microscopio ottico metallografico*

## 2.6 SEM (scanning electron microscope)

Il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova è dotato di microscopio elettronico a scansione. Lo strumento in dotazione è il SEM Leica Cambridge Stereoscan 440 dotato di sonda EDS per le microanalisi.

Si è ricorso all'analisi al SEM per la ricerca di eventuali inclusioni metalliche e non metalliche. In particolar modo sono stati presi ad esame i provini in cui i valori di resilienza sono relativamente bassi rispetto alla media campionaria. Inoltre per le analisi frattografiche dei provini Charpy sono stati impiegati gli elettroni secondari al fine di ricavarne un'osservazione ad alta risoluzione.

Il microscopio elettronico a scansione è composto da diverse componenti:

- sistema di pompaggio del vuoto;
- sorgente per la produzione di elettroni liberi ad alta energia;
- sistema di accelerazione degli elettroni liberi;
- sistema di lenti elettromagnetiche per la focalizzazione del fascio elettronico sulla superficie da osservare;
- rilevatori per i vari effetti prodotti dall'interazione fra l'elettrone e la materia, che a seconda della energia e lunghezza d'onda permettono di ricavare informazioni utili all'analisi degli elementi del campione;
- sistema hardware di trattamento e conversione del segnale rivelato in segnale visivo.

Il fascio di elettroni è generato da un cannone elettronico composto da un filamento di tungsteno o di esaboruro di lantanio, che funge da catodo. Il filamento che opera da sorgente viene riscaldato fino a rilasciare elettroni per l'effetto termoionico. La potenza del sistema di emissione di elettroni è costante fra i 5 e i 30 kV. Per evitare l'interazione tra gli elettroni accelerati e l'aria, tutto l'apparato deve essere in vuoto (circa  $10^{-5}$  bar), Il campione deve essere conduttivo e collegato a terra con dello scotch conduttivo in modo da evitare accumuli di carica elettrica su di esso.

### **Elettroni retrodiffusi o elettroni di backscattering**

Gli elettroni retrodiffusi da atomi con elevato numero atomico  $Z$  originano ad un segnale più intenso. Nel monitor di visualizzazione le fasi con  $Z$  più elevato compaiono più chiare così come le inclusioni metalliche di Piombo, mentre inclusioni o fasi costituite da atomi con

numero atomico  $Z$  più piccolo appaiono più scure. L'osservazione con gli elettroni retrodiffusi permette di riconoscere anche visivamente i diversi elementi ma con una perdita di risoluzione e della tridimensionalità dell'immagine prodotta.

## Elettroni secondari

La rivelazione degli elettroni secondari permette un'osservazione ad alta risoluzione del campione, dovuta ad un ristretto volume di interazione che permette di rilevare anche i più piccoli dettagli fino a 5 nm. Con questa modalità anche la profondità di campo è molto elevata consentendo di mettere a fuoco le superfici di frattura che sono fortemente rugose e tridimensionali.

Il fascio elettronico viene orientato sul campione grazie alle bobine di deflessione e viene effettuata così la scansione. Il fascio elettronico incidente reagisce con la materia producendo raggi X, elettroni Auger, elettroni secondari, retrodiffusi e una quota di elettroni vengono assorbiti. Gli elettroni secondari e retrodiffusi vengono raccolti da un detector, convertiti in segnali elettrici e successivamente tradotti in pixel tramite un software che fornisce l'immagine in scala di grigi della superficie del campione osservata. L'immagine riportata a video è in funzione del numero atomico della materia che si sta osservando: le parti più chiare sono causate da elementi ad alto numero atomico, al contrario le zone più scure rappresentano porzioni di campione composto da elementi con basso numero atomico.

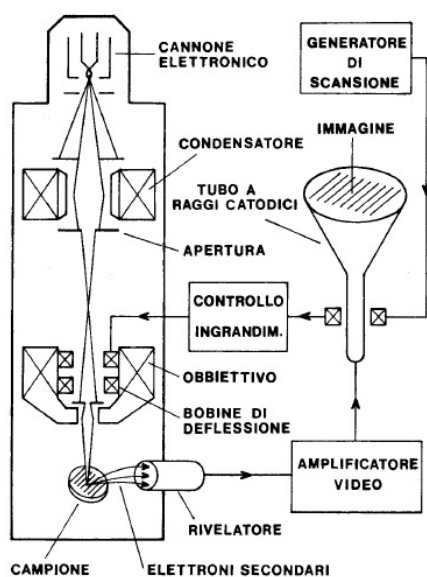


Figura 26 Schema di funzionamento del SEM



Figura 25 Microscopio elettronico

## 2.7 Termocamera

Per tracciare un profilo di raffreddamento della barra laminata sulla quale poi verrà effettuato il prelievo dello spezzone, si è reso necessario l'utilizzo di termocamere. La temperatura del prodotto appena uscito dall'ultima gabbia finitore si aggira intorno ai 1000 - 1050°C e pertanto viene direttamente scaricato nella prima corsia della placca di raffreddamento. La prima termocamera che viene utilizzata è la Minolta Land Cyclops 153A che ha un range di temperature rilevabili (da +500 a +3250°C) adatto per i primi minuti di attraversamento della placca, mentre la seconda termocamera FLIR E60, con un range di rilevazione delle temperature più basso (da 0 a +650°C), ha permesso di tenere traccia dell'abbassamento della temperatura fino alla fine della placca.

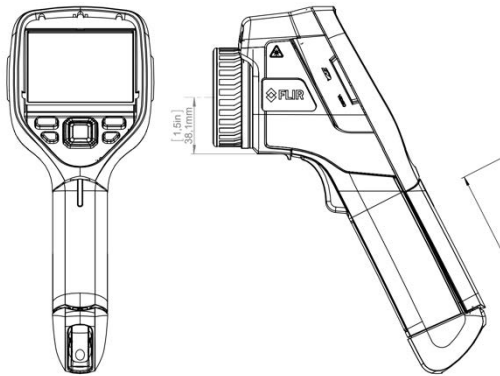


figura 28 Termocamera digitale flir e60

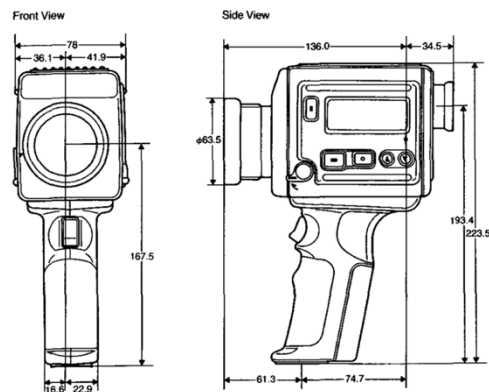


figura 27minolta land cyclops 153a

Per costruire la curva di raffreddamento è stato indispensabile rilevare con un cronometro il tempo trascorso tra una rilevazione e l'altra. Si è presa in considerazione anche la geometria della placca di raffreddamento, la quale è composta da 20 posizioni, in cui le prime 5 corsie di alloggiamento sono geometricamente "chiuse" sul fondo e sono fatte di ghisa, mentre gli altri 15 denti rimanenti della placca sono "aperti" sul fondo in modo che vi sia un flusso d'aria convettiva a raffreddare il prodotto.

Sono stati rilevati i tempi e le temperature in 4 momenti:

- 1 appena il profilo laminato entra in placca di raffreddamento;
- 2 quando il profilo oltrepassa le prime 5 posizioni di ghisa;
- 3 alla temperatura di 400°C;
- 4 al raggiungimento della via rulli (fine placca).

## 2.8 Diffrattometro XRD

Per la rilevazione di eventuali stress residui presenti nei materiali policristallini è stato utilizzato il diffrattometro ultra portatile SPIDER X.

Il sistema è composto da:

- un goniometro con un asse PSI ( $\Psi$ ), da  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ ;
- uno strip detector del tipo HPC (Hybrid Photon Counting), per la collezione simultanea di una porzione dello spettro di diffrazione XRD;
- un tubo di raggi-X a bassa potenza (4 W) con relativo alimentatore ad esso solidalmente collegato;
- un sistema di posizionamento basato su lettore laser;
- un supporto del goniometro con sistema di regolazione della distanza dal campione;
- un set di collimatori di differente diametro (0.5 mm, 1mm, 2 mm).

La diffrazione a raggi-X permette di misurare la deformazione del reticolo cristallino causata dalle tensioni residue, siano esse tensioni di trazione o di compressione. La tensione è calcolata tramite un modello matematico basato sulla deformazione lineare ed elastica del reticolo stesso. L'apparecchio sfrutta la Legge di Bragg, un fascio collimato di raggi-X diretto sulla superficie dell'acciaio, il quale viene riflesso diretto al rilevatore che genererà un diffrattogramma:

$$n\lambda = 2d \sin\Theta$$

in cui:

- $n$  è un numero intero che indica l'ordine di diffrazione;
- $\lambda$  la lunghezza d'onda della radiazione utilizzata;
- $d$  la distanza fra i piani cristallini;
- $\Theta$  l'angolo di diffrazione;

Si veda la Figura seguente

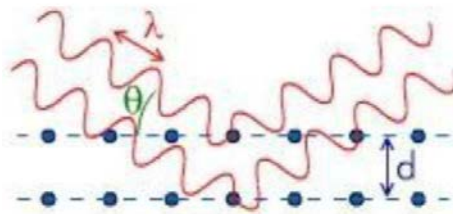


Figura 29 legge di Bragg

Nel caso in cui l'acciaio o un materiale policristallino, riceva una sollecitazione in campo elastico, (tensione residua oppure una tensione applicata da forze esterne) le distanze interreticolari dei cristallini subiscono una variazione dipendente dal segno della tensione e dall'orientazione dei cristallini stessi rispetto alla direzione della sollecitazione. Ad esempio, nel caso in cui venga applicata una sollecitazione di trazione semplice ad un provino, i piani reticolari paralleli alla superficie risultano avvicinati fra loro, mentre i piani reticolari perpendicolari si allontanano.

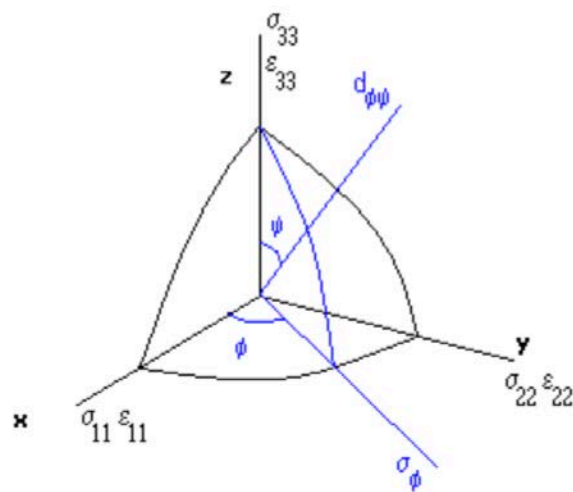


Figura 30 sistema di riferimento per la misura dei piani cristallini

Con  $\varepsilon_{\phi\psi}$  si indica la deformazione macroscopica in una precisa direzione indicata dagli angoli  $\phi$  e  $\psi$  nel sistema di riferimento in Figura 18.

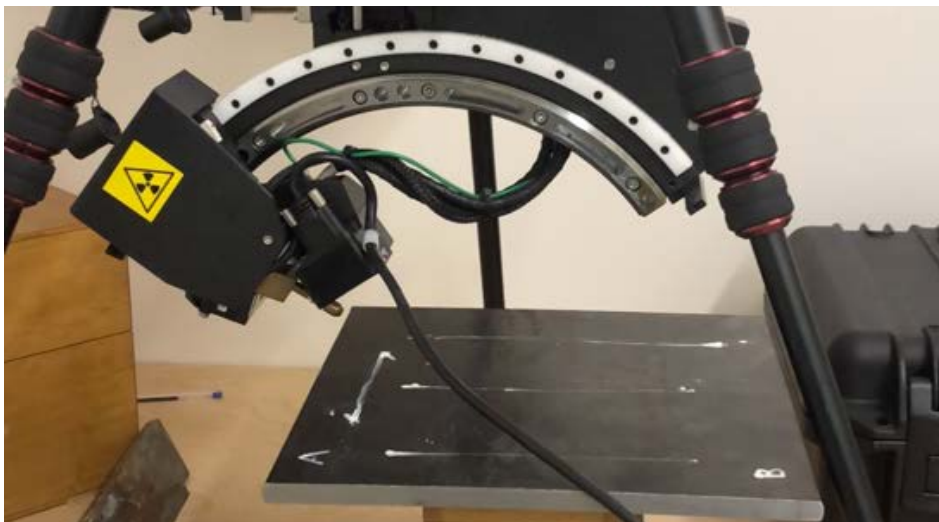
La deformazione è quindi la variazione della distanza interplanare di tale direzione rispetto alla distanza interplanare  $d_0$  della parte di materiale non sollecitato;

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0}$$

Si può esprimere  $\varepsilon_{\phi\psi}$  in funzione delle componenti del tensore della tensione residua e ricavare:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi$$

Nella pratica la misura sperimentale si esegue rilevando l'intensità della radiazione diffratta in funzione dell'angolo di diffrazione  $2\theta$ . Il rivelatore (strip detector) di cui è dotato questo sistema diffrattometrico permette di tracciare l'intero picco con un'unica collezione di dati. L'emettitore di raggi-X e il rivelatore viene accuratamente tarato manualmente per quanto riguarda la distanza  $Z$  dalla superficie da analizzare. L'apparato è mobile e collocato su una corsia del goniometro dove tramite il software dedicato viene mosso e quindi modificato l'angolo  $\psi$ , così è possibile riprodurre su un piano  $2\theta$ - $\sin 2\psi$  l'andamento della posizione dei picchi relativi al piano cristallino che si è scelto di analizzare. Nella Figura sottostante è possibile notare la rilevazione delle tensioni residue in uno spezzone di Piatto 250x10, dove sono poi successivamente stati ricavati i provini Charpy denominati AFV21A e AFV21B.



*Figura 31 Rilevazione delle tensioni residue tramite diffrattometro spider X*

# Capitolo 3

## Risultati sperimentali

Introduzione: in questo capitolo vengono illustrati i risultati delle analisi sia statistiche che sperimentali atte ad individuare le cause che portano ad aumentare la variabilità del valore di resilienza oltre che ad abbassarne il valore medio.

### 3.1 Analisi statistica

A seguito di alcune valutazioni di carattere commerciale vengono approfondite le analisi statistiche dei profili piatti e angolari di acciaio strutturale S355 in quanto dai rilievi effettuati emergono dei valori di resilienza con una variabilità leggermente più elevata rispetto alle altre tipologie. A tal fine viene considerato anche l'aspetto economico di produzione; Un elevato quantitativo di ordini infatti, incidono in modo sostanziale sulla percentuale di tonnellate prodotte annualmente. Ai fini dell'analisi statistica è stato preso in considerazione il periodo di produzione da gennaio 2018 fino a marzo 2019 e rispettivamente i profili ANG sono state laminate 20206 Ton e della tipologia PIA circa 11116 Ton.

Prendendo in analisi i Piatti (PIA) si individuano quindi due sottocategorie in base allo spessore, includendo tutte le larghezze possibili che vanno dai 60 mm a 250 mm di larghezza. Il primo sottogruppo riguarda i piatti con spessore dai 5 mm ai 12 mm, mentre il secondo sottogruppo riguarda gli spessori dai 12 ai 30 mm. Infatti, senza fare distinzione sulle larghezze e quindi considerando tutti i prodotti. Nello specifico i profili presi in esame dal database hanno spessore 5,8,10,11,12,15,25,30 mm e larghezza 60,70,75,80,90,100,120,140,150,180,200.

Nella Carta di controllo sottostante è riportata la distribuzione dei valori di resilienza dei piatti laminati del primo sottogruppo, ossia quelli con spessore 5-12 mm. Si evidenzia, in particolare, il numero di prove rilevate, che sono  $N=95$ , il valore medio di resilienza pari a 74,34J, si rileva la voce "Sigma generale", ossia la deviazione standard, ha un valore pari a  $\sigma=31,30$  e il numero di casi sotto il limite LSL impostato a 37J è del 9,47%.

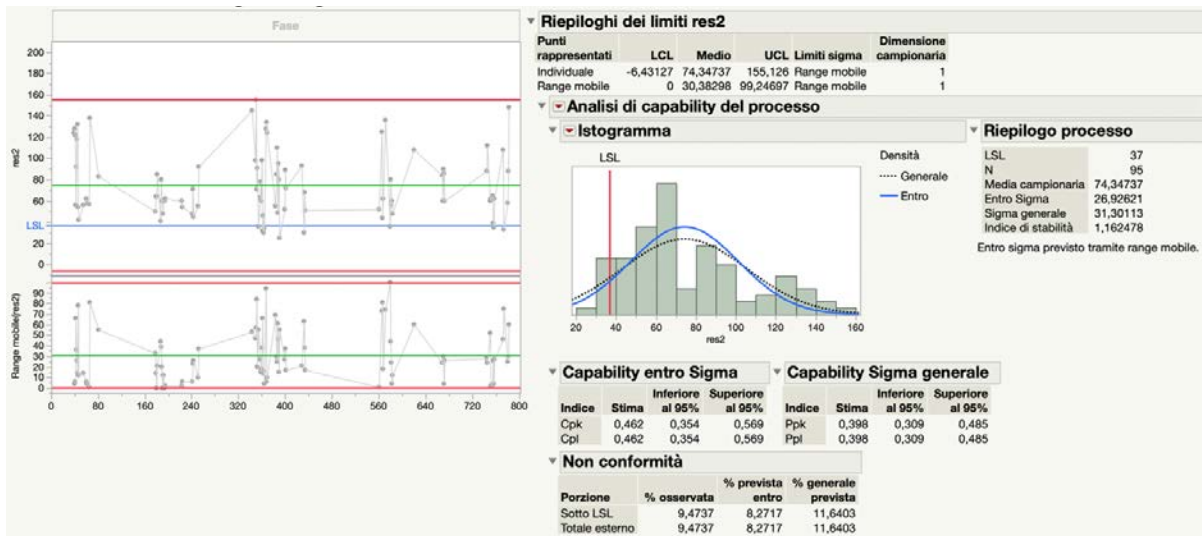


Tabella 4: Carta di controllo dei prodotti "piatti" dello spessore 5-12mm

Nella Carta di controllo seguente è riportata la distribuzione dei valori di resilienza dei piatti laminati del secondo sottogruppo, ossia quelli con spessore più elevato che ha un range di 12-30 mm. Si evidenzia il numero di prove rilevate sono N=141 il valore medio di resilienza 96,54J, la relativa deviazione standard di  $\sigma=31,89$  e il numero di casi sotto il limite LSL impostato a 37J è del 1,41%.

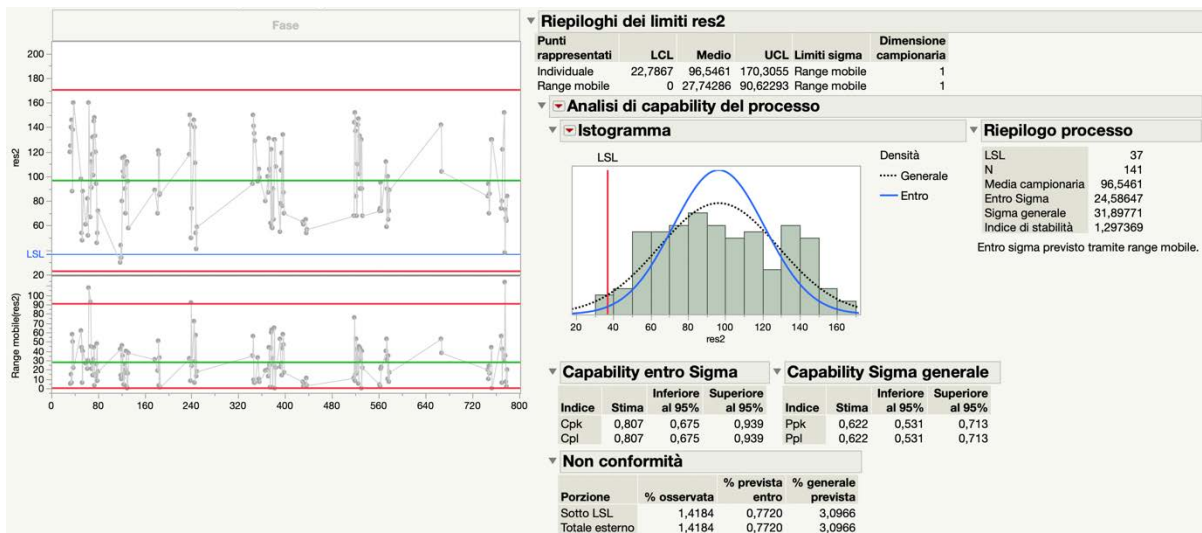


Tabella 5 Carta di controllo dei prodotti "piatti" dello spessore 12-30mm

Nella tabella soprastante vengono riportati i valori delle analisi di entrambi i sottogruppi al fine di eseguire una più agevole comparazione.

