

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dell'effetto PLC e delle bande plastiche in trazione  
nella lega 8090-T851 tramite DIC, reagente Weck e  
microscopio SEM

**Relatore:**

Prof. Roberto Doglione

**Candidato:**

Alberto Serra Matricola 246237



## Sommario

1	Scopo dell'attività di ricerca .....	1
2	Tecnica di Correlazione di Immagini Digitali (DIC) .....	3
2.1	Introduzione .....	3
2.2	Correlazione d'immagini digitali 2D .....	4
2.3	Principio di funzionamento .....	5
2.4	Misurazione degli spostamenti con risoluzione sub-pixel.....	7
2.5	Deformazione dei subsets.....	9
2.6	Configurazione e setup del sistema .....	11
2.7	Il pattern .....	14
2.8	La calibrazione .....	15
3	Prova di trazione – curva reale e curva ingegneristica .....	17
4	Effetto di Portevin-Le Chatelier.....	19
4.1	Introduzione .....	19
4.2	Jerky flow nel grafico tensione – deformazione.....	21
4.3	Tipologie di bande plastiche di scorrimento .....	21
4.4	Caratteristiche delle bande plastiche di scorrimento .....	24
4.5	Esempio di effetto PLC in una lega d'alluminio Al-Li-Cu-Mg (8090-T851).....	25
5	Lega Al-Li-Cu-Mg 8090-T851 .....	28
5.1	Introduzione .....	28
5.2	Caratteristiche meccaniche AA 8090.....	29
5.3	Effetto degli elementi leganti .....	31
5.4	Fenomeni di rafforzamento durante l'invecchiamento.....	32
6	Prova preliminare con provino di polietilene.....	34
7	Prove di trazione della prima serie di provini della lega 8090-T851 .....	37
7.1	Prova di trazione - provino R60LT .....	39
7.2	Prova di trazione - provino R61LT .....	42
7.3	Prova di trazione - provino R67L.....	45
7.4	Prova di trazione del provino R62LT.....	47
7.5	Prova di trazione del provino R68L .....	51
7.6	Considerazioni finali sulla prima serie di provini .....	54
8	Prove di trazione della seconda serie di provini della lega 8090-T851.....	56
8.1	Errore calibratore da 4 mm.....	58
8.2	Prova di trazione del provino R4LS .....	60
8.3	Prova di trazione del provino R3TS .....	63
8.4	Prova di trazione del provino R1LC.....	66
8.5	Prova di trazione del provino R1TC.....	69
8.6	Considerazioni finali sulla seconda serie di provini.....	72
9	Prove di trazione della terza serie di provini della lega 8090-T851 .....	73

9.1	Prova di trazione del provino R6LS .....	75
9.2	Prova di trazione del provino R7LC.....	78
9.3	Prova di trazione del provino R4LI.....	79
9.4	Prova di trazione del provino R8LS .....	80
9.5	Prova di trazione del provino R6LC.....	82
9.6	Prova di trazione del provino R5LC.....	85
9.7	Prova di trazione del provino R5LS .....	88
9.8	Prova di trazione del provino R1LI.....	92
9.9	Prova di trazione del provino R5TS .....	95
9.10	Prova di trazione del provino R2TI.....	98
9.11	Prova di trazione del provino R4TC.....	99
9.12	Prova di trazione del provino R3TI.....	102
9.13	Prova di trazione del provino R5TC.....	105
9.14	Prova di trazione del provino R6TS .....	108
9.15	Prova di trazione del provino R6TC.....	110
9.16	Prova di trazione del provino R4TI.....	113
9.17	Prova di trazione del provino R7TS .....	115
9.18	Considerazioni finali sulla terza serie di provini.....	118
10	Analisi metallografica tramite reagente Weck .....	120
10.1	Campione LT-C inglobato .....	122
10.2	Campione LT-S inglobato .....	126
10.3	Analisi metallografica – Provino R6TS .....	133
10.4	Analisi metallografica – Provino R7TS .....	136
11	Analisi al SEM della morfologia della frattura .....	138
11.1	Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5TS .....	138
11.2	Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5LS .....	143
11.3	Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R6LC.....	153
11.4	Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5TC.....	160
12	Applicazione DIC al fenomeno di “Crack Closure” delle cricche di fatica .....	165
13	Conclusioni .....	168
14	Bibliografia .....	169

# 1 Scopo dell'attività di ricerca

L'obiettivo che si propone l'attività di ricerca che verrà trattata all'interno di questa tesi sarà quello di studiare l'effetto Portevin Le Chatelier e la relativa formazione e propagazione delle bande plastiche, che si formano durante i fenomeni di deformazione plastica localizzata dei provini sottoposti ad una prova di trazione uniassiale, nella lega d'alluminio 8090-T851. La tecnica di Correlazione d'Immagini Digitali verrà applicata e utilizzata all'interno di questo studio, proprio per valutare la nascita, la propagazione, la tipologia delle bande plastiche e la loro influenza sul comportamento dei campioni sottoposti alle prove di trazione. La correlazione d'immagini digitali, l'analisi delle deformazioni plastiche e delle bande plastiche ad esse associate, relative ai provini sottoposti alla prova di trazione, verrà realizzata tramite il software ISTR4 4D. Sui provini che verranno analizzati, verrà precedentemente realizzato sulla superficie di ognuno un pattern stocastico, che servirà da riferimento per il software per valutare il campo degli spostamenti e successivamente delle deformazioni dei punti di riferimento presi sulla superficie del provino, con l'obiettivo di valutare la nascita, la propagazione e l'influenza che le bande plastiche hanno durante la prova di trazione, sul comportamento del provino e sulle caratteristiche meccaniche del materiale. Dopo l'analisi con la correlazione d'immagini digitali durante le prove di trazione, le superfici di frattura verranno analizzate al microscopio SEM, per osservare l'effetto Portevin-Le Chatelier da un altro punto di vista e per condurre uno studio sulla morfologia della microstruttura e per capire quale tipo di fenomeno di frattura si è verificato e se è correlato alla tipologia dei campioni utilizzati e alla loro microstruttura. Inoltre, verrà condotta un'analisi metallografica per analizzare la microstruttura della lega, nei suoi diversi strati. Per far questo verrà utilizzata la tecnica dell'attacco colorante Weck sulle superfici che verranno successivamente osservate al microscopio ottico.

I provini, che verranno utilizzati nelle prove di trazione e nelle analisi metallografiche ai microscopi, sono stati realizzati intagliando una lastra di lega di alluminio ad alta resistenza, più precisamente la lega 8090-T851, ottenuta per laminazione. In particolare, i provini non sono tutti uguali tra loro, in quanto sono stati ricavati a diversi livelli di profondità e di orientazione rispetto allo spessore e alla direzione di laminazione della lastra. I provini ricavati lungo lo spessore della lastra sono sei: due superficiali, due intermedi e due centrali. Di seguito, la dicitura riportata fa riferimento alle ultime due lettere che sono riportate sulla sigla del provino e viene utilizzata per distinguere come i provini sono stati ricavati rispetto alla lastra:

- LS: indica i provini che sono stati ricavati sulla superficie della lastra in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- LI: indica i provini che sono stati ricavati dallo strato intermedio, tra la superficie e il cuore, della lastra in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- LC: indica i provini che sono stati ricavati a livello del cuore della lastra in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- TS: indica i provini che sono stati ricavati sulla superficie della lastra in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.
- TI: indica i provini che sono stati ricavati dallo strato intermedio, tra la superficie e il cuore, della lastra in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.
- TC: indica i provini che sono stati ricavati a livello del cuore della lastra in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.

La nomenclatura dei provini appena riportata fa riferimento alle figure seguenti, nel quale è riportato un sistema di riferimento con assi  $x$ ,  $y$  e  $z$ . L'asse  $y$  indica la direzione di laminazione della lastra, l'asse  $z$  indica la posizione del provino lungo lo spessore della lastra, mentre l'asse  $x$

indica la direzione trasversale alla direzione di laminazione. I provini ricavati in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione, sono ricavati lungo la direzione  $y$ ; mentre i provini ricavati in maniera trasversale rispetto alla direzione di laminazione sono ricavati lungo la direzione  $x$ .

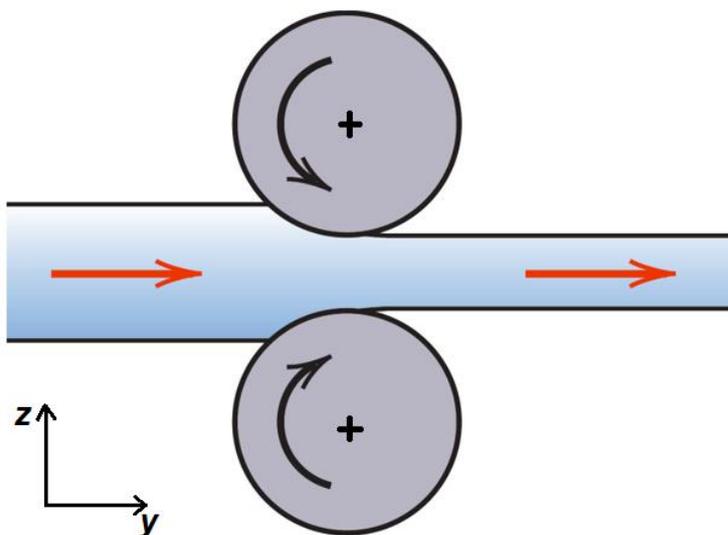


Figura 1: Direzione di laminazione della lastra d'alluminio 8090-T851, dalla quale sono stati ricavati i campioni.

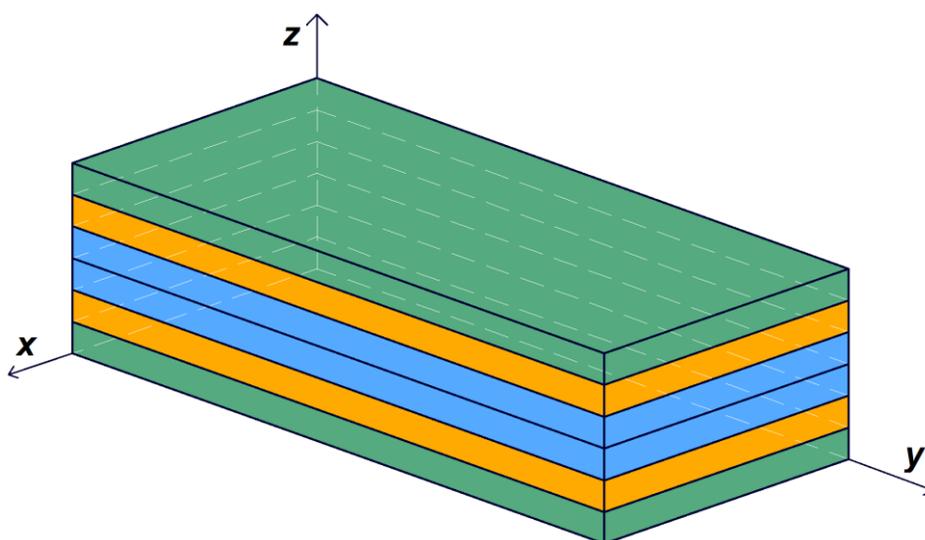


Figura 2: Nell'immagine si fa riferimento alla posizione dei provini rispetto alla posizione della lastra. In verde i provini ricavati dalla superficie della lastra (S), in blu i provini ricavati dagli strati centrali della lastra (C), mentre in arancione i provini intermedi (I) ricavati dagli strati intermedi tra la superficie e il cuore.

## 2 Tecnica di Correlazione di Immagini Digitali (DIC)

### 2.1 Introduzione

Negli ultimi anni i sistemi di rilevazione e di misura hanno subito un significativo sviluppo tecnologico, diventando sempre più efficienti e meno invasivi. Sono stati sviluppati alcuni metodi di misura ottica, come la tecnica di Correlazione di Immagini Digitali, chiamata comunemente DIC (*Digital Image Correlation*). Si tratta di un metodo di misura ottica senza contatto che permette di realizzare delle misurazioni, nell'ambito dei campi di spostamento e deformazioni, sulle superfici sulle quali viene utilizzata. Si tratta di una tecnica estremamente poco invasiva che non influisce sulle proprietà e sulle caratteristiche dei provini in esame, in quanto le acquisizioni digitali dei provini vengono realizzate utilizzando una videocamera. Se si vogliono realizzare delle acquisizioni bidimensionali si usa una sola videocamera, altrimenti se si vogliono realizzare delle acquisizioni tridimensionali, si usano due videocamere, opportunamente posizionate.

La tecnica DIC viene ampiamente utilizzata in diverse aree della scienza e dell'ingegneria. Inoltre, per funzionare correttamente e con una buona precisione è necessario che vengano definiti e messi a punto differenti parametri di processo. Infatti, le performance e il grado di errore del sistema oltre che dai parametri di processo dipendono anche dalle condizioni ambientali, in cui vengono eseguiti gli esperimenti, come l'illuminazione e la temperatura. La capacità di questa tecnica di realizzare delle misurazioni sui provini, si basa sulla realizzazione di un modello puntinato (pattern) sulla superficie metallica dei provini e sulla definizione dei parametri che influenzano i risultati finali del modello. Per questi motivi solitamente viene utilizzata nell'ambito di prove meccaniche, soprattutto nelle prove di trazione, per misurare spostamenti e deformazioni in un campo ben definito e limitato della superficie del provino. Le applicazioni del modello DIC sono molte e dipendono dal campo di applicazione. Sovente è stato utilizzato per monitorare gli spostamenti dei ponti stradali e ferroviari, per misurare l'apertura delle cricche in componenti dell'ingegneria civile. Altri esempi in cui è stato utilizzato il modello DIC sono: in ambito industriale per quanto riguarda i processi di controllo, nei sistemi tutor autostradali nei quali ha il compito di rilevare e riconoscere automaticamente i numeri delle targhe e in ambito aerospaziale, per quanto riguarda i robot adibiti all'esplorazione spaziale.

La tecnica di correlazione d'immagini digitali presenta tutta una serie di vantaggi rispetto ai metodi convenzionali di misura o rispetto ad altri metodi di misura ottica come "laser shearography" e "speckle interferometry", che rispetto alla tecnica DIC sono nettamente più costose sia a breve, sia a lungo termine; inoltre, sono più difficili da utilizzare sul campo, in ambienti al di fuori del laboratorio, in quanto richiedono setup molto precisi e ambienti con vibrazioni contenute. Invece la tecnica DIC, rispetto alle altre tecniche, è in grado di utilizzare la convenzionale fotografia digitale per realizzare le misurazioni sul componente che si vuole utilizzare. La si può utilizzare per fare misurazioni accurate anche in ambienti al di fuori del laboratorio, è una tecnica che consente di realizzare delle misurazioni utilizzando una strumentazione relativamente low-cost che può essere facilmente sviluppata e potenziata per garantire gradi di accuratezza e precisione ancora più elevati nel tempo.

Recenti studi e sviluppi, soprattutto in ambito software hanno confermato che la tecnica di correlazione d'immagini digitali è in continuo sviluppo, sia in termini di espansione in nuovi campi di applicazione, sia in termini di sviluppo di migliori livelli di accuratezza nelle misurazioni.

## 2.2 Correlazione d'immagini digitali 2D

La correlazione d'immagini digitali (DIC) è un potente e innovativo strumento che per misurare spostamenti e deformazioni, si basa su una tecnica di misura ottica senza stabilire un contatto con il provino sul quale si vogliono fare le rilevazioni. Per questo può essere utilizzato per acquisire e registrare delle immagini e tracciare su di esse gli spostamenti di determinati punti di riferimento. In molti casi le immagini utilizzate vengono ottenute tramite sensori fotografici. La tecnica di correlazione di immagini digitali si pone l'obiettivo di misurare la deformazione a tutto campo sul campione analizzato, è un metodo non intrusivo, perché non influisce sul campione o sul suo comportamento; può essere applicata per misurare la deformazione solo su provini con superfici piane. La correlazione d'immagini digitali può essere 2D quando si utilizza un solo obiettivo, oppure 3D quando si utilizzano due obiettivi. Nel nostro caso è stata condotta la correlazione d'immagini digitali 2D. Uno dei principi fondamentali in questo caso è che la visione è di tipo monoculare e quindi non può determinare la dimensione degli oggetti; di conseguenza una deformazione isotropa del 200% di un certo campione produce la stessa immagine come se l'oggetto fosse spostato a metà della sua distanza originale dal sensore visivo, inoltre durante l'esperimento bisogna fare in modo che l'oggetto sia planare, parallelo e ad una distanza costante dal sensore visivo.

La tecnica di correlazione d'immagini digitali basa il proprio funzionamento sul confronto di fotografie digitali, di un provino o di un componente sul quale si stanno facendo dei determinati esperimenti, scattate a diversi istanti di tempo. Successivamente il software del modello DIC, tracciando un blocco di pixels, è in grado di misurare gli spostamenti sulla superficie del provino e costruire così un campo 2D o 3D (a seconda che si usino una o due videocamere nel sistema DIC) di vettori relativi all'andamento delle deformazioni che si verificano nel provino analizzato. Affinché il sistema DIC possa lavorare come si deve è necessario che la distribuzione dei blocchi di pixels sia di tipo casuale e che presentino dei range di contrasto e di intensità unici tra loro. Questo è fondamentale affinché non ci siano blocchi di pixels simili tra loro, altrimenti il sistema potrebbe andare in confusione e commettere degli errori nelle misurazioni. In alcuni casi quando si utilizza il sistema di correlazione d'immagini digitali, non sono necessarie illuminazioni particolari e in molti casi per realizzare delle buone rilevazioni la superficie naturale della struttura del campione che si vuole analizzare presenta una texture superficiale sufficiente affinché il sistema DIC possa lavorare senza che sia necessario che la superficie del provino venga preparata.

Con questa tecnica ogni cambiamento nella struttura del componente può essere facilmente confrontato con le immagini catturate inizialmente che vengono utilizzate come riferimento. In questo modo risulta più semplice riconoscere le anomalie che potrebbero causare un comportamento inaspettato del campione. Viene utilizzato per fare misure sia in campo di spostamento sia in campo di deformazione. Prima di realizzare una misurazione DIC bisogna definire e settare tutta una serie di parametri tra cui la densità di correlazione dei puntini che definiscono il pattern, l'algoritmo di correlazione e ottimizzazione, le dimensioni dei subset, la spaziatura della griglia tra i subset e il grado di grigio del pattern sulla superficie del provino. Una volta definiti e trovata la giusta combinazione non sarà più necessario modificarli per le prove successive. L'idea di funzionamento su cui si basa questo metodo è quella di trovare il campo di spostamenti di determinati punti sulla superficie del campione analizzato e tracciare e analizzare la deformazione di un pattern puntinato che era stato preventivamente realizzato sulla superficie del campione. Si calcolano gli spostamenti e il campo di deformazione relativi ad un'immagine deformata, soggetta per questo ad un cambiamento, e li si confrontano con una specifica immagine presa come riferimento ad inizio prova.

## 2.3 Principio di funzionamento

Quando si conduce un'analisi DIC è necessario mantenere il sensore fotografico, tramite il quale si fanno le acquisizioni di fotogrammi, perfettamente perpendicolare alla superficie del campione che si vuole analizzare e inoltre la distanza focale tra la superficie che verrà ripresa e il sensore fotografico deve rimanere costante. In questo modo viene assicurata la complanarità tra il campo di spostamenti e, di conseguenza di deformazioni, la superficie del provino di riferimento. Al fine di ottenere un'elevata accuratezza dei risultati è necessario che queste condizioni rimangano inalterate e costanti durante lo svolgimento della prova e delle acquisizioni. Se così non fosse, verrebbero generate delle deformazioni apparenti che andrebbero a sommarsi alle deformazioni realmente calcolate, generando così degli errori, non identificabili ed eliminabili, nel calcolo delle deformazioni. Prima di partire con le acquisizioni, la superficie in oggetto deve essere ricoperta con un pattern stocastico, ovvero costituito da puntini di vernice bianca e nera in maniera casuale. Durante le acquisizioni, il sensore fotografico acquisisce fotogrammi ad una certa frequenza preimpostata ed insieme ad essi, attraverso la scheda di acquisizione, anche i valori delle grandezze provenienti dal computer della macchina di trazione, valori di carico o deformazione a seconda della prova che si conduce e del segnale in output dal pc MTS. Il primo fotogramma acquisito fa sempre riferimento alla condizione iniziale del campione, ovvero la configurazione indeformata e viene poi diviso come una scacchiera in quadrati più o meno grandi che prendono il nome di facets o subset. L'analisi di calcolo DIC, che viene poi condotta al termine della prova di trazione, effettua un confronto tra il fotogramma iniziale di riferimento e quelli acquisiti successivamente, in modo da calcolare il campo di spostamenti e di conseguenza le deformazioni. Per far questo viene preso un marker di riferimento sul fotogramma relativo alla configurazione indeformata e poi si traccia la posizione del marker nelle configurazioni deformate che via via si susseguono, in modo da ottenere una funzione che massimizza lo spostamento del marker. Nella pratica, non si considera il solo marker, ma si considera una certa zona nell'intorno del marker, contenente un certo numero di pixel; questo insieme di pixels intorno delimitato intorno al marker prende il nome di subset.

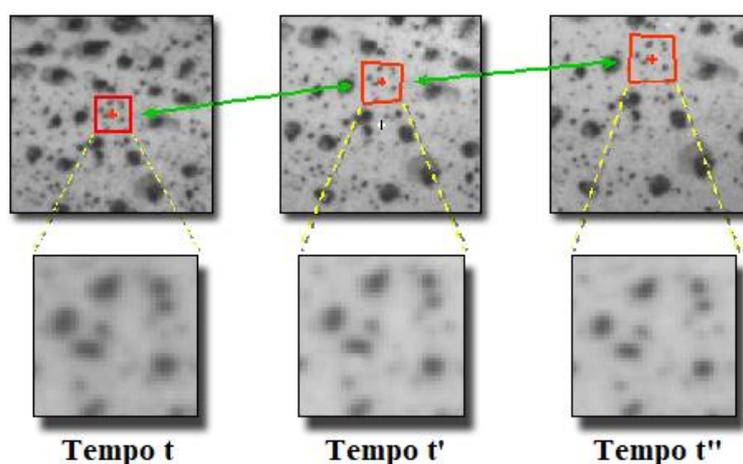


Figura 3: Tracking del subset intorno al marker di riferimento partendo dall'istante iniziale di riferimento  $t$  e in due istanti di tempo successivi  $t'$  e  $t''$  [1].

Di seguito verrà presentato il principio base di funzionamento della correlazione d'immagini digitali, per il calcolo di spostamenti e deformazione lungo il piano parallelo al sensore fotografico che realizza le acquisizioni. I livelli di grigio presenti tra i pixels di un'immagine digitale dopo deformazione vengono interpolati per ottenere gli spostamenti con una risoluzione dell'ordine dei sub-pixels. Gli spostamenti vengono poi determinati risolvendo

delle equazioni non lineari, considerando la deformazione di un subset e non del singolo pixel. Dopo di che le deformazioni vengono ottenute partendo dagli spostamenti e risolvendo delle equazioni differenziali. Siccome a ciascun pixel corrisponde un certo livello di grigio, non viene ricercata la corrispondenza tra i singoli pixels, perché ci potrebbero essere dei pixels con valori di grigio uguali nelle immagini deformate; per questo motivo la ricerca viene fatta sulle regioni quadrate comprendenti più pixels, i subsets. In questo modo, si va alla ricerca di un subset nell'immagine deformata che presenti la stessa distribuzione di livelli di grigio dello stesso subset nell'immagine precedente alla deformazione. Le immagini in scala di grigio acquisite prima e dopo la deformazione della superficie planare di un oggetto, ricoperta col pattern stocastico, servono a determinare gli spostamenti sul piano. Nell'immagine sottostante, tramite il pattern casuale vengono distribuiti dei livelli di grigio non uniformi. All'istante  $t'$  si vede che il subset rispetto alla posizione indeformata, si è spostato di una distanza  $d$ .

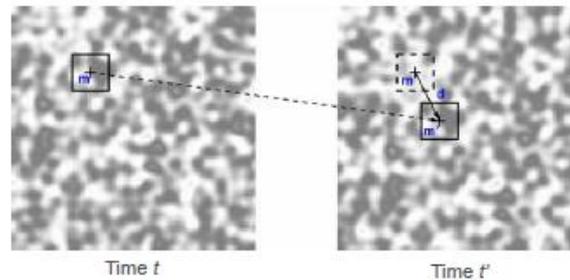


Figura 4: Superficie di un oggetto ricoperta dal pattern casuale prima ( $t$ ) e dopo ( $t'$ ) deformazione. Il subset si è spostato di una quantità  $d$  rispetto alla condizione di partenza prima della deformazione [1].

Per determinare la posizione del marker del subset si considera la condizione che massimizza il coefficiente di correlazione  $C$  tra i due fotogrammi, prima e dopo la deformazione:

$$C(x,y,x^*,y^*) = \frac{\sum F(x,y)G(x^*,y^*)}{\sqrt{\sum F(x,y)^2 \sum G(x^*,y^*)^2}}$$

Facendo riferimento all'equazione, abbiamo che  $F(x,y)$  indica il livello di grigio nel punto  $(x,y)$  nell'immagine prima della deformazione,  $G(x^*,y^*)$  indica il livello di grigio nel punto  $(x^*,y^*)$  nell'immagine dopo deformazione. Il simbolo  $\sum$  indica la sommatoria all'interno del subset. il livello di grigio dà il valore d'intensità luminosa dei pixels all'interno del subset e deve essere espresso in maniera continua, in modo da ottenere una distribuzione continua dei valori d'intensità luminosa  $I$  all'interno dei subsets. Il valore massimo del coefficiente di correlazione  $C$  lo si ottiene quando la distribuzione dei livelli di grigio all'interno del subset, coincide con quelli presenti all'interno di una certa area nell'immagine dopo deformazione; questo significa che è stata trovata la posizione del subset nell'immagine dopo deformazione. Questa procedura viene poi ripetuta per tutti i subsets, cambiando l'area estratta dall'immagine successiva alla deformazione. La posizione dei subset dopo deformazione viene relazionata come segue:

$$\begin{aligned} x^* &= x + u_x \\ y^* &= y + u_y \end{aligned}$$

dove  $u_x$  e  $u_y$  sono le componenti relative allo spostamento del marker del subset. La distribuzione degli spostamenti viene ottenuta, cambiando la posizione del subset estratto dall'immagine dopo deformazione e ripetendo la procedura per tutta la regione d'interesse. Con questo metodo si possono determinare spostamenti non più piccoli di 1 pixel; per determinare spostamenti inferiori a 1 pixel, bisogna usare un metodo con una risoluzione dell'ordine dei sub-pixel.

## 2.4 Misurazione degli spostamenti con risoluzione sub-pixel

Solitamente gli spostamenti non coincidono con spostamenti dei pixel interi, ma si verificano anche spostamenti più piccoli di un pixel, dell'ordine dei sub-pixels. Per ottenere delle misurazioni accurate è necessario individuare gli spostamenti dei subsets con una risoluzione dell'ordine dei sub-pixels. Solitamente per far questo, si usa il metodo che consiste nel trovare il massimo della funzione che approssima il coefficiente di correlazione  $C$ . Tuttavia, questo metodo presenta un'accuratezza dei risultati, inferiore a quella prodotta dal metodo che si basa sull'interpolazione dei livelli di grigio, con il quale si riesce anche a tenere in considerazione la deformazione subita dai subsets. Con il metodo dell'interpolazione dei livelli di grigio si è in grado di determinare la posizione dei pixels nel subset, situato tra i pixels dell'immagine dopo deformazione, tranne che nel caso in cui gli spostamenti siano uguali a multipli di 1 pixel. Per poter calcolare il coefficiente di correlazione dei subsets è necessario conoscere il livello di grigio tra i pixels. Questo significa che per determinare gli spostamenti con una risoluzione sub-pixel, bisogna conoscere i livelli di grigio tra i pixels. In più, la deformazione dei subset può essere considerata, conoscendo la distribuzione dei livelli di grigio tra i pixels. I livelli di grigio situati tra i pixels interi, generalmente viene determinata per interpolazione dai livelli di grigio dei pixels interi, risolvendo delle funzioni d'interpolazione bilineari e bicubiche.

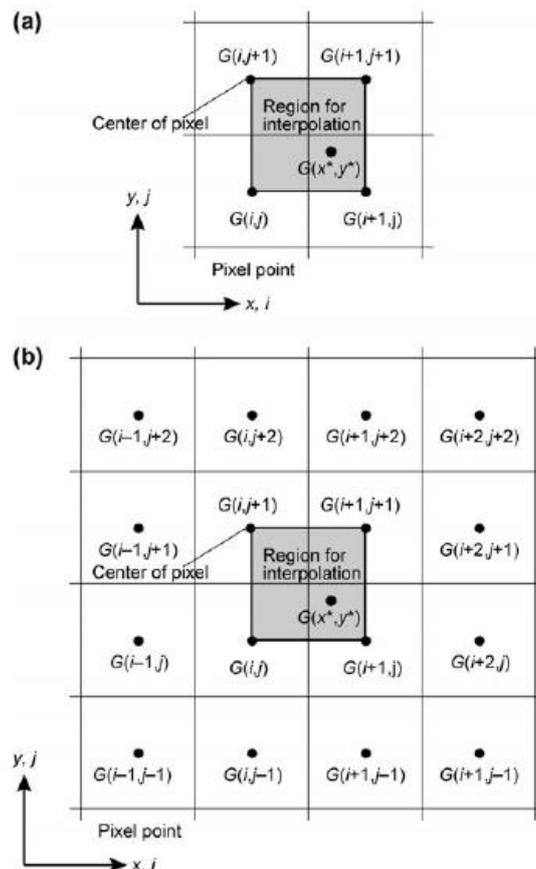


Figura 5: Posizione dei pixels e interpolazione sull'area del subset con funzione bilineare (a) e bicubica (b) [4].

Considerando l'immagine soprastante, si vedono 4 quadrati che sono 4 pixels adiacenti (a) e 16 quadrati che sono 16 pixels adiacenti (b) che determinano il subset e ciascun pixel ha una sua area. Il livello di grigio in ciascun pixel è definito dal valor medio della distribuzione dell'intensità di luce sull'area del pixel. Siccome la distribuzione dell'intensità di luce sull'area del pixel non è nota, il livello di grigio del pixel fa riferimento al valore al centro del pixel. I valori

dei livelli di grigio diversi dal centro del pixel vengono determinati per interpolazione. I pedici  $i, j$  fanno riferimento alla posizione dei pixels interi. Le espressioni  $G(i, j)$ ,  $G(i+1, j)$ ,  $G(i, j+1)$  e  $G(i+1, j+1)$  indicano i valori dei livelli di grigio, ovvero delle intensità luminose nei rispettivi pixels e fanno riferimento al valore del centro di ciascun pixel. Quando si utilizza l'interpolazione con funzione bilineare, i livelli di grigio ottenuti per interpolazione tra i pixels interi possono essere espressi come segue:

$$G(x^*, y^*) = a_{11}x'y' + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{00}$$

Dove  $G$  indica il livello di grigio dopo deformazione della regione usata per l'interpolazione,  $x'$  e  $y'$  indicano la distanza da  $x^*$  e  $y^*$  lungo le componenti  $(i, j)$  e variano nel range  $0 \leq x' \leq 1$  e  $0 \leq y' \leq 1$ . Mentre i coefficienti  $a_{00}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{01}$  e  $a_{11}$  della funzione bilineare vengono determinati dai 4 livelli di grigio relativi ai 4 pixels interi adiacenti, risolvendo le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{10} + a_{01} + a_{00} &= G(i+1, j+1) \\ a_{10} + a_{00} &= G(i+1, j) \\ a_{01} + a_{00} &= G(i, j+1) \\ a_{00} &= G(i, j) \end{aligned}$$

Invece, se venisse usata l'interpolazione con funzione bicubica, si otterrebbero i livelli di grigio tra i 16 pixels interi adiacenti, espressi come segue:

$$\begin{aligned} G(x^*, y^*) &= b_{33}x'^3y'^3 + b_{32}x'^3y'^2 + b_{31}x'^3y' + b_{30}x'^3 \\ &\quad + b_{23}x'^2y'^3 + b_{22}x'^2y'^2 + b_{21}x'^2y' + b_{20}x'^2 \\ &\quad + b_{13}x'y'^3 + b_{12}x'y'^2 + b_{11}x'y' + b_{10}x' \\ &\quad + b_{03}y'^3 + b_{02}y'^2 + b_{01}y' + b_{00} \\ &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 b_{ij}x'^i y'^j \end{aligned}$$

I parametri  $x'$  e  $y'$  variano nel range  $-1 \leq x' \leq 2$  e  $-1 \leq y' \leq 2$  e l'interpolazione viene effettuata nella zona centrale del pixel nell'intorno  $0 \leq x' \leq 1$  e  $0 \leq y' \leq 1$ . Dove, i coefficienti  $b_{00}$ ,  $b_{10}$ , ...,  $b_{33}$  della funzione bicubica vengono determinati dai 16 livelli di grigio relativi ai 16 pixels interi adiacenti. In alternativa possono essere determinati per derivazione dalla distribuzione dei valori di grigio nel subset. In questo modo, applicando questo metodo d'interpolazione a tutta l'area interessata per determinare i coefficienti della funzione d'interpolazione, si è in grado di determinare una distribuzione continua dei livelli di grigio su tutta l'area interessata. In questo modo, determinando i coefficienti della funzione d'interpolazione cubica è possibile calcolare i valori di grigio in posizioni arbitrarie. Generalmente, l'utilizzo della funzione d'interpolazione bicubica garantisce dei risultati migliori con errori di misurazione minori, rispetto alla funzione d'interpolazione bilineare. L'errore di misurazione è piccolo quando si hanno spostamenti dell'ordine del pixel o di 1,5 volte il pixel intero. Solitamente l'errore massimo che si può avere è pari a 0,01 pixel, quando si usa l'interpolazione cubica, e influenza molto i valori che si ottengono nel calcolo delle deformazioni, ottenute differenziando i valori di spostamento. L'errore e la sua distribuzione dipendono molto dal pattern, realizzato sulla superficie, e dalla qualità delle immagini.

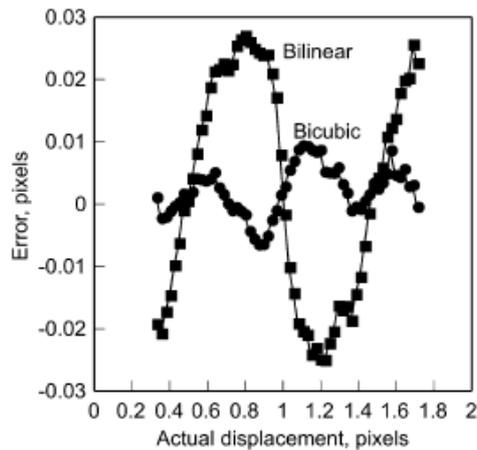


Figura 6: Errore di misurazione generato dall'interpolazione per il calcolo dei livelli di grigio. Si vede come l'errore generato dalla funzione bicubica sia inferiore a quello generato dalla funzione bilineare [4].

## 2.5 Deformazione dei subsets

Quando il campione subisce una deformazione, anche la sua superficie la subisce e allo stesso modo il pattern realizzato sulla superficie del campione. I subsets si deformano, seguendo la deformazione a cui è sottoposta la superficie. Dato che il subset è piccolo, anche la deformazione lo sarà; quindi i gradienti degli spostamenti all'interno del subset saranno uniformi. Di seguito viene presentata la relazione che lega i punti interni al subset prima  $(x,y)$  e dopo  $(x^*,y^*)$  deformazione:

$$\begin{aligned} x^* &= x + u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta y \\ y^* &= y + u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_y}{\partial y} \Delta y \end{aligned}$$

Dove,  $u_x$  e  $u_y$  indicano le componenti degli spostamenti del centro del subset lungo le direzioni  $x$  e  $y$ ;  $\Delta x$  e  $\Delta y$  indicano la distanza di un generico punto Q di coordinate  $(x,y)$  dal centro del subset P.

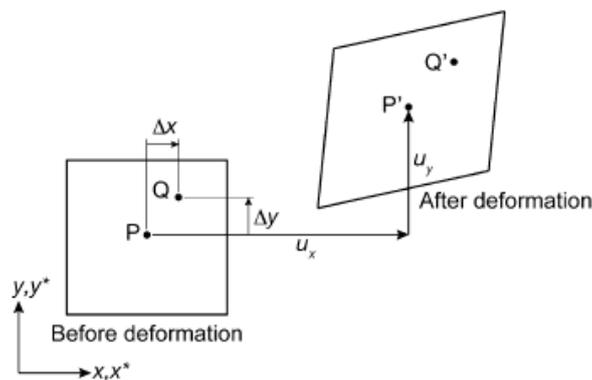


Figura 7: Spostamento e deformazione di un generico subset. Il subset prima della deformazione ha una forma quadrata; dopo deformazione assume una forma a parallelogramma [4].

Durante la deformazione il quadrato che rappresenta il subset si deforma e assume una forma a parallelogramma e di conseguenza cambia la posizione dei punti P e Q che si saranno spostati in P' e Q' dopo deformazione. Con  $I(P)$  e  $I(Q)$  si possono indicare le intensità luminose, relative ai livelli di grigio, nei punti P e Q. In particolare, la forma del subset cambierà a seconda

di come varieranno le componenti relative alla deformazione. Con le equazioni appena presentate si è in grado di esprimere la distanza di cui si è spostato il punto P e la posizione del punto Q'. In queste due equazioni ci sono sei incognite: le due componenti di spostamento  $u_x$  e  $u_y$  e i quattro gradienti relativi agli spostamenti, che vengono determinati durante i calcoli della correlazione d'immagini digitali. Facendo riferimento alla figura 7, si possono esprimere le intensità luminose dei punti P e Q riferiti al subset prima della deformazione e dei punti P' e Q' riferiti al subset dopo deformazione:

$$I(P) = I(x_P, y_P)$$

$$I(Q) = I(x_P + \Delta x, y_P + \Delta y)$$

$$I(P') = I(x_{P'}, y_{P'})$$

$$I(Q') = I(x_{P'} + \Delta x', y_{P'} + \Delta y')$$

Tramite i calcoli iterativi della correlazione d'immagini digitali, si va a cercare il subset che nelle condizioni dopo deformazione, presenta l'intensità di luminosità il più prossima possibile a quella del subset nelle condizioni di riferimento, quelle prima della deformazione. Facendo riferimento all'espressione che lega le coordinate del punto prima e dopo deformazione, si può riscrivere il coefficiente di correlazione  $C$  in funzione dello spostamento  $u$ , ottenendo:

$$C(x, y, \mathbf{u}) = \frac{\sum F(x, y) G(x, y, \mathbf{u})}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x, y, \mathbf{u})^2}}$$

Dove il vettore  $u$  rappresenta le componenti e i gradienti degli spostamenti:

$$\mathbf{u} = \left\{ u_x \quad u_y \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad \frac{\partial u_y}{\partial y} \right\}^T$$

Gli spostamenti vengono determinati seguendo un processo di calcolo iterativo cercando all'interno dell'insieme di spostamenti, quelli che massimizzano il coefficiente di correlazione  $C$ . Questo processo si ripete fino a quando non si massimizza il coefficiente  $C$  e a quel punto si ottengono i valori di spostamento desiderati. Una volta ottenuti i valori di spostamento, le deformazioni possono essere calcolate differenziando i valori di spostamento lungo la superficie del campione. Al fine di ridurre al minimo l'effetto degli errori di misurazione nel calcolo delle deformazioni, per calcolarle si usa il metodo dei minimi quadrati. Gli spostamenti, all'interno di un'area delimitata, vengono approssimati usando il metodo dei minimi quadrati e poi le deformazioni vengono calcolate differenziando l'espressione degli spostamenti. Applicando il seguente metodo a tutta l'area d'interesse si ottiene la distribuzione delle deformazioni sulla superficie desiderata:

$$\begin{aligned} u_x &= a_x x + b_x y + c_x \\ u_y &= a_y x + b_y y + c_y \end{aligned}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = a_x$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} = b_y$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = a_y + b_x$$

## 2.6 Configurazione e setup del sistema

Prima di effettuare le prove di acquisizione della correlazione d'immagini digitali, bisogna configurare il sistema DIC come segue. La superficie dell'oggetto sulla quale si scatteranno le fotografie deve essere illuminata uniformemente in modo da ottenere un buon contrasto nell'immagine. L'immagine non deve essere né troppo chiara, né troppo scura; non è sempre necessario utilizzare un'illuminazione artificiale, l'importante è ottenere un'illuminazione sufficiente e uniforme a garantire un buon contrasto. Il provino deve essere posizionato in modo tale da avere la superficie d'interesse, sulla quale bisogna fare le acquisizioni, perpendicolare al sensore fotografico.

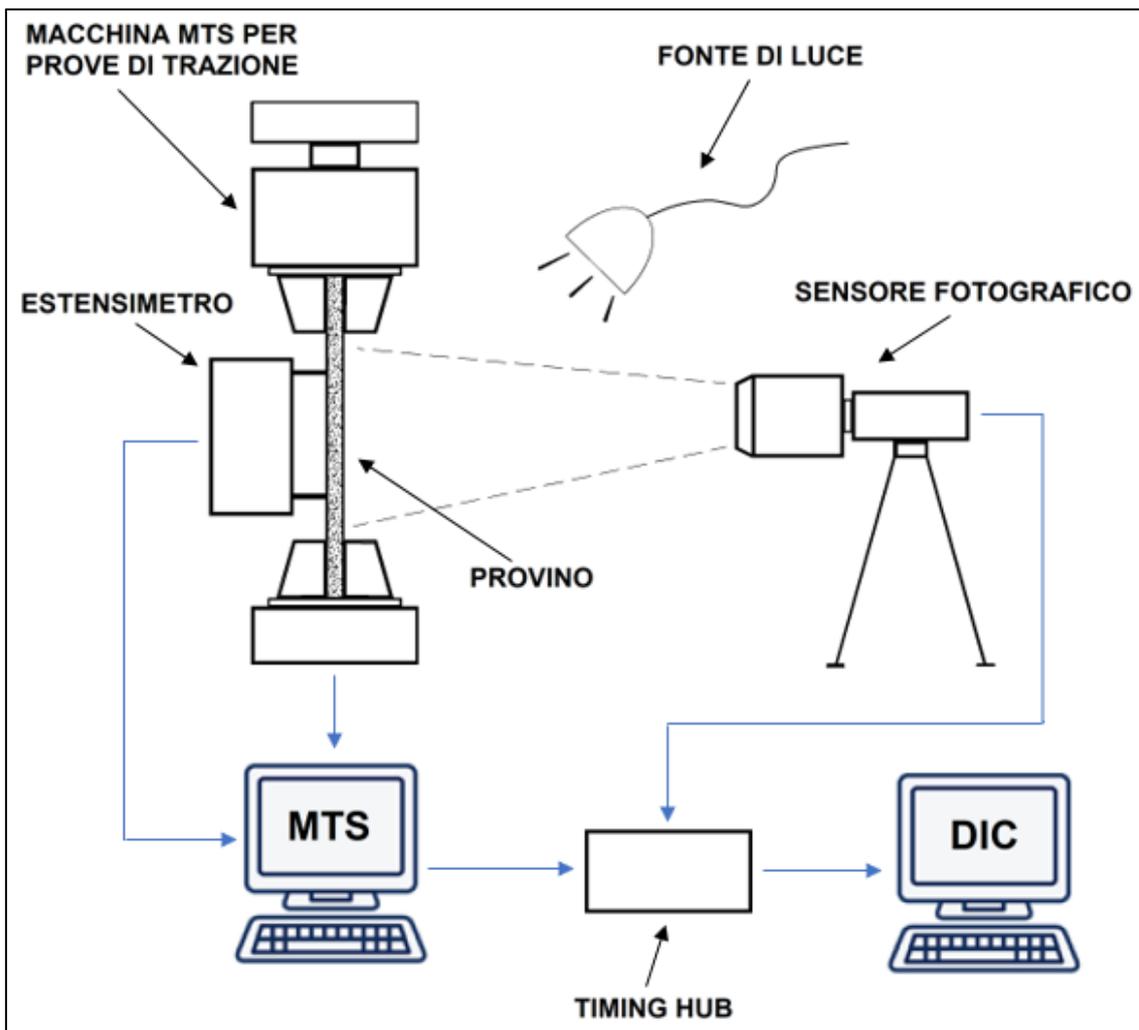


Figura 8: Setup del sistema utilizzato per studiare le prove di trazione della lega d'alluminio 8090-T851 con la correlazione d'immagini digitali.

Gli strumenti e l'attrezzatura utilizzati per la correlazione d'immagini digitali, sono prodotti dalla Dantec Dynamics e Limesh per quanto riguarda sia la parte hardware che software. La macchina di trazione MTS è stata utilizzata per eseguire tutte le prove di trazione condotte in questo studio; essa è controllata da un computer, da qui in avanti indicato come "computer MTS". I provini vengono montati e afferrati dalle teste di afferraggio e disposti in maniera tale da avere la superficie ricoperta dal pattern verso il sensore fotografico. La testa di afferraggio superiore del provino è vincolata alla cella di carico fissa della macchina e rimane ferma, mentre la testa inferiore del provino è vincolata al pistone mobile della macchina, che si muoverà unicamente verso il basso, dato che in questi casi deve effettuare delle prove di trazione uniassiale. Il sensore fotografico è di tipo CCD (Charge Couple Device) e viene utilizzato di questo tipo, perché in questo modo si riesce ad attenuare il rumore di fondo nelle immagini acquisite. Il sensore è attaccato alla scheda di acquisizione Limesh, e il tutto viene posizionato su un supporto treppiede davanti al provino ad una distanza di circa 30 cm. La scheda di acquisizione viene collegata poi al Timing Hub e al computer DIC. Il Timing Hub è un dispositivo che funge da interfaccia tra il computer che controlla la macchina MTS e il computer DIC; il suo compito è quello di sincronizzare i dati provenienti dal computer MTS con quelli registrati dalla scheda di acquisizione del sensore fotografico e inviarli al computer DIC. Per misurare la deformazione lungo l'asse longitudinale alla direzione di applicazione del carico, lungo il tratto utile del provino, è stato usato un estensimetro della MTS, che viene attaccato sulla parte posteriore del provino, in modo da non interferire con l'acquisizione delle immagini. I valori di deformazione misurati dall'estensimetro vengono poi inviati al computer MTS, il quale invia al Timing Hub, i valori di carico applicati durante la prova di trazione dalla macchina MTS e i valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Infine, il Timing Hub è collegato al computer DIC, il quale riceverà sia i valori di carico e deformazione provenienti dal computer MTS, sia le immagini inviate dalla scheda di acquisizione del sensore fotografico.

Una volta collegata tutta l'attrezzatura e dopo aver ricoperto la superficie del campione col pattern stocastico e aver effettuato le operazioni di setup e calibrazione, è possibile effettuare la prova di trazione e fare la correlazione d'immagini digitali. Prima di iniziare la prova, è possibile modificare la regione d'interesse (ROI) sul computer del DIC, in modo da riprendere solamente la zona della superficie del provino interessata. In questo modo diminuendo l'area d'interesse è possibile aumentare la frequenza di acquisizione delle immagini. Un fatto importante che è bene tenere a mente è che il software DIC non fa molta distinzione tra un provino piccolo che viene ripreso da vicino e un provino più grande che viene ripreso da più lontano, perché per il programma per la superficie che viene acquisita, sottoforma di fotogrammi, durante il processo di acquisizione delle immagini, contano solo i pixel che vengono ripresi e che costituiscono le immagini. Il software Istra-4D, che si trova sul computer DIC, si occupa di gestire le operazioni di setup, calibrazione, calcolo e analisi, fornendo alla fine della correlazione i risultati delle immagini finali. Alla fine della prova di trazione, dalle acquisizioni DIC verranno poi calcolati i valori di spostamenti e deformazioni che verranno poi confrontati con i valori deformazione misurati dall'estensimetro, in modo tale da stabilire il grado di accuratezza nel calcolo delle deformazioni da parte della correlazione d'immagini digitali, calcolandone l'errore di misurazione e tracciando dei grafici qualitativi che ne mostrino l'andamento, usando come riferimento i valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Invece, i grafici di tensione – deformazione verranno realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS; dopo aver appurato il grado di precisione della correlazione d'immagini digitali sarà possibile utilizzare i valori di deformazione calcolate tramite DIC.



Figura 9: Configurazione del sensore fotografico per DIC nelle prove di trazione uniassiale.



Figura 10: Estensimetro MTS per il calcolo delle deformazioni.



Figura 11: Sensore fotografico CCD e scheda d'acquisizione Limes.



Figura 12: Interfaccia Timing Hub.

## 2.7 Il pattern

Per poter condurre la correlazione d'immagini digitali sulla superficie del provino, è necessario realizzare su di essa un pattern. Dopo la calibrazione abbiamo proceduto alla verniciatura del provino, realizzando un pattern stocastico utilizzando delle vernici spray di colore bianco e nero di tipo opaco. Esistono diverse tecniche con le quali si possono realizzare i pattern sulla superficie dei provini, alcune delle quali sono molto facili e veloci da realizzare, economiche, flessibili e non richiedono attrezzature particolari. Inoltre, le tecniche di applicazione dei pattern ai provini possono essere utilizzate su provini di diversa forma e misura. Questo pattern puntinato può essere realizzato sia naturalmente, sia artificialmente utilizzando diverse tecniche tra le quali: adesivi in vinile, bombolette spray di vernice, pattern prestampati, applicazione di vernici con spazzole e pennelli. Il pattern realizzato sulla superficie del campione ricopre un'importanza fondamentale nel processo di correlazione d'immagini digitali. Questo perché il tipo e la dimensione del pattern utilizzato influenzano l'accuratezza dell'abbinamento tra i rispettivi subset in cui l'immagine di partenza e l'immagine del provino deformato, vengono suddivisi. Il pattern non deve essere né troppo fine, né troppo grossolano. Per questo motivo la qualità del pattern puntinato realizzato sul provino influenza direttamente il grado di errore nelle misurazioni del modello DIC. L'obiettivo è quello di realizzare un pattern stocastico, ovvero il più casuale possibile, che non presenti zone uguali ad altre, che teoricamente deve presentare una verniciatura per il 50% composta da bianco e per l'altro 50% composta da nero, in modo da avere un livello di grigio che conferisca una buona intensità di luminosità all'occhio del sensore fotografico. In seguito a numerosi tentativi, abbiamo potuto constatare che, per ottenere un pattern che non si screpoli durante la prova di trazione, è meglio dare una prima passata di vernice bianca, non troppo spessa, aspettare una decina di minuti e poi dare una leggera spruzzata di nero sopra il bianco, evitando di creare delle gocce troppo grosse di vernice nera.



*Figura 13: Nell'immagine vengono mostrati i diversi tentativi, fatti sui campioni di polietilene, per realizzare il pattern sulla superficie del campione.*

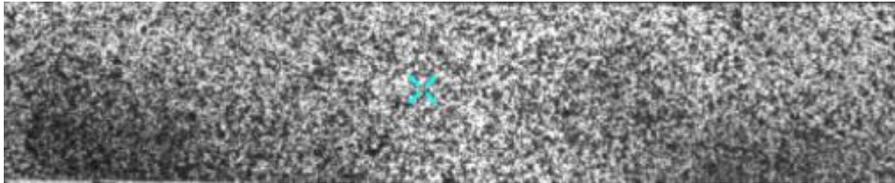


Figura 14: Esempio di pattern artificiale realizzato sulla superficie del campione, visibile durante le acquisizioni relative alla correlazione d'immagini digitali.

Per quanto riguarda le dimensioni dei punti che costituiscono il pattern, bisogna fare in modo che i punti neri su sfondo bianco abbiano un diametro compreso tra i 3 e i 5 pixel e che siano distribuiti sulla superficie bianca, in precedenza distribuita sulla superficie del provino, in modo da dare un fattore di ricoprimento compreso tra il 40% e il 70%. In questo modo si ottiene un aspetto del pattern che non risulta né troppo chiaro né troppo scuro. Quando si realizza il pattern sulla superficie del campione è molto importante non fare zone in cui si accumuli la vernice nera, ovvero macchie molto grandi di nero su bianco, altrimenti in quelle zone il software non sarà in grado di riconoscere i subsets e quindi si avranno delle perdite di informazioni nelle immagini, che risulteranno bucate. Questo perché, siccome il software Istra4D effettua i calcoli di spostamento non a livello dei sub-pixel, ma solo dei pixel interi è importante che la dimensione dei punti neri del pattern non sia inferiore alla dimensione dei pixel, di cui sono fatte le immagini digitali, altrimenti il software non sarà in grado di considerare gli spostamenti dei punti con dimensioni inferiori a quelle dei pixel. Allo stesso modo la dimensione dei punti non deve essere maggiore di quelle dei subsets di riferimento con cui è stata suddivisa la superficie del campione, ricoperta dal pattern. Da studi precedenti è stato dimostrato che la dimensione dei punti del pattern, insieme alla dimensione dei subsets che compongono la griglia con la quale viene idealmente suddivisa la superficie del campione, influenzano l'accuratezza della misurazione degli spostamenti.

## 2.8 La calibrazione

Ogni volta che si vogliono effettuare delle prove in cui si vuole usare la correlazione d'immagini digitali, bisogna effettuare la calibrazione del sistema e del sensore della camera. Una volta calibrato il sistema, se la posizione della camera non verrà cambiata, non sarà più necessario calibrare il sistema per le prove successive. Per la calibrazione abbiamo utilizzato il calibratore professionale con scacchiera 9x9 e quadrati di 2mm di lato della Dantec Dynamics, con scacchiera nera su sfondo bianco. In altri casi ho usato il calibratore con scacchiera 9x9 e quadrati da 4mm, perché bisogna scegliere il calibratore più opportuno a seconda della superficie del provino. La dimensione dell'area del calibratore scelto e la dimensione dell'area del provino devono avere delle dimensioni il più prossime possibile.



Figura 15: Calibratore con scacchiera 9x9 e quadrati da 2mm della Dantec Dynamics.

Durante la calibrazione sono stati settati i parametri relativi allo zoom, alla messa a fuoco dell'obiettivo e la distanza focale del sensore fotografico dalla superficie del provino, i quali determinano le dimensioni delle immagini del provino ripresi dalla videocamera. Inoltre, abbiamo settato i parametri di gain, shutter time e apertura focale dell'obiettivo, che vengono influenzati e che riguardano le condizioni di illuminazione dell'area che viene ripresa dalla videocamera. Questo perché il laboratorio, in cui sono state effettuate tutti gli esperimenti, presenta sul lato destro un'ampia finestra che lascia filtrare la luce naturale. Quindi a seconda dell'illuminazione esterna, si avrà un'area d'interesse più o meno illuminata. Per le prime prove preliminari, abbiamo deciso di lasciare accese soltanto le luci presenti sul soffitto della stanza, come fonte di luce artificiale. In alternativa, nelle prove successive abbiamo utilizzato anche come fonte di luce artificiale delle lampade alogene. Le condizioni di luminosità vanno settate in base alla tipologia di provini utilizzati, facendo diversi tentativi finché non si trovano le condizioni ottimali. Questi parametri vanno impostati opportunamente, ogni volta che si effettua una calibrazione, in base alle condizioni di illuminazione ambientale. Per quanto riguarda l'orientazione della camera rispetto al provino, viene settata la posizione relativa del sensore fotografico e la sua rotazione nelle tre dimensioni, in questo modo viene definita il sistema di riferimento in coordinate  $x$ ,  $y$  e la distanza del sensore dal provino, coordinata  $z$ . Bisogna poi regolare lo zoom e l'apertura focale dell'obiettivo per mettere a fuoco il calibratore, in modo da ottenere un'immagine con un'ottima nitidezza e un buon contrasto. In questo modo si riescono ad ottenere dei buoni livelli di grigio nelle immagini, tra un pixel e l'altro, e questo renderà ben visibile e definito il pattern.

Dopo aver settato questi parametri, abbiamo iniziato il processo di calibrazione. All'inizio della calibrazione il software deve essere in grado di riconoscere gli spigoli dei quadrati della scacchiera e in caso positivo questi verranno cerchiati in verde; inoltre in questa fase viene definito il sistema di riferimento della camera, quando il software determina l'orientazione a schermo si vedrà una freccia blu che indica la direzione dell'asse  $x$  nel sistema di riferimento della calibrazione. La direzione  $y$  sarà quella ad essa perpendicolare verso l'alto, secondo la regola della mano destra. Quando la maggior parte degli spigoli vengono cerchiati in verde significa che il software ha riconosciuto il calibratore e che la configurazione del sistema e i parametri della camera impostati sono corretti. A questo punto si fa partire la calibrazione e alla sua conclusione la si può ritenere buona quando alla fine si ottiene un valore di residuum compreso tra 0,3 e 0,5, ottima se il residuum scende sotto lo 0,3. Il residuum indica l'incertezza media dei marker trovati nell'unità di pixels; si tratta di un parametro che indica la qualità dei parametri che vengono calcolati e impostati durante il processo di calibrazione. In molti casi è stato ottenuto un valore di residuum compreso tra 0,28 e 0,30 utilizzando un'apertura focale dell'obiettivo pari a 5.6 e una distanza del sensore fotografico dalla superficie dei provini intorno ai 30-40 cm a seconda dei provini utilizzati. È importante fare un buon settaggio dei parametri sopra citati, affinché durante la calibrazione vengano riconosciuti tutti i nodi della scacchiera del calibratore utilizzato.

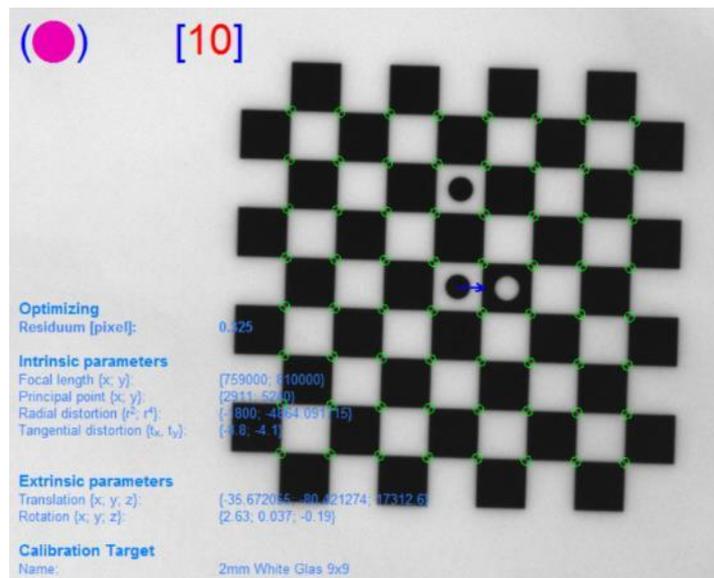


Figura 16: Immagine relativa al processo di calibrazione. I nodi dei quadrati della scacchiera vengono cerchiati in verde, quando il software riconosce il calibratore e determina il sistema di riferimento.

### 3 Prova di trazione – curva reale e curva ingegneristica

Quando si sottopone un campione ad una prova di trazione uniassiale, si possono ottenere due andamenti differenti della curva – tensione deformazione a seconda dei valori di tensione e deformazione che si considerano. Per spiegare le differenze tra le due curve si farà riferimento alla notazione riportata nella figura sottostante:

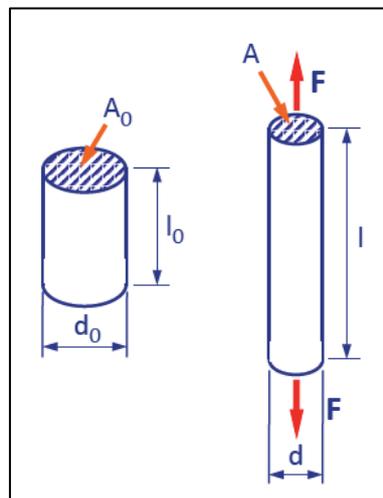


Figura 17: Caratteristiche iniziali e istantanee del provino [8].

Di seguito si elencano le caratteristiche del campione:

- $F$  = carico applicato
- $l_0$  = lunghezza iniziale
- $d_0$  = diametro iniziale
- $A_0$  = sezione iniziale, normale alla direzione di applicazione del carico
- $A$  = sezione istantanea, normale alla direzione di applicazione del carico
- $d$  = diametro istantaneo
- $l$  = lunghezza istantanea

Facendo riferimento alla notazione sopra riportata, si possono esprimere le espressioni delle tensioni e delle deformazioni. Per quanto riguarda la curva ingegneristica tensione – deformazione, si ha che le tensioni ( $S$ ) equivalgono al rapporto tra il carico applicato  $F$  e la sezione iniziale  $A_0$  del provino; mentre le deformazioni ( $e$ ) vengono espresse come il rapporto tra l’allungamento  $\Delta l$  e la lunghezza iniziale del provino:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Invece, per quanto riguarda la curva reale tensione – deformazione, si ha che le tensioni ( $\sigma$ ) equivalgono al rapporto tra il carico applicato  $F$  e la sezione istantanea  $A$  del provino. Mentre per quanto riguarda le deformazioni, partendo dalla deformazione infinitesima  $d\varepsilon$  espressa come il rapporto tra l’allungamento infinitesimo  $dl$  e la lunghezza istantanea  $l$ , si ottiene l’espressione della deformazione reale ( $\varepsilon$ ) che è uguale al logaritmo naturale del rapporto tra la lunghezza istantanea  $l$  e la lunghezza iniziale  $l_0$  del provino:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad d\varepsilon = \frac{dl}{l} \Rightarrow \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

Finché il provino si trova in campo di deformazione elastica e quindi, finché le deformazioni rimangono relativamente piccole, è possibile considerare il corpo deformato come se fosse ancora nella sua configurazione geometrica iniziale, prima della deformazione. Considerando che, la lunghezza istantanea è pari alla lunghezza iniziale  $l_0$  più il contributo relativo all’allungamento subito  $\Delta l$  e avendo posto che il volume del materiale deve rimanere invariato durante la deformazione:

$$l = l_0 + \Delta l \quad A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$$

In questo modo si possono ottenere le espressioni che legano le grandezze reali di tensione e deformazione, con le grandezze ingegneristiche:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot l}{A_0 \cdot l_0} = S \cdot \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = S \cdot (1 + e)$$

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln (1 + e)$$

Una caratteristica delle due curve di tensione – deformazione è che per piccoli valori di deformazione gli andamenti della curva sono gli stessi.

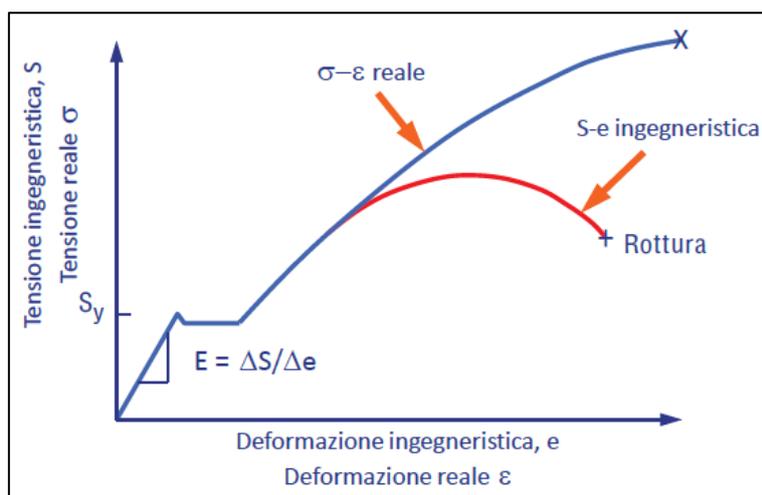


Figura 18: Confronto tra curva tensione – deformazione ingegneristica e reale [8].

Per quanto riguarda i grafici rappresentanti le curve di tensione – deformazione riportate nel seguito di questa trattazione, si tratterà sempre di curve di trazione di tipo ingegneristico.

## 4 Effetto di Portevin-Le Chatelier

### 4.1 Introduzione

L'effetto di Portevin-Le Chatelier (PLC) è un fenomeno di instabilità che si verifica durante la deformazione plastica di un metallo o di una lega metallica. I fattori esterni che influiscono maggiormente sull'effetto PLC sono la deformazione  $\varepsilon$ , la velocità di deformazione  $\dot{\varepsilon}$  e la temperatura  $T$  alle quali viene sottoposto il materiale durante la prova di trazione. L'effetto PLC è visibile solo in certi range di velocità di deformazione e temperatura, per questo motivo, variando questi due parametri, variano le tipologie di instabilità che si possono osservare. La stabilità della deformazione plastica dipende anche dalla rigidità della macchina di prova che viene utilizzata e dalla rugosità superficiale dei campioni utilizzati. Altri fattori, che influenzano l'effetto Portevin-Le Chatelier, sono la composizione e la morfologia della microstruttura della lega, la densità delle dislocazioni e la dimensione dei grani. Le dislocazioni, altro non sono che difetti lineari presenti della struttura cristallina dei metalli. La temperatura influisce sull'effetto PLC incrementando soprattutto la velocità e la capacità di diffusione degli atomi di soluto; questo perché la temperatura, quindi il calore, rappresenta una fonte di energia per il loro movimento nel materiale. Mentre, per quanto riguarda la velocità di deformazione, si ha che questa influisce sul tempo che le dislocazioni impiegano ad attraversare i precipitati e a disancorarsi dagli atomi di soluto. Anche la velocità di propagazione delle bande plastiche è legata alla temperatura. Solitamente a basse temperature, corrispondono basse velocità di propagazione; mentre ad alte temperature, corrispondono alte velocità di propagazione. L'andamento del flusso della deformazione plastica è fortemente influenzato dalle dimensioni e dalla finitura superficiale del provino analizzato. Altri fattori che influenzano la deformazione plastica sono: la composizione della lega, la microstruttura, la densità delle dislocazioni e le dimensioni dei grani. Quando si sottopone un materiale metallico ad una deformazione plastica, se si tratta di un materiale duttile, la deformazione plastica avviene per via del movimento e dell'aumento del numero delle dislocazioni, il materiale si dice che incrudisce e la sua resistenza alla deformazione plastica aumenta col carico.

Considerando il comportamento dei materiali duttili, il movimento delle dislocazioni avviene per scorrimento lungo i piani di scorrimento e lungo definite direzioni cristallografiche, dette direzioni di scorrimento, che appartengono ai piani di scorrimento. Quando si analizza il comportamento di un componente, soggetto ad una prova di trazione, in un grafico tensione – deformazione, queste instabilità plastiche si manifestano come deformazioni localizzate. Solitamente queste deformazioni plastiche localizzate possono essere associate ad una nucleazione repentina delle dislocazioni e ad una loro successiva moltiplicazione. L’origine dell’effetto PLC può essere ricondotta al cosiddetto “*Dynamic strain aging*”, un meccanismo microscopico che induce l’effetto PLC e che consiste in un’interazione dinamica tra le dislocazioni in movimento e gli atomi di soluto o i precipitati presenti nella lega, in questo modo il movimento delle dislocazioni viene ostacolato e si avrà un flusso di deformazione plastica instabile quando le dislocazioni si disancorano. Quando si hanno dei cambiamenti repentini nella deformazione plastica che si originano dalla nucleazione o dalla propagazione delle dislocazioni, si ha che il materiale può emettere delle onde acustiche più o meno intense. Solitamente le dislocazioni devono muoversi ad una velocità sufficientemente elevata per poter emettere delle onde sonore e quest’ultime sono una misura della propagazione e dell’avanzamento della dislocazione, che sono legate al concetto di cedimento del provino. Per questo motivo, il rumore emesso dal campione, sottoposto a trazione, può essere considerato come un indizio riguardante il fatto che il provino è vicino al punto di rottura.

Se si prende un provino per una prova di trazione, lo si tratta superficialmente, levigandolo con una carta abrasiva molto fine per rimuovere le irregolarità superficiali e ottenere così una superficie il più regolare possibile e poi lo si sottopone ad una prova di trazione uniassiale, si potrà vedere che man mano che la deformazione plastica progredisce, quest’ultima tenderà a raggrupparsi sottoforma di bande che si muoveranno attraverso il provino in diversi modi, a seconda della tipologia e di come si sviluppa l’effetto PLC. Questo fenomeno sarà riconoscibile, sulla superficie del provino, quando si formeranno delle linee con un orientamento regolare. Si tratta di linee di scorrimento, ognuna delle quali sarà la traccia lasciata dalla fuoriuscita di una o più dislocazioni che si sono mosse su un certo piano di scorrimento. Quando queste linee di scorrimento si uniscono tra loro si ottiene una banda di scorrimento. Le bande di scorrimento più grandi possono anche essere visibili ad occhio nudo sulla superficie del provino.

L’effetto PLC quando si verifica oltre a causare un decadimento delle proprietà strutturali del materiale, provoca anche un peggioramento della finitura e della rugosità superficiale del componente.

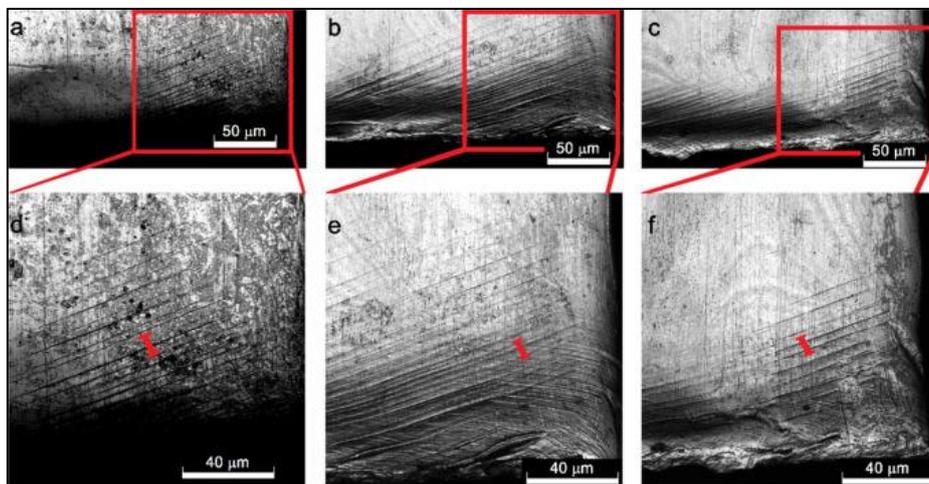


Figura 19: Esempio di bande di scorrimento visibili sulla superficie di un provino in seguito a deformazione plastica [9].

## 4.2 Jerky flow nel grafico tensione – deformazione

Se si traccia il grafico tensione – deformazione ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) di un provino soggetto ad una prova di trazione uniassiale in controllo di deformazione, dove la velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}$  è mantenuta costante, si potrà osservare, nella curva nei tratti in deformazione plastica nei quali si manifesta l'effetto di Portevin-Le Chatelier, un andamento seghettato con frequenza e ampiezza caratteristiche. Questo comportamento è dovuto al fatto che la deformazione plastica, in questi punti, si propaga in maniera instabile e non omogenea. Infatti, quando il moto delle dislocazioni, durante la deformazione plastica, avviene senza particolari interruzioni, la curva nel grafico tensione - deformazione presenta un andamento continuo a tratti senza particolari discontinuità. Mentre quando il movimento delle dislocazioni viene ostacolato, ad esempio da atomi di soluto, precipitati o altre foreste di dislocazioni presenti all'interno della lega, la dislocazione si arresta temporaneamente sull'ostacolo e poi riprende il suo movimento. È proprio in questi punti che si ha la formazione delle bande plastiche, perché in questi punti le dislocazioni si accumulano e impilano le une sulle altre, in corrispondenza di un difetto o di un precipitato. Nel momento in cui queste si disancorano, dato che la deformazione è costante, si verifica una caduta istantanea del carico. Sul grafico tensione – deformazione, questo susseguirsi di ancoraggi e disancoraggi delle dislocazioni, appare come un andamento irregolare, discontinuo e seghettato, chiamato anche jerky flow.

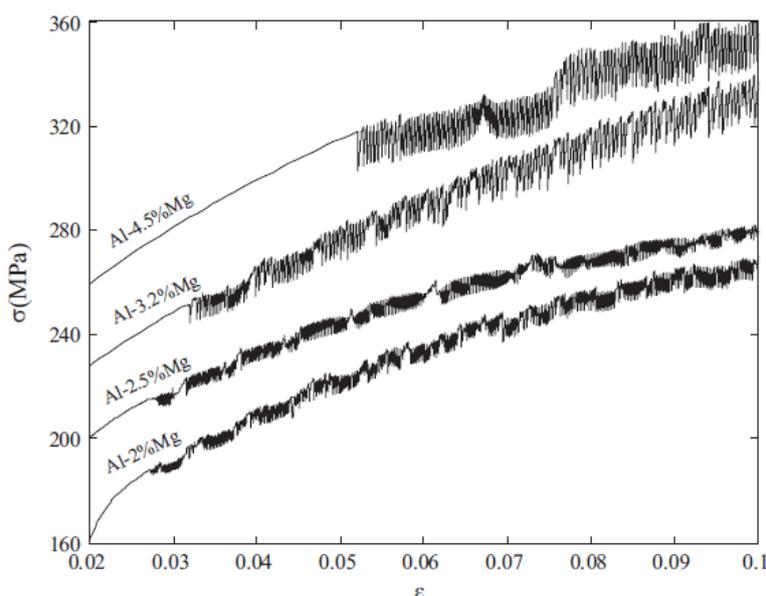


Figura 20: Curva tensione – deformazione che mostra l'andamento seghettato tipico dell'effetto PLC, in diverse leghe Al-Mg a temperatura ambiente [10].

I tratti in cui la curva tensione – deformazione presenta un andamento seghettato, rappresentano le sezioni del provino in cui la deformazione plastica è più localizzata. Questo fa sì che al crescere della deformazione complessiva a cui sottoposto il componente, la deformazione plastica in queste zone crescerà a sua volta, fino a raggiungere dei livelli di deformazione localizzati molto più elevati rispetto alla deformazione complessiva. Sarà proprio in queste zone che si potrà raggiungere il collasso del provino.

## 4.3 Tipologie di bande plastiche di scorrimento

In molte leghe metalliche di tipo duttile, come acciai e leghe d'alluminio, quando vengono sottoposte a certi range di deformazione plastica e temperatura, se si traccia un grafico tensione-

deformazione si può osservare un comportamento plastico instabile, l'effetto Portevin-Le Chatelier, che è caratterizzato da un andamento seghettato, il cui aspetto dipende dalla tipologia di bande plastiche che si manifestano. Esistono diverse tipologie di bande plastiche e comunemente vengono distinte in tre categorie: bande di tipo A, bande di tipo B e bande di tipo C. Esse si distinguono principalmente per l'ampiezza e la frequenza dell'oscillazione e per il diverso modo di propagazione. Inoltre, i diversi tipi di andamenti seghettati si sviluppano in diversi range di velocità di deformazione e di temperatura, per questo si può avere il passaggio da un tipo di banda all'altra a seconda del punto in cui ci troviamo del grafico tensione – deformazione.

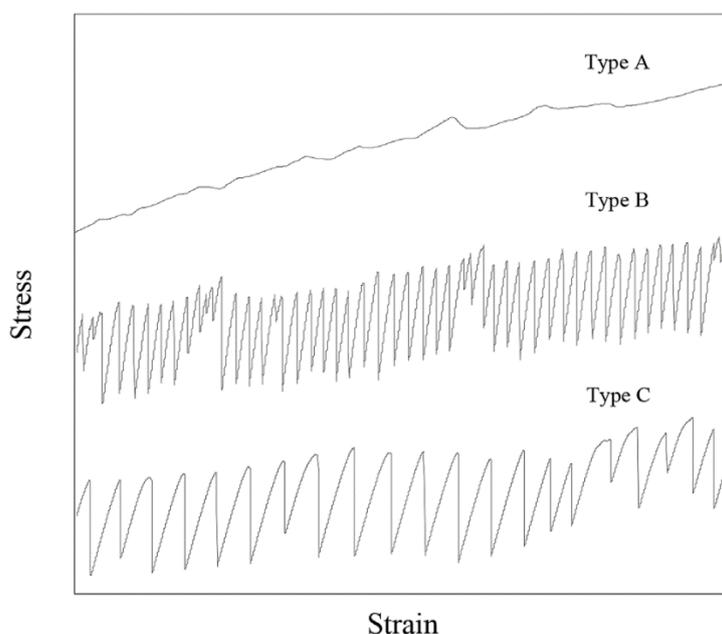


Figura 21: Tipologie di bande plastiche di scorrimento caratteristiche dell'effetto PLC nel grafico tensione – deformazione [11].

- **Tipo A**

Le bande plastiche di tipo A solitamente si formano, quando il materiale è sottoposto ad alte velocità di deformazione e basse temperature. Tra tutte e tre le categorie di bande, queste sono quelle che presentano l'andamento seghettato più irregolare, con delle cadute di tensione piccole e localizzate lungo la curva tensione – deformazione. Le bande di tipo A vengono suddivise in due sottocategorie, in base alla velocità con cui si verifica la caduta di tensione, bande di tipo A1 quando la caduta di tensione è più repentina, bande di tipo A2 quando la caduta di tensione è più graduale. Attraverso degli studi condotti tramite l'analisi termografica, si è potuto vedere che, questa tipologia di bande tende a nucleare ad un estremo della lunghezza utile del provino, solitamente l'estremità fissa del provino, per poi propagare verso l'estremità mobile del provino, finché non si verifica la formazione di una banda stazionaria. Per questo motivo, il tipo A viene associato ad una propagazione continua e lineare della banda di deformazione plastica lungo la lunghezza del provino. Lungo il loro movimento di propagazione, le bande possono incontrare dei precipitati, che oppongono una certa resistenza alla propagazione della banda. Questo momentaneo arresto del moto della banda, nel grafico tensione – deformazione, si traduce in piccolo salto di tensione seguito da una caduta di tensione, che genera così l'andamento seghettato tipico delle bande di tipo A. Con la propagazione delle bande di tipo

A, la temperatura media della superficie del campione tende ad aumentare con la deformazione.

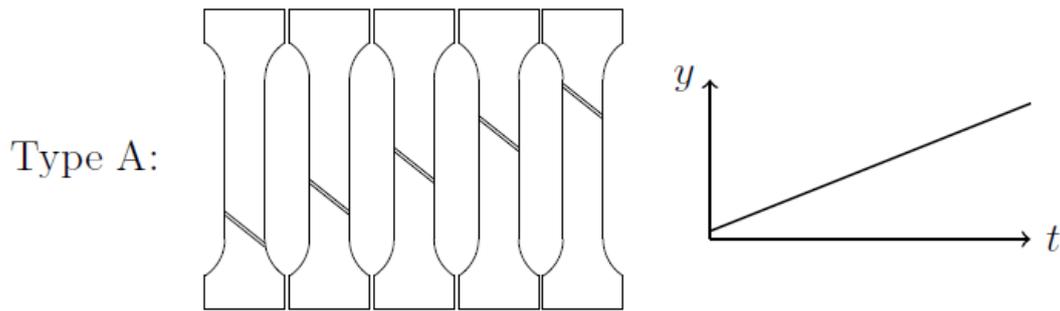


Figura 22: Rappresentazione schematica dell'andamento lineare relativo alla propagazione delle bande di tipo A lungo la lunghezza utile del provino, dove  $y$  è la coordinata che indica lo spostamento longitudinale lungo la lunghezza del provino [12].

- **Tipo B**

Le bande plastiche di tipo B solitamente si formano dopo che si sono sviluppate le oscillazioni del tipo A, oppure quando il materiale è sottoposto a valori intermedi di velocità di deformazione e temperatura. In alcuni casi, negli stadi iniziale dell'effetto PLC è possibile osservare delle multibande, aggregati di due o più bande, che nucleano simultaneamente o durante la propagazione di un'altra banda. Rispetto al tipo A, l'andamento seghettato è più regolare, le cadute di tensione sono maggiori e presentano una frequenza e un'ampiezza di oscillazione più regolare rispetto alle bande di tipo A. Solitamente l'andamento seghettato di tipo B viene associato con l'alternanza della deformazione elastica a cui è sottoposto l'intero provino e con la rapida deformazione plastica localizzata durante la caduta di carico. Le bande di tipo B hanno una nucleazione casuale lungo la lunghezza utile del provino e la loro propagazione è discontinua e saltellante lungo la direzione di applicazione del carico al provino e continua attraverso il provino finché la deformazione non si localizza e si verifica la formazione di una banda stazionaria. Successivamente la deformazione continua in questa banda stazionaria di taglio che porta ad una diminuzione della sezione del provino e infine al collasso. Attraverso degli studi condotti tramite l'analisi termografica, si è potuto constatare che, questa tipologia di bande tende a nucleare in un tempo molto breve, inferiore ai 10 ms e, successivamente, propaga lungo lo spessore del provino ad una velocità di 3600 mm/s. In questo caso il cambiamento nell'inclinazione della banda, nel grafico tensione – deformazione, produce un grosso calo della sollecitazione seguito successivamente da una risalita, dovuto all'andamento saltellante lungo il campione, che genera così l'andamento seghettato tipico delle bande di tipo B.