<b>Profilo PIATTO</b>		
	<b>Primo sottogruppo 5-12mm</b>	<b>Secondo sottogruppo 12-30mm</b>
<b>N</b>	95	141
<b>Media campionaria</b>	74,35J	96,59J
$\sigma$	31,30	31,90
<b>LSL</b>	37	37
<b>SOTTO LSL</b>	9,47%	1,42%

*Tabella 6 Prospetto comparativo dei piatti laminati di entrambi i sottogruppi*

Si può notare come i laminati piatti del primo sottogruppo mostrino una resilienza media generalmente inferiore di circa 20 J rispetto ai valori di resilienza dei piatti appartenenti al secondo sottogruppo.

Per quanto riguarda lo scarto quadratico medio  $\sigma$ , il valore rimane pressoché costante per entrambi i sottogruppi di piatti. Inoltre, è stato inserito un limite di specifica inferiore LSL (lower specific limit) di 37J, ovvero 10J maggiore rispetto ai dettami della normativa. Considerando LSL si nota un valore di 9,47% di casi fuori limite di specifica nei piatti che appartengono al sottogruppo 5-12 mm, rispetto al sottogruppo con spessori più elevati (12-30mm) che ha solamente pochi casi l'1,42%.

Lo stesso tipo di approfondimento viene realizzato per i laminati di tipo angolare. I profili angolari ANG sono disponibili in diversi spessori e dimensioni delle ali. Dal database vengono estratti i valori di resilienza di profili angolari senza fare distinzione sullo spessore, ossia senza dividere in più gruppi i profili, in quanto il range di valori è molto più ristretto e non evidenziano differenze sostanziali né circa il valore medio né per quanto riguarda la dispersione dei dati.

Le prove di resilienza rilevate sono di profili angolari con dimensioni di spessore 6,7,8,9,10,11,12,14,15 mm e, per quanto riguarda la larghezza dell'ala, 70,80,90,100,120 mm.

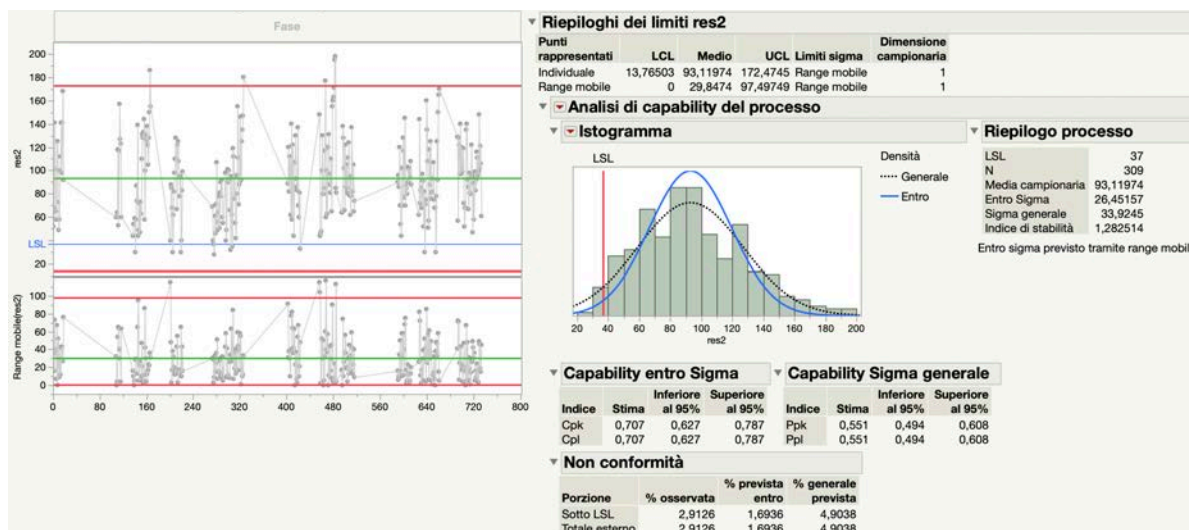


tabella 7: carta di controllo dei prodotti angolari dello spessore di 6-15mm

Si riassumono i dati statistici calcolati nel prospetto sottostante:

<b>Profilo ANGOLARE</b>	
<b>Spessore 6-15mm</b>	
<b>N</b>	309
<b>Media campionaria</b>	93,12
$\sigma$	33,93
<b>LSL</b>	37
<b>SOTTO LSL</b>	2,91%

Tabella 8: prospetto riassuntivo dati jmp dei laminati angolari

Le prove analizzate dal database sono 309, la media campionaria del valore di resilienza è 93,12J, che è un valore del tutto simile ai piatti appartenenti al secondo sottogruppo. La dispersione media dei valori di resilienza  $\sigma=33,93$ , il valore di limite di specifica impostato rimane 37J conseguendo una percentuale di casi fuori specifica (Sotto LSL) del 2,91%.

### 3.2 Tentativo di modellizzazione della variabilità della resilienza applicando la tecnica di Multiple Regression

Alla luce delle analisi precedenti si è tentato di modellizzare i risultati della resilienza in funzione dei parametri chiave considerati.

Un primo approccio, sviluppato applicando la tecnica di regressione multipla alla matrice dei dati con un modello contenente solo termini lineari, ha fornito uno scadente accordo fra i dati ed il modello stesso.

Si è deciso pertanto di valutare modelli contenenti anche termini non lineari, quali, per esempio, i quadrati delle variabili e i prodotti misti.

A tal fine si è utilizzata una tecnica di regressione multipla a fasi successive, per mezzo della quale sono stati valutati i termini ritenuti più importanti.

Il modello in grado di fornire la migliore previsione correla la resilienza con 13 termini fra lineari e non lineari

Come si può osservare dal grafico sotto riportato la qualità della modellizzazione sembra sufficientemente buona, come è anche attestato da un coefficiente di correlazione di  $R_q = 0.78$ .

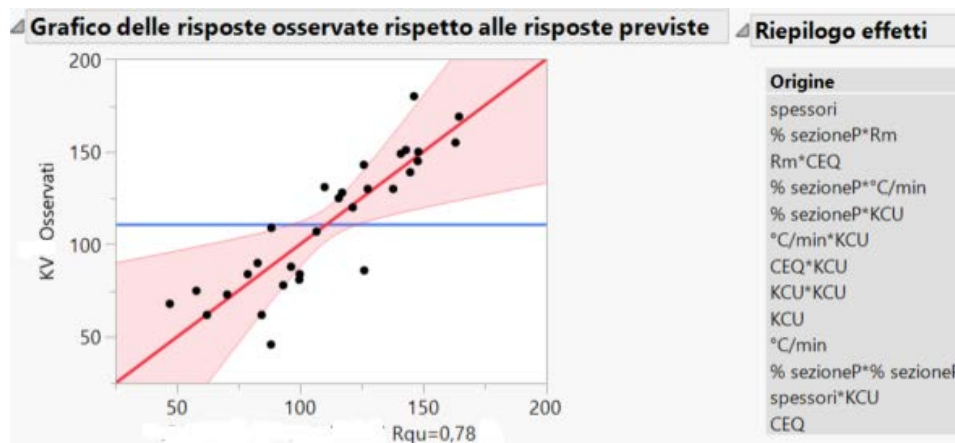


Figura 32 grafico delle risposte osservate rispetto a quelle previste

Si ritiene che sia un buon modello previsionale sulle capacità di operare in predizione sul comportamento della variabile resilienza sia notevolmente importante tanto più se si considera l'esiguità delle variabili da prendere in considerazione e la semplicità operativa per il loro ottenimento. In ultimo è stata sfruttato il "profiler di previsione", un'applicazione del software Jmp di statistica che permette di effettuare una simulazione, cambiando il valore delle variabili inserite e quindi di trovare una combinazione che permetta di minimizzare il valore della

variabilità “ $\sigma$ ” della resilienza dei prodotti. Sono state eseguite 4 valutazioni prendendo in considerazione solamente gli spessori 5-10-20 mm.

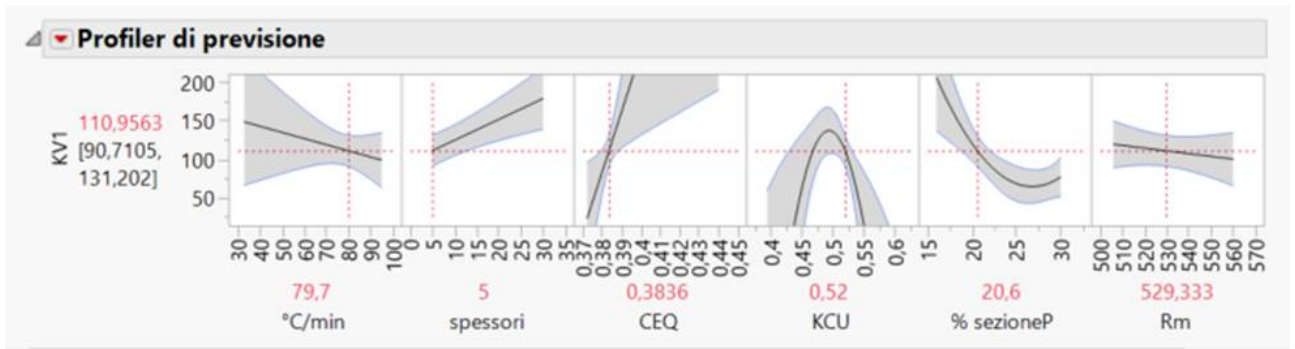


Figura 33 profiler di previsione dello spessore 5 mm



Figura 34 profiler di previsione dello spessore 10 millimetri

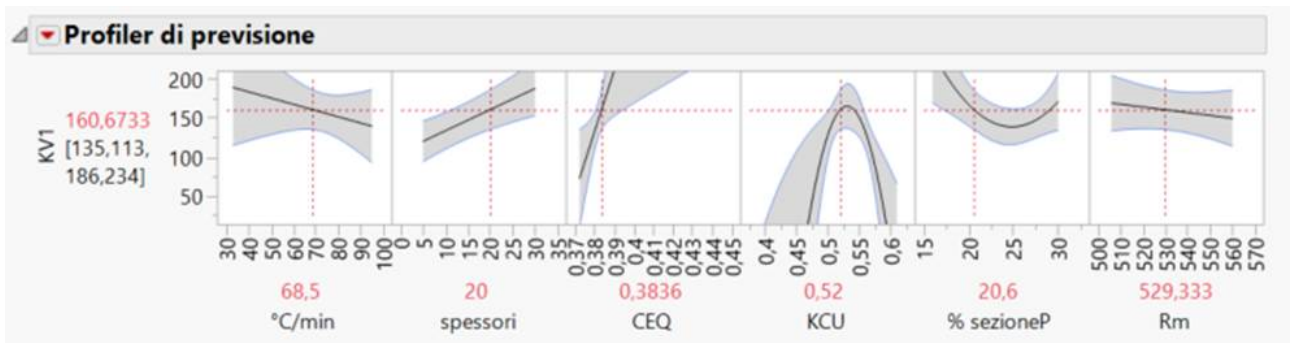


Figura 35 profiler di previsione dello spessore di 20 millimetri

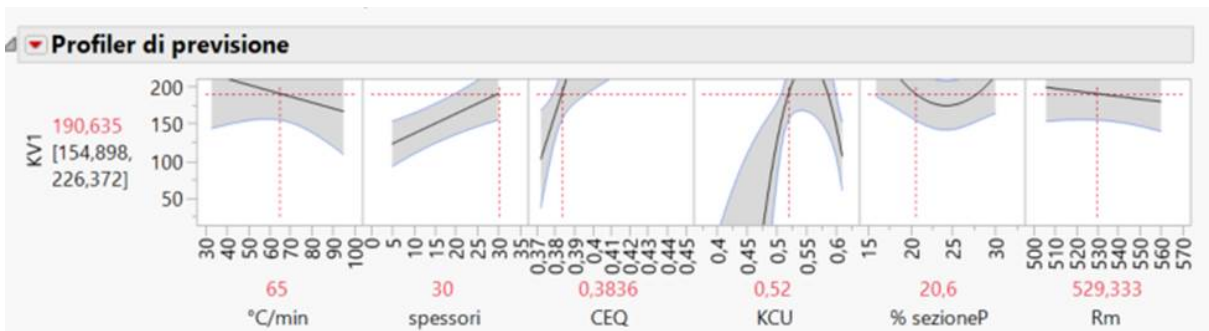


Figura 36 profiler di previsione dello spessore di 30 millimetri

### 3.3 Temperatura di laminazione

Si è reso necessario controllare il range delle temperature di laminazione, accertandosi che avvenga in zona austenitica del diagramma bifasico Fe-C, in quanto la laminazione a caldo on oggetto è di tipo tradizionale.

In un primo momento è stata posta l'attenzione al range di temperature con le quali il materiale viene laminato. L'acquisizione dei dati di laminazione è stata realizzata grazie al software IbaAnalyzer, collegato al sistema di monitoraggio continuo del laminatoio. Il software si interfaccia ai due termometri ad irraggiamento posti direttamente in linea. Il primo pirometro è posizionato prima della gabbia n.1 quindi dopo lo sbozzo, mentre il secondo pirometro è posizionato dopo la gabbia finitore, quindi alla fine del treno di laminazione, ovvero all'ingresso della placca di raffreddamento.

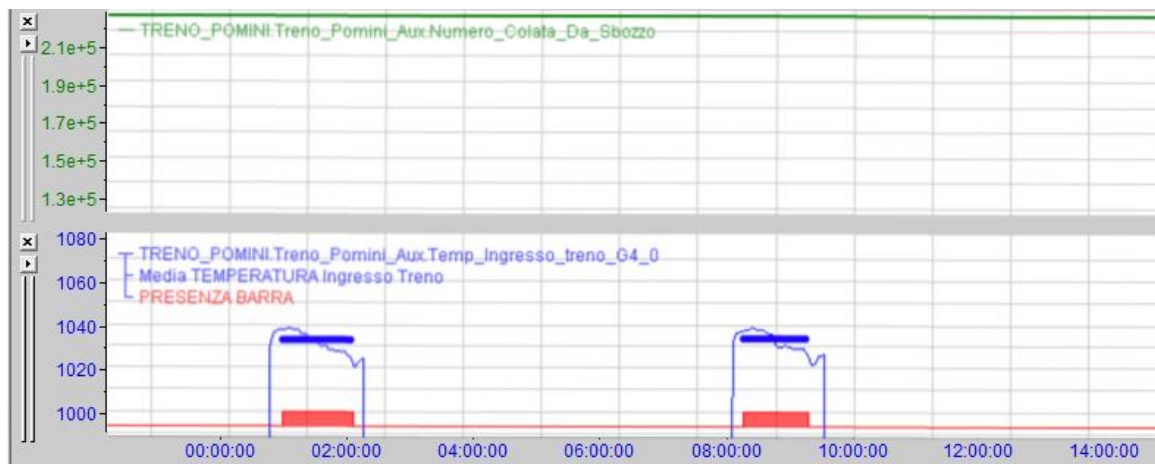


Figura 37 IbaAnalyzer rilevazione temperatura media singola billetta

Nella figura soprastante è possibile visualizzare la time line relativa all'inizio della laminazione. Nel primo grafico viene riportato il numero della colata in laminazione, invece nel secondo grafico, si evidenzia la temperatura istantanea, temperatura media e il segnale della presenza della billetta. Sull'asse delle ascisse viene riportato l'orario di laminazione, mentre sulle ordinate la temperatura in gradi Celsius. Le barre orizzontali di colore blu rappresentano la temperatura media di ogni billetta in ingresso del treno di laminazione. Viene così autonomamente calcolata dal software la media delle rilevazioni di temperatura effettuate nei 25-30 secondi di transito del materiale, ossia in presenza del tratto rosso che indica la presenza del materiale.

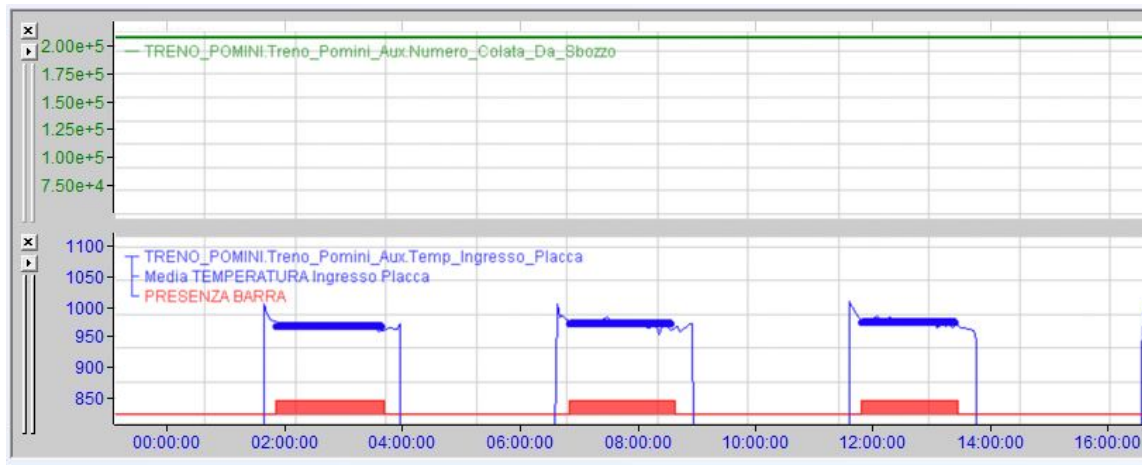


Figura 38 IbaAlyzer rilevazione temperatura media singola billetta

Nella figura soprastante viene visualizzata la temperatura media del materiale giunto all'ultima gabbia di laminazione, ossia in uscita dal treno. Dai dati estratti durante la laminazione dei profili angolari e profili piatti, e rielaborati con Matlab, si evince che la laminazione dell'acciaio S355 inizia e termina nella regione austenitica. La linea verde nel diagramma Fe-C sottostante segna il range delle temperature in entrata e uscita del treno, che va dai 1100-1050°C all'ingresso del treno e ai 900-950°C alla fine, ovvero all'ultima gabbia del laminatoio.