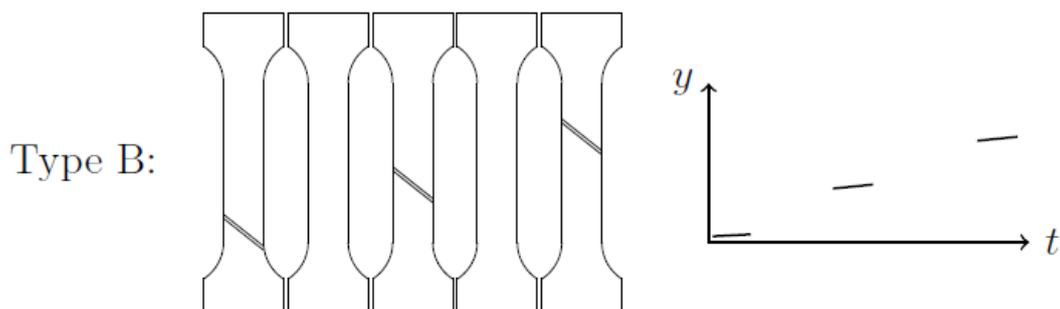


Figura 23: Rappresentazione schematica della nucleazione casuale e dell'andamento discontinuo e saltellante relativo alla propagazione delle bande di tipo B lungo la lunghezza utile del provino [12].

- **Tipo C:**

Le bande plastiche di tipo C solitamente si formano quando il materiale è sottoposto a bassi valori di velocità di deformazione e alte temperature. Rispetto ai tipi A e B, è molto facile osservare delle multibande. L'andamento seghettato di questa tipologia di bande presenta dei valori, di frequenza e ampiezza di oscillazione, elevati e approssimativamente costanti; per questi motivi è molto regolare e presenta dei salti regolari di tensione, che possono essere associati al fatto che bande plastiche nucleano in maniera casuale lungo il provino senza mostrare alcun tipo di propagazione e che producono delle deformazioni plastiche localizzate accompagnate da consistenti cadute di carico. Questo significa che, per questa tipologia di bande, a ciascuna caduta di tensione visibile nella curva tensione – deformazione, corrisponde la formazione di una banda.

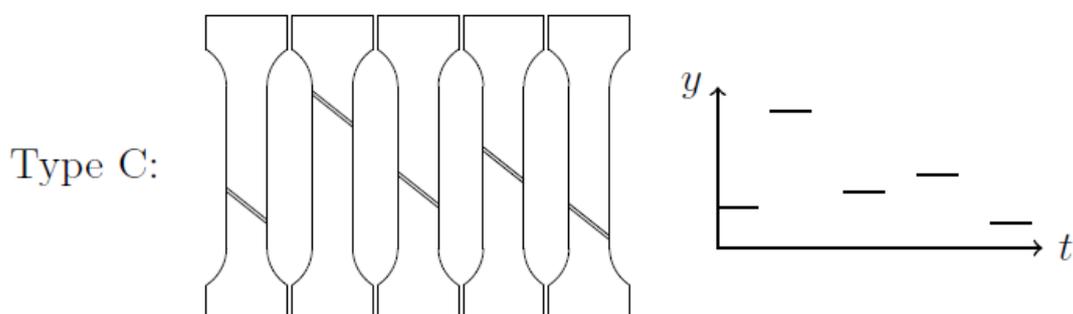


Figura 24: Rappresentazione schematica della nucleazione casuale delle bande di tipo C lungo la lunghezza utile del provino [12].

#### 4.4 Caratteristiche delle bande plastiche di scorrimento

Le bande plastiche di scorrimento, oltre che per la tipologia di classe di appartenenza della banda (A, B o C), possono essere suddivise secondo una serie di parametri caratterizzanti, quali: l'angolo di banda, la larghezza, la velocità di propagazione e la deformazione localizzata a livello della banda. Anche le dimensioni dei provini sottoposti a prova di trazione rappresentano una variabile importante, in quanto generano un effetto di scala sulla dimensione, il numero e la tipologia delle bande plastiche che andranno a formarsi. Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche dei parametri caratterizzanti le bande plastiche elencati in precedenza:

- Angolo di banda: solitamente gli angoli di banda vengono riferiti all'asse longitudinale del provino, asse di applicazione del carico durante le prove di trazione uniassiale. Seguendo questa convenzione, facendo riferimento ai risultati di studi

precedenti, è stato calcolato con precisione che gli angoli di banda presentano degli angoli che variano in un range compreso tra  $70^{\circ}$ - $50^{\circ}$ , il che è in accordo con il valore teorico di  $60^{\circ}$ , che viene attribuito agli angoli di banda.

- **Larghezza:** la larghezza delle bande plastiche, che si sviluppano durante l'effetto PLC, è un parametro che dipende fortemente da altre caratteristiche secondarie come lo spessore del provino, la velocità di deformazione e anche dalla tipologia di banda. Facendo riferimento allo spessore del campione, solitamente la larghezza di banda può variare in range che va da metà dello spessore del provino fino al doppio dello spessore del provino. Inoltre, la larghezza di banda presenta una relazione, prossima alla linearità, con lo spessore del provino.
- **Velocità di propagazione:** questo è un parametro che viene considerato, soprattutto quando si parla di velocità di propagazione delle bande plastiche di tipo A lungo il provino. In relazione alla velocità di deformazione, si ha una diminuzione della velocità di propagazione della banda plastica nel provino, al crescere della velocità di deformazione. Solitamente le bande plastiche di tipo A presentano una velocità di propagazione costante, con valori che variano in un range che va da pochi mm/s a velocità dell'ordine dei 100 mm/s.
- **Deformazione localizzata:** facendo riferimento a i risultati ottenuti nelle prove di trazione, presentate nel seguito di questa trattazione, si è visto che la deformazione localizzata a livello della banda plastica può andare da pochi punti percentuale in più rispetto alla deformazione totale subita dal provino, fino a valori pari a tre volte la grandezza della deformazione plastica totale subita dal provino. Per le bande plastiche di tipo A, che propagano lungo il provino ad una certa velocità di propagazione praticamente costante, è stato misurato che la deformazione localizzata nella banda plastica superava il valore di deformazione totale del provino, di 2 o 3 punti percentuali. Ad esempio, se il provino all'istante di rottura si trovava al 7% di deformazione, a livello della banda la deformazione localizzata era intorno al 9%-10%. Invece, per le bande plastiche di tipo C, che nucleano nel provino e poi rimangono stazionarie, è stato misurato che la deformazione localizzata nella banda plastica era di 2 o 3 volte il valore di deformazione totale del provino. Ad esempio, se il provino all'istante di rottura si trovava intorno all'8% di deformazione, a livello della banda la deformazione localizzata era intorno al 25%-30%.

#### **4.5 Esempio di effetto PLC in una lega d'alluminio Al-Li-Cu-Mg (8090-T851)**

All'interno dello studio condotto da R. Doglione, P. Haghi Ashtiani e C. Berdin, intitolato "*Rolling Effect on Serrated Flow in an Al-Li-Cu-Mg Alloy Plate*" [13] viene mostrato un esempio dell'andamento seghettato della curva tensione – deformazione e delle tipologie di bande riscontrate in trazione che analizza una serie di provini ricavati da una lastra di 12 mm di lega d'alluminio commerciale Al-Li-Cu-Mg del tipo 8090-T851 che presenta una tessitura cristallografica differente tra la superficie e il cuore.

La lastra di lega d'alluminio 8090 presenta la seguente composizione in massa: circa il 95% Al, 2.38% Li, 1.39% Cu, 0.74% Mg, 0.21% Fe, 0.13% Si e 0.12% Zr. Il trattamento termico

subito dalla lastra viene indicato con la sigla T851 e sta a significare che la lastra è stata sottoposta ad un processo di solubilizzazione per un tempo di 2 ore a 535°C, dopo di che è stata temprata in acqua, successivamente la piastra ha subito una deformazione plastica pari al 3% e in fine è stata sottoposta ad un invecchiamento artificiale per un tempo di 16 ore ad una temperatura di 190°C. viene applicata una deformazione plastica dopo tempra, perché in questo modo si provoca la formazione delle dislocazioni all'interno dei grani, e queste si comporteranno da siti di nucleazione per i precipitati che si formeranno durante il processo d'invecchiamento artificiale che verrà effettuato dopo [14]. In questo modo si provoca una nucleazione dei precipitati transgranulare, che evita la formazione dei precipitati a bordo di grano [15]. Dopo tutti questi trattamenti la lega alla fine ha raggiunto dei livelli di durezza e delle caratteristiche meccaniche, in termini di resistenza, più elevate. I campioni che verranno utilizzati per le prove di trazione presenti in questo studio sono stati ricavati da una lastra dello stesso tipo.

Elementi leganti	Li	Cu	Mg	Fe	Si	Zr
8090	2,38%	1,39%	0,74%	0,21%	0,13%	0,12%

Tabella 1: Composizione chimica percentuale in massa degli elementi leganti nella lega 8090.

Attraverso un'analisi metallografica è stato possibile vedere che era presente un gradiente nella tessitura cristallografica lungo lo spessore della piastra. Il trattamento di laminazione a caldo subito in origine dalla piastra, ha portato alla formazione di una tessitura cristallografica formata da grani impacchettati e molto allungati a forma di parallelepipedo, lungo la direzione di laminazione. Il trattamento di solubilizzazione ha lasciato la microstruttura invariata a livello del cuore della piastra, mentre negli strati superficiali, ha provocato una parziale ricristallizzazione, che ha portato ad ottenere una microstruttura mista composta per la maggior parte piccoli cristalli equiassici ricristallizzati con un diametro prossimo a 8  $\mu\text{m}$ , e alcuni cristalli più grandi impacchettati e allungati non ricristallizzati. La microstruttura della piastra a livello del cuore risulta anisotropa, presentando dei grani non ricristallizzati, allungati lungo la direzione di laminazione della piastra con una forma simil parallelepipedo con lunghezze prossime al millimetro, dimensioni pari a 350  $\mu\text{m}$  in direzione del traverso lungo e dimensioni pari a 40  $\mu\text{m}$  in direzione del traverso corto. Al loro interno, questi grani detti a pancake, dal modo in cui sono impacchettati, sono formati da sub-grani equiassici che hanno un diametro dell'ordine dei 10  $\mu\text{m}$ . Sulla superficie si è riscontrato un tipo di tessitura cristallina detta cubica [13], che tende progressivamente a scomparire, man mano che ci si sposta verso il centro della lastra, infatti al cuore della lastra il tipo di tessitura che si riscontra è detto brass [13]. Mentre negli strati intermedi, tra superficie e cuore, è presente una tessitura cristallografica con un'orientazione mista. [16] Facendo riferimento a studi pregressi, si è visto che la tessitura cubica ha un effetto di ammorbidimento, mentre la tessitura brass ha un effetto di indurimento del materiale.

Di seguito verranno distinti i provini ricavati in direzione longitudinale alla direzione di laminazione della lastra (RD), dai provini ricavati in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione della lastra (TD). Inoltre, si farà distinzione tra i provini ricavati dal cuore della lastra (C) e i provini ricavati dagli strati superficiali (S). I diversi provini presenteranno delle caratteristiche meccaniche differenti a seconda della posizione da cui sono stati ricavati. Questo perché, proprietà come la tenacità alla frattura e la duttilità, dipendono soprattutto da come sono orientati i cristalli e dalla microstruttura della lega. In questo studio sono state identificate tutte e tre le tipologie di bande plastiche. In particolare, le bande di tipo A e B sono state ottenute sullo strato superficiale, indipendentemente dalla direzione di applicazione del carico. L'unica differenza è che, lungo la direzione RD, la frequenza dell'andamento seghettato delle bande è

maggiore e quindi le bande saranno più fitte. Mentre per quando riguarda i provini ricavati dagli strati nel cuore della lastra, in essi l'andamento delle bande di tipo B e C è molto più accentuato e l'ampiezza della seghettatura aumenta maggiormente all'aumentare della deformazione in quelli ricavati in direzione TD, rispetto a quelli ricavati in direzione RD. Si tratta di cadute di tensione considerevoli che raggiungono valori anche di 50 MPa. Complessivamente dalle prove di trazione è stato possibile riscontrare la formazione delle bande di tipo B sulla superficie, bande di tipo B e C lungo la direzione RD a livello del cuore e bande di tipo A e C lungo la direzione TD a livello del cuore. Inoltre, si è visto che l'andamento seghettato è più intenso nei provini ricavati dal cuore della lastra, rispetto a quelli ricavati dalla superficie e che gli andamenti seghettati sono più intensi lungo la direzione RD, rispetto a quelli lungo la direzione TD.

Dalle prove di trazione condotte sui provini ricavati dalla superficie (S) e dal cuore (C) della lastra, lungo la direzione di laminazione (RD) e lungo la direzione trasversale alla direzione di laminazione (TD), sono stati ricavati i seguenti valori relativi a: limite elastico ( $R_{p02}$ ), resistenza a trazione ( $R_m$ ) e allungamento a rottura ( $A\%$ ):

	<b>RD-S</b>	<b>RD-C</b>	<b>TD-S</b>	<b>TD-C</b>
<b><math>R_{p02}</math> [MPa]</b>	430	520	440	500
<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	480	570	510	550
<b>A [%]</b>	5	4	8	4

Tabella 2: Valori di limite elastico ( $R_s$ ), resistenza a trazione ( $R_m$ ) e allungamento a rottura ( $A\%$ ) ricavati da  $n$  prove di trazione condotte sui diversi provini ricavati dalla lastra di 12 mm in questione [13].

In accordo, con quanto ci si poteva aspettare, è presente una moderata anisotropia nella resistenza dei campioni ricavati nelle diverse posizioni, lungo lo spessore della piastra. Dai dati ottenuti, si può vedere che i provini ricavati dal cuore della lastra hanno una resistenza maggiore, in termini di limite elastico e resistenza a trazione, rispetto ai provini ricavati dagli strati superficiali; tuttavia il cuore della lastra risulta più fragile.

Si è potuto inoltre constatare che l'effetto PLC e l'andamento seghettato dipendono dalla dimensione dei grani che compongono la microstruttura cristallografica del materiale e dalla posizione del provino rispetto alla piastra, se a cuore o in superficie. Per quanto riguarda l'anisotropia in termini di resistenza e di duttilità, si è potuto constatare che anche questa dipende dalla posizione del provino, se a livello del cuore o della superficie della lastra. Facendo riferimento alla figura sottostante, possiamo osservare che le cadute di tensione, che si verificano lungo la curva tensione-deformazione, rappresentano la formazione di una banda plastica, perché in questi punti le dislocazioni si accumulano e impilano le une sulle altre, in corrispondenza di un difetto o di un precipitato. Nel momento in cui queste si disancorano, dato che la deformazione è costante, si verifica una caduta del carico.

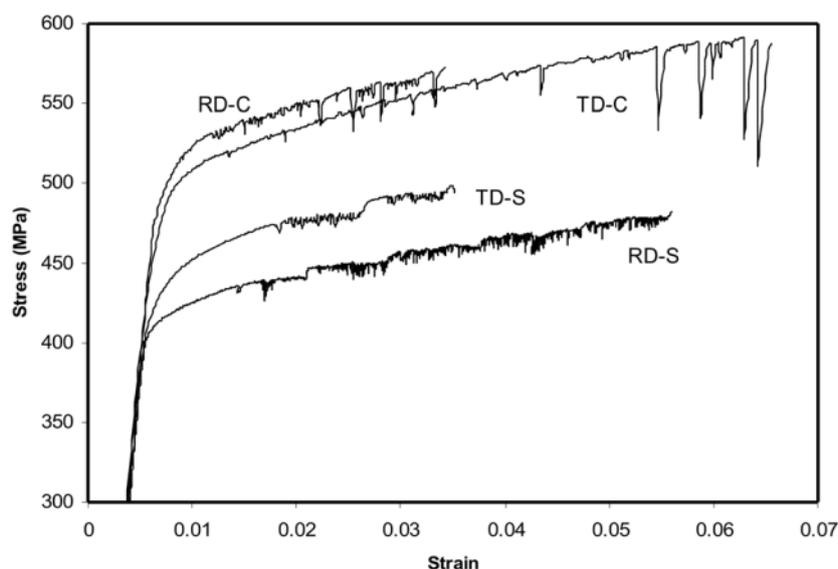


Figura 25: Curve tensione – deformazione per una lega d'alluminio 8090 che mostrano l'effetto PLC in quattro provini a seconda della direzione, longitudinale o trasversale rispetto alla direzione di laminazione, e della profondità nella lastra, superficie o cuore [13].

## 5 Lega Al-Li-Cu-Mg 8090-T851

### 5.1 Introduzione

La lega Al-Li 8090 è stata standardizzata dalla European Aluminum Association nel 1984. Fa parte delle leghe quaternarie Al-Li-Cu-Mg e la sua composizione chimica in massa, per quanto riguarda gli elementi leganti, è la seguente: 2.38% Li, 1.39% Cu, 0.74% Mg, 0.21% Fe, 0.13% Si e 0.12% Zr ed ha una densità di 2.54 g/cm<sup>3</sup>. Fa parte delle leghe alluminio-litio di seconda generazione che sono state sviluppate negli Stati Uniti e in Europa a partire dagli '70 fino alla fine degli anni '80; mentre nell'Unione Sovietica tra gli anni '80 e '90. Per la realizzazione delle leghe alluminio-litio di seconda generazione vennero usati due processi differenti:

1. il primo consisteva nell'utilizzare la metallurgia delle polveri: questo metodo presentava i vantaggi di avere delle ampie variazioni di composizione, delle elevate flessibilità in termini d'impiego delle strutture di produzione e differenti approcci di produzione, per esempio si potevano effettuare delle rapide solidificazioni. Questo metodo viene utilizzato per realizzare prodotti finiti con l'utilizzo di stampi;
2. il secondo consisteva nell'utilizzare la metallurgia dei lingotti: questo era il metodo più utilizzato, perché era più economico, permetteva di ottenere dei lingotti finali di grandi dimensioni.

Uno dei principali problemi che si incontrarono nello sviluppo delle leghe alluminio-litio fu quello legato ai costi di produzione. Questo includeva anche i costi legati alle industrie di fonderia che andava associato al fatto dell'elevata reattività che presentavano le leghe d'alluminio-litio, per questo motivo fu necessario studiare dei nuovi metodi di fabbricazione, attraverso i quali fosse possibile controllare la reazione del litio con l'atmosfera, durante le operazioni di fonderia. La reazione del fuso di alluminio-litio con l'ossigeno e con l'acqua contenuti nell'aria causava tutta una serie di problemi, come incendi ed esplosioni. Ad esempio, la rapida reazione che si verifica tra la superficie della lega fusa e l'aria dell'atmosfera genera la formazione e l'inclusione di pellicole di ossido, nitruri e carbonati dentro il fuso della lega. Si possono verificare anche reazioni tra il fuso della lega e gli attrezzi di fonderia come i crogioli e gli stampi.

Per questi motivi vennero usati dei flussi di gas inerti per coprire e proteggere la lega fusa durante le operazioni di fusione e di colata.

Lo sviluppo delle leghe alluminio-litio di seconda generazione, si era posto come obiettivo quello di ottenere delle leghe che fossero l'8 – 10% più leggere e rigide delle leghe d'alluminio convenzionali; l'elevata rigidità e la densità relativamente bassa furono gli aspetti più positivi che accompagnarono lo sviluppo di queste leghe. [15] Per far questo si vide che aggiungendo l'elemento legante Li alla lega, in percentuali in massa non superiori al 4%, per ogni punto percentuale di Li aggiunto, si otteneva una diminuzione del 3% della densità e un aumento del modulo elastico pari al 6%. Facendo riferimento alla famiglia di leghe della seconda generazione, l'8090 venne sviluppata per essere applicata in campo aeronautico, quando era necessario accompagnare le alte caratteristiche meccaniche richieste, con bassi valori di densità e alte rigidità. Sfortunatamente negli anni a venire, si scoprì che l'aggiunta di litio in percentuali pari al 2% o più comportava una serie di conseguenze e svantaggi. I punti deboli delle leghe alluminio-litio di seconda generazione includevano: una forte anisotropia legata alle caratteristiche meccaniche del materiale, una bassa duttilità in direzione del traverso corto, una tenacità alla frattura variabile. I precedenti difetti furono il motivo per il quale, lo sviluppo delle leghe alluminio-litio di terza generazione fu fatto riducendo il contenuto di litio, arrivando ad una percentuale in massa inferiore al 2%, aumentandone così la densità.

## 5.2 Caratteristiche meccaniche AA 8090

La lega 8090 fa parte delle leghe Al-Li di seconda generazione e al di là dei vantaggi riguardanti la bassa densità e l'elevata rigidità rispetto alle leghe d'alluminio classiche, queste sono caratterizzate dall'aver una tessitura cristallografica complessa e dall'anisotropia delle caratteristiche meccaniche, soprattutto per quanto riguarda il limite elastico, la duttilità e la tenacità alla frattura in lamine, lastre e prodotti ottenuti per estrusione. Si parla di anisotropia sia a livello dello stesso piano, sia attraverso lo spessore. L'anisotropia della deformazione plastica è da ricondurre principalmente alle differenze nella tessitura cristallografica, che provocano una localizzazione della deformazione plastica. Quando si parla di lastre, queste presentano un limite elastico del 10%-20% maggiore al centro, rispetto alla superficie. Queste differenze sono da ricondurre alla differente tessitura cristallografica presente. Per quanto riguarda l'anisotropia del limite elastico, le due cause che la influenzano maggiormente sono la tessitura cristallografica e il trattamento termico finale. Facendo riferimento agli elementi leganti, lo Zr viene utilizzato per affinare il grano nelle leghe quaternarie Al-Li, perché si è visto che la sua presenza è in grado di inibire il fenomeno della ricristallizzazione e la susseguente crescita del grano cristallino; la ricristallizzazione variabile all'interno dei manufatti prodotti mediante deformazione plastica è una delle cause principali dell'alto livello di anisotropia presente in questa lega. Passando all'anisotropia nella resistenza a trazione, si è visto che il livello di anisotropia del limite elastico è molto maggiore rispetto all'anisotropia alla resistenza a rottura. L'anisotropia relativa all'UTS è correlata al comportamento della deformazione plastica per le diverse direzioni in cui sono stati testati i campioni, rispetto alla direzione di laminazione. Per quanto riguarda l'anisotropia della duttilità in trazione, si è visto che questa presenta i valori minimi per i provini longitudinali e dei valori massimi per i provini che sono inclinati di 45°-60° rispetto alla direzione di laminazione. Complessivamente, l'anisotropia nella duttilità nelle leghe Al-Li è stata attribuita all'influenza dei seguenti fattori:

- A quanto risulta esteso il taglio dei precipitati rafforzanti  $\delta'$  e all'orientazione del flusso di deformazione plastica rispetto all'applicazione del carico.

- Alla densità di concentrazione e distribuzione delle inclusioni intermetalliche, che favoriscono la concentrazione delle tensioni.
- La morfologia e la distribuzione dei precipitati che danno rafforzamento, che dipendono dalla chimica della lega e dai trattamenti termici.
- Allo storico dei processi, al grado di ricristallizzazione e dal livello di deformazione plastica impartiti alla lega prima dell'invecchiamento artificiale.

La lega 8090 dopo il processo di tempra, viene sottoposta ad una deformazione plastica, perché ne aumenta la resistenza. La successiva precipitazione durante l'invecchiamento di S' (Al<sub>2</sub>CuMg) migliora le proprietà meccaniche del materiale. Da studi pregressi [14] si è potuto constatare che applicando una deformazione plastica del 7% si è in grado di aumentare il limite elastico in trazione e in compressione e si ottiene una più alta tenacità soprattutto in direzione longitudinale, e un incremento leggermente minore in direzione del trasverso lungo e corto. In direzione L (direzione di laminazione) il limite elastico in compressione è dell'8% inferiore rispetto alil limite elastico in trazione; mentre in direzione LT (direzione del trasverso lungo) il limite elastico in compressione è dell'6% maggiore rispetto alil limite elastico in trazione. Questo diverso comportamento della distribuzione di resistenza può essere ricondotto a: effetto delle tensioni residue, microcricche, interazione delle dislocazioni con gli atomi di soluto, concentrazione di precipitati all'interfaccia con la matrice d'Al e infine alle tessiture cristallografiche.

Facendo riferimento alla figura sottostante, i cui andamenti sono stati ottenuti da tutta una serie di prove di trazione uniassiale eseguite sui campioni ricavati da diverse tipologie di leghe Al-Li, si può vedere come sia evidente che le migliori caratteristiche meccaniche siano quelle ottenibili con una lega Al-Li del tipo Al-Li-Cu-Mg-Zr, come la 8090 analizzata in questo studio.

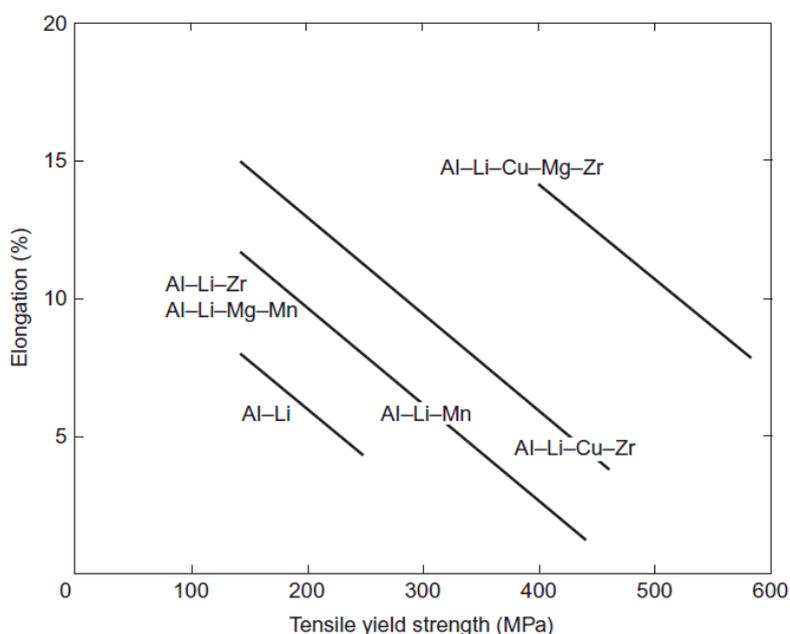


Figura 26: Andamento schematico della relazione tra il limite elastico e l'allungamento per una serie di leghe d'alluminio, tra le quali la lega 8090 (Al-Li-Cu-Mg-Zr) [14].

Per migliorare le caratteristiche meccaniche delle leghe Al-Li, si possono adottare alcuni criteri di modifica della microstruttura della lega [15], come:

- Incremento della resistenza meccanica: ottenendo la precipitazione di precipitati di dimensione dell'ordine dei 50 nm e affinando il grano, si riesce ad ostacolare il moto

delle dislocazioni: tali precipitati sono sufficientemente piccoli, di modo che le dislocazioni non riescono ad attraversarli o li attraversano con fatica;

- Aumento della tenacità: eliminando inclusioni da ferro e silicio si migliora la purezza della lega, si vuole evitare la formazione di  $\delta$ , e favorire la precipitazione di  $\delta'$ , che sono più facilmente attraversabili dalle dislocazioni e si favorisce una deformazione plastica più uniforme e l'incrudimento, evitando così la formazione di microvuoti che accrescendosi portano a precoce frattura duttile;
- Resistenza alla nucleazione di cricche di fatica: limitando la formazione di precipitati  $\delta'$ , favorendo l'affinamento del grano ed eliminando le inclusioni, si contrasta la concentrazione della deformazione plastica e degli sforzi sui bordi di grano;
- Resistenza alla propagazione di cricche di fatica: se si porta alla formazione di precipitati  $\delta'$ , che sono facilmente attraversabili dalle dislocazioni e si fa una microstruttura composta da grani grandi e allungati, si favorisce la propagazione delle cricche lungo delle direzioni ramificate che portano alla chiusura delle cricche.

### 5.3 Effetto degli elementi leganti

La lega 8090 tende a soffrire molto di anisotropia legata alle caratteristiche meccaniche, una bassa duttilità e tenacità alla frattura in direzione del traverso corto. La bassa duttilità e tenacità alla frattura sono da ricondurre a:

- all'effetto degli elementi leganti Na e K che tendono a segregare a livello dei bordi di grano;
- alla formazione di composti intermetallici contenenti Fe e Si durante il processo di solidificazione del fuso;
- alla presenza di tensioni localizzate, risultato del taglio dei precipitati metastabili  $\delta'$  in prossimità dei bordi di grano.

Si è visto che con l'aggiunta di elementi leganti come Cu, Mg, Zr e Ag si è in grado di minimizzare questi effetti negativi, promuovendo la formazione di nuove fasi e dei cambiamenti nella nucleazione di  $\delta'$ . Le principali impurità che possono essere trovate dentro la lega sono dovute a elementi come Fe, Si, Na, K e Ca che derivano dai materiali usati in partenza nel processo di fusione. Fe e Si sono delle impurità inevitabili nelle leghe d'alluminio commerciali; mentre la presenza di Cl, F e H è da ricondurre a dei processi di fusione e colata inappropriati e malfatti. L'aggiunta di due elementi molto leggeri, Li e Mg, contribuisce a migliorare le proprietà specifiche della lega 8090 e ad un notevole risparmio di massa quando si vogliono realizzare delle strutture aeronautiche. [15] Di seguito verrà presentato l'effetto degli elementi leganti nelle leghe Al-Li:

- Li: aggiungendo Li alla lega come effetti positivi si hanno diminuzione della densità della lega, aumento del modulo di Young, incremento della resistenza a fatica, si formano i precipitati  $\delta'$  ( $Al_3Li$ ) che rappresenta il maggior rafforzamento di fase durante il fenomeno dell'invecchiamento, invece a seconda del rapporto d'inserimento tra Cu e Li, si può avere che il rame forma la fase  $Al_2Cu$  ( $\theta'$ ) oppure la fase  $Al_2CuLi$  ( $T_1$ ). Gli aspetti negativi sono che aumenta la fragilità del materiale e l'anisotropia. Facendo riferimento al contenuto in massa del Li nella lega 8090 pari a 2,38% e alla frazione in volume delle particelle  $\delta'$ , è stato stimato la presenza del 0,95% in massa di Li in soluzione solida. [14]

- Cu: porta rafforzamento nella lega grazie alla formazione di precipitati indurenti come  $T_1'$  ( $Al_2CuLi$ ) e  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ ), soprattutto quando il Cu è molto presente nella lega;
- Mg: l'aggiunta di magnesio nella lega porta alla formazione di precipitati come  $S'$  ( $Al_2CuMg$ ) che induriscono il materiale; si ottiene una grande precipitazione di  $S'$ , quando ci sono composizioni molto ricche di Cu e Mg.
- Ag: nelle leghe Al-Li-Cu favorisce l'invecchiamento naturale del materiale.
- Zr: quando si effettuano delle deformazioni plastiche a caldo, questo elemento è in grado di contrastare il fenomeno della ricristallizzazione e l'accrescimento dei grani; inoltre forma dei piccoli precipitati  $\beta'$  ( $Al_3Zr$ ) capaci di contrastare la localizzazione dello scorrimento, ma provoca una forte deformazione della struttura cristallografica della lega.
- Cr, Mn: l'aggiunta di questi elementi leganti tende a rallentare l'accrescimento dei grani e a opporsi alla localizzazione dello scorrimento plastico, tramite la formazione di piccoli precipitati incoerenti.
- Si, Fe: l'aggiunta di questi elementi leganti tende a causare la formazione di inclusioni, che avranno un effetto negativo sulla tenacità a frattura.

Per quanto riguarda la lega d'alluminio 8090, si ha che l'aggiunta del solo litio, come elemento legante, non è in grado di garantire una soddisfacente combinazione di resistenza e duttilità. Per questo motivo è necessario garantire una giusta combinazione di altri elementi leganti, tra i quali ci sono rame (Cu), magnesio (Mg) e zirconio (Zr), che contribuiscono all'indurimento del materiale attraverso il meccanismo di rafforzamento per precipitazione. In questo caso si ottiene la lega 8090, una lega a 5 elementi (Al-Li-Cu-Mg-Zr) con una composizione molto complessa, ma che è in grado di superare le problematiche di fragilità che caratterizzano le leghe Al-Li binarie.

## 5.4 Fenomeni di rafforzamento durante l'invecchiamento

In seguito al processo d'indurimento per invecchiamento, le leghe Al-Li-Cu-Mg-Zr sviluppano un certo rafforzamento che va correlato alla capacità dei precipitati che si sono sviluppati di resistere al moto delle dislocazioni durante la deformazione plastica, perché esercitano una certa resistenza al moto delle dislocazioni e questo contribuisce al rafforzamento. La capacità di questi precipitati di opporsi al moto delle dislocazioni dipende da tipo, dimensione, morfologia, distribuzione, densità, coerenza con la matrice e dipende anche dal fatto se i precipitati vengono tagliati e attraversati, o circondati dalle dislocazioni (meccanismo di Friedel o Orowan). Si è visto che il massimo di rafforzamento viene raggiunto quando i precipitati raggiungono una dimensione critica, per la quale si ha la transizione dal tagliare (meccanismo di Friedel) all'aggirare i precipitati (meccanismo di Orowan) [14]. Natura, struttura, dimensione e distribuzione delle fasi e le proprietà dell'interfaccia tra precipitati e matrice sono influenzati dalla composizione chimica e dai trattamenti termici a cui viene sottoposta la lega.

Nelle leghe di seconda generazione si formano le seguenti fasi di equilibrio:  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ),  $\delta$  ( $AlLi$ ),  $S$  ( $Al_2CuMg$ ),  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ),  $T_2$  ( $Al_6CuLi_3$ ). Le fasi metastabili rafforzanti che si formano sono:  $\delta'$  ( $Al_3Li$ ),  $T_1'$  ( $Al_2CuLi$ ),  $S'$  ( $Al_2CuMg$ ). La formazione della fase  $\delta$  avviene per precipitazione ai bordi di grano quando ci si trova ad una temperatura di 170-375°C e all'interno dei grani all'interfaccia tra la fase  $T_2$  e la matrice d'Al. Le fasi metastabili  $T_1'$ ,  $S'$  e  $\beta'$  e le fasi d'equilibrio  $\delta$  e  $T_2$  possono essere trovate nella lega 8090 quando si hanno tempi d'invecchiamento elevati. [14] Nelle leghe Al-Li possono essere trovate tutta una serie di precipitati tra cui le fasi metastabili

$\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ),  $\text{T}_1'$  ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ),  $\text{S}'$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ),  $\beta'$  ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ) e le fasi stabili  $\delta$  ( $\text{AlLi}$ ) e  $\text{T}_2$  ( $\text{Al}_6\text{CuLi}_3$ ). Le fasi appena elencate, presentano le seguenti caratteristiche:

- $\delta$  ( $\text{AlLi}$ ): presenta una struttura cristallina cubica ed è una fase d'equilibrio con la soluzione solida  $\alpha$ , precipita in maniera meno omogenea e irregolare rispetto a  $\delta'$ , i precipitati presentano una forma piatta e nucleano ai bordi di grano e dentro i grani. Durante il fenomeno dell'invecchiamento, prima si ha la precipitazione della fase metastabile  $\delta'$  e poi, man mano che si continua con altri invecchiamenti si arriva alla formazione della fase d'equilibrio  $\delta$  ( $\text{AlLi}$ ).
- $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ): presenta una struttura cristallina cubica ed è una fase metastabile e coerente con la matrice cubica d'Al, con una forma sferica, che si forma dalla soluzione solida  $\alpha$ . Le dimensioni di questi precipitati aumentano all'aumentare del periodo d'invecchiamento, passando da 14 a 45 nm, in un tempo d'invecchiamento che va da 1,5 a 100 ore. Si tratta della fase metastabile più abbondante nelle leghe Al-Li invecchiate artificialmente. Nelle leghe Al-Li contenenti Zr, come l'8090, le particelle di  $\beta'$ , si comportano come siti di nucleazione per la precipitazione di  $\delta'$ . Questo precipitato migliora le caratteristiche meccaniche e la tenacità a frattura della lega, perché ostacola il moto delle dislocazioni nel materiale. La presenza di questa fase nelle leghe Al-Li dipende molto dalla composizione. Per quanto riguarda la lega 8090 oggetto di questo studio, si è visto che la fase metastabile  $\delta'$  è un precipitato rafforzante che si trova distribuito in tutta la lastra e presenta delle dimensioni medie di 20 nm di diametro e genera un rafforzamento per precipitazione. Dato che il materiale è arrivato al picco d'invecchiamento, le particelle di precipitato sono grandi abbastanza da generare un forte effetto di accoppiamento con i pacchetti di dislocazioni, che tagliano i precipitati.
- $\text{S}$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ): è una fase incoerente con una forma piatta. Solitamente la si può trovare nelle leghe Al-Li con un contenuto di Cu basso e di Mg prossimo allo 0,8%.
- $\text{S}'$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ): si tratta di un precipitato, la cui formazione porta rafforzamento nella lega, è metastabile e parzialmente coerente con la matrice d'Al, per quanto riguarda la morfologia, ha una forma piatta. Tende a precipitare e nucleare in maniera più o meno eterogenea in corrispondenza delle dislocazioni nella matrice, lungo i bordi di e sub-bordi di grano, in prossimità dei cluster di vacanze, all'interfaccia tra le particelle  $\delta$  e la matrice. Si è visto che le deformazioni plastiche applicate durante il trattamento T8 favoriscono la nucleazione eterogenea sulle dislocazioni a spigolo [14]. La maggior parte del Cu, presente nella lega, è contenuto nella fase  $\text{S}'$  e non è più disciolto nella matrice. Il precipitato  $\text{S}'$  è rafforzante perché provoca un effetto d'indurimento generale della lega e questo è da ricondurre al meccanismo di Orowan per ostacolare il moto delle dislocazioni; i precipitati  $\text{S}'$  essendo di dimensioni considerevoli, vengono aggirati dalle dislocazioni invece di venir tagliati.
- $\beta'$  ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ): si tratta di precipitati coerenti di forma sferica e hanno dei diametri di 20-30 nm; sono precipitati metastabili e derivano dalla bassa solubilità di Zr in Al. Si è visto che l'aggiunta di Zr alla composizione della lega inibisce il fenomeno della ricristallizzazione, aumenta la tenacità e la resistenza alla corrosione e porta rafforzamento anche per affinamento del grano. Questo miglioramento delle caratteristiche della lega è da ricondurre alla formazione di questo precipitato, che tende a nucleare eterogeneamente su bordi di grano e dislocazioni, inoltre influenza la formazione di  $\delta'$ . Durante i processi termomeccanici a cui viene sottoposta la lega, i precipitati  $\beta'$  si attaccano ai bordi e sub-bordi di grano, inoltre si comportano da siti di nucleazione per i precipitati  $\delta'$ .

- $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ): presenta una struttura cristallina esagonale ed è una fase d'equilibrio incoerente con una forma piatta. La sua nucleazione nei sistemi quaternari Al-Li-Cu-Mg è influenzata dalla nucleazione della fase S, perché entrambe sono interessate agli atomi liberi di Cu, dispersi nella matrice, come siti di nucleazione. La presenza di Mg può influenzare la morfologia di  $T_1$ , facendola diventare più allungata e arrotondata. Questo precipitato può nucleare eterogeneamente sulle dislocazioni, sui bordi di grano formando precipitati corti piatti e spessi. La nucleazione e formazione di  $T_1$  è favorita dalla deformazione plastica a cui viene sottoposta la lega, dopo tempra prima del processo d'invecchiamento, ovvero del trattamento denominato T8 e anche dall'aggiunta di piccole quantità di Mg e Ag.
- $T_2$  ( $Al_6CuLi_3$ ): oltre alla formazione delle fasi  $T_1$  e S' l'aggiunta di Cu nelle leghe Al-Li provoca la formazione della fase d'equilibrio  $T_2$ , contenente anch'essa del Cu. Questa fase presenta una struttura cristallina cubica ed è una fase d'equilibrio che presenta una simmetria icosaedrica, tende a formarsi e nucleare principalmente sui bordi di grano sottoforma di cristalli.

## 6 Prova preliminare con provino di polietilene.

Prima di eseguire le prove di trazione con i provini di lega d'alluminio, abbiamo deciso di eseguire una prova preliminare di trazione. L'obiettivo di questa prova è stato quello di assicurarci che il sistema fosse ben calibrato e che ci fosse una buona precisione tra i valori misurati dall'estensimetro e i valori calcolati dal DIC. Per questa prova preliminare abbiamo deciso di utilizzare un provino di polietilene ad alta densità.



*Figura 27: Provino di polietilene utilizzato nella prova preliminare.*

Prima di eseguire la prova abbiamo dovuto calibrare il sistema, come spiegato in precedenza e poi abbiamo realizzato sulla superficie del provino il pattern stocastico. Dopo di che abbiamo fatto la prova di trazione. Prima è stato fatto compiere uno spostamento di 5 mm al pistone in modo che la prova iniziasse quando il campione si trovava già in stato di deformazione. Poi sono state condotte due prove, entrambe le prove sono state condotte in controllo di spostamento del pistone:

- 5 – 6 mm: nella prima prova è stato fatto compiere uno spostamento di 1 mm al pistone ad una velocità di 0,1 mm/s, mentre il computer lavorava ad una frequenza di acquisizione di 1 Hz, in modo da acquisire un totale di 11 fotogrammi.
- 6 – 8 mm: nella seconda prova è stato fatto compiere uno spostamento di 2 mm al pistone ad una velocità di 0,2 mm/s, mentre il computer lavorava ad una frequenza di acquisizione di 2 Hz, in modo da acquisire un totale di 21 fotogrammi.

Per la realizzazione, dei grafici di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC, è stato utilizzato il software Matlab, tramite il seguente codice che io stesso ho provveduto a scrivere:

```
% Prova di trazione in controllo spostamento di un provino di polietilene.
```

```
% Step | % Axial strain estensimetro | % Axial strain DIC
```

```
clear
```

```
clc
```

```
% 1)Diagramma prova di trazione in controllo spostamento 5-6mm:
```

```
test_name1 = 'controllo_spostamento_5_6.dat';
```

```
acq1 = importdata(test_name1);
```

```
step1 = acq1(:,1); % Step
```

```
defest1 = acq1(:,2); % Axial strain estensimetro [%]
```

```
defdic1 = acq1(:,3); % Axial strain DIC [%]
```

```
% 2)Diagramma prova di trazione in controllo spostamento 6-8mm:
```

```
test_name2 = 'controllo_spostamento_6_8.dat';
```

```
acq2 = importdata(test_name2);
```

```
step2 = acq2(:,1); % Step
```

```
defest2 = acq2(:,2); % Axial strain estensimetro [%]
```

```
defdic2 = acq2(:,3); % Axial strain DIC [%]
```

```
% Grafici
```

```
figure(1)
```

```
plot(defest1,step1,'k-',defdic1,step1,'r-','LineWidth',1.5),grid
```

```
title('Prova di trazione in controllo spostamento 5 - 6 mm con f = 1 Hz')
```

```
xlabel('Deformazione [%]')
```

```
ylabel('Step')
```

```
legend('Estensimetro','DIC')
```

```
figure(2)
```

```
plot(defest2,step2,'k-',defdic2,step2,'r-','LineWidth',1.5),grid
```

```
title('Prova di trazione in controllo spostamento 6 - 8 mm con f = 2 Hz')
```

```
xlabel('Deformazione [%]')
```

```
ylabel('Step')
```

```
legend('Estensimetro','DIC')
```

Di seguito vengono mostrati gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC, relativi alla prima e seconda prova. La dicitura "step" fa riferimento al numero di fotogrammi acquisiti.

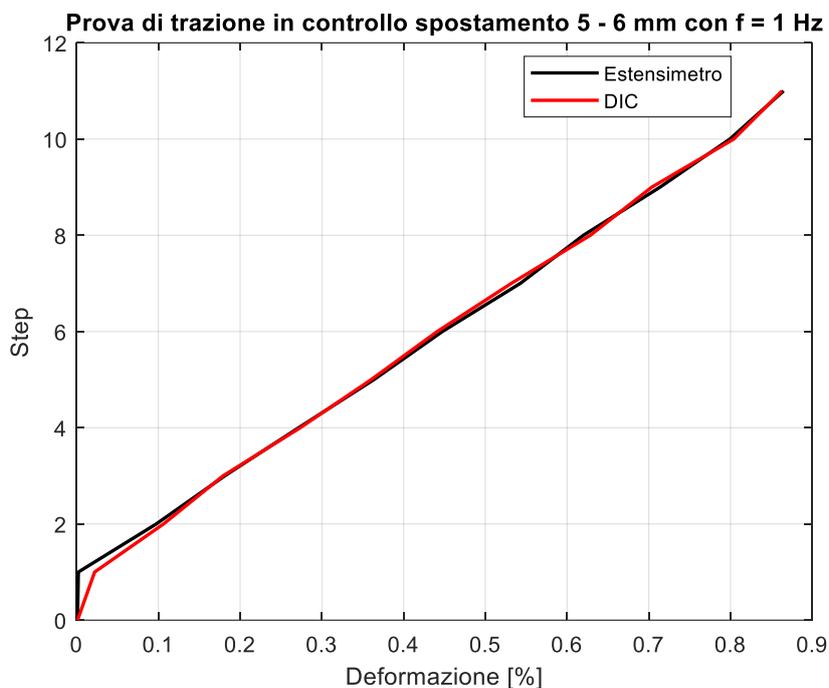


Figura 28: Prima prova in controllo di spostamento 5-6mm con frequenza di acquisizione pari a 1Hz, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

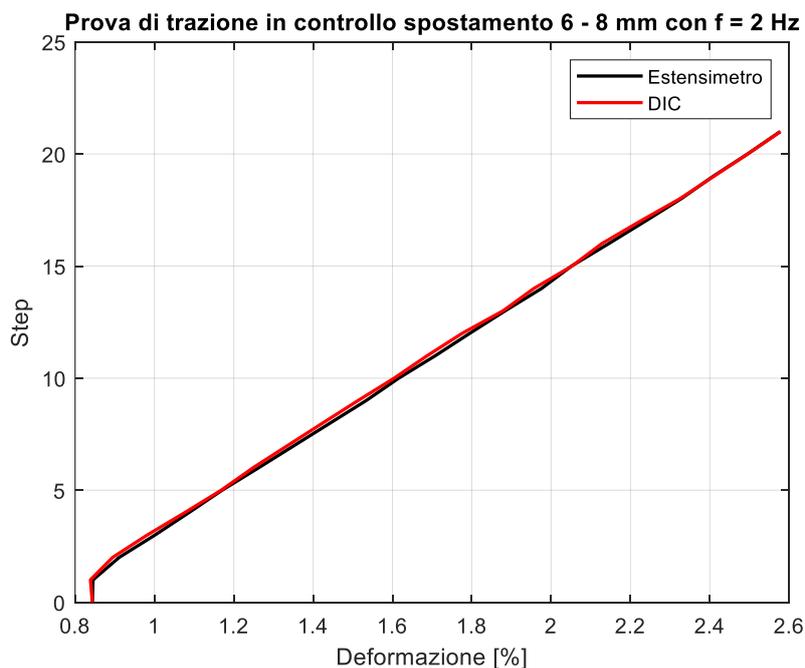


Figura 29: Seconda prova in controllo di spostamento 6-8mm con frequenza di acquisizione pari a 2Hz, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Dai grafici sopra riportati si può vedere come in entrambe le prove, gli andamenti delle deformazioni misurate dall'estensimetro e delle deformazioni calcolate dal DIC siano molto simili. È stato calcolato l'errore percentuale tra i due andamenti come differenza tra il valore calcolato dal DIC e quello misurato dall'estensimetro, diviso per il valore misurato dall'estensimetro. Per la prima prova è stato ottenuto un errore medio pari allo 0,42%, mentre nella seconda prova è stato ottenuto un errore medio pari allo -0,74%. Si può vedere come in entrambi i casi l'errore sia molto basso, in particolare nella prima prova il DIC sovrastima di poco

il valore di deformazione, mentre nella seconda prova si ha una leggera sottostima. È possibile che questo piccolo grado di errore sia da ricondurre ad un certo grado di incertezza nelle misurazioni o a fattori esterni che influenzano l'acquisizione delle immagini, come la variazione di luminosità ambientale o la qualità del pattern realizzato sul provino.

Nonostante questo, facendo riferimento ai risultati ottenuti, siamo in grado di affermare, che la prova preliminare è stata un successo, la calibrazione fatta in precedenza andava bene e che i valori di deformazione calcolati dal DIC, così come la qualità del pattern realizzato sul provino, presentano un notevole livello di affidabilità.

## **7 Prove di trazione della prima serie di provini della lega 8090-T851**

In seguito alla prova preliminare di trazione con provino in polietilene, si è deciso di proseguire sottoponendo alla prova di trazione uniassiale una prima serie di provini della lega d'alluminio Al-Li-Cu-Mg 8090-T851, ricavati dalla lastra laminata tramite un taglio per elettroerosione. Lo scopo delle seguenti prove di trazione è quello di studiare, tramite la correlazione d'immagini digitali, l'andamento della deformazione plastica, durante la prova di trazione, per osservare le diverse tipologie di bande plastiche che si sviluppano quando si verifica l'effetto Portevin Le Chatelier e per dimostrare che l'intensità della deformazione plastica localizzata, a livello delle bande plastiche, supera nettamente l'intensità della deformazione plastica media calcolata nel tratto di lunghezza in cui l'estensimetro realizza le proprie misurazioni. In questo modo con la tecnica DIC, si può andare a vedere in un singolo punto quanto è grande la deformazione plastica, mentre utilizzando l'estensimetro si ottiene un valore di deformazione che fa riferimento ad un tratto di provino più o meno esteso.

Per queste prime prove di trazione, i provini oggetto degli esperimenti sono i seguenti e sono contraddistinti ciascuno da una sigla diversa: R60LT, R61LT, R67L, R62LT, R68L. Questi campioni analizzati presentano tutti le stesse dimensioni nominali della sezione lungo la lunghezza utile del provino, pari a 6 mm di larghezza e 4 mm di spessore, una lunghezza totale di circa 140 mm e una larghezza delle teste di afferraggio pari a 20 mm. Di questi provini non si avevano informazioni riguardanti la posizione da cui è stato ricavato il provino rispetto allo spessore della lastra, l'unica informazione nota era la loro posizione rispetto alla direzione in cui la lastra era stata laminata. Per questo motivo, questa prima serie di provini è stata utilizzata per mettere a punto tutto il sistema di acquisizione e di calcolo DIC, prima di passare ai provini veri e propri oggetto dello studio. In particolare, per questi provini possiamo fare riferimento alla seguente nomenclatura:

- LT: indica la posizione di traverso lungo.
- L: indica la direzione longitudinale alla direzione di laminazione della lastra.

Nel seguito viene riportato un esempio della geometria e delle dimensioni dei provini utilizzati in questa serie di prove:

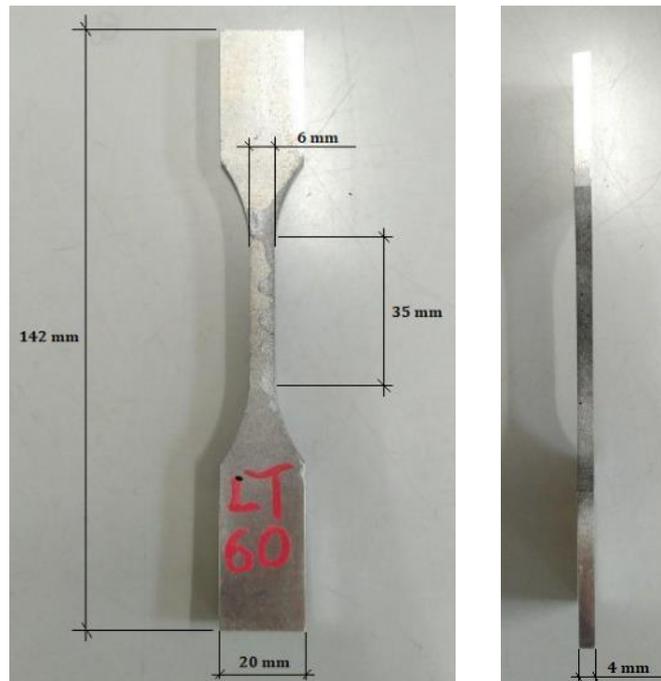


Figura 30: Dimensioni relative a tutti i campioni della prima serie: R60LT, R61LT, R67L, R62LT, R68L.

Dopo la lavorazione i provini ottenuti sono stati trattati e levigati con delle carte abrasive di grado 600 e 800. Abbiamo deciso di trattare superficialmente i provini, levigandoli, perché c'erano alcuni provini che presentavano una differenza sostanziale nelle dimensioni di larghezza e spessore in diversi punti, misurati lungo la lunghezza utile del provino. Inoltre, un altro motivo per il quale abbiamo deciso di levigare i provini è quello dovuto al fatto che si voleva ottenere una finitura superficiale il più possibile priva di irregolarità e difetti, sia per migliorare l'adesione della vernice con cui è poi stato realizzato il pattern, sia per far sì che non vi fossero più delle irregolarità, dovute a possibili difetti presenti nel materiale o portate dalla lavorazione per taglio con elettroerosione, che potessero influenzare la morfologia, l'andamento della deformazione plastica, il comportamento delle bande plastiche o la durata del provino, soprattutto in termini di allungamento a rottura.

Dopo il trattamento superficiale con carte abrasive, è stato possibile determinare le dimensioni dei provini, in termini di larghezza e spessore. Per far questo sono state fatte tre misurazioni in tre diversi punti lungo il tratto utile del provino: la prima poco al di sotto dei raccordi superiori, la seconda a livello del centro del provino e la terza poco al di sopra dei raccordi inferiori. Dopo di che è stato calcolato un valore finale come valore medio sulle tre misurazioni, in modo da ottenere un valore di larghezza media e spessore medio, con i quali fosse possibile calcolare la sezione nominale del provino. Questo valore di sezione ottenuto verrà poi utilizzato per calcolare il valore della sollecitazione, punto per punto lungo la curva di tensione - deformazione.

Dopo la preparazione e la misurazione dei provini, si è andati avanti realizzando la calibrazione del sistema DIC. Il processo di calibrazione del sistema va fatto prima di effettuare ogni prova, se queste vengono eseguite in tempi diversi e se tra una prova e una successiva la telecamera subisce degli spostamenti o se cambia la messa a fuoco o l'apertura focale. Per questo, quando abbiamo fatto più prove di trazione nello stesso giorno, senza spostare la telecamera tra una prova e l'altra, abbiamo utilizzato sempre la stessa calibrazione. È bene tenere a mente che dopo aver fatto la calibrazione, vengono stabiliti i riferimenti della telecamera, in termini di sistema di riferimento x-y, di distanza focale dell'obiettivo dalla superficie del calibratore, i quali

determineranno le dimensioni delle immagini del provino ripresi dalla videocamera e, inoltre, vengono settati i parametri di gain, shutter time e apertura focale dell'obiettivo. Per questi motivi se capitasse che la telecamera venisse urtata o venisse spostata, sarebbe necessario ricalibrare il sistema altrimenti le acquisizioni e le misurazioni non sarebbero più attendibili. Per le calibrazioni fatte per questa serie di provini, abbiamo utilizzato il calibratore professionale con scacchiera 9x9 e quadrati di 2mm di lato, con scacchiera nera su sfondo bianco. Per quanto riguarda la qualità delle calibrazioni realizzate per questi provini, abbiamo ottenuto dei valori di residuum molto validi, sempre compresi tra 0,3 e 0,5. I valori di residuum ottenuti nella calibrazione utilizzata per ciascun provino verranno presentati in seguito nel paragrafo relativo a ciascun provino. Un requisito fondamentale al fine di ottenere una buona calibrazione è quello di fare un buon settaggio dei parametri sopra citati, affinché durante la calibrazione vengono riconosciuti tutti i nodi della scacchiera del calibratore utilizzato, che verranno così cerchiati di verde. Mentre per quanto riguarda le impostazioni della videocamera per la calibrazione, abbiamo utilizzato sempre un'apertura focale di 4 o 5,6 a seconda dell'intensità dell'illuminazione ambientale e uno zoom di 35.

Dopo la calibrazione abbiamo realizzato un pattern stocastico utilizzando delle vernici spray di colore bianco e nero di tipo opaco. L'obiettivo è quello di realizzare un pattern stocastico, ovvero il più casuale possibile, che non presenti zone uguali ad altre, che teoricamente deve presentare una verniciatura per il 50% composta da bianco e per l'altro 50% composta da nero. In seguito a numerosi tentativi, abbiamo potuto constatare che, per ottenere un pattern che non si screpoli durante la prova di trazione, è meglio dare una prima passata di vernice bianca, non troppo spessa, aspettare una decina di minuti e poi dare una leggera spruzzata di nero sopra il bianco, evitando di creare delle gocce troppo grosse di vernice nera, in modo da ottenere una buona distribuzione della vernice con una composta per il 50% da bianco e per l'altro 50% da nero.

Per le prove di trazione condotte in controllo di velocità di spostamento del pistone  $v_{sp}$ , quest'ultima è stata calcolata nel seguente modo, usando come dati la lunghezza utile del provino  $l_0$  e la velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}$  di  $0,0001 \text{ mm/mm} \cdot \text{s}^{-1}$ :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad v_{sp} = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \dot{\epsilon} \cdot l_0$$

Dopo di che il campione è stato messo in posizione, vincolato nelle pinze di serraggio della macchina, in modo da avere la propria superficie maggiore, quella di larghezza nominale di 6 mm, disposta perpendicolarmente all'obiettivo della videocamera.

Nei paragrafi a seguire, verranno mostrati in dettaglio i risultati ottenuti nelle prove di trazione di trazione, analizzate tramite la correlazione d'immagini digitali dei provini R60LT, R61LT, R67L, R62LT, R68L.

## 7.1 Prova di trazione - provino R60LT

Il primo provino ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R60LT. Questo provino presentava una larghezza media di 5,96 mm, uno spessore medio di 3,95 mm e una sezione nominale di  $23,54 \text{ mm}^2$ . La prova di trazione era stata condotta in modo tale da acquisire i valori di deformazione, tramite estensimetro, ad una frequenza di acquisizione di 50 Hz. Per quanto riguarda le acquisizioni di immagini, tramite il computer DIC, era stata impostata

una frequenza di acquisizione di 10 Hz. Tuttavia, durante lo svolgimento della prova di trazione, per via di un problema tecnico legato al malfunzionamento dell'attrezzatura, sono state perse le acquisizioni d'immagini fatte dal computer del DIC, per questo motivo non è stato possibile confrontare i dati di deformazione misurati dall'estensimetro con quelli calcolati dal DIC e non è stato nemmeno possibile analizzare la deformazione plastica e lo svilupparsi dell'effetto PLC. Per questo motivo la prova era stata stoppata e poi successivamente ripresa. Questo ha fatto sì che il provino R60LT subisse due prove di trazione una inseguito all'altra. Nonostante questo, è stato possibile tracciare il diagramma tensione - deformazione utilizzando i valori di deformazione rilevati dall'estensimetro e i valori relativi al carico applicato, che venivano salvati dal computer collegato alla macchina MTS in entrambe le prove. Nella seconda prova effettuata sul provino l'acquisizione d'immagini da parte del DIC ha avuto successo, per questo è stato possibile confrontare i valori di deformazione e analizzare l'effetto PLC. Anche la seconda prova di trazione è stata condotta in modo tale da acquisire i valori di deformazione, tramite estensimetro, ad una frequenza di acquisizione di 50 Hz, mentre il computer del DIC acquisiva fotogrammi ad una frequenza di acquisizione di 10 Hz.

Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di 0,01 mm/s. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 5%, un limite elastico  $R_{p02}$  di 502 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 562 MPa e il provino si è rotto in corrispondenza del centro.

Per la realizzazione dei grafici tensione-deformazione è stato utilizzato il software Matlab, con il quale è stato scritto un semplice codice attraverso il quale è stato possibile ottenere un plottaggio delle curve molto preciso e dettagliato. Il seguente codice è stato utilizzato per plottare tutti i grafici tensione – deformazione presenti all'interno di questa trattazione, cambiando solamente i dati relativi a ciascuna prova:

```
% Axial Spostamento | Axial Carico | Axial Deformazione | Tempo
%   mm           kN           %           Sec
clear
clc

% 1)Diagramma tensione-deformazione con i valori acquisiti dall'estensimetro:
test_name = 'R60LT_trazione_per_matlab.dat';
acq = importdata(test_name);
% a_spost = acq(:,1); % Axial Spostamento [mm]
a_c = acq(:,2); % Axial Carico [kN]
a_def = acq(:,3); % Axial Deformazione [%]
% t = acq(:,4); % Tempo [s]
S = 5.96*3.95;% sezione provino in [mm2]
sigma_n = a_c*1000/S; % tensione principale [MPa]
% Grafici
figure(1)
plot(a_def,sigma_n,'k-','LineWidth',1.5),grid
title('Diagramma tensione-deformazione trazione R60LT')
xlabel('Deformazione [%]')
ylabel('Tensione [MPa]')
legend('Estensimetro')
```

Di seguito vengono riportati i grafici tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS, per le due prove effettuate sul provino R60LT. Non è mai stato possibile tracciare i grafici usando

i valori di deformazione calcolati dal DIC, perché non si poteva avere una corrispondenza di questi valori di deformazione con i valori di carico della macchina MTS, in quanto i valori di carico non venivano inviati al computer DIC, perché mancava il collegamento hardware necessario.

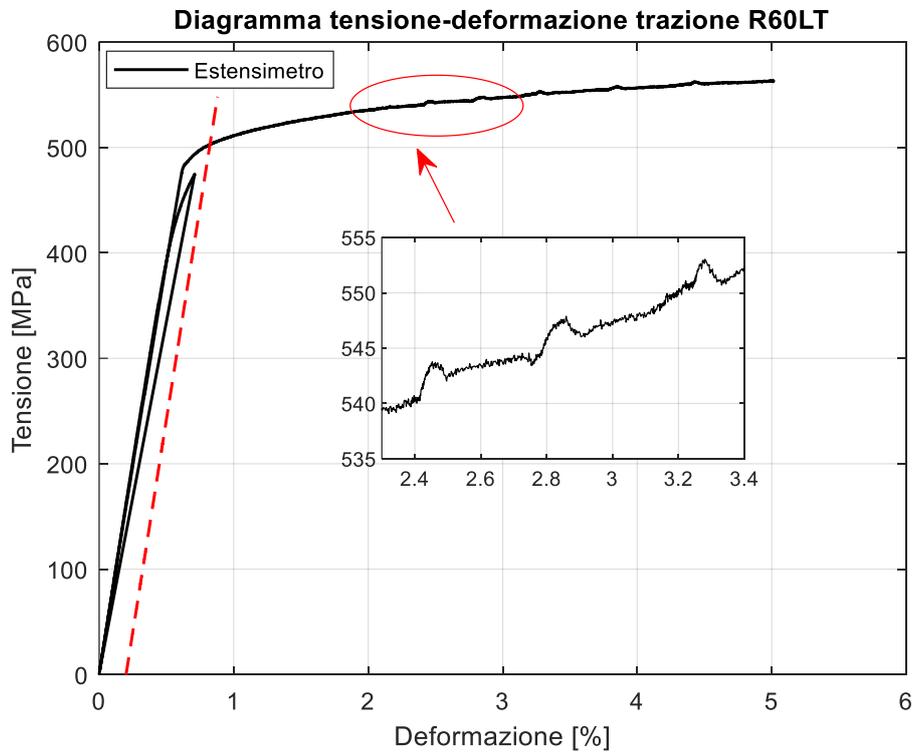


Figura 31: Grafico tensione - deformazione prima prova di trazione del provino R60LT.

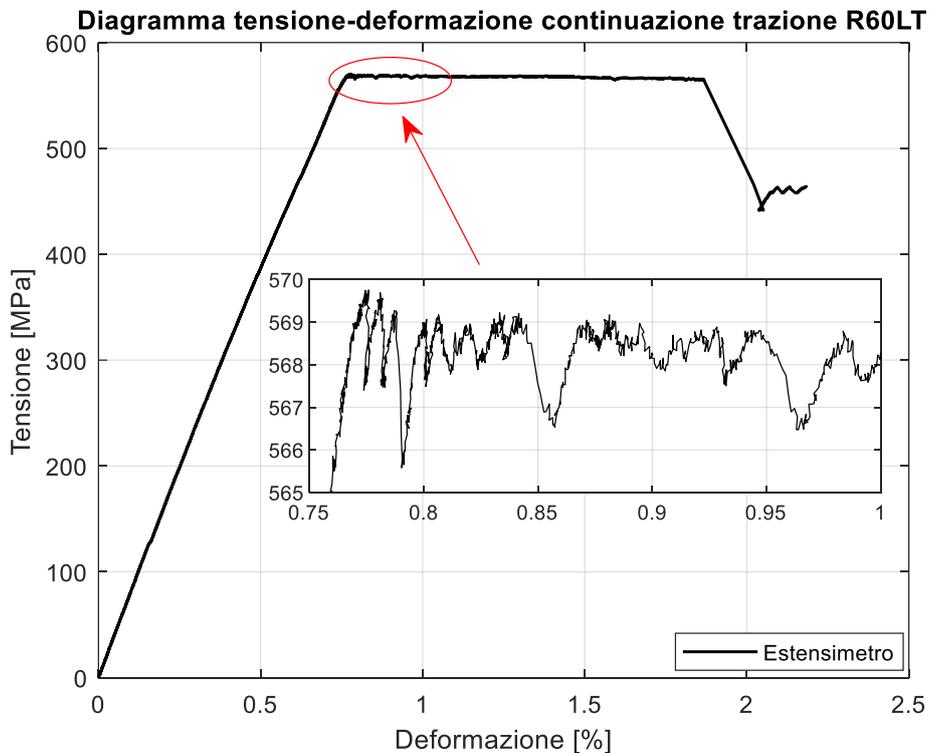


Figura 32: Grafico tensione - deformazione seconda prova di trazione del provino R60LT.

Dai grafici sopra riportati si può vedere come in entrambe le prove, gli andamenti di tensione - deformazione non mostrano un andamento seghettato molto marcato. Nel grafico

relativo alla prima prova si notano delle dentellature in corrispondenza del 2,5%, 2,8%, 3,3%, 3,8% e 4,4% di deformazione. Per quanto riguarda la differenza tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, è stato calcolato un errore medio percentuale, relativo alla seconda prova, pari all'1,75%.

## 7.2 Prova di trazione - provino R61LT

Il secondo provino ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R61LT. Questo provino presentava una larghezza media di 5,92 mm, uno spessore medio di 4,02 mm e una sezione nominale di 23,79 mm<sup>2</sup>. La prova di trazione su questo provino è stata condotta in tre parti. Durante tutte e tre le parti la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di acquisizione di 20 Hz. Si è scelto di abbassare di molto la frequenza d'acquisizione, perché i grafici di tensione – deformazione venivano troppo rumorosi e disturbati. Per quanto riguarda la frequenza di acquisizione del DIC abbiamo scelto valori diversi nelle tre parti della prova di trazione:

- parte 1: abbiamo fatto fare una deformazione da 0 a 5% con frequenza di acquisizione di 1 Hz, impostando una ROI in modo tale da riprendere l'intero provino e dopo di che abbiamo fatto i calcoli per vedere se fossero già visibili delle bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC.
- parte 2: abbiamo fatto fare una deformazione da 5 a 6% con frequenza di acquisizione di 1 Hz, lasciando la ROI invariata e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere se si fossero sviluppate altre bande o se quelle presenti si erano spostate o intensificate e per calcolare le deformazioni tramite il DIC. È stato possibile osservare una zona con una maggiore intensità di bande, per questo motivo abbiamo ridotto la ROI per concentrarci su una superficie più piccola del provino, di nostro interesse.
- parte 3: abbiamo fatto fare una deformazione da 6% fino alla rottura del provino con una frequenza di acquisizione di 10 Hz, e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere le bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC. Dato che abbiamo visto delle bande plastiche nella parte inferiore, abbiamo ridotto la ROI, riprendendo solo la parte interessata.

Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di 0,00357 mm/s, in modo tale da originare una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 7,45%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 486 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 560 MPa e il provino si è rotto in corrispondenza della zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

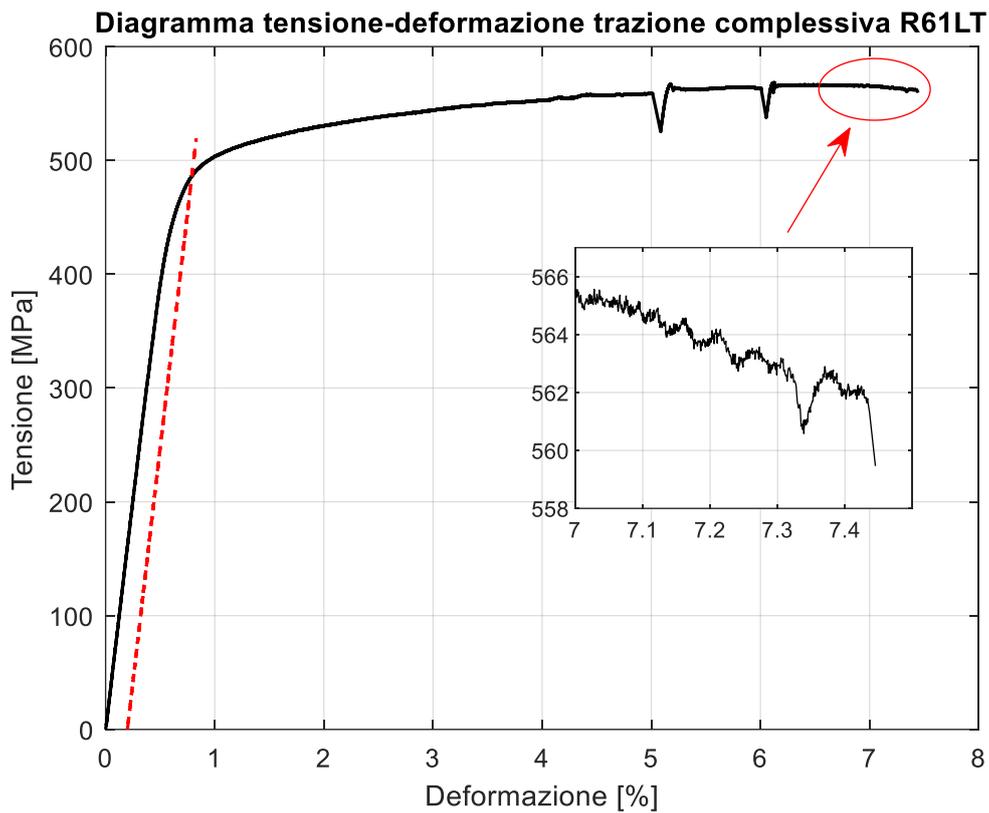


Figura 33: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R61LT.

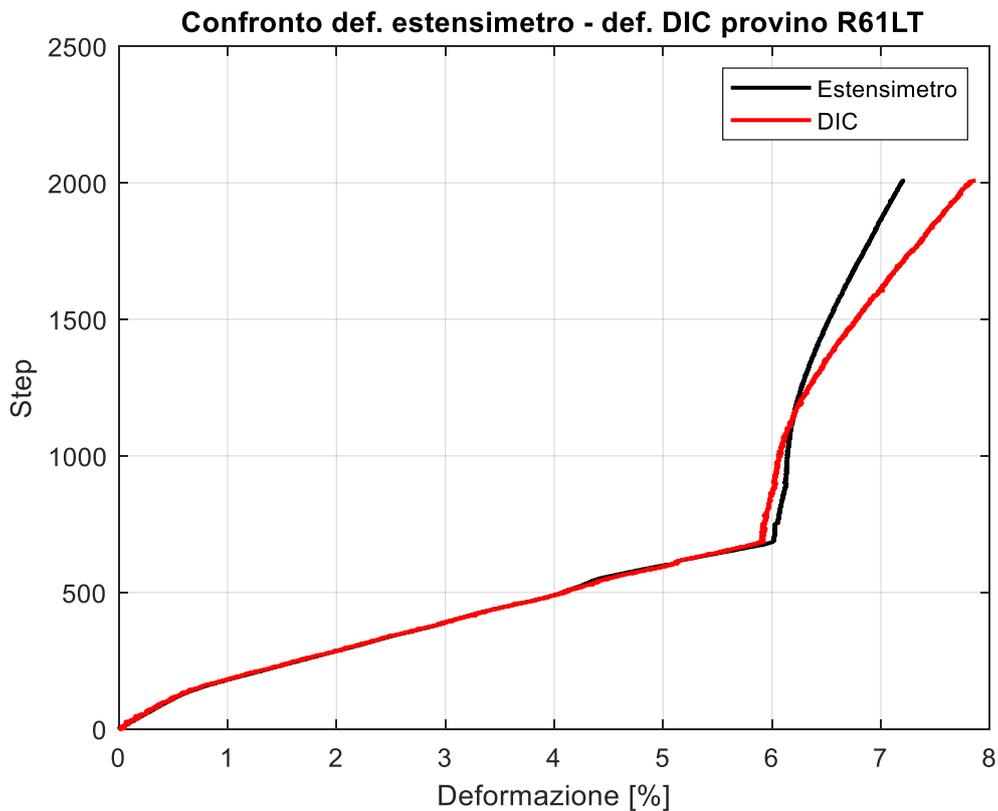


Figura 34: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare alcune cose. Per cominciare i punti in corrispondenza del 5% e del 6% di deformazione, in cui si notano due cadute di tensione molto marcate, rappresentano i punti in cui la prova di trazione

era stata fermata sotto la condizione di spostamento dell'attuatore MTS mantenuto fisso e poi fatta ripartire. La caduta di tensione è tipica del rilassamento del materiale, che si verifica quando il provino rimane fermo, per un centro lasso di tempo, durante il quale il provino continua a rimare nella stessa posizione perché la posizione dell'attuatore rimane costante. Per quanto riguarda il resto dell'andamento della curva, non si notano andamenti seghettati degni di nota e tipici dell'effetto PLC. Solamente nel tratto che va dal 4% al 4,5% di deformazione e verso la fine della prova, dal 7% di deformazione in poi, si nota un leggero andamento ondulato e seghettato.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che fino al 5,9% di deformazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Dopo questo punto i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi, anche di molto, da quelli misurati dall'estensimetro. La causa che abbiamo potuto riconoscere visivamente e che ha provocato questa differenza, è da ricondurre al pattern che era stato realizzato sul provino, che dal 6% di deformazione in poi ha incominciato a screpolarsi e rovinarsi, per questo motivo le deformazioni calcolate hanno presentato un errore maggiore. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, relativo all'intera prova, relativamente basso e pari all'1,07%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

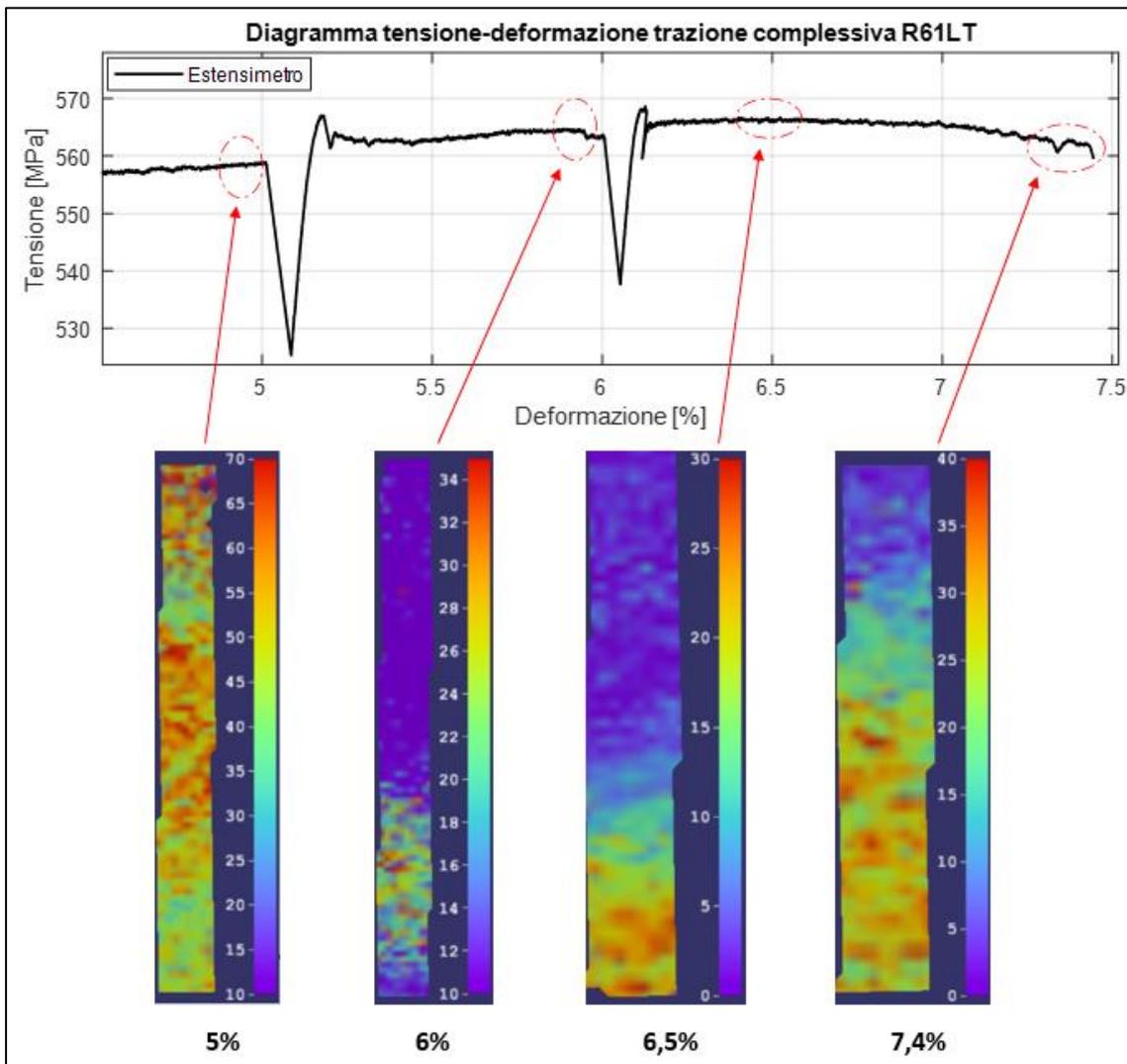


Figura 35: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che la deformazione plastica si è localizzata nella parte inferiore del provino. Non è stato possibile vedere la formazione delle bande plastiche. Le deformazioni che si sono formate sono rimaste stazionarie e non si sono mosse lungo il provino. Fermando la prova e poi facendola ripartire, non è stato possibile correlare i gradienti di deformazione nelle tre diverse parti delle prove, quindi si perde l'analisi visiva della deformazione. Inoltre, non si riesce ad esprimere con assoluta certezza, il valore di deformazione localizzata raggiunto.

### 7.3 Prova di trazione - provino R67L

Il terzo provino ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R67L. Questo provino presentava una larghezza media di 5,99 mm, uno spessore medio di 4,03 mm e una sezione nominale di 24,15 mm<sup>2</sup>. Come nel caso precedente, l'obiettivo era quello di condurre la prova di trazione di questo provino in tre parti, però durante la prima parte della prova, condotta nel campo di deformazione da 0 a 5% il provino si è rotto e quindi la sua prova si è conclusa nella prima parte. Durante lo svolgimento della prova di trazione la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di acquisizione di 20 Hz. Per quanto riguarda la frequenza di acquisizione del DIC, era stata scelta una frequenza di acquisizione di 1 Hz. Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di 0,00357 mm/s, in modo tale da originare una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 4,8%, un limite elastico  $R_{p02}$  di 474 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 526 MPa e il provino si è rotto nella parte inferiore, tra la zona centrale e la zona dei raccordi inferiori.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

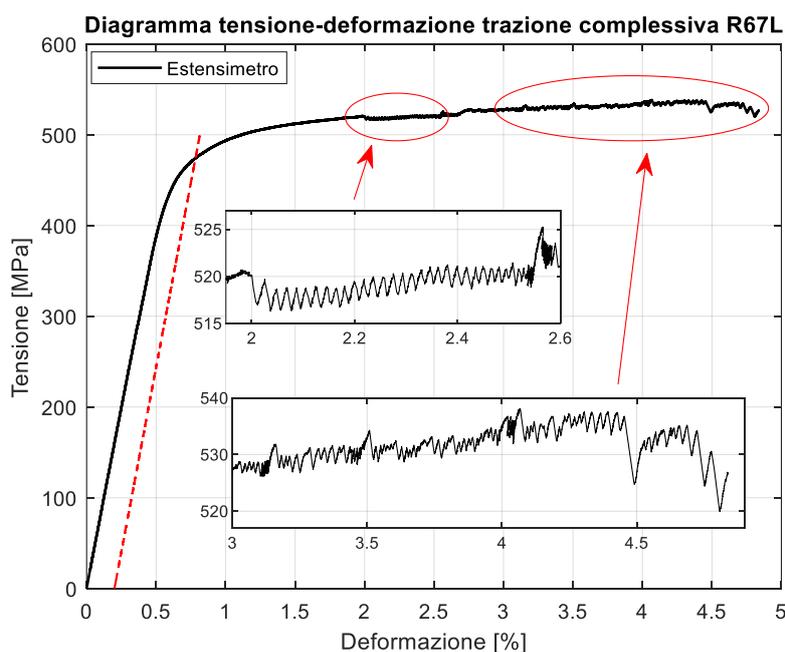


Figura 36: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R67L.

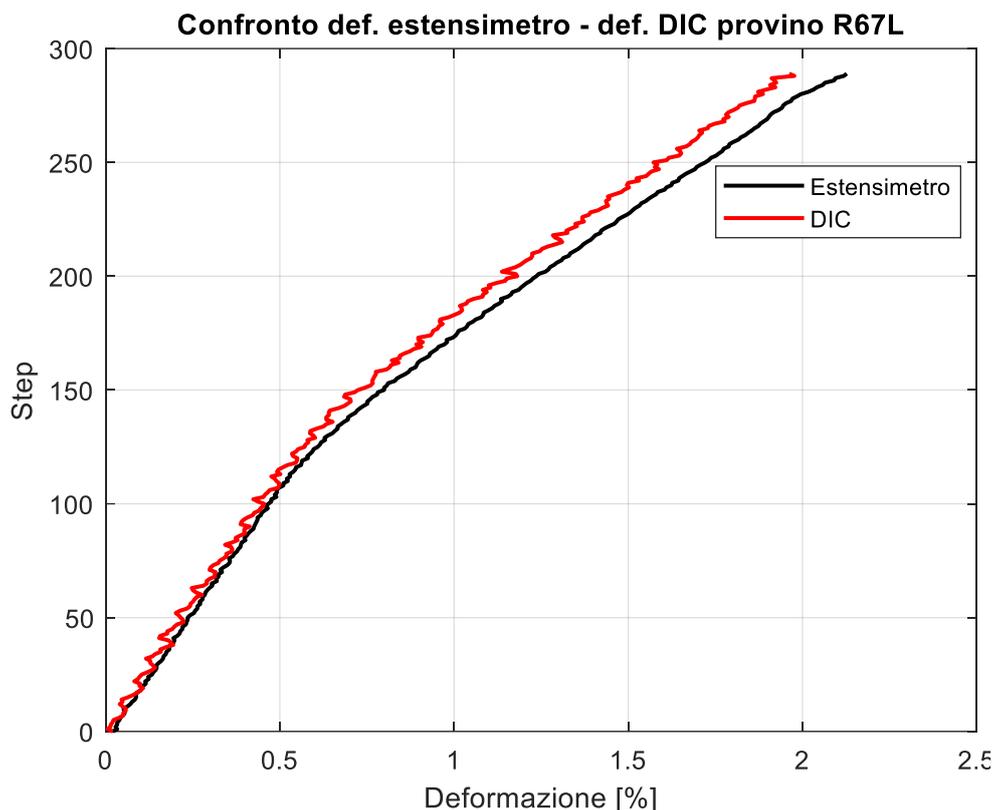


Figura 37: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare degli andamenti seghettati marcati e degni di nota, tipici dell'effetto PLC, che iniziano dopo la caduta di tensione che si manifesta in corrispondenza del 2% di deformazione. Da qui in poi, nel tratto che va dal 2% al 2,5% di deformazione l'andamento seghettato presenta un'ampiezza costante. Dal 2,5% di deformazione in poi fino al collasso del provino, l'andamento seghettato ha un'ampiezza più variabile e irregolare. In prossimità del punto di rottura del provino, l'ampiezza delle oscillazioni di sollecitazione, si fa ancora più marcata.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che fino allo 0,7% di deformazione, quindi finché il provino è rimasto nel tratto di deformazione elastica, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC ha seguito abbastanza bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Quando il provino ha incominciato ad entrare nel campo delle deformazioni plastiche, i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi, da quelli misurati dall'estensimetro. Il motivo di questo errore maggiore nel calcolo delle deformazioni tramite DIC è da ricondurre al pattern che era stato realizzato sul provino, che ha incominciato a screpolarsi e rovinarsi. Questo comportamento può essere ricondotto a due fattori, o la vernice era troppo secca e quindi poco elastica, o era troppo spessa. In entrambi i casi la verniciatura non è riuscita a seguire la deformazione del provino e a rimanere attaccata alla superficie e quindi ha iniziato a sfaldarsi. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale relativo alto rispetto a quelli ottenuti nelle precedenti prove, pari all'-8,16%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

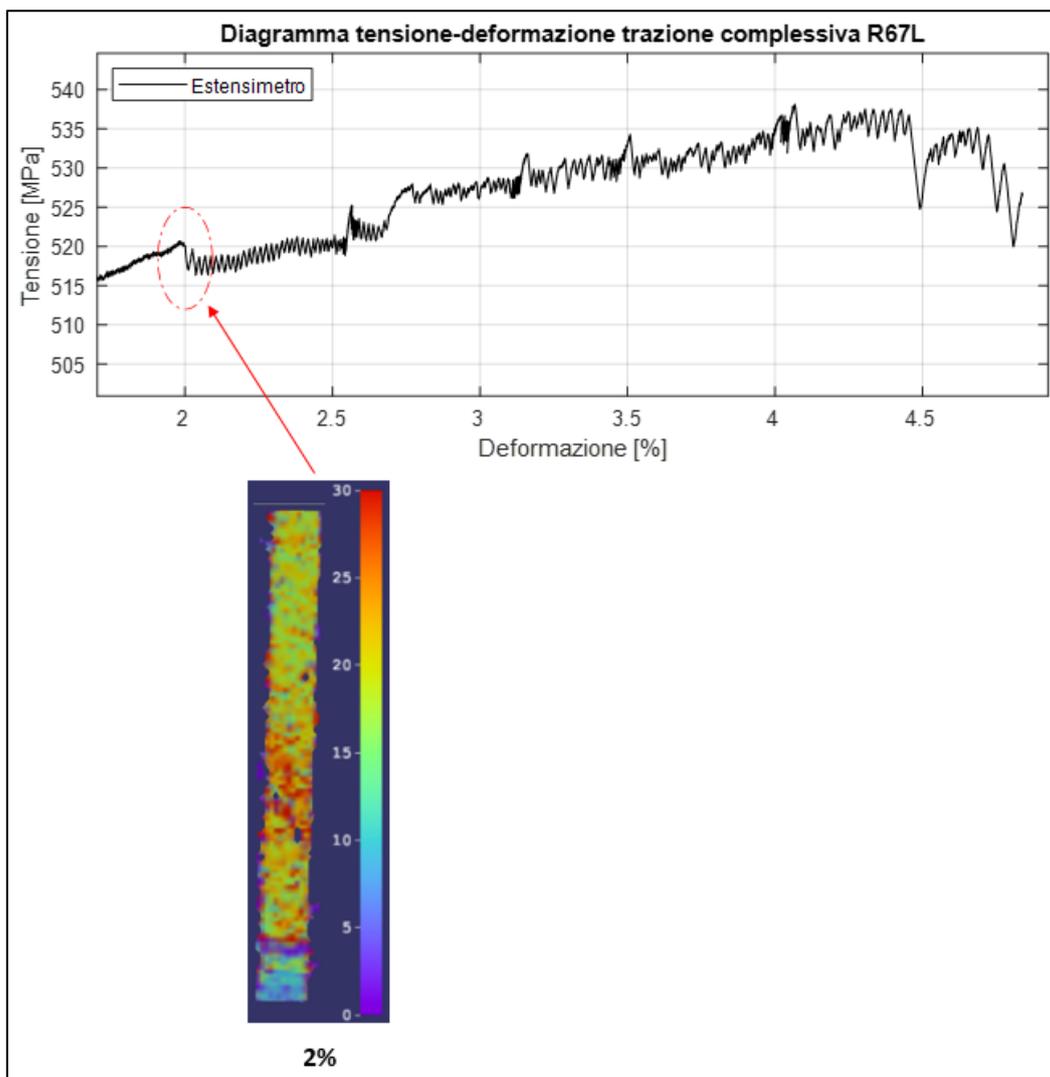


Figura 38: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che la deformazione plastica si è localizzata nella parte leggermente inferiore rispetto al centro del provino. In questo caso è stato possibile vedere la formazione della banda plastica, in corrispondenza della caduta di tensione in corrispondenza del punto individuato dal 2% di deformazione e 520 MPa di tensione. In seguito, non è stato possibile analizzare maggiormente la deformazione, perché il pattern si era rovinato e il DIC, per questo motivo, non è più stato in grado di calcolare le deformazioni. Tuttavia, vien da pensare che la deformazione si sia intensificata fino a portare il provino a rottura in quel punto. Fermando la prova e poi facendola ripartire, non è stato possibile correlare i gradienti di deformazione nelle tre diverse parti delle prove, quindi si perde l'analisi visiva della deformazione. Inoltre, non si riesce ad esprimere con assoluta certezza, il valore di deformazione localizzata raggiunto.

#### 7.4 Prova di trazione del provino R62LT

Il quarto provino ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R62LT. Questo provino presentava una larghezza media di 5,90 mm, uno spessore medio di 4,05 mm e una sezione nominale di 23,90 mm<sup>2</sup>. La prova di trazione su questo provino è stata condotta in tre parti. Durante tutte e tre le parti la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di

acquisizione di 20 Hz. Per quanto riguarda la frequenza di acquisizione del DIC abbiamo scelto valori diversi nelle tre parti della prova di trazione:

- parte 1: abbiamo fatto fare una deformazione da 0 a 5% con frequenza di acquisizione di 1 Hz, dopo di che abbiamo fatto i calcoli per vedere se fossero già visibili delle bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC.
- parte 2: abbiamo fatto fare una deformazione da 5 a 6% con frequenza di acquisizione di 1 Hz e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere se si fossero sviluppate altre bande o se quelle presenti si erano spostate o intensificate e per calcolare le deformazioni tramite il DIC. A questo è stato possibile osservare una zona con una maggiore intensità di bande, per questo motivo abbiamo ridotto la ROI per concentrarci su una superficie più piccola del provino, di nostro interesse.
- parte 3: abbiamo fatto fare una deformazione da 6% fino alla rottura del provino con una frequenza di acquisizione di 10 Hz e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere le bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC.

Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di 0,00357 mm/s, in modo tale da originare una velocità di deformazione di  $0,0001 \text{ mm/mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 8,7%, un limite elastico  $R_{p02}$  di 482 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 522 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore, tra la zona centrale e la zona dei raccordi superiori.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

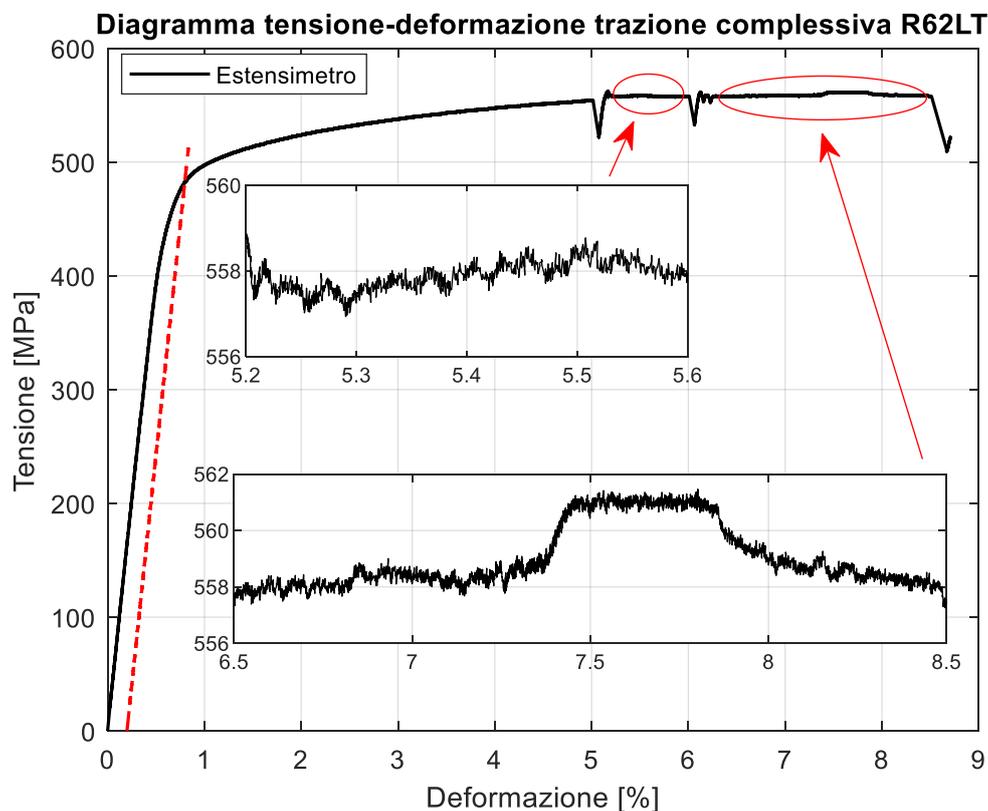


Figura 39: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R62LT.

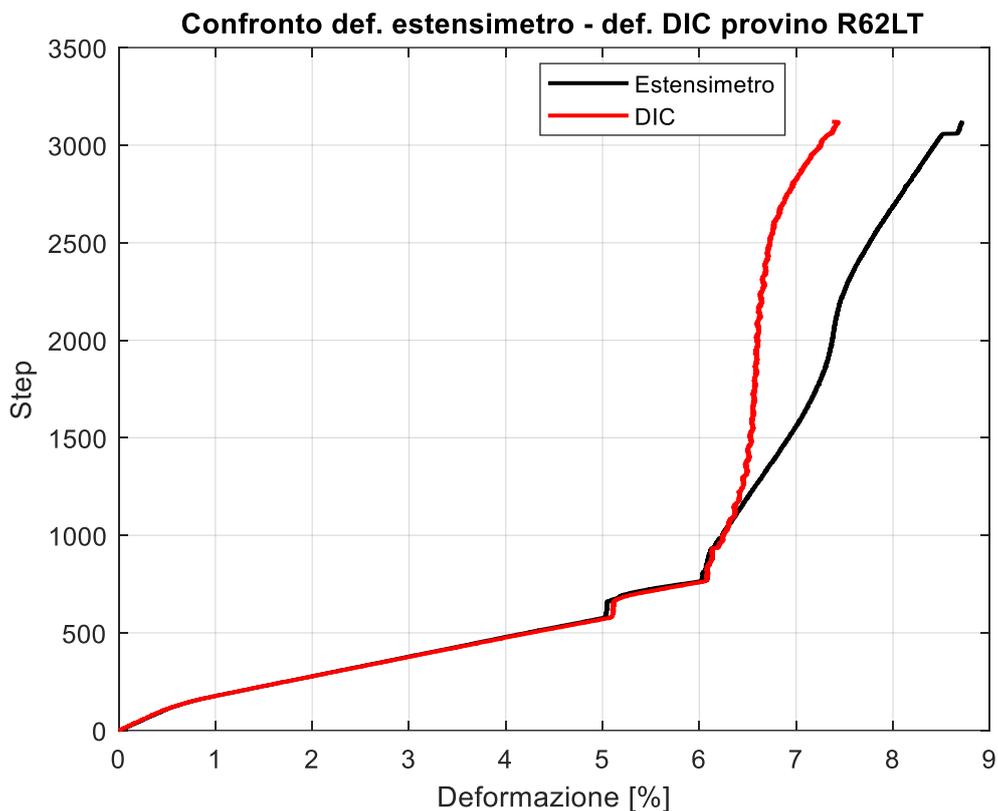


Figura 40: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono osservare alcune cose. Per cominciare i punti in corrispondenza del 5% e del 6% di deformazione, in cui si notano due cadute di tensione molto marcate, rappresentano i punti in cui la prova di trazione era stata fermata e poi fatta ripartire. La caduta di tensione è tipica del rilassamento del materiale, che si verifica quando il provino rimane fermo, per un centro lasso di tempo, durante il quale la posizione dell'attuatore rimane costante. Per quanto riguarda il resto dell'andamento della curva, questa presenta un andamento regolare e non si notano andamenti seghettati degni di nota e tipici dell'effetto PLC. Solamente poco prima del collasso del provino, in corrispondenza dell'8,4% di deformazione, si nota una caduta di tensione molto significativa.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che fino al 6,4% di deformazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC ha seguito molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Dopo questo punto, i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi di molto, da quelli misurati dall'estensimetro. Il motivo di questo errore maggiore nel calcolo delle deformazioni tramite DIC è da ricondurre al pattern che era stato realizzato sul provino, non è più riuscito a seguire la deformazione del provino e a rimanere attaccato alla superficie e quindi ha iniziato a sfaldarsi. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale relativamente alto pari a -6,44%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

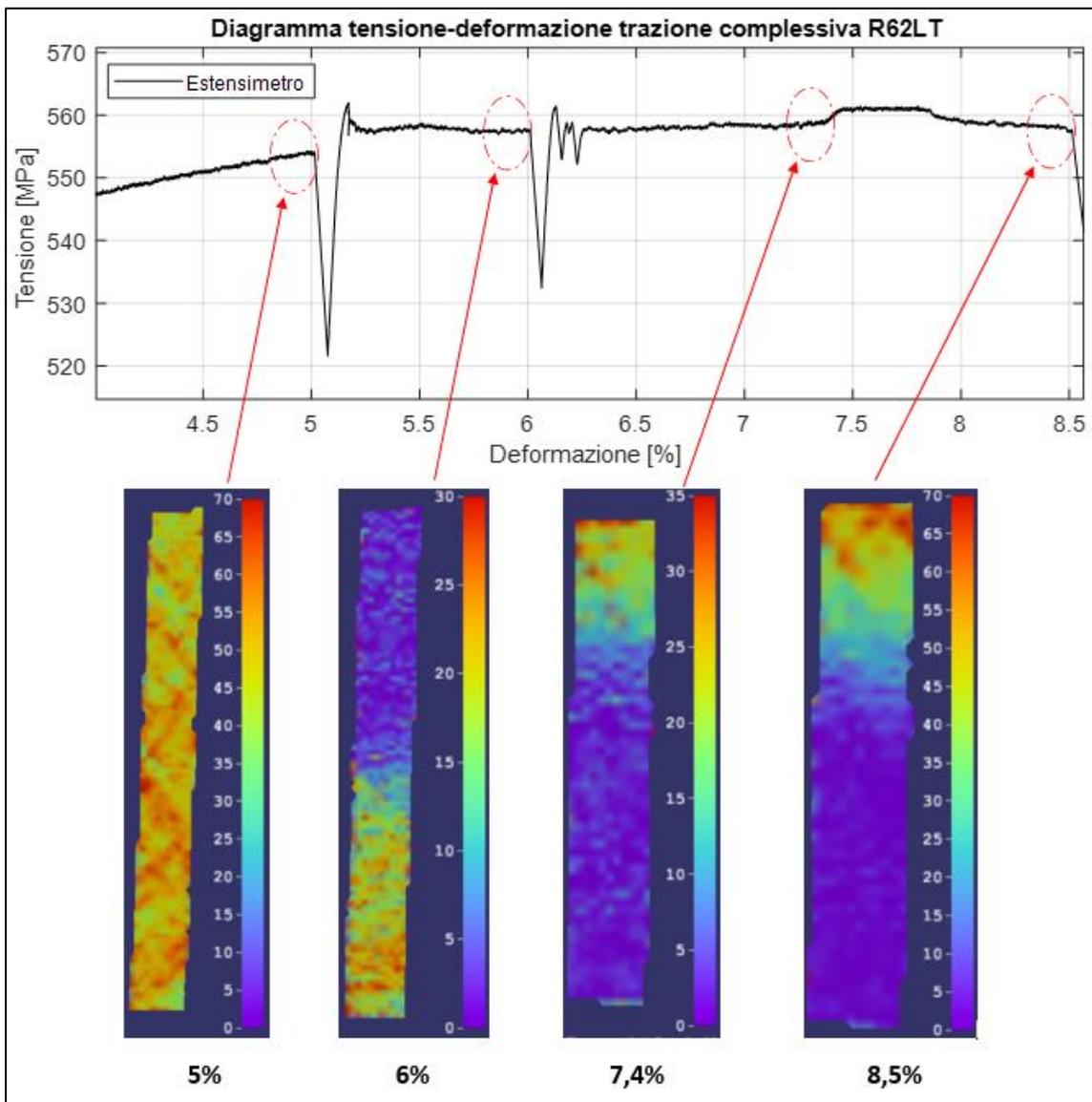


Figura 41: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che la deformazione plastica si è localizzata nella parte leggermente inferiore rispetto al centro del provino. In questo caso è stato possibile vedere che la deformazione plastica fino al 5% presentava un andamento uniforme lungo tutto il provino. In corrispondenza del 6%, la deformazione ha incominciato ad intensificarsi nella parte inferiore del provino. Nella terza parte, abbiamo ridotto la ROI alla parte inferiore del provino e si è visto che la deformazione ha continuato ad intensificarsi fino a portare il provino a rottura in quel punto. Fermando la prova e poi facendola ripartire, non è stato possibile correlare i gradienti di deformazione nelle tre diverse parti delle prove, quindi si perde l'analisi visiva della deformazione. Inoltre, non si riesce ad esprimere con assoluta certezza, il valore di deformazione localizzata raggiunto. Non si sono viste bande plastiche ben definite e con angolature ben delineate. In questo caso le deformazioni che si vedono formarsi e svilupparsi sono stazionarie e non si muovono lungo il provino.

## 7.5 Prova di trazione del provino R68L

Il quinto provino ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R68L. Questo provino presentava una larghezza media di 5,97 mm, uno spessore medio di 4,01 mm e una sezione nominale di 23,96 mm<sup>2</sup>. La prova di trazione su questo provino è stata condotta in tre parti. Durante tutte e tre le parti la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di acquisizione di 20 Hz. Per quanto riguarda la frequenza di acquisizione del DIC abbiamo scelto valori diversi nelle tre parti della prova di trazione:

- parte 1: abbiamo fatto fare una deformazione da 0 a 5% con frequenza di acquisizione di 1 Hz, dopo di che abbiamo fatto i calcoli per vedere se fossero già visibili delle bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC.
- parte 2: abbiamo fatto fare una deformazione da 5 a 6% con frequenza di acquisizione di 1 Hz e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere se si fossero sviluppate altre bande o se quelle presenti si erano spostate o intensificate e per calcolare le deformazioni tramite il DIC. A questo è stato possibile osservare una zona con una maggiore intensità di bande, per questo motivo abbiamo ridotto la ROI per concentrarci su una superficie più piccola del provino, di nostro interesse.
- parte 3: abbiamo fatto fare una deformazione da 6% fino alla rottura del provino con una frequenza di acquisizione di 10 Hz e poi abbiamo fatto i calcoli per vedere le bande e per calcolare le deformazioni tramite il DIC.

Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di 0,00357 mm/s, in modo tale da originare una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 6,86%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 491 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 556 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

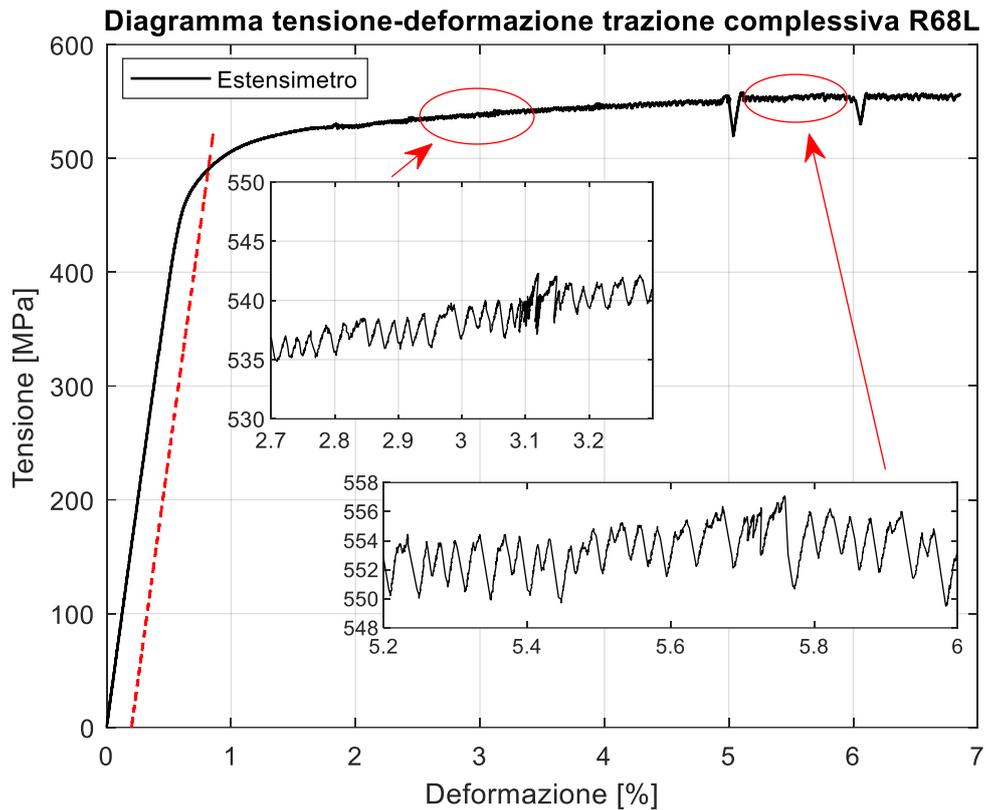


Figura 42: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R68L.

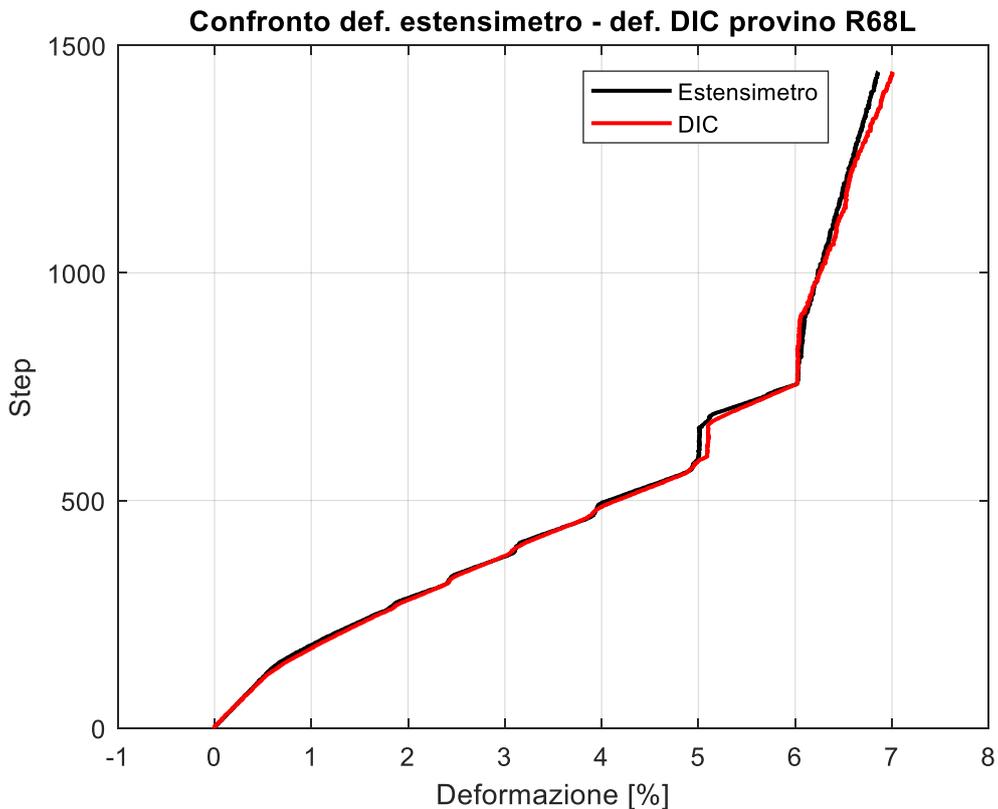


Figura 43: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare degli andamenti seghettati marcati e degni di nota, tipici dell'effetto PLC, che iniziano dopo la caduta di tensione che si manifesta in corrispondenza del 2% di deformazione. Da qui in

poi, lungo tutto il tratto della deformazione fino alla rottura, l'andamento seghettato presenta un andamento costante, che tende ad intensificarsi e ad aumentare di ampiezza verso la fine della prova. Invece, i punti in corrispondenza del 5% e del 6% di deformazione, in cui si notano due cadute di tensione molto marcate, rappresentano i punti in cui la prova di trazione era stata fermata e poi fatta ripartire.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Rispetto ai casi precedenti, il pattern sul provino è stato realizzato in modo differente. È stato spruzzato un primo strato leggero di colore bianco, abbiamo aspettato una decina di minuti che asciugasse e poi abbiamo dato il nero. Subito dopo abbiamo montato il provino sulla macchina ed eseguito la prova. Avendo lasciato la vernice ad asciugare per meno tempo, questa è rimasta meno secca e più elastica e in questo modo il pattern, durante la prova, è più riuscito a seguire meglio la deformazione del provino e a rimanere attaccato alla superficie, senza rovinarsi e sfaldarsi. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale molto basso, pari allo 0,84%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

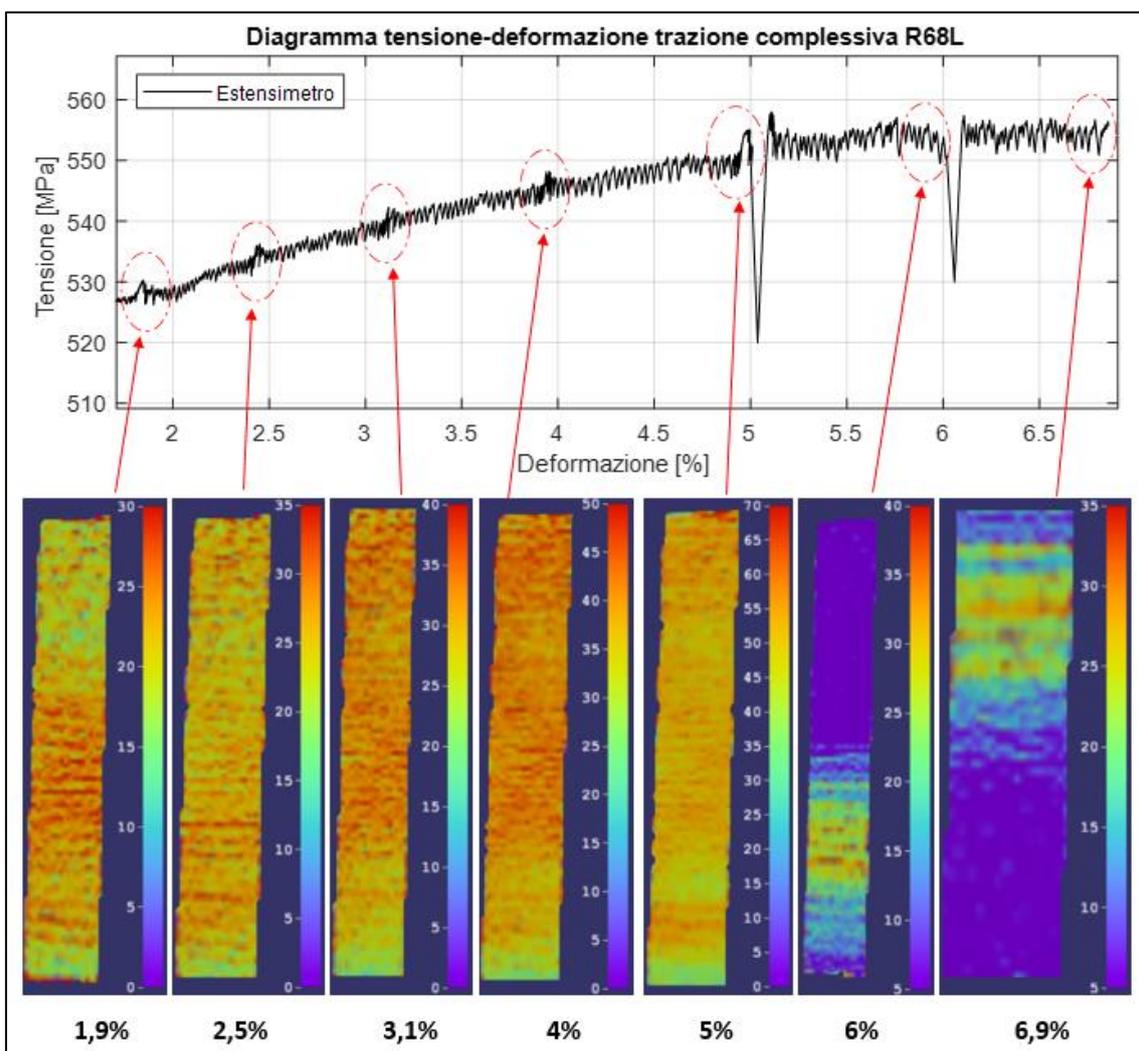


Figura 44: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che la deformazione è uniforme lungo il provino fino all'1,8%, poi poco prima del 2% di deformazione, nasce una banda nella parte inferiore, che comincia a muoversi attraverso il provino verso l'alto, attraversando tutto il provino. questo fenomeno si ripete di nuovo al 2,5%, al 3,2% e al 4% di deformazione. In questi quattro casi si vede la banda nascere in basso e attraversare il provino, verso l'alto, muovendosi come un'onda. Dopo di che la deformazione si stabilizza fino al 5%. Nella terza parte della prova, abbiamo ridotto la ROI alla parte inferiore del provino e si è visto che la deformazione ha continuato ad intensificarsi fino a portare il provino a rottura in corrispondenza della parte inferiore, subito sotto al centro del provino. In questo caso è stato possibile osservare un totale di 4 bande mobili, che nascono e si muovono lungo il provino, si tratta di bande plastiche di tipo A. Verso la fine della prova la deformazione si stabilizza, la banda diventa stazionaria di tipo B o C, in corrispondenza del punto in cui il materiale striziona, punto in cui alla fine il provino collasserà.

## 7.6 Considerazioni finali sulla prima serie di provini

Una volta concluse le prove di trazione sulla prima serie di provini abbiamo potuto trarre le seguenti conclusioni:

- grazie all'utilizzo del calibratore da 2mm, una volta superata la prima fase preliminare di messa a punto, è stato possibile ottenere sempre delle buone calibrazioni, con valori di residuum che non hanno mai superato lo 0,4; il software ha sempre riconosciuto bene i nodi della scacchiera evidenziandoli con dei cerchi verdi.
- Per quanto riguarda il calcolo delle deformazioni tramite la tecnica DIC, abbiamo potuto constatare che questo dipende molto dalle condizioni in cui si trova il pattern durante lo svolgimento della prova. Infatti, nelle prove di trazione dei provini R61LT, R67L e R62LT, i valori di deformazione calcolati dal DIC, ad un certo punto della prova, hanno incominciato a distaccarsi e a mostrare un errore, in alcuni casi anche relativamente elevato, da quelli misurati dall'estensimetro. In questi provini il pattern era stato realizzato a distanza di giorni, rispetto al giorno in cui poi è stata effettuata la prova di trazione. In questo modo la vernice del pattern si è asciugata troppo e ha perso la sua elasticità e così il pattern, non è più riuscito a seguire la deformazione del provino e a rimanere attaccato alla superficie, durante la prova di trazione. Per questo motivo è stato deciso di realizzare il pattern, aspettare una decina di minuti e poi effettuare la prova, in modo tale che la vernice non si asciugasse troppo.
- Inizialmente avevamo pensato di eseguire le prove in tre parti, in modo tale da andare a vedere alla fine di ciascuna prova dove si formavano le bande, per poi diminuire la ROI e concentrarci solo in quelle zone e aumentare la frequenza di acquisizione per analizzare meglio il fenomeno PLC. Abbiamo visto che in questo modo si perdevano molte informazioni, soprattutto per quanto riguarda i gradienti di deformazione, perché fermando la prova e poi facendola ripartire, non era stato possibile correlare i gradienti di deformazione nelle tre diverse parti delle prove, quindi si andava a perdere l'analisi visiva della deformazione, che rappresenta una delle informazioni più importanti di questo studio. Inoltre, non si riesce ad esprimere con assoluta certezza, il valore di deformazione localizzata raggiunto a livello della banda plastica. Per questo motivo nelle prove successive, abbiamo

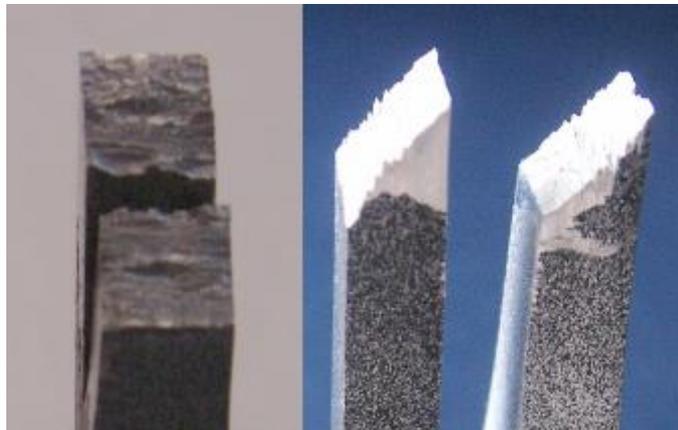
deciso di effettuarle in un'unica prova, senza interruzioni durante lo svolgimento della prova di trazione.

Nonostante questo, le prove eseguite su questi provini sono state utili per configurare e mettere a punto il sistema per le prove che sono state eseguite dopo.

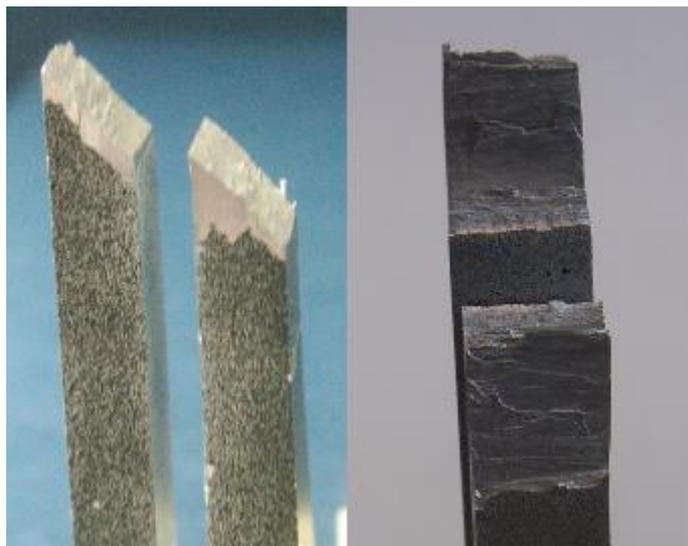
- Di seguito vengono mostrate alcune fotografie, riguardanti le superfici di frattura dei provini della prima serie:



*Figura 45: Superficie di frattura del provino R61LT. Da notare come si sia creata la delaminazione, forse dovuta a decoesione dei cristalli lungo i bordi di grano ad alto angolo.*



*Figura 46: Superficie di frattura del provino R67L inclinata a 45° rispetto alla direzione longitudinale di applicazione del carico.*



*Figura 47: A sinistra, la superficie di frattura del provino R68L, inclinata a 45° rispetto alla direzione longitudinale di applicazione del carico. A destra, la superficie di frattura del provino R60LT, che presenta una delaminazione, forse dovuta a decoesione dei cristalli lungo i bordi di grano ad alto angolo.*

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva dei dati principali relativi alle precedenti prove di trazione:

	<b>R60LT</b>	<b>R61LT</b>	<b>R67L</b>	<b>R62LT</b>	<b>R68L</b>
<b>MTS [HZ]</b>	50	50	20	20	20
<b>DIC [Hz]</b>	10	1-1-10	1	1-1-10	1-1-10
<b>Velocità spostamento pistone [mm/s]</b>	0,00357	0,00357	0,00357	0,00357	0,00357
<b>Velocità deformazione [mm/mm*s<sup>-1</sup>]</b>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
<b>Controllo prova di trazione</b>	Velocità spostamento pistone				
<b>R<sub>p02</sub> [MPa]</b>	502	486	474	482	491
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	563	569	538	562	558
<b>A%</b>	5%	7,45%	4,8%	8,7%	6,86%
<b>Tipo bande</b>	Non pervenute	Non pervenute	Non pervenute	Non pervenute	A – B – C

Tabella 3: Dati relativi alle prove di trazione della prima serie di provini.

## 8 Prove di trazione della seconda serie di provini della lega 8090-T851

In seguito alle prove di trazione relative alla prima serie di provini, si è deciso di proseguire sottoponendo alla prova di trazione uniassiale una seconda serie di provini della lega d'alluminio Al-Li-Cu-Mg 8090, sempre ricavati dalla lastra laminata tramite un taglio per elettroerosione. Lo scopo delle seguenti prove di trazione è sempre stato quello di studiare, tramite la correlazione d'immagini digitali, l'andamento della deformazione plastica, durante la prova di trazione, per osservare le diverse tipologie di bande plastiche che si sviluppano quando si verifica l'effetto Portevin-Le Chatelier e per valutare l'intensità della deformazione plastica localizzata, però in questo caso sono stati utilizzati dei provini con dimensioni differenti e dei quali si conosceva la posizione da cui è stato ricavato il provino rispetto allo spessore e alla direzione di laminazione della lastra.

Per queste prove di trazione, i provini oggetto degli esperimenti sono stati i seguenti e sono contraddistinti ciascuno da una sigla diversa: R4LS, R3TS, R1LC, R1TC. Questi campioni analizzati presentano dimensioni nominali differenti. I provini R4LS e R3TS presentavano le seguenti dimensioni nominali di sezione lungo la lunghezza utile del provino, pari a 12,6 mm di larghezza e 1,5 mm di spessore, una lunghezza del tratto utile di 75 mm, una lunghezza totale di 180 mm e una larghezza delle teste di afferraggio pari a 19 mm. I provini R1LC e R1TC

presentavano le seguenti dimensioni nominali di sezione lungo la lunghezza utile del provino, pari a 13,3 mm di larghezza e 1,9 mm di spessore, una lunghezza del tratto utile di 80 mm, una lunghezza totale di 200 mm e una larghezza delle teste di afferraggio pari a 19 mm. Ciò che differenzia i provini sono la posizione da cui è stato ricavato il provino rispetto allo spessore della lastra e alla direzione in cui essa è stata laminata. In particolare, per questi provini possiamo fare riferimento alla seguente nomenclatura:

- LS: provino ricavato dalla superficie in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- TS: provino ricavato dalla superficie in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.
- LC: provino ricavato dal cuore in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- TC: provino ricavato dal cuore in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.

Nel seguito viene riportato un esempio della geometria e delle dimensioni dei provini utilizzati in questa serie di prove:

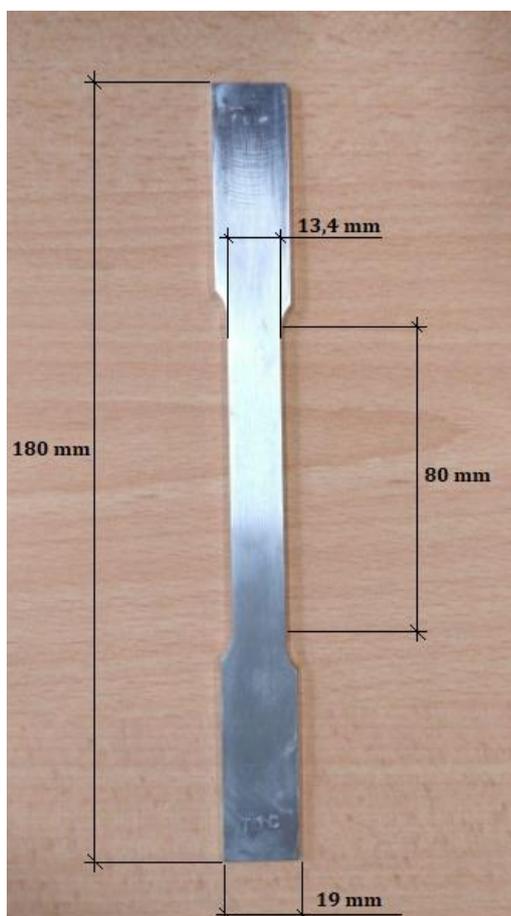


Figura 48: Dimensioni relative ai campioni della seconda serie: R4LS, R3TS, R1LC, R1TC.

Come per la prima serie di provini, anche questi hanno ricevuto lo stesso pretrattamento con carte abrasive e poi misurati. Per quanto riguarda la calibrazione del sistema è stato utilizzato il calibratore da 4mm 9x9 con scacchiera bianca su sfondo nero e poi per le prove di trazione, è stato seguito il medesimo iter utilizzato nella prima serie di prove.

Nei paragrafi a seguire, verranno mostrati in dettaglio i risultati ottenuti nelle prove di trazione di trazione, analizzate tramite la correlazione d'immagini digitali dei provini R4LS, R3TS, R1LC, R1TC.

## 8.1 Errore calibratore da 4 mm

Prima di sottoporre alla prova di trazione i provini con una lunghezza utile di 80 mm (seconda serie di provini) abbiamo provato a vedere se il calibratore, con quadrati di lato 2mm con scacchiera 9x9 nera su sfondo bianco, andava bene. Con lunghezza utile si intende il tratto di lunghezza rettilinea del provino compresa tra i due raccordi alle estremità delle teste di serraggio.

Per far questo abbiamo posizionato nelle teste di serraggio il provino in questione e abbiamo posizionato l'obiettivo della fotocamera ad una distanza tale da poter riprendere interamente il tratto di provino che ci interessava fotografare. Dopo di che abbiamo attaccato sul provino il calibratore da 2mm e abbiamo provato a calibrare il sistema. Dopo una serie di tentativi non siamo riusciti a calibrare il sistema e siamo giunti alla conclusione che il calibratore da 2mm aveva una superficie della scacchiera troppo piccola per poter essere calibrata a quella distanza. Una soluzione sarebbe stata quella di avvicinare maggiormente l'obiettivo della videocamera al provino e calibrare così ad una distanza minore, ma in questo modo non saremmo stati in grado di riprendere tutto il tratto utile del provino che ci interessava fotografare. Per questo motivo abbiamo deciso di usare un calibratore con una superficie della scacchiera maggiore e abbiamo scelto il calibratore con quadrati di lato 4 mm con scacchiera 9x9 bianca su sfondo nero. Come fatto precedentemente, abbiamo posizionato nelle teste di afferraggio il provino e poi abbiamo posizionato l'obiettivo della fotocamera ad una distanza tale da poter riprendere interamente il tratto di provino che ci interessava fotografare. Dopo di che abbiamo attaccato sul provino il calibratore da 4 mm e abbiamo provato a calibrare il sistema. A differenza di quanto accaduto con il calibratore da 2 mm, siamo riusciti subito ad effettuare un paio di calibrazioni con un valore di residuum compreso tra 0.38 e 0.42.

Il risultato ottenuto è stato positivo perché il calibratore da 4 mm aveva una superficie sufficiente a consentire una buona calibrazione alla distanza desiderata. Tuttavia, il calibratore da 4 mm, a differenza del calibratore da 2 mm della Dantec Dynamics, non è un calibratore professionale, bensì è un calibratore realizzato su Autocad e stampato su carta fotografica lucida. Per questo motivo presenta delle imperfezioni:

- I quadrati bianchi presentano una superficie maggiore sia rispetto alla superficie nominale di  $16 \text{ mm}^2$ , sia rispetto alla superficie dei quadrati neri.
- I quadrati neri presentano una superficie minore rispetto alla superficie nominale di  $16 \text{ mm}^2$ .

Per misurare gli errori sulle dimensioni l e h e sulle superfici dei quadrati bianchi e neri della scacchiera abbiamo utilizzato la seguente procedura. Abbiamo preso due micrometri collegati ad una piattaforma in modo da poter muovere la piattaforma lungo le direzioni x e y azionando i micrometri. Successivamente abbiamo attaccato il calibratore sulla piattaforma e abbiamo posizionato il tutto sotto la videocamera collegata al microscopio collegato al computer. In questo modo quando si faceva compiere uno spostamento lungo x o y, ruotando le manopole dei micrometri, sullo schermo del pc si vedeva l'immagine muoversi. Prima di iniziare a misurare le dimensioni dei quadrati della scacchiera, abbiamo allineato i bordi dei quadrati lungo le direzioni x e y della regione d'interesse delimitata dalla videocamera, per far sì che fossero il più

possibile parallele in modo tale che non si verificasse un'inclinazione nell'immagine durante lo spostamento della videocamera. Questo è stato un passaggio fondamentale nella fase di misurazione, perché se ci fosse stata un'inclinazione della piattaforma, durante lo spostamento questo avrebbe comportato degli errori nella misurazione e di conseguenza dei valori non veritieri.

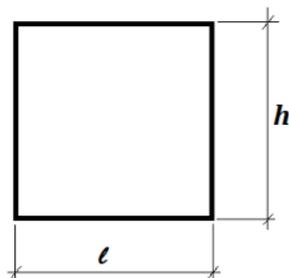


Figura 49: Quadrati di larghezza nominale  $l=4\text{mm}$  e altezza nominale  $h=4\text{mm}$  che compongono la scacchiera del calibratore da  $4\text{mm}$ .

Dopo di che abbiamo misurato la larghezza  $l$  e l'altezza  $h$  per  $n$  quadrati bianchi e neri e successivamente abbiamo calcolato, con le seguenti formule, gli errori relativi alle misurazioni effettuate e gli errori rispetto alle dimensioni nominali dei quadrati pari a  $4\text{mm}$ :

- Valore medio su  $n$  misurazioni:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- Errore massimo o incertezza:

$$e_m = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

- Errore relativo o incertezza relativa:

$$e_r = \frac{e_m}{\bar{x}}$$

- Errore relativo percentuale:

$$e_{\%} = e_r \cdot 100$$

- Errore rispetto al valore nominale:

$$e_{\%} = \frac{\text{valore misurato} - \text{valore nominale}}{\text{valore nominale}} \cdot 100$$

Con le formule sopra elencate abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

	$\bar{l}$ [mm]	$\bar{h}$ [mm]	$e_{m\%}$ su $l$	$e_{m\%}$ su $h$	$e_{\%}$ su $l$ 4mm	$e_{\%}$ su $h$ 4mm	$e_{\%}$ su $l$	$e_{\%}$ su $h$	Superficie media [mm <sup>2</sup> ]	$e_{\%}$ superficie
Quadrato bianco	4,27	4,35	9	7	6,75	8,75	2,11	1,61	18,57	16,09
Quadrato nero	3,78	3,81	3,5	6,5	-5,5	-4,9	0,93	1,71	14,39	-10,07

Tabella 4: Valori riassuntivi relativi al calibratore da  $4\text{mm}$ .

Dai valori ottenuti si può vedere come i quadrati bianchi siano effettivamente più grandi dei quadrati neri, presentando una superficie media di  $18,57 \text{ mm}^2$ , contro i  $14,39 \text{ mm}^2$  dei quadrati neri. I bianchi sono più grandi rispetto alla superficie nominale di  $16 \text{ mm}^2$  del 16,09%, mentre i quadrati neri della scacchiera sono più piccoli rispetto alla superficie nominale del 10,07%. Invece per quanto riguarda le dimensioni dei quadrati si può vedere come l'errore sia un po' più basso con dei valori che vanno da un minimo del 4,09% ad un massimo del 8,75%. Dato che nel nostro caso, vengono analizzate le deformazioni lungo l'asse y, l'asse di applicazione del carico, calcolate a partire dal campo di spostamenti lungo tale direzione, possiamo dire che l'errore più influente sia quello tra il valore misurato di h e il valore nominale di h, il cui valore massimo è del 8,75 %.

## 8.2 Prova di trazione del provino R4LS

Il primo provino della seconda serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R4LS. Questo provino presentava una larghezza media di 12,64 mm, uno spessore medio di 1,66 mm e una sezione nominale di  $20,92 \text{ mm}^2$ .

L'obiettivo era quello di condurre la prova di trazione in un'unica parte, però non è stato possibile perchè il tempo, e quindi gli step, che avevamo inizialmente impostato non sono bastati e quindi abbiamo dovuto fermare la prova, per poi farne ripartire subito un'altra fino alla rottura del provino. Poco dopo che era iniziata la seconda parte della prova il provino si è rotto, fuori dal campo di visuale della telecamera. Quindi la zona in cui il provino si è rotto non è stata ripresa dalla videocamera. Inoltre, per quanto riguarda il calcolo delle deformazioni DIC, oltre il un certo valore di deformazione, il DIC non ha più calcolato la deformazione, perché il pattern si è rovinato, si sono formate delle increspature orizzontali sulla superficie che lo hanno fatto incresparsi. Durante tutte e due le parti della prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC nella prima parte acquisiva ad una frequenza di 3.5 Hz, mentre nella seconda parte abbiamo aumentato la frequenza portandola a 5 Hz. Questa prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, impostando una velocità di  $0,0075 \text{ mm/s}$ , in modo tale da originare una velocità di deformazione di  $0,0001 \text{ mm/mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 7,74%, un limite elastico  $R_{p02}$  di 411 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 457 MPa.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

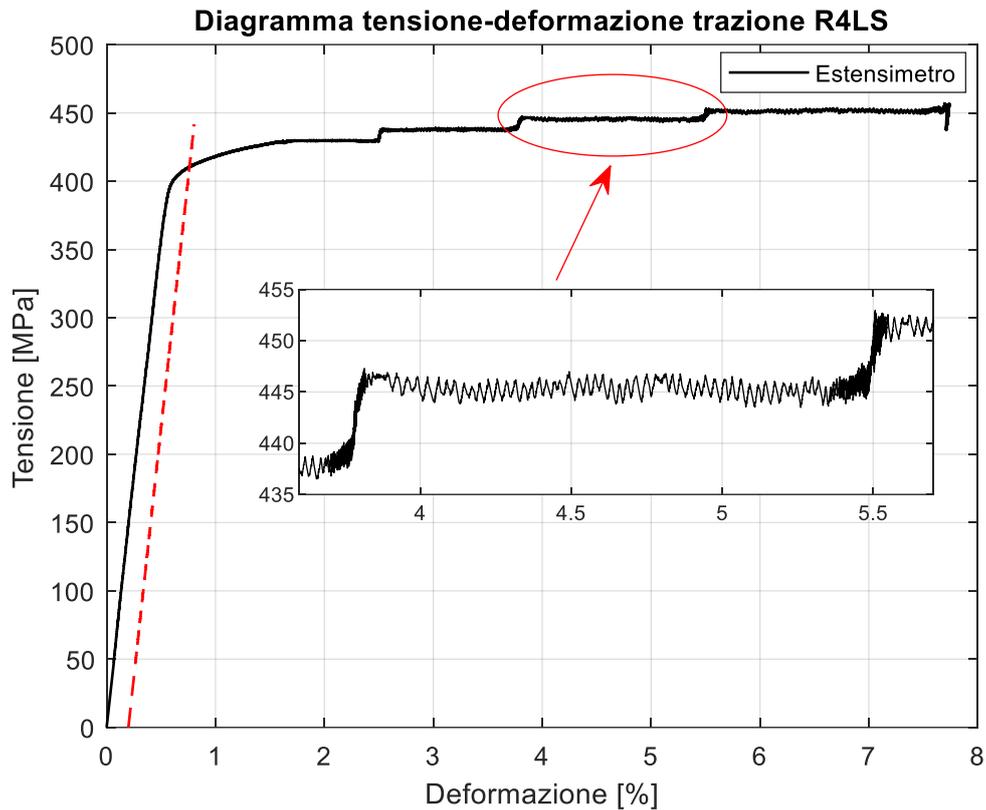


Figura 50: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R4LS.

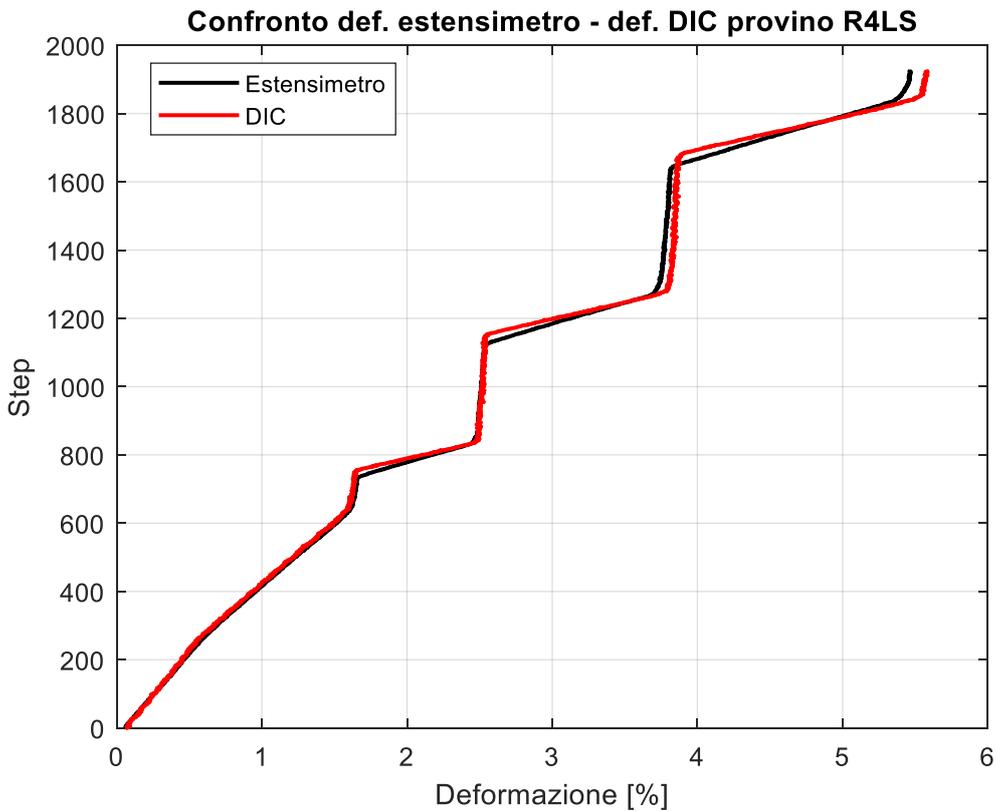


Figura 51: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione - deformazione, si possono notare tre andamenti seghettati marcati e degni di nota, tipici dell'effetto PLC, ciascuno dei quali inizia rispettivamente in corrispondenza dei gradini presenti lungo la curva tensione-

deformazione al 2,5%, 3,8% e 5,5% di deformazione. Da questi punti in poi, lungo ciascun tratto si sviluppa un andamento seghettato con ampiezza e frequenza molto costante, fino alla rottura del provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Oltre il 5,5% di deformazione, il DIC non ha più calcolato la deformazione, perché il pattern si è rovinato, si sono formate delle increspature orizzontali sulla superficie. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale molto basso, pari allo -0,61%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

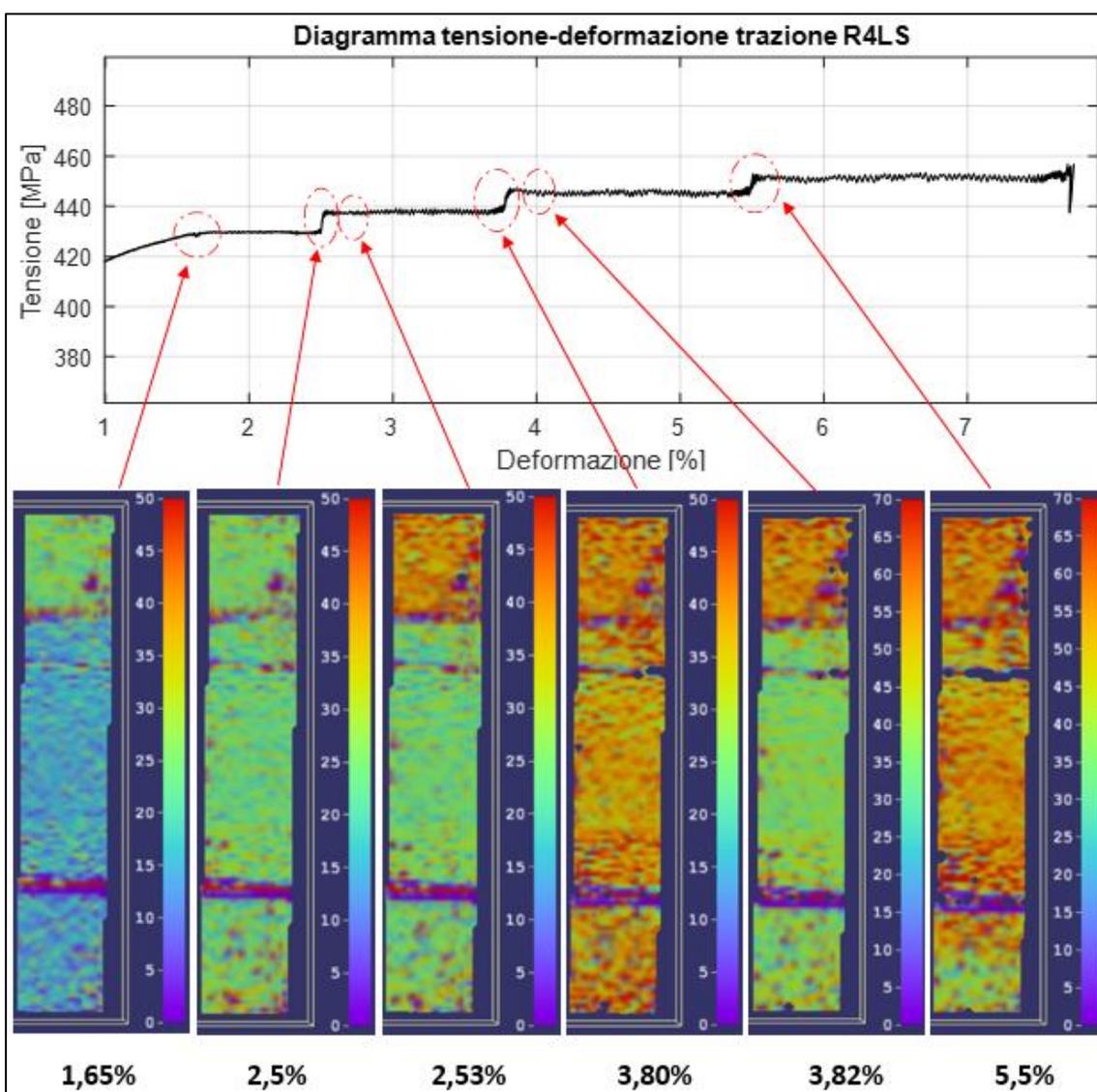


Figura 52: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione. La presenza delle due linee orizzontali viola è dovuta alla presenza delle molle di aggancio dell'estensimetro.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante va premesso che, utilizzando dei provini molto lunghi, il campo visivo che la telecamera andava a riprendere veniva disturbato dalle bacchette di aggancio dell'estensimetro al campione. Per questo motivo nelle immagini acquisite dal DIC si vedono sempre due linee orizzontali scure più o meno marcate (in questo caso è più marcata la linea

inferiore, che appare come striscia spessa di colore viola-rosso). Tale inconveniente si è prodotto in tutti i campioni di questa serie di prove. Proseguendo nell'analisi, è emerso che fino all'1,64% la deformazione rimane costante e uniforme lungo il provino. A partire dall'1,65% di deformazione nasce una banda nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 2,5%. Dopo di che la deformazione rimane uniforme fino al 2,52%. Dal 2,53% di deformazione si verifica di nuovo lo stesso fenomeno, ovvero nasce una banda nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 3,80%. Dal 3,82% di deformazione si verifica di nuovo lo stesso fenomeno, nasce una banda nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 5,5%, punto oltre il quale il DIC ha smesso di calcolare le deformazioni. Le tre bande individuate in corrispondenza dei gradini nel grafico tensione-deformazione, sono del tipo A, perché nascono all'estremo superiore del provino e poi propagano verso il basso, attraversandolo tutto. I tratti con andamento seghettato con ampiezza e frequenza regolare rappresentano la propagazione della banda. La deformazione non si è localizzata in modo evidente, ma è rimasta distribuita raggiungendo un valore dell'ordine del 7%.

### 8.3 Prova di trazione del provino R3TS

Il secondo provino della seconda serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R3TS. Questo provino presentava una larghezza media di 12,71 mm, uno spessore medio di 1,50 mm e una sezione nominale di 19,10 mm<sup>2</sup>.

Questa è stata la prima prova di trazione della serie ad essere realizzata in controllo di deformazione e l'abbiamo condotta in un'unica parte fino alla rottura del provino. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 2 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Prima di eseguire la prova in controllo di deformazione, dato che non era mai stato fatto, abbiamo dovuto impostare i parametri del computer collegato alla macchina MTS, in modo che potesse funzionare in controllo di deformazione. Per fare questo, abbiamo realizzato il tuning della macchina per impostare i guadagni PID, in modo tale da ottenere un valore di deformazione letto dall'estensimetro il più prossimo possibile al valore di deformazione impostato come input nella macchina MTS. Per ottenere l'uguaglianza tra i due valori abbiamo continuato a modificare i valori del guadagno PID, finché non abbiamo ottenuto il risultato desiderato. Alla fine, abbiamo ottenuto i seguenti valori relativi al guadagno PID:

- P = 12000
- I = 1000
- D = 2

Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 4,57%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 436 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 496 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

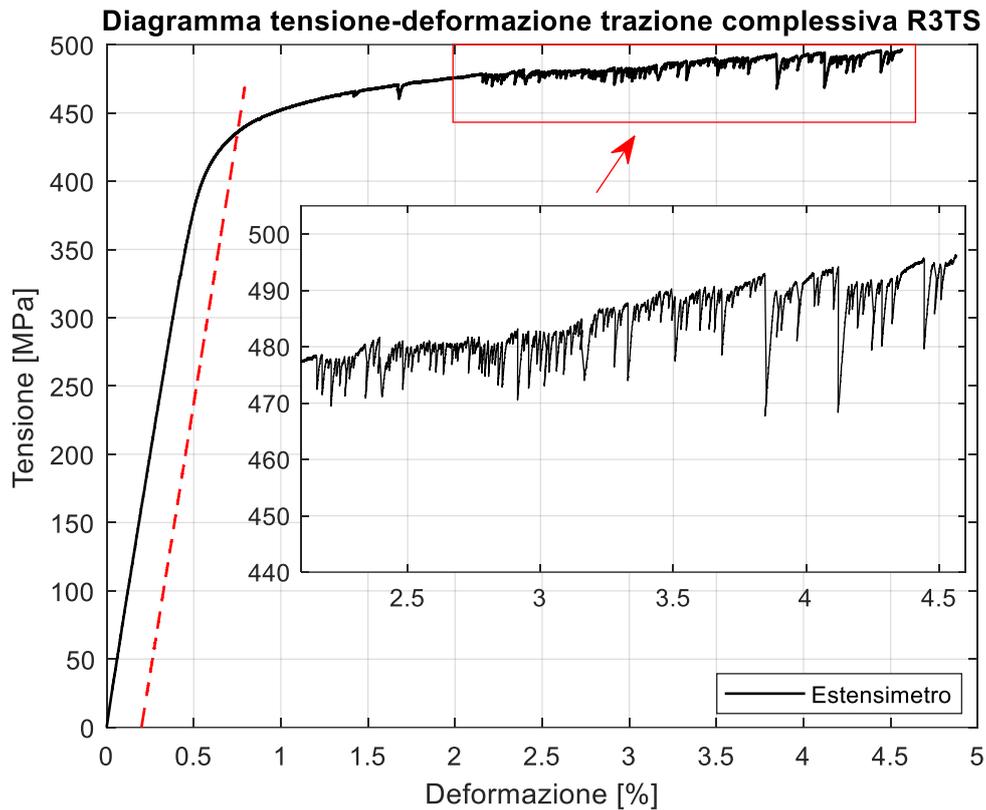


Figura 53: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R3TS.

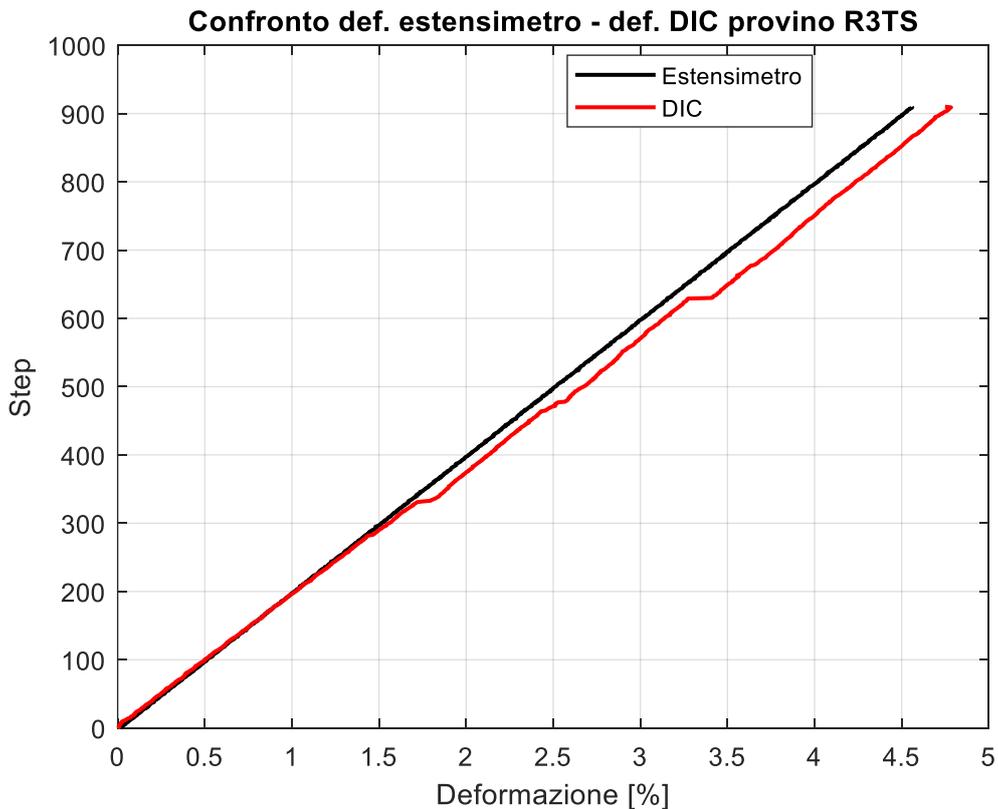


Figura 54: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati molto marcati, tipici dell'effetto PLC. In particolare, si vede una prima caduta di tensione all'1,4% di deformazione e una più marcata all'1,7%. Successivamente

dal 2,2% al 4,5% si sviluppa un andamento seghettato molto irregolare, con cadute di tensione ad ampiezza e frequenza irregolare. Si ha la formazione successiva di una serie di bande plastiche stazionarie di tipo C, fino a quando non si ottiene la rottura del provino. La nucleazione di ciascuna banda inizia rispettivamente in corrispondenza dei gradini presenti lungo la curva tensione-deformazione.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue abbastanza bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Oltre l'1,7% di deformazione, i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi un po' da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale basso, pari allo 2,11%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

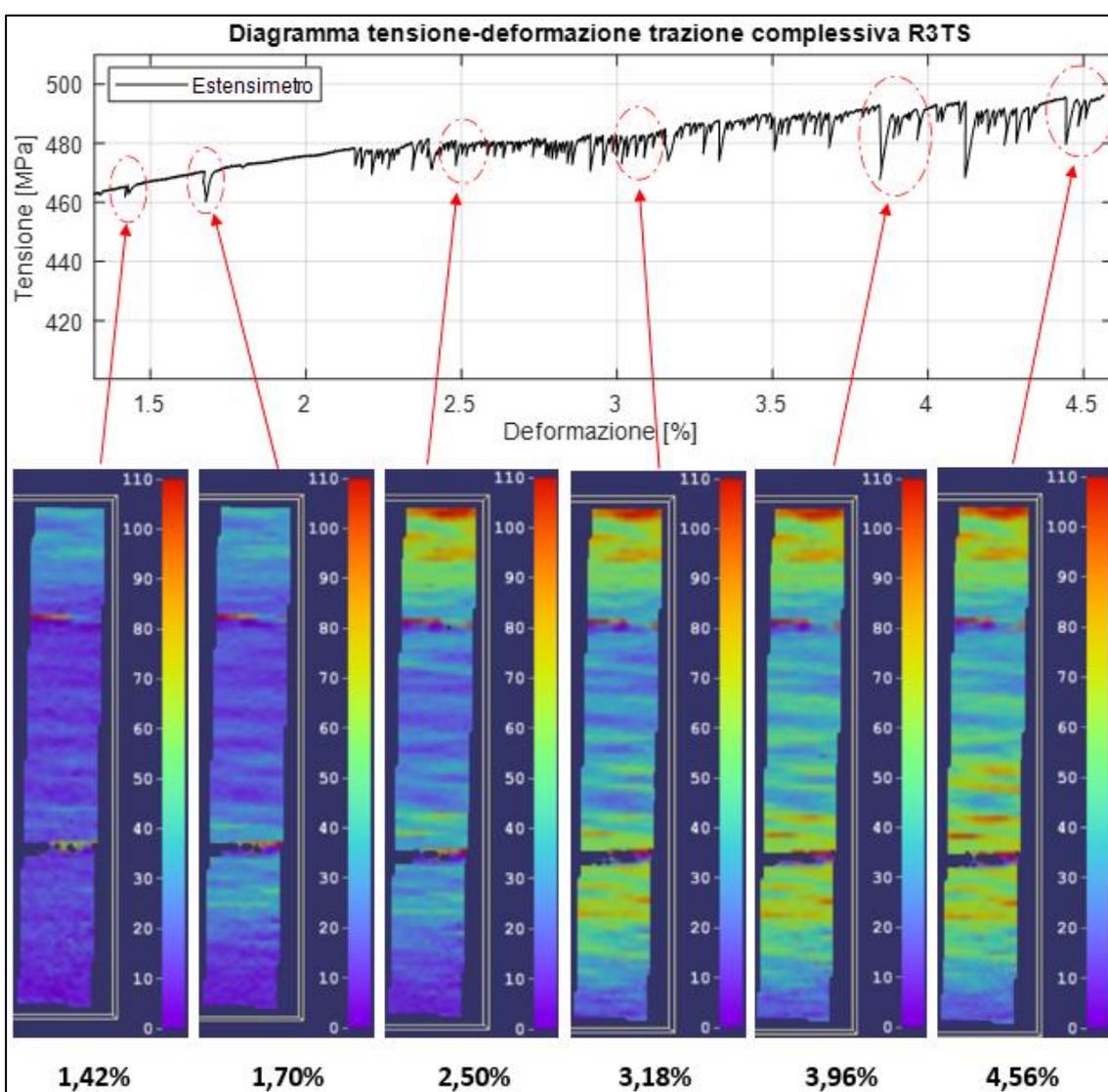


Figura 55: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione. Le due linee orizzontali non sono bande plastiche, ma le aste dell'estensimetro.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, va di nuovo ricordato che, utilizzando dei provini molto lunghi, il campo visivo che la telecamera andava a riprendere veniva intersecato dalle bacchette di aggancio dell'estensimetro al campione. Per

questo motivo nelle immagini acquisite dal DIC si vedono sempre due linee orizzontali scure più o meno marcate. Tale inconveniente si è prodotto in tutti i campioni di questa serie di prove. Facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che la deformazione rimane praticamente uniforme lungo il provino fino all'1,4% di deformazione. Dopo di che, man mano che la prova va avanti si vede che la deformazione avanza lungo la lunghezza utile del provino, dall'alto verso il basso, fino a quando non nasce una banda localizzata e stazionaria. Si ha questo comportamento per tutto il tratto seghettato evidenziato nel grafico tensione-deformazione. Quindi inizialmente la deformazione si muove lungo il provino come una oscillazione di tipo A, ad un certo punto si forma una banda di tipo B orientata orizzontalmente, che diventerà stazionaria di tipo C, intensificandosi sempre di più man mano che la prova di trazione procede nel tempo. Si può vedere come già al 2,50% di deformazione generale, in corrispondenza della banda plastica superiore di tipo C si raggiunga un valore di deformazione localizzata superiore all'11%. Il collasso del provino è stato ottenuto in corrispondenza della banda plastica all'estremo superiore al 4,56%, dove la deformazione localizzata ha raggiunto un valore superiore all'11%. Le bande che si sono formate, hanno presentato tutte un'orientazione più o meno orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale superficiale.

#### **8.4 Prova di trazione del provino R1LC**

Il terzo provino della seconda serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R1LC. Questo provino presentava una larghezza media di 13,34 mm, uno spessore medio di 1,86 mm e una sezione nominale di 24,77 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 2,5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 2,6%, un limite elastico  $R_{p02}$  di 527 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 564 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore, tra il centro e la zona dei raccordi superiori.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

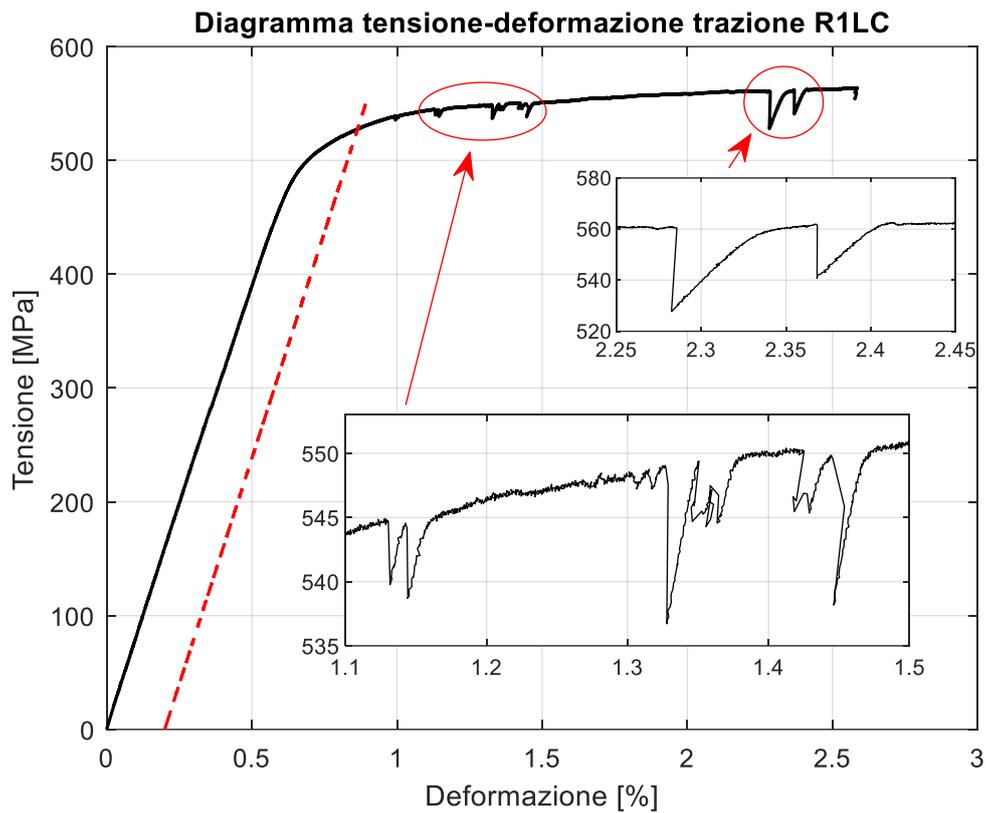


Figura 56: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R1LC.