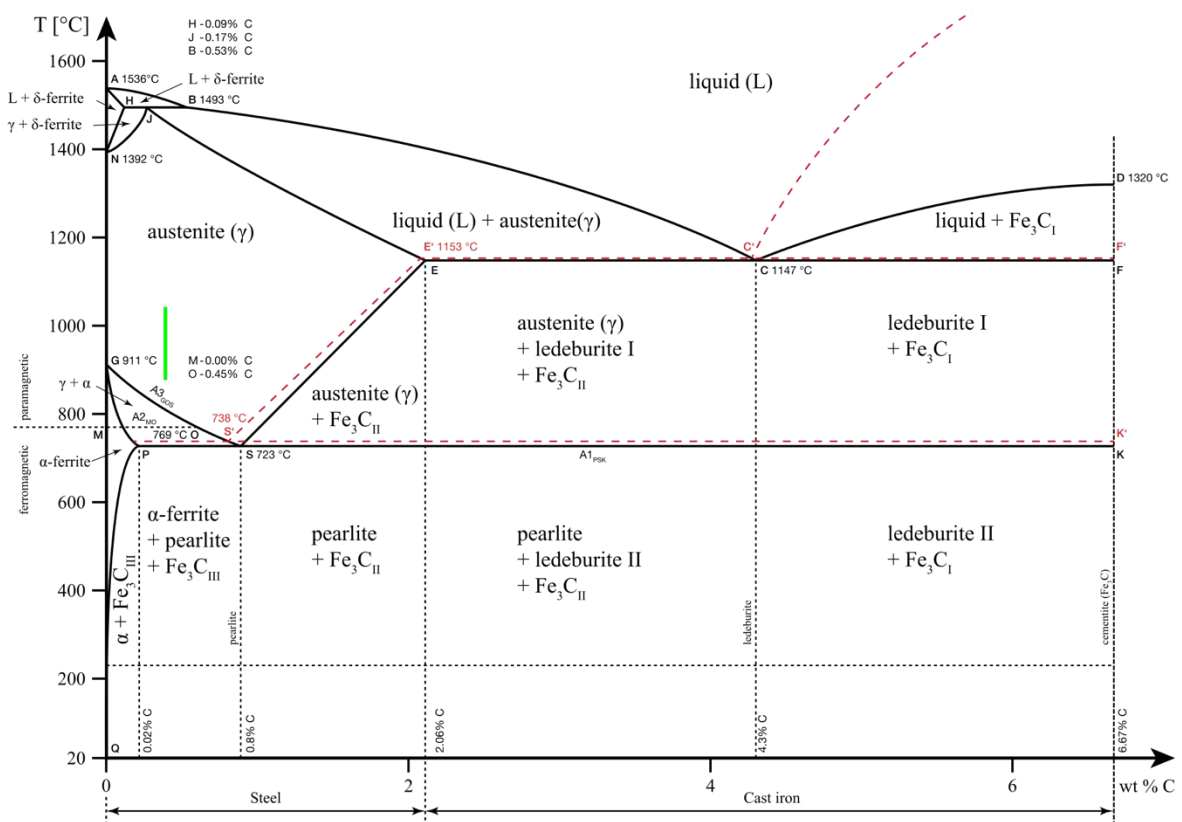


Figura 39 Diagramma di stato Fe-C

### 3.4 Placca di raffreddamento

Il processo di laminazione si conclude con il raffreddamento del laminato, che può avvenire in modo più o meno controllato in base al tipo di acciaio impiegato.

Relativamente all'acciaio strutturale S355J2, viene impiegato il raffreddamento in aia calma adagiando il profilo sulla placca e, in questa fase, la microstruttura del laminato inizia ad organizzarsi in modo definitivo.

Durante il transito del profilo nella placca è stato necessario tenere traccia dei tempi di raffreddamento e delle relative temperature al fine di ricostruire la curva di raffreddamento. Successivamente è stato eseguito il prelievo di spezzone per conseguire le analisi microstrutturali relativamente a quei profili di cui si è reso noto il raffreddamento termico in funzione del tempo. Le categorie di profili considerati sono quelle dei Piatti e Angolari.

L'operazione è stata svolta manualmente con il supporto delle termocamere ad infrarosso e di un cronometro digitale. Le foto sottostanti sono state scattate dalla termocamera Flir E60 e, si nota nell'immagine a sinistra la diversità di colori in funzione della temperatura il laminato, in particolar modo la barra mirata posta al centro del mirino misura 470°C. L'immagine sottostante a destra raffigura il laminato ormai giunto alla fine della placca misurando 351°C

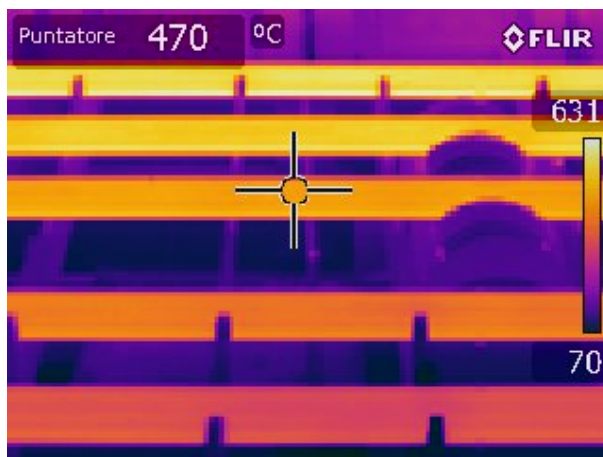


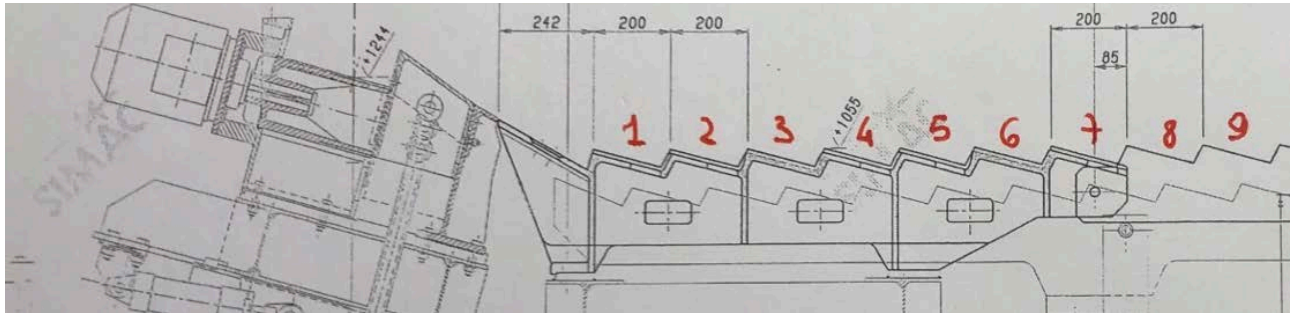
Figura 41 Termografia FLIR E60



Figura 40 temperatura laminato nella via rulli

Il tempo di permanenza in placca del laminato è fortemente influenzata da due fattori che non sono di natura microstrutturale. Il primo fattore è la velocità di produzione del treno di laminazione, il secondo fattore è legato al vincolo di condurre il laminato fuori dalla placca non oltre una soglia massima di temperatura per non compromettere le successive fasi di taglio e impacchettamento.

La placca di raffreddamento ha una particolare conformazione e, nello specifico è strutturata in due modi: La prima parte è atta ad accogliere il laminato alle temperature più elevate ed è composta da 7 piani inclinati “chiusi” per conferire un raffreddamento più repentino nei primi istanti del raffreddamento, più precisamente nella figura sottostante è riportata la sezione.



*Figura 42 sezione trasversale placca di raffreddamento*

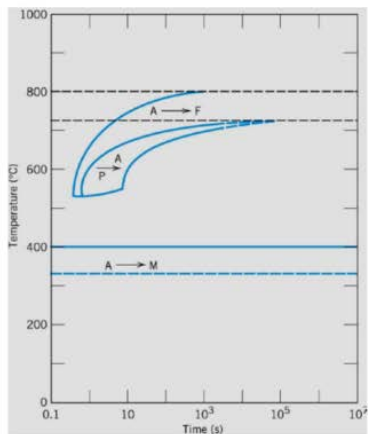
La seconda parte della placca è composta dai restanti 14 piani inclinati di tipologia totalmente differente. Essi apportano uno scambio termico di natura totalmente convettiva in quanto il sistema di appoggio e trascinamento dei prodotti laminati è di tipo “aperto”, i piani inclinati prendono la conformazione di barre seghettate dove il contatto con il materiale da raffreddare è ridotto al minimo. Nella foto seguente si nota la differenza di conformazione della placca.



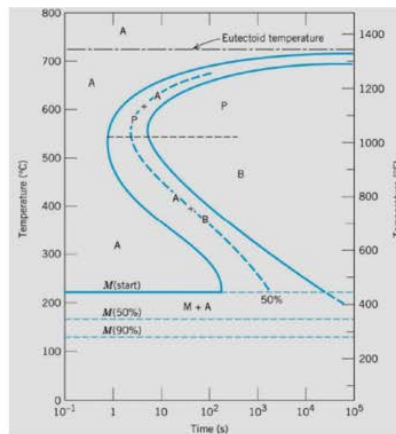
*Figura 43 profili PIA100x20 in transito nella placca di raffreddamento*

### 3.5 Analisi del raffreddamento termico con JMatPro

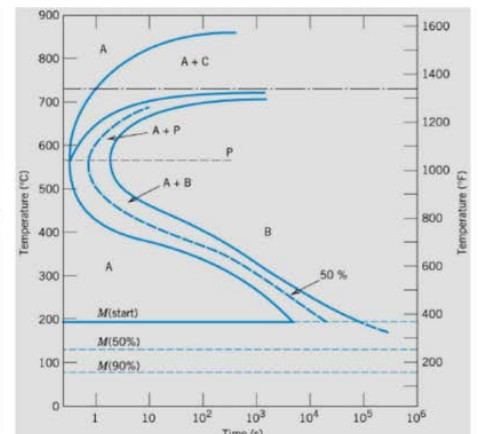
Per condurre l'analisi termica è stato indispensabile riprodurre delle curve CCT (continuous cooling transformation) relative all'acciaio S355. L'acciaio S355 è un acciaio di tipo ipoeutettoideico le cui curve CCT si differenziano dagli acciai eutettoidici e ipereutettoidici.



Acciaio ipoeutettoideico



Acciaio eutettoideico



Acciaio ipereutettoideico

Figura 44 grafici esempio di curve cct

In ambito industriale le curve CCT trovano occupazione nel caso si debba definire un trattamento termico da effettuare su un prodotto.

La loro caratteristica consiste nel prevedere quali saranno le fasi presenti, e le loro quantità, quando l'acciaio sarà a temperatura ambiente, questo è possibile in base alla velocità di raffreddamento del prodotto laminato. I diagrammi con le curve di trasformazione anisoterma (CCT) sono più frequentemente utilizzate rispetto a quelle relative alle curve TTT (curve di trasformazione isoterma), in quanto è più economico e più pratico raffreddare il materiale in modo continuo, anziché riscaldare rapidamente e mantenere la temperatura target per tempi lunghi

Per mezzo del software Jmatpro è stato possibile ricostruire le curve CCT dell'acciaio S355J2. I dati di input richiesti dal programma sono la temperatura di austenizzazione, l'analisi chimica e la grandezza media del grano. Il risultato elaborato dal software è il grafico in scala logaritmica sottostante ove si notano le tre curve orizzontali, una relativa alla ferrite e due relative alla perlite. Nella parte destra sono riportati i valori percentuali degli elementi chimici rilevati in azienda sull'acciaio S355J2.

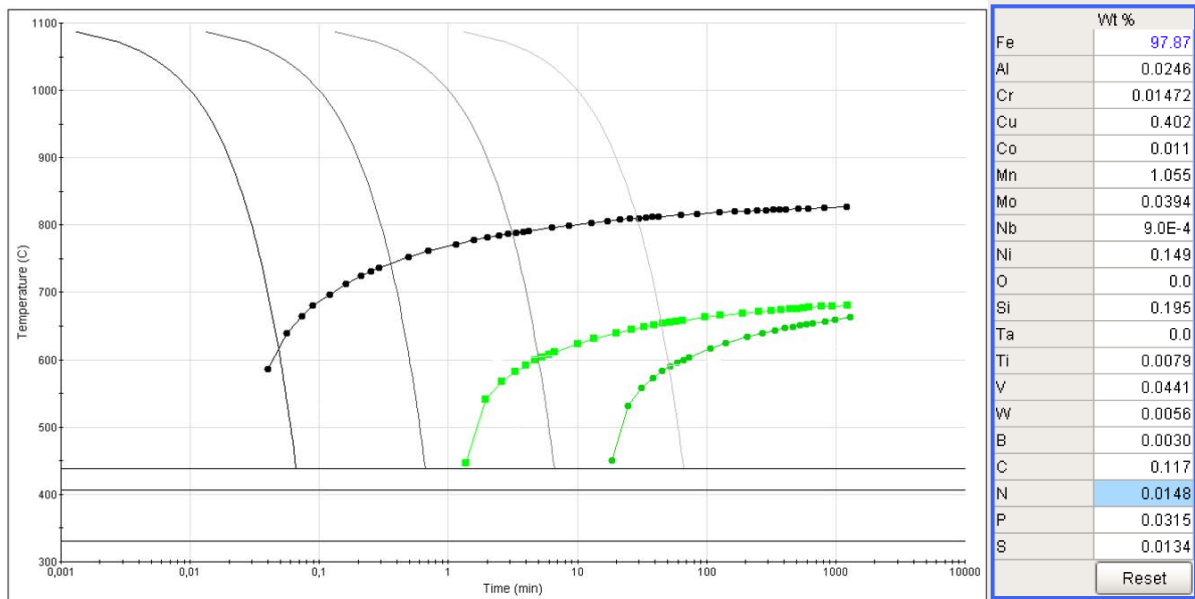


Figura 45 Curve CCT acciaio S355 plot eseguito con JMatPro

I dati termici e cronometrici sono stati collezionati in un foglio elettronico e successivamente rielaborati tramite il software OriginLab per tracciare sia i punti su cui verrà tracciata la curva di raffreddamento e sia per tracciare le curve di trasformazione isoterma CCT generata da JmatPro.

Di seguito sono riportati i grafici rielaborati con OriginLab completi sia delle curve CCT relative alle trasformazioni di fase, che la curva di raffreddamento tracciata da punti raccolti con la termocamera in placca di raffreddamento.

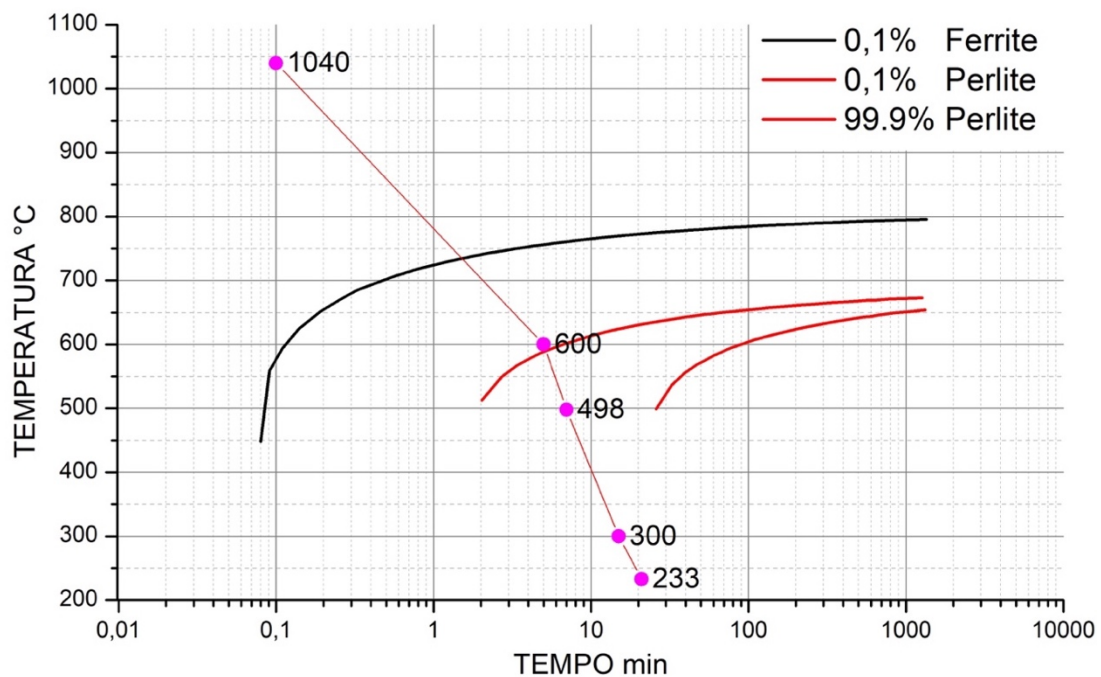
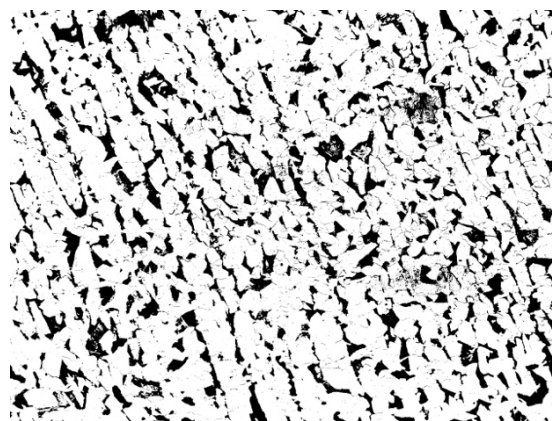
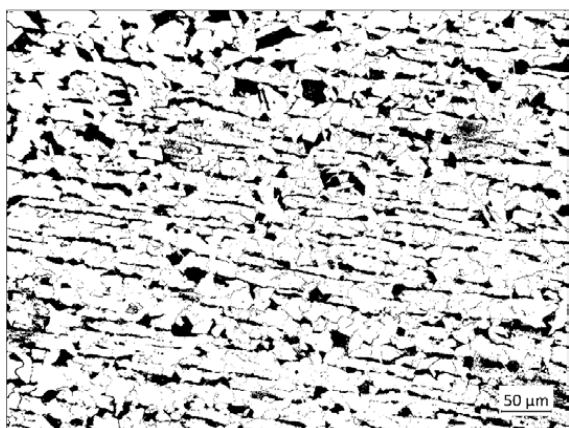


Figura 46 Curva cct del campione AFV15

Nell'asse delle ascisse è riportato il tempo in scala logaritmica mentre nelle ordinate la temperatura in °C. La curva che discende da sinistra verso destra rappresenta la curva di raffreddamento, la curva nera crescente rappresenta l'inizio della formazione della ferrite, mentre le altre rappresentano la trasformazione della perlite. Sono tracciate solamente le curve rappresentative della perlite in quanto è un acciaio a basso carbonio raffreddato in aria calma. Ad esempio, il primo valore di temperatura rilevato è 1040°C esattamente nel momento in cui il laminato è stato appena scaricato nel primo scalino della placca e quindi la temperatura registrata al tempo zero. Le ultime temperature rilevate, generalmente quelle al di sotto di 300° sono rilevate quando il profilato arriva alla fine della placca in prossimità della via rulli. Successivamente, il rilevamento della fase perlitica e della fase ferritica è stato fatto tramite ImageJ, un software di analisi d'immagine che conteggia le aree di colore scuro, relative alla fase perlitica, rispetto alle aree di colore Bianco della fase ferritica. Le immagini sottostanti sono delle sezioni dei provini AFV15A e AFV15B, sono servite per quantificare le due fasi presenti.



<b>QUANTIA PERLITE SEZ</b>	
<b>AFV15A</b>	<b>AFV15B</b>
21	22

Sono stati elaborati i grafici di tutti i provini oggetto di studio:

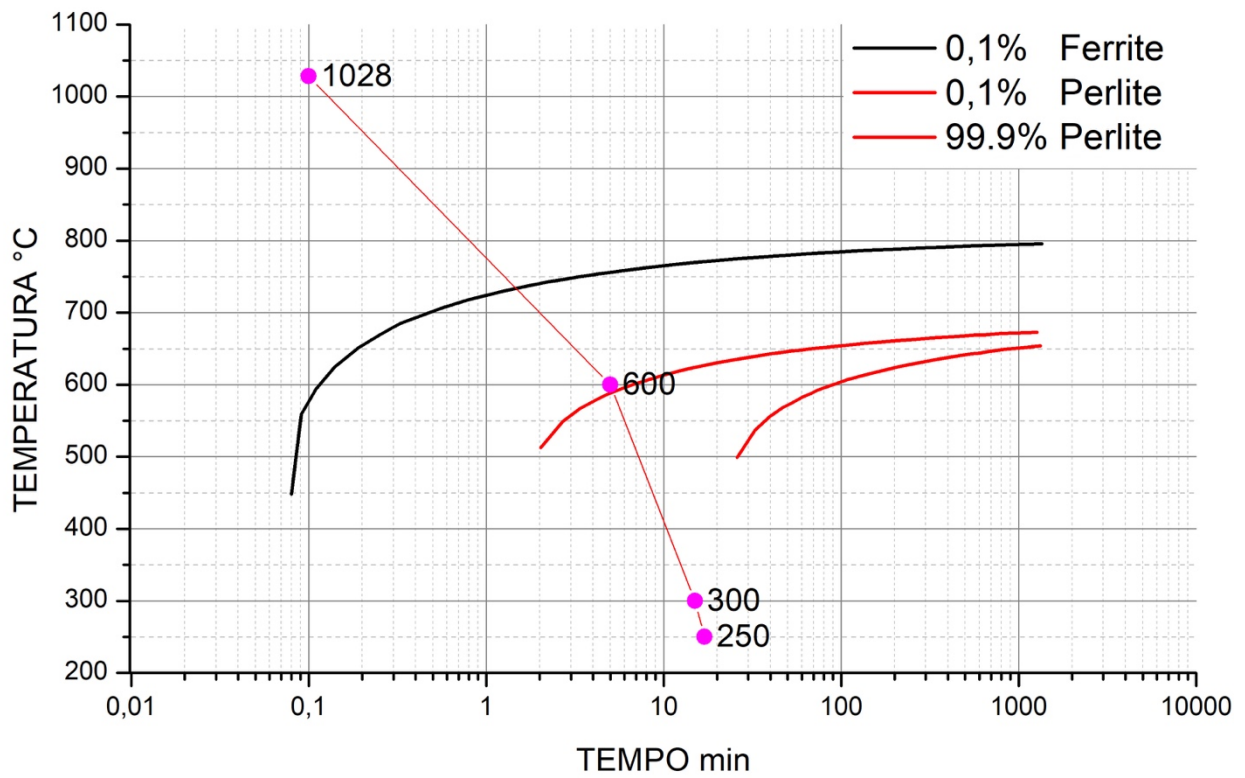


figura 49 curva cct del campione afv16



Figura 47 16A

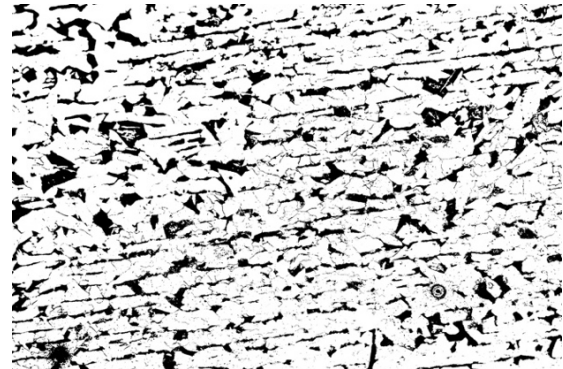


Figura 48 16B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV16A	AFV16B
20	22

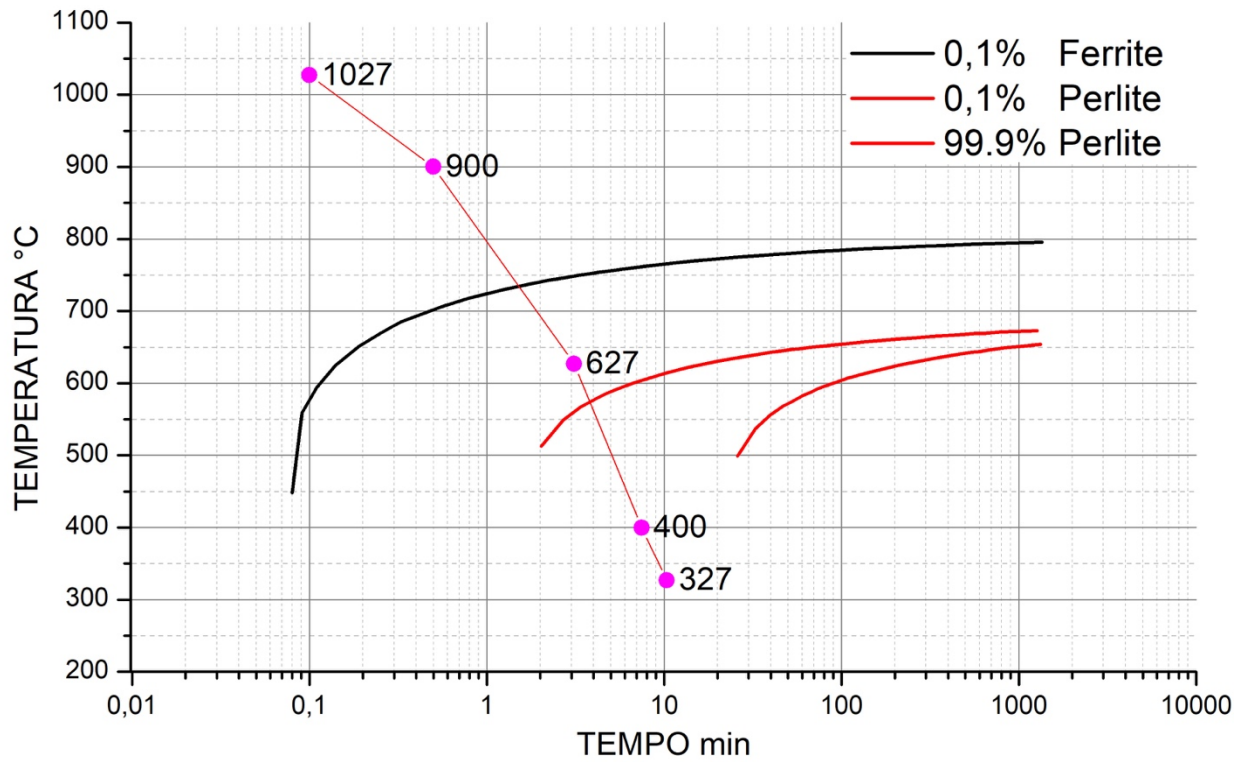


Figura 50 CURVA CCT DEL CAMPIONE AFV18

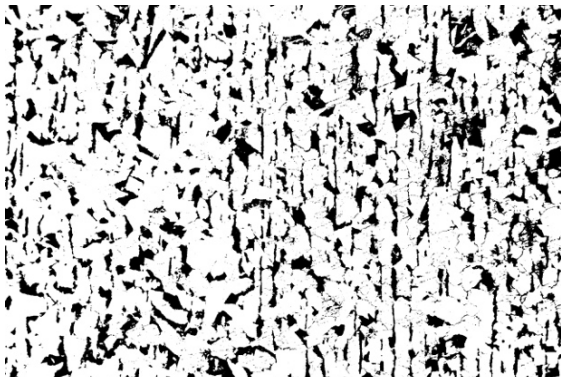


Figura 52 AFV18A

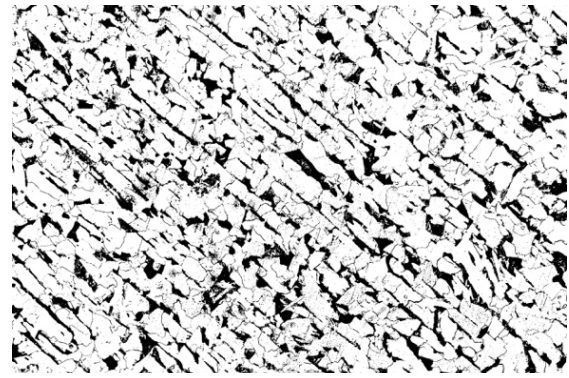


Figura 51 AFV18B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV18A	AFV18B
21	22

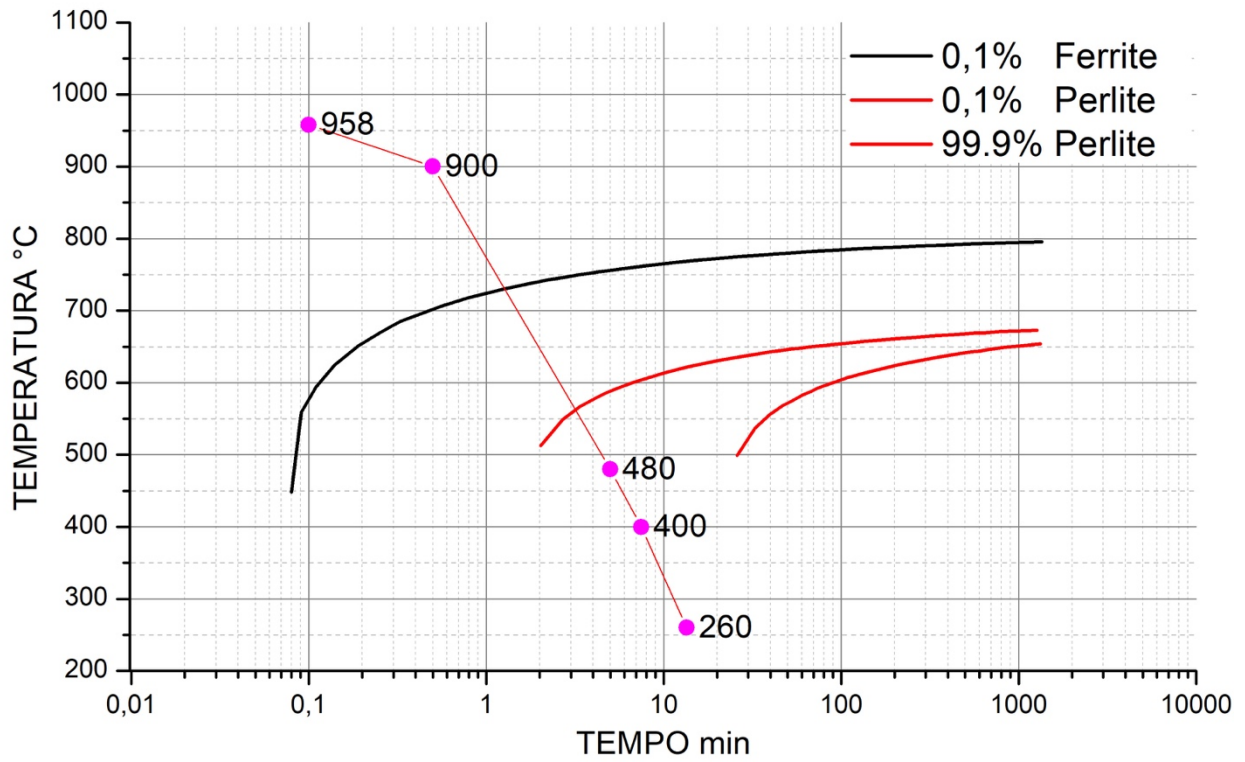


Figura 53 curva cct del campione AFV21

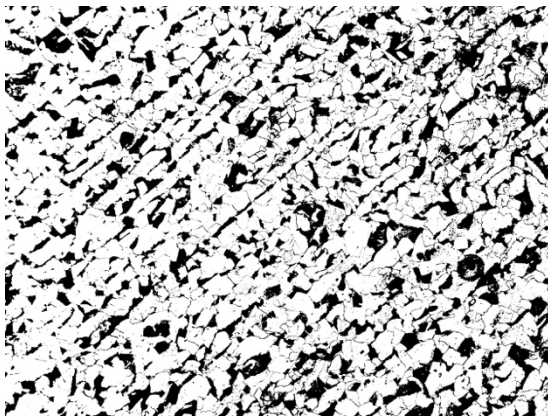


Figura 55 AFV 21A

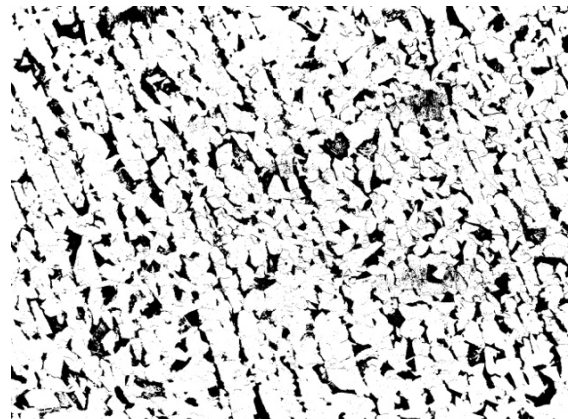


Figura 54 AFV 21B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV21A	AFV21B
21	21

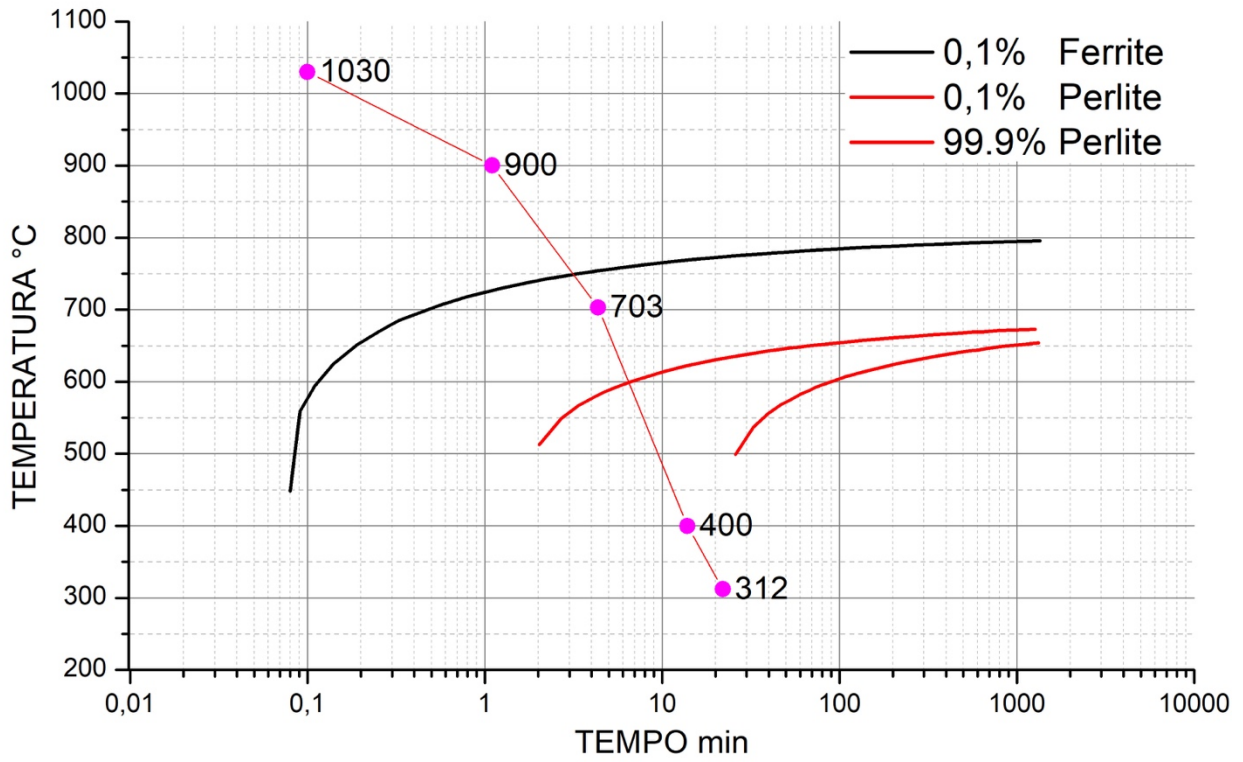


Figura 56 curva cct del campione AFV22



Figura 58 AFV22A

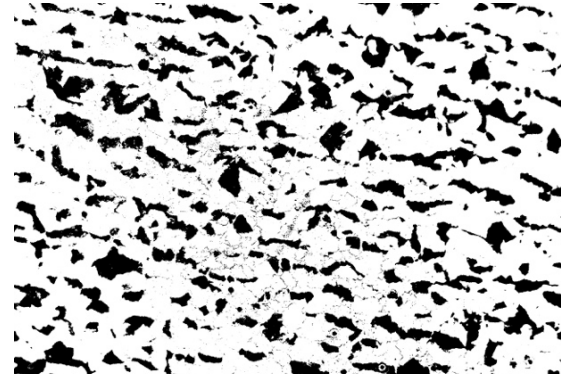


Figura 57 AFV22B

QUANTIA PERLITE	
AFV22A	AFV22B
24	25

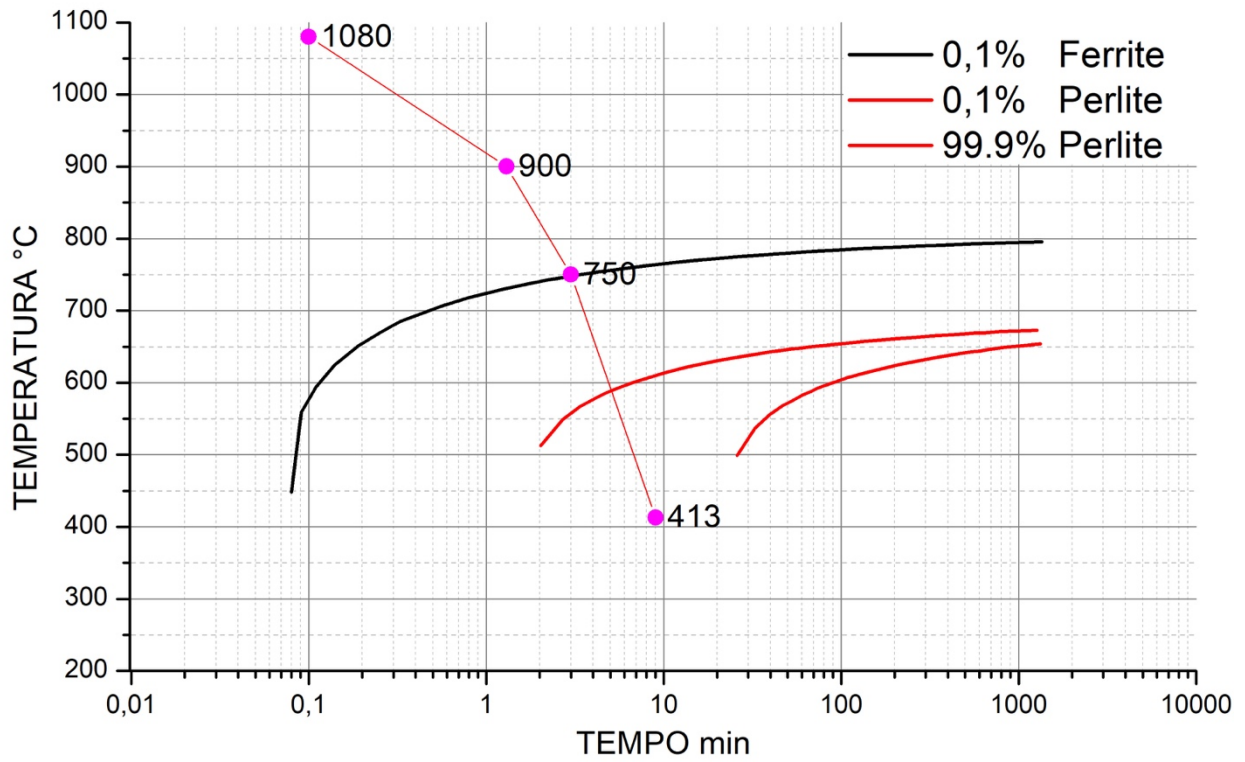


Figura 59 curva cct del campione AFV24

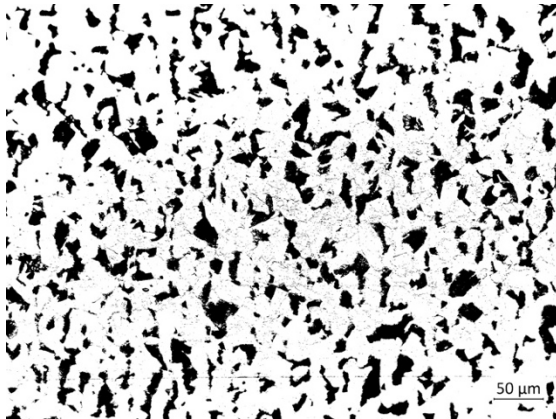


Figura 61 AFV 24A

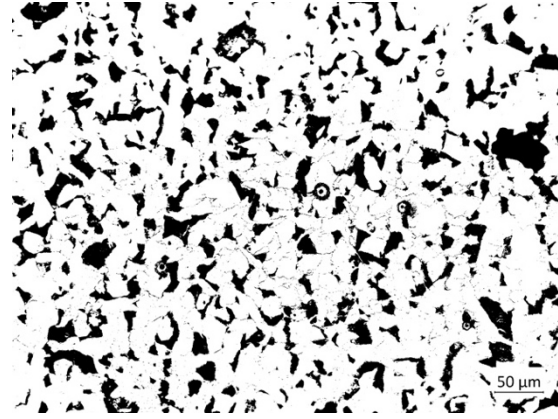


Figura 60 AFV 24B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV24A	AFV24B
24	23