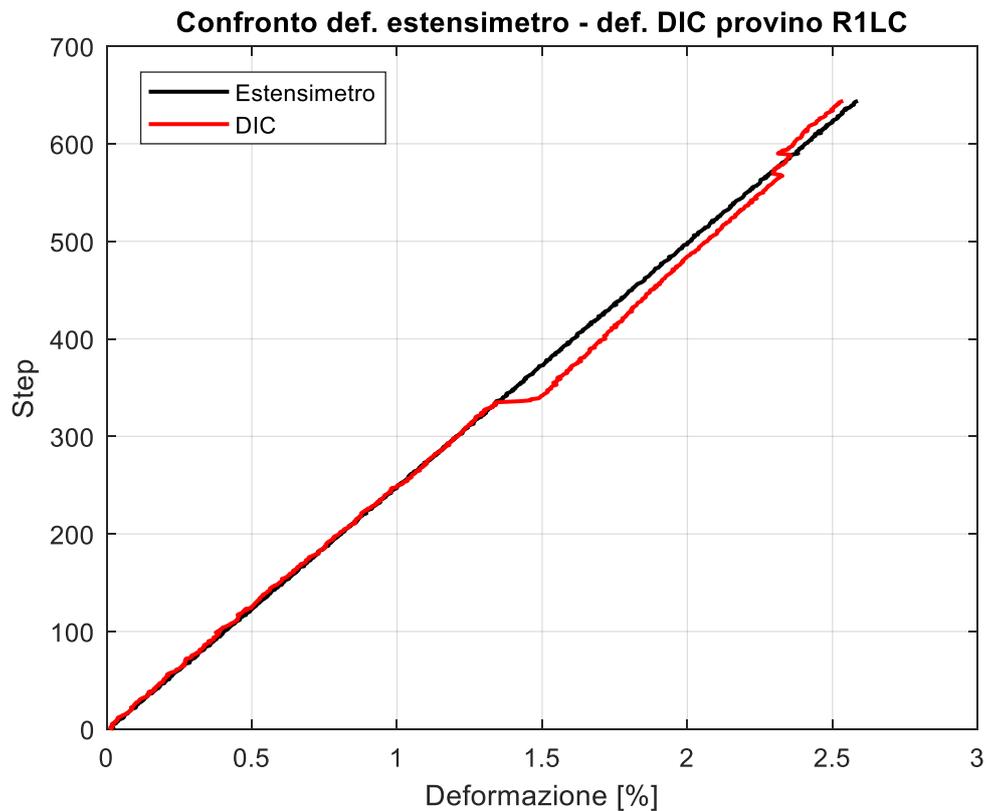


Figura 57: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dell'effetto PLC. In particolare, si possono notare delle cadute di tensione molto brusche e ampie in corrispondenza del 1,14%,

1,34%, 1,45%, 2,29%, 2,37% di deformazione. Facendo riferimento alla tipologia di andamento seghettato si può pensare che siano bande stazionarie di tipo B o C, che compaiono istantaneamente in certo punto del provino e che poi non propagano lungo il provino, perché dopo la brusca caduta di tensione non si verifica un andamento seghettato regolare tipico della propagazione. L'ultima caduta di tensione che si verifica è quella al 2,6% di deformazione e rappresenta la comparsa della banda che porta alla rottura del provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue abbastanza bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Oltre l'1,37% di deformazione, i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi un po' da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale molto basso, pari allo 0,20%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

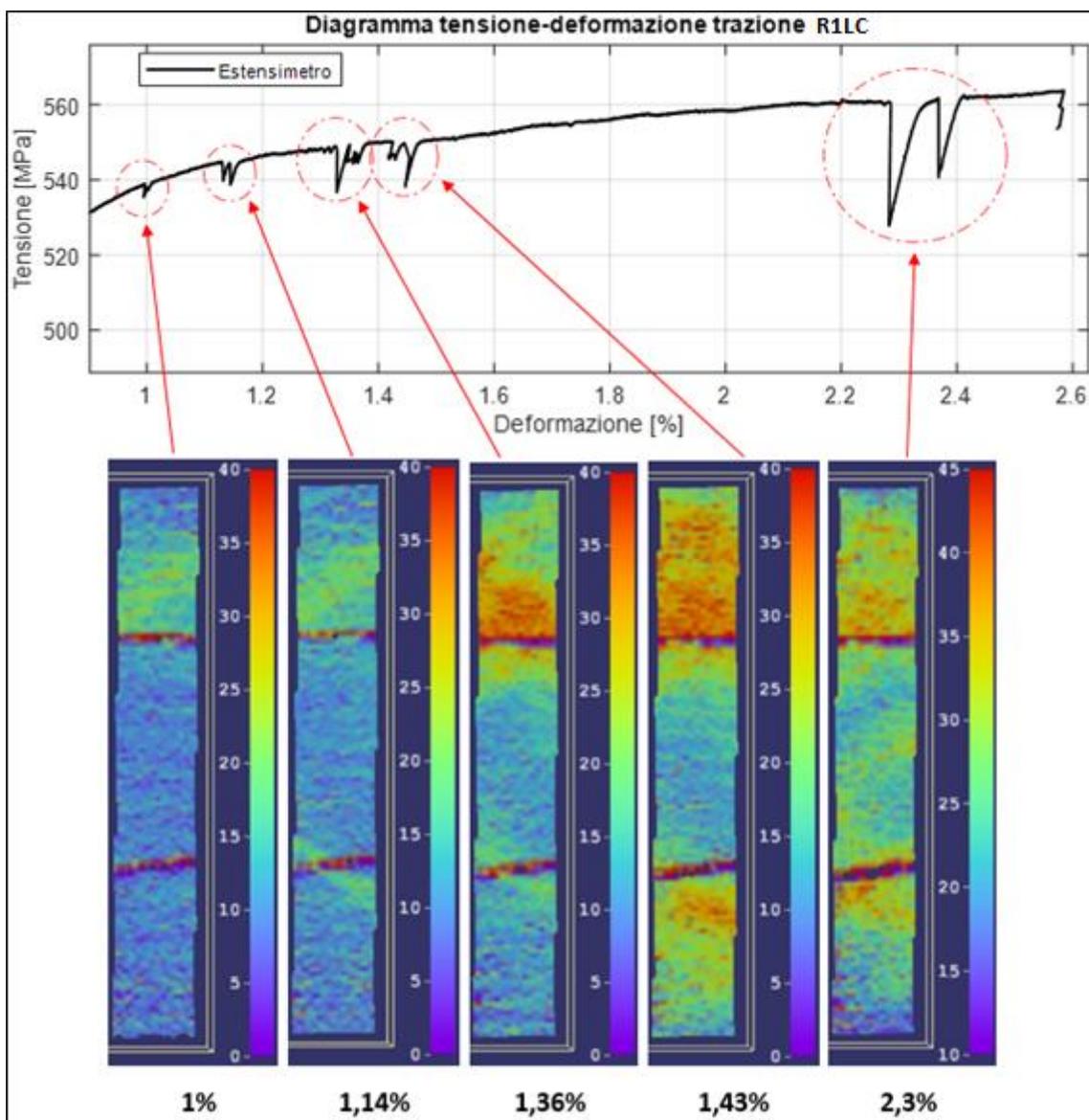


Figura 58: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione. Le due linee orizzontali non sono bande plastiche, ma le aste dell'estensimetro.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che rimane uniforme lungo il provino fino a poco prima dell'1% di deformazione. Dopo di che, in corrispondenza dell'1% e 1,4% si formano due bande oblique a 45° localizzate e stazionarie di tipo B o C. Al 1,36% si forma un'altra banda localizzata e stazionaria di tipo B o C nella stessa zona superiore e si vede che la deformazione localizzata è già superiore al 4%. Stessa cosa avviene al 1,43% nella zona inferiore. Dopo di che la deformazione si intensifica, non più di tanto, in questi punti fino alla rottura che si ha al 2,59%, raggiungendo valori di deformazione localizzata intorno al 4%. Le bande che si sono formate, hanno presentato tutte un'orientazione di circa 45° rispetto alla direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino longitudinale centrale.

## 8.5 Prova di trazione del provino R1TC

Il quarto provino della seconda serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R1TC. Questo provino presentava una larghezza media di 13,37 mm, uno spessore medio di 1,90 mm e una sezione nominale di 25,36 mm<sup>2</sup>. La prova di trazione è stata condotta in due parti: nella prima parte da 0 a 5% di deformazione, la seconda parte da 5% fino a rottura. Avevamo aggiunto la seconda parte della prova, perché avevamo pensato che il tempo che gli avevamo dato inizialmente non sarebbe stato sufficiente a registrare tutta la prova. Questo provino poi si è rotto dopo 10s dall'inizio della seconda parte della prova. Durante entrambe le parti della prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC nella prima parte acquisiva ad una frequenza di 3,5 Hz, mentre nella seconda ad una frequenza di 6 Hz. Entrambe le prove di trazione sono state condotte in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 5,1%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 494 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 565 MPa e il provino si è rotto nella parte inferiore, tra il centro e la zona dei raccordi inferiori.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

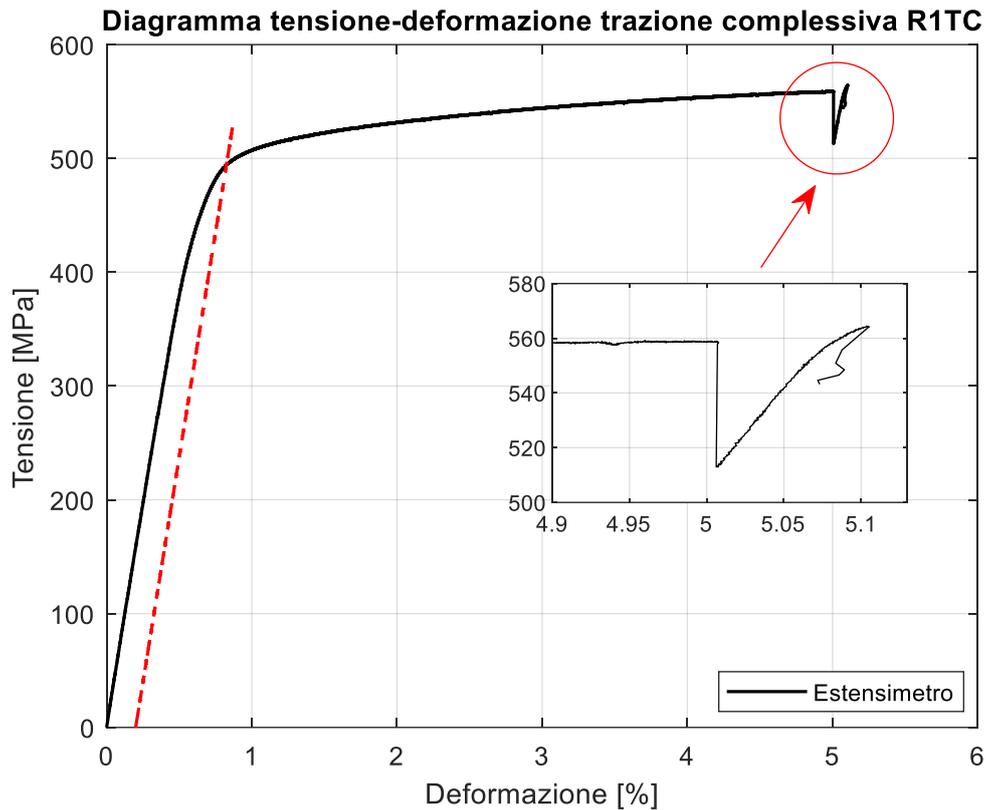


Figura 59: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R1TC.

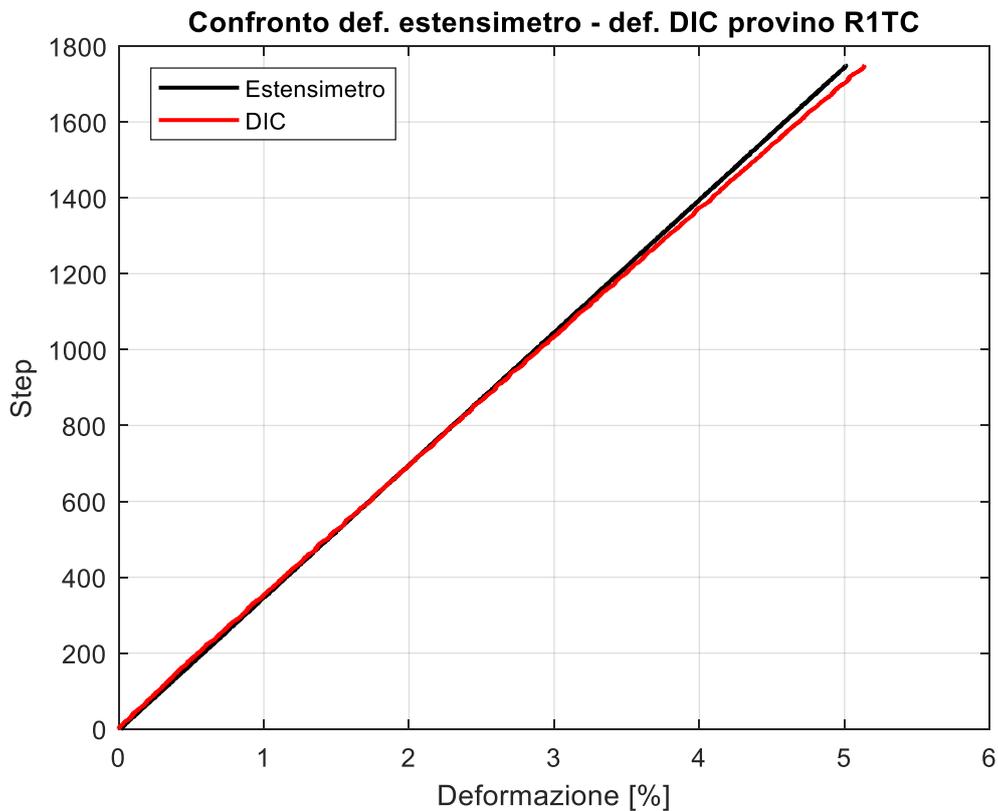


Figura 60: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono vedere alcune cose. Per cominciare il punto in corrispondenza del 5% di deformazione, in cui si nota una caduta di tensione molto marcata, rappresenta il punto in cui la prova di trazione era stata

fermata e poi fatta ripartire. La caduta di tensione è tipica del rilassamento del materiale, che si verifica quando il provino rimane fermo, per un centro lasso di tempo, durante il quale il provino rimane nella stessa posizione, perché la posizione dell'attuatore rimane costante. Per quanto riguarda il resto dell'andamento della curva, non si notano andamenti seghettati particolari e degni di nota, tipici dell'effetto PLC.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale molto basso, pari allo -0,12%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

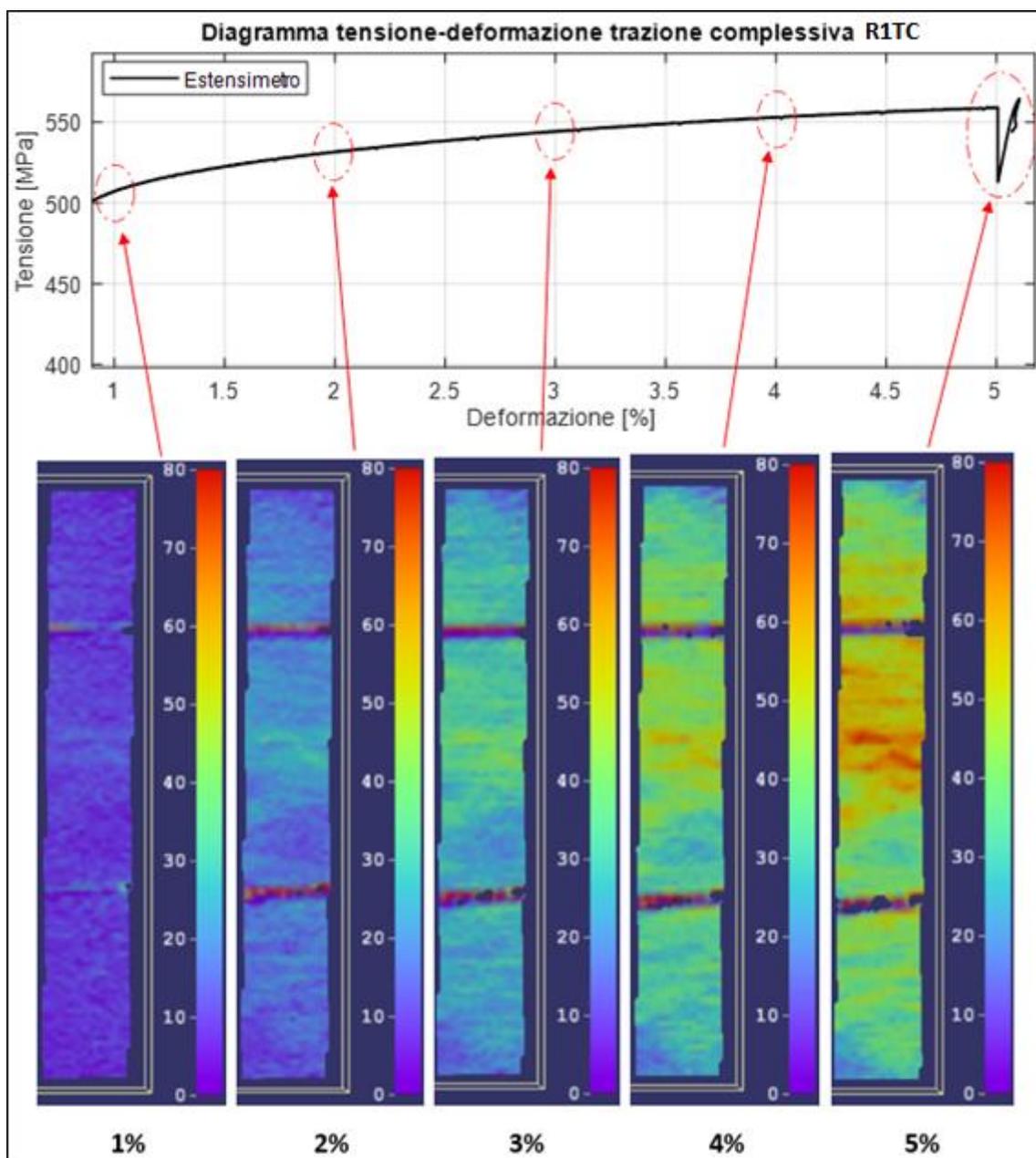


Figura 61: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione. Le due linee orizzontali non sono bande plastiche, ma le aste dell'estensimetro.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che a differenza dei due casi precedenti, in cui si è potuto osservare la formazione di bande plastiche ben delineate, in questo caso non si nota la nucleazione di nessuna banda. Infatti, l'andamento del grafico tensione deformazione è molto regolare, lineare e privo di cadute di tensione tipiche dell'effetto PLC. Dalle immagini DIC registrate si vede che la deformazione cresce progressivamente a partire dall'1% intensificandosi sempre di più nella zona centrale fino al 5%, dove si formano progressivamente due bande plastiche stazionarie di tipo C con un'orientazione orizzontale. In questo punto si ha la rottura del provino e si raggiunge un valore di deformazione localizzata dell'8%. Le bande che si sono formate, hanno presentato tutte un'orientazione più o meno orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale centrale, formato pochi cristalli grossi e allungati lungo la direzione di laminazione.

## 8.6 Considerazioni finali sulla seconda serie di provini

Una volta concluse le prove di trazione sulla seconda serie di provini abbiamo potuto trarre le seguenti conclusioni:

- Come per la prima serie di provini, anche con la seconda serie, tramite l'utilizzo del calibratore da 4mm, è stato possibile ottenere sempre delle buone calibrazioni, ottenendo dei valori di residuum sempre intorno allo 0,35.
- Per quanto riguarda il calcolo delle deformazioni tramite la tecnica DIC, abbiamo potuto constatare che questo dipende molto dalle condizioni in cui si trova il pattern durante lo svolgimento della prova. Infatti, nella prova di trazione del provino R4LS, il DIC ad un certo punto della prova, non è più stato in grado di calcolare i valori di deformazione, molto probabilmente per via di un danneggiamento del pattern superficiale.  
Un altro inconveniente riscontrato è stato quello che utilizzando dei provini molto lunghi il campo visivo che la telecamera andava a riprendere veniva disturbato dalle bacchette dell'estensimetro. Per questo motivo nelle immagini acquisite dal DIC si vedono sempre due linee orizzontali. Per le prove di trazione successive è stato deciso di utilizzare dei provini più corti, in modo tale da avere le bacchette dell'estensimetro fuori dal campo d'interesse della telecamera, eliminando così il problema.
- Realizzando le prove di trazione in un'unica, è stato possibile ottenere delle correlazioni di immagini digitali senza perdere informazioni, soprattutto per quanto riguarda i gradienti di deformazione, perché fermando la prova e poi facendola ripartire, non era stato possibile correlare i gradienti di deformazione nelle tre diverse parti delle prove, quindi si andava a perdere l'analisi visiva della deformazione. In questo modo, realizzando prove di trazione senza interruzioni, è stato possibile esprimere con una buona certezza, la tipologia di bande plastiche che si sono formate e i valori di deformazione localizzata raggiunti in esse.

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva dei dati principali relativi alle precedenti prove di trazione:

	<b>R4LS</b>	<b>R3TS</b>	<b>R1LC</b>	<b>R1TC</b>
<b>Frequenza MTS [HZ]</b>	20	20	20	20
<b>Frequenza DIC [Hz]</b>	3,5	2	2,5	3,5
<b>Velocità spostamento pistone [mm/s]</b>	0,00357	0,00357	0,00357	0,00357
<b>Velocità deformazione [mm/mm*s<sup>-1</sup>]</b>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
<b>Controllo prova di trazione</b>	Velocità spostamento pistone	Velocità deformazione	Velocità deformazione	Velocità deformazione
<b>R<sub>p02</sub> [MPa]</b>	411	436	527	494
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	457	496	564	565
<b>A%</b>	7,74%	4,57%	2,6%	5,1%
<b>Tipo bande</b>	A	A - B - C	B - C	C

*Tabella 5: Dati relativi alle prove di trazione della seconda serie di provini.*

## **9 Prove di trazione della terza serie di provini della lega 8090-T851**

In seguito alle prove di trazione relative alla prima seconda di provini, si è deciso di proseguire sottoponendo alla prova di trazione uniassiale una terza serie di provini della lega d'alluminio Al-Li-Cu-Mg 8090, sempre ricavati dalla lastra laminata tramite un taglio per elettroerosione. Lo scopo delle seguenti prove di trazione è sempre stato quello di studiare, tramite la correlazione d'immagini digitali, l'andamento della deformazione plastica, durante la prova di trazione, per osservare le diverse tipologie di bande plastiche che si sviluppano quando si verifica l'effetto Portevin Le Chatelier e per valutare l'intensità della deformazione plastica localizzata, però in questo caso sono stati utilizzati dei provini con dimensioni differenti. In particolare, questi provini sono stati ricavati dalla stessa tipologia dei provini della seconda serie, tagliandoli e fresandoli, in modo tale da ottenere due provini di dimensione più piccoli da un unico provino della seconda serie, dei quali si conosceva sempre la posizione da cui è stato ricavato il provino rispetto allo spessore e alla direzione di laminazione della lastra.

Per queste prove di trazione, i provini oggetto degli esperimenti sono stati i seguenti e sono contraddistinti ciascuno da una sigla diversa: R6LS, R7LC, R4LI, R8LS, R6LC, R5LC, R5LS, R1LI, R5TS, R2TI, R4TC, R3TI, R5TC, R6TS, R6TC, R4TI, R7TS. Questi campioni analizzati presentavano le seguenti dimensioni nominali di sezione lungo la lunghezza utile del provino, pari a 6,60 mm di larghezza e 1,70 mm di spessore, una lunghezza del tratto utile di 35

mm, una lunghezza totale di 96 mm e una larghezza delle teste di afferraggio pari a 19 mm e 12,5 mm. Ciò che differenzia i provini sono la posizione da cui è stato ricavato il provino rispetto allo spessore della lastra e alla direzione in cui essa è stata laminata. In particolare, per questi provini possiamo fare riferimento alla seguente nomenclatura:

- LS: provino ricavato dalla superficie in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- LI: provino ricavato dalla zona intermedia tra superficie e cuore, in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- LC: provino ricavato dal cuore in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione.
- TS: provino ricavato dalla superficie in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.
- TI: provino ricavato dalla zona intermedia tra superficie e cuore, in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.
- TC: provino ricavato dal cuore in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.

Nel seguito viene riportato un esempio della geometria e delle dimensioni dei provini utilizzati in questa serie di prove:

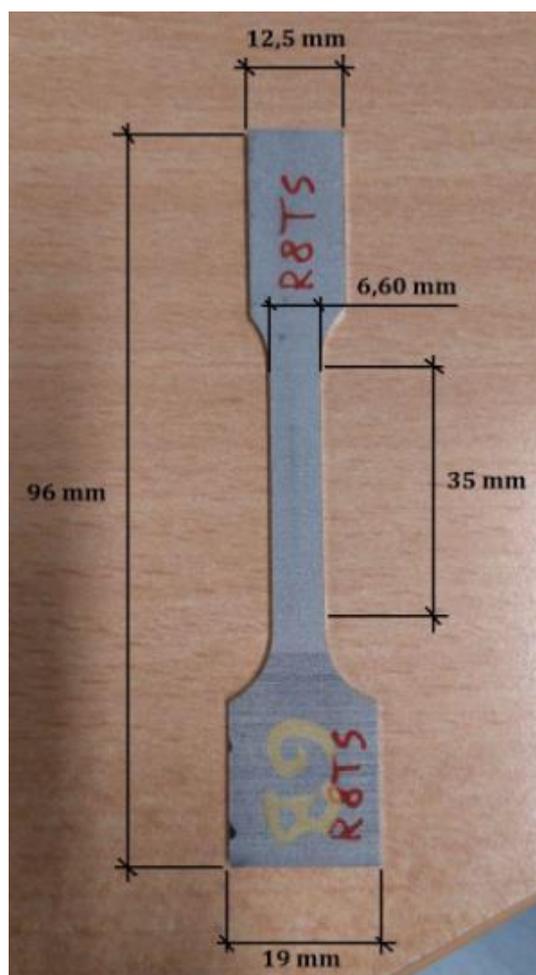


Figura 62: Dimensioni relativi ai campioni della terza serie: R6LS, R7LC, R4LI, R8LS, R6LC, R5LC, R5LS, R1LI, R5TS, R2TI, R4TC, R3TI, R5TC, R6TS, R6TC, R4TI, R7TS.

Come per la prima e seconda serie di provini, anche questi hanno ricevuto lo stesso pretrattamento con carte abrasive e poi misurati. Per quanto riguarda la calibrazione del sistema è stato utilizzato il calibratore da 2mm e per le prove di trazione, è stato seguito il medesimo iter.

Nei paragrafi a seguire, verranno mostrati in dettaglio i risultati ottenuti nelle prove di trazione di trazione, analizzate tramite la correlazione d'immagini digitali dei provini R6LS, R7LC, R4LI, R8LS, R6LC, R5LC, R5LS, R1LI, R5TS, R2TI, R4TC, R3TI, R5TC, R6TS, R6TC, R4TI, R7TS.

## 9.1 Prova di trazione del provino R6LS

Il primo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R6LS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,63 mm, uno spessore medio di 1,70 mm e una sezione nominale di 11,27 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 3 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 6,1%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 414 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 460 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore, poco sotto il raccordo superiore.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

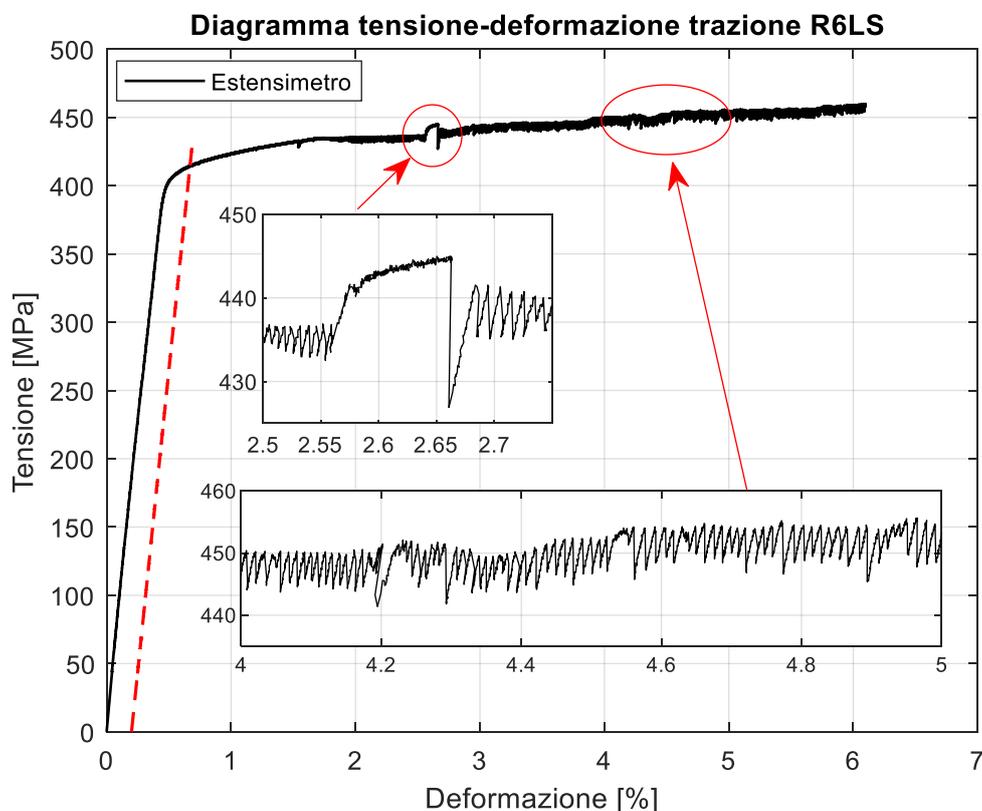


Figura 63: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R6LS.

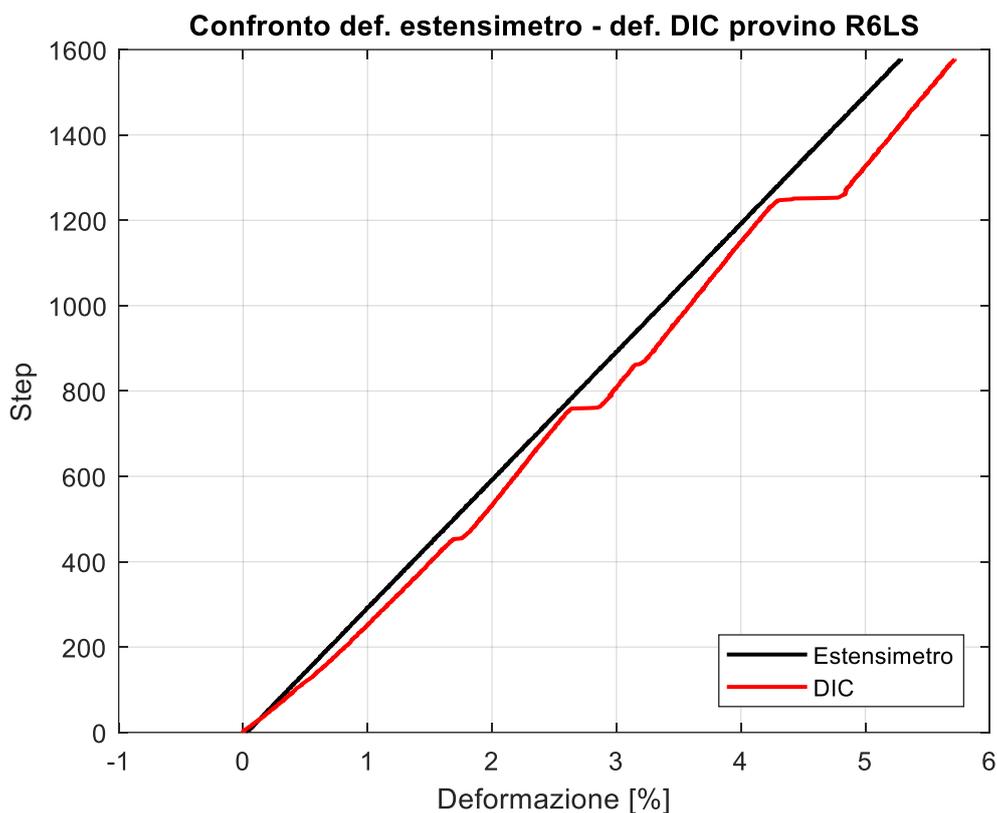


Figura 64: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dell'effetto PLC. In particolare, si vedono due cadute di tensione più marcate e ampie, una più piccola in corrispondenza dell'1,5% e una seconda molto più intensa in corrispondenza del 2,5%. Il resto della curva tensione-deformazione presenta un andamento seghettato regolare e costante. Facendo riferimento alla tipologia di andamento seghettato si può pensare che, i punti in cui ci sono le cadute di tensione più marcate, siano i punti in cui si ha la formazione della banda presumibilmente di tipo A, che con il procedere della prova propagano e s'intensificano fino a diventare bande stazionarie di tipo C. Per quanto riguarda i tratti con andamento seghettato più regolare potrebbero rappresentare la propagazione della banda lungo il provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue abbastanza bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Nei punti in corrispondenza del 1,7%, 2,6% e 4,2% i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi maggiormente da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari all' 8,93%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

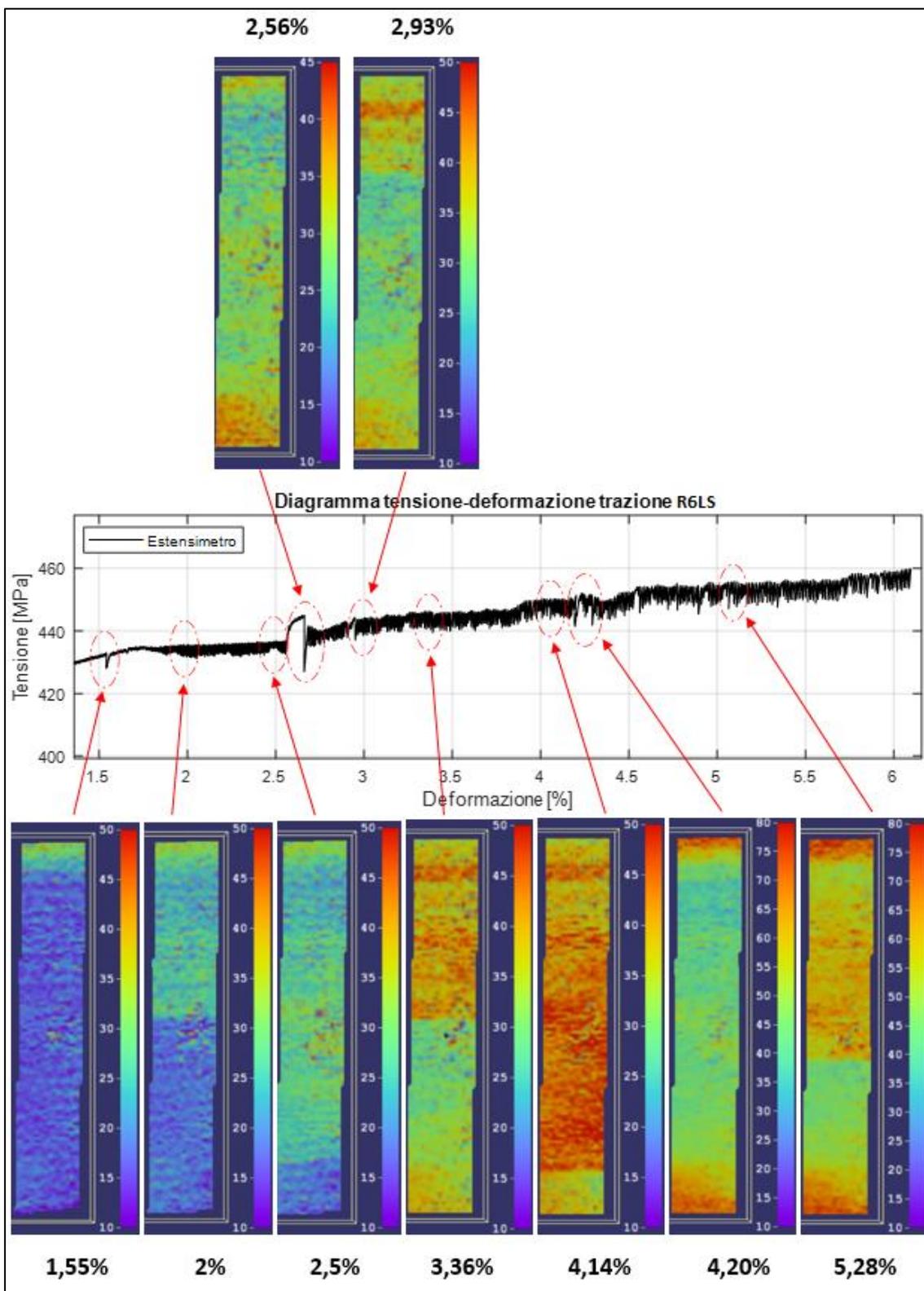


Figura 65: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, si può vedere che fino all'1,5% la deformazione rimane costante e uniforme lungo il provino. A partire dall'1,55% di deformazione nasce una banda orizzontale di tipo A nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 2,5%. Dopo di che la deformazione rimane uniforme fino al 2,52%. In corrispondenza del 2,56% di deformazione si verifica di nuovo la nascita di una banda di tipo A nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi

attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 4,14%. Si può vedere come i tratti con andamento seghettato con ampiezza e frequenza costanti, siano i tratti in cui la banda si muove attraverso il provino. Al 4,2% di deformazione si vede che ci sono due bande localizzate di tipo C agli estremi dell'area d'interesse. Il 4,2% di deformazione è anche il punto in cui si verifica per la terza volta la nascita di una banda di tipo A nella parte superiore del provino, che comincia a muoversi attraverso il provino verso il basso, attraversandolo tutto, fino al 5,2%, punto oltre il quale il DIC ha smesso di calcolare le deformazioni. Le tre bande individuate in corrispondenza del 1,55%, 2,56% e 4,2%, sono del tipo A, perché nascono all'estremo superiore del provino e poi propagano verso il basso, attraversandolo tutto. I tratti con andamento seghettato con ampiezza e frequenza regolare rappresentano la propagazione delle bande plastiche.

## 9.2 Prova di trazione del provino R7LC

Il secondo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R7LC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,54 mm, uno spessore medio di 1,71 mm e una sezione nominale di 11,16 mm<sup>2</sup>. Dato che questi provini presentavano una finitura superficiale, dovuta al taglio per elettroerosione, simile ad un pattern naturale, abbiamo provato a fare le prove di trazione senza realizzare il pattern sulla superficie usando le vernici bianca e nera. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 20 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 3,32%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 511 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 565 MPa. Per quanto riguarda l'analisi DIC, alla fine della prova la macchina si è bloccata e tutti i dati sono andati persi e quindi non è stato possibile analizzare la deformazione plastica tramite la correlazione d'immagini digitali.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS.

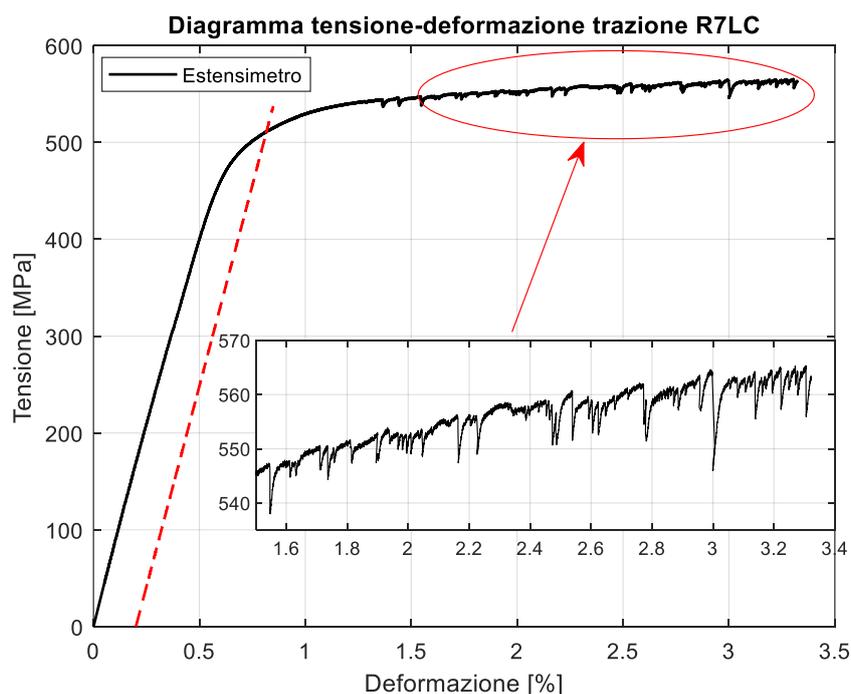


Figura 66: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R7LC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare degli andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dell'effetto PLC. In particolare, si vede che fino all'1,3% la curva è molto regolare, da qui in poi si osservano molte cadute di tensione marcate, ampie e irregolari tipiche dei provini centrali, lungo tutta la curva fino al punto di collasso del provino. Facendo riferimento alla tipologia di andamento seghettato si può pensare che, in corrispondenza delle cadute di tensione si sia avuta la formazione di bande di tipo stazionario di tipo B e C, che dopo essersi formate, sono rimaste stazionarie e in esse la deformazione localizzata si è intensificata fino a portare alla rottura del provino.

### 9.3 Prova di trazione del provino R4LI

Il terzo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R4LI. Questo provino presentava una larghezza media di 6,69 mm, uno spessore medio di 1,70 mm e una sezione nominale di 11,35 mm<sup>2</sup>. Come per il provino precedente, dato che questi provini presentavano una finitura superficiale, dovuta al taglio per elettroerosione, simile ad un pattern naturale, abbiamo provato a fare le prove di trazione senza realizzare il pattern sulla superficie usando le vernici bianca e nera. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 15 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A_{\%}$  del 4%, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 447 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 503 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore, poco sotto la zona dei raccordi superiori. Per quanto riguarda l'analisi DIC, questa prova è andata bene e i valori DIC sono stati registrati correttamente alla fine della prova, però durante la parte di calcolo il DIC ad un certo punto ha smesso di riconoscere i riferimenti da un certo step in poi e quindi non è più stato in grado di calcolare il campo di spostamenti e di conseguenza i valori di deformazione. Il pattern naturale del provino, dato dall'operazione di taglio con elettroerosione, non va bene, perchè forse risulta essere troppo fine e omogeneo per il software. Quindi alla fine rimangono solo i dati letti dall'estensimetro.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS.

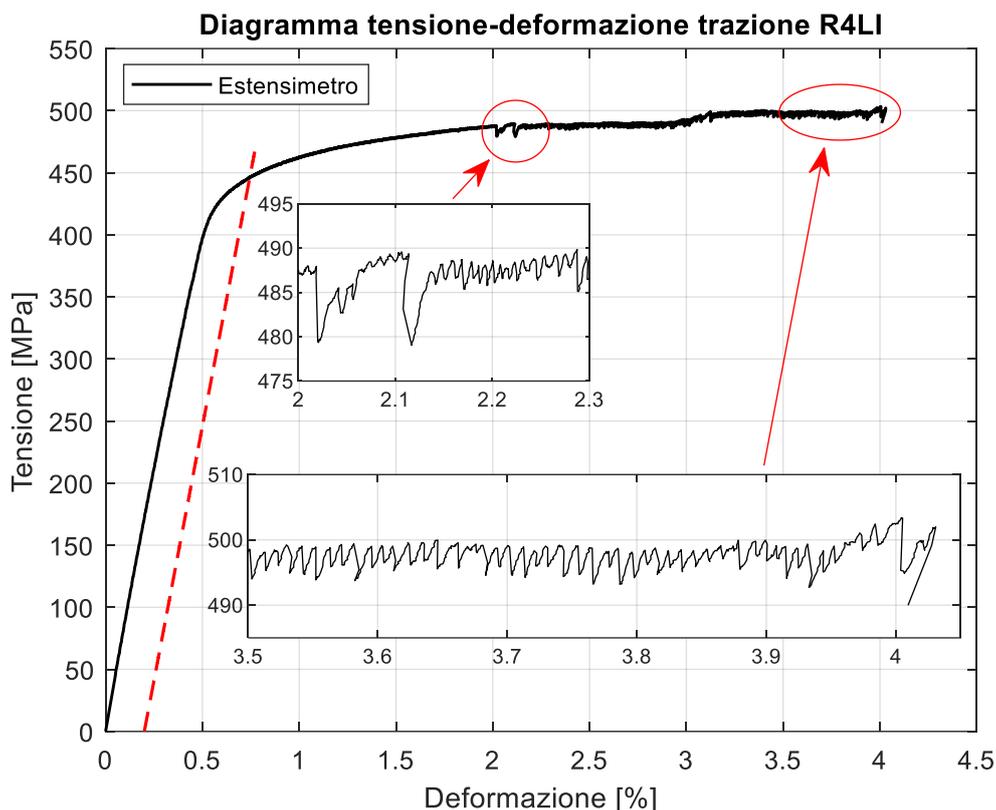


Figura 67: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R4LI.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono osservare degli andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino a poco prima del 2% la curva è molto regolare. In corrispondenza del 2%, 2,1% e 3,2% ci sono tre cadute di tensione più marcate che rappresentano la nascita di tre bande plastiche, difficile dire di quale tipologia si tratti non essendoci le immagini acquisite dal DIC. Nei restanti tratti della curva tensione-deformazione, l'andamento seghettato è abbastanza regolare con ampiezza e frequenza delle cadute di tensione, relativamente costanti e tipiche dei provini superficiali. Non essendoci i dati DIC è difficile esprimere che tipologia di bande plastiche si siano formate.

## 9.4 Prova di trazione del provino R8LS

Il quarto provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R8LS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,65 mm, uno spessore medio di 1,73 mm e una sezione nominale di 11,53 mm<sup>2</sup>. Come per i due casi precedenti, dato che questi provini presentavano una finitura superficiale, dovuta al taglio per elettroerosione, simile ad un pattern naturale, abbiamo provato a fare le prove di trazione senza realizzare il pattern sulla superficie usando le vernici bianca e nera. Nonostante il risultato negativo della prova precedente, era necessario fare un'ulteriore prova con questo metodo, per essere sicuri del risultato ottenuto. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 15 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A_{\%}$  del 8,54 %, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 401 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 452 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale. Come per il caso precedente, anche in questo per quanto

riguarda l'analisi DIC, durante la fase di calcolo il DIC ha smesso di riconoscere i riferimenti da un certo step in poi e quindi non è più stato in grado di calcolare il campo di spostamenti e di conseguenza i valori di deformazione. Sembra proprio che il problema sia il pattern naturale del provino, che risulta troppo omogeneo per permettere al software, di calcolare il campo di spostamenti. Quindi alla fine rimangono solo i dati letti dall'estensimetro.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS.

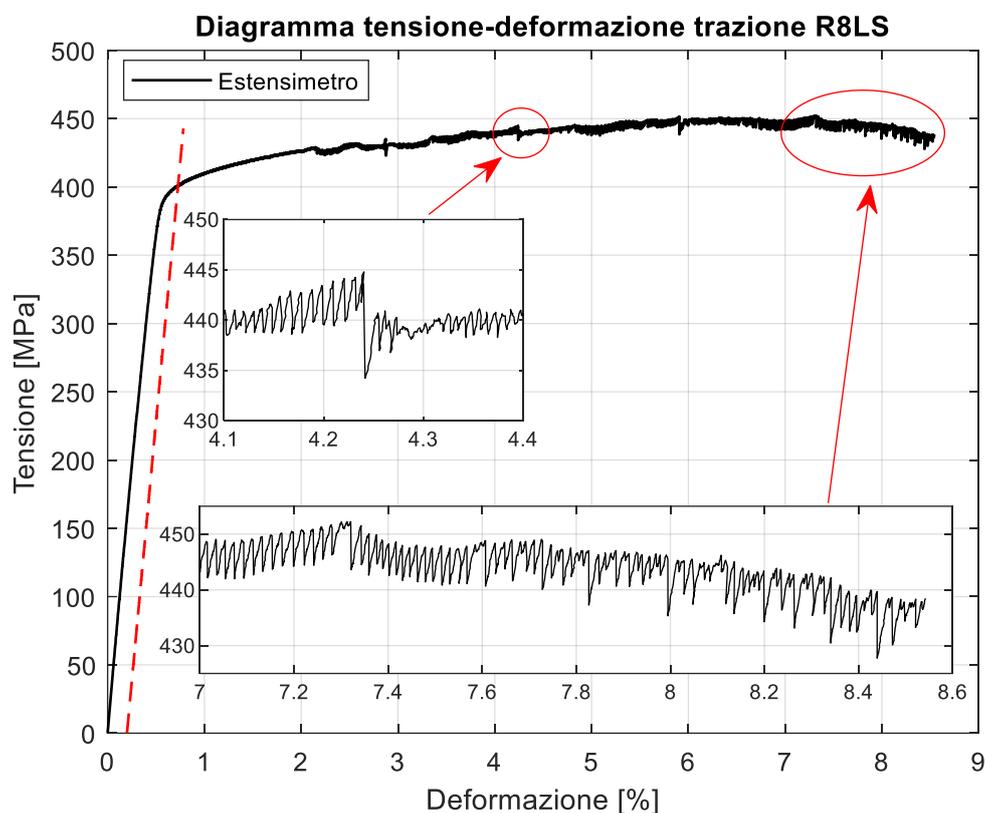


Figura 68: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R8LS.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino al 2% la curva è molto regolare. In corrispondenza del 2,1%, 2,9%, 4,3%, 6% si vedono delle cadute di tensione più marcate, che sono i punti in cui si sono formate le bande plastiche, nei tratti che susseguono questi punti l'andamento seghettato ha un andamento con ampiezza e frequenza regolare, tipico della propagazione e dell'intensificazione della deformazione nella banda plastica. Questo tipo di andamento della curva tensione-deformazione è tipico dei provini superficiali. Non essendoci i dati DIC è difficile esprimere che tipologia di bande plastiche si siano formate.

Dalle prove di trazione di questi ultimi tre provini, è stato ottenuto un ottimo grafico di confronto. I tre provini messi a confronto appartengono ciascuno ad un diverso strato lungo lo spessore della lastra, in particolare un superficiale, un intermedio e un centrale, tutti e tre ricavati in direzione longitudinale. Nel grafico si possono notare i diversi comportamenti di ciascun provino, lungo la curva tensione-deformazione. Si può notare come le cadute di tensione nel centrale siano più ampie, marcate e irregolari rispetto all'intermedio e al superficiale, nei quali le cadute di tensione sono meno ampie e più regolari. Per quanto riguarda l'allungamento a rottura nel provino superficiale ha raggiunto un valore doppio rispetto a quello raggiunto dai provini

intermedio e centrale, che più o meno si equivalgono, anche se di solito i provini intermedi presentano un allungamento a rottura maggiore di quelli centrali, di circa l'1%.

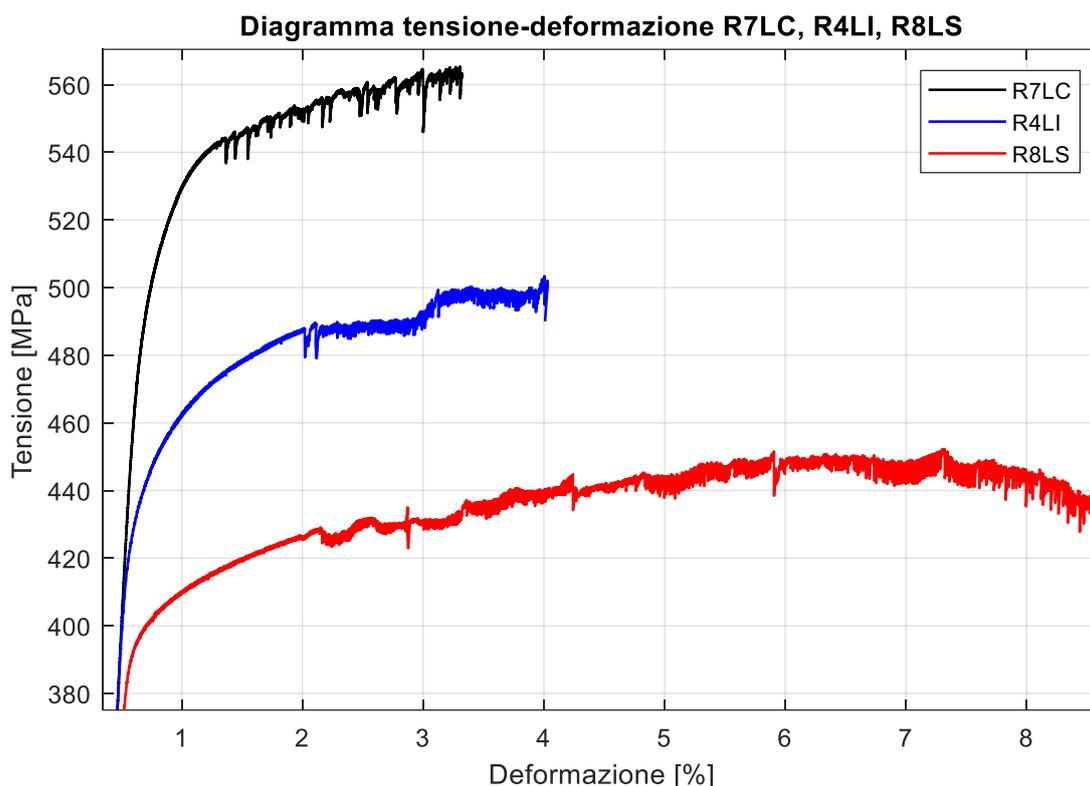


Figura 69: Grafico tensione - deformazione di confronto tra LC, LI e LS.

## 9.5 Prova di trazione del provino R6LC

Il quinto provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R6LC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,49 mm, uno spessore medio di 1,70 mm e una sezione nominale di 11,03 mm<sup>2</sup>. In seguito ai risultati negativi ottenuti con i provini trazionati senza pattern, abbiamo deciso di riprendere a trazionare i provini realizzando su di essi il pattern stocastico tramite l'utilizzo delle vernici bianca e nera. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 15 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A_{\%}$  del 4,47 %, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 501 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 556 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

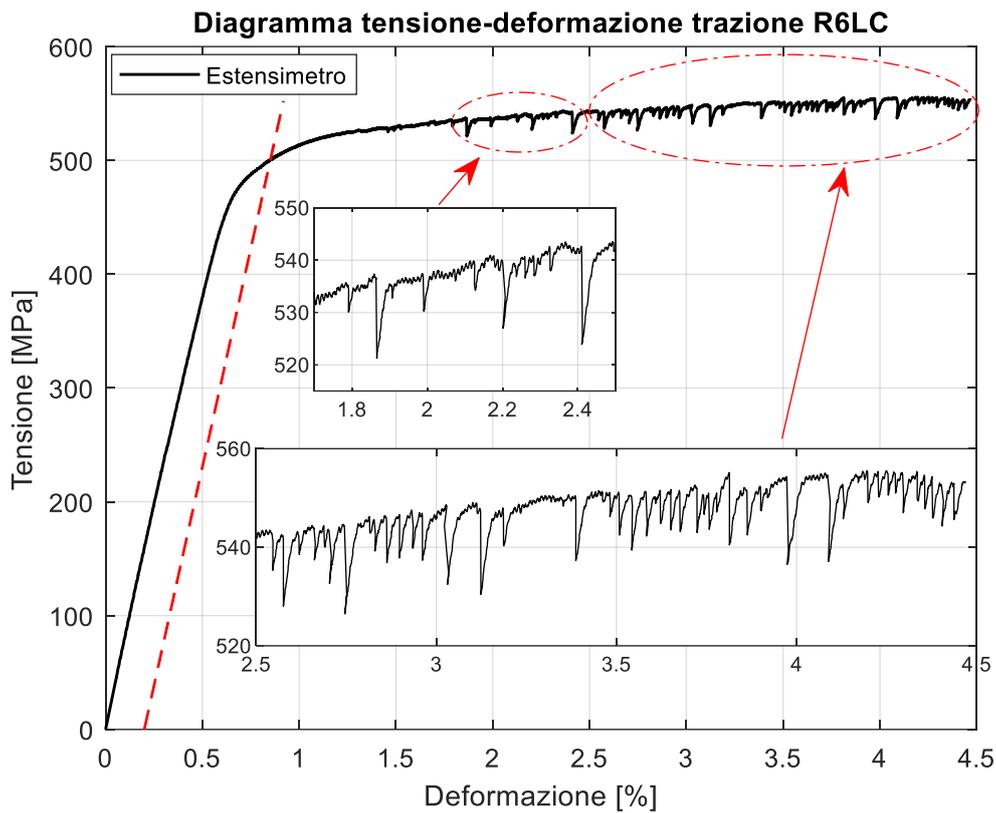


Figura 70: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R6LC.

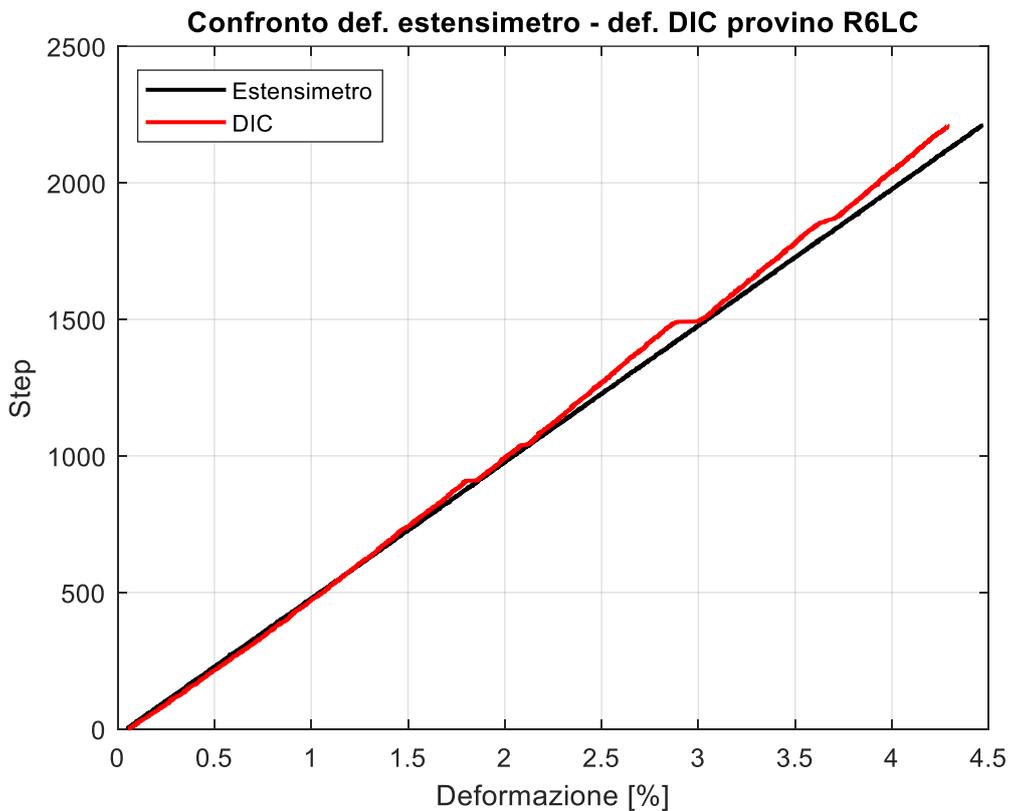


Figura 71: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dei provini centrali. Fino a circa l'1,5% la curva presenta un andamento regolare. A partire dall'1,8% incominciano a formarsi

tutta una serie di andamenti seghettati molto irregolari e con ampiezze e frequenze variabili. Solo verso la fine della prova, dal 4% fino alla rottura del provino, l'andamento seghettato diventa più regolare. Facendo riferimento alla tipologia di andamento seghettato si può pensare che, in corrispondenza delle cadute di tensione si sia avuta la formazione di bande di tipo stazionario di tipo B e C, che dopo essersi formate, sono rimaste stazionarie e si sono intensificate fino a portare alla rottura del provino. Per quanto riguarda i tratti con andamento seghettato più regolare potrebbero rappresentare l'intensificazione della banda plastica stazionaria.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Solamente al 3% i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi leggermente da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo -0,37%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

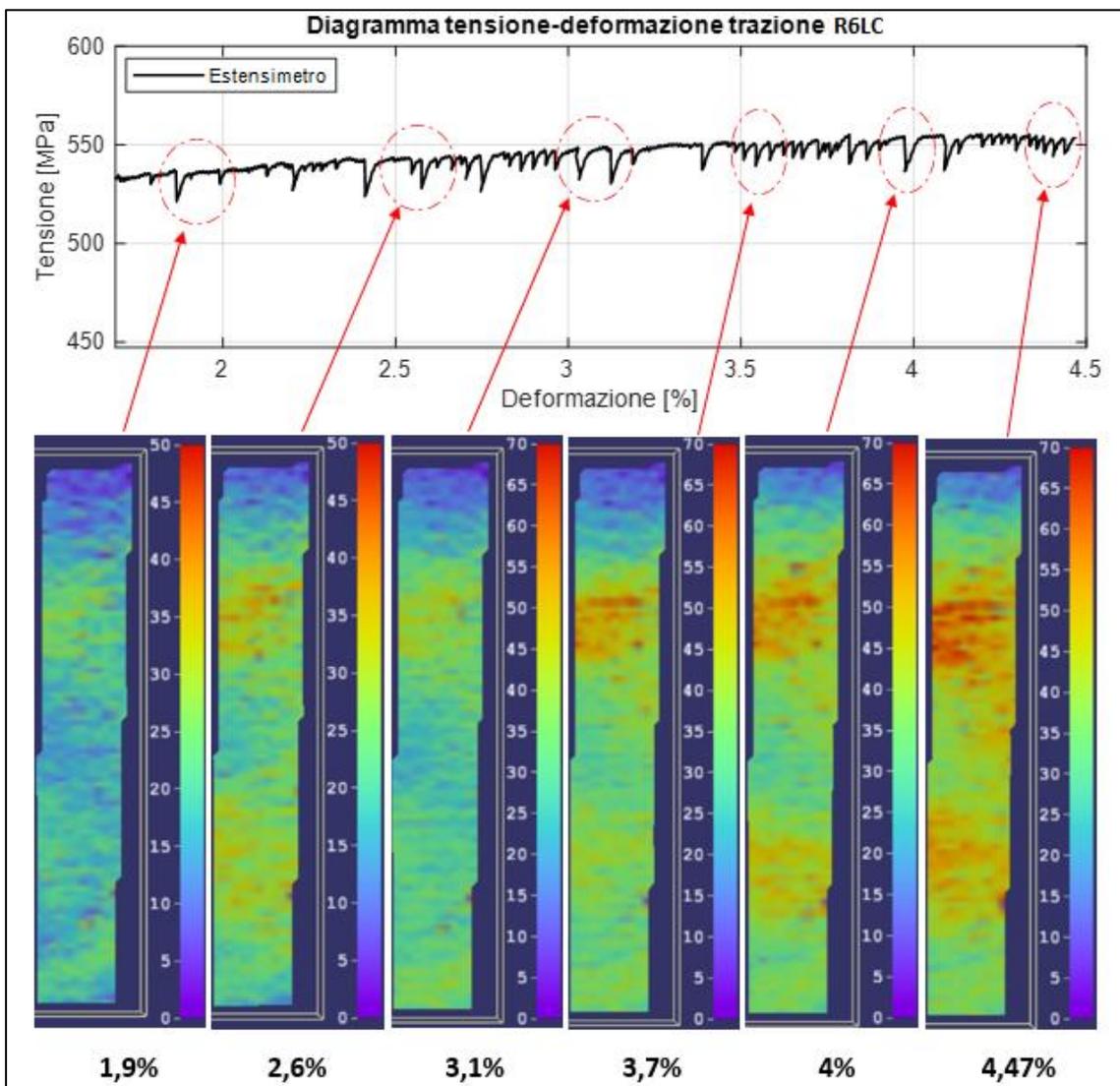


Figura 72: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che rimane uniforme lungo il provino fino a poco

prima dell'1,5% di deformazione. Dopo di che, in corrispondenza dell'1,9% e 2% si formano due bande oblique, localizzate e stazionarie di tipo C. Al 2,6% si formano altre due bande localizzate e stazionarie, sempre di tipo C e sempre negli stessi punti e si vede come la deformazione s'intensifichi raggiungendo valori del 4%. Al 3,1% di deformazione nasce una banda inclinata e stazionaria nella parte inferiore della ROI. Questo effetto è molto visibile, per via della modifica nella scala adottata nelle acquisizioni. Al 3,5% si può vedere come la deformazione sia cresciuta, nella parte centrale superiore, perché si sono formate altre bande. Anche in corrispondenza del 4% si può vedere una caduta di tensione marcata che rappresenta la formazione di una banda plastica. Infine, nel tratto seghettato più regolare fino al 4,5%, la deformazione cresce e s'intensifica nella parte centrale superiore fino a portare a rottura il provino. Complessivamente le bande plastiche che si sono formate erano tutte di tipo stazionario di tipo C, alcune hanno presentato una certa inclinazione rispetto alla direzione di laminazione della lastra, altre invece no.

## 9.6 Prova di trazione del provino R5LC

Il sesto provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R5LC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,65 mm, uno spessore medio di 1,69 mm e una sezione nominale di 11,26 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 3,91 %, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 502 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 558 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

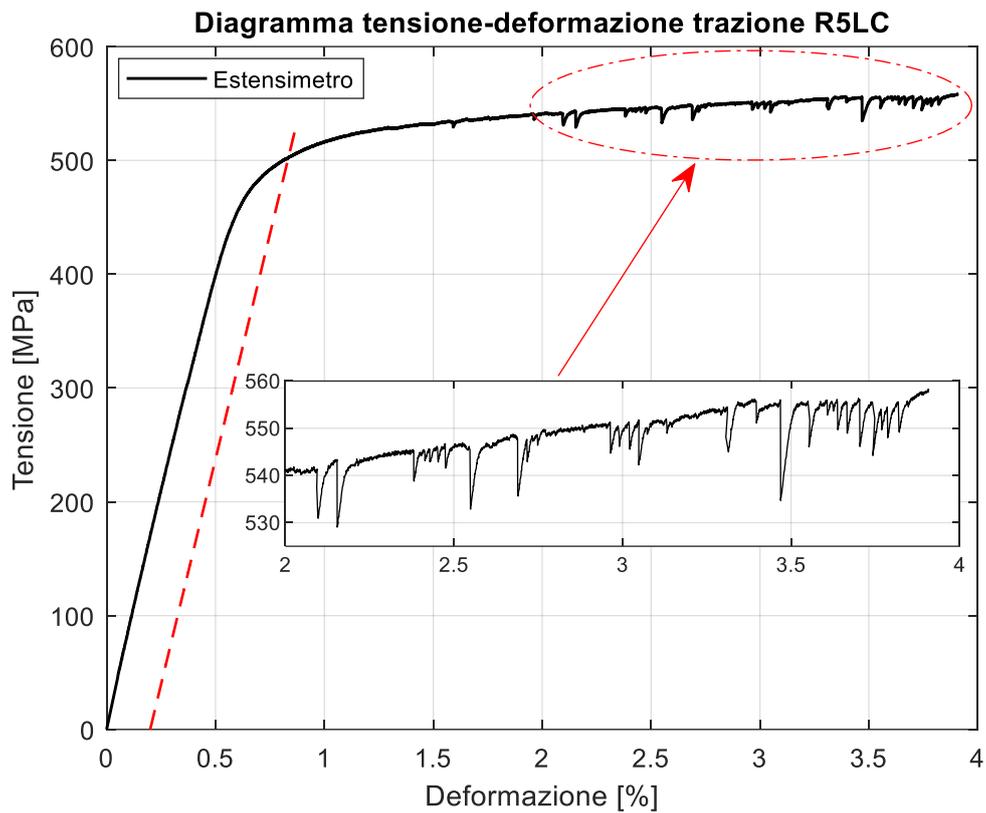


Figura 73: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R5LC.

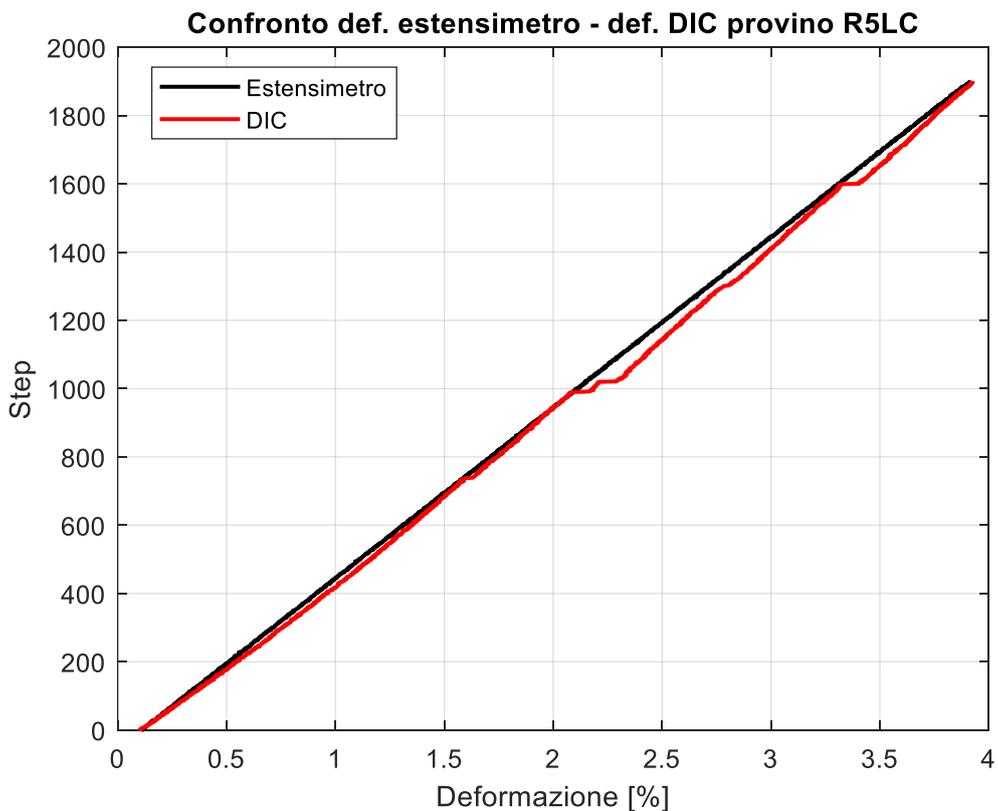


Figura 74: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare alcuni andamenti seghettati molto marcati e localizzati, tipici dei provini centrali. Fino a circa l'1,5% la curva presenta un andamento regolare e senza cadute di tensione. Da questo punto

in poi si sono formate delle cadute di tensione degne di note. In particolare, i punti 1,6%, 2,2%, 2,6%, 2,7%, 3,3% e 3,5% di deformazione, sono punti in cui si è avuta la formazione di una banda plastica. Dal 3,6% fino a rottura l'andamento seghettato si fa più intenso e di solito quando diventa così marcato poi si ha il collasso del provino e così è stato. Facendo riferimento alla tipologia di andamento seghettato e alla tipologia di provino, si può pensare che, in corrispondenza delle cadute di tensione si sia avuta la formazione di bande di tipo stazionario di tipo B e C, che dopo essersi formate, sono rimaste stazionarie e si sono intensificate fino a portare alla rottura del provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che lungo tutta la durata della prova di trazione, l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Dal 2,2% i valori di deformazione calcolati dal DIC hanno incominciato a distaccarsi leggermente da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari al 3,05%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

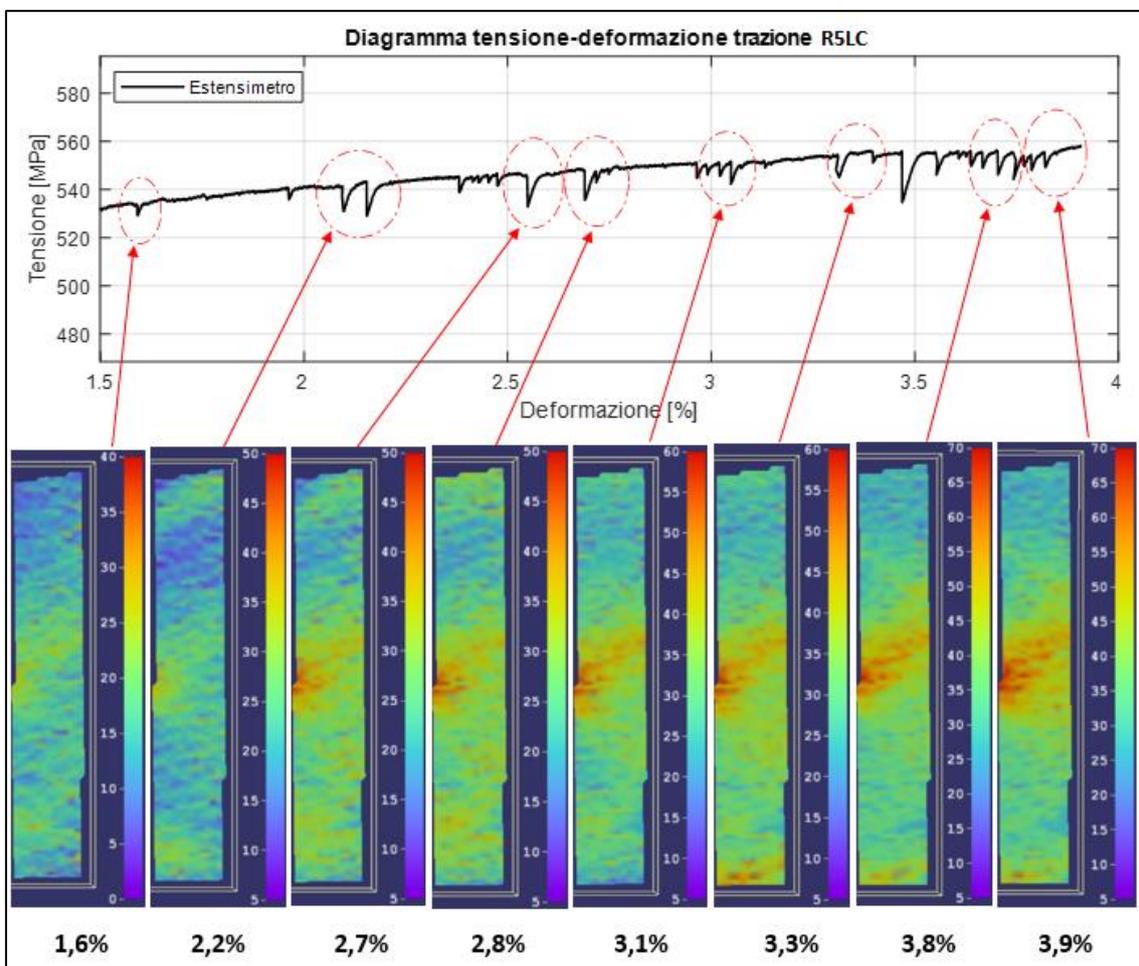


Figura 75: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che rimane uniforme lungo il provino fino a poco prima dell'1,5% di deformazione. Dopo di che, all'1,6% si formano due bande stazionarie C, una al centro inclinata a 45° e l'altra nella parte inferiore. Al 2,2% si forma una banda stazionaria C nella parte superiore, anch'essa con una certa inclinazione. Al 2,7% si forma un'altra banda

stazionaria sempre nella zona centrale, che fa crescere l'intensità della deformazione localizzata. Al 2,8% nasce un'altra banda nella parte superiore della ROI. Al 3,1% nasce una banda C stazionaria inclinata a 45° sempre nella parte centrale del provino, che fa crescere la deformazione localizzata fino al 6%. Al 3,3% nasce una banda stazionaria inclinata nella parte inferiore della ROI. Dopo di che, le cadute di tensione che si vedono nella curva fino al punto di rottura, rappresentano le bande plastiche stazionarie di tipo C che si sono formate nella parte centrale del provino, queste hanno fatto crescere la deformazione localizzata in quel punto fino ad un valore superiore al 7%, la deformazione in questo modo si è intensificata fino a portare a rottura il provino. Complessivamente le bande plastiche che si sono formate erano tutte di tipo stazionario di tipo C, alcune hanno presentato un'inclinazione di 45° rispetto alla direzione di laminazione della lastra.

## 9.7 Prova di trazione del provino R5LS

Il settimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R5LS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,63 mm, uno spessore medio di 1,70 mm e una sezione nominale di 11,28 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 4 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 9,16 %, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 404 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 453 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

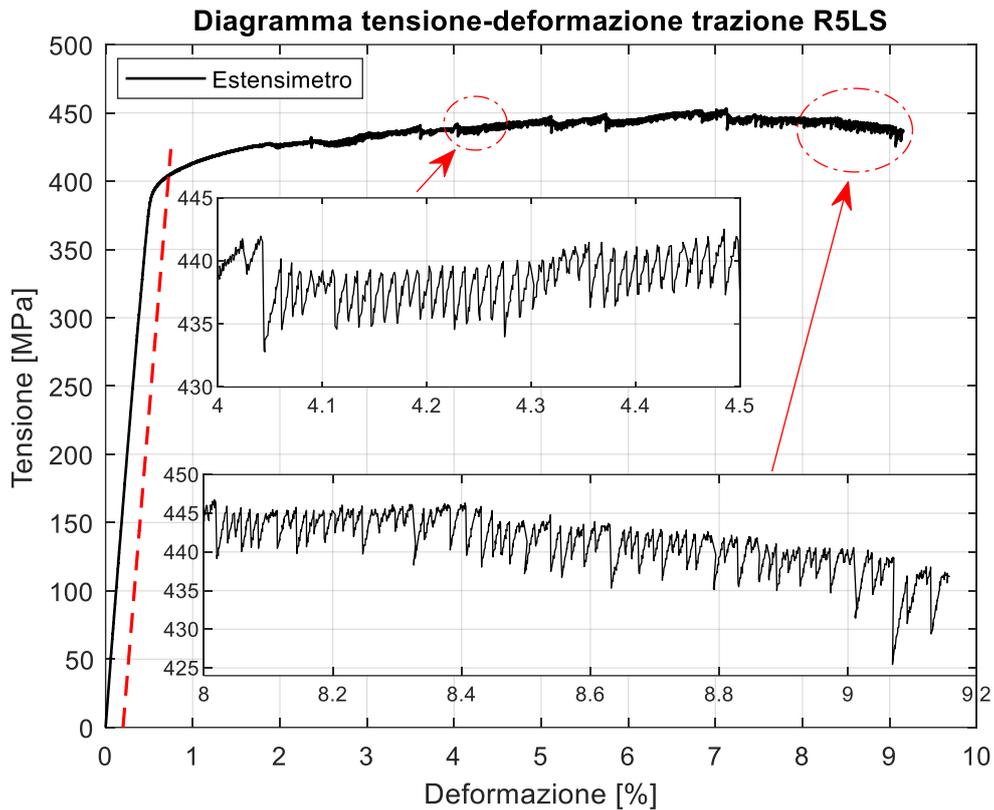


Figura 76: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R5LS.