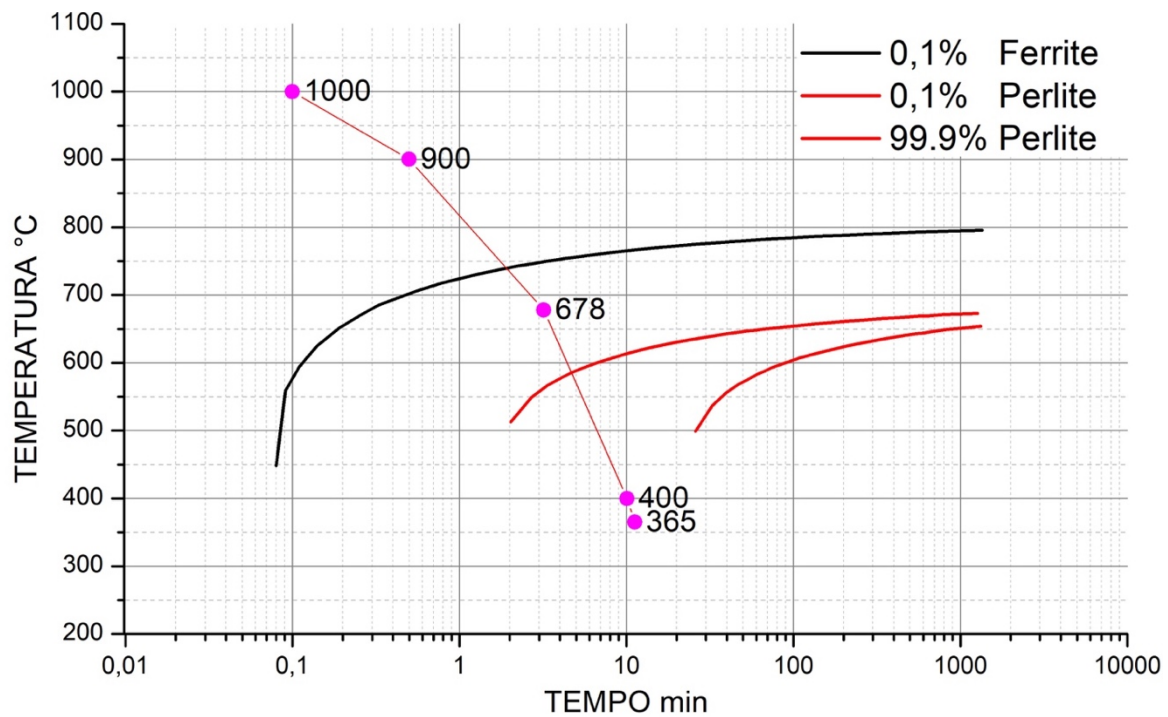


Figura 62 curva cct del campione AFV27



Figura 64 AFV27A



Figura 63 AFV27B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV27A	AFV27B
22	21

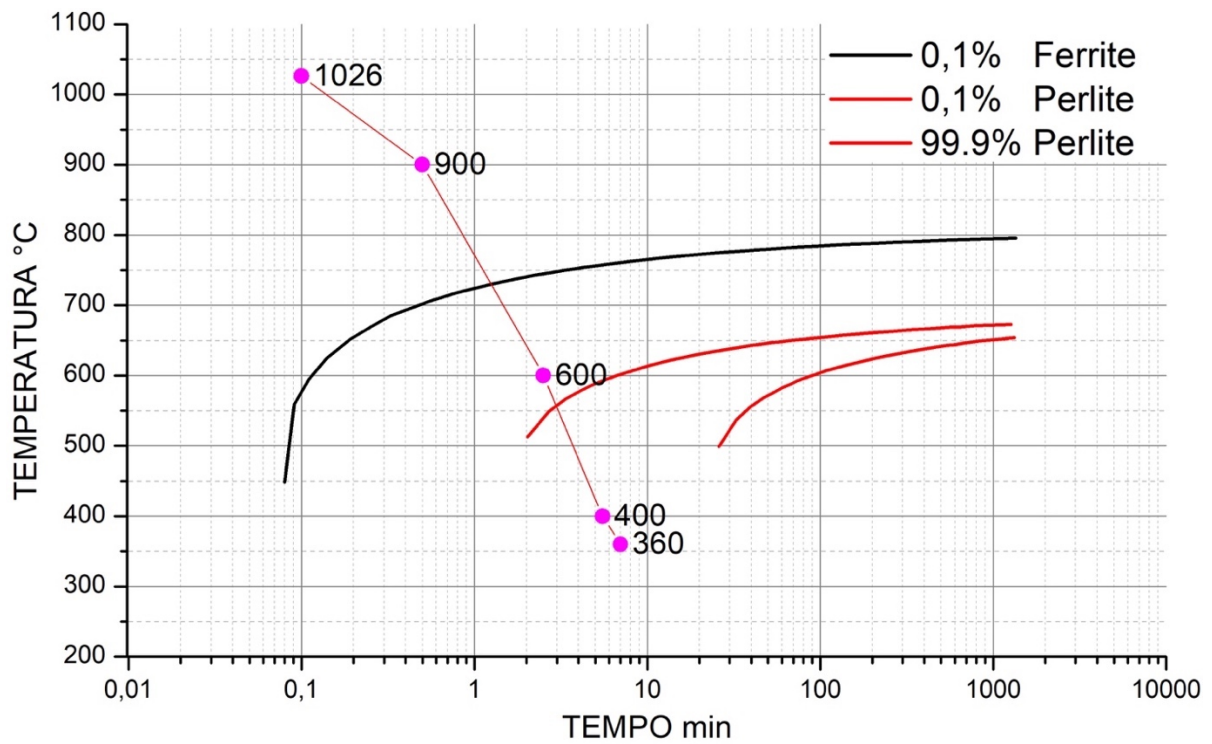


Figura 65 curva cct del campione AFV28

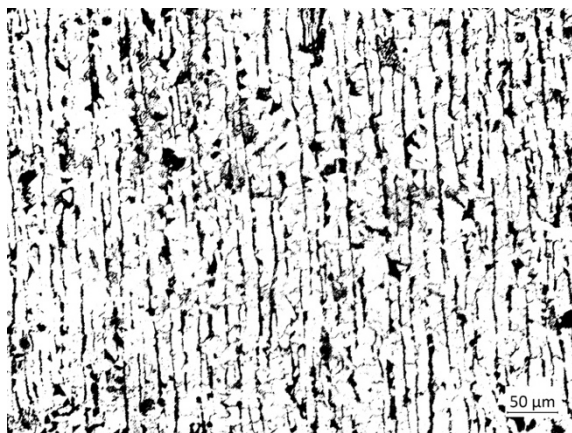


Figura 67 AFV28A

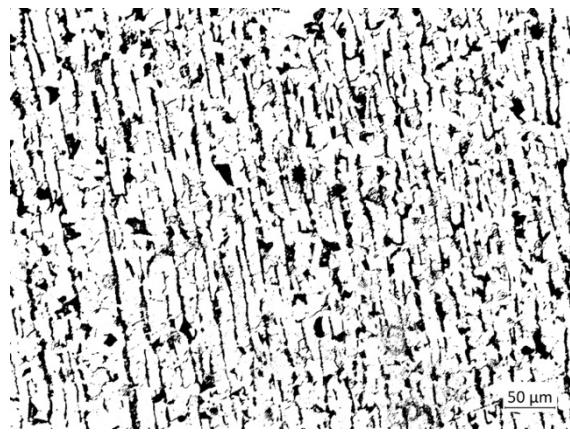


Figura 66 AFV28B

QUANTITÀ PERLITE SEZ	
AFV28A	AFV28B
23	22

### 3.6 Analisi micrografie e superficie di frattura dei provini Charpy

Per eseguire delle analisi microstrutturali si è reso necessario effettuare le foto dei campioni al microscopio ottico e successivamente di eseguire l'analisi di immagine con il software Imagej. I campioni rotti della prova Charpy sono stati inglobati nella resina termoindurente, quindi lucidati ed attaccati ottenendo così 15 dischetti di resina AFV lato A e 15 dischetti AFV lato B. Ognuno di essi contiene la sezione trasversale (sezione) e la sezione parallela (lato) al senso di laminazione.

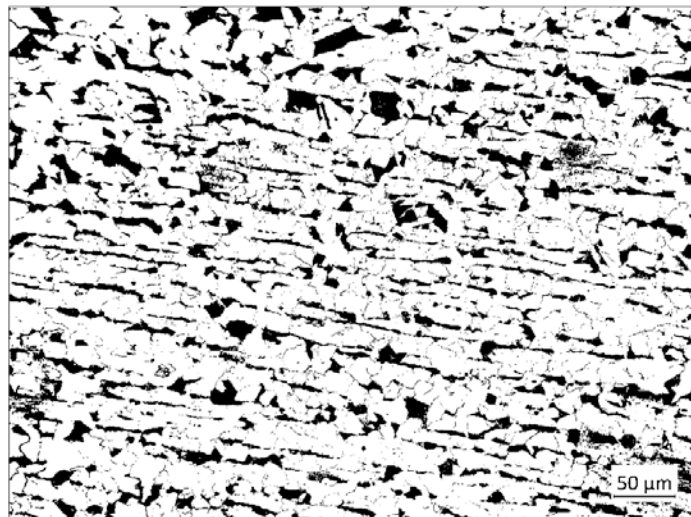
I dati ricavati saranno relativi alla grandezza media del grano cristallino misurata in  $\mu\text{m}$  e alla quantità di perlite in termini percentuali.

Vengono sottoposti al confronto i campioni più significativi relativamente alle categorie già sottoposte all'analisi statistica:

LST	PIA	ANG
AFV15	AFV21	AFV27
AFV16	AFV22	AFV28
AFV18	AFV24	-

*Tabella 9 campioni considerati per il confronto*

Per eseguire l'analisi di immagine è stato utilizzato il software imageJ e le foto con ingrandimento 200x, viene importata la micrografia e con la funzione specifica viene convertita in 8 bit bianco e nero. Il calcolo della perlite viene fatto sull'area di colore nero restituendone il valore percentuale rispetto al totale della foto.



*Figura 68 calcolo della perlite su provino AFV15A sezione*

### 3.5.1 Profili angolari LST

Di seguito si riportano le foto delle micrografie del campione **AFV15A** relative ad un LST angolare ad ali ineguali di dimensioni 120x80mm con 10 mm di spessore:

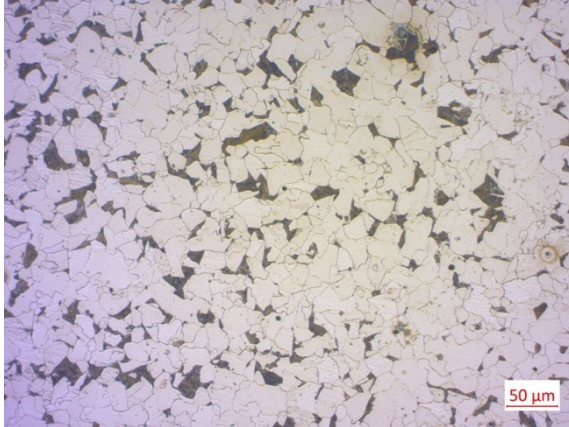


Figura 43 AFV15A LATO 200X

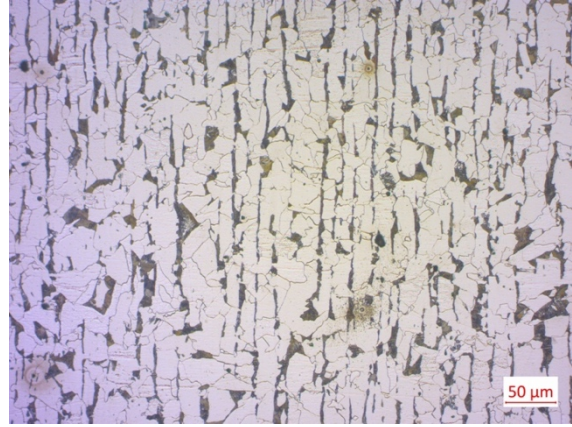


Figura 44 AFV15A SEZ 200X

Come si può notare, la microstruttura in sezione, figura 44 presenta un lieve bandeggiamento (*banding*) della fase perlitica sulla fase ferritica; al contrario nella micrografia del lato la struttura risulta omogenea le due fasi ben distribuite. La media dei valori di resilienza è 95J. La dimensione media del grano dell'immagine relativa al lato è  $\approx 13 \mu\text{m}$  e la quantità di perlite è 21%, mentre per l'immagine relativa alla sezione è presente il 22% di perlite e la dimensione media del grano è  $12 \mu\text{m}$ .

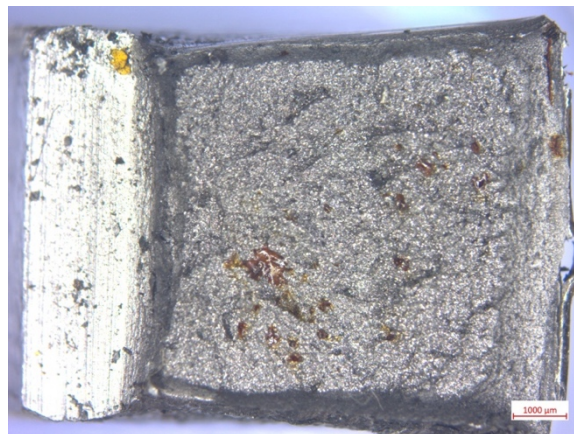
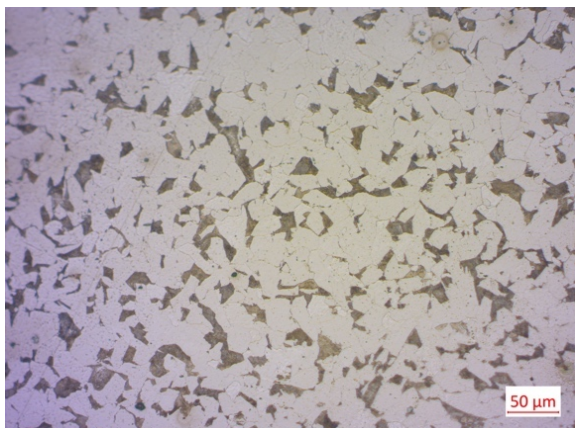


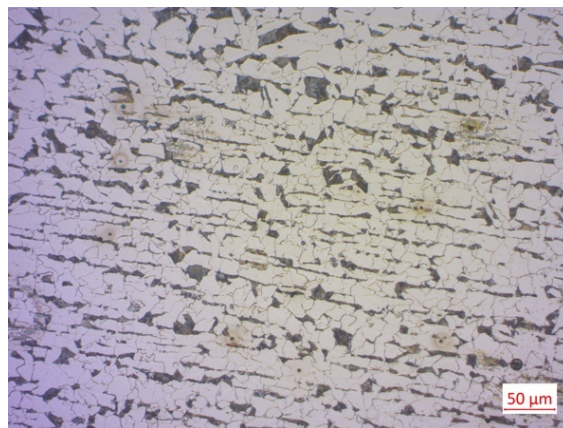
Figura 69 superficie di frattura afv15A

Nella superficie di frattura è presente una vasta superficie riflettente causata dall'elevata quantità di cristalli fratturati in modo intergranulare inoltre è presente un lieve ritiro del materiale ai lati in corrispondenza dell'intaglio. Dall'osservazione dell'immagine si trovano caratteristiche prevalenti tipiche di un comportamento prevalentemente fragile. Le macchie di color marrone non è un difetto del materiale e sono causate dall'ossido di ferro originato dallo stoccaggio in ambiente ad elevata umidità.

Micrografie del campione **AFV15B** angolare LST:

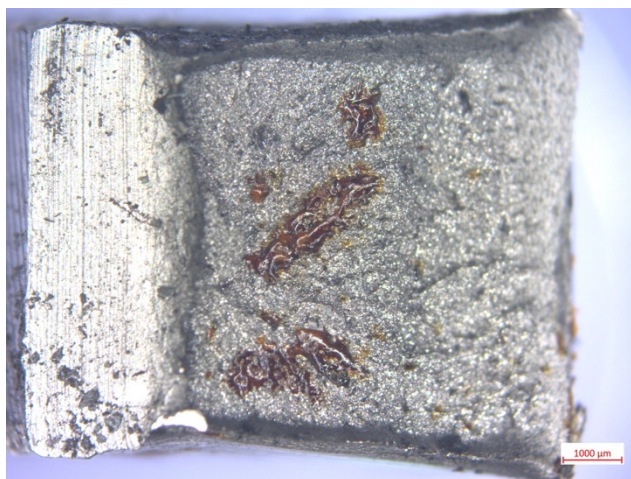


*Figura 71 AFV15B LATO 200X*



*Figura 70 AFV15B SEZ 200X*

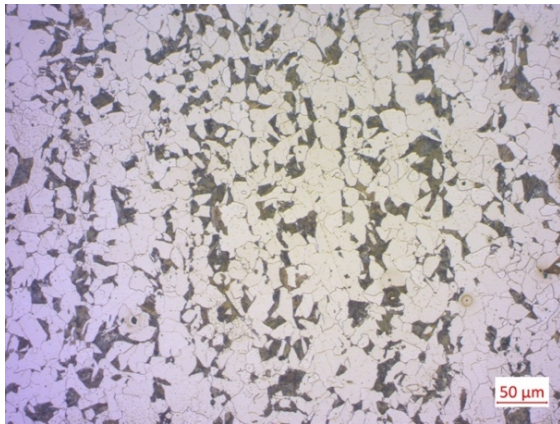
Entrambe le micrografie del lato B, sono del tutto simili a quelle del lato A, infatti in quella relativa alla sezione si denota il bandeggiamento, mentre la micrografia del lato presenta una struttura omogenea, ma con la fase perlitica leggermente più grossolana. Per quanto riguarda la quantità di perlite e grandezza del grano non c'è molto discostamento rispetto al lato A. Il valore di resilienza medio è 90J in linea con quello del lato A. La fase perlitica ha valori simili al lato A infatti 21,5% lato 22% sezione e anche la grandezza media del grano è molto simile.



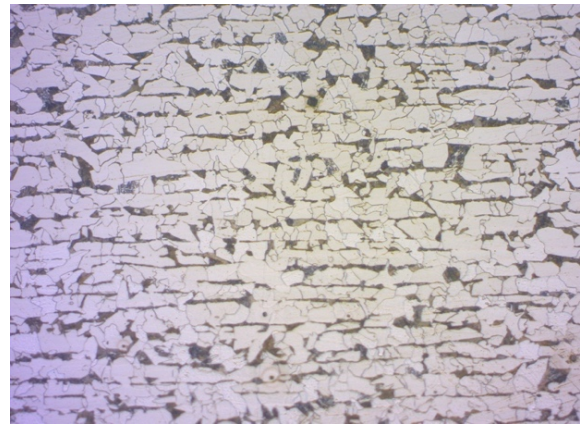
*Figura 72 superficie di frattura AFV15B*

La superficie di frattura del provino AFV15B non è molto diversa dalla superficie di frattura del provino AFV15A, così come si nota una buona corrispondenza tra le microstrutture e valori di resilienza. Dall'osservazione della figura si può constatare una frattura di tipo prevalentemente fragile.