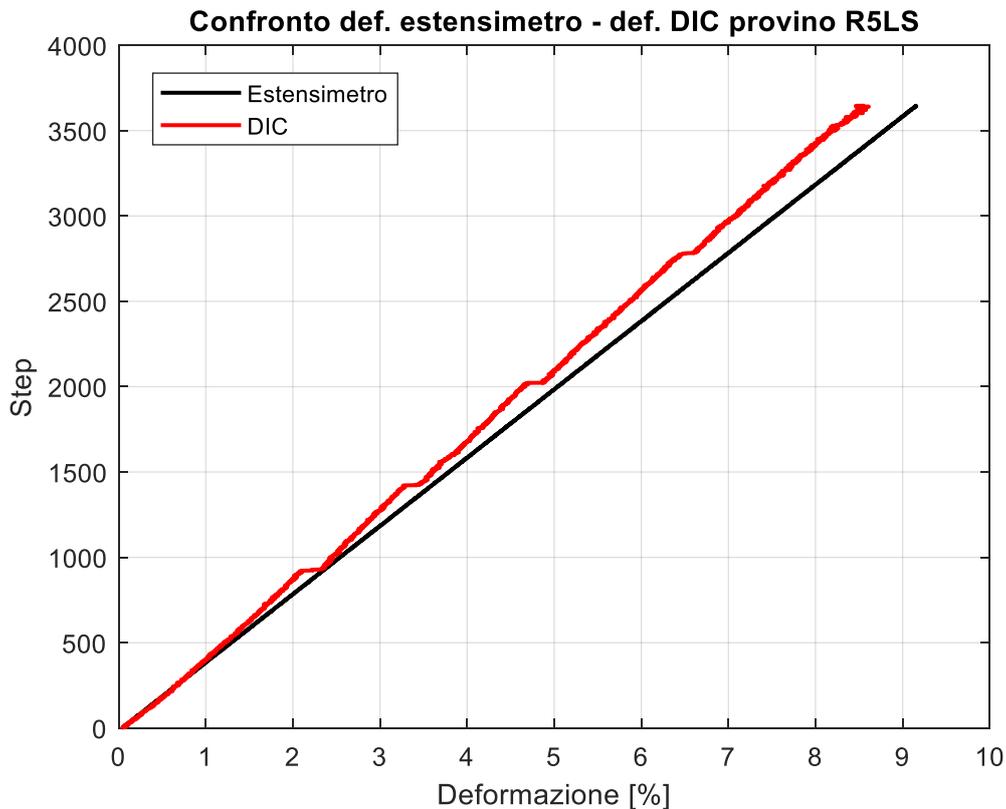


Figura 77: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino all'1,6% la curva è molto regolare. Lungo l'andamento della curva in corrispondenza del 2,4%, 3,6%, 4%,

5,1%, 5,8%, 6,8%, 7,1% di deformazione, si possono vedere delle cadute di tensione più marcate, tipiche della nascita delle bande plastiche. Mentre, i tratti con andamento seghettato ad ampiezza e frequenza più regolare, rappresentano la propagazione della banda plastica lungo il provino. Per quanto riguarda invece il tratto di deformazione che va dal 7% fino alla rottura del provino, rappresenta la crescita e l'intensificazione della deformazione nella zona in cui poi crollerà il provino. Questo tipo di andamento della curva tensione-deformazione lo si riscontra spesso nei provini superficiali.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue abbastanza bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. In particolare, i due andamenti tendono a discostarsi un po' in corrispondenza del 2,1%, 3,2%, 4,7% e 6,5% di deformazione. Questo comportamento potrebbe essere riconducibile alla formazione delle bande plastiche che influiscono sulla qualità del pattern. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo -5,45%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

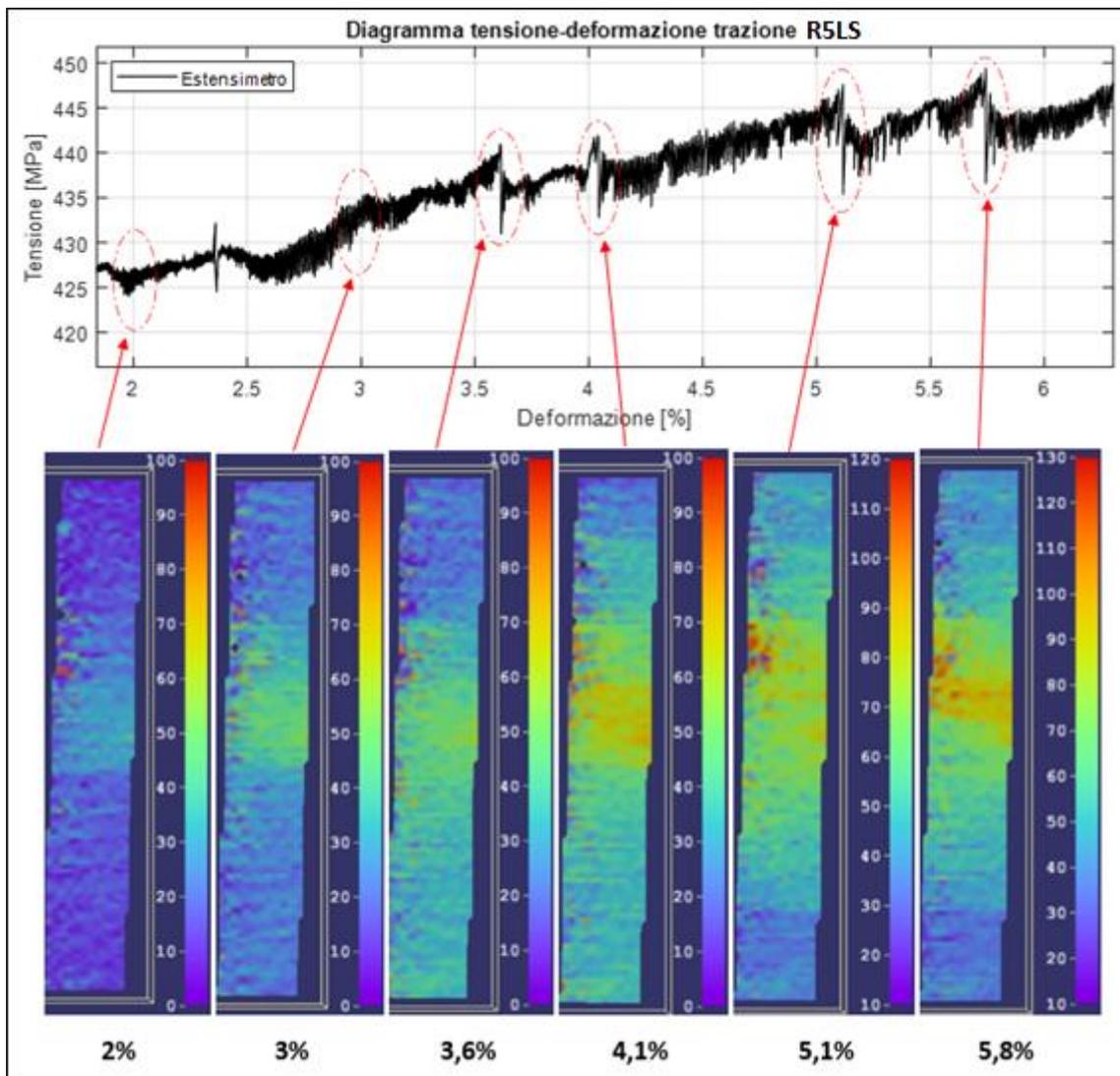


Figura 78: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione dal 2% al 6,8% di deformazione.

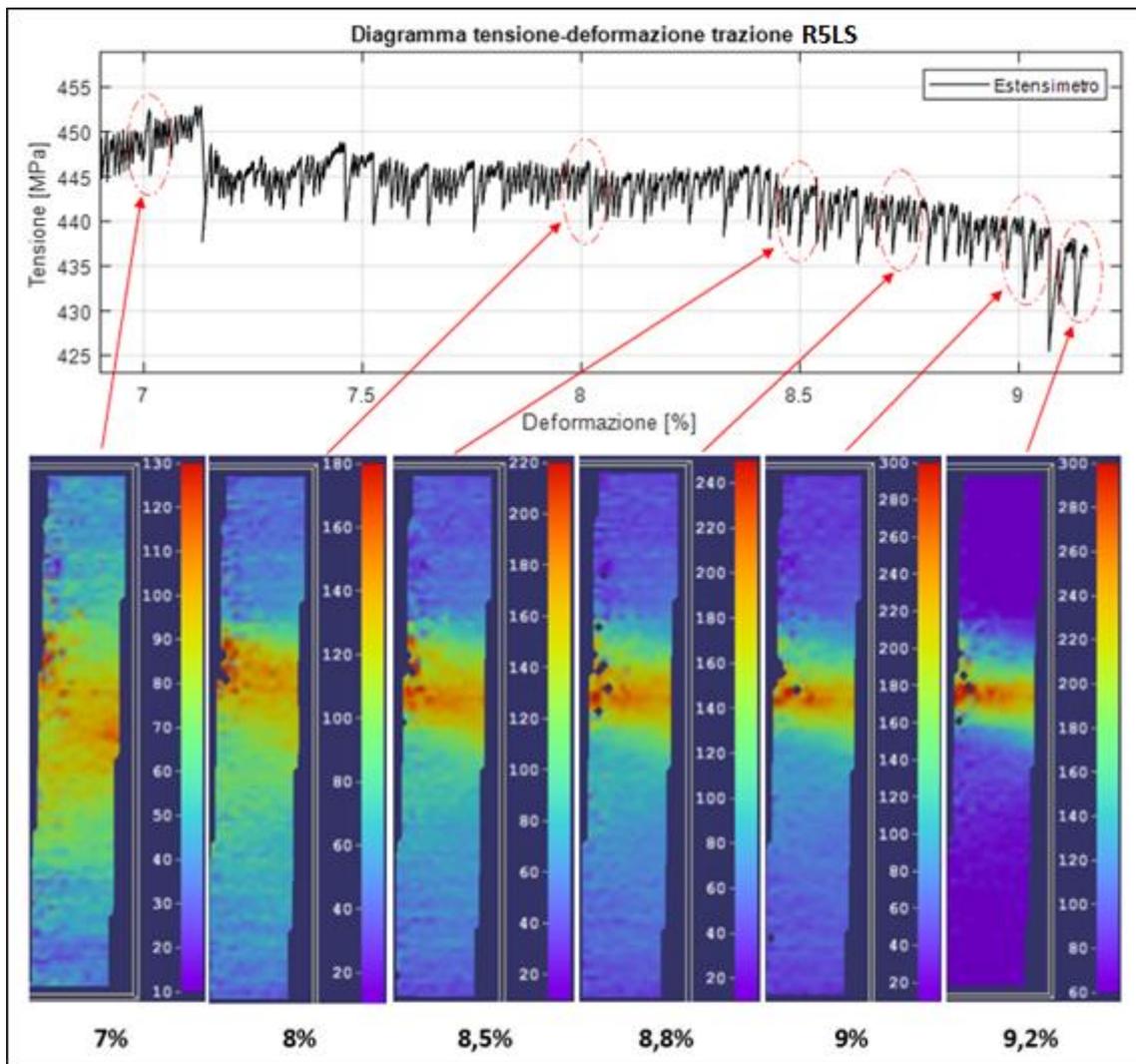


Figura 79: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione dal 6,8% al 9,2% di deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, si può vedere che fino all'1,6% la deformazione rimane costante e uniforme lungo il provino. Dopo di che, per il tratto di deformazione che va dal 2% al 7%, i punti in corrispondenza del 2%, 2,4%, 3,6%, 4,1%, 5,1%, 5,8%, 7%, 7,1% di deformazione, rappresentano i punti in cui c'è stata la nascita di una banda plastica di tipo A, che si è formata in una certa zona del provino e che ha propagato attraverso il provino fino a quando non si è formata una banda stazionaria o finché non si è formata un'altra banda. Mentre, i tratti con andamento seghettato ad ampiezza e frequenza più regolare, rappresentano la propagazione della banda plastica lungo il provino. Per quanto riguarda invece il tratto di deformazione che va dal 7% fino alla rottura del provino, si può vedere che nel punto al 7,1% si è formata una banda plastica stazionaria di tipo C molto grande, nella zona centrale del provino, in corrispondenza della quale la deformazione localizzata ha continuato a crescere, raggiungendo un valore superiore al 30%, in corrispondenza dell'istante di rottura del provino.

## 9.8 Prova di trazione del provino R1LI

L'ottavo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R1LI. Questo provino presentava una larghezza media di 6,67 mm, uno spessore medio di 1,67 mm e una sezione nominale di 11,14 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 5,34 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 470 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 544 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

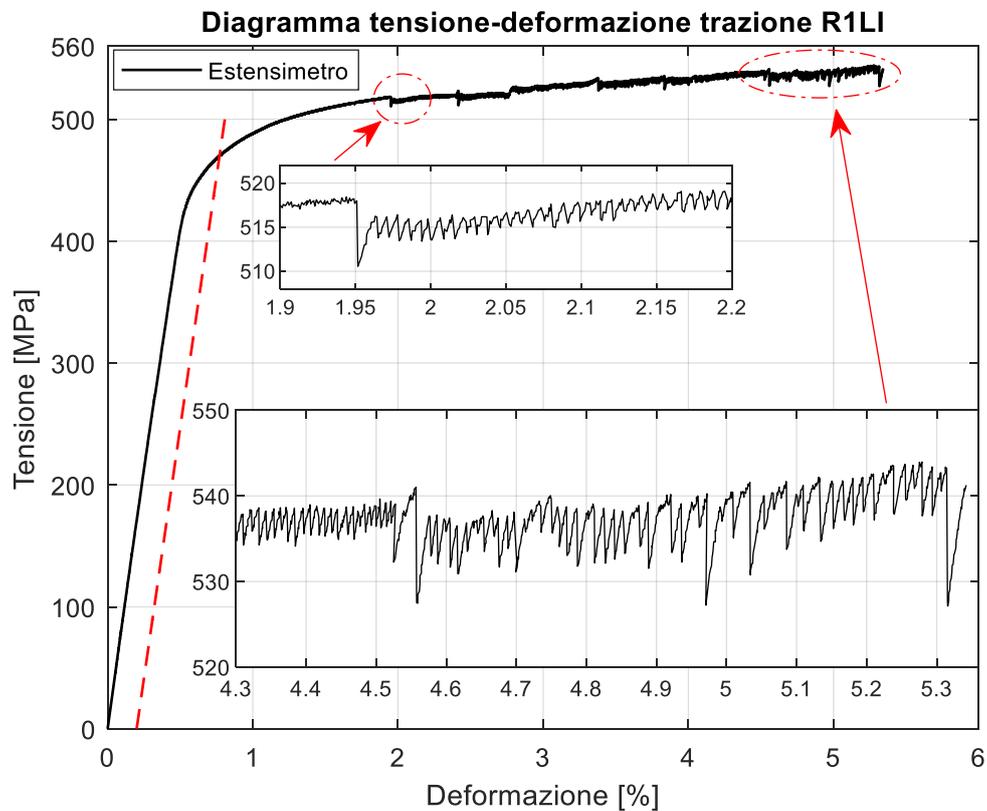


Figura 80: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R1LI.

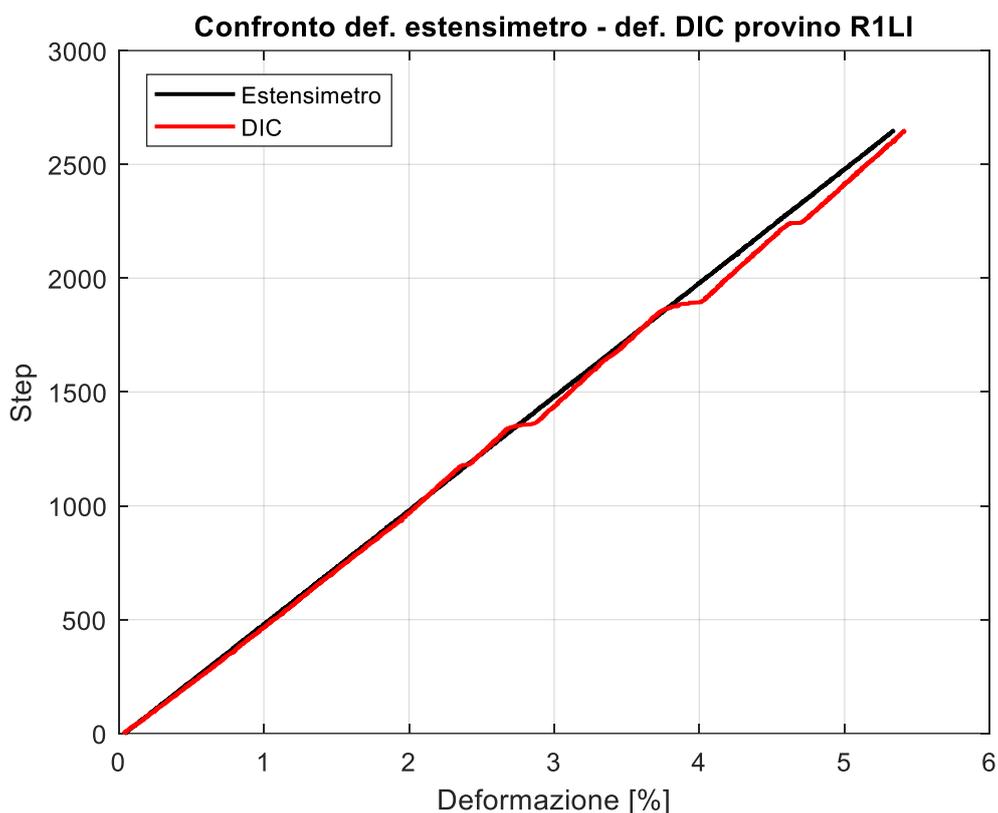


Figura 81: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare andamenti seghettati tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino all'1,9% la curva è molto regolare e priva di seghettature. Lungo la curva in corrispondenza dell'1,98%, 2,4%, 2,8%, 3,45%, 3,85%, 4,6% di deformazione, si possono vedere delle cadute di tensione più marcate. Molto probabilmente in questi punti si vedrà la formazione di una banda plastica. Per quanto riguarda invece il tratto terminale della curva tensione-deformazione, questo rappresenta la crescita e l'intensificazione della deformazione nella zona in cui poi collasserà il provino. L'andamento della curva tensione-deformazione dei provini intermedi è molto simile a quello dei provini superficiali, l'unica grossa differenza che li contraddistingue è che i provini superficiali solitamente presentano un allungamento a rottura maggiore, rispetto ai provini intermedi.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro. In particolare, a partire dal 3,8% di deformazione, i valori calcolati dal DIC tendono a discostarsi un po' da quelli letti dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo 1,85%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano leggermente i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

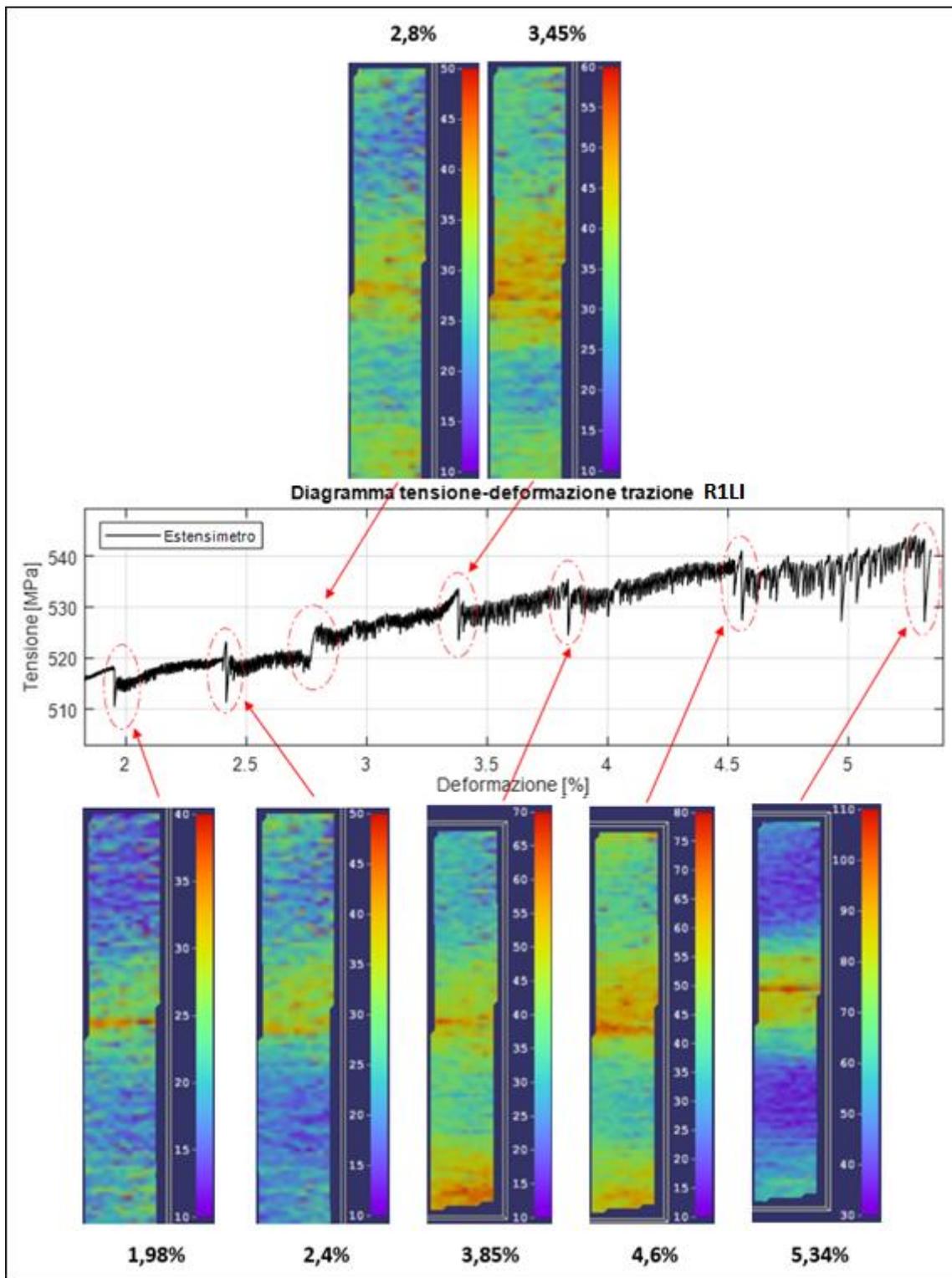


Figura 82: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, si può vedere che fino all'1,9% la deformazione rimane costante e uniforme lungo il provino. Dopo di che, i punti in corrispondenza dell'1,98%, 2,4%, 2,8%, 3,45%, 3,85% di deformazione, rappresentano i punti in cui c'è stata la nascita di una banda plastica non stazionaria di tipo A, che si è formata in una certa zona del provino e che ha propagato attraverso il provino fino a quando non si è formata una banda stazionaria di tipo B. Il tratto con andamento seghettato più regolare che sussegue le singole cadute di tensione, rappresenta la propagazione della banda plastica attraverso la lunghezza del provino. Nel primo tratto della curva

si vede un alternarsi di bande di tipo A che propagando formano bande stazionarie di tipo B. Per quanto riguarda invece il tratto di deformazione che va dal 4,5% fino alla rottura del provino, si può vedere dal 4,6% si sono formate una serie di multibande plastiche stazionarie di tipo C, nella zona centrale del provino. Queste bande sono difficili da distinguere le une dalle altre, perché si formano molto rapidamente, tanto più ci si avvicina alla rottura del provino. Fatto sta che, in corrispondenza del punto in cui si sono formate, la deformazione localizzata ha continuato a crescere, raggiungendo un valore superiore all'11%, in corrispondenza dell'istante di rottura del provino.

## 9.9 Prova di trazione del provino R5TS

Il nono provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R5TS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,53 mm, uno spessore medio di 1,76 mm e una sezione nominale di 11,50 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 7,56 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 421 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 496 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

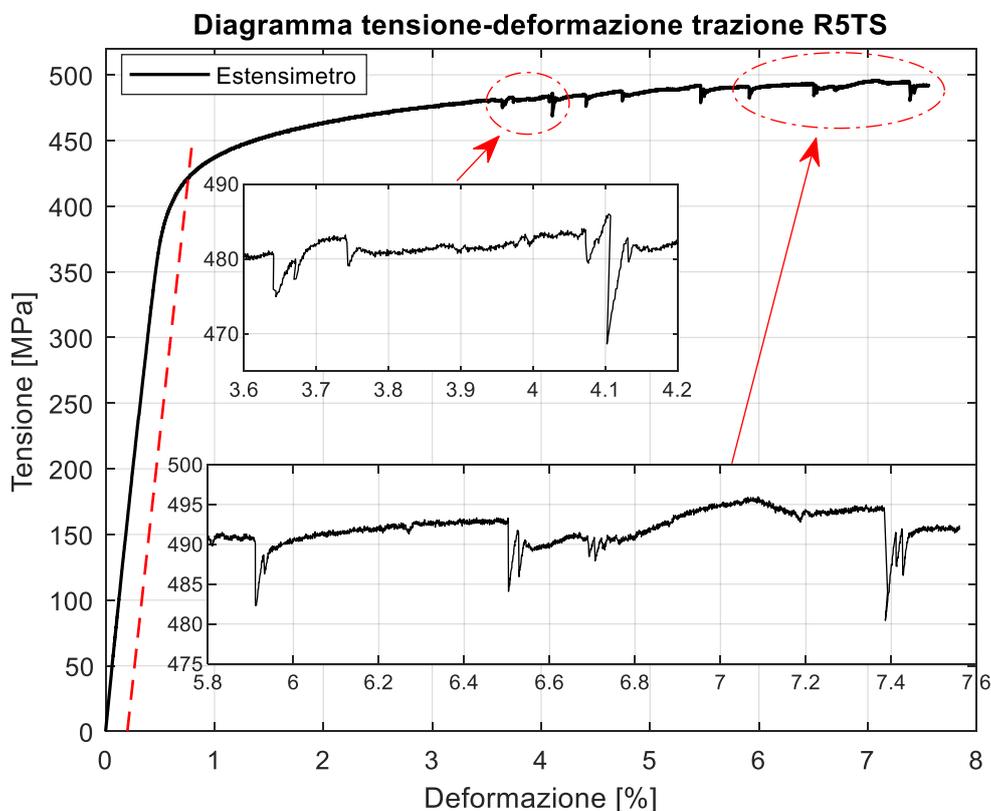


Figura 83: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R5TS.

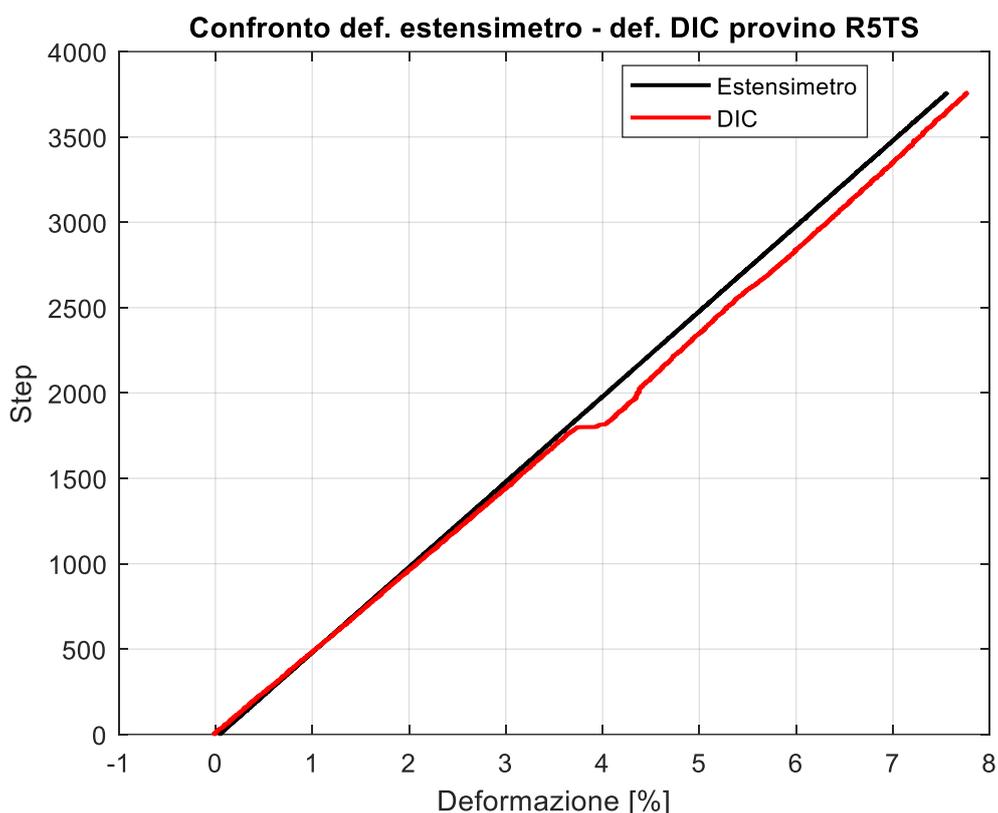


Figura 84: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare dei fenomeni di formazione delle bande plastiche tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino all'3,5% la curva è molto regolare. Lungo l'andamento della curva in corrispondenza del 3,6%, 4,1%, 4,5%, 4,84%, 5,5%, 5,9%, 6,5%, 7,4% di deformazione, si vedono delle cadute di tensione, tipiche della formazione di bande plastiche. Rispetto ai casi precedenti, relativi ai provini longitudinali, dopo i punti con cadute di tensioni non si vedono dei tratti con andamento seghettato ad ampiezza e frequenza regolare, legati alla propagazione della banda plastica lungo la lunghezza del provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro, fino al 3,6% di deformazione. Da questo punto in poi i valori di deformazione calcolati dal DIC tendono a distaccarsi un po' dai valori letti dall'estensimetro. Questo comportamento può essere ricondotto alla formazione della banda plastica in corrispondenza del 3,6% di deformazione, che molto probabilmente ha influenzato la qualità o la struttura del pattern superficiale, influenzando così il calcolo del campo di spostamenti. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo 1,31%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sovrastimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

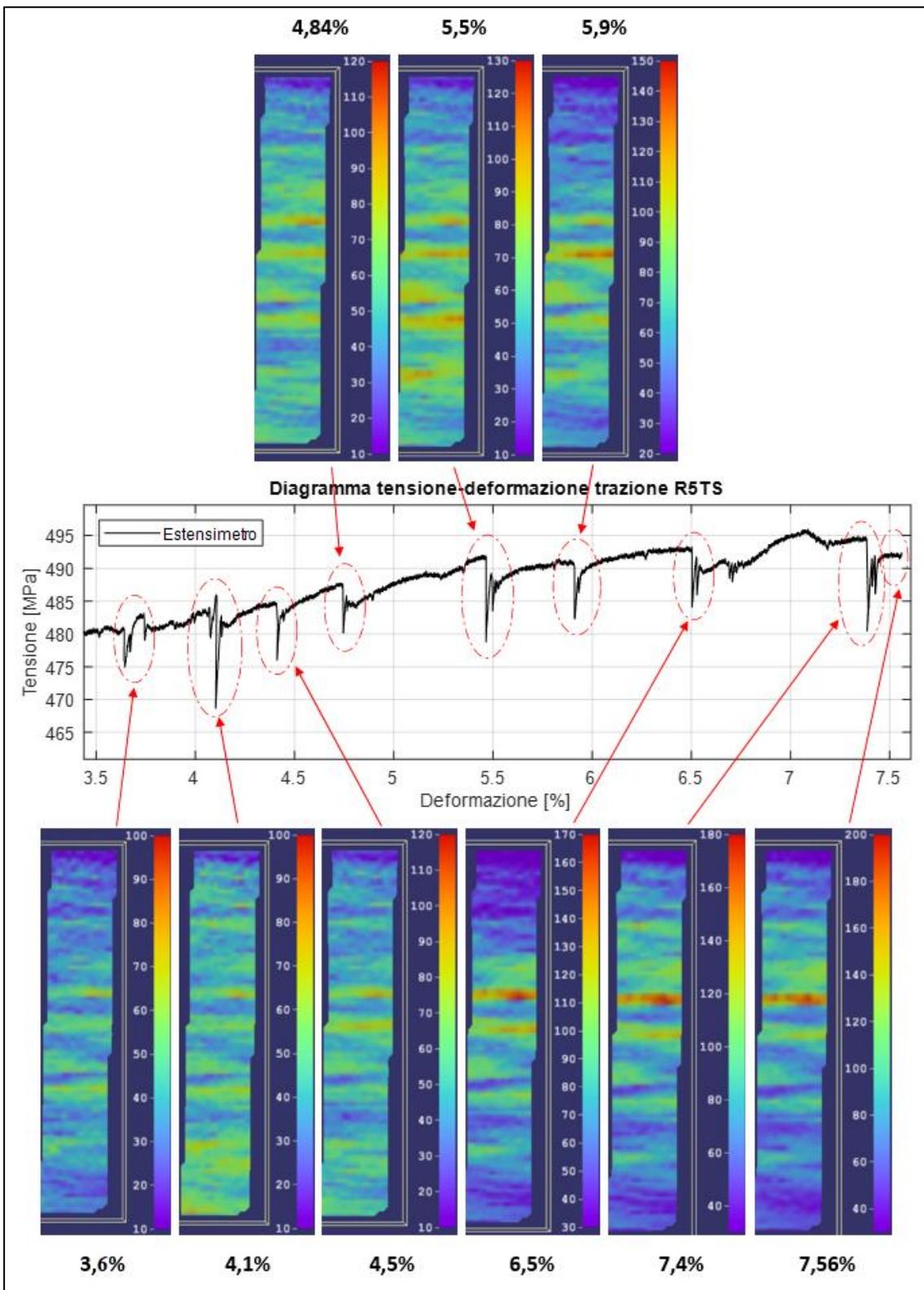


Figura 85: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che fino a poco prima del 3,5% la deformazione rimane praticamente uniforme. In corrispondenza del 3,6% si forma una serie di multibande lungo tutta la lunghezza utile del provino, con una orientazione orizzontale che coincide con la direzione longitudinale del provino. Le bande che si sono formate sono stazionarie e di tipo C. Dalla scala relativa alla deformazione, si può vedere che già in questo punto, la deformazione localizzata ha raggiunto un valore del 7%, rispetto alla deformazione misurata dall'estensimetro pari a 3,5%.

Dopo di che, man mano che la prova va avanti, nei punti in corrispondenza del 4,1%, 4,5%, 4,84%, 5,5% di deformazione si vede la formazione continua di nuove bande plastiche stazionarie di tipo C. In corrispondenza del 5,9% si forma una banda plastica stazionaria C nella zona centrale del provino; in questo modo la deformazione localizzata raggiunge in quel punto un valore superiore al 15%, mentre l'estensimetro misurava 5,9%. Dopo di che, nei punti in corrispondenza del 6,5%, 7,4% di deformazione si continuano a formare nuove bande plastiche stazionarie di tipo C, lungo tutta la lunghezza utile del provino e la deformazione tende a localizzarsi sempre più in corrispondenza della banda centrale. All'istante di rottura del provino, che si verifica al 7,56%, la deformazione localizzata in corrispondenza della banda centrale dove si è rotto, ha raggiunto un valore superiore al 20%. Complessivamente, tutte le bande che si sono formate hanno presentato un'orientazione più o meno orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale superficiale.

## 9.10 Prova di trazione del provino R2TI

Il decimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R2TI. Questo provino presentava una larghezza media di 6,55 mm, uno spessore medio di 1,71 mm e una sezione nominale di 11,23 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 7,66 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 441 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 525 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS. Alla fine della prova il computer DIC si è bloccato e tutti i valori registrati sono andati persi, per questo sono presenti solo i valori registrati dalla macchina MTS, con i quali è stato fatto il grafico di tensione-deformazione.

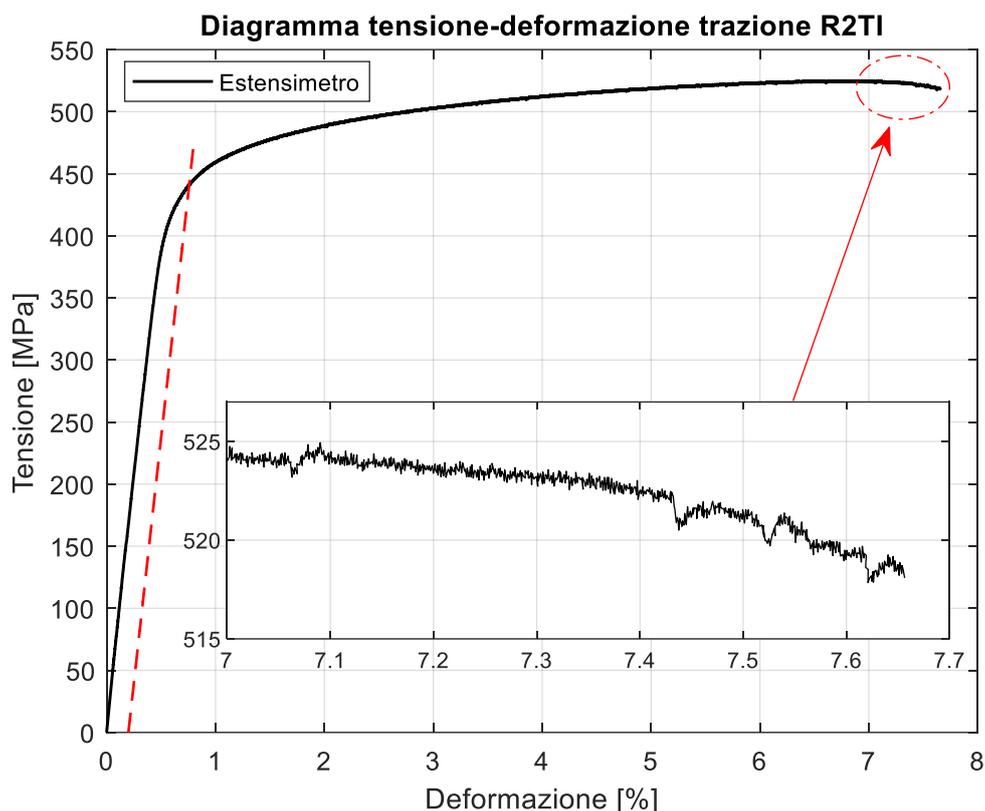


Figura 86: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R2TI.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si può vedere che la curva presenta un andamento molto regolare e non si notano i tipici andamenti seghettati relativi alla formazione e/o propagazione delle bande plastiche. Solamente nel tratto terminale della curva, che va dal 7% alla rottura, si può vedere un accenno di seghettatura, che potrebbe essere ricondotto alla localizzazione e alla formazione della banda plastica che ha portato al collasso del provino. Non essendoci i valori e le informazioni del DIC non è possibile fare un'analisi più approfondita per questo caso.

## 9.11 Prova di trazione del provino R4TC

L'undicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R4TC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,56 mm, uno spessore medio di 1,71 mm e una sezione nominale di 11,22 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 6 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 7,22 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 491 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 556 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale, a metà.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

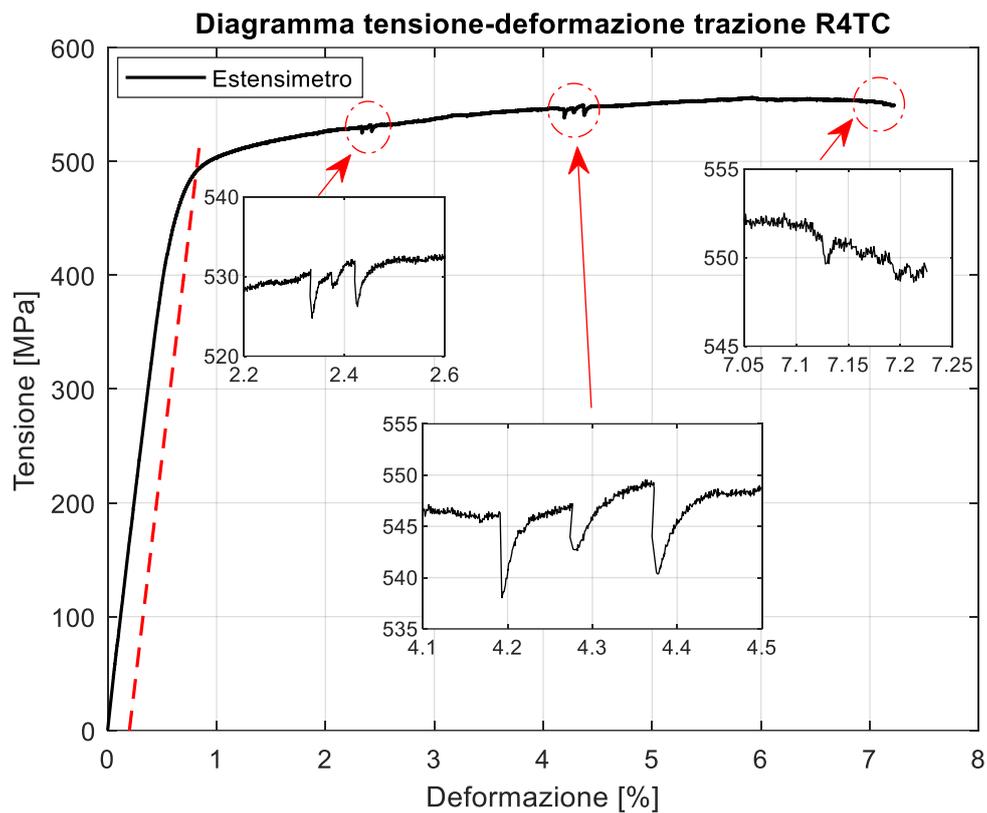


Figura 87: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R4TC.

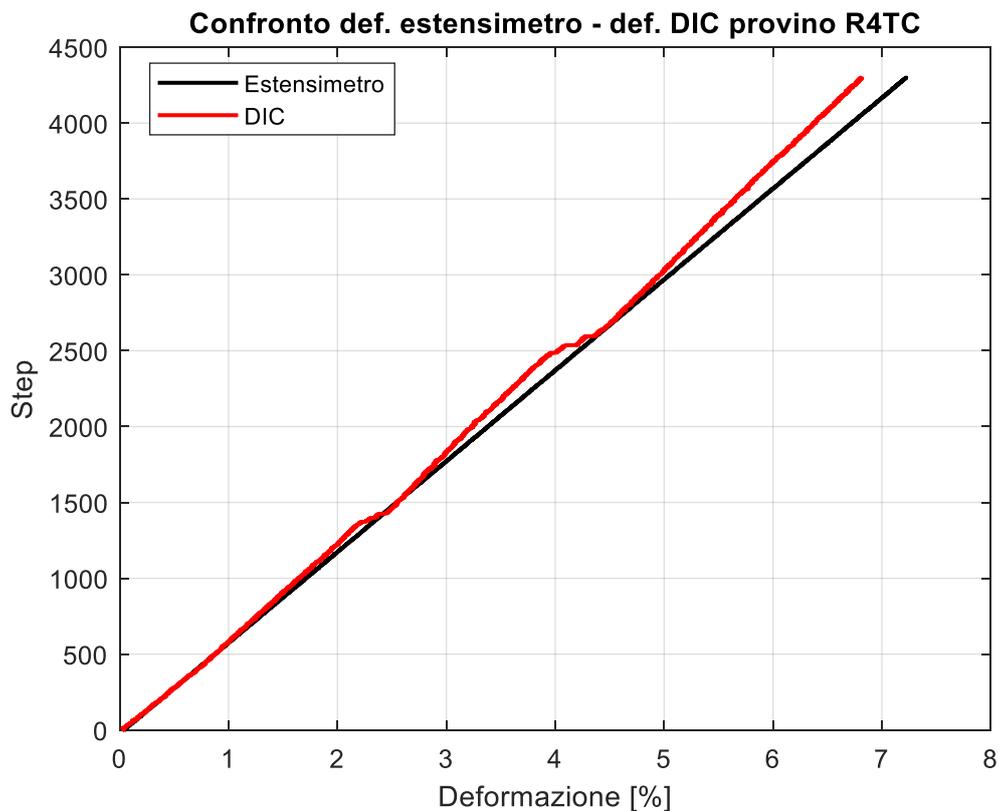


Figura 88: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si vede che la curva presenta un andamento piuttosto regolare per tutta la durata della prova. In particolare, si possono notare dei fenomeni legati alla formazione delle bande plastiche tipici dell'effetto PLC,

nei pressi del 2,4%, 4,2%, 4,3%, 4,4% di deformazione. Anche in questo provino trasversale, dopo i punti con cadute di tensioni non si vedono dei tratti con andamento seghettato ad ampiezza e frequenza regolare, da ricondurre alla propagazione o all'intensificazione della banda plastica.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro, fino al 3% di deformazione. Poi i valori tendono un po' a divergere, a riconvergere in prossimità del 4,5% e poi di nuovo a divergere fino alla fine della prova. Questo comportamento può essere ricondotto all'influenza della deformazione plastica sulla qualità sulla struttura del pattern superficiale, che influenza a sua volta il calcolo delle deformazioni. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo -3,35%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

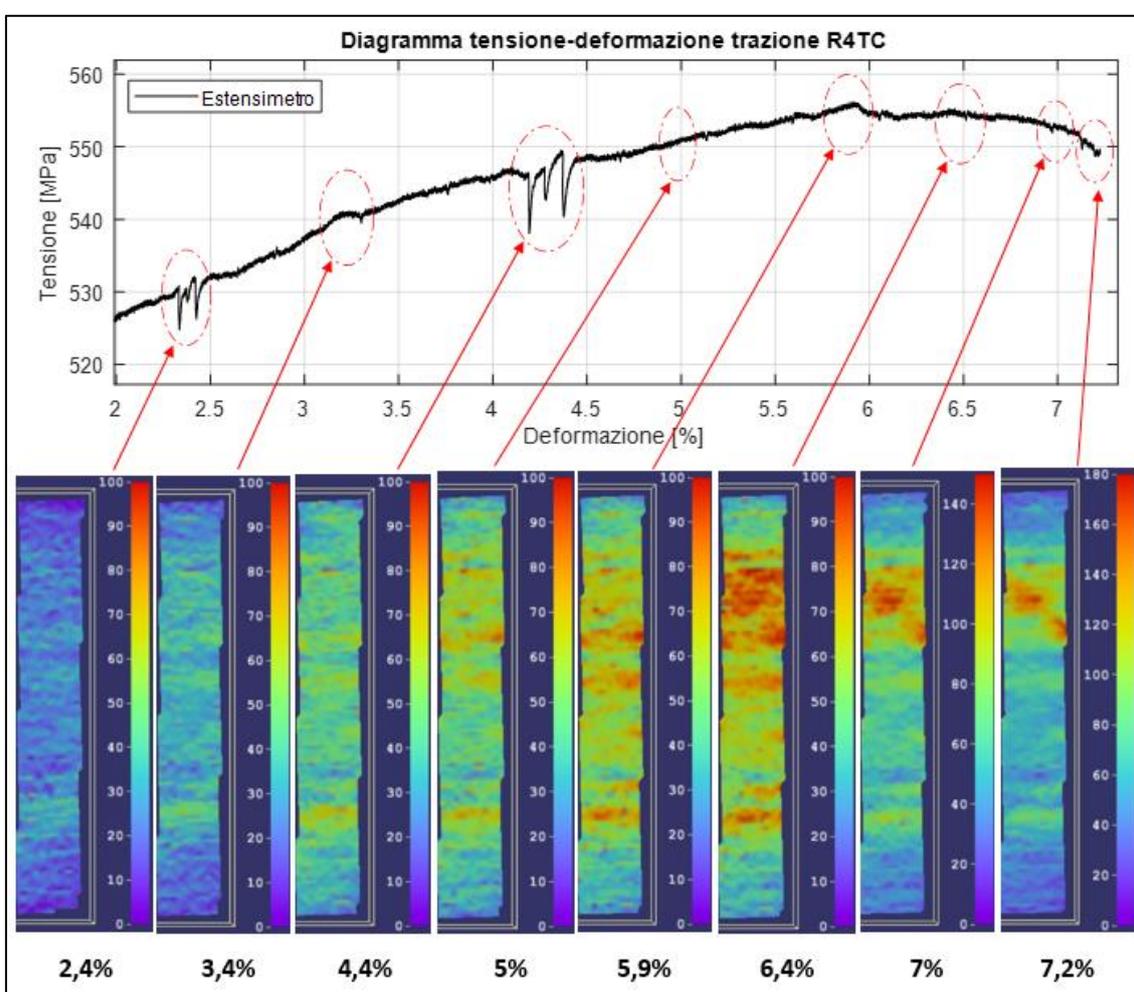


Figura 89: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che fino al 2% la deformazione rimane praticamente uniforme lungo il provino. In corrispondenza del 2,4% si formano due bande stazionarie di tipo C, nella parte inferiore dell'area d'interesse. Dopo di che, anche in corrispondenza del 4,4% si vede la formazione di tre bande plastiche stazionarie C nella parte superiore. Le bande formatesi finora in corrispondenza delle cadute di tensione, presentano un'orientazione abbastanza orizzontale, anche se non sono ben delineate come quelle dei casi

precedenti. Nel tratto successivo della curva tensione-deformazione, non si vedono delle cadute di tensione molto marcate legate alla comparsa di bande plastiche. Infatti, facendo riferimento alle immagini catturate al 5%, 5,9%, 6,4%, 7% e 7,2% di deformazione, si può vedere una progressiva crescita della deformazione localizzata nelle bande plastiche che si erano formate, soprattutto nella zona superiore. Avendo modificato la scala, sembra che la deformazione si sia solo intensificata, ma in realtà c'è stata la nucleazione di altre bande plastiche stazionarie di tipo C che si sono sovrapposte a quelle precedenti. Facendo riferimento allo step al 7,2% di deformazione, istante di rottura del provino, si vede una zona con una deformazione plastica localizzata, ma non si vede una banda plastica con un'orientazione e dei bordi ben delineati e definiti. In quel punto la deformazione localizzata aveva raggiunto valori superiori al 18%.

## 9.12 Prova di trazione del provino R3TI

Il dodicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R3TI. Questo provino presentava una larghezza media di 6,66 mm, uno spessore medio di 1,74 mm e una sezione nominale di 11,57 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A_{\%}$  del 7,56 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 431 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 513 MPa e il provino si è rotto nella zona centrale.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

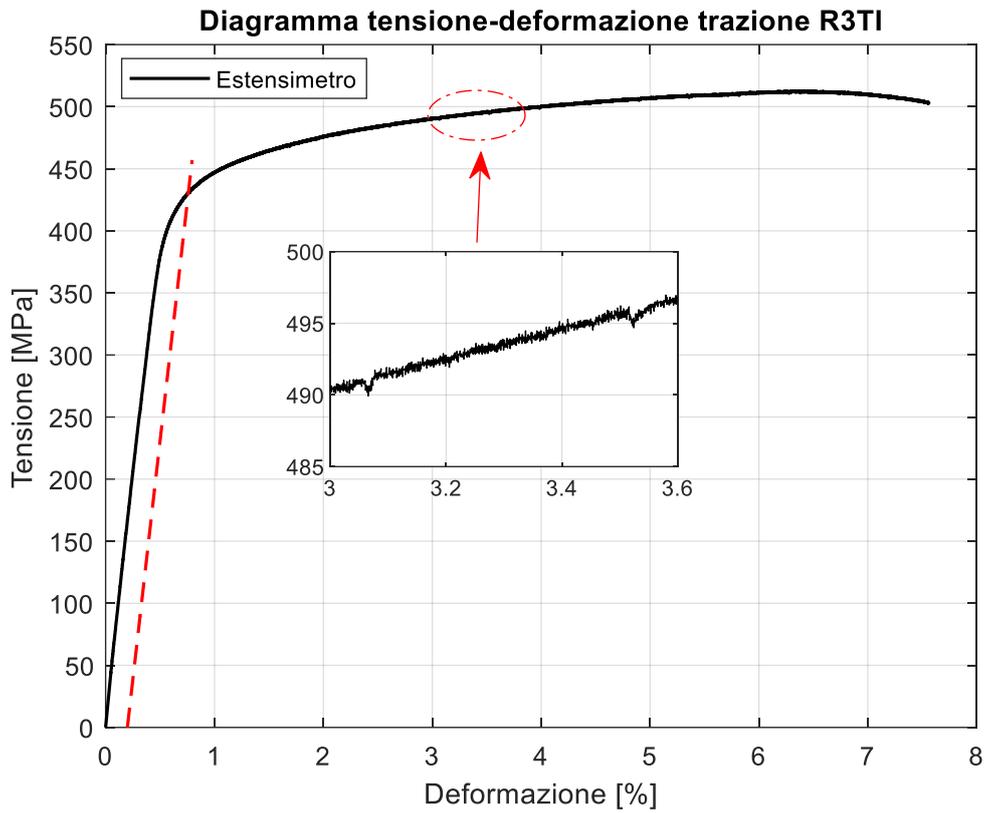


Figura 90: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R3TI.

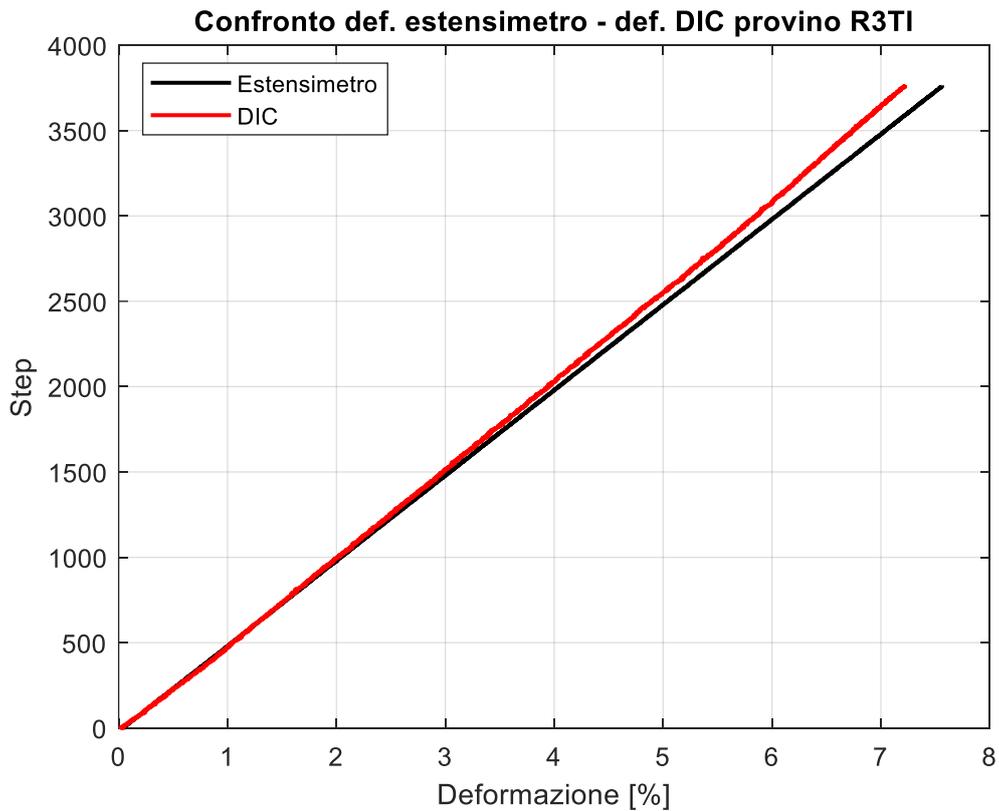


Figura 91: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si vede che la curva presenta un andamento molto regolare per tutta la durata della prova e non si nota la minima presenza di cadute di tensione o seghettature tipiche della formazione delle bande plastiche legate

all'effetto PLC. Una causa di questo comportamento anomalo potrebbe essere ricondotta al fatto che il provino presentava una sezione leggermente più ristretta nella zona centrale del provino., che ha fatto sì che la deformazione si localizzasse progressivamente in quella zona, togliendo la possibilità alle bande plastiche di svilupparsi in altri punti lungo la lunghezza utile del provino.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro, fino al 4% di deformazione. Dopo di che i valori di deformazione calcolati dal DIC tendono a discostarsi un po' da quelli misurati dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo -2,17%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano un po' i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

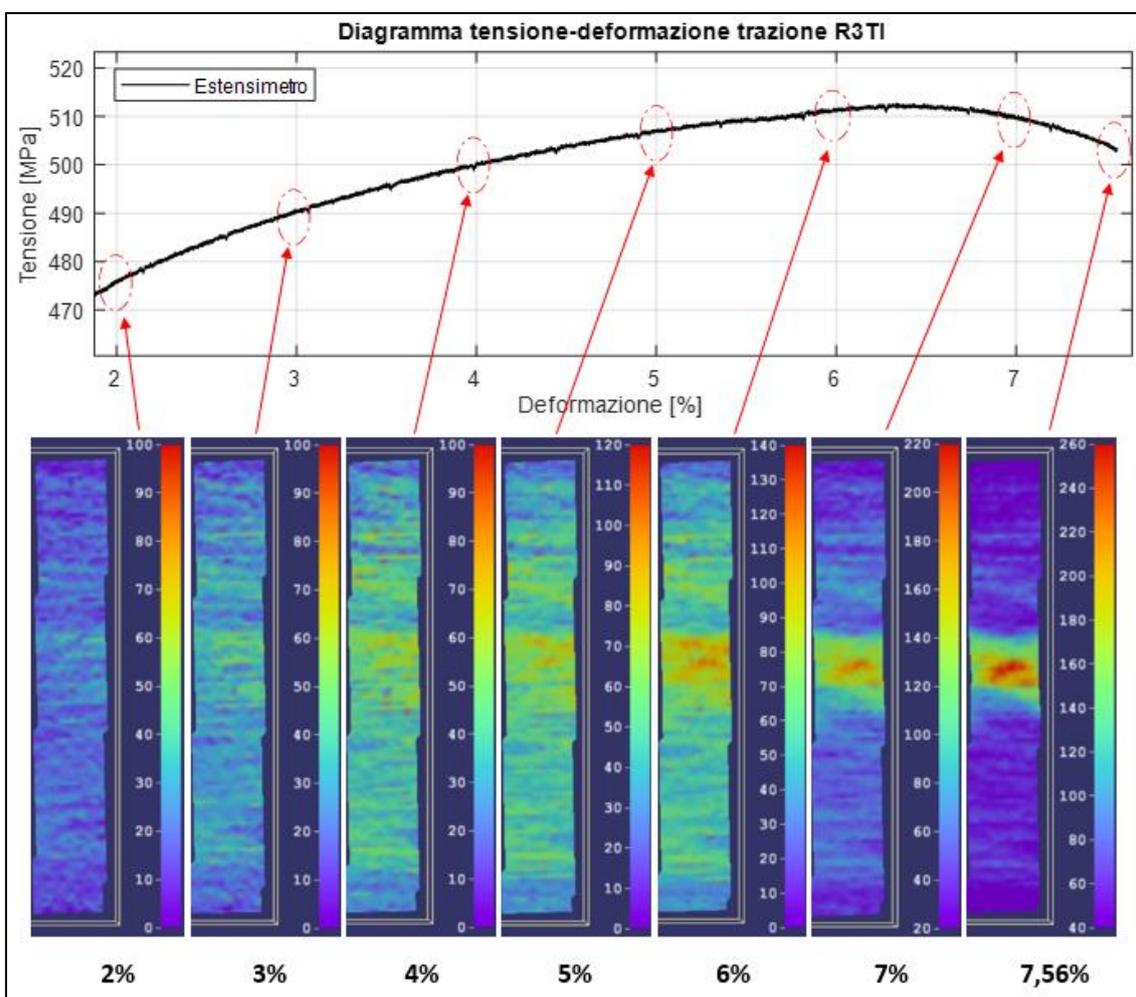


Figura 92: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante e agli step relativi al 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7% e 7,56% di deformazione, si può chiaramente vedere come la deformazione plastica si sia progressivamente localizzata nella zona centrale. Facendo riferimento allo step al 7,56% di deformazione, istante di rottura del provino, si vede che nella zona centrale in cui si è concentrata la deformazione, la deformazione plastica localizzata ha superato il 24%.

## 9.13 Prova di trazione del provino R5TC

Il tredicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R5TC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,63 mm, uno spessore medio di 1,73 mm e una sezione nominale di 11,46 mm<sup>2</sup>. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz. La prova di trazione è stata condotta in controllo di deformazione, con una velocità di deformazione impostata a 0.0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con il collasso del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A_{\%}$  del 6,50 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 485 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 547 MPa e il provino si è rotto nella parte superiore, tra il centro e la zona dei raccordi superiori.

Di seguito vengono riportati il grafico tensione – deformazione realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina MTS e il grafico di confronto tra gli andamenti delle deformazioni calcolate dall'estensimetro e di quelle calcolate tramite DIC.

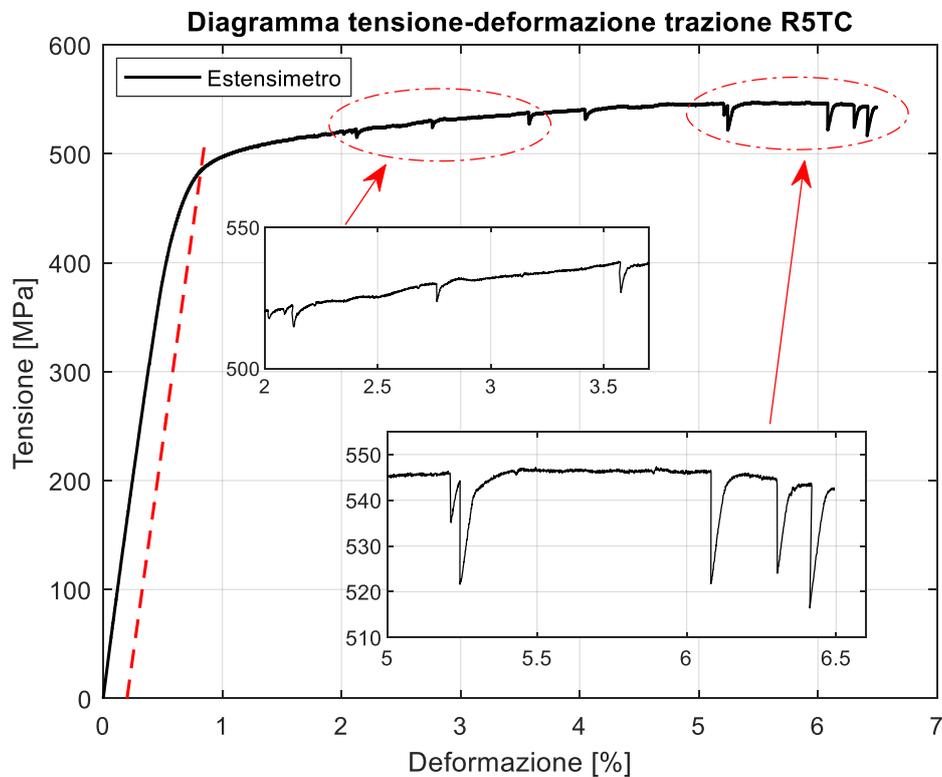


Figura 93: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R5TC.

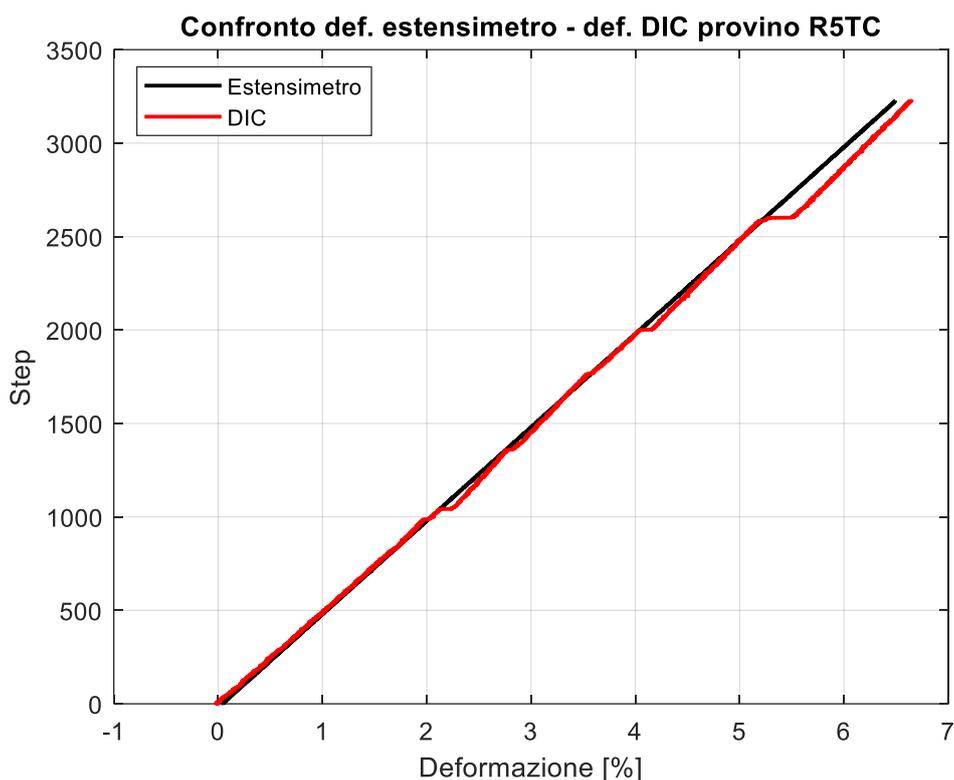


Figura 94: Grafico di confronto delle deformazioni, in nero i valori misurati dall'estensimetro, in rosso i valori calcolati dal DIC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si possono notare delle cadute di tensione che possono essere ricondotte alla formazione delle bande plastiche. Fino all'1,5% di deformazione la curva non presenta irregolarità. Dopo di che si possono notare, in corrispondenza del 2,1%, 2,8%, 3,6%, 4%, 5,2%, 6,1%, 6,5% di deformazione, delle cadute di tensione, le prime meno marcate, mentre le successive più accentuate, che sono tipiche della formazione bande plastiche. Rispetto ai provini longitudinali, dopo i punti con cadute di tensioni non si vedono dei tratti con andamento seghettato molto accentuato, ad ampiezza e frequenza regolare, che nei casi visti in precedenza erano legati alla propagazione delle bande plastiche.

Per quanto riguarda invece l'andamento del grafico di confronto tra i valori di deformazione misurate dall'estensimetro e quelli calcolati dal DIC, si può vedere che l'andamento dei valori di deformazione calcolati dal DIC segue molto bene l'andamento dei valori di deformazione misurati dall'estensimetro, fino al 5,2% di deformazione. Da questo punto in poi i valori di deformazione calcolati dal DIC tendono a distaccarsi un po' dai valori letti dall'estensimetro. Complessivamente è stato calcolato un errore medio percentuale, pari allo -1,16%. In questo caso i valori di deformazione calcolati dal DIC sottostimano un po' i valori di deformazione calcolati dall'estensimetro.

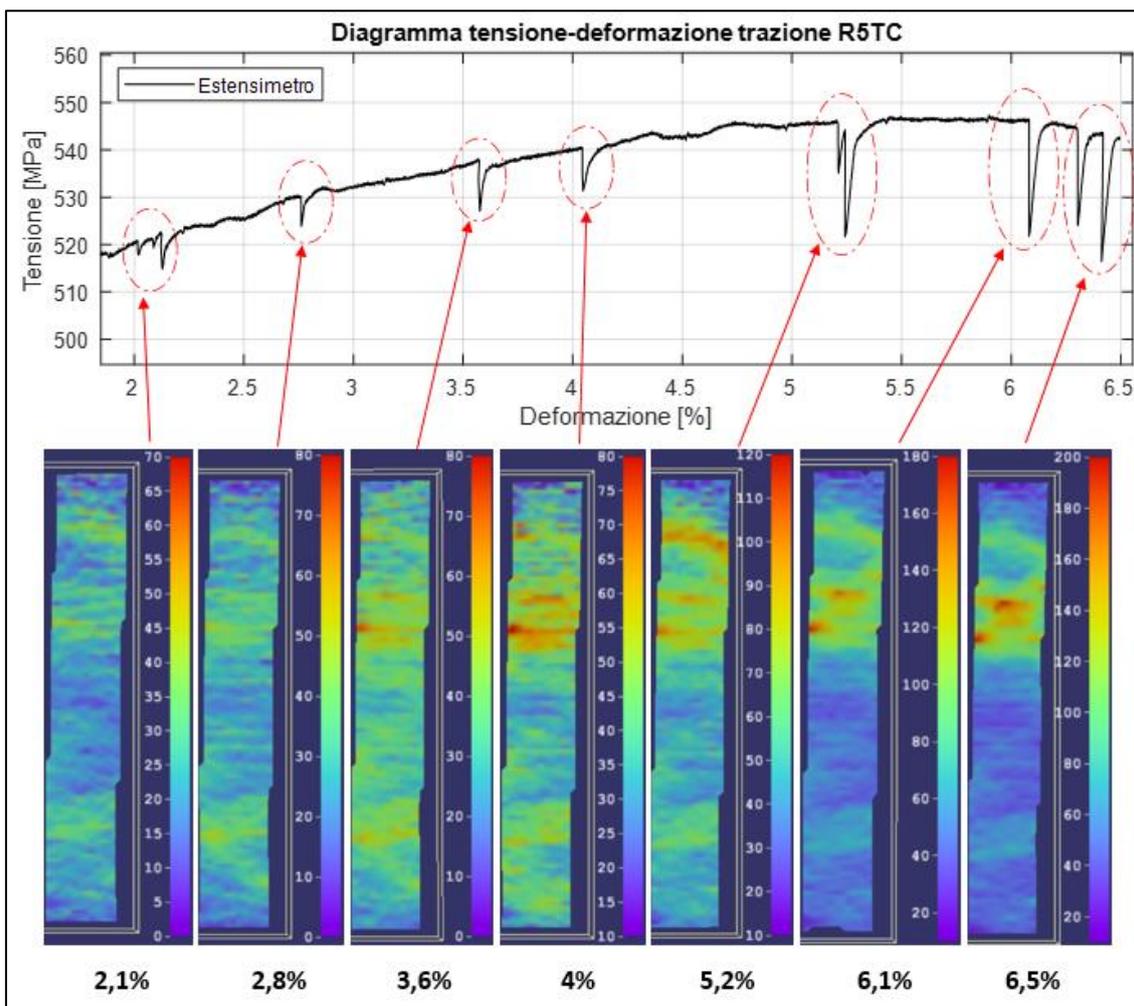


Figura 95: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che fino a poco prima del 2% la deformazione rimane praticamente uniforme lungo il provino. In corrispondenza del 2,1% si formano tre bande stazionarie di tipo C, nella parte superiore, centrale e inferiore del provino. Dopo di che, anche in corrispondenza del 2,8% si vede la formazione di un'altra banda stazionaria C, di nuovo nella parte inferiore del provino. Successivamente al 3,6% e 4% si formano in successione due bande stazionarie C, poco al di sopra della zona centrale e in quella zona la deformazione localizzata arriva a superare l'8%. Le bande formatesi finora in corrispondenza delle cadute di tensione, presentano un'orientazione orizzontale o poco inclinata, che coincide con la direzione d'orientazione dei cristalli e della direzione di laminazione della lastra, dato che il provino in questione è di tipo trasversale. Al 5,2% si formano in rapida successione altre due bande stazionarie C, nella parte superiore della regione d'interesse inquadrata dalla videocamera. L'effetto non è molto visibile per via del cambiamento di scala. È bene ricordare che bisogna correlare le deformazioni in ciascuna immagine alla scala adottata per comprendere il fenomeno osservato. Da questo punto in poi la formazione di bande, si concentra in una zona ristretta nella parte superiore del provino, infatti facendo riferimento alle immagini catturate al 6,1% e 6,5% di deformazione, si vede che si formano in successione tre bande stazionarie C non molto delineate, l'ultima delle quali porta a rottura il provino. Facendo riferimento allo step al 6,5% di deformazione, istante di rottura del provino, si vede una zona con una deformazione plastica localizzata, con tre bande abbastanza delineate e in quel punto la deformazione localizzata aveva raggiunto dei valori superiori al 20%.

## 9.14 Prova di trazione del provino R6TS

Il quattordicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R6TS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,61 mm, uno spessore medio di 1,74 mm e una sezione nominale di 11,52 mm<sup>2</sup>. Prima di eseguire la prova di trazione il provino è stato lucidato e poi attaccato con acido fosforico e colorante Weck (che verrà presentato nei capitoli successivi di questa trattazione). Dopo di che la prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, senza utilizzare l'estensimetro, perchè altrimenti le bacchette dell'estensimetro avrebbero rovinato lo strato di ossido di manganese ottenuto tramite colorazione Weck sulla superficie del provino. La prova di trazione è stata fermata al 5% di deformazione, perchè non volevamo che il provino si rompesse, ma volevamo solo vedere l'effetto delle bande plastiche sulla superficie del provino. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 8 Hz i valori di carico provenienti dalla macchina MTS. La prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone, con una velocità impostata a 0,0045 mm/mm\*s<sup>-1</sup>, in modo da ottenere una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che è stata fermata quando il provino è arrivato al 5% di deformazione e 480 MPa di carico di trazione, per evitare che si rompesse, è stato ottenuto un limite elastico  $R_{p02}$  di 427 MPa.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione calcolati tramite DIC e i valori di carico provenienti dalla macchina MTS e registrati dal computer DIC.

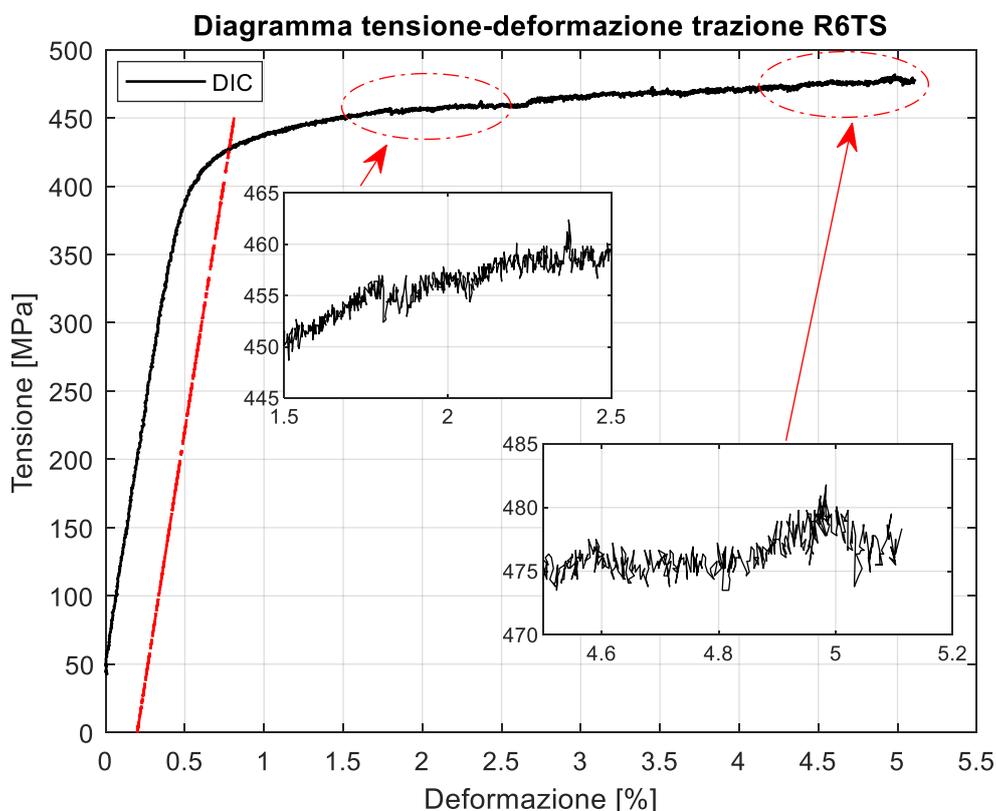


Figura 96: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R6TS.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, non si vedono delle cadute di tensione molto marcate, l'andamento della curva è molto disturbato e facendo uno zoom si vedono delle increspature, che possono essere ricondotte all'effetto PLC, ma non si

vedono delle seghettature con ampiezza e frequenza regolari, come quando sono stati utilizzati i valori letti dall'estensimetro per fare i grafici.

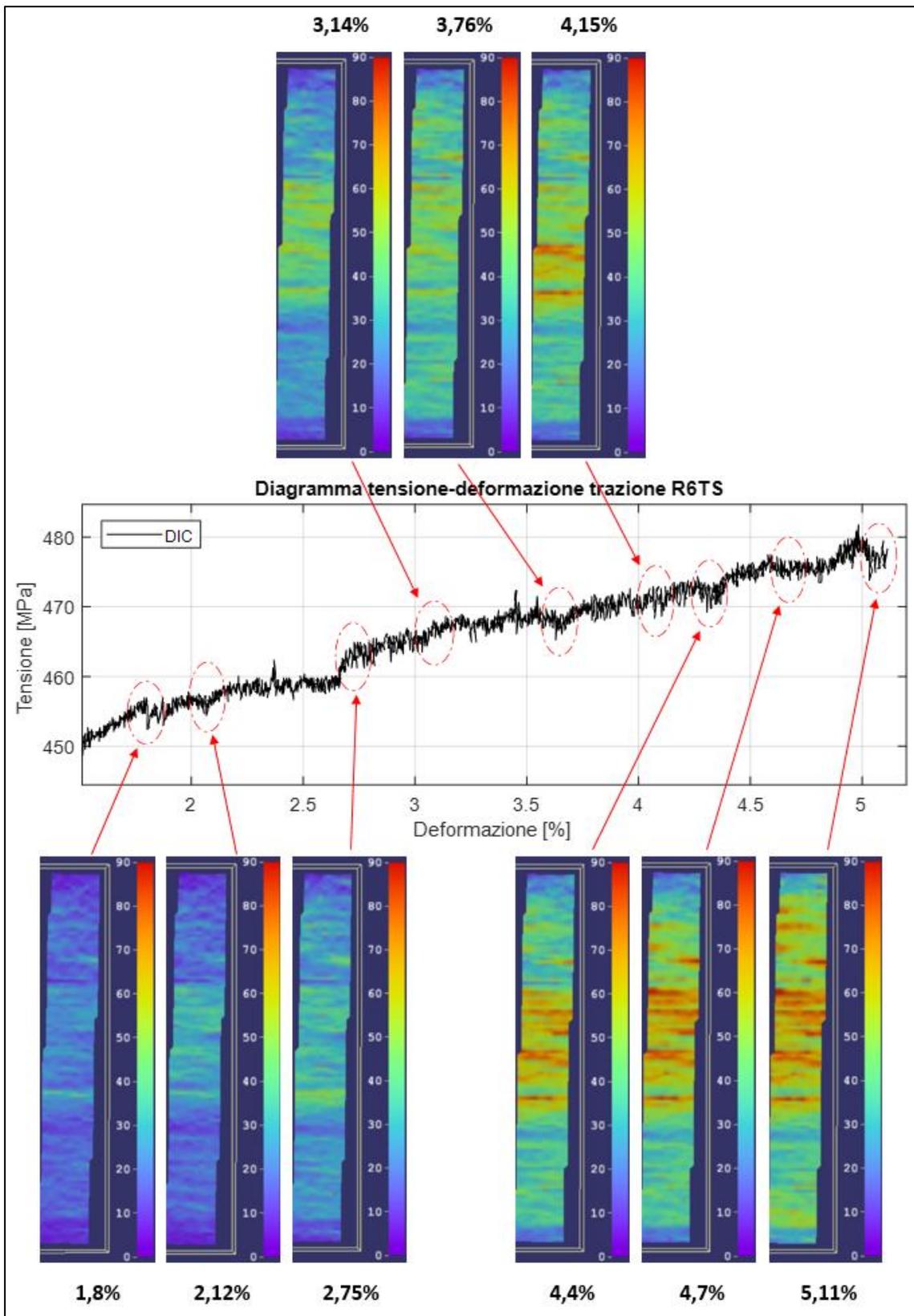


Figura 97: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento alla curva tensione deformazione e alle immagini catturate tramite DIC si vede che la

deformazione rimane pressoché costante fino all'1,5%. Dopo di che la deformazione tende a muoversi lungo il campione; questa progressiva intensificazione della deformazione è dovuta alla formazione di nuove bande e non ad una banda che si allarga. Durante questo movimento, si formano delle bande plastiche stazionarie C nella zona centrale del provino. Le bande formatesi presentano un'orientazione orizzontale, che coincide con la direzione di laminazione, dato che questo è un provino trasversale. Man mano che la prova prosegue, continuano a formarsi altre bande stazionarie C, sempre nella stessa zona e in quelle già formatesi la deformazione continua ad intensificarsi. Facendo riferimento alla scala relativa alla deformazione dello step al 4,15% di deformazione, si può vedere che già in questo punto, la deformazione localizzata aveva raggiunto un valore superiore al 9%, in due bande stazionarie. Dopo di che, man mano che la prova va avanti, nei punti in corrispondenza del 4,4%, 4,7% di deformazione si vede la formazione continua di nuove bande plastiche stazionarie di tipo C, nella zona centrale del provino. All'istante d'interruzione della prova di trazione, che si è verificata al 5,11%, la deformazione localizzata in corrispondenza del sistema di multibande centrale, ha raggiunto un valore superiore al 9%. Complessivamente, tutte le bande stazionarie di tipo C che si sono formate hanno presentato un'orientazione orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale superficiale.