Le micrografie del campione **AFV16A** riguardano un profilo LST 120x80mm spessore 10mm, geometricamente identico al profilo precedente AFV15A:

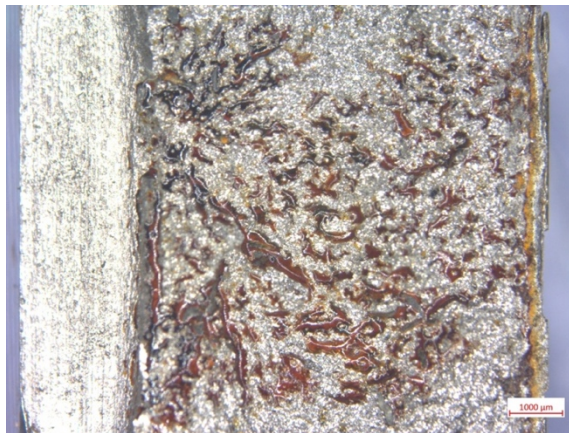


*Figura 74 AFV16A LATO*



*Figura 73 AFV16A SEZ*

anche in questo campione si possono notare delle differenze di microstruttura tra le due facce. La sezione, presenta una tessitura cristallina leggermente più piccola rispetto al lato circa 12 µm e la fase perlitica è del 20% ed è disposta in modo orizzontale, forma tipica dovuta dalla laminazione. L'immagine del il lato invece, mostra una grana cristallina leggermente più grossolana, così anche la fase perlitica e a tratti leggermente più compatta.



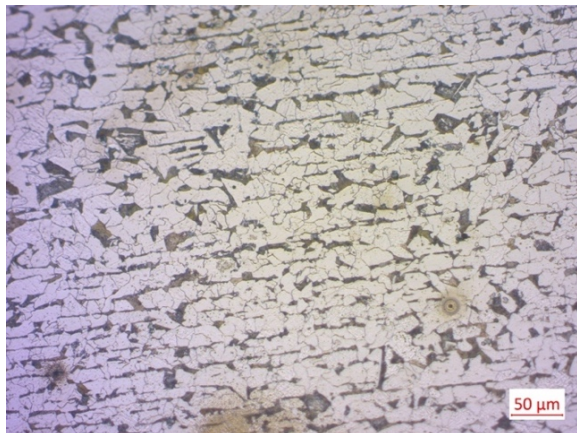
*Figura 75 superficie di frattura AFV16A*

La superficie di frattura è nella maggior parte compianare, è presente un'elevata quantità di cristalli fratturati in modo intragranulare inoltre non sono presenti ritiri del materiale ai lati in corrispondenza dell'intaglio. L'immagine presenta le caratteristiche tipiche di un comportamento prevalentemente fragile dell'acciaio ed a conferma lo è il valore di resilienza piuttosto basso 62J.

Foto del campione **AFV16 B**:



*Figura 77 AFV16B LATO*



*Figura 76 AFV16B SEZ*

Nelle micrografie dei due provini A e B si denota una corrispondenza diretta per quanto riguarda la forma o meglio la disposizione delle fasi. La grandezza media del grano cristallino relativa alla sezione è leggermente più piccola, circa 11 μm con una quantità di perlite 22%. Il lato invece presenta circa 23% di fase perlitica e la grandezza media del grano è 13,5 μm. I valori di resilienza media sono del tutto simili lato A 62J lato B 74J.



*Figura 78 superficie di frattura AFV16B*

La superficie di frattura del provino AFV16B non è molto diversa da quella del provino AFV15A, così come si nota una buona corrispondenza tra le microstrutture e valori di resilienza simili. Dall'osservazione della figura si può constatare una frattura di tipo fragile.

Micrografie del campione **AFV18A** riguardano un profilo LST 120x80mm spessore 8mm, due millimetri più sottile dei due precedenti profili analizzati:

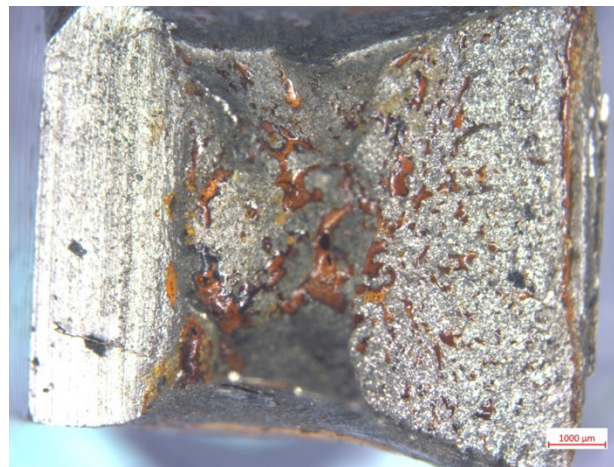


*Figura 79 AFV18A LATO 200X*



*Figura 80 AFV18A SEZ 200X*

In questo campione si nota una somiglianza tra il lato A e il lato B nella tessitura della grana cristallina, entrambe presentano l'orientazione della fase perlitica lungo il senso di laminazione. La grandezza media del grano circa  $11\mu\text{m}$  sia per la sezione che per il lato. La fase perlitica della sezione è al 21% mentre per il lato 22%. Il valore medio di resilienza è 125,7J.



*Figura 81 superficie di frattura AFV18A*

Nella superficie di frattura si individua una zona di circa il 65% che mostra comportamento duttile, ed è localizzata dal lato dell'intaglio fino a metà della sezione. I segni caratteristici sono l'allungamento del materiale in direzione trasversale alla sezione del provino e la deformazione dei bordi esterni verso l'interno oltre all'aspetto non riflettente della superficie. Il resto della superficie sulla destra, circa 35%, è caratterizzata da lucentezza e complanarità tipica di una frattura a carattere fragile. Nel complesso il comportamento del materiale si è mostrato di tipo duttile.

Micrografie del campione **AFV18B**:

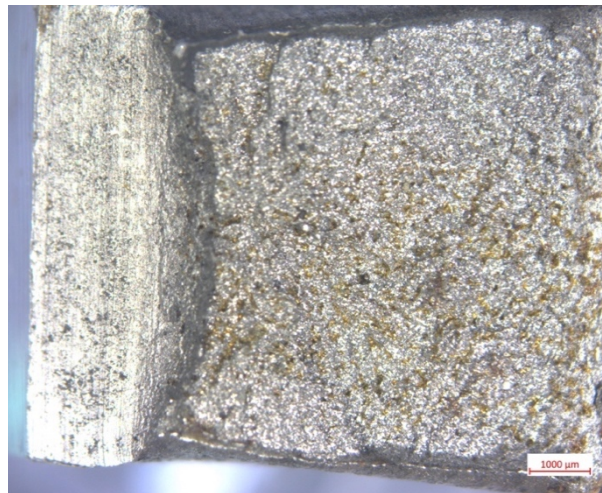


*Figura 57 AFV 18B LATO 200X*



*Figura 58 AFV 18 B SEZ 200X*

Per il provino AFV18B si nota una forte somiglianza della microstruttura del provino AFV18A. In alcune zone della riguardante il lato si notano alcune zone in cui la grana è leggermente grossolana. LA quantità di perlite risulta essere per entrambe le zone del lato B leggermente più elevata del lato A. La sezione presenta 22% di perlite mentre il lato 20%, la resilienza media si attesta al 81,7J.



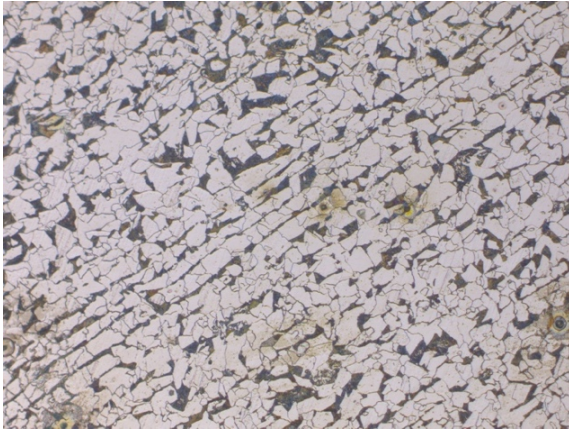
*Figura 82 superficie di frattura AFV18B*

La superficie di frattura del campione AFV18B è in contrasto netto rispetto alla parte A dello stesso spezzone di profilo infatti, sono presenti i tratti caratteristici di una frattura di tipo fragile e intragranulare, a conferma di ciò il valore di resilienza di circa 45J inferiore.

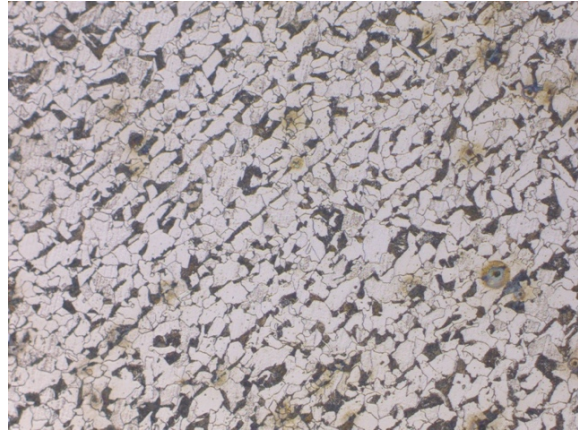
### 3.5.2 Profili piatti PIA

Le seguenti immagini riguardano le micrografie del campione **AFV21**, un profilo piatto di larghezza 250mm e di spessore e 10mm.

Micrografie campione **AFV21A**:

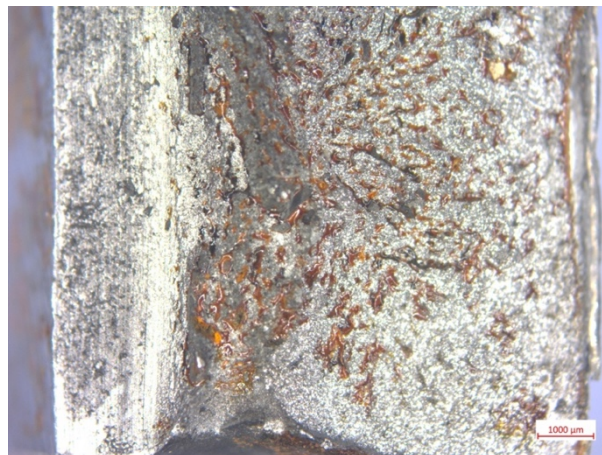


*Figura 84 AFV21A LATO 200X*



*Figura 83 AFV21A SEZ 200X*

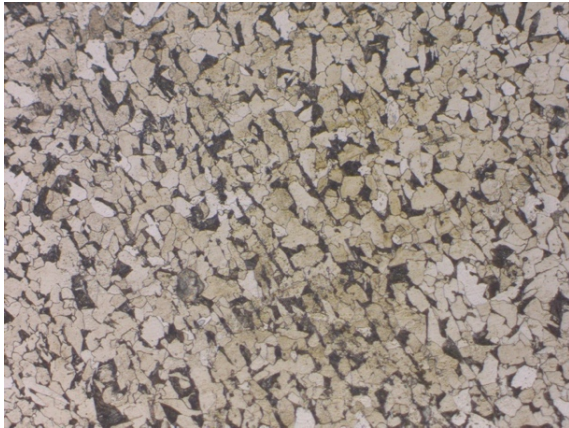
La disposizione della microstruttura è molto simile in entrambe le immagini, fase perlitica fortemente orientata nella direzione di laminazione ed è presente nella quantità del 20-21%. La grandezza media della grana cristallina è circa 10-11 $\mu$ m. Il valore medio della resilienza dei provini testati è 114J.



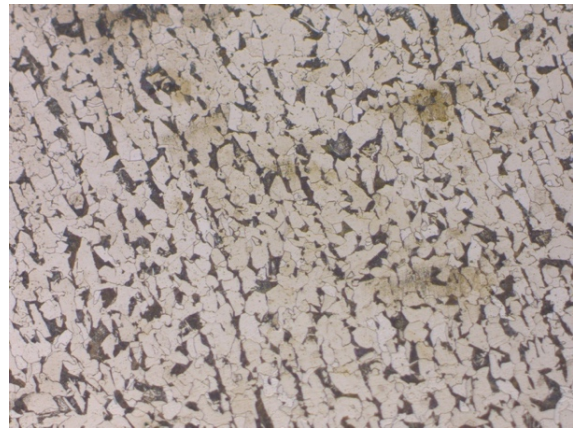
*Figura 85 superficie di frattura afv21A*

Nella superficie di frattura è presente un'area localizzata vicino all'intaglio, di circa il 25%, dove il materiale mostra segni di frattura duttile, infatti si nota l'allungamento del materiale lungo la normale alla sezione della superficie di colore grigio scuro. Il resto della sezione è molto più luminosa e riflettente segno di una frattura più fragile.

Micrografie campione **AFV21B**:



*Figura 87AFV 21B LATO 200X*



*Figura 86AFV 21 B SEZ 200X*

Nel lato B del provino AFV21 si nota una grana cristallina leggermente più grossolana rispetto alle micrografie precedenti. I valori percentuale della fase perlitica sono sensibilmente maggiori, 22% sul lato e 21% sulla sezione. Il valore medio di resilienza è 77J.

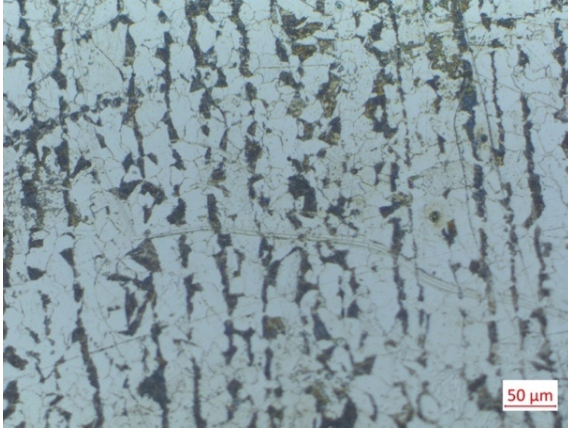


*Figura 88 superficie di frattura AFV21B*

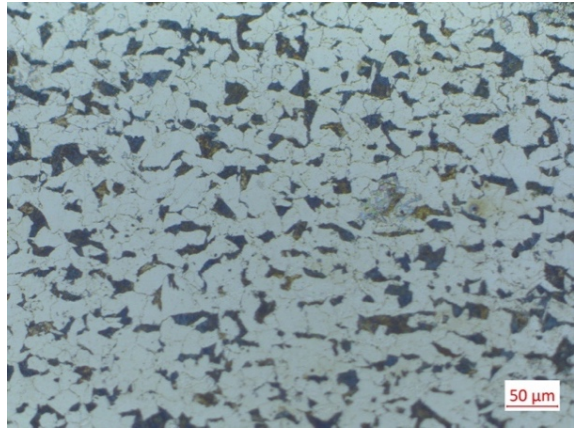
La superficie di frattura del lato B del provino AFV21 è caratterizzata prevalentemente da un comportamento più fragile del materiale rispetto al lato B del provino. La superficie di frattura è complanare e riflettente, segni caratterizzanti di una frattura di tipo fragile e intergranulare.

Le immagini seguenti sono relative al campione **AFV22** un profilo piatto di dimensioni 80mm di larghezza e 30mm di spessore, la sezione finale è abbastanza tozza.

Micrografie del campione **AFV22A**:



*Figura 90 AFV 22 A LATO 200*



*Figura 89 AFV 22 A SEZ 200*

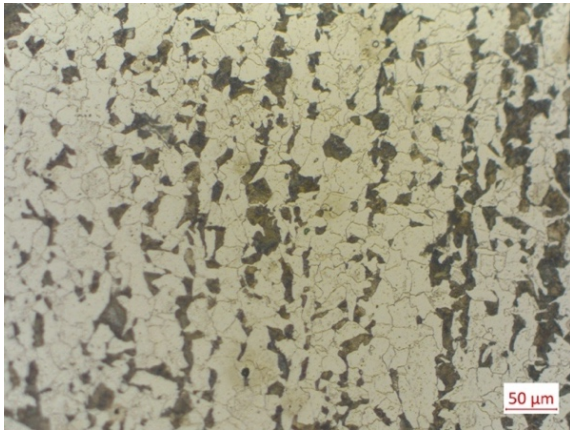
Nelle micrografie precedenti si nota la microstruttura piuttosto omogenea per la sezione mentre per il lato è molto orientata lungo il verso di laminazione, la percentuale di perlite rilevata è del 24% per la sezione mentre per il lato è al 25%. La grandezza media del grano è molto simile sia per la sezione che per il lato 12µm per il lato e 11,8µm per la sezione. Il valore medio delle prove di resilienza su questo campione è 139J.



*Figura 91 superficie di frattura AFV22*

Nella superficie di frattura del provino AFV22A si denota una zona a carattere duttile che occupa un valore di circa il 70% della sezione. Sono molte le zone di colore grigio scuro, indice di una dissipazione dell'energia impulsiva attraverso la deformazione plastica del materiale in direzione trasversale alla sezione. Il valore di resilienza è di 139J.

Micrografie del campione **AFV22B**:

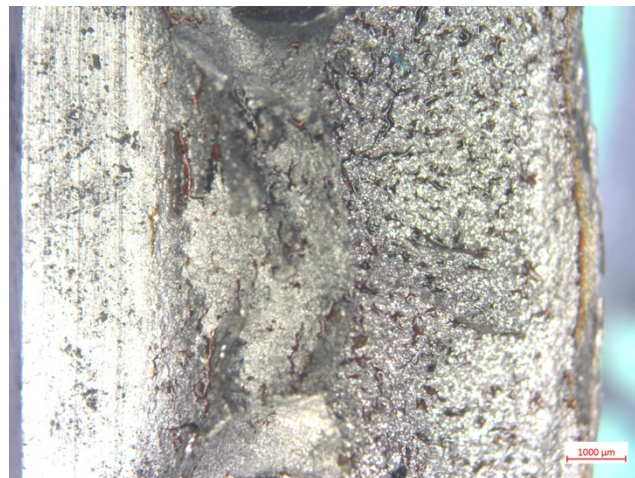


*Figura 93 AFV 22 B LATO 200*



*Figura 92 AFV 22 B SEZ 200*

Per il alto B la situazione è analoga al alto A, la sezione risulta essere omogenea nella forma, mostrando comunque chiaramente i grani di perlite. Nell'immagine del lato si nota la direzione di laminazione con qualche bandeggiamento perlitico. La percentuale di perlite nella sezione scende al 25% rispetto la sezione del campione AFV22A, invece sale al 26% nella micrografia del lato. Il valore medio della resilienza è 139J come nel precedente campione AFV22A.



*Figura 94 superficie di frattura AFV21B*

Si denota una forte somiglianza tra superfici di frattura del lato A e B del profilo AFV21. La maggior parte della superficie porta i segni di un materiale di natura duttile. Il valore di resilienza in questi due provini è identico 139J.

Si analizzano ora le immagini del campione **AFV24**, un piatto con dimensioni 70mm di lato e 20mm di spessore.

Micrografie AFV24A:

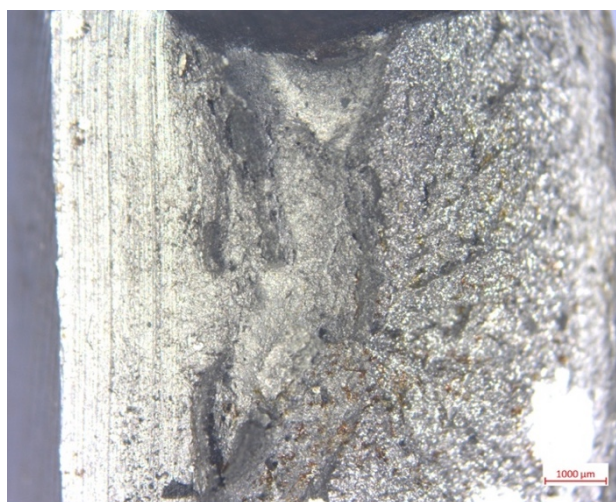


*Figura 96 AFV 24 A LATO 200*



*Figura 95 AFV 24 A SEZ 200*

Nella micrografia del lato è difficile apprezzare appieno la direzione di laminazione, in quanto ci sono pochi grani perlitici disposti longitudinalmente. La micrografia della sezione invece è molto omogenea. La percentuale di perlite rilevata nel lato è 22% mentre nella sezio 24%. In entrambe le immagini la grana cristallina presenta sia grani di media dimensione che grandi di piccola dimensione ben dispersi, la grandezza media del grano risulta essere 10,5 µm per il lato e 11 µm per la sezione. La resilienza media dei campioni è 148J.