## 9.15 Prova di trazione del provino R6TC

Il quindicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R6TC. Questo provino presentava una larghezza media di 6,67 mm, uno spessore medio di 1,72 mm e una sezione nominale di 11,48 mm<sup>2</sup>. Prima di eseguire la prova di trazione il provino è stato lucidato e poi attaccato con acido fosforico, senza fare la colorazione Weck. Dopo di che la prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, senza utilizzare l'estensimetro, perchè altrimenti le bacchette dell'estensimetro avrebbero rovinato la superficie lucidata del provino, rigandolo. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 7 Hz i valori di carico provenienti dalla macchina MTS. La prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone, con una velocità impostata a 0,0045 mm/mm\*s<sup>-1</sup>, in modo da ottenere una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con la rottura del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 5,26 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 471 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 529 MPa e il provino si è rotto nella parte centrale, a metà.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione calcolati tramite DIC e i valori di carico provenienti dalla macchina MTS e registrati dal computer DIC.

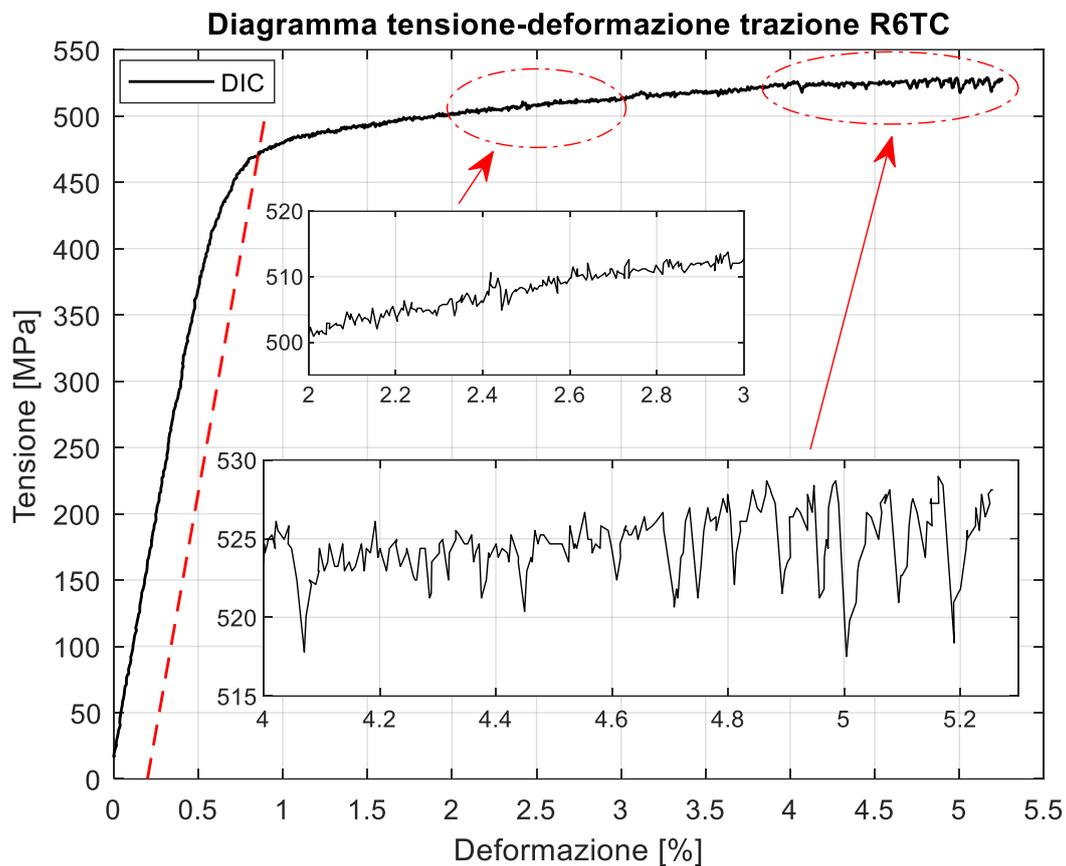


Figura 98: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R6TC.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, non si vedono delle cadute di tensione molto marcate, l'andamento della curva è meno disturbato del caso precedente, perché sono stati usati un numero minore di dati per costruire la curva. Rispetto ai grafici delle prove condotte in precedenza, non si vedono delle seghettature con ampiezza e frequenza regolari tipiche dell'effetto PLC. Verso la fine della prova si vedono delle cadute di tensione più marcate e irregolari che rappresenta la formazione repentina di nuove bande plastiche nella zona in cui poi si avrà la rottura del provino.

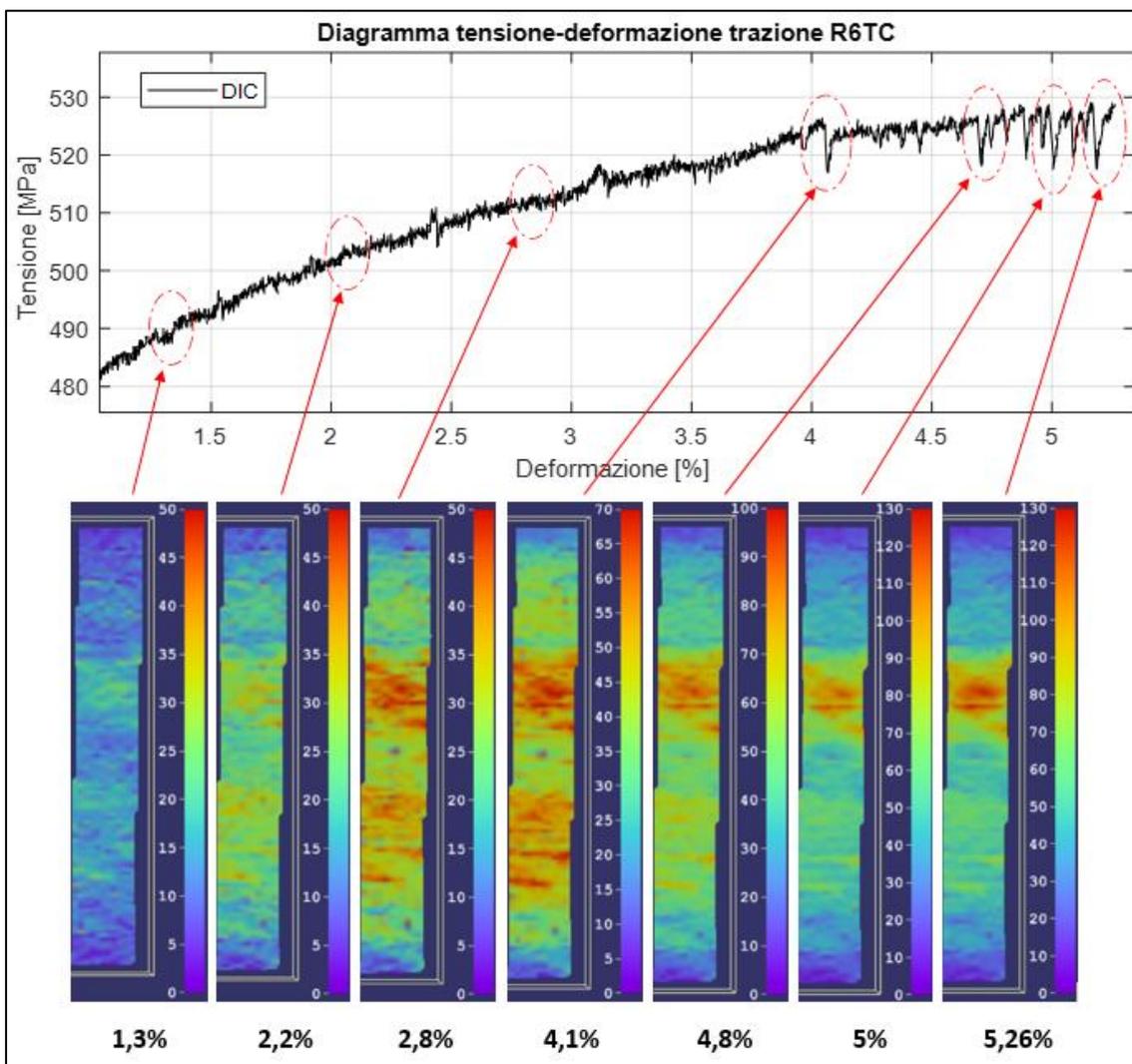


Figura 99: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che rispetto ai casi precedenti non si riesce a distinguere un punto preciso in cui la deformazione smette di essere uniforme e incomincia a manifestarsi l'effetto PLC. In corrispondenza dell'1,3%, 2,2%, 2,8% lungo la curva non si notano cadute di tensione o irregolarità molto marcate, però nelle immagini acquisite si vede la formazione di più bande plastiche in due zone ben distinte del provino, confinanti con la zona centrale del campione. Si tratta di bande che dopo essersi formate rimangono stazionarie. In corrispondenza del 2,8% di deformazione, la deformazione localizzata in corrispondenza delle bande formatesi è già superiore al 5%. Successivamente, in corrispondenza del 4,1%, 4,8%, 5% e 5,26% si formano delle cadute di tensione molto marcate e repentine. Al 4,8% si vede una zona più in alto in cui non si distinguono bene le bande formatesi, mentre nella zona più in basso si vede che le bande hanno un'orientazione orizzontale. In entrambi i casi le bande sono stazionarie di tipo C. Successivamente si formano altre bande, sempre stazionarie di tipo C, sempre nella stessa zona centrale del provino, che portano ad una intensificazione della deformazione. Al 5% di deformazione, la deformazione localizzata in corrispondenza della zona in cui si sono formate queste ultime bande plastiche, ha raggiunto un valore superiore al 13%. Facendo riferimento allo step al 5,26% di deformazione, istante di rottura del provino, si vede una zona con una deformazione plastica localizzata, in cui si è formata l'ultima banda che ha portato alla rottura del provino, ma non si vede una banda plastica con un'orientazione e dei bordi ben delineati e definiti.

Dall'immagine si può vedere come in quel punto la deformazione localizzata abbia raggiunto dei valori superiori al 13%.

## 9.16 Prova di trazione del provino R4TI

Il sedicesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R4TI. Questo provino presentava una larghezza media di 6,55 mm, uno spessore medio di 1,72 mm e una sezione nominale di 11,24 mm<sup>2</sup>. Prima di eseguire la prova di trazione il provino è stato lucidato e poi attaccato con acido fosforico, senza fare la colorazione Weck. Dopo di che la prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, senza utilizzare l'estensimetro, perchè altrimenti le bacchette dell'estensimetro avrebbero rovinato la superficie lucidata del provino, rigandolo. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz i valori di carico provenienti dalla macchina MTS. La prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone, con una velocità impostata a 0,0045 mm/mm\*s<sup>-1</sup>, in modo da ottenere una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con la rottura del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 5,98 %, un limite elastico  $R_{p0.2}$  di 418 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 489 MPa e il provino si è rotto nella parte centrale, a metà.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione calcolati tramite DIC e i valori di carico provenienti dalla macchina MTS e registrati dal computer DIC.

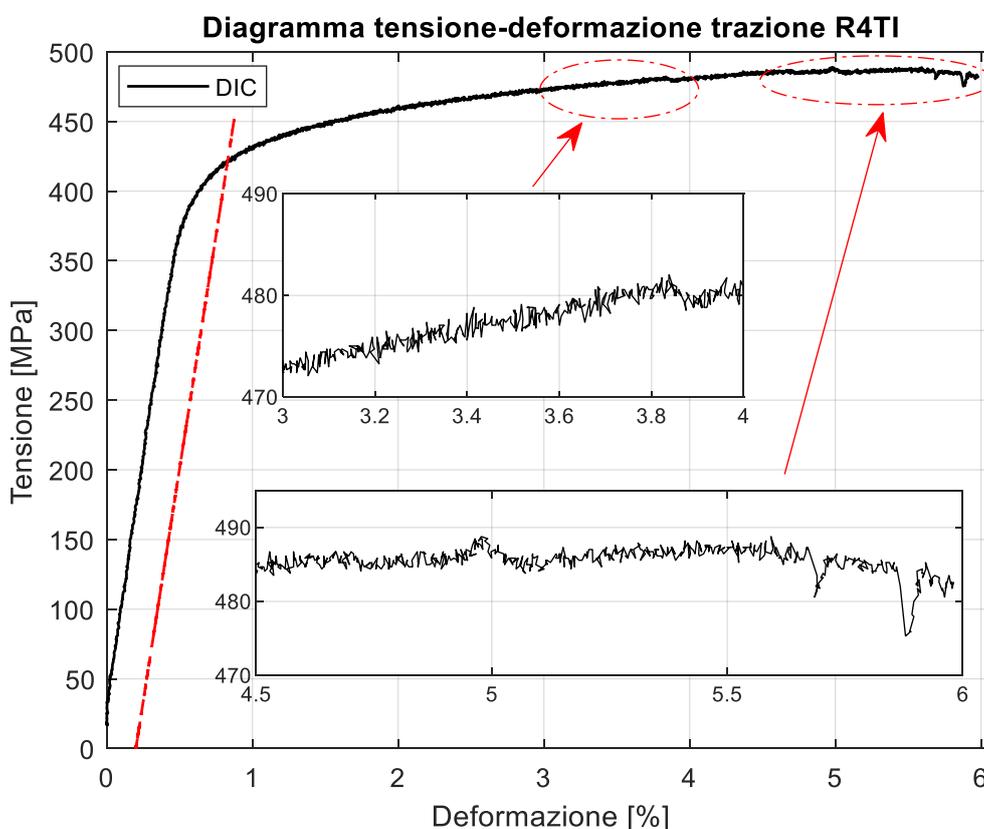


Figura 100: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R4TI.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si vede che la curva presenta un andamento piuttosto regolare e solo in alcuni punti si vedono delle irregolarità. In particolare, si possono osservare una piccola caduta di tensione al 3,8%, un gradino al 5% e due cadute di tensione, una in seguito all'altra, verso la fine della prova in corrispondenza del 5,7% e 5,9% di deformazione. Proprio queste ultime due cadute di tensione osservate al termine della prova potrebbero rappresentare la formazione repentina di nuove bande plastiche nella zona in cui poi si avrà la rottura del provino.

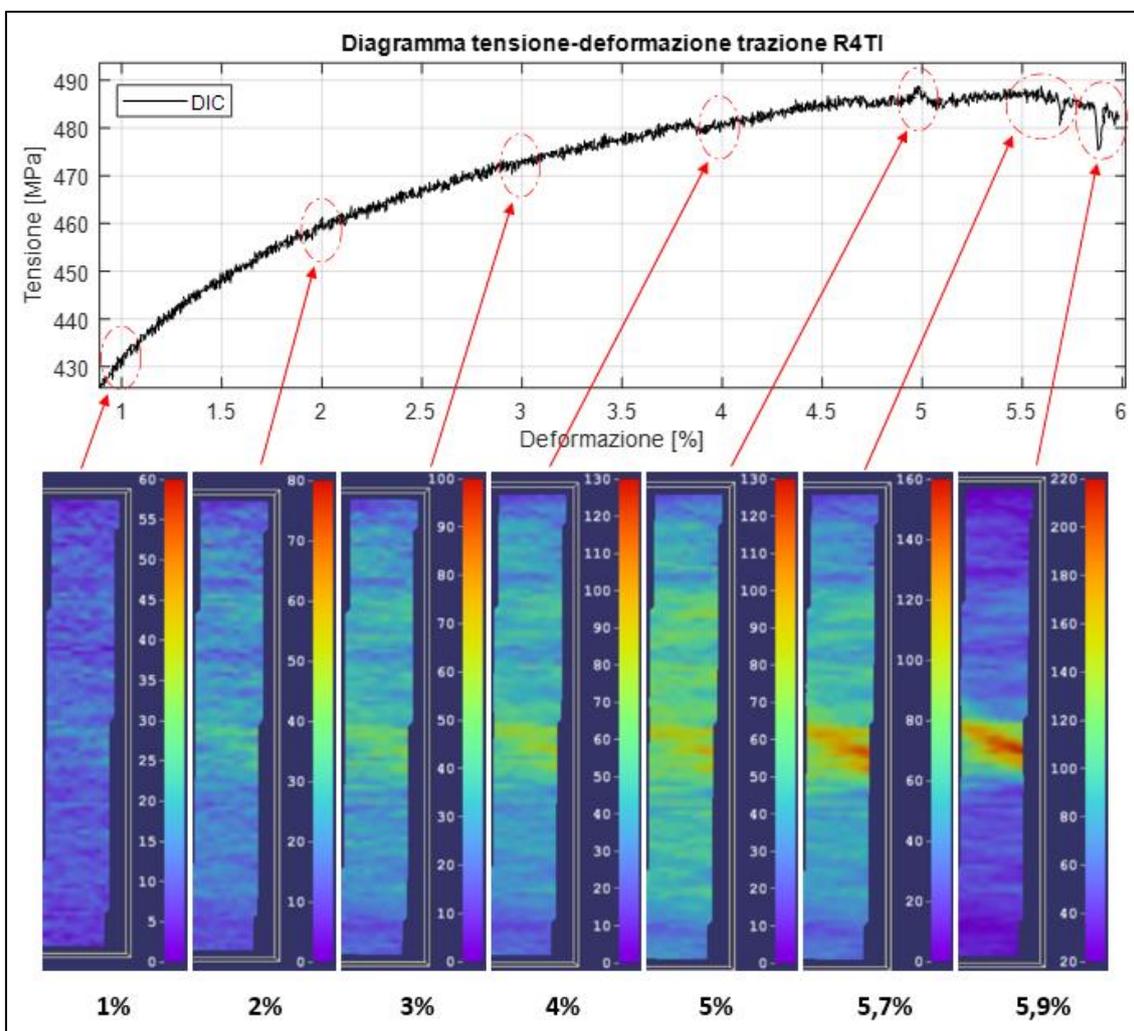


Figura 101: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante e agli step relativi all'1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 5,7% e 5,9% di deformazione, si può chiaramente vedere come la deformazione plastica si sia progressivamente localizzata soprattutto nella zona centrale, fino a portare alla rottura del provino. Fino all'1% la deformazione rimane uniforme. Al 2% diventa maggiormente visibile una banda plastica di tipo C nella zona centrale del provino, in questo punto alla fine si avrà la rottura del provino. Da questo momento in poi, guardando i fotogrammi catturati al 3%, 4% e 5% si può vedere come la deformazione continua a crescere in questa banda e lungo tutto il provino si formano delle bande plastiche stazionarie orizzontali di tipo C, nelle quali la deformazione risulta meno intensa. Al 5,7% di deformazione si può vedere come la caduta di tensione coincida con la formazione di una banda di tipo C molto intensa che raggiunge valori di deformazione localizzata superiori al 16%. Al 5,9% di deformazione in corrispondenza della caduta di tensione, si verifica sempre nello stesso punto, la formazione di un'altra banda stazionaria di tipo C, che causa

un'intensificazione della deformazione. Dal relativo fotogramma si può vedere che la deformazione localizzata si è intensificata molto, superando il 22% di deformazione. Quest'ultima banda ha causato un forte stress nel provino, infatti subito dopo c'è stata la rottura, che è avvenuta al 6% di deformazione.

Facendo sempre riferimento allo step al 5,9% di deformazione, si vede che la banda plastica che ha portato a rottura il provino, presentava un'inclinazione di circa 60° rispetto alla direzione di applicazione del carico. Tutta la superficie del tratto utile del provino risultava bandizzata, con bande plastiche stazionarie di minore entità che presentavano un'intensità di deformazione intorno al 6%, in accordo con il valore di deformazione media a cui era sottoposto il campione, fino all'istante in cui si è rotto. Inoltre le bande plastiche presentavano tutte orientazione più o meno orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale.

### **9.17 Prova di trazione del provino R7TS**

Il diciassettesimo provino della terza serie, ad essere stato sottoposto alla prova di trazione è il campione R7TS. Questo provino presentava una larghezza media di 6,57 mm, uno spessore medio di 1,74 mm e una sezione nominale di 11,44 mm<sup>2</sup>. Prima di eseguire la prova di trazione il provino è stato lucidato e poi attaccato con acido fosforico, senza fare la colorazione Weck. Dopo di che la prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone della macchina MTS, senza utilizzare l'estensimetro, perchè altrimenti le bacchette dell'estensimetro avrebbero rovinato la superficie lucidata del provino, rigandolo. Durante la prova la macchina MTS acquisiva valori con una frequenza di 10 Hz, mentre il pc DIC acquisiva ad una frequenza di 5 Hz i valori di carico provenienti dalla macchina MTS. La prova di trazione è stata condotta in controllo di velocità di spostamento del pistone, con una velocità impostata a 0,0045 mm/mm\*s<sup>-1</sup>, in modo da ottenere una velocità di deformazione di 0,0001 mm/mm\*s<sup>-1</sup>. Alla fine della prova, che si è conclusa con la rottura del provino, sono stati ottenuti un allungamento a rottura  $A\%$  del 6,86 %, un limite elastico  $R_{p02}$  di 420 MPa e una resistenza a trazione  $R_m$  di 486 MPa e il provino si è rotto nella parte centrale, a metà.

Di seguito viene riportato il grafico tensione – deformazione realizzato utilizzando i valori di deformazione calcolati tramite DIC e i valori di carico provenienti dalla macchina MTS e registrati dal computer DIC.

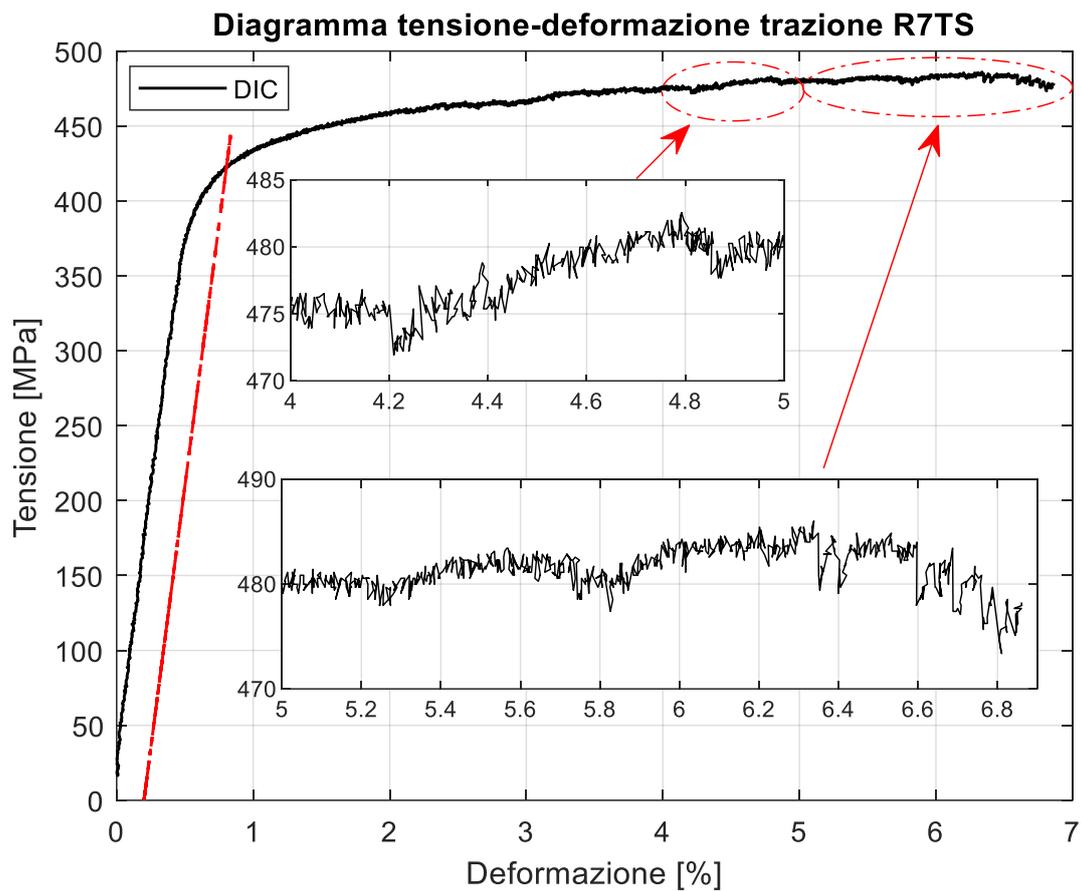


Figura 102: Grafico tensione - deformazione della prova di trazione del provino R7TS.

Facendo riferimento all'andamento del grafico tensione – deformazione, si può vedere che la curva è abbastanza regolare e in certi punti si vedono dei fenomeni tipici dell'effetto PLC. In particolare, si può vedere che fino al 2% la curva è molto regolare e priva di discontinuità. Lungo l'andamento della curva, nel tratto che va dal 2% al 3%, in corrispondenza del 4,3%, 4,9%, 5,8% e dal 6,4% fino al 6,9% di deformazione, si vedono delle irregolarità e cadute di tensione, tipiche della formazione di bande plastiche e riconducibili all'effetto PLC.

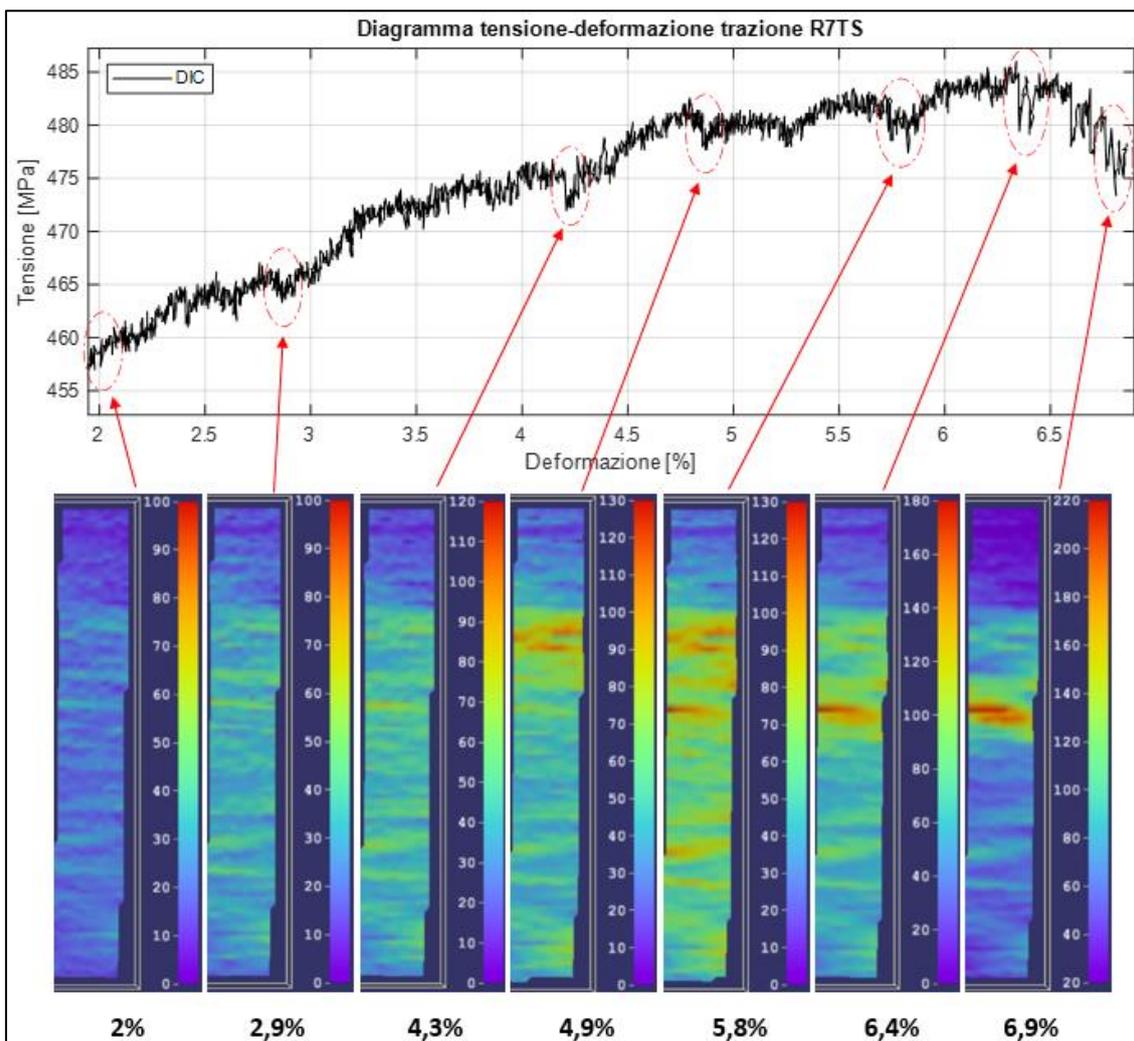


Figura 103: Analisi tramite DIC dell'effetto PLC lungo il grafico tensione-deformazione.

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione plastica tramite DIC, facendo riferimento all'immagine soprastante, è emerso che fino a poco prima del 2% la deformazione rimane praticamente uniforme. In corrispondenza del 2% incominciano a vedersi delle bande plastiche stazionarie distribuite lungo la superficie del provino e orientate lungo la direzione di laminazione. Facendo riferimento agli step al 2,9% e 4,3%, si vede che le bande rimangono stazionarie e la deformazione in corrispondenza di esse s'intensifica, raggiungendo un valore intorno al 6%. Dopo di che al 4,9% si forma un'altra banda stazionaria C nella parte superiore del provino che raggiunge un valore di deformazione localizzata superiore al 13%. Al 5,9% succede la stessa cosa, si formano due bande plastiche stazionarie C, una al centro e l'altra nella parte inferiore del provino e anche in esse la deformazione localizzata supera il 13%. In corrispondenza del 6,4% si formano, in rapida successione, due bande plastiche stazionarie C al centro del provino, che fanno localizzare la deformazione in questo punto, facendole raggiungere il 18%. Da questo punto in poi, fino alla rottura del provino si formano quattro bande plastiche stazionarie C che si localizzano al centro del provino. Vedendo solo le foto si vede solo l'intensificazione della deformazione, invece osservando i video relativi alla DIC, si vede la comparsa di nuove bande che vanno a sovrapporsi parzialmente a quelle già presenti. Facendo riferimento allo step al 6,9% di deformazione, istante di rottura del provino, si può osservare la deformazione localizzata in corrispondenza della banda centrale dove si è rotto il provino, che ha raggiunto un valore superiore al 22%. Complessivamente, la maggior parte delle bande che si sono formate hanno presentato un'orientazione orizzontale, coincidente con la direzione di laminazione della lastra, dato che questo era un provino trasversale superficiale. Mentre una banda plastica formatasi

nella parte inferiore del provino ha presentato un'inclinazione di circa 60° rispetto alla direzione di applicazione del carico.

## 9.18 Considerazioni finali sulla terza serie di provini

Dalla conclusione delle prove di trazione sulla terza serie di provini, è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Per le calibrazioni di questa serie di provini è stato utilizzato il calibratore da 2mm, con il quale sono state ottenute sempre delle buone calibrazioni, con valori di residuum intorno allo 0,30.
- Per quanto riguarda il calcolo delle deformazioni tramite la tecnica di correlazione d'immagini digitali, abbiamo potuto constatare che il pattern naturale del provino, dato dall'operazione di taglio con elettroerosione, non va bene, perchè risulta essere troppo fine e omogeneo per il software ISTRa, che durante l'operazione di evaluation inizialmente trova i riferimenti e riesce a calcolare il campo di spostamenti, però da un certo punto in poi smette di riconoscere i riferimenti e quindi poi non è più stato in grado di calcolare il campo di spostamenti e di conseguenza i valori e i gradienti di deformazione.
- Utilizzando dei provini con una dimensione pari alla metà dei provini della seconda serie, è stato possibile superare l'inconveniente legato alle dimensioni della superficie ripresa dal campo visivo della telecamera. In questo modo la ROI non veniva più disturbata dalle bacchette dell'estensimetro e così i gradienti di deformazione erano privi di disturbi e nelle immagini acquisite dal DIC non si vedono più le due linee orizzontali.  
Con questa serie di provini è stato possibile ottenere una qualità maggiore delle immagini acquisite e dei dati di deformazione calcolati. Oltre a capire quale tipologia di bande si formavano e dove si formavano, è stato anche possibile determinare l'orientazione, l'angolazione delle bande e l'intensità della deformazione localizzata nei singoli punti del provino e delle bande plastiche.
- Eseguendo le prove di trazione nel giro di 10-15 minuti dalla realizzazione del pattern sui provini, la vernice non risultava troppo secca e durante la prova non si è più sfaldata, permettendo così il calcolo delle deformazioni fino alla fine della prova.
- Considerando i valori, ottenuti in tutte le prove di trazione, sono stati ottenuti i seguenti valori medi relativi a limite elastico  $R_{p02}$ , resistenza a trazione  $R_m$  e allungamento a rottura  $A\%$ .

Posizione	$R_{p02}$ [Mpa]	$R_m$ [Mpa]	A%	Bande
LS	408	456	7,89%	A – C
LI	459	524	4,67%	A – B – C
LC	510	561	3,58%	B – C
TS	426	493	6,33%	A – B – C
TI	430	509	7,07%	C
TC	485	549	6,02%	C

Tabella 6: Valori medi, relativi a limite elastico  $R_{p02}$ , resistenza a trazione  $R_m$  e allungamento a rottura  $A\%$ , ricavati dalle prove di trazione.

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva dei dati principali relativi alle precedenti prove di trazione. Per rendere la tabella più snella le informazioni verranno presentate con la seguente nomenclatura:

$f_{MTS}$  = frequenza MTS [HZ]

$f_{DIC}$  = frequenza DIC [HZ]

$v_p$  = Velocità di spostamento del pistone [mm/s]

$v_{def}$  = Velocità di deformazione [mm/mm\*s<sup>-1</sup>]

$C$  = Controllo prova di trazione

$v.s.p.$  = Controllo prova di trazione in velocità di spostamento del pistone

$v.def.$  = Controllo prova di trazione in velocità di deformazione

$N.O.$  = non osservate perché non è stata condotta la DIC per mancanza del pattern.

	$f_{MTS}$	$f_{DIC}$	$v_p$	$v_{def}$	$C$	$R_{p02}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A%	Bande
<b>R6LS</b>	20	3	---	0,0001	<i>v.def.</i>	414	460	6,1%	A-C
<b>R7LC</b>	20	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	511	565	3,32%	<i>N.O.</i>
<b>R4LI</b>	15	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	447	503	4%	<i>N.O.</i>
<b>R8LS</b>	15	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	401	452	8,54%	<i>N.O.</i>
<b>R6LC</b>	15	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	501	556	4,47%	C
<b>R5LC</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	502	558	3,91%	C
<b>R5LS</b>	10	4	---	0,0001	<i>v.def.</i>	404	453	9,16%	A-C
<b>R1LI</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	470	544	5,34%	A-B-C
<b>R5TS</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	421	496	7,56%	C
<b>R2TI</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	441	525	7,66%	---
<b>R4TC</b>	10	6	---	0,0001	<i>v.def.</i>	491	556	7,22%	C
<b>R3TI</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	431	513	7,56%	C
<b>R5TC</b>	10	5	---	0,0001	<i>v.def.</i>	485	547	6,49%	C
<b>R6TS</b>	10	8	0,0045	0,0001	<i>v.s.p.</i>	427	---	5%	C
<b>R6TC</b>	10	7	0,0045	0,0001	<i>v.s.p.</i>	471	529	5,26%	C
<b>R4TI</b>	10	5	0,0045	0,0001	<i>v.s.p.</i>	418	489	5,98%	C
<b>R7TS</b>	10	5	0,0045	0,0001	<i>v.s.p.</i>	420	486	6,86%	C

Tabella 7: Dati relativi alle prove di trazione della terza serie di provini.

## 10 Analisi metallografica tramite reagente Weck

La metallografia è una tecnica di studio che viene applicata alla struttura dei grani che compongono la lega metallica, nel nostro caso l'abbiamo utilizzata per studiare due campioni della lega d'alluminio 8090, un campione ricavato dalla superficie (S) della lastra e uno ricavato dallo strato a cuore (C). Prima di passare all'analisi dei campioni tramite microscopio ottico, è stata utilizzata una procedura chimica per mettere in risalto i grani sulla superficie. Prima dell'attacco chimico, la superficie dei provini è stata levigata con carte abrasive inizialmente da 800 e via via più fini fino ad arrivare alla 2400 e poi lucidata con dei panni utilizzando una sospensione di silica colloidale, nella quale era stata disciolta una perlina di NaOH, per renderla un po' più aggressiva. Dopo di che è stata applicata la procedura di attacco che consiste di due step:

- 1) Prima si effettua un primo attacco chimico tramite una soluzione di  $H_3PO_4$ . Durante il pre-attacco chimico, l'acido fosforico corrode preferenzialmente alcuni grani e allo stesso tempo promuove delle modifiche sulla chimica superficiale, che rendono alcuni grani meno reattivi all'attacco Weck successivo. L'acido fosforico aggredisce solo i grani orientati secondo certi piani cristallografici. In questo modo si riesce a modificare il comportamento che hanno i grani a reagire con il colorante Weck e si riesce ad avere una variazione di contrasto nella colorazione dei diversi grani.
- 2) Poi si fa un attacco colorante, denominato *Weck*, tramite una soluzione acquosa di  $KMnO_4$  e NaOH. L'attacco Weck reagisce solo con le aree superficiali formando uno strato di ossido di manganese  $MnO_2$ , senza alterare significativamente la morfologia del grano. I grani si coloreranno in modo differente a seconda dell'orientazione e il colore andrà dal blu al marrone.

Alla fine del processo di lucidatura con la sospensione di silica colloidale, sulla superficie del campione si avrà uno strato poroso composto da ossido d'alluminio  $Al_2O_3$  e ossido di silice  $SiO_2$ . Quando si sottopone il campione al pre-attacco chimico con acido fosforico, alcuni grani saranno più soggetti a corrosione di altri a seconda dell'orientazione cristallografica, in particolare i grani anodici saranno più soggetti a corrosione di quelli catodici. Durante questo processo, l'acido fosforico non corrode lo strato di ossido poroso, ma promuove la dissoluzione dell'Al che si trova sotto questo strato, con la conseguente formazione di  $Al_2O_3$  e di bolle di idrogeno gassoso. Visivamente alla fine di questo pre-attacco la superficie del campione tende a opacizzarsi. Invece, durante l'attacco colorante Weck, dato che questa è una soluzione con un elevato pH, si ha la dissoluzione dello strato di ossido poroso composto da  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , che era presente sulla superficie dell'alluminio. Durante la rapida immersione nella soluzione, lo strato presente sui grani anodici si scioglie parzialmente, mentre quello sui grani catodici si scioglie completamente. In questo modo, sui grani catodici viene esposta una nuova superficie di Al, sulla quale si forma uno strato di  $MnO_2$ , mentre sopra i grani anodici si forma uno strato più sottile, questo dipende dal tempo d'immersione e da quanto era stata intensa la corrosione ottenuta con il pre-attacco acido. Questa differenza determinerà il diverso contrasto e tonalità nella colorazione dei diversi grani, dovuto al diverso assorbimento della luce da parte del film di  $MnO_2$ , che potrà essere osservata tramite un microscopio ottico. È importante ricordare che non è possibile mettere in risalto i cristalli, se prima dell'attacco Weck, non si fa il pre-attacco con acido fosforico.

In un primo tentativo abbiamo realizzato una soluzione di 20 ml di  $H_3PO_4$  al 40% e 0,4 g di NaCl e dopo averla portata alla temperatura di  $70^\circ C$ , l'abbiamo applicata alla superficie del campione, immergendolo per un tempo di 3 minuti. In seguito al pre-attacco con acido fosforico, la superficie è risultata completamente opaca. Per quanto riguarda l'attacco colorante Weck,

abbiamo preparato una soluzione acquosa composta da: 20 ml di H<sub>2</sub>O distillata, 0,2 g di NaOH e 0,8 g di KMnO<sub>4</sub> e poi l'abbiamo applicata alla superficie del campione, immergendolo per un tempo di 1 minuto. Dopo l'attacco Weck, la superficie del campione presentava un colore tendente al marrone. In seguito, abbiamo guardato al microscopio ottico la superficie del campione e abbiamo potuto constatare che la superficie del campione risultava tutta erosa e scavata dall'acido fosforico presentando molti fori. Durante l'attacco erosivo dell'acido fosforico, la parte intorno alle inclusioni intermetalliche è stata corrosa e di conseguenza quest'ultime, sia grandi che piccole, si sono staccate, formando dei fori sulla superficie. Le particelle intermetalliche sono sempre presenti nella lega e hanno un potenziale elettrochimico differente dalla matrice, nella quale sono immerse e quindi reagiscono in modo differente da essa, quando si trovano a contatto con una soluzione acida. Per questo la matrice intorno ad esse tende a corrodersi e le inclusioni si staccano formando delle cavità. Siamo giunti alla conclusione che il primo attacco chimico tramite acido fosforico era stato troppo forte per la superficie metallica e l'attacco colorante Weck non era stato in grado di delineare il profilo e le dimensioni dei grani, perché i grani risultavano essere coperti dai prodotti di corrosione. Per questo motivo non è stato possibile riconoscere delle strutture cristalline. Questo primo tentativo è risultato troppo aggressivo, per via della temperatura elevata alla quale era stata portata la soluzione e della presenza di NaCl in soluzione che ha un forte effetto corrosivo sull'alluminio. Per quanto riguarda l'effetto della temperatura, si ha che ad alte temperature la reazione sulla superficie è più veloce e corrode prima, quindi il tempo di immersione deve essere ridotto. Tempi d'attacco maggiori con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, genereranno delle superfici con un numero di fori maggiore, perché si staccheranno più inclusioni intermetalliche.

Per gli attacchi successivi abbiamo deciso di cambiare la composizione della soluzione di pre-attacco rimuovendo l'NaCl e aggiungendo una goccia di sapone per diminuire la tensione superficiale della soluzione, in modo tale che potesse aderire meglio sulla superficie del campione. Per questo abbiamo realizzato una soluzione di 20 ml di H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> al 20% con l'aggiunta di una goccia di sapone. Questa volta abbiamo lasciato la soluzione a temperatura ambiente e l'abbiamo applicata alla superficie del campione, versandola sopra la superficie. Dopo numerosi tentativi, abbiamo potuto constatare che l'attacco migliore lo si ottiene dopo un tempo di applicazione del pre-attacco pari a 10 minuti. A differenza del primo tentativo, in seguito al pre-attacco con acido fosforico, la superficie è risultata ancora riflettente come alla fine del processo di lucidatura, ma con un leggero strato opacizzato, distribuito sulla superficie. Per quanto riguarda l'attacco colorante Weck abbiamo preparato la soluzione lasciando invariata la composizione aggiungendo solamente due gocce di sapone, per diminuire la tensione superficiale, secondo la seguente composizione: 20 ml di H<sub>2</sub>O distillata, 0,2 g di NaOH e 0,8 g di KMnO<sub>4</sub> e due gocce di sapone. Dopo di che abbiamo distribuito la soluzione, versandola sulla superficie del campione. Dopo una serie di tentativi, abbiamo visto che la colorazione migliore con reagente Weck, la si ottiene dopo un tempo di applicazione di 10 secondi. Dopo ciascun attacco la superficie è stata lavata prima con acqua distillata e poi con alcool etilico CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH al 99,9%, per rimuovere le impurità sulla superficie. L'efficacia della colorazione Weck dipende essenzialmente dal pre-attacco con acido. Se l'acido non attacca e corrode abbastanza la superficie, la colorazione Weck non è in grado di mettere in risalto i cristalli e i bordi di grano. Con un attacco più aggressivo, da un lato si è in grado di mettere maggiormente in risalto i bordi di grano, mentre dall'altro si ottiene una superficie più corrosa e butterata. Per questi motivi, alla fine siamo giunti alla conclusione che per il nostro caso, con la lega d'alluminio 8090, quando si vuole ottenere una superficie con cristalli meno delineati e con meno fori, si può usare un pre-attacco con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> al 20%; mentre per avere una superficie più con cristalli più delineati, con bordi di grano più marcati, ma con maggior fori, si può usare un pre-attacco con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> al 30%. Per entrambi i casi il tempo di

applicazione migliore è di 10 minuti per l'attacco con acido e di 10 secondi per l'attacco colorante Weck.

I campioni metallografici TC e TS analizzati qui di seguito, sono stati inglobati all'interno di cilindri costituiti da resina per i seguenti motivi. Primo, durante il processo di lucidatura manuale, viene facilitata la presa sul campione. Secondo, l'inglobatura è un processo che permette di limitare gli effetti di bordo durante la fase di lucidatura, perché scegliendo una resina di durezza adeguata, sarà possibile lucidare adeguatamente il bordo del campione senza rovinarlo, in modo da poterlo analizzare allo stesso modo del resto della superficie del campione.

## 10.1 Campione LT-C inglobato

I campioni LT-C e LT-S in seguito al processo di lucidatura e attacco colorante Weck sono stati osservati al microscopio ottico, con l'obiettivo di analizzare la morfologia, le dimensioni e la distribuzione dei grani cristallini. Nel seguito vengono riportate le immagini, relative alle acquisizioni fatte tramite il microscopio ottico; in ciascuna immagine viene riportata la scala con unità di misura di riferimento. L'effetto puntinato, presente nelle immagini, molto probabilmente è dovuto ad un deposito di impurità avvenuto durante le operazioni di attacco Weck o dopo. Mentre la diversa illuminazione presente nelle prime immagini, riportate qui di seguito, dipende dal tipo di filtro utilizzato a bordo del microscopio.

Facendo riferimento alle immagini sottostanti, riguardanti la superficie del campione centrale (LT-C), è emersa la presenza di una struttura composta da grani relativamente grandi e allungati, lungo la direzione di laminazione della lastra, con delle lunghezze prossime al millimetro. Durante il processo di laminazione, la deformazione plastica subita dalla lastra fa sì che si formino dei grani allungati nella direzione della deformazione, in questo caso la direzione di laminazione e le dislocazioni, modificano la loro disposizione, riarrangiandosi.

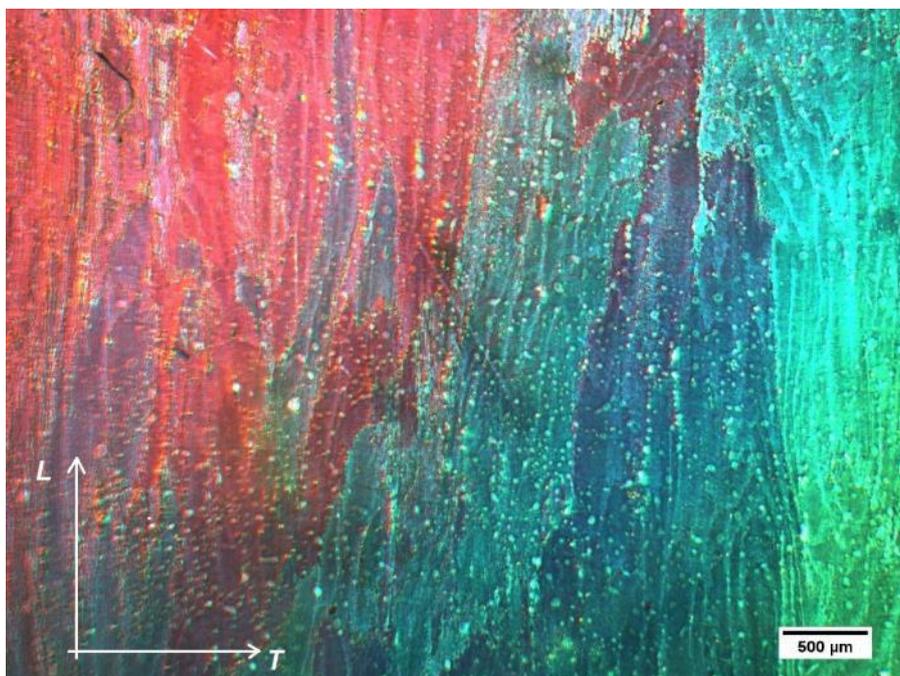


Figura 104: Grani colonnari, che compongono la tessitura cristallografica sulla superficie analizzata del campione LT-C, allungati lungo la direzione di laminazione della lastra, coincidente con la direzione L indicata nell'immagine (così in tutte le immagini a seguire).



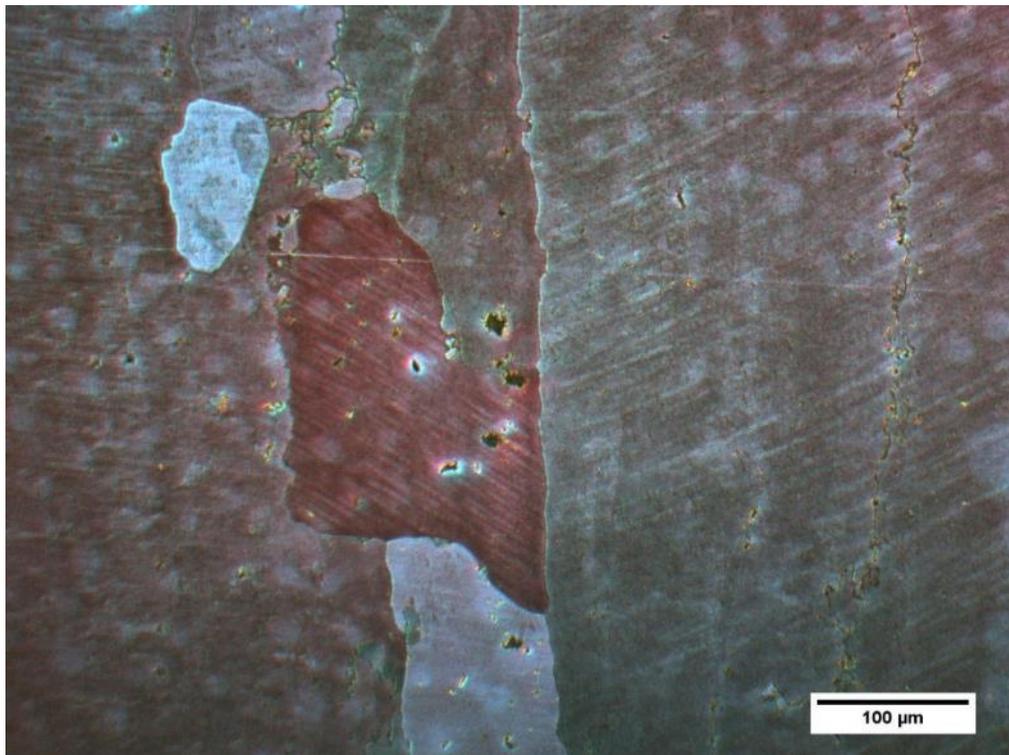
*Figura 105: Nell'immagine si vedono i grani colonnari e i bordi di grano che segnano i confini tra i diversi grani che compongono la tessitura cristallografica del campione LT-C.*

Si possono anche riconoscere i bordi di grano che segnano i confini tra un grano e l'altro. Le colorazioni presentate dai grani dipendono da come la luce viene riflessa dalla superficie attaccata dal colorante Weck; i cristalli che presentano colorazioni differenti, significa che presentano orientazioni cristallografiche molto differenti (sono quindi separati fra loro da bordi di grano ad alto angolo) e quindi rifletteranno la luce in modo diverso ed è questo che provoca una diversa colorazione. Passando ad ingrandimenti maggiori è stato possibile vedere i sub-grani più piccoli che presentano un colore e quindi un'orientazione cristallografica leggermente diversa da quella dei cristalli primari adiacenti.

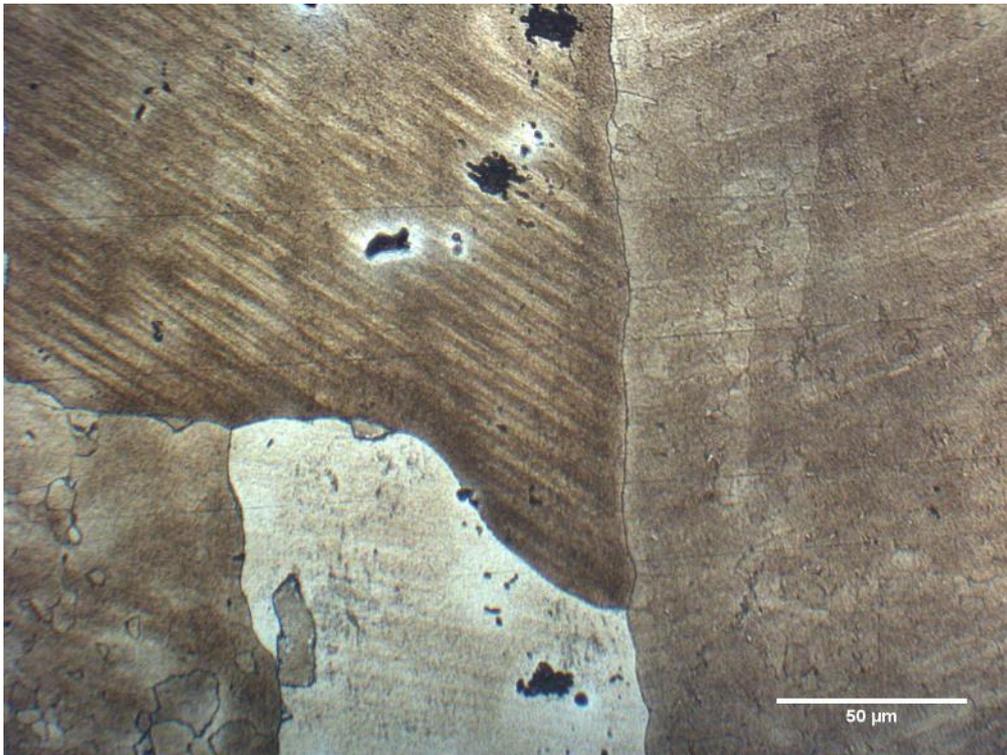


*Figura 106: Sub-grani e grani con differente orientazione cristallografica.*

Ad ingrandimenti maggiori è stato possibile vedere l'inclinazione delle dislocazioni all'interno di un grano e la loro diversa orientazione tra grani adiacenti che presentano piani di scorrimento con diverse orientazioni. Quando un grano viene sottoposto a deformazione plastica si formano sulla superficie dei segni di traslazione, le bande di scorrimento. Sono le dislocazioni presenti su specifici piani cristallografici, detti piani di scorrimento, a formare le bande di scorrimento. Lo scorrimento avviene per via del movimento delle dislocazioni, sui piani a maggior densità atomica, perché su questi piani è presente il minor valore del vettore di Burger, che indica la minore energia necessaria per far scorrere i piani gli uni sugli altri. Lo scorrimento inizierà quando la tensione di taglio, nel piano e nella direzione di scorrimento, raggiunge il valore critico, che corrisponde alla critical resolved shear stress (CRSS). L'alluminio ha una struttura cristallina di tipo CFC, questo fa sì che lo scorrimento possa avvenire nei piani  $\{111\}$ , che sono i piani a maggior impacchettamento, e nelle direzioni  $[110]$ , ottenendo così un totale di 12 sistemi di scorrimento. La deformazione che può subire un cristallo, sarà tanto maggiore, quanto più è alto il numero di sistemi di scorrimento; per questo motivo la deformabilità dipende dalla struttura cristallina. I bordi di grano rafforzano e aumentano le caratteristiche meccaniche dei materiali metallici, perché agiscono da ostacolo al moto delle dislocazioni. Alle alte temperature invece, peggiorano le proprietà del materiale, perché danno la possibilità ai grani di scorrere tra loro, lungo i bordi di grano. Durante la deformazione plastica, le dislocazioni si muovono lungo i piani di scorrimento secondo una certa direzione, infatti in ogni grano le dislocazioni si orientano in relazione dell'orientazione dei propri piani preferenziali allo scorrimento; per questo motivo le linee di dislocazione, tra grani adiacenti, presentano direzioni diverse.

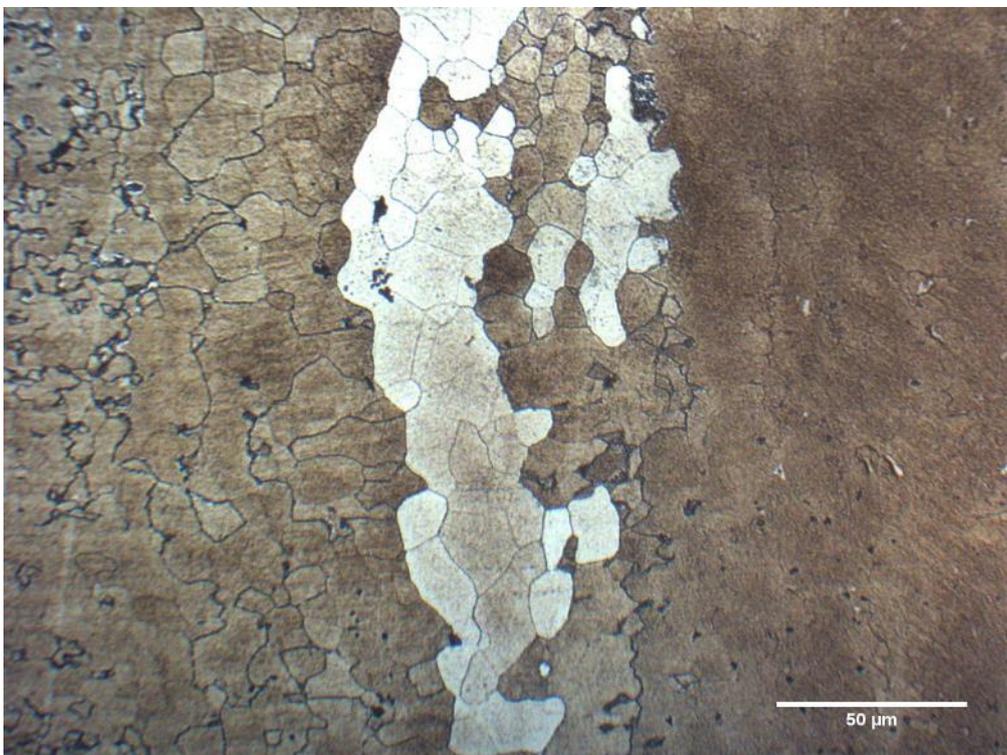


*Figura 107: Diversa orientazione delle dislocazioni, all'interfaccia del bordo di grano tra grani adiacenti, dovuta alla diversa orientazione dei piani di scorrimento.*

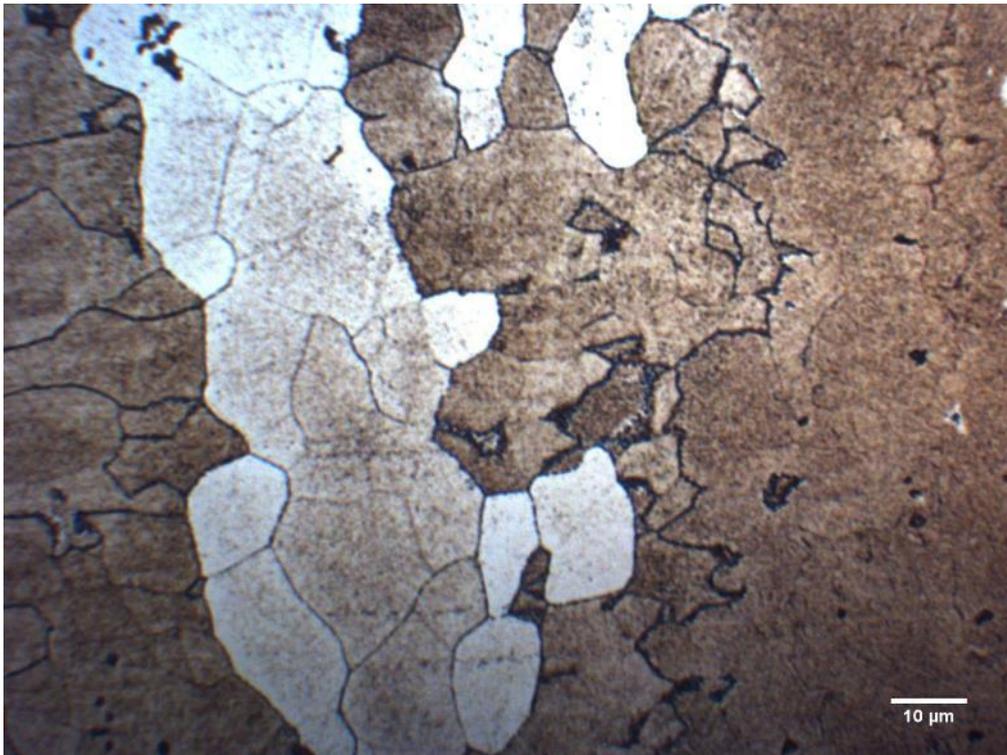


*Figura 108: Nel dettaglio si può vedere l'inclinazione delle dislocazioni; in nero delle inclusioni, presenti all'interno dei grani, con dimensioni non superiori ai 10μm.*

Ad ingrandimenti ancora più alti è stato possibile osservare i sub-grani, all'interno dei grani, che presentavano una dimensione dell'ordine dei 10μm.



*Figura 109: Dettaglio dei sub-grani, con diversa orientazione cristallografica, che compongono i grani principali; in nero, le inclusioni intermetalliche.*



*Figura 110: Dettaglio a ingrandimenti maggiori dei sub-grani e dei sub-bordi di grano, che presentano delle dimensioni che vanno dai 10 ai 20 $\mu$ m. La diversa colorazione è da ricondurre alla differente orientazione cristallografica.*

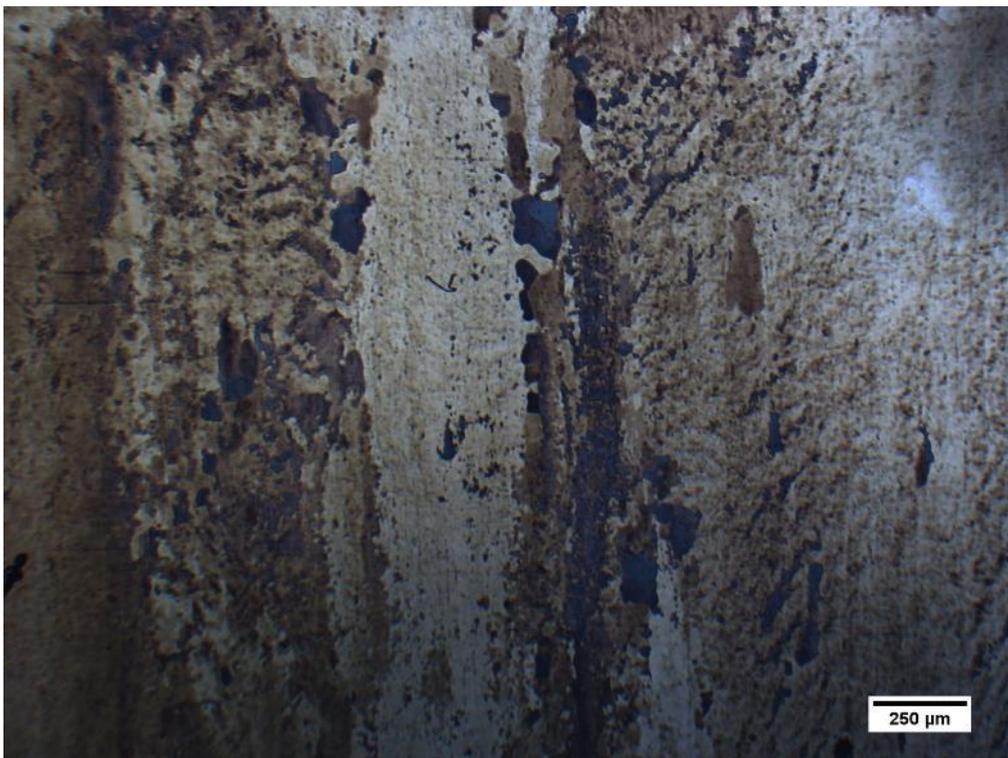
## 10.2 Campione LT-S inglobato

Seguendo la metodologia di analisi del campione inglobato LT-C, anche il campione LT-S è stato osservato al microscopio ottico. Nel seguito vengono riportate le immagini, relative alle acquisizioni fatte al microscopio ottico; in ciascuna immagine viene riportata la scala con unità di misura di riferimento.

Facendo riferimento alle immagini sottostanti, riguardanti la superficie del campione superficiale (LT-S), è emersa la presenza di una microstruttura mista composta per la maggior parte da grani ricristallizzati fini e leggermente allungati e alcuni grani più grandi non ricristallizzati allungati, simil parallelepipedo, con lunghezze prossime al millimetro. Il processo di laminazione a caldo ha portato ad una ricristallizzazione dinamica della lastra soprattutto sulla superficie, perchè le deformazioni sono maggiori, mentre la microstruttura è rimasta invariata a livello del cuore della piastra. Il processo di ricristallizzazione, quando viene raggiunta la temperatura di ricristallizzazione, porta alla nucleazione di nuovi grani e alla loro crescita fino a quando non si ha contatto reciproco. Questo processo porta ad una diminuzione del limite elastico  $R_{p02}$ , della resistenza a trazione  $R_m$  e della durezza e ad un aumento dell'allungamento a rottura  $A\%$  e della resilienza del materiale. Questo è in accordo con quanto è stato ottenuto dai risultati delle prove di trazione. Infatti, facendo riferimento ai valori medi di queste grandezze (tabella 5), si vede che limite elastico e di rottura diminuiscono man mano che ci si sposta dal cuore della lastra verso la superficie, mentre l'allungamento a rottura aumenta.



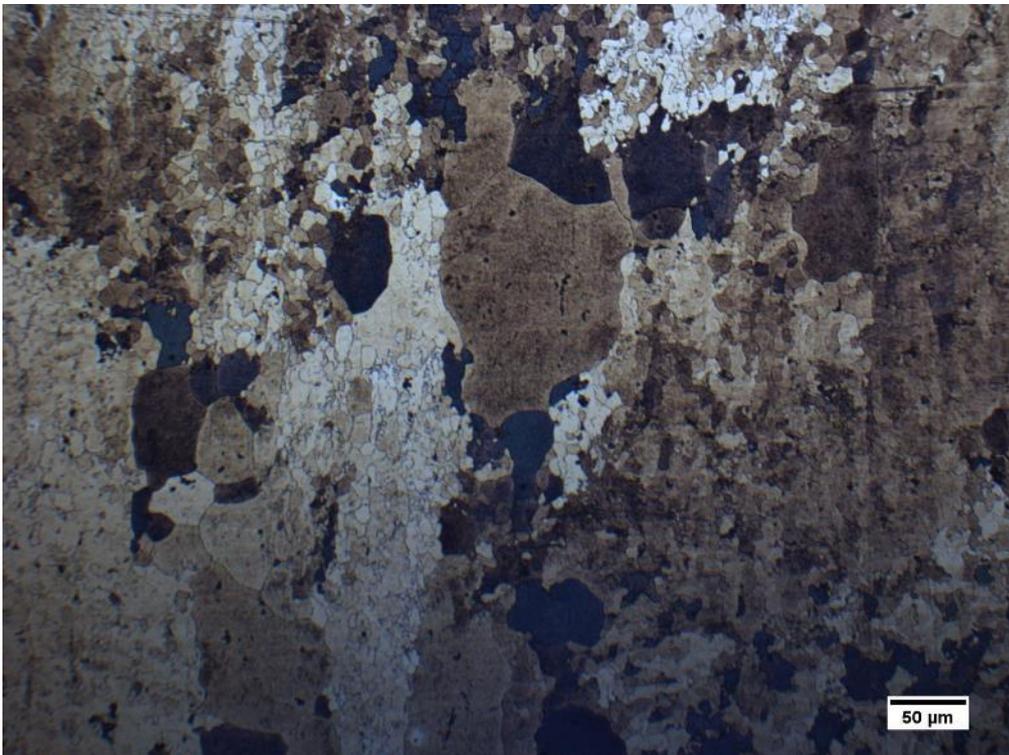
*Figura 111: Grani colonnari non ricristallizzati con larghezze prossime ai 500 $\mu$ m e lunghezze prossime ai 2mm.*



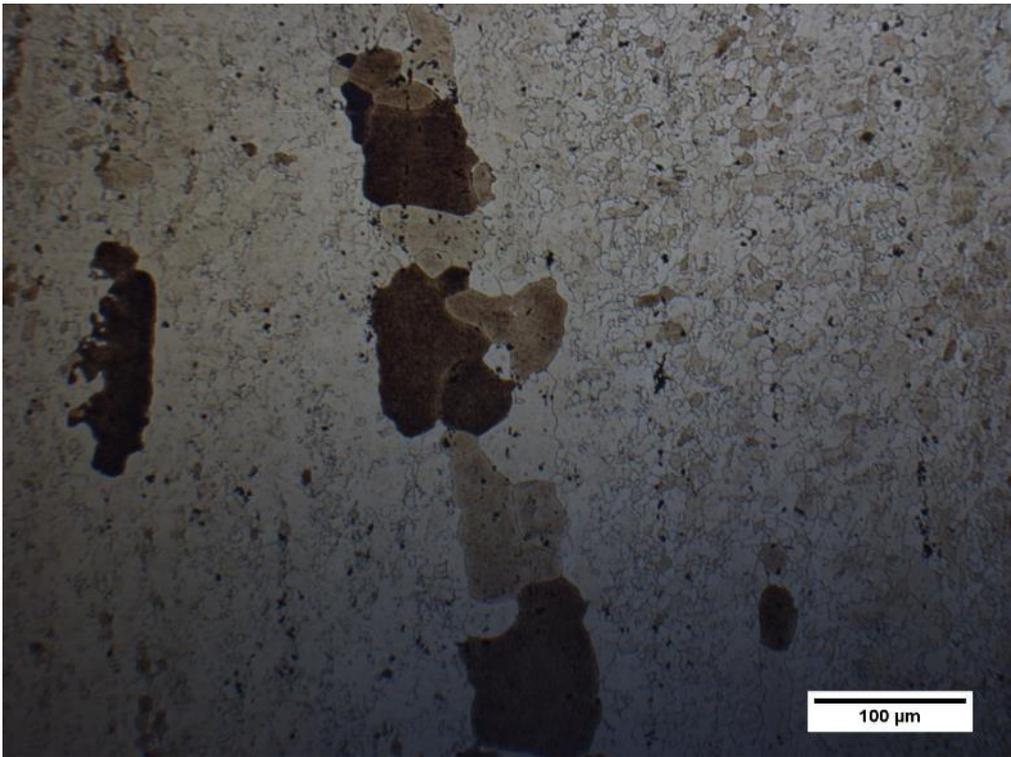
*Figura 112: Grani più fini ricristallizzati e bordi di grano che segnano i confini d'interfaccia tra i diversi grani adiacenti.*



*Figura 113: Grani più fini ricristallizzati con differenti orientazioni cristallografiche.*



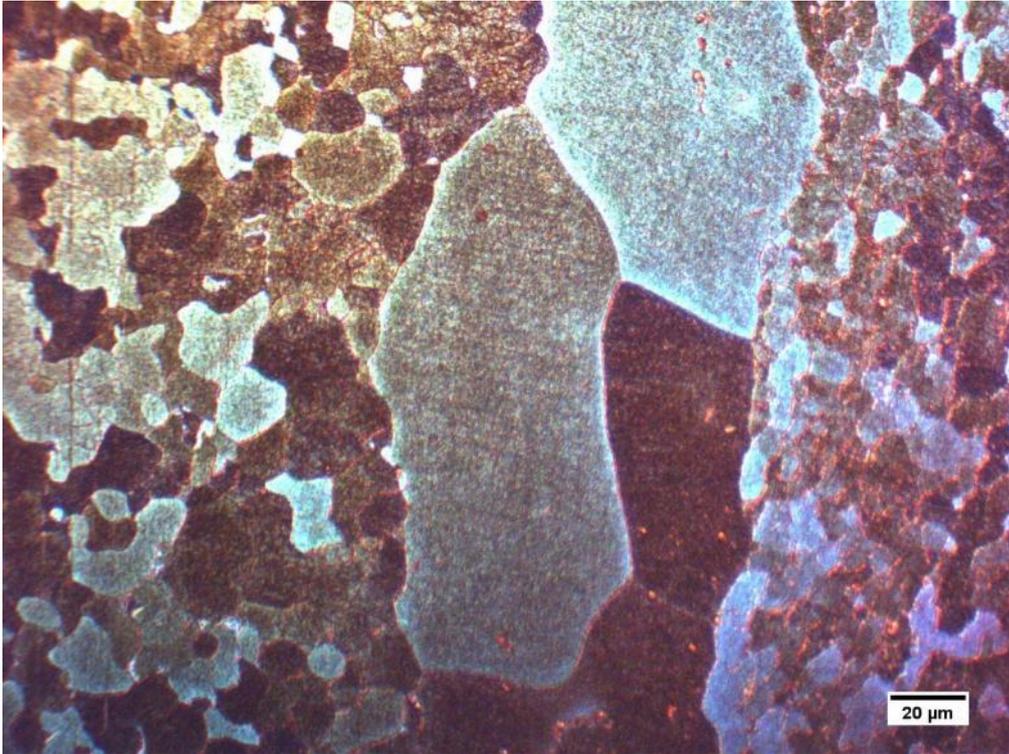
*Figura 114: (a, b, c) Grani più fini ricristallizzati e sub-grani, con differenti orientazioni cristallografiche. (a)*



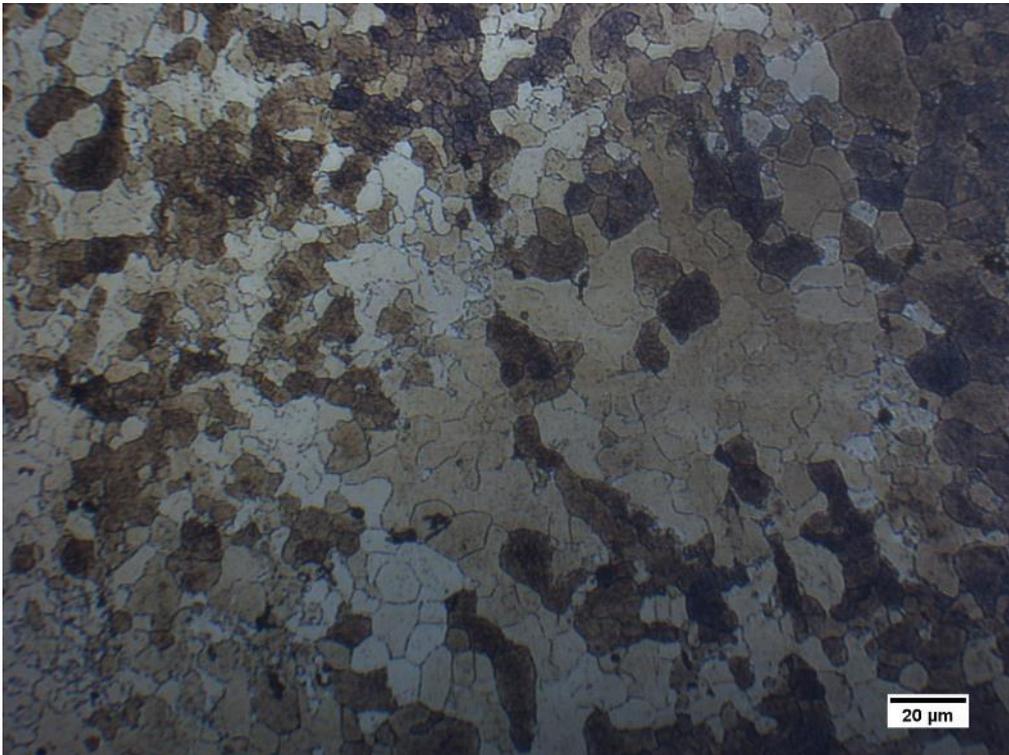
(b)



(c)



*Figura 115: Dettaglio dei grani più fini ricristallizzati e dei sub-grani all'interfaccia dei bordi di grano, da notare la diversa colorazione dei grani per via delle differenti orientazioni cristallografiche.*



*Figura 116: (a, b) Dettaglio dei sub-grani con differente colorazione dovuta all'orientazione cristallografica. (a)*



(b)

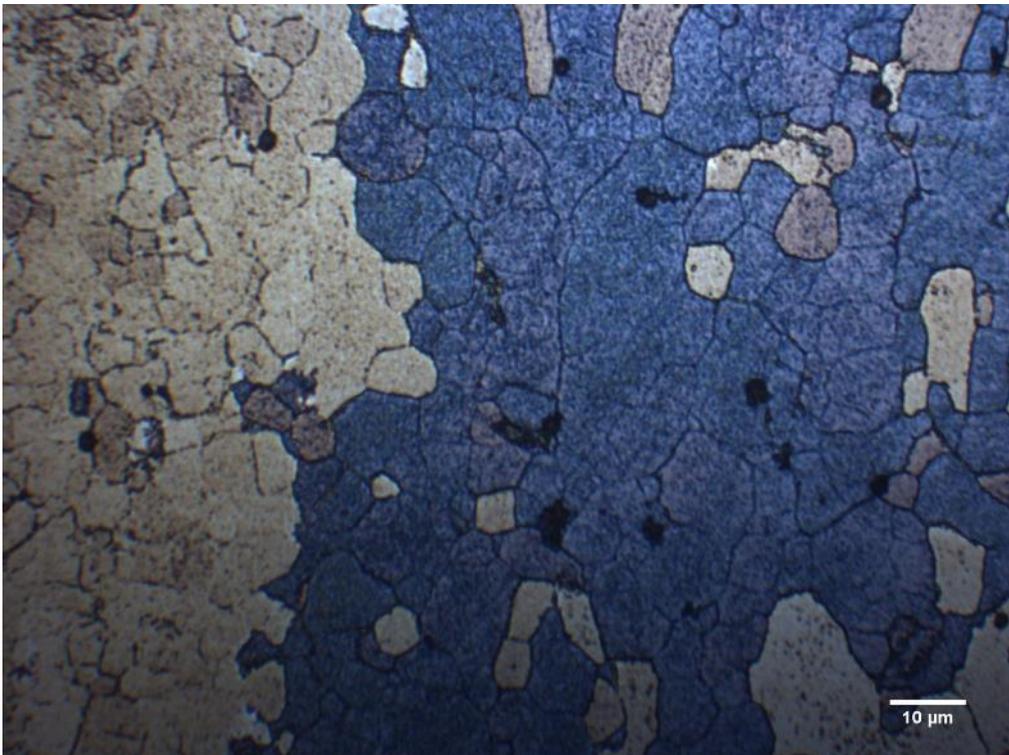
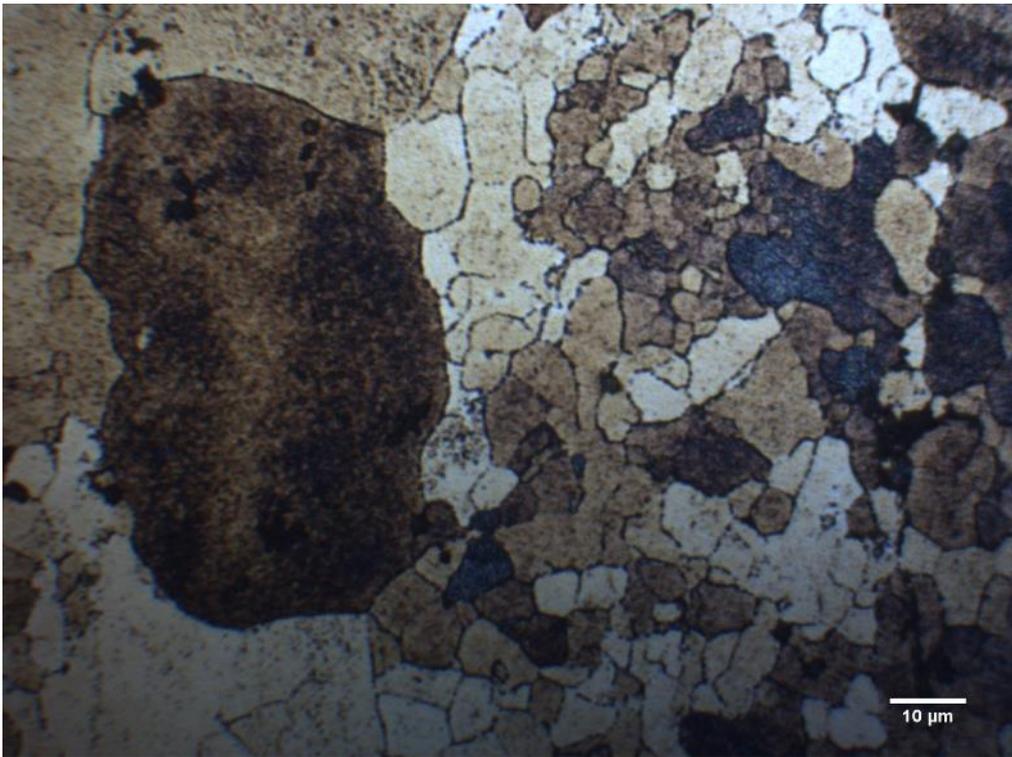
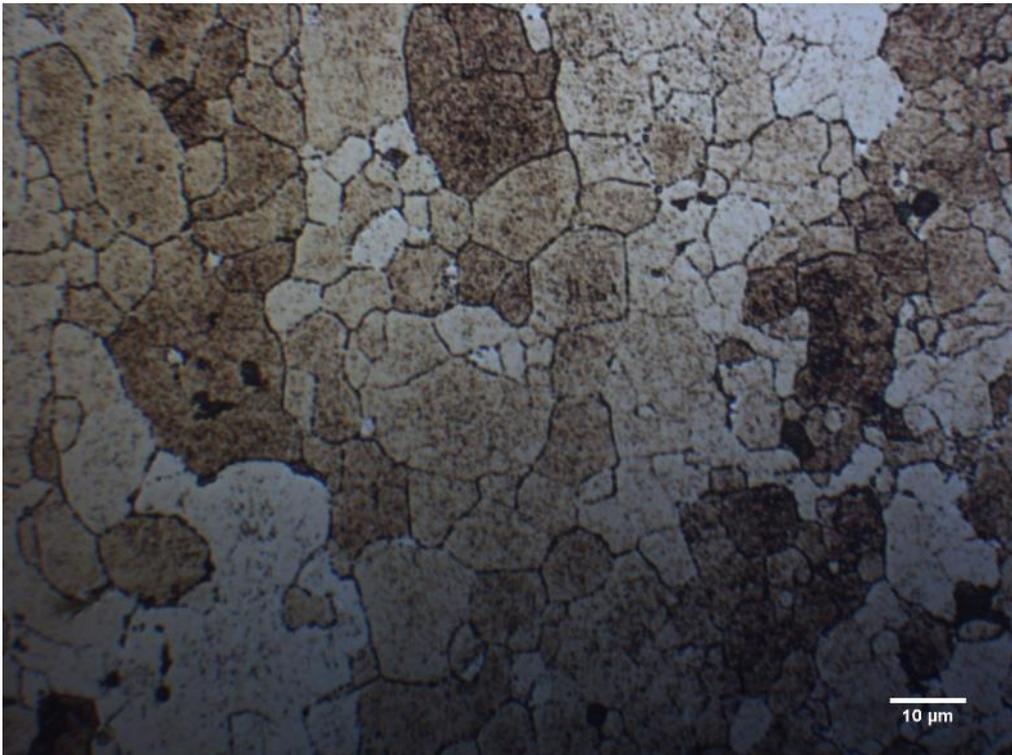


Figura 117: (a, b, c) Dettaglio a maggior ingrandimento dei sub-grani con differente colorazione dovuta all'orientazione cristallografica. (a)



(b)



(c)

### 10.3 Analisi metallografica – Provino R6TS

Il provino R6TS, in seguito al processo di lucidatura, è stato pre-attaccato con l'acido fosorico e poi ha subito l'attacco colorante Weck. Prima di eseguire la prova di trazione, il provino è stato osservato al microscopio ottico. Dopo di che è stata eseguita la prova di trazione, che è stata fermata al 5% di deformazione, perchè non volevamo che il provino si rompesse, ma volevamo solo vedere l'effetto della deformazione plastica e delle bande plastiche sulla superficie e sulla microstruttura del provino. Al termine della prova di trazione, il provino in questione è stato osservato al il microscopio ottico, con l'obbiettivo di analizzare l'effetto della deformazione plastica, sulla microstruttura cristallografica. Nel seguito vengono riportate le immagini, relative alle acquisizioni fatte tramite il microscopio ottico; in ciascuna immagine viene riportata la scala con unità di misura di riferimento. Prima vengono riportate le immagini acquisite prima della prova di trazione e dopo quelle acquisite dopo la deformazione plastica al 5%.