*Figura 97 superficie di frattura AFV24A*

La superficie di frattura del provino AFV24A esibisce per oltre il 50% le caratteristiche di un materiale duttile, lo si deduce dalla deformazione del materiale in direzione normale alla sezione oltre ai piegamenti dei lati del provino Charpy verso l'interno della sezione. La prova di resilienza accerta l'assorbimento di energia nel provino è di 148J.

Micrografie le foto del campione **AFV24B**:



*Figura 98 AFV 24 B LATO 200*



*Figura 99 AFV 24 B SEZ 200*

Le micrografie del lato B sono molto simili a quelle del lato A, entrambe le immagini presentano un'omogeneità diffusa, i valori percentuali della perlite sulla sezione si attestano al 23% mentre sul lato al 23%. La grandezza media del grano cristallino non è molto diversa dal lato A, sia per la sezione che per la direzione parallela alla direzione di laminazione. La media dei valori di resilienza è leggermente inferiore al lato A 123,3J.



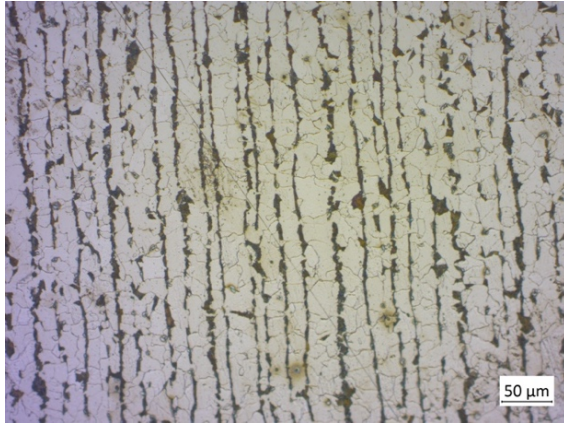
*Figura 100 superficie di frattura AFV24B*

La superficie di frattura del lato B è molto simile a quella del lato A, ed è prevalentemente di carattere duttile, infatti anche il valore di energia assorbibile è 123,3J, comparabile con il valore del lato A.

### 3.5.3 Profili angolari ANG

Le seguenti immagini riguardano le micrografie del campione **AFV27**, profilo angolare con l'ala di dimensioni 80mm larghezza e 10mm di spessore.

Micrografie del campione **AFV27A**:

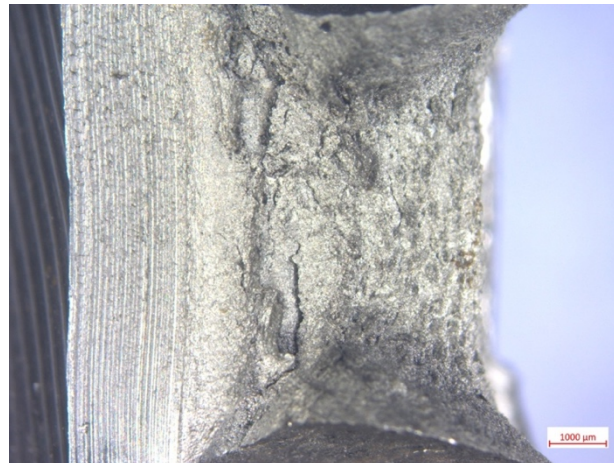


*Figura 101 AFV 27 A LATO 200*



*Figura 102 AFV 27A LATO 200*

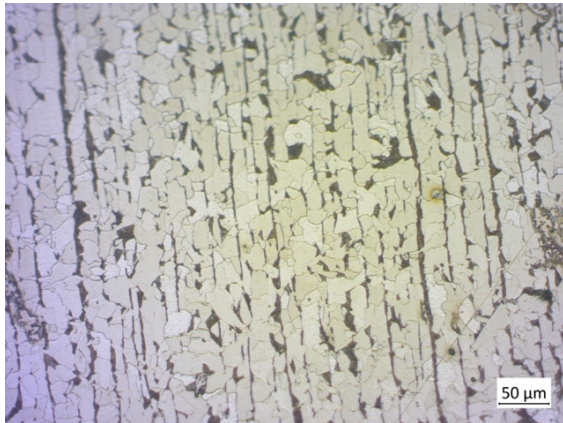
Nella micrografia del lato la disposizione della perlite è bande disposta lungo la direzione di laminazione. Il diametro medio del grano cristallino è relativamente piccolo  $11,2\mu\text{m}$ , la percentuale di perlite rilevata è del 22,5%. La microstruttura della sezione invece è molto più omogenea, la fase perlitica è ben distribuita nella fase ferritica ed è presente nella percentuale del 22,5% circa. Il diametro medio del grano cristallino è circa  $12\mu\text{m}$ . Il valore medio della resilienza è di 206,7J



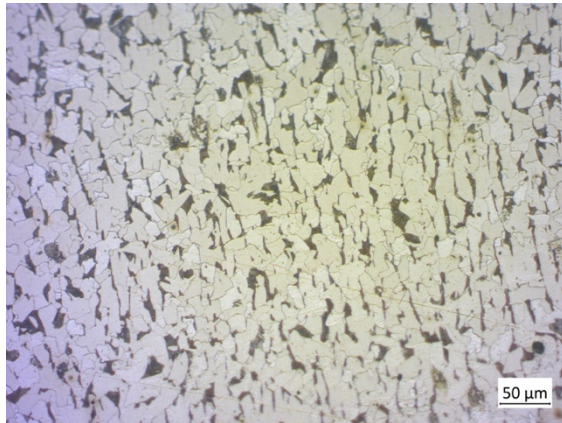
*Figura 103 superficie di frattura AFV27A*

La superficie di frattura di questo provino è al 100% di carattere duttile, sono infatti presenti tutti gli elementi distintivi infatti, si denota una elevata fibrosità della superficie in corrispondenza del cuore del provino, oltre alle deformazioni dei lati verso il centro dell'area. L'energia assorbita dal materiale dall'urto impulsivo è di 206,7J. Si riporta che è stato ritrovato il provino piegato e non spezzato in due pezzi al termine della prova come solitamente in tutti gli altri campioni.

Microstrutture del campione **AFV27B**:



*Figura 104 AFV 27B LATO 200*



*Figura 105 AFV 27B SEZ 200*

Le microstrutture del lato B sono molto simili a quelle del lato A, non ci sono sostanziali differenze, infatti la percentuale di perlite nel lato è al 22% mentre nella sezione 23%. Anche per quanto riguarda il diametro medio del grano cristallino è simile, circa  $11,5\mu\text{m}$  sia per la sezione sia per il lato. Il valore medio della resilienza è di 140,7J



*Figura 106 superficie di frattura AFV27B*

La superficie di frattura del alto B riporta una minore quantità di frattura a carattere duttile rispetto a quella del alto A infatti è presente una quantità di superficie fragile di circa il 20%. L'energia assorbita dal materiale è di 140,7J.

Le seguenti immagini riguardano le micrografie del campione **AFV28**, profilo angolare con l'ala di dimensioni 70mm larghezza e 6mm di spessore.

Micrografie del campione **AFV28A**:

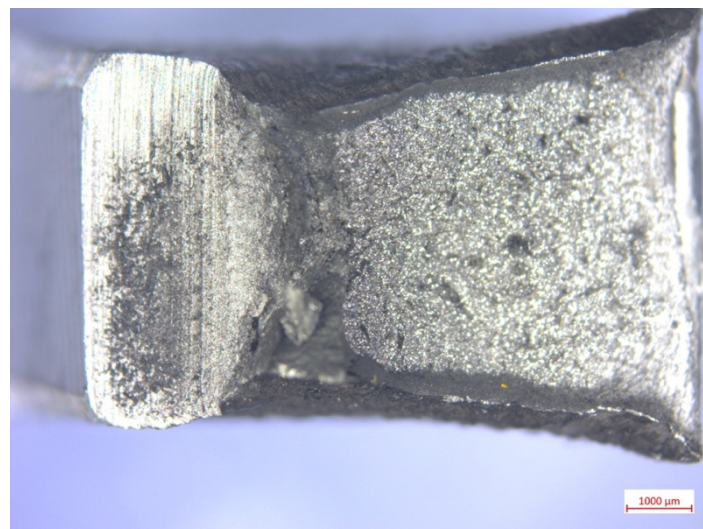


*Figura 108 AFV 28A LATO 200*



*Figura 107 AFV 28 SEZ 200*

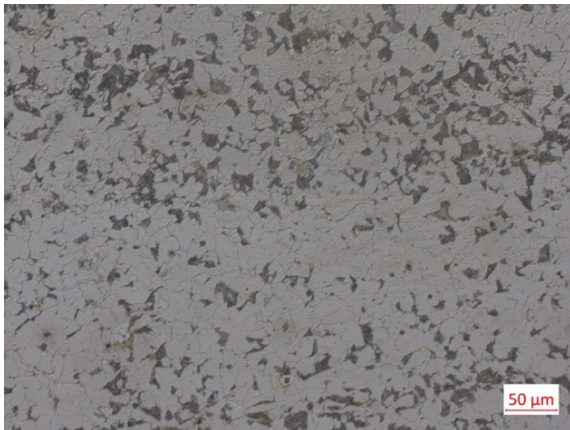
la micrografia riguardante il lato mostra una fase perlitica leggermente agglomerata in alcuni punti, senza lasciar intuire la direzione di laminazione, la percentuale di perlite è del 22% e il diametro medio del grano cristallino è di 10,6 µm. La micrografia della sezione mostra evidente orientazione della fase perlitica lungo la direzione di laminazione, la grandezza media del grano cristallino è di circa 10 µm e la quantità della fase perlitica è del 23%.



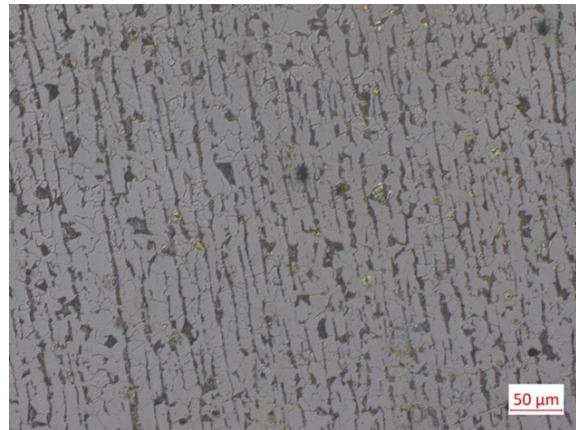
*Figura 109 superficie di frattura AFV28A*

La zona in grigio scuro della superficie di frattura adiacente all'intaglio del provino è di carattere plastico, inoltre i lati del provino sono piegati verso il centro della sezione in prossimità di questa zona. L'area rimanente della superficie di frattura è luminosa come per le superfici di frattura di natura fragile. Nel complesso la superficie riporta una frattura che tenderebbe a dedurre un comportamento fragile del materiale. Il valore medio della resilienza 94,3J.

Immagini del campione **AFV28B**:

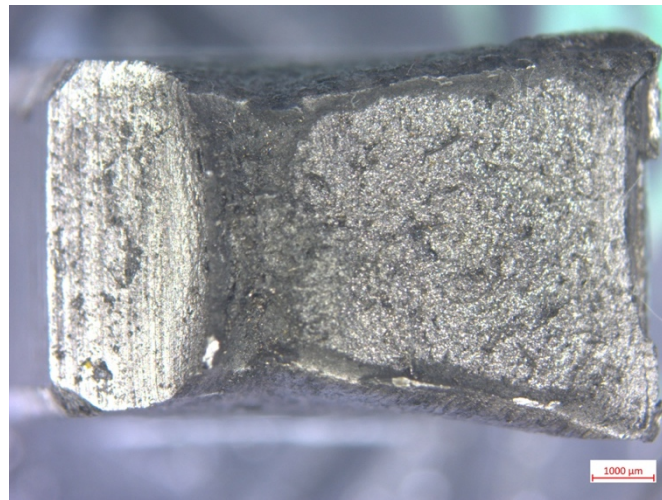


*Figura 110 AFV 28B LATO 200*



*Figura 111 AFV 28B SEZ 200*

Le microstrutture del lato B del provino AFV28 sono del tutto simili a quelle del lato A. La fase perlitica è presente nel lato e nella sezione in egual quantità 22%. La grandezza del grano cristallino è circa 10 µm per il lato e 13 µm per la sezione. Il valore medio della resilienza è di 110,3J.



*Figura 112 superficie di frattura AFV28B*

Questa superficie di frattura ha una zona di plasticità del materiale leggermente più elevata rispetto al lato A visto precedentemente. Il valore di resilienza testato è di 110,3J, sensibilmente maggiore a confronto del lato A.

### 3.7 Analisi inclusionale SEM

Gli acciai non possono essere considerati delle semplici leghe binario ferro-carbonio, in quanto in essi sono sempre presenti quantità più o meno elevate di altri elementi di diversa provenienza, ad esempio:

1. Alcuni elementi possono provenire in parte dalle materie prime di partenza, nel caso di metallurgia secondaria dal rottame (come Cu, Ni, Mo, Sn, P, S).  
Durante il processo al forno elettrico (EAF) e al LF (Ladle furnace) si riesce ad intervenire ottimizzando l'analisi in funzione delle richieste del cliente;
2. Elementi di tipo gassoso (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) presenti nell'atmosfera che entrano nel bagno fuso;
3. Altri ancora vengono deliberatamente aggiunti al metallo fuso come manganese e silicio, oppure come Cr, Ni, Mo etc. che fanno entrare gli acciai nella classe degli acciai legati.

Nei processi metallurgici hanno un'importante rilevanza le combinazioni lineari di certi elementi che forniscono immediate informazioni sulla bontà dell'acciaio, ad esempio:

il carbonio equivalente, indice per le caratteristiche meccaniche:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$

K<sub>cu</sub> (Cu+8xSn) → indice per la fragilità a caldo

Alcuni di questi elementi entrano in soluzione solida nella ferrite, altri invece come: carburi, azoturi e carboazoturi formano fasi intermedie. Altri elementi di tipo non metallico formano una scoria insolubile nell'acciaio, che restano intrappolate nel metallo solidificato se non riescono a portarsi a galla nel bagno liquido e vengono pertanto chiamate "inclusioni non metalliche". Infine, il piombo rimane insoluto nell'acciaio.

Si possono quindi distinguere inclusioni di due tipi, esogene ed endogene:

#### **Le Inclusioni esogene**

Sono frammenti di materie prime di carica oppure particelle di refrattario del forno, della siviera, di scoria oppure elementi correttivi non del tutto disciolti. Esse provengono dall'esterno rispetto al bagno di metallo fuso e rimangono intrappolate al suo interno nel momento della solidificazione. Sono eventi di natura accidentale, che non si trovano di frequente nell'acciaio, legati alla manutenzione degli impianti, ed evitabili grazie un'attenta esecuzione del processo di fabbricazione nelle fasi di colata.

## **Le Inclusioni endogene**

Al contrario, hanno origine direttamente all'interno della massa di metallo fuso come prodotti di reazione chimica, principalmente in fase di riduzione della solubilità durante il raffreddamento e solidificazione del bagno liquido. Risulta fondamentale quindi mantenere il livello di queste inclusioni entro tenori accettabili data la loro inevitabile presenza.

La pericolosità delle inclusioni non metalliche sopra descritte dipende da alcuni fattori come la composizione chimica e il loro comportamento alle alte temperature di lavorazione a caldo, come la laminazione.

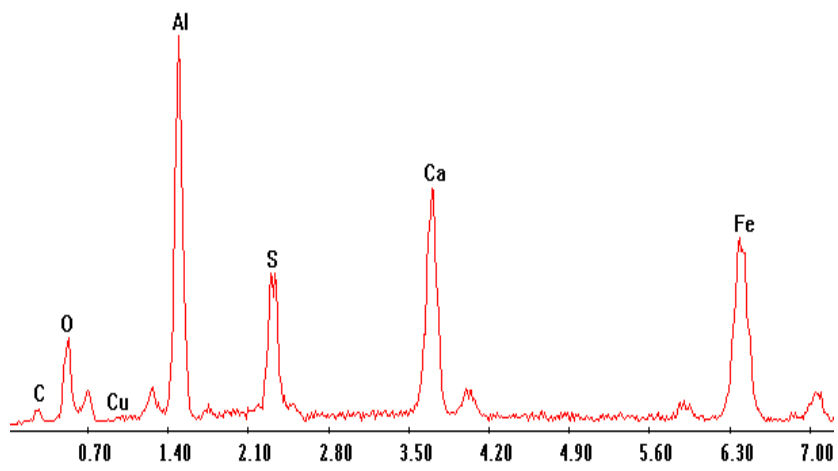
Molto frequenti sono i *solfori* che possono essere di vario tipo, di ferro, di manganese e altri come nichel molibdeno cromo, ma anche *ossidi* di ossidi di ferro, manganese, alluminio e cromo.

Altre tipologie di inclusioni sono i *silicati* di ferro di manganese, di calcio, altre ancora gli *azoturi* di titanio, vanadio, niobio e alluminio. Per questo ultimo elemento è importante sottolineare la natura “pericolosa” delle inclusioni date dalla combinazione dell'alluminio con l'ossigeno. Esse sono dure e aghiformi quindi poco deformabili e possono generare l'effetto *clogging* in colata continua, tramite l'aggiunta di calcio vengono convertite in alluminati di calcio fluidi alle temperature di colaggio. Molto importante è la consistenza delle inclusioni alle temperature di laminazione a caldo che vanno dai 900°C ai 1100°C, se nel caso in cui si trovino allo stato cristallino al momento della solidificazione, esse infatti difficilmente si frantumano al momento della laminazione; Se si frantumano si dispongono lungo il senso di lavorazione comportando una discontinuità interna del materiale.

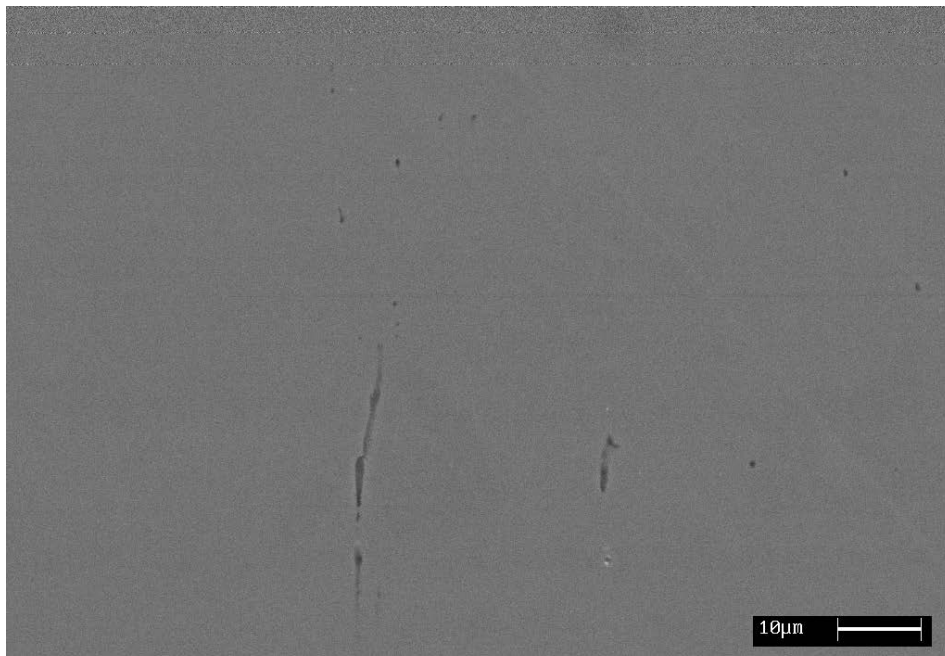
Se invece alla temperatura di lavorazione a caldo le inclusioni si trovano allo stato liquido, come il caso del solfuro di ferro, le lavorazioni di questo tipo sono fortemente compromesse a causa della decoesione dei cristalli ove vi è localizzata l'inclusione liquefatta.