- Superficie del provino R6TS prima della prova di trazione al 5% di deformazione:



*Figura 118: Nell'immagine si vedono i grani primari colonnari non ricristallizzati e alcuni grani più piccoli, fini e ricristallizzati lungo in bordo di grano.*

Dall'analisi al microscopio ottico, in accordo con quanto visto per il campione TS inglobato, è emerso che i provini superficiali presentano una microstruttura mista composta da grani ricristallizzati fini e leggermente allungati e alcuni grani più grandi non ricristallizzati allungati, simil parallelepipedo, con lunghezze prossime al millimetro.



*Figura 119: Grani primari colonnari non ricristallizzati e grani più piccoli, fini e ricristallizzati che presentano una colorazione differente, per via del diverso orientamento cristallografico.*

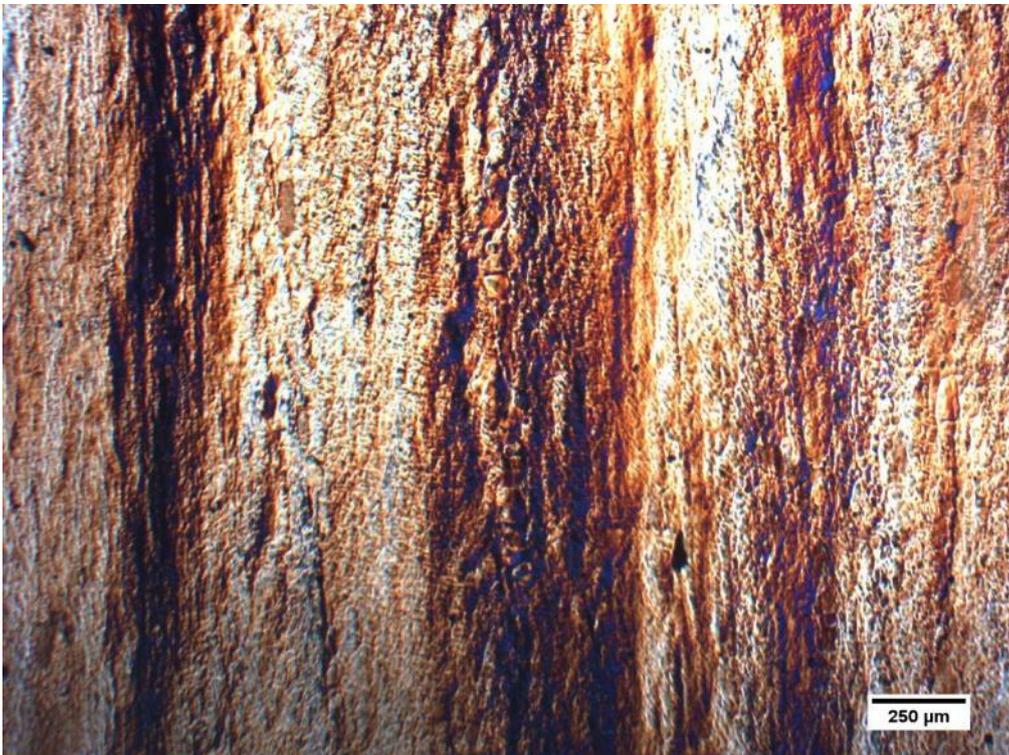


*Figura 120: Grani più piccoli, fini e ricristallizzati che presentano una colorazione differente, per via del diverso orientamento cristallografico.*

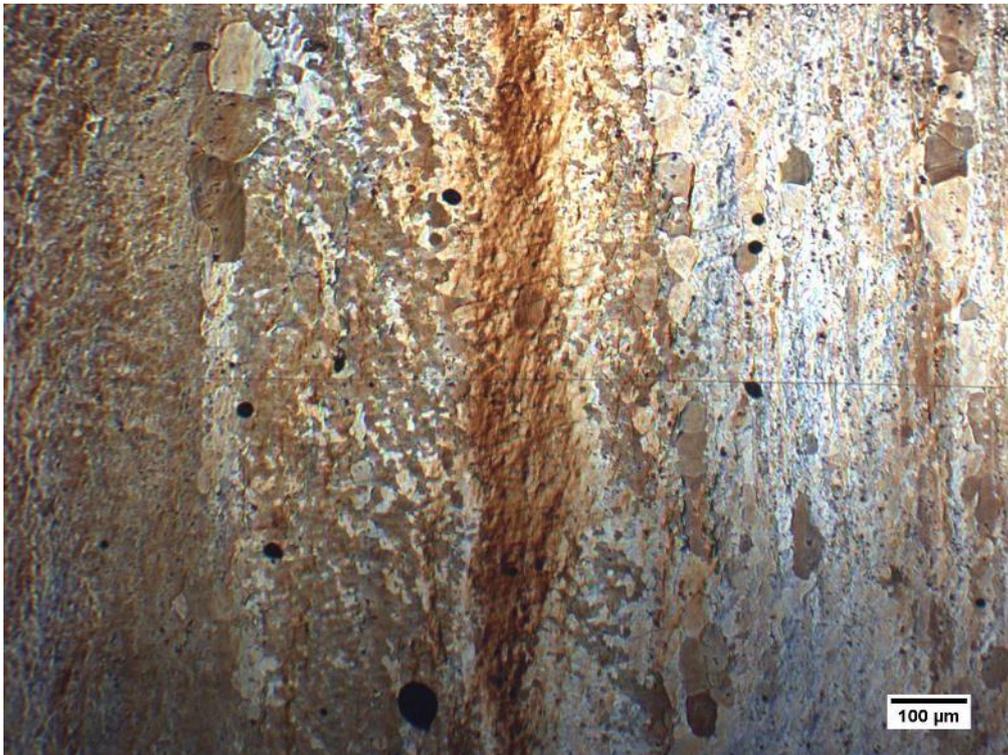
- Superficie del provino R6TS dopo la prova di trazione al 5% di deformazione:



*Figura 121: In queste tre fotografie viene mostrata la superficie bandizzata del provino R6TS dopo aver subito la deformazione al 5%. Da diverse angolazioni è possibile vedere, anche a occhio nudo, le bande plastiche che sono emerse sulla superficie.*



*Figura 122: Le zone più scure sono le bande plastiche emerse e visibili sulla superficie del provino in seguito alla deformazione plastica subita durante la prova di trazione.*

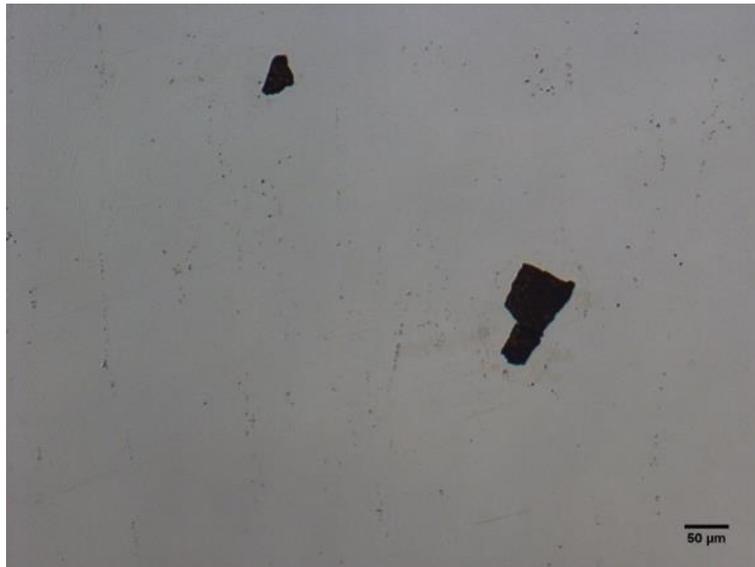


*Figura 123: Banda plastica emersa sulla superficie del provino e grani fini ricristallizzati, provino R6TS dopo deformazione.*

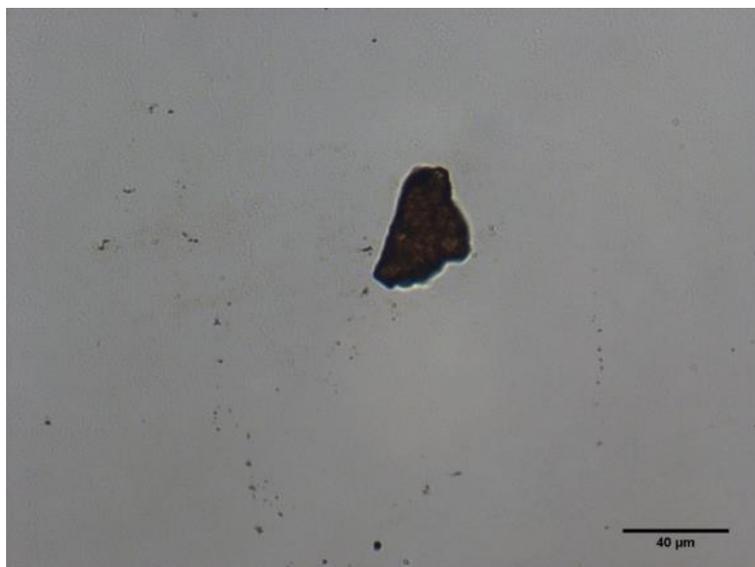
Dopo la prova di trazione, la superficie del provino risulta tutta bandizzata, per via delle bande plastiche che si sono sviluppate e sono emerse sulla superficie. Ad ingrandimenti maggiori è stato possibile osservare la localizzazione della banda plastica e alcuni grani più fini ricristallizzati. Tuttavia, non è stato possibile vedere le linee di dislocazione, perché la superficie risulta disallineata su più piani per via della formazione delle bande plastiche superficiali e non si è riuscito a mettere a fuoco le zone desiderate per via dei limiti del microscopio, per questo motivo per le analisi morfologiche successive si è scelto un microscopio SEM.

#### **10.4 Analisi metallografica – Provino R7TS**

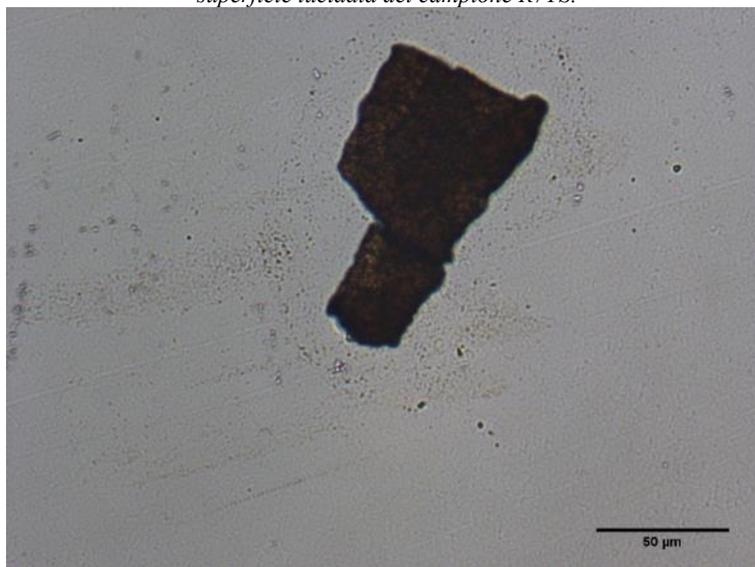
Il provino R7TS, in seguito al processo di lucidatura, è stato osservato al microscopio ottico, senza eseguire il pre-attacco con l'acido fosforico e l'attacco colorante Weck. In questo caso è stato interessante osservare la superficie lucidata del provino, ed è stato possibile individuare delle grosse inclusioni intermetalliche sulla superficie lucidata.



*Figura 124: Inclusioni intermetalliche presenti sulla superficie lucidata del campione R7TS, analizzata al microscopio ottico.*



*Figura 125: Inclusionione intermetallica, con dimensioni pari a 40μm di lunghezza e 30μm di larghezza, presente sulla superficie lucidata del campione R7TS.*



*Figura 126: Passando a ingrandimenti maggiori si è visto che si trattava di due inclusioni adiacenti. Una con dimensioni pari a 30x40μm e l'altra pari a 50x60μm.*

## 11 Analisi al SEM della morfologia della frattura

Per capire come era avvenuta la rottura dei provini, è stata condotta un'analisi della morfologia della superficie di frattura di un provino, osservando la superficie di frattura tramite un microscopio elettronico a scansione. All'interno del SEM viene generato un fascio di elettroni che viene concentrato, attraverso una serie di lenti, e poi gli viene imposta una deflessione controllata, in modo da permettere la scansione il campione seguendo una certa griglia e una frequenza di scansione che può essere impostata. Durante le acquisizioni, il campione analizzato e il fascio di elettroni devono essere tenuti sottovuoto. Sono mantenuti all'interno di una camera sigillata, per preservare il vuoto e proteggerla da contaminazioni, vibrazioni o rumore. Il vuoto, oltre a proteggere la sorgente del fascio di elettroni dalla contaminazione, consente anche di ottenere un'immagine ad alta risoluzione e priva di impurità. Nel caso in cui non si abbia un vuoto adeguato nella camera di analisi, questo comporterebbe la presenza di altri atomi e molecole, la cui interazione con il fascio di elettroni farebbe sì che il fascio venga deviato o ostacolato e si riduca così la qualità delle immagini acquisite.

### 11.1 Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5TS

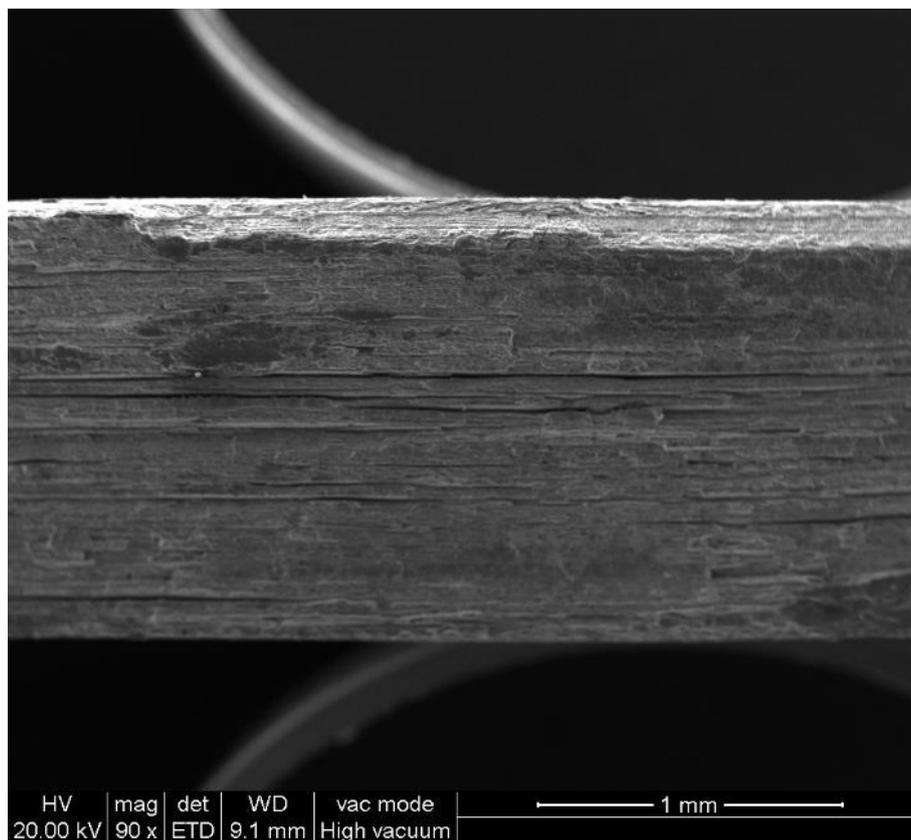
Durante l'analisi del campione R5TS al microscopio SEM, sono state ricavate tutta una serie di immagini, utili per studiare la morfologia del campione. Dalle immagini acquisite a diversi livelli di ingrandimento, è stato possibile constatare che la rottura del provino risente fortemente dell'allineamento dei cristalli con la direzione di laminazione. Infatti, in Figura 127 si nota l'orientamento dei cristalli nella direzione del traverso lungo (parallelo al piano di frattura) e la presenza di numerose cricche secondarie parallele alla direzione di laminazione. Nella Figura 128 si mostra quest'ultimo dettaglio a più alti ingrandimenti, dove le cricche secondarie nella direzione L sono ancora più evidenti.

Osservando ancora più da vicino la frattura, Figura 129, si nota che questa è in parte duttile, con nucleazione, crescita e coalescenza di cavità attorno alle fasi secondarie di maggiori dimensioni (Figura 130, principalmente le inclusioni semimetalliche o intermetalliche), in parte cristallografica, cioè è avvenuta in parte con decoesione di piani cristallografici, Figura 131. Inoltre, le cricche secondarie visibili sulla superficie di frattura si sono formate lungo i bordi di grano, portando alla separazione dei cristalli e generando in parte delle notevoli cavità, con una larghezza dell'ordine dei 10-20  $\mu\text{m}$ , Figura 130. In questo caso la morfologia di frattura è duttile. Analizzando la superficie di frattura ad ingrandimenti maggiori, è stato possibile vedere delle striature orizzontali, che rappresentano le cricche e micro-cricche che si sono formate lungo i bordi di sub-grano, Figura 132. Da questi risultati è stato possibile dedurre che prima è avvenuta la rottura con cricca a livello dei sub-bordi, ovvero c'è stata la coalescenza dei microvuoti presenti nel materiale (microvuoti all'interfaccia intergranulare attorno alle inclusioni ivi presenti), che si sono poi uniti e hanno portato alla formazione delle microcricche, Figura 133; dopo di che c'è stata la coalescenza di queste microcricche che hanno portato alla rottura cristallografica a livello dei sub-grani o anche dei grani, Figura 134, dove si notano evidenti striature dovuto ad accumulo di dislocazioni.

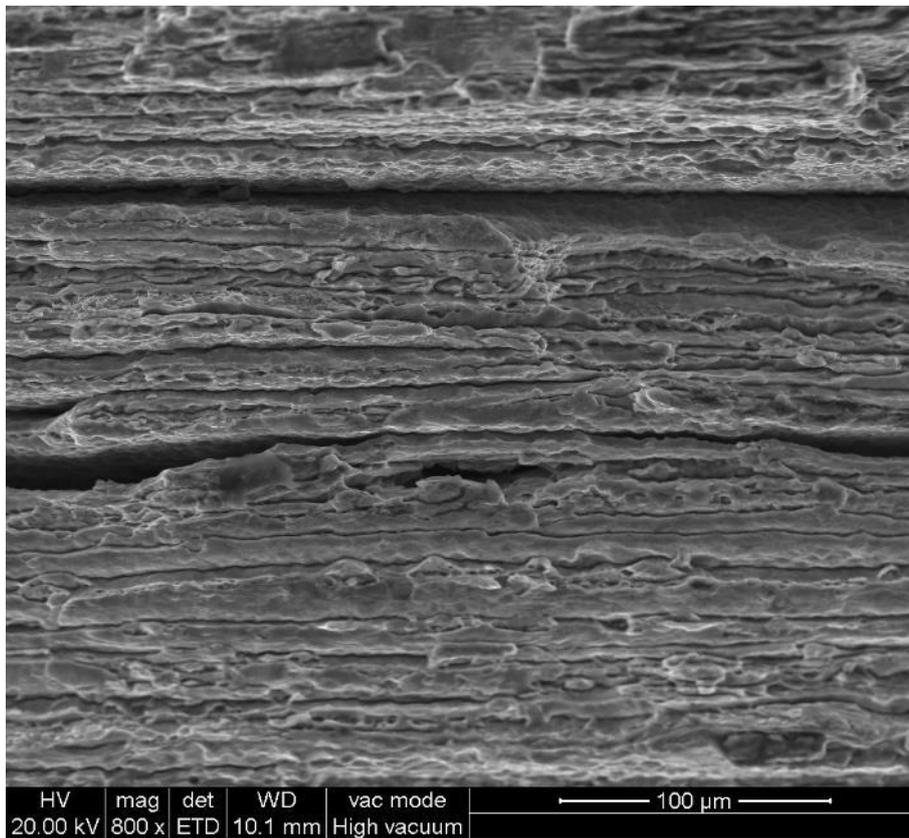
Riepilogando, la rottura, a livello dei sub-grani, è avvenuta lungo i bordi dei sub-grani, quindi il singolo sub-grano si rompe o in maniera cristallografica, oppure in modo duttile per nucleazione, crescita e coalescenza di microvuoti attorno alle fasi secondarie (inclusioni). Quando si verifica il tipo di rottura cristallografica, la superficie di frattura risulta tutta liscia e altro non è che il piano di rottura del grano, piano lungo il quale le dislocazioni hanno scorso. Si vedono delle

cavità adiacenti tra loro, i microvuoti che si stanno aprendo e unendo tra loro per formare una cricca. Questi microvuoti, potrebbero essere dovuti a delle inclusioni, come dei composti intermetallici, che si sono staccate e sono saltate via formando così la cavità, Figure 133 e 134.

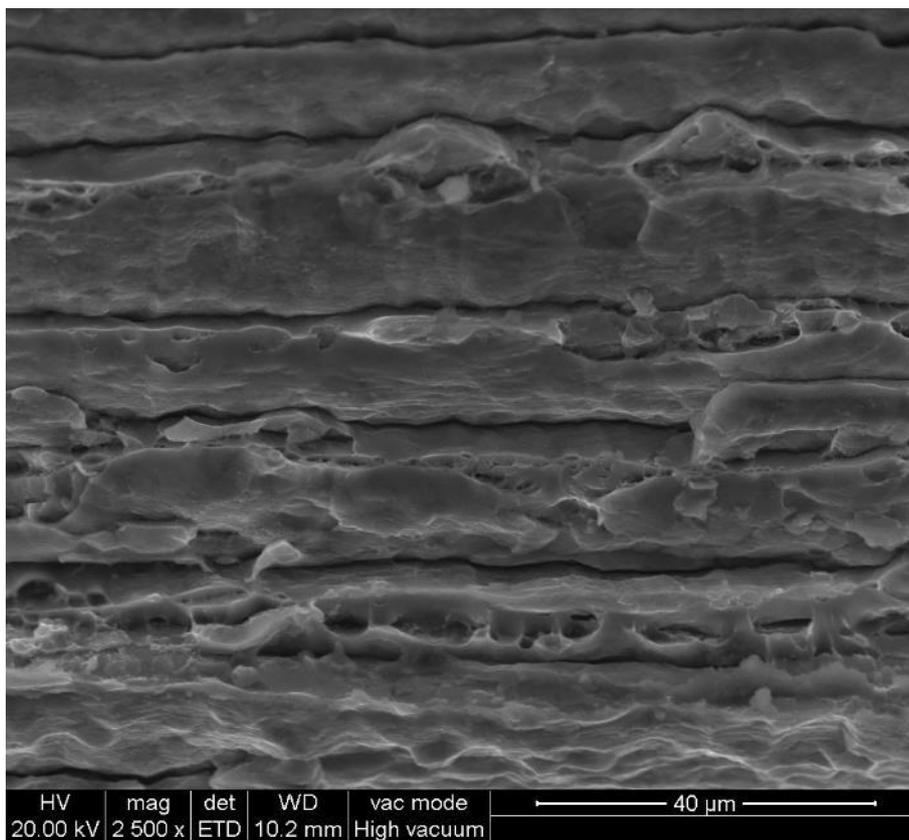
Nel seguito vengono riportate le immagini, relative alle acquisizioni fatte tramite il microscopio SEM sulla superficie di frattura del provino R5TS; in ciascuna immagine viene riportato il livello d'ingrandimento e la scala con unità di misura di riferimento.



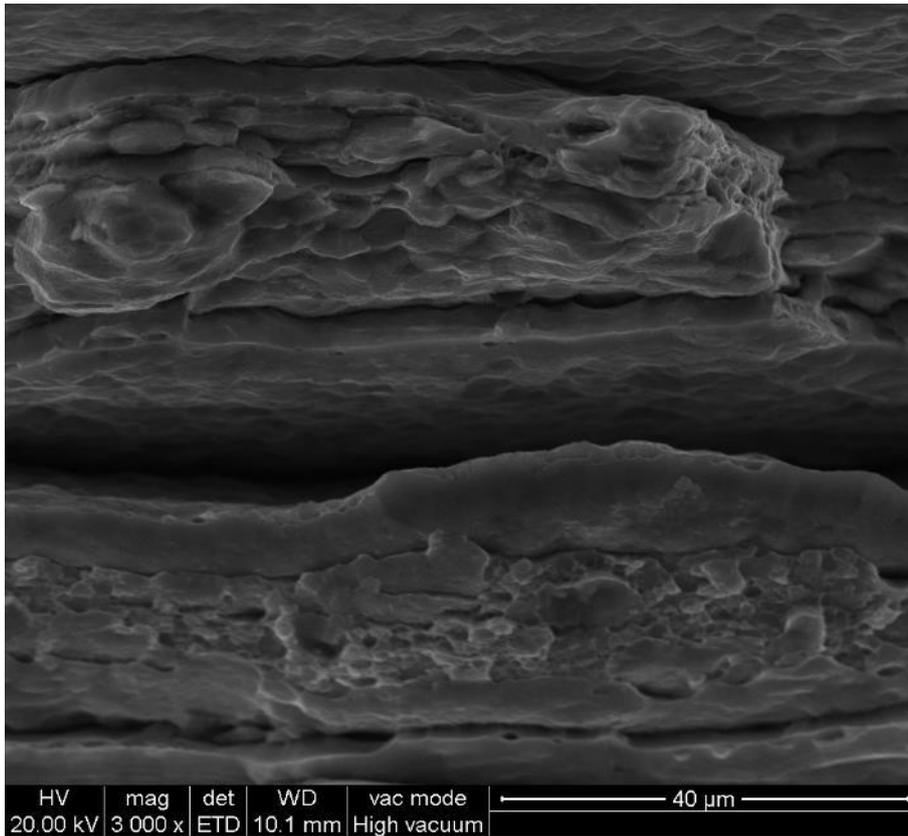
*Figura 127: Panoramica della superficie di frattura del provino R5TS.*



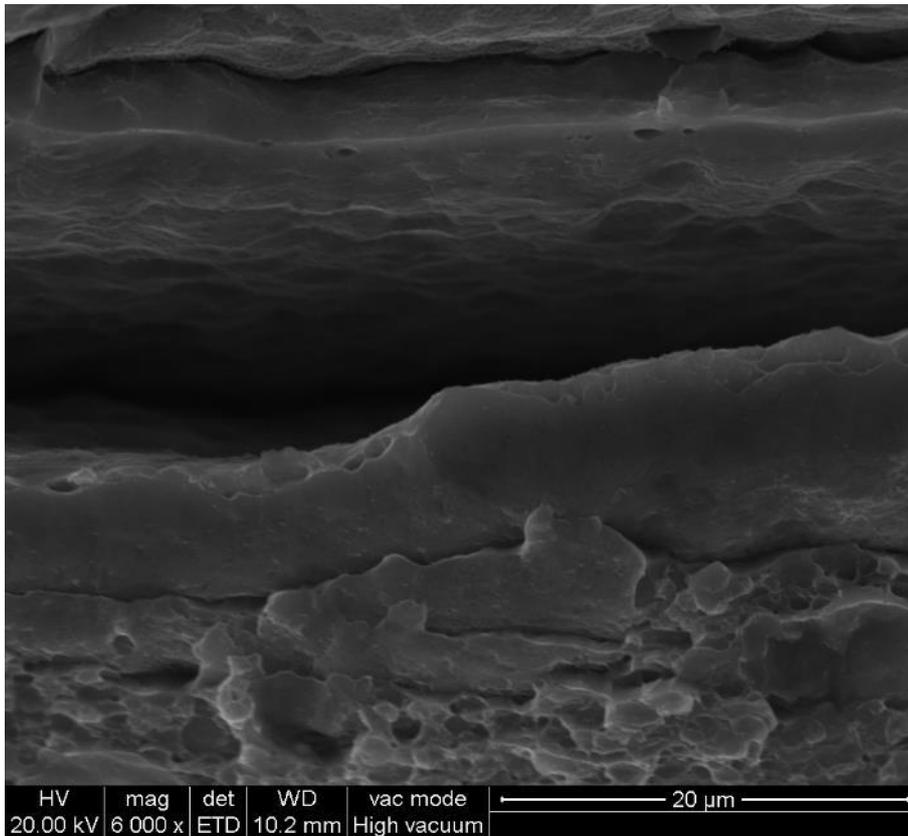
*Figura 128: Dettaglio delle cricche centrali nella superficie di frattura.*



*Figura 129: Dettaglio delle cricche centrali formatesi lungo i bordi di sub-grano.*



*Figura 130: Dettaglio della cavità della frattura duttile e cricca secondaria intergranulare*



*Figura 131: Interno della cricca che ha portato alla rottura cristallografica dei cristalli adiacenti.*

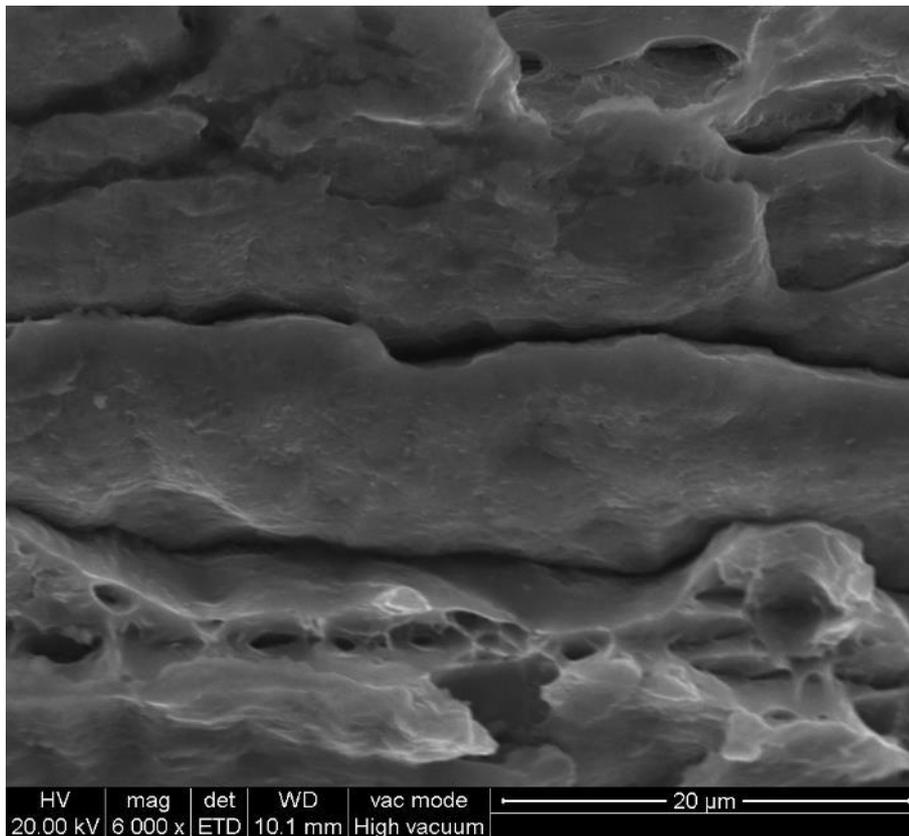


Figura 132: La superficie liscia di frattura del grano è il piano di rottura del grano, piano lungo il quale le dislocazioni si sono mosse e hanno scorso portando alla rottura.

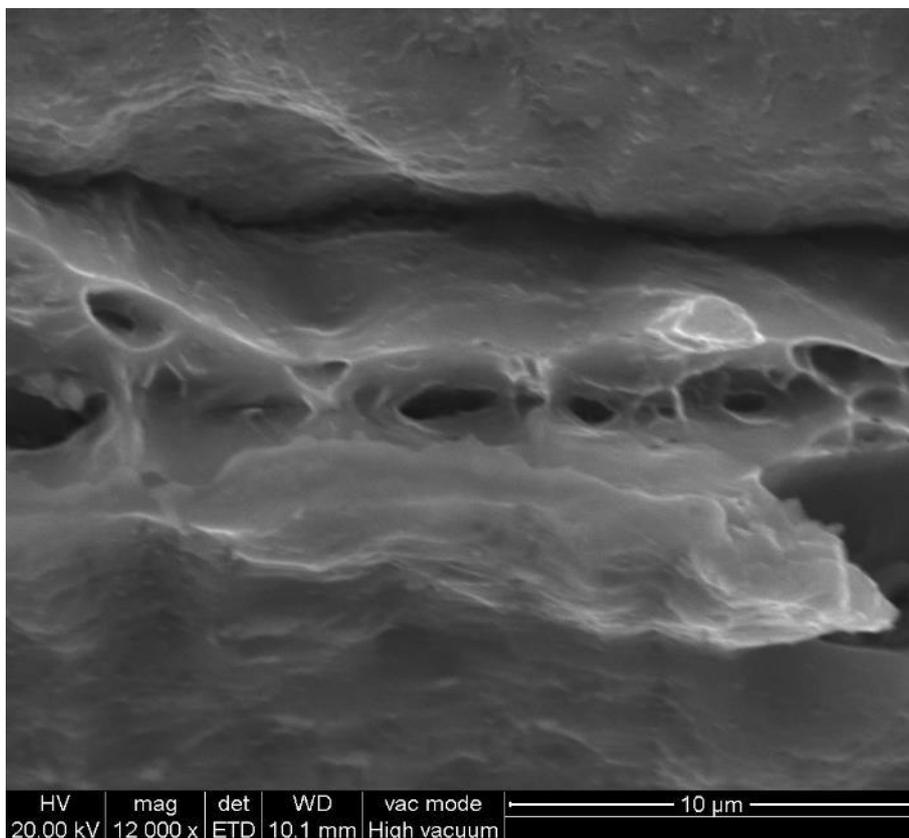


Figura 133: In un subgrano, si vedono dei microvuoti, tutti adiacenti tra loro e allineati, che si stanno aprendo e unendo tra loro per formare una cricca secondaria.

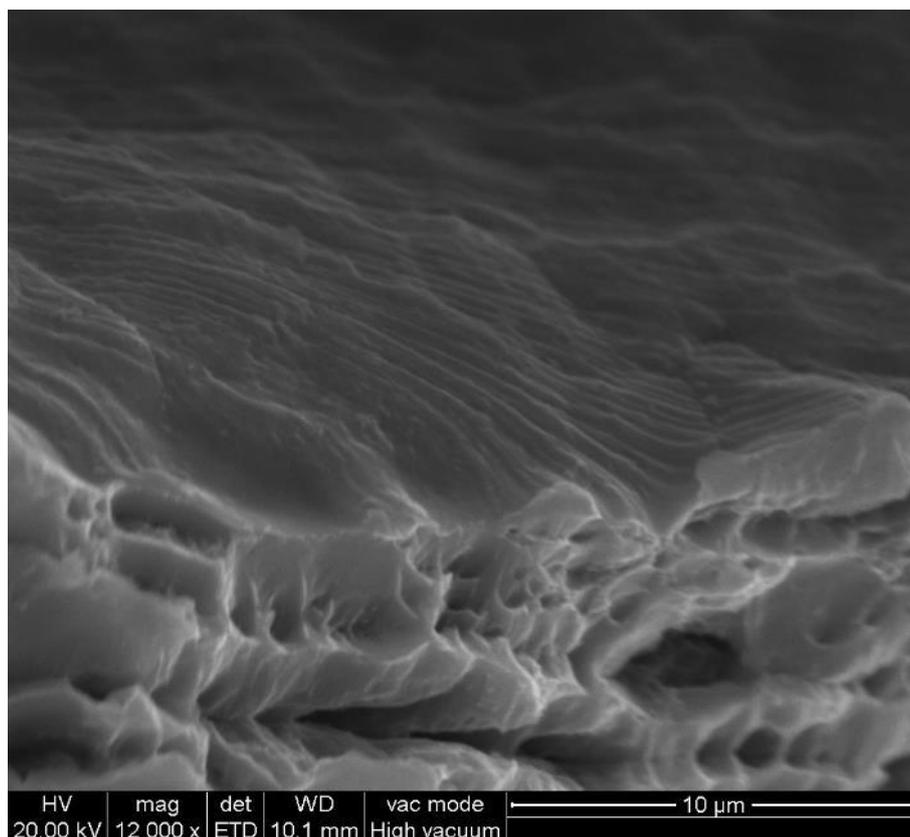


Figura 134: Linee di dislocazione formatesi lungo una cricca centrale.

Facendo riferimento all'immagine precedente, Figura 134, arrivando ad un ingrandimento di 12000x, è stato possibile osservare le linee di dislocazione. Durante il processo di deformazione plastica, viene attivato il movimento delle dislocazioni le quali incominciano a muoversi all'interno dei grani e sub-grani, finché non incontrano un ostacolo, in questo caso un bordo di sub-grano. Questo processo continua a ripetersi durante il fenomeno di deformazione plastica e si formano dei pacchetti di dislocazioni in prossimità dei bordi di sub-grano. In questo caso le linee di dislocazioni si trovano lungo il bordo di una cricca, perché questa si è originata lungo un bordo di sub-grano. Dall'immagine si può vedere come le dislocazioni tendano ad emergere dai cristalli e a staccarli lungo la cricca.

## 11.2 Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5LS

Durante l'analisi del campione R5LS al microscopio SEM, sono state ricavate tutta una serie di immagini, utili per studiare la morfologia del campione. Facendo riferimento alla prima panoramica della Figura 135, si può vedere come si sia verificata una grossa delaminazione (cricca secondaria), che ha formato una grossa cricca centrale estesa per i 2/3 della larghezza del provino. Salendo d'ingrandimento (Figura 136) si vede una concentrazione maggiore di cricche secondarie nella parte del provino al di sopra della grossa cricca. Andando ad ingrandimenti ancora maggiori, Figura 137, dentro la grossa cricca centrale si è visto che c'è stato uno sfaldamento dei grani. Le pareti interne della grossa cricca centrale sono molto verticali e regolari, Figura 138; internamente si vedono le cricche formatesi lungo i bordi di sub-grano. All'interno di questa cricca si è verificato il distacco di un grosso grano, perché i cristalli si sono sfaldati; si può riconoscere che la rottura in questo caso è in parte di natura cristallografica, in parte duttile, infatti si vedono le linee di dislocazioni che sono emerse sulla superficie, Figura 139. Se si fosse trattato di rottura fragile, la superficie sarebbe stata molto più liscia.

Complessivamente, la morfologia di cedimento è come quella del campione TS, cioè è una miscela di frattura duttile e frattura cristallografica, Figura 140.

Salendo ad un ingrandimento di 8000x, Figura 141, si vedono i pacchetti di dislocazioni lungo i bordi della cricca. Durante il loro movimento le linee di dislocazione vengono fuori e emergono sulla superficie di frattura. In corrispondenza delle fessure intergranulari, si vede che le linee di dislocazione si sono impilate, bloccandosi in corrispondenza dei bordi di grano e formando dei pacchetti di dislocazioni; questi si bloccano all'interfaccia dei grani adiacenti, fino a provocare il distacco dei grani gli uni dagli altri, Figura 142. Dalle immagini acquisite è stato calcolato che le linee di dislocazione sono distanziate mediamente, le une dalle altre, di circa 0,3 $\mu$ m.

In successive immagini, catturate ad ingrandimenti di 1200x (Figura 140), 8000x (Figura 141) e 16000x (Figura 142) si vede una frattura che ha un carattere misto fra il comportamento cristallografico, legato alla concentrazione delle dislocazioni su alcuni piani cristallografici, fino alla decoesione reticolare, e il comportamento intergranulare duttile, che è caratterizzato dalla formazione di microvuoti e grosse fessure intergranulari formatesi dalla rottura dei bordi di grano ad alto angolo; questo tipo di rottura genera delle superfici rugose. Da non confondere con la rottura intergranulare fragile, che quando si verifica, forma delle superfici di frattura completamente lisce.

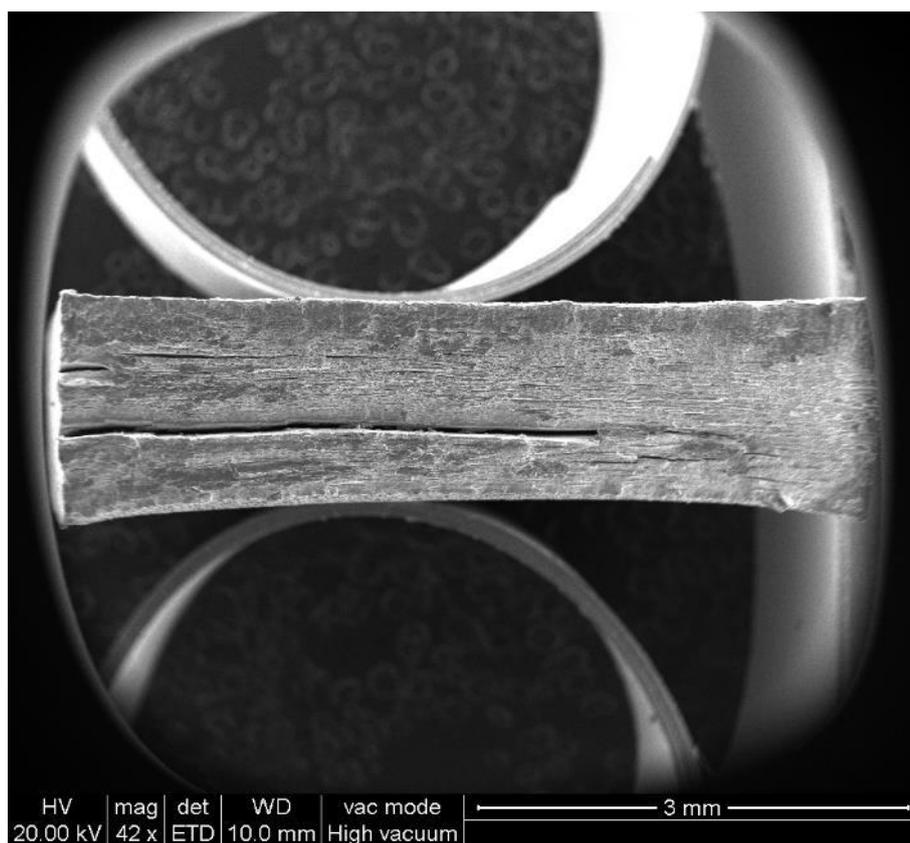


Figura 135: Panoramica della superficie di frattura del provino R5LS.

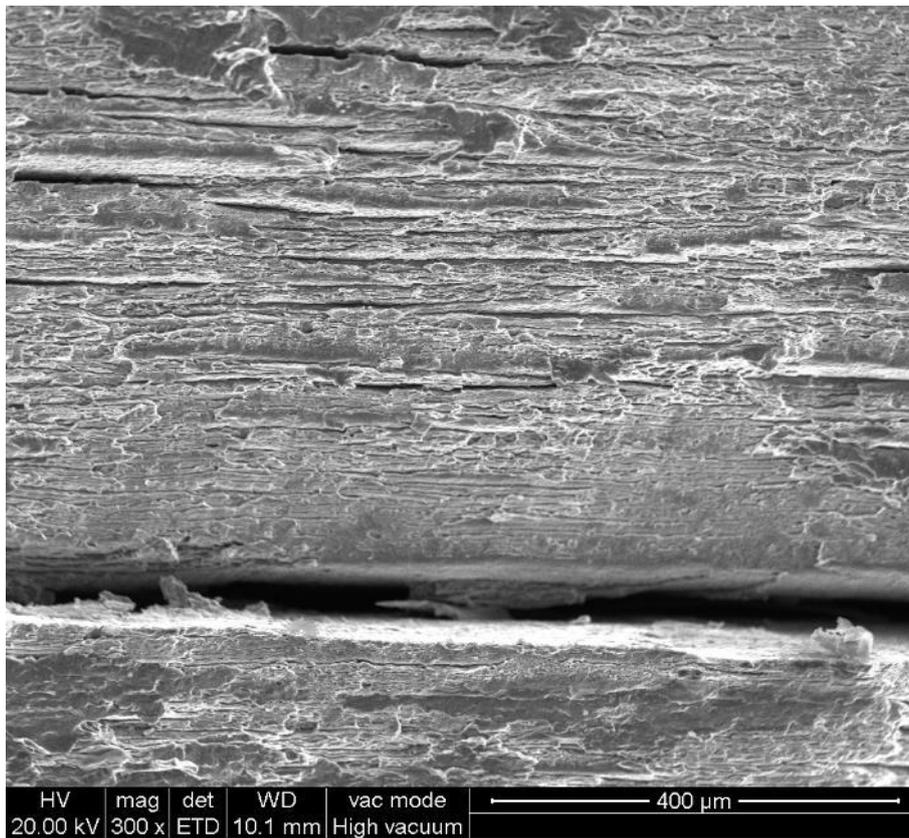


Figura 136: Maggior concentrazione delle cricche nella parte superiore. Inferiormente si vede una porzione della grossa cricca, lunga 3,5 mm e larga circa 50 μm.

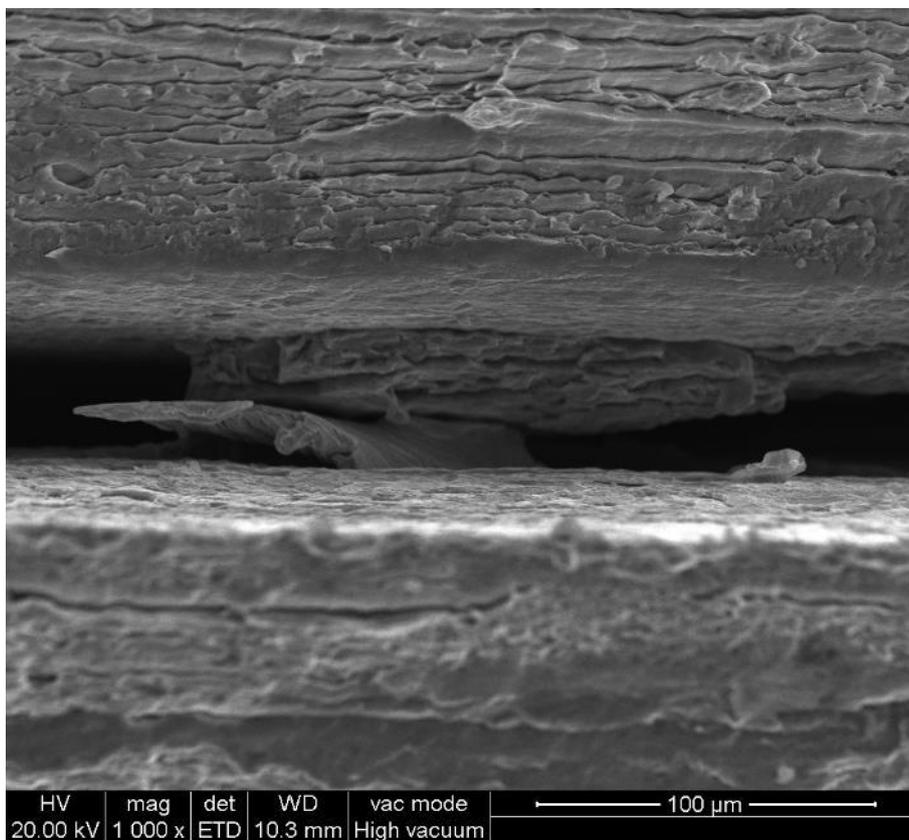


Figura 137: All'interno della grossa cricca centrale, si è verificato lo sfaldamento dei cristalli, causando il distacco di un grosso grano dalla parete della cricca.

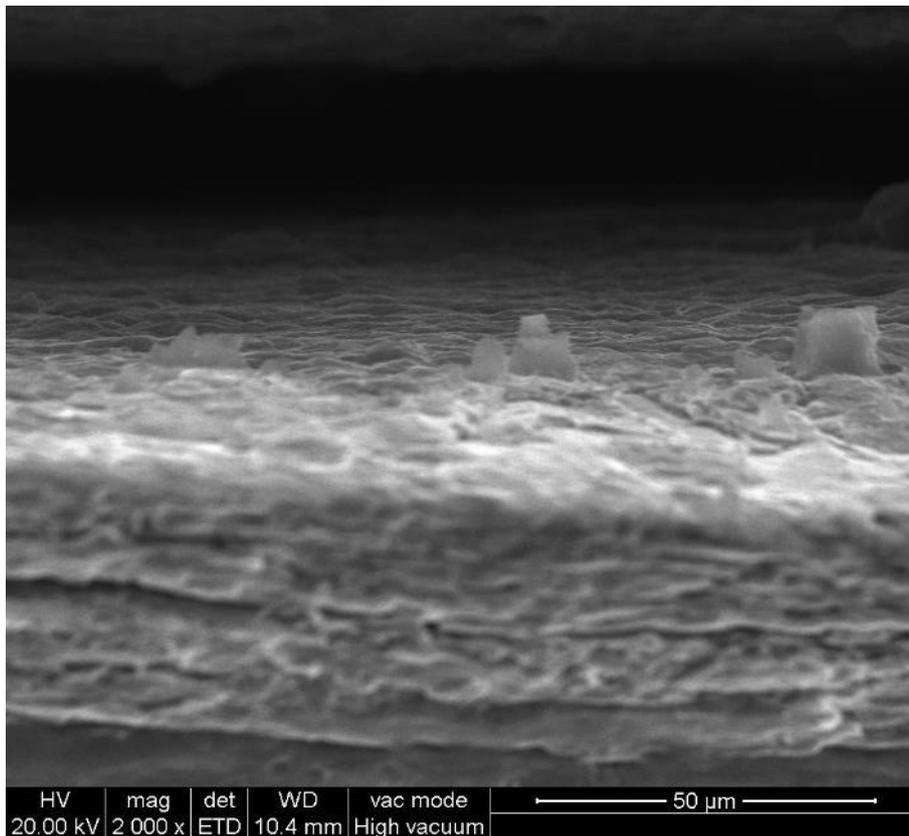


Figura 138: La parete interna, della grossa cricca centrale, è molto verticale e regolare; sulla superficie si nota il distacco di alcuni sub-grani.

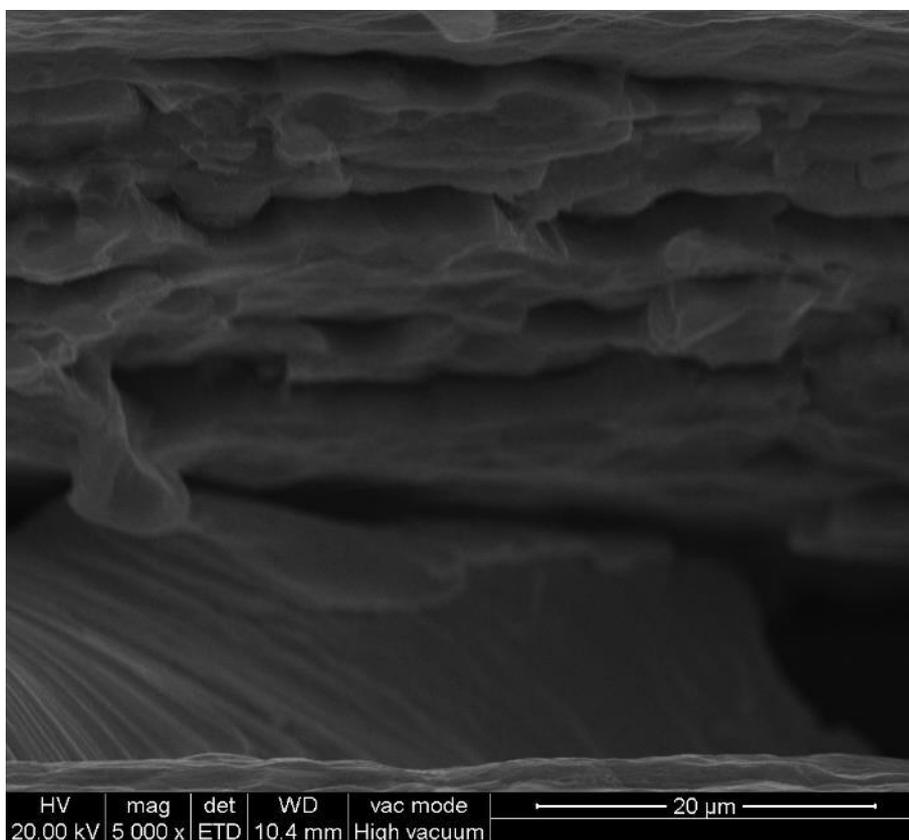


Figura 139: Inferiormente, dettaglio della frattura cristallografica e delle linee di dislocazione presenti sulla sfaldatura, all'interno della grossa cricca centrale. Superiormente, intragranulare duttile.

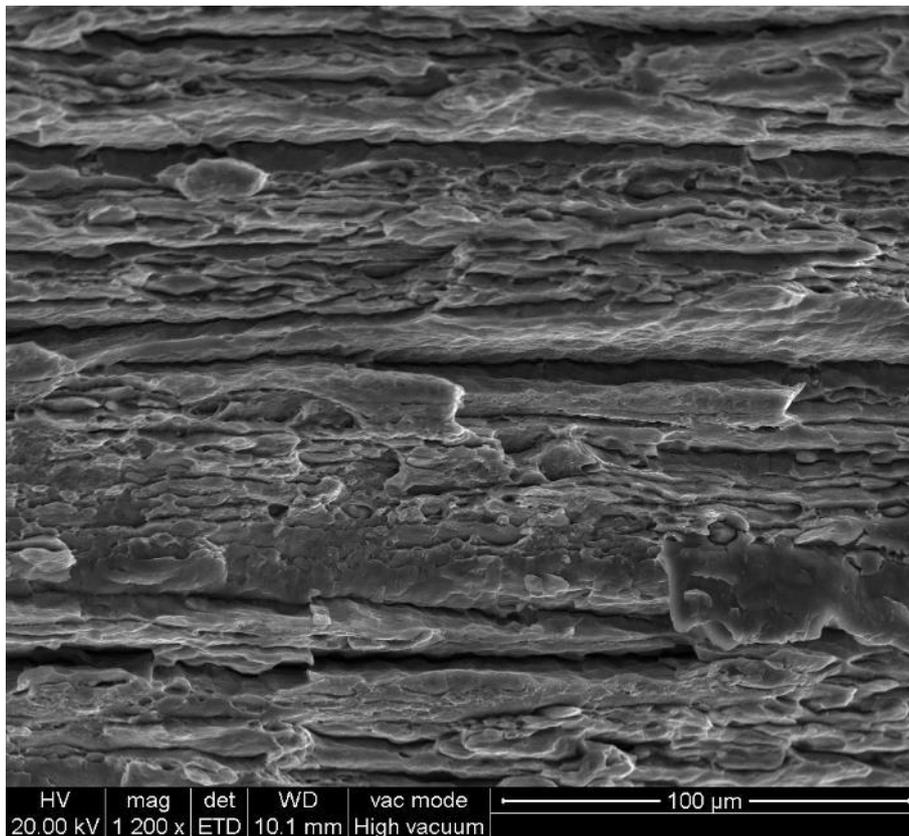


Figura 140: Fessure intergranulari formatesi tra i grani, lungo i bordi di grano, caratteristiche della frattura duttile intergranulare.

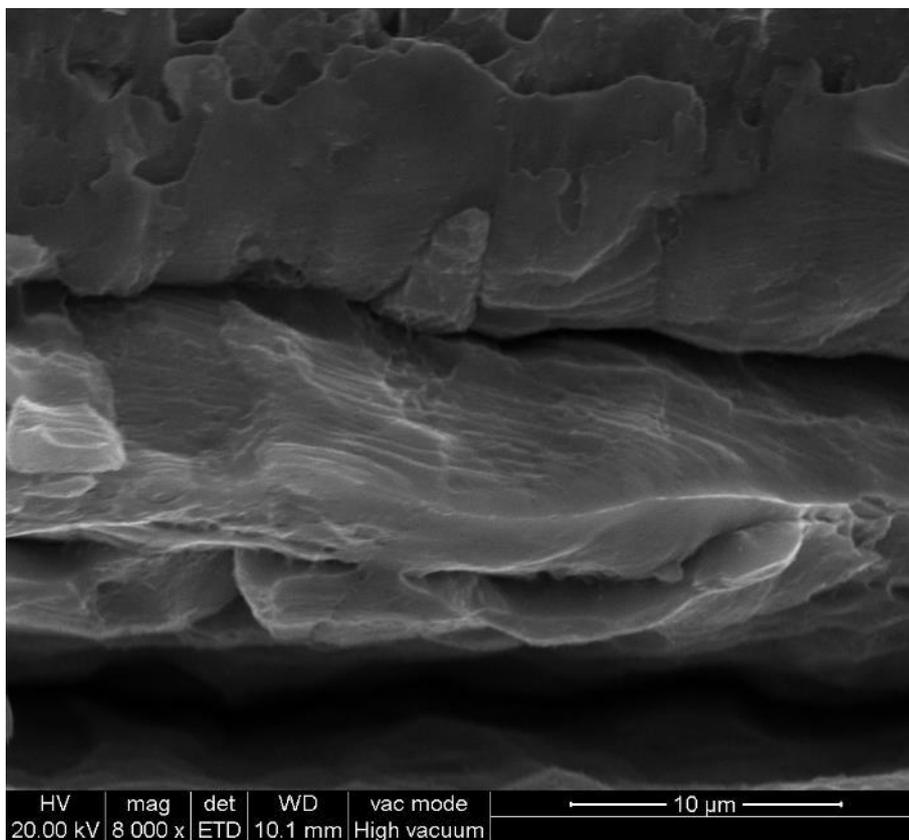


Figura 141: Le linee di dislocazione emergono e vengono bloccate dai bordi di grano, impilandosi e formando pacchetti di dislocazioni, in corrispondenza del bordo di grano.

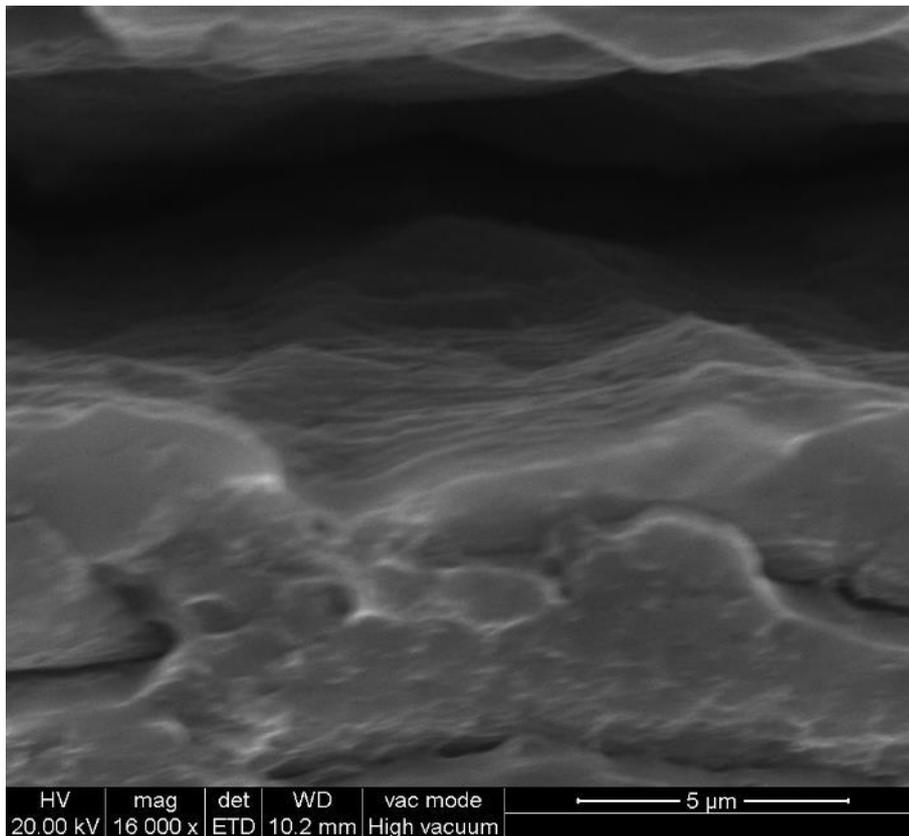
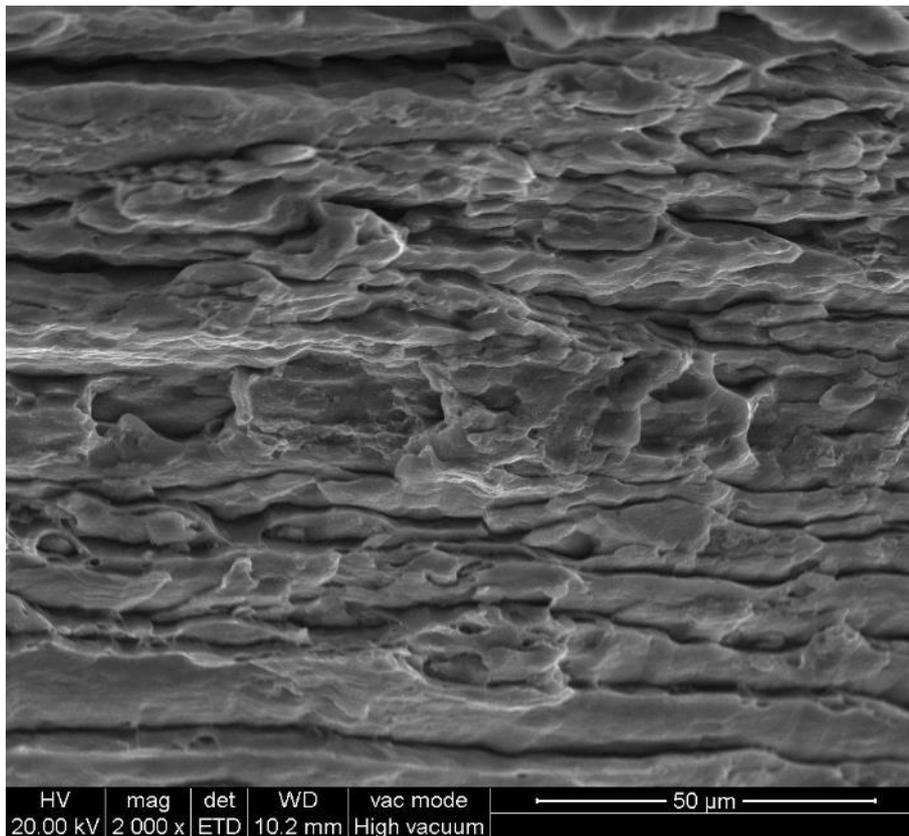
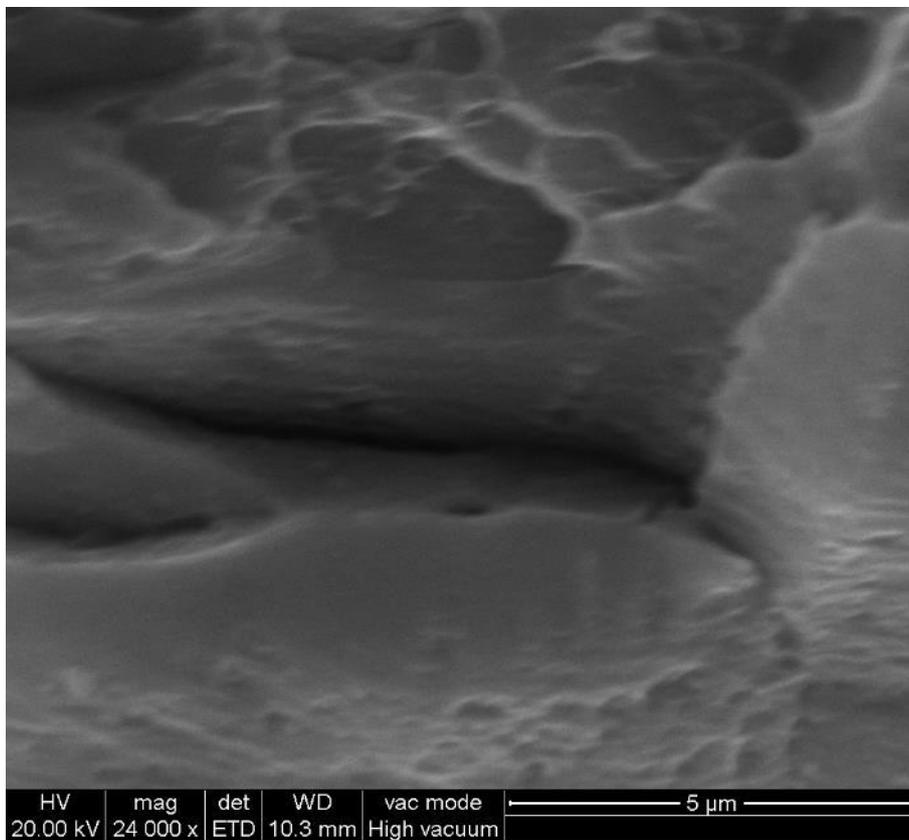


Figura 142: Le linee di dislocazione emerse in corrispondenza del bordo di grano portano al distacco dei grani adiacenti e formando così le cricche tra i grani, lungo i bordi di grano.

Facendo riferimento alle immagini successive, è stato possibile osservare delle superfici particolarmente lisce delimitate da profili ben delineati, Figura 143. Il profilo che delimita la superficie liscia potrebbe essere il bordo di grano, che delimita la parte superiore o inferiore di un grano dal successivo; tuttavia, se fosse così su quella superficie si dovrebbero vedere le dislocazioni che si sono mosse attraverso il cristallo e che sono emerse dalla superficie, Figura 144, e invece non è così. È più plausibile che quello sia il grano tagliato a metà dallo scorrimento delle dislocazioni, ancora Figura 144 e poi Figura 145. Quindi la superficie liscia delimitata dovrebbe essere il piano cristallografico di rottura del grano, si tratta di rottura cristallografica, è bene sottolineare che si tratta comunque di una frattura duttile. Su questo piano, le linee di dislocazione non si vedono, perché non si tratta della superficie su cui sono emerse, ma si tratta del piano sul quale c'è stato il loro passaggio, Figura 146. Si tratta di un piano abbastanza liscio, seppur un po' sporco e con qualche linea di dislocazione, Figure 147 e 148. In questo provino, il meccanismo di rottura dei grani, in entrambi i casi, ha la stessa origine, solo che nel primo caso i grani si sono separati gli uni dagli altri lungo il bordo di grano, rottura duttile intragranulare; invece nel secondo caso c'è stata la rottura all'interno del grano, che si è diviso a metà, rottura duttile transgranulare. Ne emerge il panorama documentato nelle Figure 149-151.



*Figura 143: Fessure intergranulari formatesi tra i grani, lungo i bordi di grano, caratteristiche della frattura duttile intergranulare.*



*Figura 144: Dettaglio di una microcricca e delle linee di dislocazione formatesi in prossimità.*

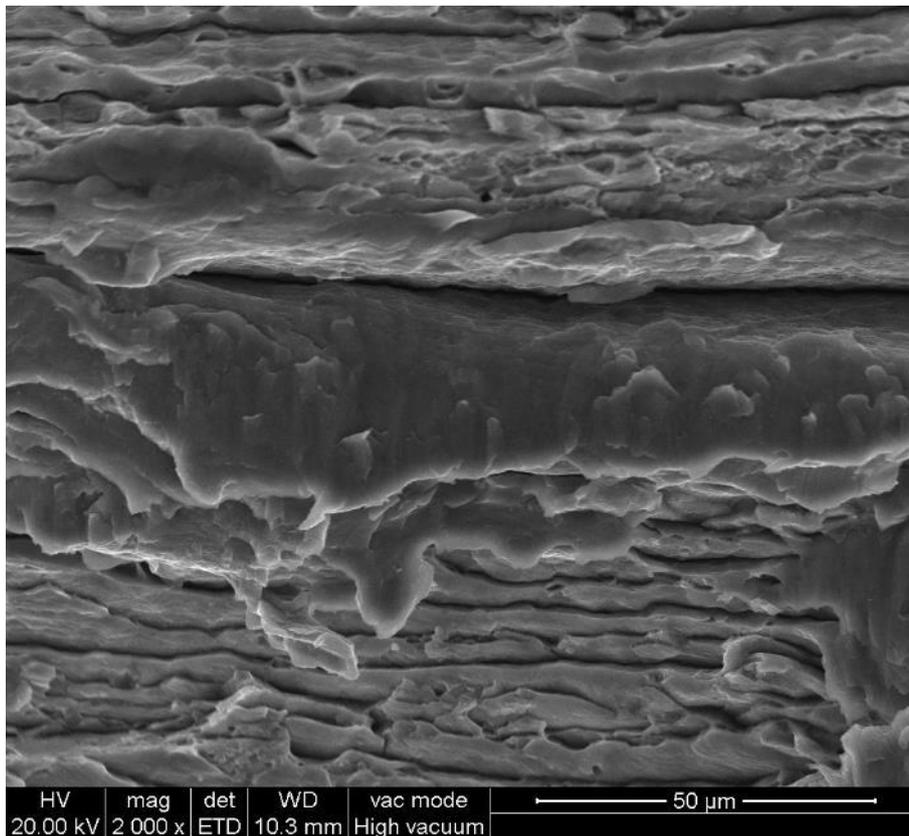


Figura 145: Panoramica della superficie liscia delimitata dal bordo di grano, rappresentante il piano di rottura cristallografica del grano.

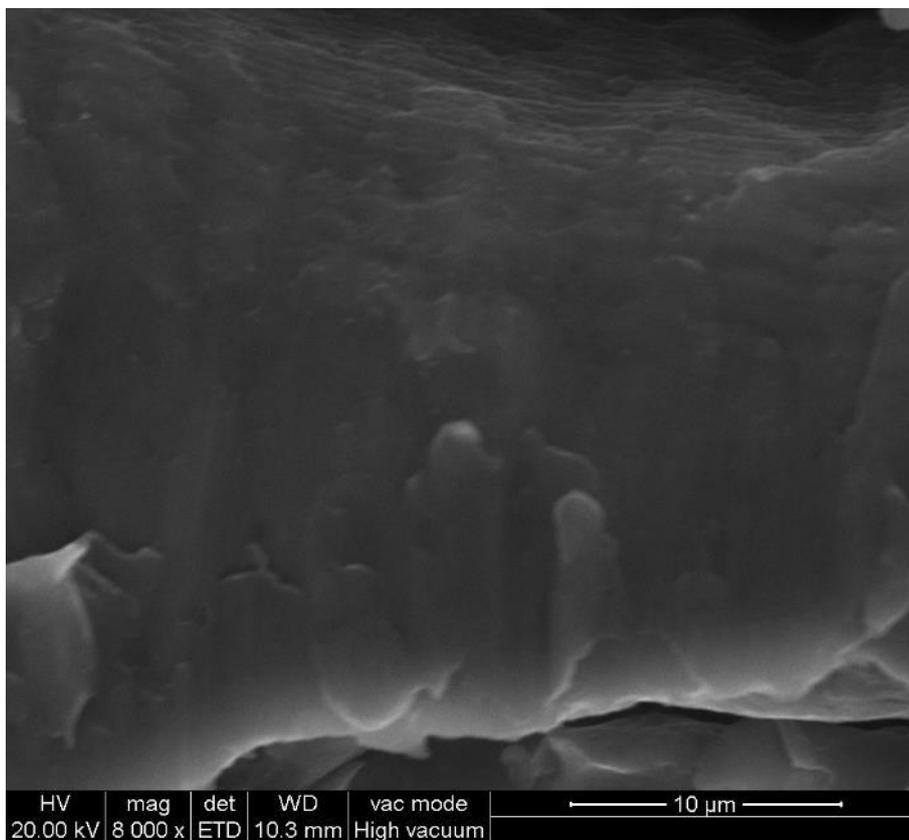


Figura 146: Ingrandimento 8000x del piano di rottura cristallografica del grano. Superiormente si possono notare le linee di dislocazione emerse sulla superficie.

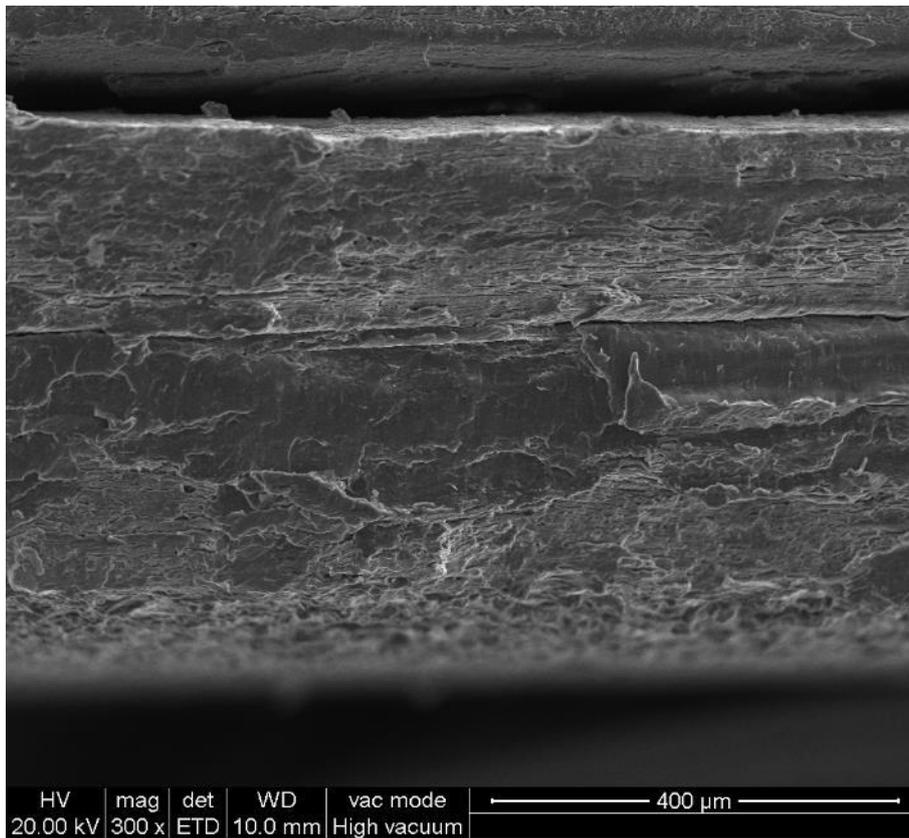


Figura 147: Panoramica del piano di rottura cristallografica di un grano con una larghezza di circa 500 $\mu$ m e uno spessore dell'ordine dei 100 $\mu$ m.

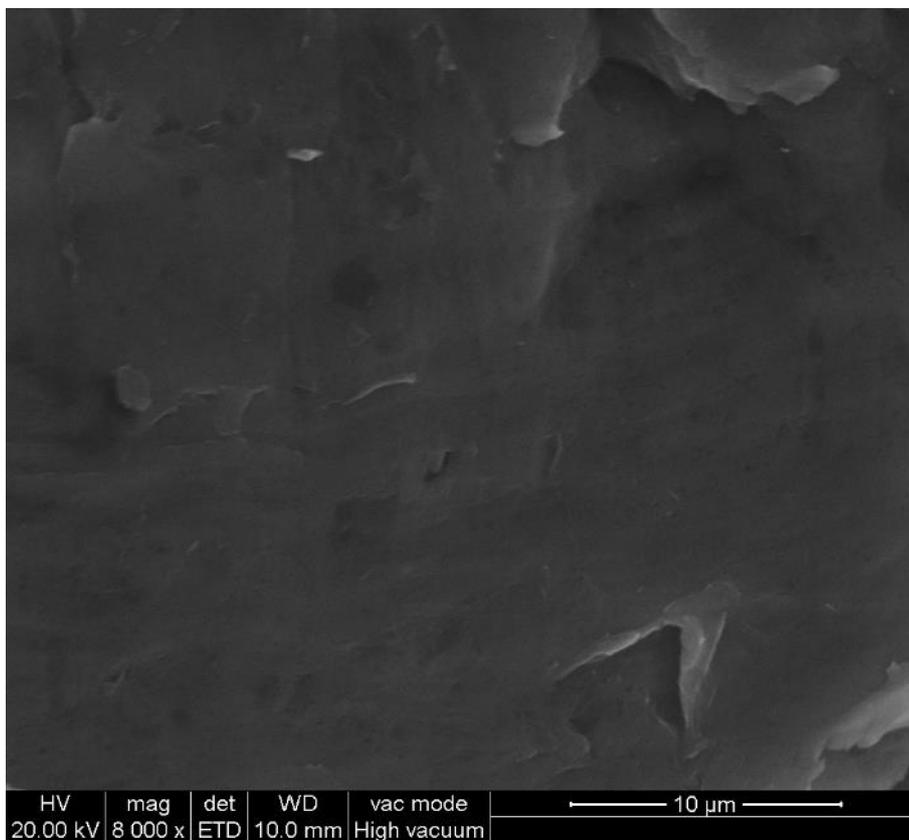


Figura 148: Ingrandimento 8000x del piano di rottura cristallografica del grano, liscio e con poche irregolarità.

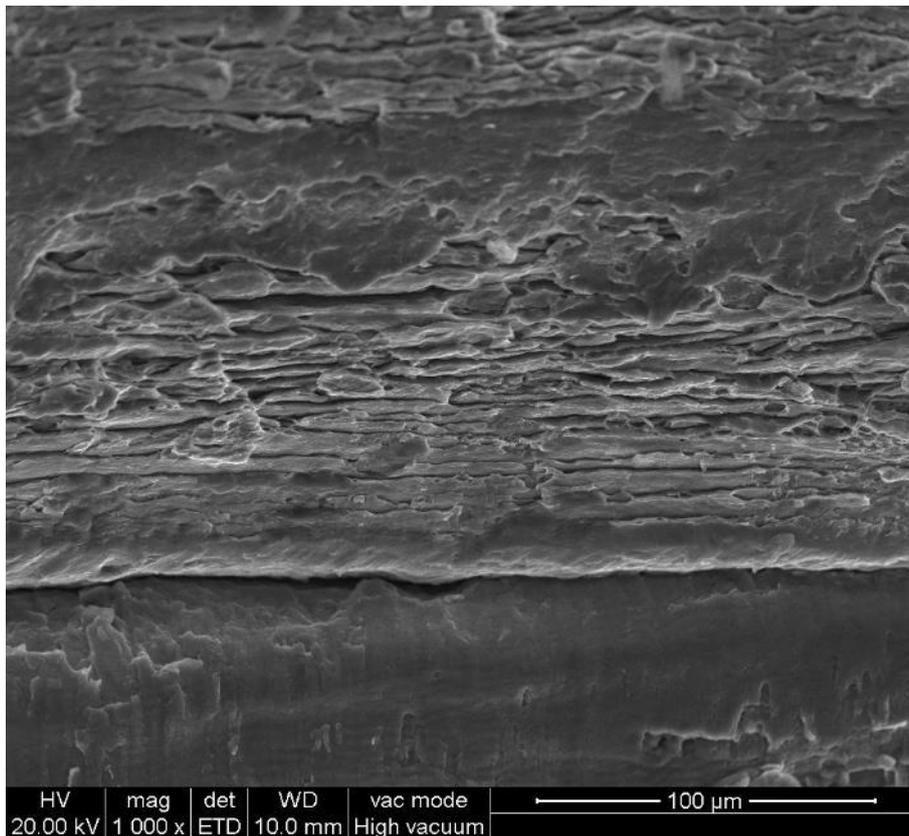


Figura 149: Superiormente, cricche intergranulari, formatesi lungo i bordi di grano, dei grani più piccoli ricristallizzati, caratteristiche della frattura duttile intergranulare. Inferiormente, il piano di rottura cristallografica di un grano colonnare non ricristallizzato.

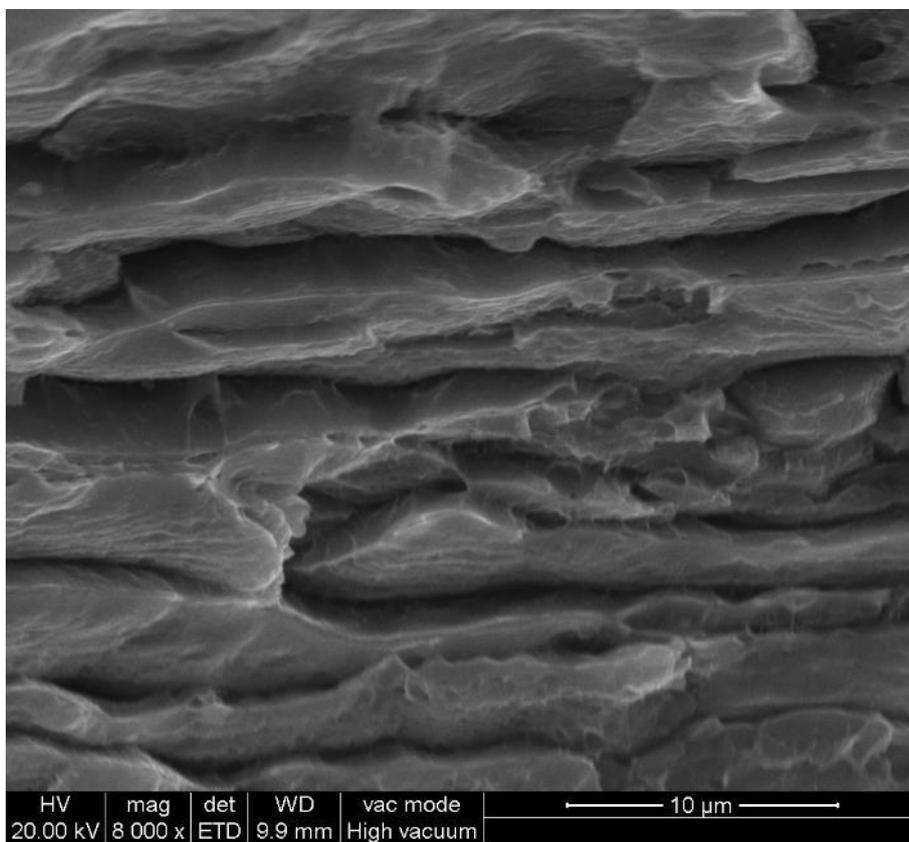


Figura 150: Ingrandimento 8000x delle cricche intergranulari duttili e dei relativi microvuoti.

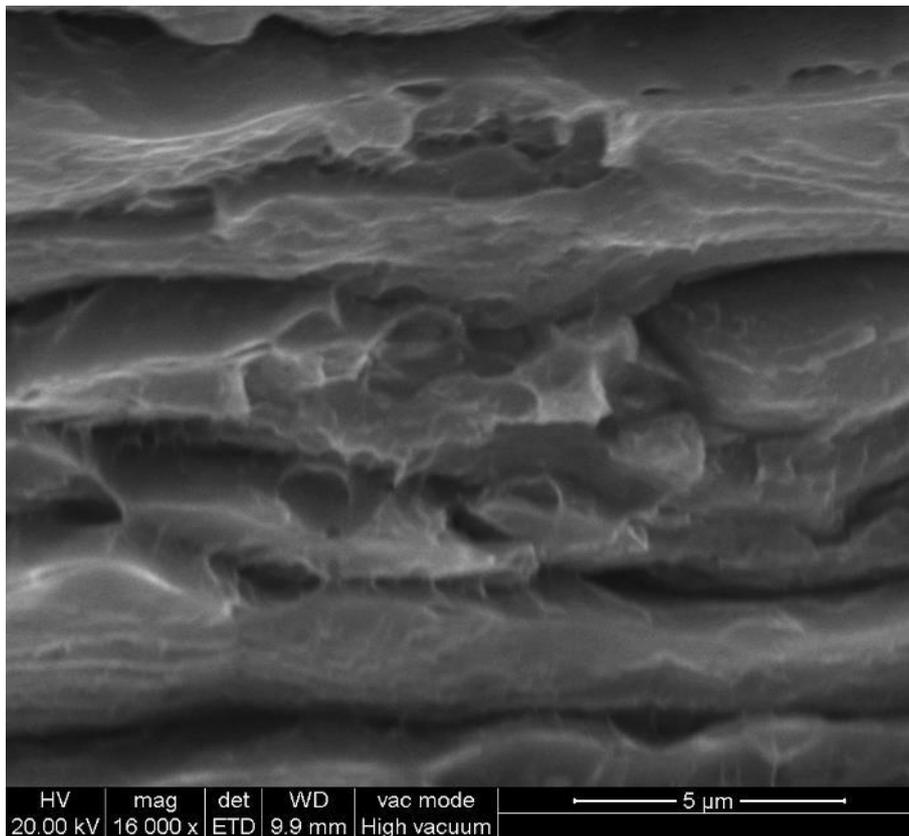
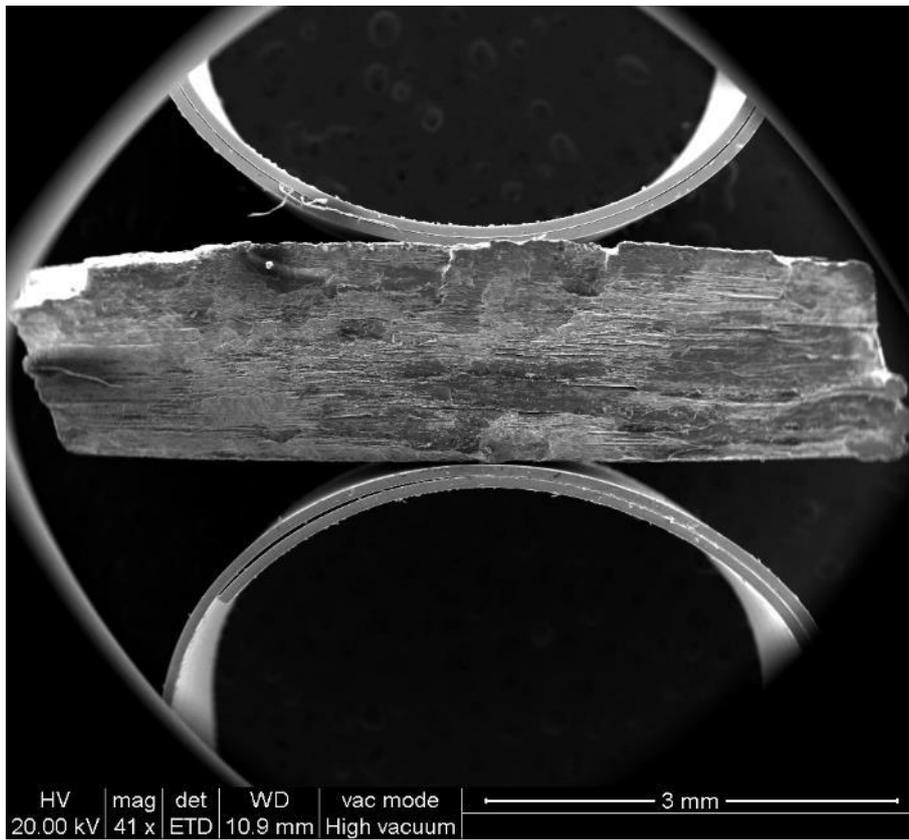


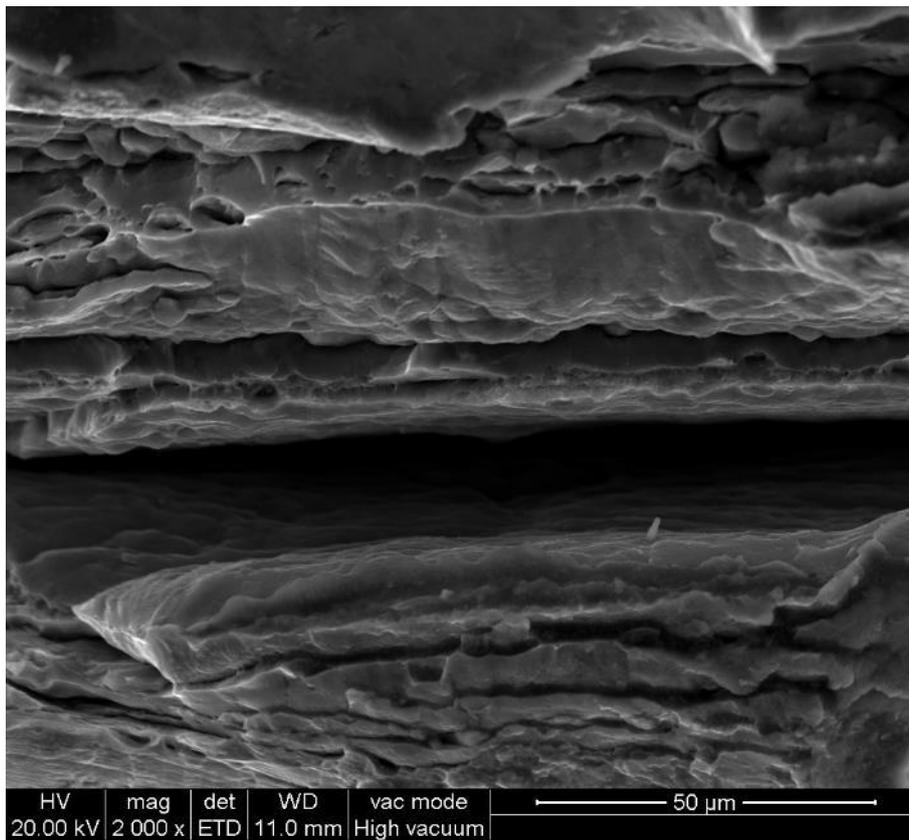
Figura 151: Microvuoti dovuti a inclusioni intermetalliche, che si stanno aprendo e unendo tra loro per formare una cricca, lungo i bordi di sub-grano.

### 11.3 Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R6LC

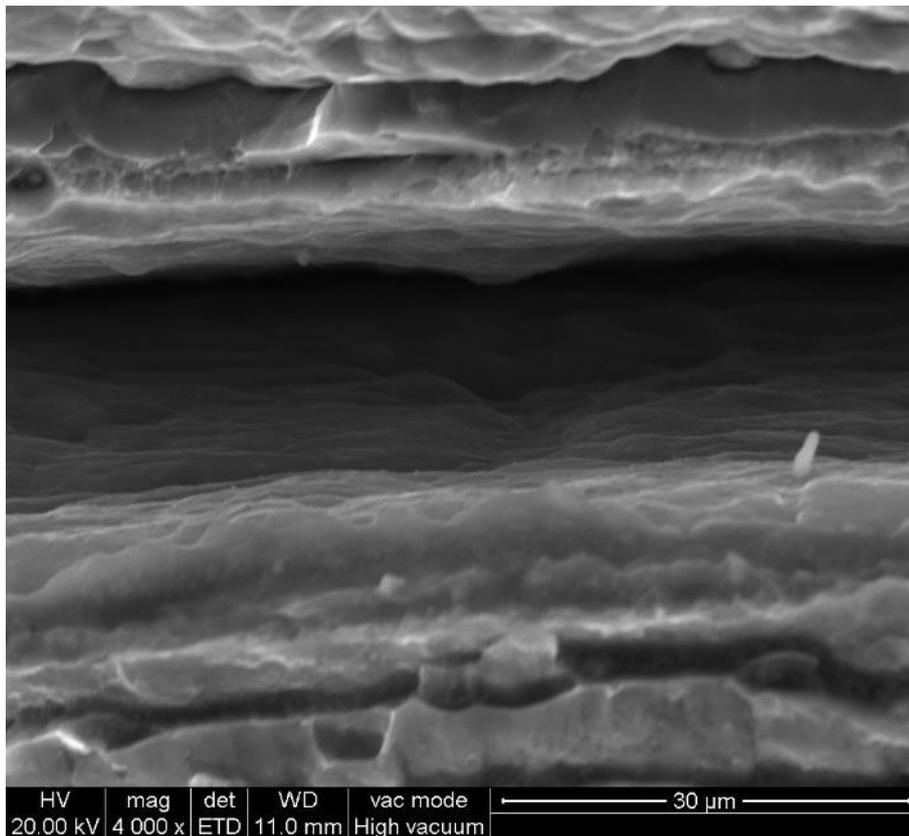
Allo stesso modo dei campioni precedenti anche la superficie di frattura del provino R6LC è stata osservata al microscopio SEM, per studiarne la morfologia. Come ci si poteva aspettare, similmente alla rottura che si è verificata nei provini precedenti osservati al SEM, si è visto che anche in questo caso la rottura contiene ampie zone di tipo cristallografico, ed è avvenuta perché si sono verificate tutte rotture con formazione, moltiplicazione e movimento dei pacchetti di dislocazioni, Figure 152 e 153. Ci sono state alcune rotture dove i grani si sono separati gli uni dagli altri lungo il bordo di grano, come la rottura duttile intergranulare della Figura 154; invece in altri casi c'è stata la rottura all'interno del grano, lungo il piano di rottura cristallografica, come nelle Figure 155 e 156; si tratta di piani abbastanza lisci, anche se un po' sporchi e con delle irregolarità, che presentano le tracce lasciate dal movimento delle dislocazioni, Figure 157 e 158. Complessivamente la frattura ha avuto un carattere misto fra il comportamento duttile intergranulare e il comportamento transgranulare duttile, Figure 159 e 160. Alcuni grani si sono rotti lungo un piano di rottura che ha generato una superficie relativamente liscia. Altri grani si sono rotti in modo transgranulare a livello dei subgrani per coalescenza dei microvuoti, Figura 161. In pratica si ha la formazione della cricca a bordo di grano quando la concentrazione delle tensioni supera un certo valore di soglia, relativo alla resistenza alla frattura del bordo di grano [14]. Quando si verifica la frattura, le dislocazioni che erano impacchettate sul bordo di grano emergono dalla superficie lasciando un segno sulla superficie, come uno scalino, che avrà un'intensità proporzionale al vettore di Burgers per il numero di dislocazioni che sono emerse, Figure 162 e 163.



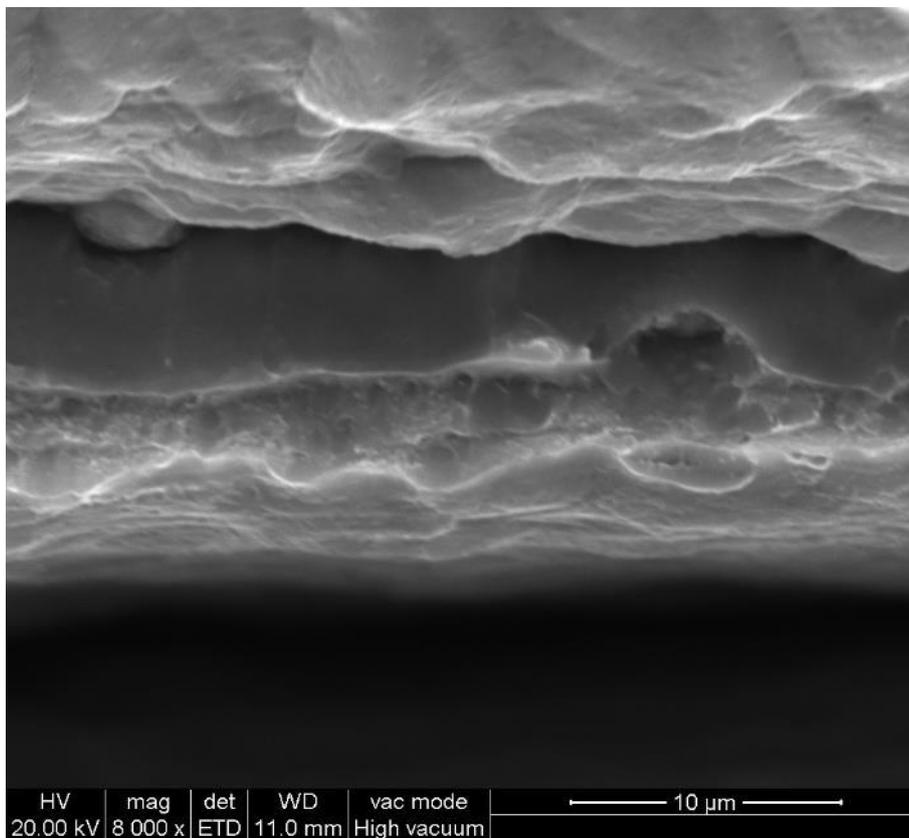
*Figura 152: Panoramica della superficie di frattura del provino R6LC.*



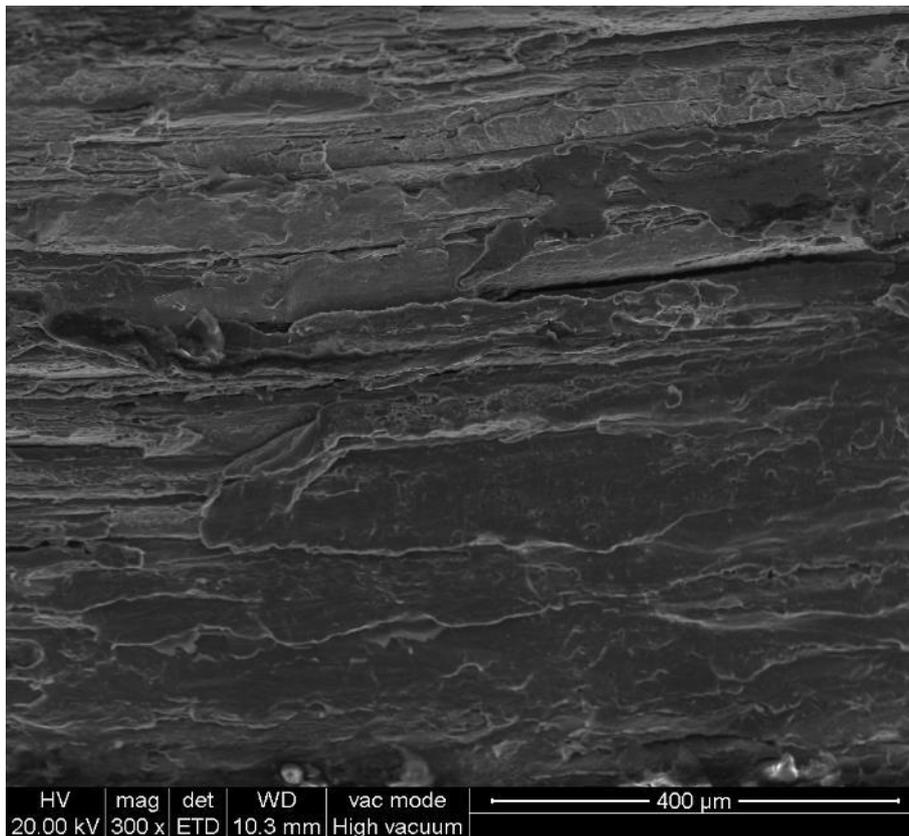
*Figura 153: Cricca intragranulare secondaria formatasi sulla superficie di frattura.*



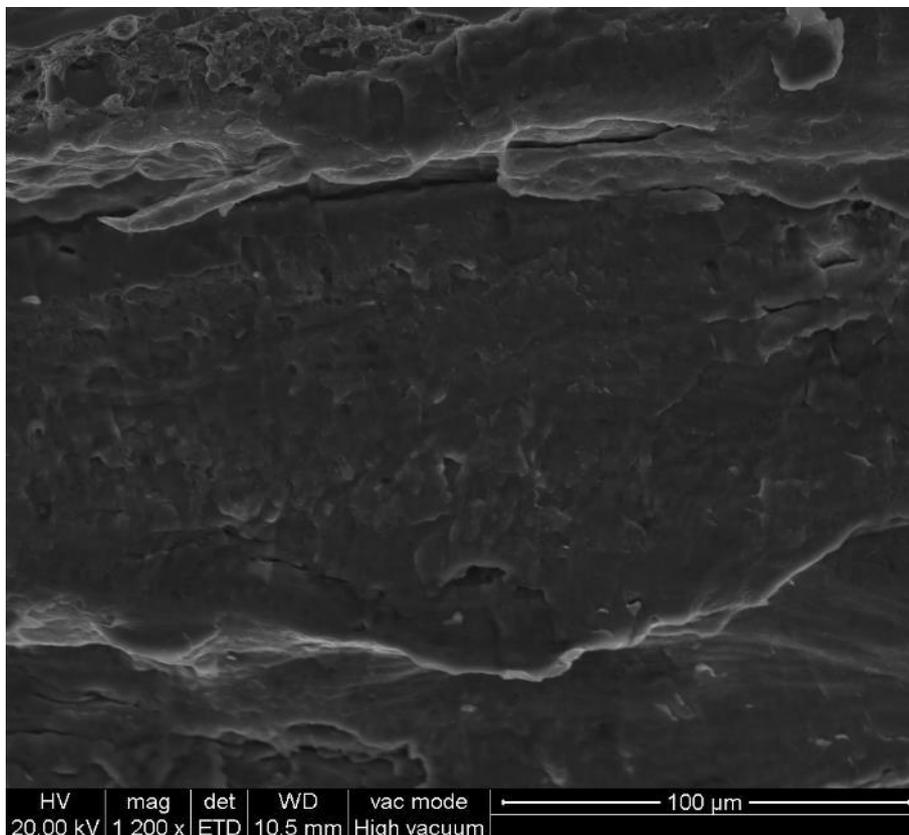
*Figura 154: Le linee di dislocazione emergono in corrispondenza del bordo di grano e portano al distacco dei grani adiacenti, formando così le cricche intragranulari.*



*Figura 155: La zona liscia raffigurata, è una banda plastica che emergendo ha portato alla rottura del cristallo.*



*Figura 156: Superfici lisce delimitate dai bordi di grano, rappresentanti i piani di rottura cristallografica dei grani.*



*Figura 157: Ingrandimento 1200x dei piani di rottura cristallografica dei grani.*

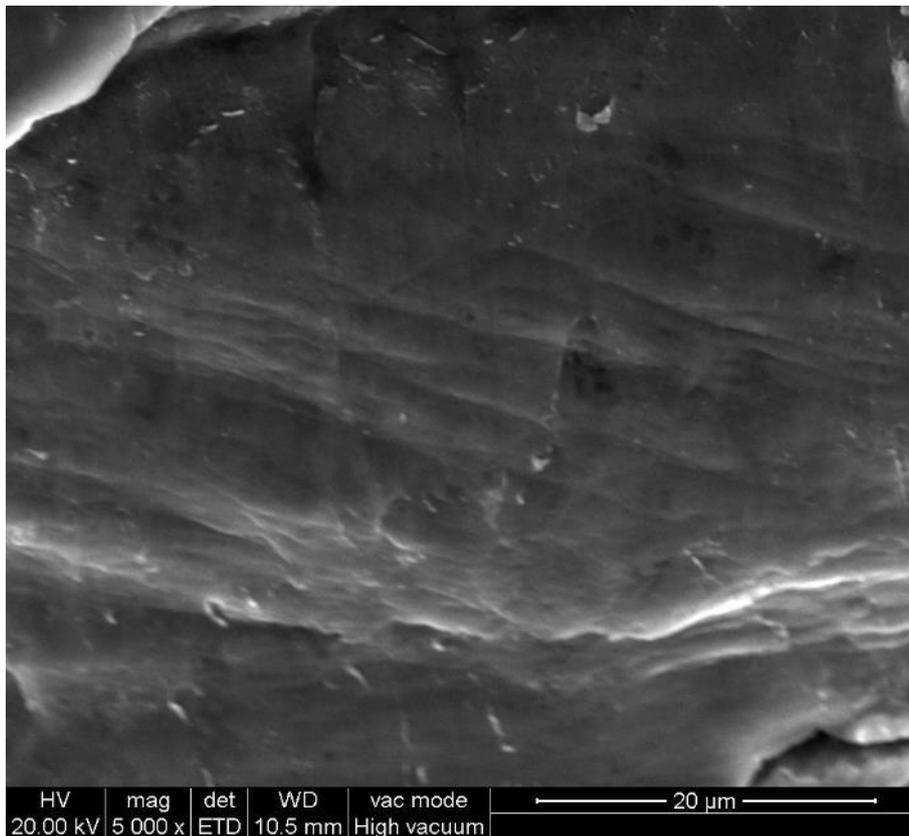


Figura 158: Ingrandimento 5000x, linee di dislocazione presenti nei piani di rottura cristallografica dei grani. Salendo d'ingrandimento si vedono molti scorrimenti per dislocazioni.

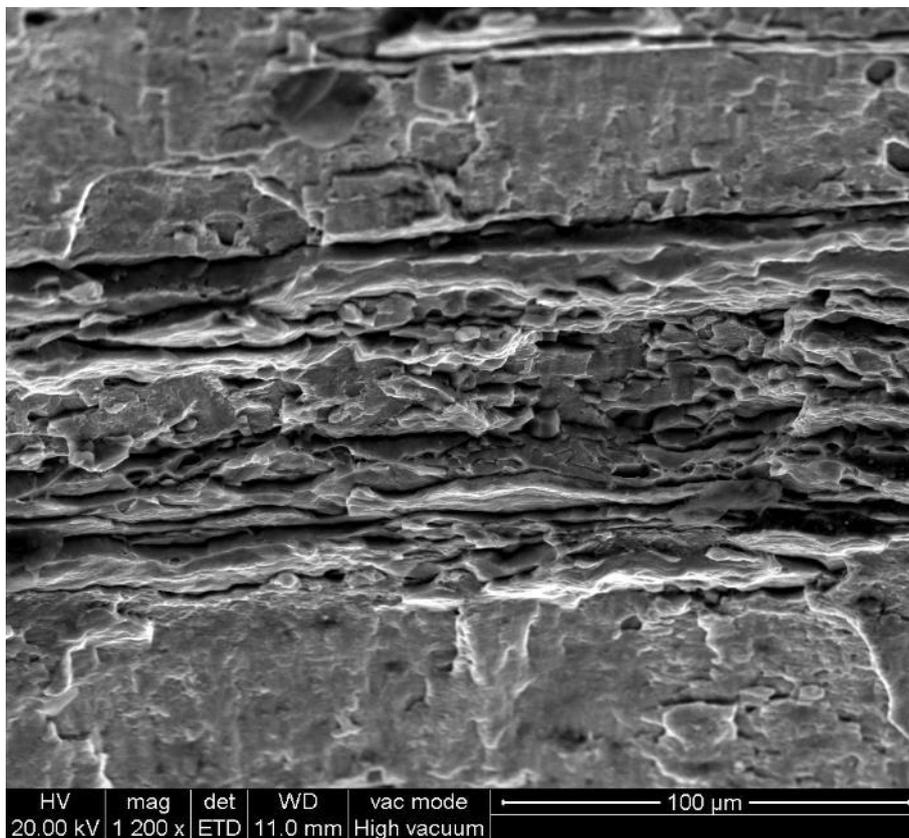


Figura 159: Zona di frattura con comportamento misto con cricche formatesi lungo i bordi di sub-grano, caratteristiche della frattura duttile intergranulare.

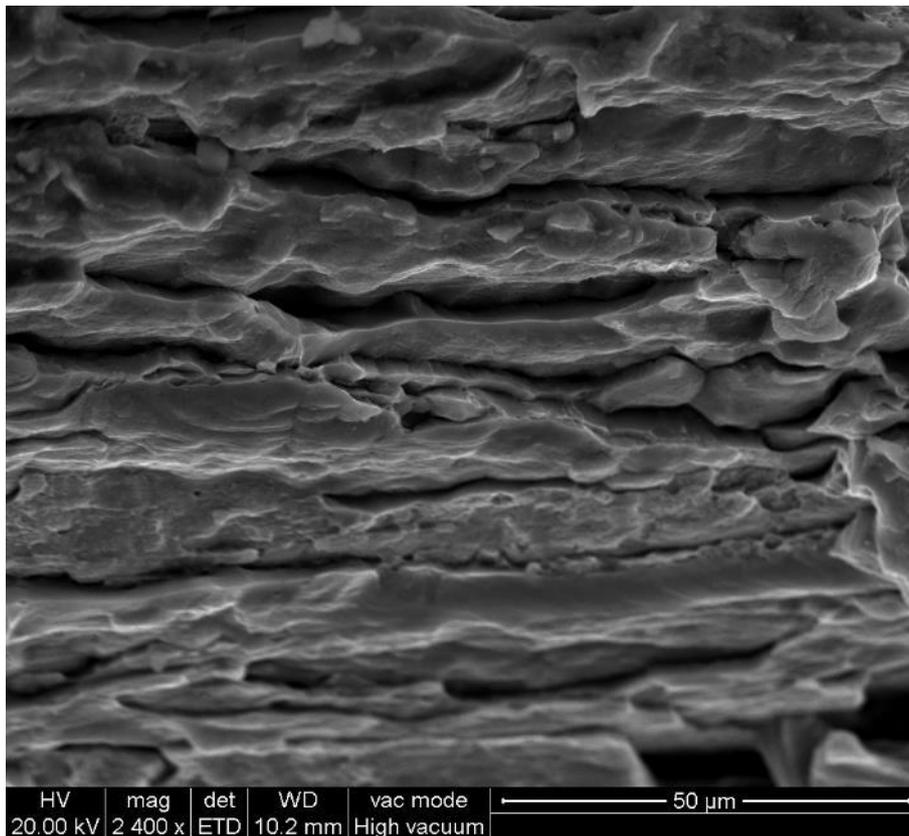


Figura 160: Dettaglio della della frattura duttile intergranulare, si vedono piccoli subgrani e dislocazioni.

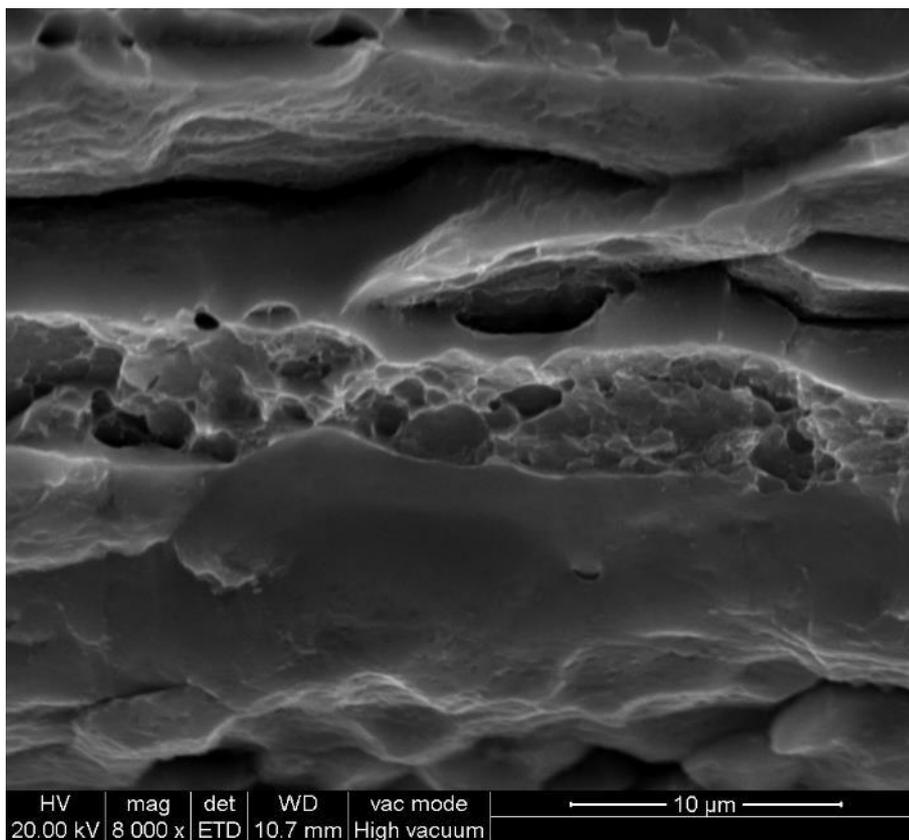
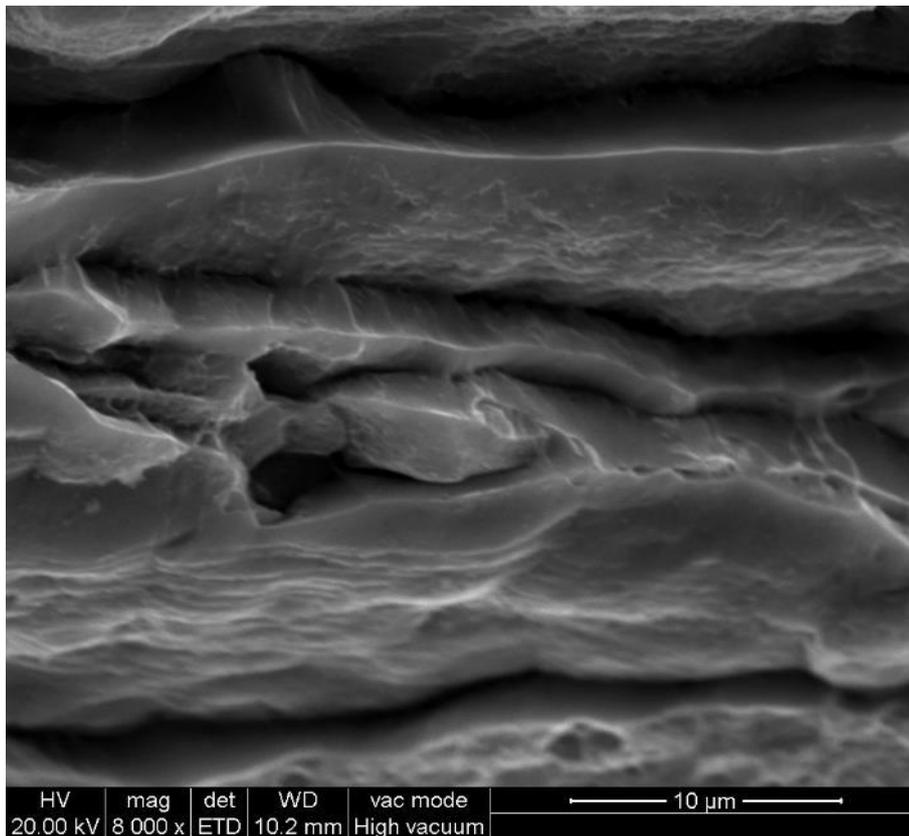
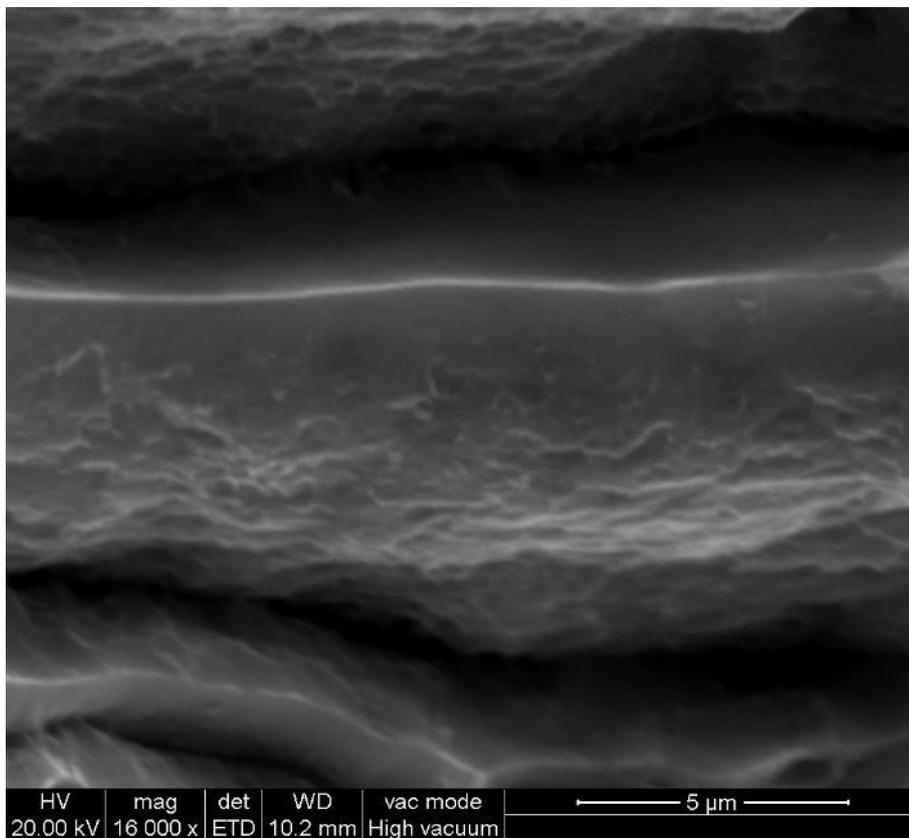


Figura 161: Formazione dei microvuoti con al contorno delle superfici di frattura più lisce.



*Figura 162: Le linee molto marcate e regolari sono i fronti d'incontro, ovvero l'interfaccia, tra due bande plastiche che si sono incontrate.*



*Figura 163: Dettaglio della linea d'interfaccia d'incontro tra due bande plastiche.*

## 11.4 Analisi al SEM della superficie di frattura – Provino R5TC

Allo stesso modo dei campioni precedenti anche la superficie di frattura del provino R5TC è stata osservata al microscopio SEM, per studiarne la morfologia. Come ci si poteva aspettare, anche in questo caso la rottura è di due tipologie, sia di tipo cristallografico transgranulare (duttile), sia intergranulare duttile, Figure 164 e 165. Complessivamente la frattura ha avuto un carattere misto fra il comportamento legato alla formazione e al movimento delle dislocazioni lungo i piani cristallografici a maggior scorrimento, Figure 166 e 167, e il comportamento intergranulare duttile, che è caratterizzato dalla formazione di microvuoti e grosse fessure intergranulari, formatesi dalla rottura dei bordi di grano ad alto angolo, Figure 168-172.

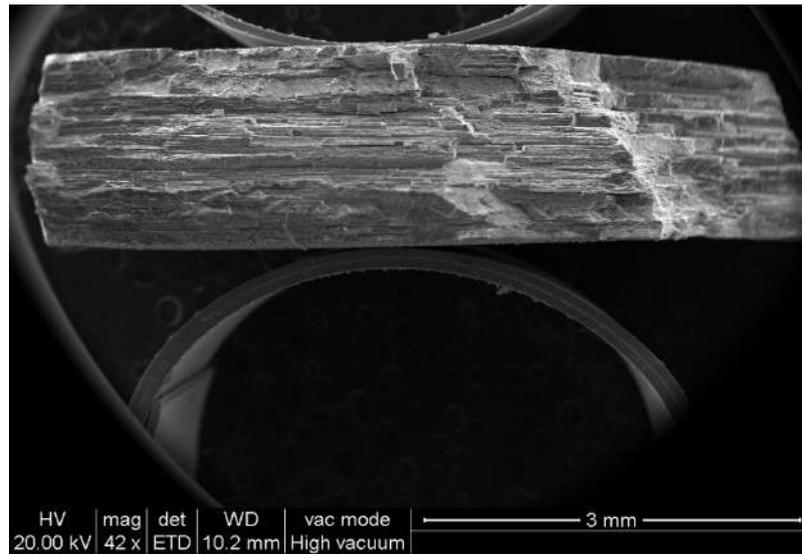


Figura 164: Panoramica della superficie di frattura del provino R5TC.

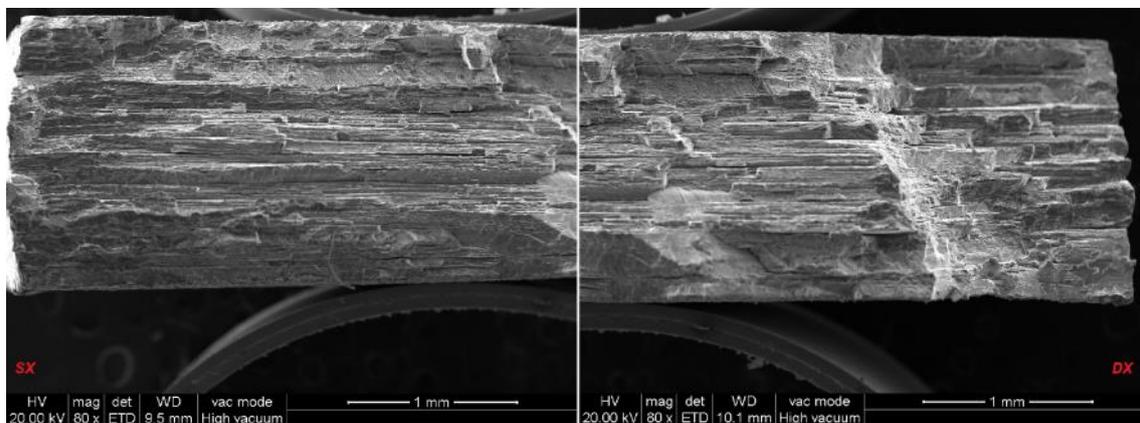


Figura 165: dettaglio della parte destra e sinistra della superficie di frattura del provino R5TC.

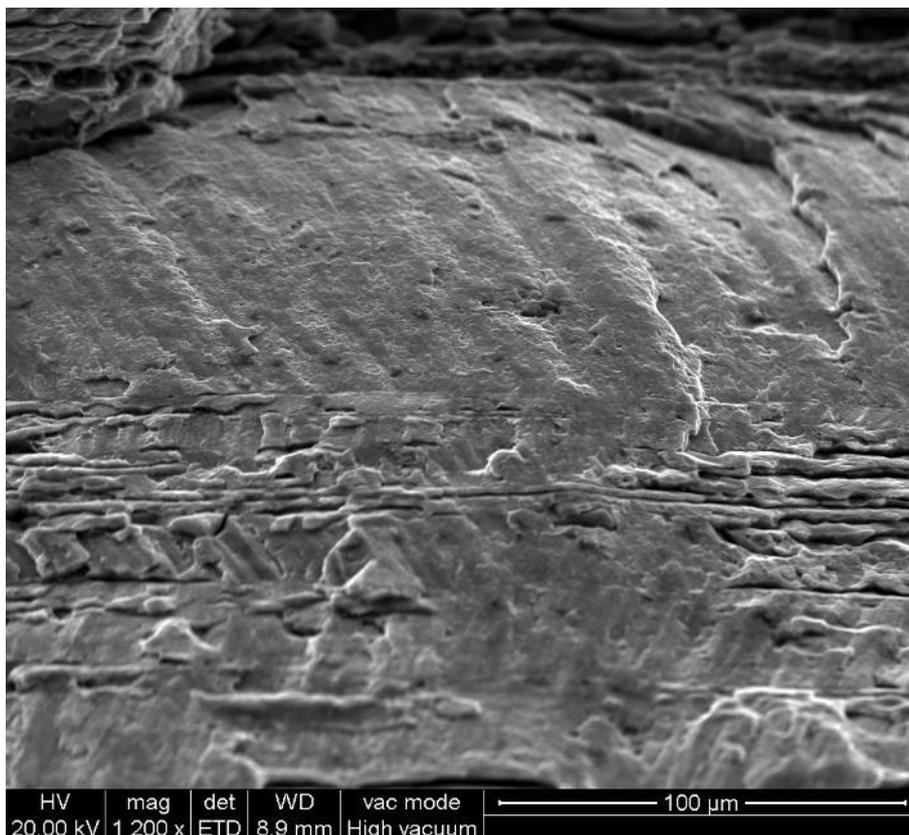


Figura 166: Zona di frattura duttile, sulla cui superficie si vede la traccia lasciata dalle bande plastiche.

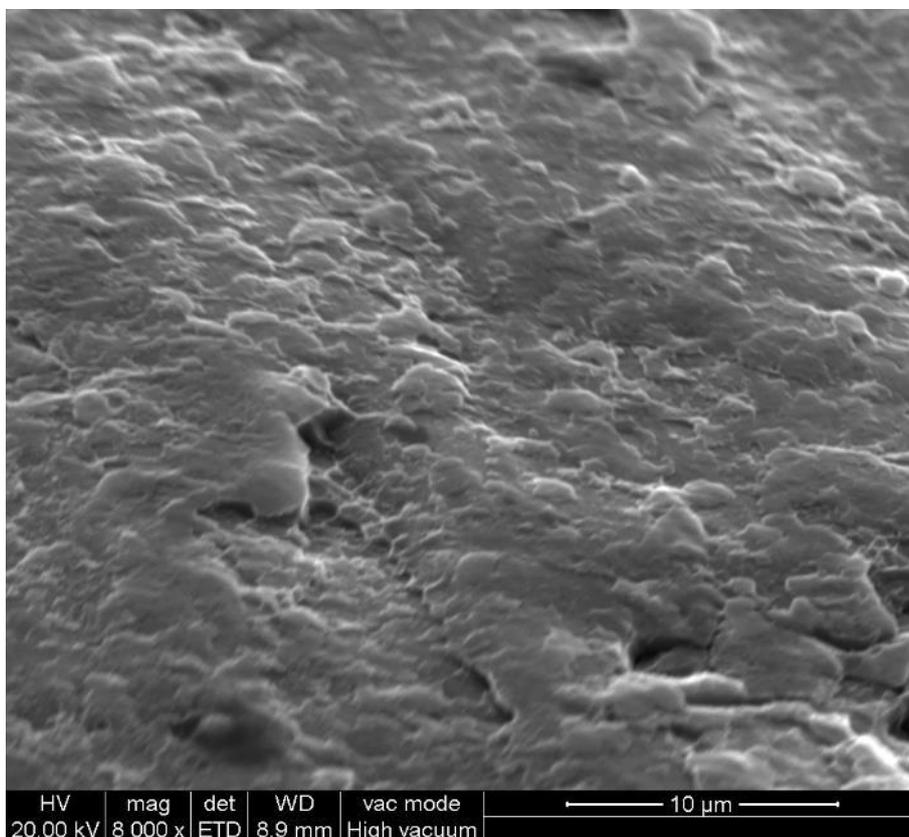


Figura 167: La superficie di frattura intergranulare duttile, che risulta un po' irregolare per la presenza di microvuoti.

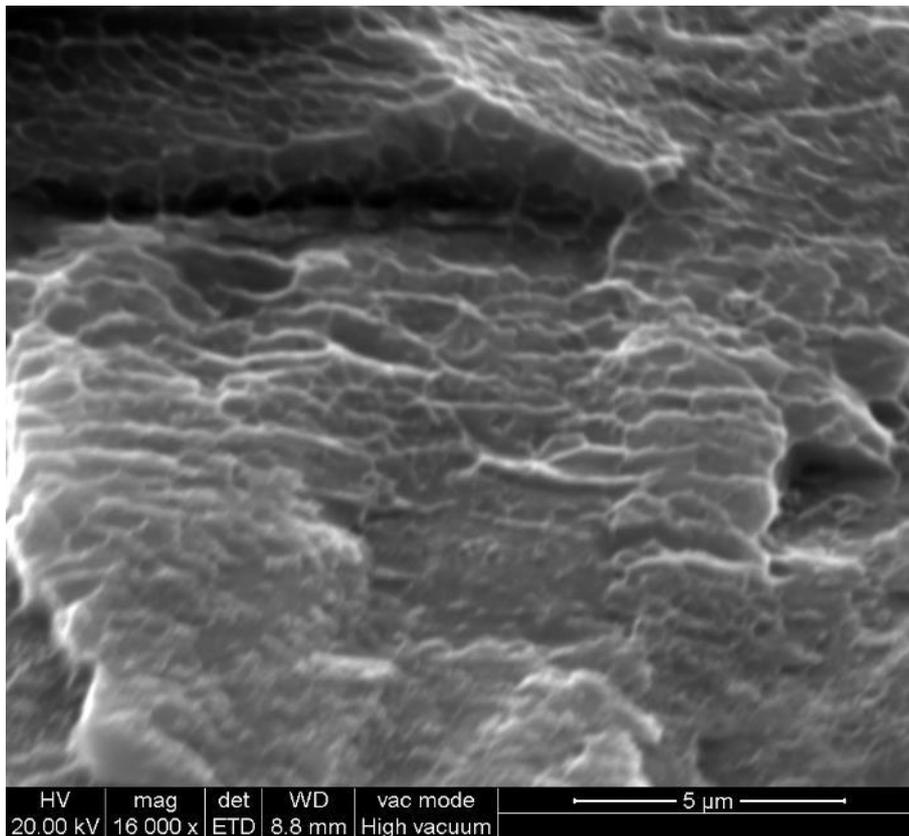


Figura 168: A livello dei subgrani, si vedono dei microvuoti, tutti adiacenti tra loro e allineati, che si sono uniti tra loro per formare una cricca.

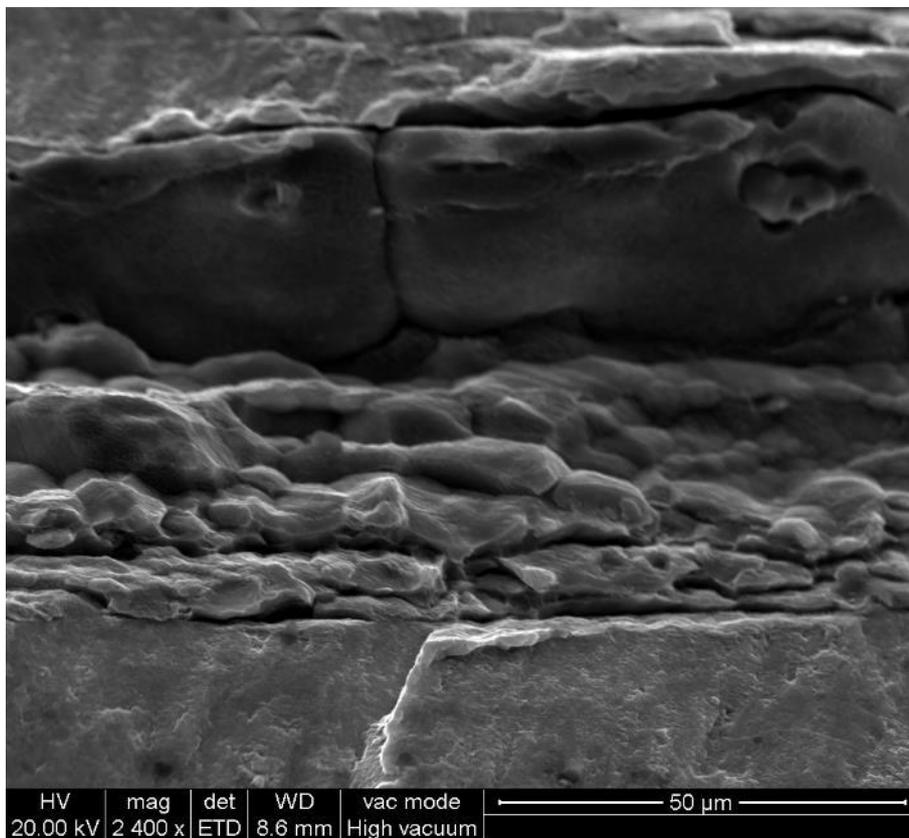
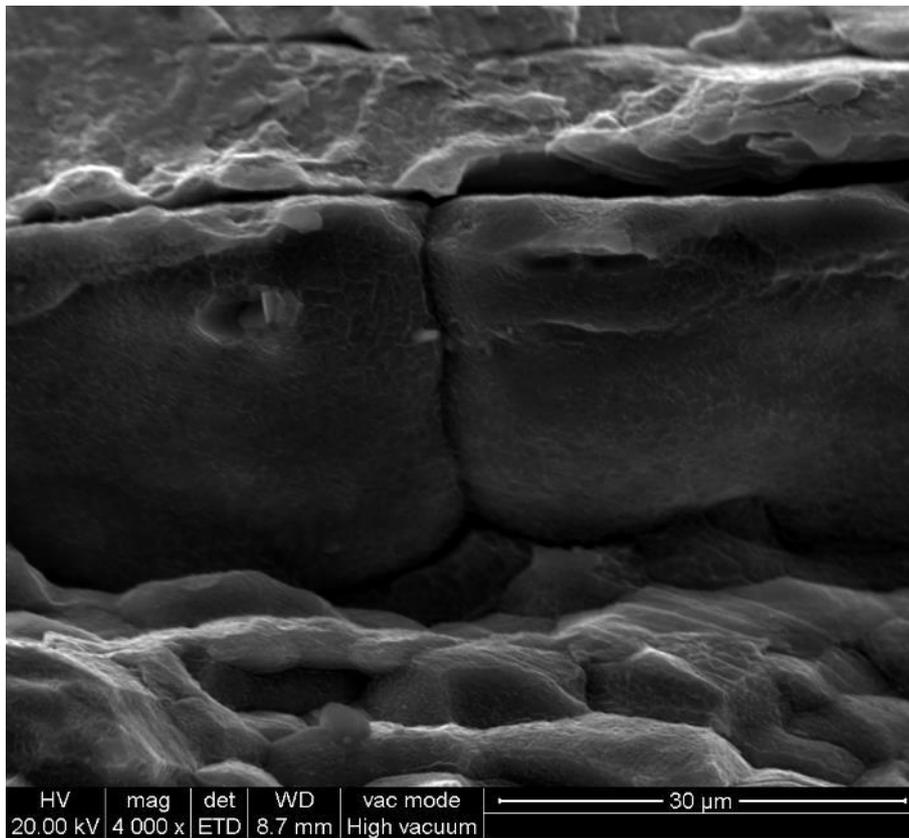
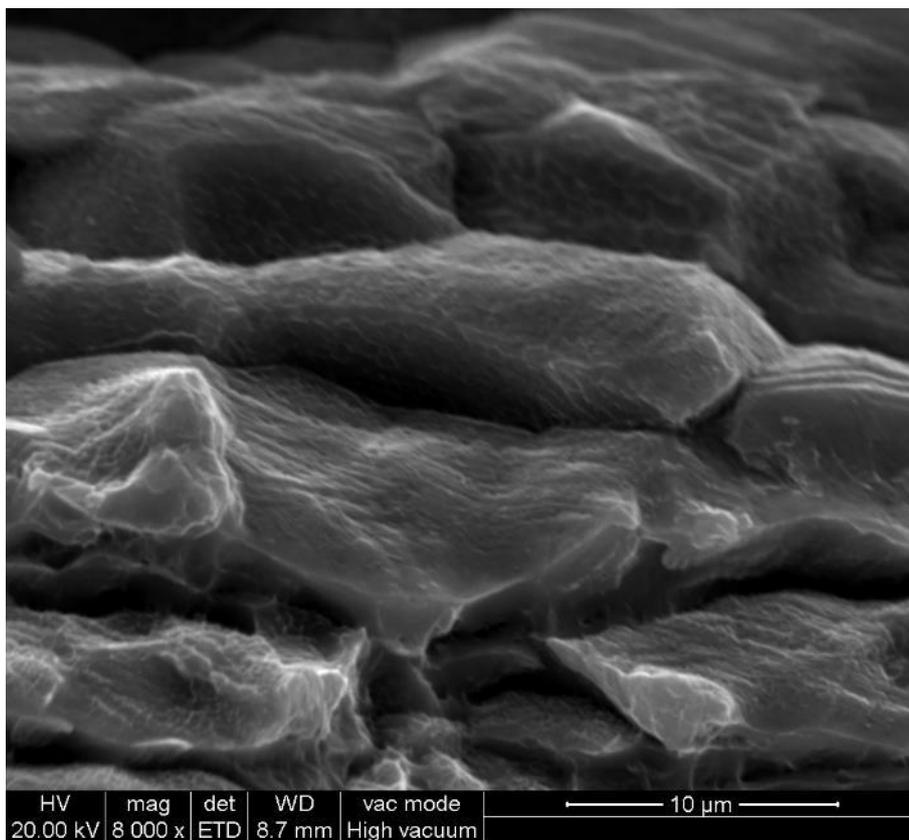


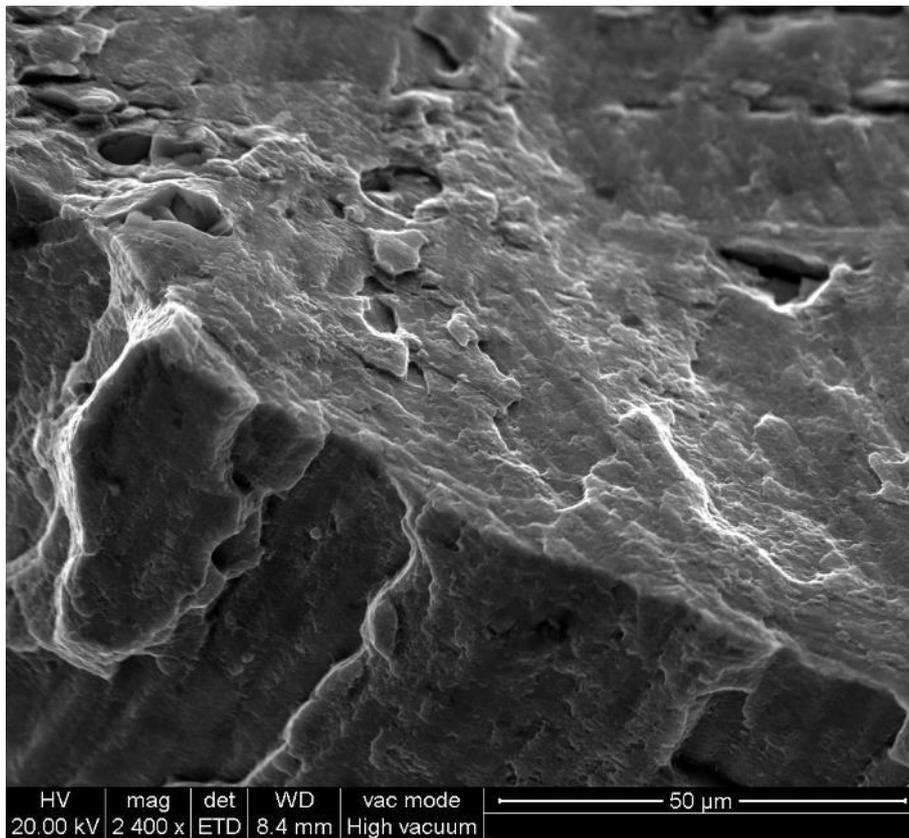
Figura 169: Zona mista caratterizzata da frattura intergranulare, nella parte inferiore delimitata dalle superfici lisce, superiormente con frattura intergranulare duttile. Si vedono ben delineati due subgrani adiacenti lungo il relativo bordo di grano.



*Figura 170: Dettaglio dei due sub-grani adiacenti lungo il bordo di grano.*



*Figura 171: Dettaglio delle linee di dislocazione emerse sulle superfici di frattura dei subgrani.*



*Figura 172: La linea di raccordo, che rappresenta nell'immagine la giunzione tra i due fronti, è la progressione del movimento di due differenti bande plastiche.*

## 12 Applicazione DIC al fenomeno di “Crack Closure” delle cricche di fatica

Visto il successo dell'applicazione della correlazione d'immagini digitali alle prove di trazione per studiare l'effetto PLC, si è provato ad applicarla al fenomeno di chiusura e apertura delle cricche di fatica su provini usati nelle prove di fatica, ricavati da acciaio C80 eutettoidico completamente perlitico usato per costruire le rotaie dei binari ferroviari. Si è voluto utilizzare questa tecnica per andare ad indagare più approfonditamente ciò che si verificava, in termini di apertura dei lembi della cricca.



Figura 173: Configurazione attrezzatura per prove DIC.

Successivamente al raggiungimento del  $\Delta K_{th}$ , si è deciso di sottoporre i provini a un ciclo di carico identico all'ultimo ciclo a cui era stati sottoposti, in modo da applicargli lo stesso  $\Delta K$ . Per analizzare il fenomeno di chiusura della cricca durante il ciclo di carico si è ricorsi a la tecnica della correlazione immagine digitale, misurando gli spostamenti relativi delle due facce della cricca durante il ciclo. Si è sottoposto alla prova un campione in flessione, come mostrato in Figura 173, che è sottoposto al ciclo di carico rappresentato in Figura 174. Il campione, denominato 342\_2 è stato assoggettato un ciclo di forza compresa fra -1,22kN e -2,44kN, quindi con un rapporto di carico  $R = 0,5$ , con una frequenza di 0,025 Hz. Qui di seguito è riportato il ciclo di carico del provino. I valori di forza sono in valore assoluto.

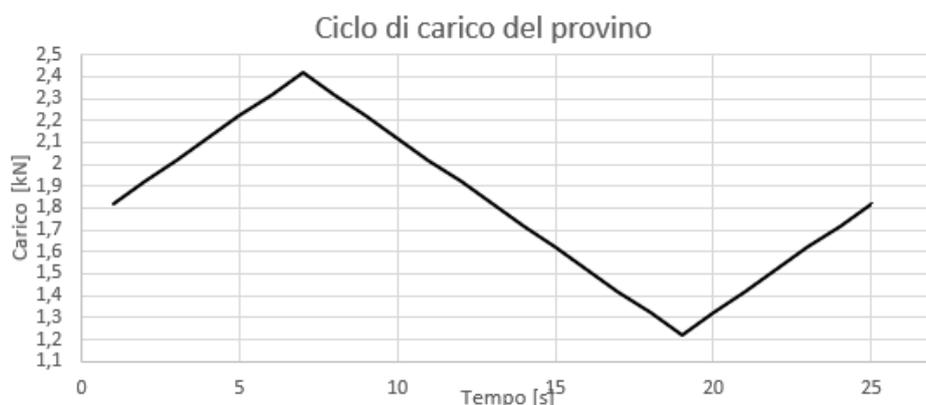


Figura 174: Ciclo di carico del provino.

Attendendosi la massima apertura della cricca al massimo carico, si è andata ad analizzare l'andamento di spostamenti lungo la linea di cricca in corrispondenza di questo. Lo step in cui il provino è soggetto al massimo carico in valore assoluto è il numero 84. Per tanto in questo step ci si aspetta il massimo valore di spostamenti. Nella Figura 175 è riportato il risultato della sperimentazione dopo il calcolo degli spostamenti. Nella Figura 176 è invece riportato un

diagramma cartesiano degli spostamenti relativi dei fianchi della cricca estratto dai files numerici relativi alle immagini colorate della Figura 175.

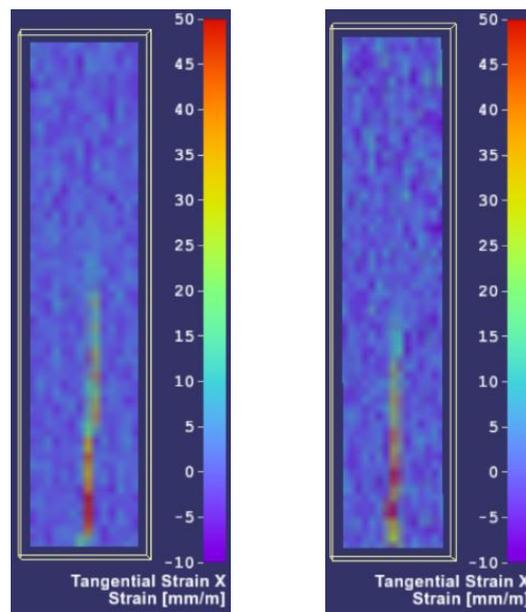


Figura 175: Da sinistra verso destra, le immagini ottenute tramite la correlazione d'immagini digitali rappresentanti il campo di deformazioni nella zona della cricca lato A e B del provino 342-2.

#### Titolo del grafico

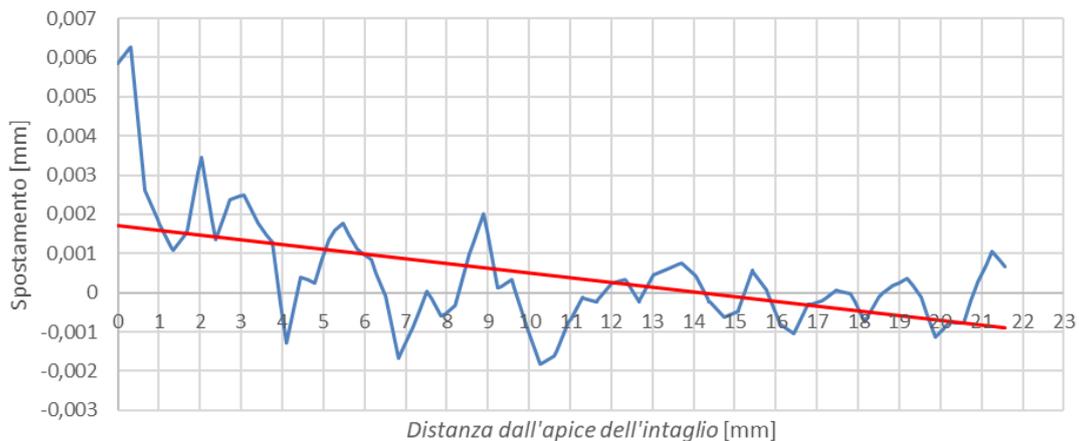
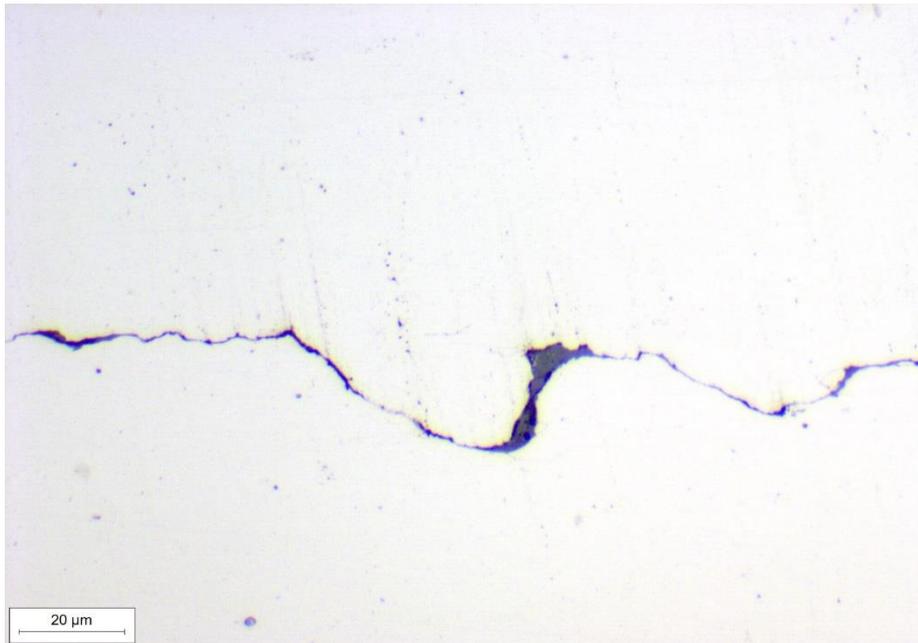


Figura 176: Andamento degli spostamenti relativi delle due facce della cricca rispetto alla distanza dall'apice dell'intaglio. Alla distanza 21,5 mm dall'apice dell'intaglio è sito l'apice della cricca.

Nonostante la linea di tendenza in rosso evidenzi una somiglianza con quanto teoricamente ci si aspetta di trovare, la linea in azzurro, che è la misura degli spostamenti effettivi, mette in risalto grandi oscillazioni, in parte dovute a un rumore del segnale, ma soprattutto dovuto ai fenomeni di chiusura che sono sicuramente presenti alla distanza dall'apice dell'intaglio (dove nasce la cricca) di 6,90 mm e di 10,50 mm. Una successiva analisi metallografica su un frammento del campione contenente la cricca esaminata ha mostrato che la fessura ha un percorso a zig-zag, Figura 177. Nella Figura 177 la cricca è mostrata chiusa, perchè la metallografia ha necessariamente richiesto il taglio del campione di flessione e ha quindi provocato lo scaricamento del materiale. Tuttavia, durante il carico del ciclo di fatica si verificano degli spostamenti sia perpendicolari ai fianchi della fessura, sia paralleli: questi implicano l'aggancio reciproco della dentellatura delle due superfici omologhe dei fianchi della cricca e perciò un

ancoraggio dei medesimi, cioè in alcuni punti la cricca rimane chiusa, nonostante le forze esterne di apertura applicate.

La presenza di questi fenomeni giustifica la congettura che il carico a cui si assoggetta il componente è inferiore a quello necessario per "scollarne" completamente le due facce. Ne segue una specie di sovrastima del  $\Delta K$  applicato alla cricca durante il ciclo di fatica. Con il grafico della Figura 176 si calcola lungo la lunghezza della cricca, dove la cricca va a chiudersi e a fare coesione lungo i bordi, in accordo con i risultati metallografici della Figura 177.



*Figura 177: Andamento della cricca di fatica nell'acciaio C80 per rotaie di binari ferroviari. In molti tratti l'angolo d'inclinazione fa sì che ci sia propagazione in modo misto I e II, con in certe zone movimenti paralleli alla direzione macroscopica di avanzamento della fessura. Ciò induce una specie d'incollamento delle due facce della cricca, che così non subisce più il ciclo nominale di carico remoto.*

## 13 Conclusioni

L'obiettivo che si è preposto questa attività di ricerca è stato quello di studiare l'effetto Portevin Le Chatelier e la relativa formazione e propagazione delle bande plastiche, che si formano durante i fenomeni di deformazione plastica nominalmente uniformi dei provini sottoposti ad una prova di trazione uniassiale, nella lega d'alluminio 8090-T851. Per quanto riguarda la parte sperimentale, sono state trazionate tre tipologie differenti di provini in una lunga fase di messa a punto degli apparati sperimentali, e i risultati migliori sono stati quelli ottenuti dalla terza serie di provini. Applicando la Correlazione d'Immagine Digitali alle prove di trazione è stato possibile valutare la localizzazione delle deformazioni lungo la superficie dei provini, osservando che la concentrazione delle deformazioni che si forma nelle bande plastiche di scorrimento, che al momento della rottura del provino può raggiungere valori molto più alti rispetto al valore di deformazione totale misurato dall'estensimetro.

Nonostante le due diverse tipologie di controlli utilizzati nelle prove di trazione, le velocità di deformazione imposte nelle diverse prove di trazione ai vari campioni erano sempre pari a  $0,0001 \text{ mm/mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le bande osservate sono state per lo più stazionarie e classificabili in bande di tipo B e C. In alcuni provini analizzati si è visto che alcune bande di tipo B che si sviluppano, successivamente si trasformano in bande di tipo C all'aumentare dell'intensità della deformazione, portando ad una localizzazione della deformazione e poi alla rottura del provino. Attraverso il metodo della correlazione d'immagini digitali è stato possibile individuare le zone in cui la deformazione andava a localizzarsi maggiormente nei provini. La classificazione delle tipologie di bande plastiche è stata fatta utilizzando congiuntamente le immagini e i filmati ottenuti dalla Correlazione d'Immagine Digitali e le curve dei grafici tensione-deformazione relativi alle prove di trazione. Le bande plastiche formatesi nei provini orientati trasversalmente alla direzione di laminazione, hanno presentato un'orientazione orizzontale, perpendicolare alla direzione di applicazione del carico, e coincidente con la direzione di laminazione della lastra. Invece le bande plastiche formatesi nei provini longitudinali, cioè prelevati parallelamente alla direzione di laminazione, hanno presentato un'orientazione più casuale e inclinata rispetto alla direzione di applicazione del carico di circa  $45^\circ - 60^\circ$ . Nella maggior parte dei campioni, è stato possibile stimare l'intensità massima di deformazione che ha portato a rottura il provino. In alcuni provini sono stati raggiunti delle deformazioni localizzate molto elevate, pari a due o tre volte la deformazione misurata dall'estensimetro. In questo modo è stato anche possibile capire quale tipo di banda porta a rottura il campione, nel tratto di superficie analizzato dal DIC.

Dopo l'analisi con la correlazione d'immagini digitali durante le prove di trazione, le superfici di frattura sono state analizzate al microscopio SEM, per osservare l'effetto Portevin-Le Chatelier da un altro punto di vista e per condurre uno studio sulla morfologia della microstruttura e per capire che tipologia di fenomeno di frattura si fosse verificato. Analizzando le superfici di frattura dopo la rottura del componente, si è visto che in tutti i campioni analizzati la rottura che si è verificata è stata di tipo cristallografico transgranulare, sia intergranulare duttile secondo due criteri principali. Complessivamente la frattura ha avuto un carattere misto fra il comportamento con frattura di taglio dei cristalli su piani di scorrimento dove si sono concentrate le dislocazioni, e il comportamento intergranulare duttile, che è caratterizzato dalla formazione di microvuoti e grosse fessure intergranulari secondarie, formatesi dalla rottura dei bordi di grano ad alto angolo. Il meccanismo di rottura dei grani, in entrambi i casi, ha la stessa origine duttile, solo che nel secondo caso i grani si sono separati gli uni dagli altri lungo il bordo di grano, dando luogo a rottura duttile intergranulare; invece nel primo caso c'è stata la rottura all'interno del grano, che si è diviso a metà, cioè una rottura duttile transgranulare di tipo cristallografico.

## 14 Bibliografia

- [1] University of South Carolina - “Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software” - Correlated Solutions Inc.
- [2] Dr Nick McCormick, Dr Jerry Lord National Physical Laboratory - “Digital Image Correlation” – *Materialstoday* volume 13, number 12 – pag. 52-54. – December 2010.
- [3] Bing Pan, Kai Li - “A fast digital image correlation method for deformation measurement” – Elsevier - *Optics and Lasers in Engineering* 49 – pag. 841–847 – 2011.
- [4] Satoru Yoneyama (2016) *Basic principle of digital image correlation for inplane displacement and strain measurement*, *Advanced Composite Materials*, 25:2, 105-123, DOI: 10.1080/09243046.2015.1129681
- [5] Zheng-Zong Tang, Jin Liang, Zhen-Zhong Xiao, Cheng Guo, Hao Hu - “Three-dimensional digital image correlation system for deformation measurement in experimental mechanics” - Xi’an Jiaotong University School of Mechanical Engineering Number 28 - *Optical Engineering* Vol. 49 pag 1-10 - October 2010
- [6] D. Lecompte, A. Smits, Sven Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, A.M. Habraken - “Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation” - *Optics and Lasers in Engineering* 44 pag. 1132–1145 - 2006
- [7] C.J. Tay, C. Quan \*, Y.H. Huang, Y. Fu - “Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera” - *Optics Communications* 251 (2005) pag. 23–36.
- [8] Antonio Gugliotta - “Slide Costruzione di Macchine V2.0”.
- [9] D.V. Lychagin, A.V.Filippov, O.S.Novitskaia, Y.I.Chumlyakov, E.A.Kolubaev, O.V. Sizova - “Friction-induced slip band relief of -Hadfield steel single crystal oriented for multiple slip deformation” – *Wear* 5-14 pag. 374-375 (2017)
- [10] H.Amokhtar, C.Fressengeas, K.Bouabdallah. - “On the effects of the Mg content on the critical strain for the jerky flow of Al–Mg alloys” – *Materials Science & Engineering A631* pag. 209–213 (2015)
- [11] M. Mehenni, H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas - “Spatiotemporal correlations in the Portevin-Le Chatelier band dynamics during the type B - type C transition” - *Materials Science & Engineering A* 756 pag. 313–318 (2019).
- [12] Tero Makinen - “Portevin-Le Chatelier effect in an aluminum alloy” - Aalto University School of Science Degree Programme in Engineering Physics and Mathematics (2016).
- [13] R. Doglione, P. Haghi Ashtiani, C. Berdin. - “Rolling Effect on Serrated Flow in an Al-Li-Cu-Mg Alloy Plate” – *ASTM* doi:10.1520/MPC20140046, Vol. 4, No. 1, pag. 72-86 (2015).
- [14] N. Prasad, A. Gokhale, R.J.H Wanhill. - “Aluminum-Lithium Alloys – Processing, Properties and applications” – Elsevier (2014).
- [15] R. Doglione - “Le leghe Alluminio-Litio” – *La metallurgia italiana* pag. 39-50 (2005).
- [16] S. Spriano, R. Doglione, M. Baricco - “Texture, hardening and mechanical anisotropy in AA. 8090-T851 plate” – Elsevier - *Materials Science and Engineering A257* pag. 134-138 (1998).

[17] Li Gao, Yohei Harada, Shinji Kumai - "Analysis of microstructure evolution and precise solid fraction evaluation of A356 aluminum alloy during partial re-melting by a color etching method" - Springer Science + Business Media, *J Mater Sci* 47 pag. 6553–6564 (2012).

[18] Li Gao, Yohei Harada, Shinji Kumai - "Microstructural characterization of aluminum alloys using Weck's reagent, part I: Applications" – Elsevier - *Materials Characterization* 107 pag. 426–433 (2015).

[19] M. Mohammadtaheri - "A New Metallographic Technique for Revealing Grain Boundaries in Aluminum Alloys" - *Metallogr. Microstruct. Anal.* 1, pag. 224–226 (2012).