Sono state condotte alcune osservazioni con il microscopio elettronico a scansione corredato con la sonda EDS per effettuare le analisi chimiche su scala microscopica.

È stato scelto un campione che presentava un valore di resilienza piuttosto basso. Il campione AFV19 caratterizzato da un valore medio di resilienza 66.3J è stato oggetto dell'osservazione al SEM e della microanalisi. Dall'analisi micro inclusionale si identifica la presenza di inclusioni, come alluminati di calcio, solfuri di calcio ed è possibile farlo grazie ai picchi tracciati nel grafico, relativi alla presenza di Fe, S, Ca e Al.

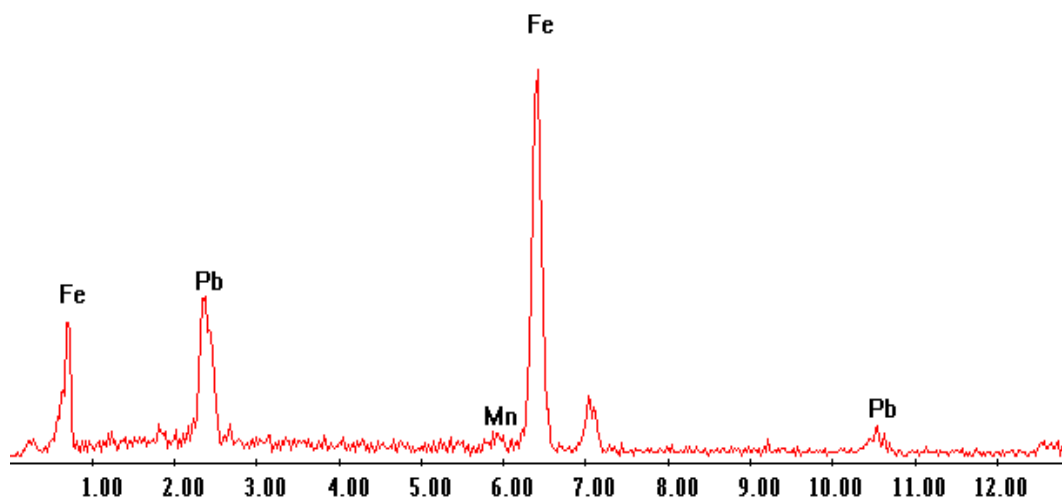


*Figura 114 spettri relativi al provino AFV19*

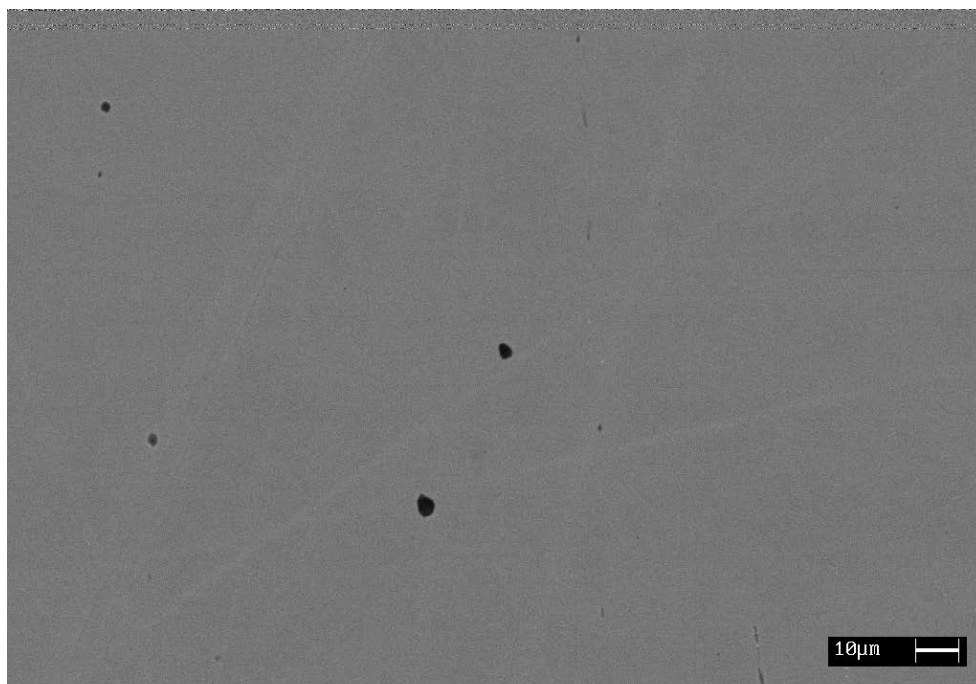


*Figura 115 SEM con elettroni retrodiffusi*

Si nota la forma tondeggiate di queste inclusioni di colore molto scuro tipica della presenza di ossido di ferro.



*Figura 116 spettri relativi al provino AFV19*



*Figura 117 SEM con elettroni retrodiffusi*

### 3.8 Analisi tensioni residue relative al profilo AFV21

Le tensioni residue o autotensioni sono stati di sforzo autoequilibrati che risiedono all'interno del pezzo non soggetto ad alcun carico esterno applicato. Più in generale le tensioni residue nascono in seguito alla deformazione plastica a caldo o a freddo, ma anche dopo trattamenti termici massivi o superficiali, durante la realizzazione di giunti saldati oltre che nella solidificazione in getti. Questo fenomeno molto spesso avviene durante i raffreddamenti, quando l'acciaio passa dalla fase austenitica alle altre fasi come quella perlitica, bainitica e martensitica, in quest'ultima in modo notevole. L'aspetto più insidioso delle tensioni residue risiede nel fatto che sono di difficile valutazione e possono influenzare il comportamento meccanico del componente. Le autotensioni si combinano con gli stati di sforzo provocati dai carichi esterni nel momento in cui il componente è posto in esercizio, questo può provocare la rottura del pezzo diminuendone la vita utile.

Nel precedente capitolo relativo alle analisi microstrutturali si è individuata una sensibile differenza di valore medio di resilienza riguardante il profilo AFV21 lato A e AFV21 lato B, come riportato nel prospetto sottostante.

provino	COLATA	spesse	profilo	reS1	res2	res3	ResMEd
AFV21/A	191089	PIA 250X10	PIA	107	126	109	114,0
AFV21/B	191089	PIA 250X10	PIA	62	81	90	77,7

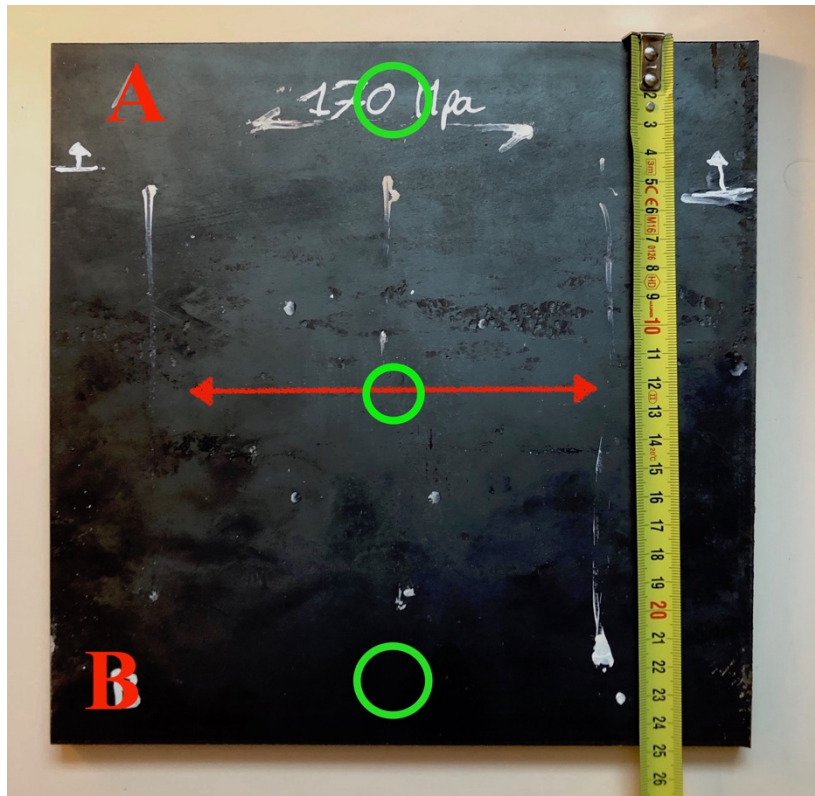
Figura 118 dati relativi alle prove di resilienza

Il valore medio di resilienza misurato nel lato A è di 114j mentre nel lato B risulta essere inferiore con 77,7J.

Il profilo analizzato ha spessore 10mm e larghezza 250 mm ed è rappresentato nell'immagine sottostante, le frecce di colore rosso indicano la direzione di laminazione, le lettere indicano il lato del profilo su sui sono stati eseguiti i prelievi per i campioni e le misure con il diffrattometro.

Sono state quindi effettuate nove analisi con il diffrattometro portatile, nello specifico tre di esse al centro, tre sul lato A e tre sul lato B, mantenendo 3 cm di distanza dal bordo esterno del piatto facendo ricadere la rilevazione all'interno del cerchio verde tracciato a titolo esemplificativo come si può notare nell'immagine sottostante.

Le tensioni residue sembrano essere localizzate in particolar modo nel lato B del piatto segnando un valore medio di 172Mpa di trazione mentre nel lato A e al centro non sono state rilevate tensioni significative, per cui può avanzare l'ipotesi che nel resto del piatto il materiale è rilassato. Questa differenza probabilmente è dovuta al fatto che la larghezza del piatto è più grande della larghezza dello scalino della placca atto ad accogliere il laminato per il raffreddamento, si necessiterebbero di ulteriori indagini e conferma di ciò.



*Figura 119 piatto analizzato con diffrattometro portatile.*

# Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto presso le Acciaierie AFV Beltrame ha permesso di approfondire il comportamento della resilienza nei profili piatti e angolari laminati a caldo.

In particolare si è avuto modo di esaminare quali siano i fattori che condizionano maggiormente questa proprietà meccanica relativamente alla fase di raffreddamento in placca, considerando la velocità di raffreddamento, la diversa conformazione geometrica del prodotto, la microstruttura, le inclusioni, per l'acciaio di qualità strutturale S355J2.

Sono stati valutati, e quindi considerati sotto controllo, i fattori di influenza della resilienza relativi alla macchina di prova (pendolo Charpy), alla corretta dimensione provino e dell'intaglio a V.

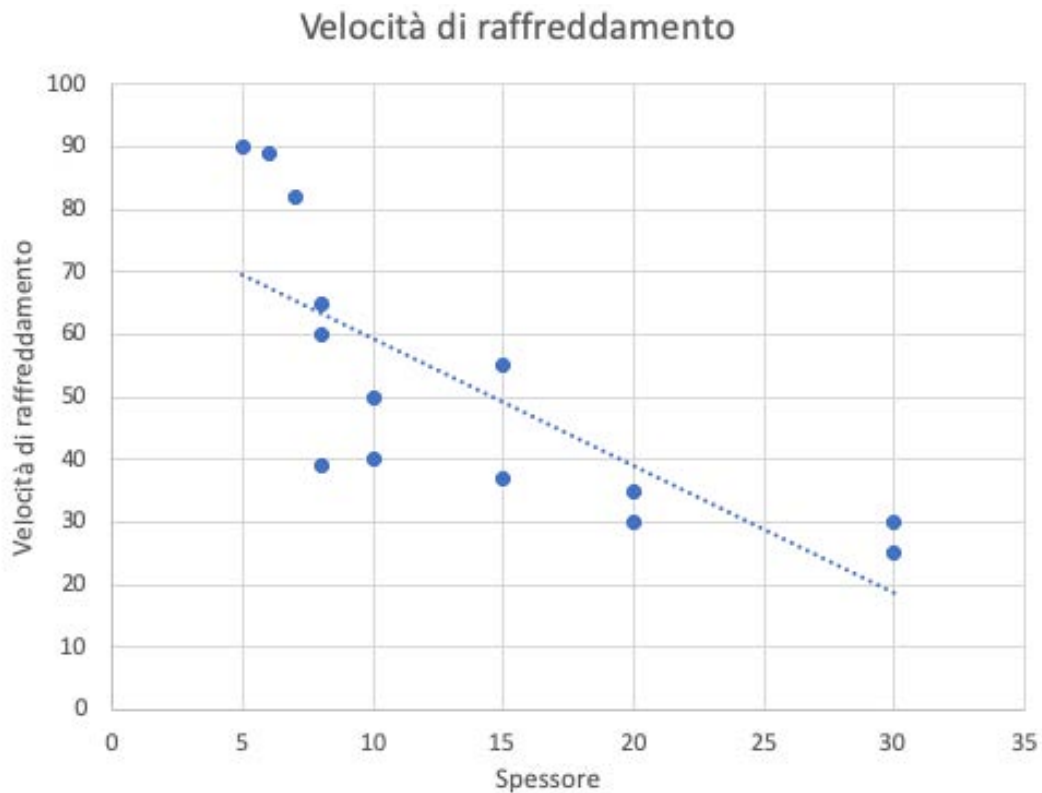
L'analisi statistica sui laminati angolari e piatti prodotti nel periodo gennaio 2018 - marzo 2019 ha fatto emergere una sostanziale differenza sia del valore medio della resilienza, che dello scostamento da tale valore. I prodotti piatti dello spessore più piccolo (5-12mm) dimostrano un valore di resilienza medio di 74,35J che è inferiore rispetto al valore di resilienza 96,59J dei prodotti di spessore più elevato (12-30mm): nonostante ciò, entrambi i gruppi esibiscono uno scostamento dal proprio valore medio simile, pari a 31-32j.

Per quanto riguarda i profili angolari, invece, essi mostrano un valore della resilienza di 93,12J, per spessori che vanno dai 6mm ai 15mm, che è un valore medio molto simile a quello dei profili piatti a grosso spessore. Questo è in parte dovuto dalla diversa dinamica di laminazione e lavorazione a caldo del materiale tra prodotto piatto e prodotto angolare.

Si è notato, attraverso le curve di raffreddamento dei diagrammi CCT, di come i piatti a carattere sottile si raffreddino molto più velocemente, soprattutto nei primi 7 "scalini" della placca di raffreddamento in quanto la loro superficie di appoggio è interamente a contatto con la superficie della placca, fornendo un veloce scambio termico prevalentemente a carattere conduttivo.

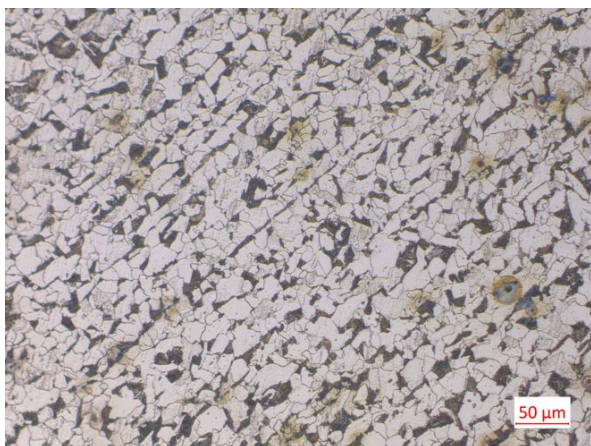
Per quanto concerne i piatti dello spessore più elevato di 12-30 mm, si è rilevato un tempo di raffreddamento maggiore. Questa differenza di velocità si riflette sulla formazione di fasi diverse nella microstruttura. Infatti, nel piatto del provino AFV22 spessore 30mm, la fase perlitica inizia a formarsi a circa 600°C, e dal grafico delle curve CCT si denota inoltre che il tempo di attraversamento della zona perlitica è di circa 5 minuti, misurando così la quantità di fase perlitica intorno a valori del 23/24%. Il piatto relativo al provino AFV21 di spessore sottile (10mm), misura valori di perlite intorno al 20-21% infatti, il piatto sottile raffredda in modo più repentino, la temperatura di inizio formazione è di circa 550-560°C permanendo nella zona di

formazione perlitica meno di 2 minuti e questo porta alla minore formazione di fase perlitica rispetto ad un piatto a spessore maggiore.



*Figura 120 Grafico velocità di raffreddamento su spessore dei laminati*

In generale si può osservare dal grafico come profili sottili si raffreddino con velocità di 80-90 °C/min rispetto a profili di spessore maggiore che hanno velocità inferiori intorno ai 50°C/min. La differente laminazione in termini di fattore di riduzione e di raffreddamento in placca produce una differente morfologia microstrutturale che incide sul valore di resilienza finale.



*Figura 122 AFV21A spessore 10mm*



*Figura 121 AFV22A spessore 30mm*

Come si può notare visivamente delle micrografie dei provini AFV21 e AFV22 sopra citati, oltre alle diverse quantità di fase perlitica esiste un'influenza data dalla diversa disposizione di perlite nella struttura cristallina.

Dalle analisi fatte con il diffrattometro portatile è inoltre emerso che nello spezzone di laminato relativo ai provini AFV21 lato B sono presenti delle tensioni residue di trazione di circa 170Mpa. Esse sono probabilmente dovute al fatto che il piatto laminato è più largo dello scalino della placca di raffreddamento atto ad accogliere il laminato, e quindi lo stesso piatto subisce due diverse tipologie di raffreddamento: dove c'è il contatto diretto con la placca lo scambio termico è più repentino rispetto alla parte di piatto solamente esposta all'aria con uno scambio termico di tipo convettivo, in cui le micrografie di fatto non riportano particolari differenze microstrutturali.

Le analisi chimiche fatte sulle diverse colate relative ai campioni sottoposti al test di resilienza risultano essere del tutto simili tra di loro. È stata posta l'attenzione in particolar modo al valore di carbonio equivalente che, assieme al valore di KCU, possono essere indici della natura fragile del materiale.

Successivamente, è stata eseguita l'analisi al Sem per rilevare la presenza di inclusioni sia esogene che endogene nella matrice dell'acciaio, come riportato nel capitolo 3.7. La loro presenza in quota parte inevitabile è dovuta al processo di colaggio in continuo, e si è verificato come, oltre ad una certa soglia, ciò può determinare la nascita di punti di fragilità nel materiale laminato e quindi causare un crollo anomalo dei valori di resilienza. Sui campioni analizzati non si è peraltro osservato un impatto tale da rendere i valori di resilienza non conformi alle normative.

Al fine di garantire sia prodotti prestazionali, sia valori di resilienza richiesti dalle norme internazionali si è dimostrato che si deve porre attenzione soprattutto ai piatti di piccolo spessore. Questi infatti risentono maggiormente del tipo di raffreddamento che, a sua volta, influenza la formazione e la disposizione della fase perlitica che va ad influire quindi sulla microstruttura generando materiali che presentano frattura di natura fragile.

# Bibliografia

G.M Paolucci (2002), *Lezioni di metallurgia per laurea in ingegneria meccanica volume 1*, seconda edizione, “*Struttura proprietà e comportamento dei materiali metallici*”

G.M Paolucci (2002), *Lezioni di metallurgia per laurea in ingegneria meccanica volume 2*, seconda edizione, “*Tecnologia dei materiali metallici*”

G.M Paolucci (2002), *Lezioni di metallurgia per laurea in ingegneria meccanica volume 3*, seconda edizione, “*Analisi, prove e controlli sui materiali metallici*”

Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2014), seconda edizione “*Tecnologia meccanica*”

Appunti personali del corso di *Materiali metallici* del prof. Dabalà M., A.A. 2016/2017

Vladimir B. Ginzburg, Robert Ballas (2000), *flat rolling fundamentals*

*Spider x User manual* Rev.01, dicembre 2016

Marco Boniardi, Andrea Casaroli (2017) “*Metallurgia degli acciai*”