

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in ingegneria meccanica



Tesi di laurea magistrale

Analisi dell'effetto Portevin-Le Chatelier mediante
correlazione d'immagine in un acciaio ad alto manganese

Relatore:

Prof. Paolo Matteis

Candidato:

Giuseppe Mosca

Matricola: s265487

Anno accademico 2020/21

Sommario

1. Scopo dell'attività di ricerca.....	5
2. Tecnica di Correlazione di Immagini Digitali(DIC)	6
2.1 Introduzione.....	6
2.2 DIC 2D	7
2.3 Principi base di funzionamento	8
2.3.1 Corrispondenza tra subset prima e dopo la deformazione.....	10
2.3.2 Funzioni di forma	11
2.3.3 Interpolazione sub-pixel	12
2.3.4 Criteri di correlazione e misurazione del campo di spostamenti.....	15
2.3.5 Stima delle deformazioni.....	18
2.4 Configurazione e setup del sistema	19
2.5 Il pattern.....	22
3. Prove preliminari su provini di acciaio DP600.....	24
3.1 Calcolo degli spostamenti e delle deformazioni su GOM Correlate	25
3.2 Confronto dei dati e valutazione degli scostamenti e degli errori	27
3.3 Prova di trazione DP600/1.....	29
3.4 Prova di trazione DP600/2.....	30
3.5 Prova di trazione DP600/3.....	32
3.6 Prova di trazione DP600/4.....	33
3.7 Prova di trazione DP600/5.....	35
3.8 Conclusioni.....	36
4. Effetto Portevin Le Chatelier.....	38
4.1 Introduzione.....	38
4.2 Parametri di influenza.....	39
4.3 Effetto PLC.....	40
4.4 Tipologia di bande di deformazione plastica localizzata.....	40
4.5 Caratteristiche delle bande.....	43
5. Acciai TWIP	46
5.1 Composizione chimica	46
5.2 Meccanismi di deformazione plastica	47
5.3 Geminazione.....	48
5.4 DSA ed effetto PLC.....	48
5.5 Incrudimento e tensione di snervamento	49
6. Prove di trazione su provini di acciaio TWIP.....	51

6.1 Prove alla velocità di 0.004 mm/s	53
6.2 Prove alla velocità di 0.04 mm/s	62
6.3 Prove alla velocità di 0.4 mm/s	71
6.4 Prove alla velocità di 4 mm/s	81
6.5 Confronto con acciaio TWIP diverso	91
6.6 Analisi della velocità di propagazione delle bande PLC	93
7. Conclusioni.....	98

1. Scopo dell'attività di ricerca

L'obiettivo che si propone l'attività di ricerca trattata in questa tesi è quello di effettuare un'analisi delle deformazioni e del comportamento plastico di provini di acciaio TWIP sottoposti a prove di trazione uniassiali, tramite la tecnica ottica di Correlazione d'Immagini Digitali (DIC). Gli acciai TWIP (TWinning Induced Plasticity), ad alto contenuto di manganese, se sottoposti a trazione, raggiungono una resistenza e un allungamento molto elevati e presentano inoltre, in un certo intervallo di temperature e velocità di deformazione, dei picchi di sollecitazione ben riconoscibili nelle curve di trazione che corrispondono alla formazione di bande di deformazione plastica localizzata che viaggiano lungo l'asse di trazione. Questo fenomeno è riconducibile all'effetto Portevin Le Chatelier (PLC) ed è dovuto ad un meccanismo di interazione dinamica tra atomi di soluto e dislocazioni mobili noto come invecchiamento 'Dynamic strain aging' (DSA). Per effettuare la correlazione delle immagini digitali viene sviluppato in laboratorio un sistema molto semplice di acquisizione dati regolabile e montato direttamente sulla macchina di trazione. Il sistema è composto da una fotocamera apposita, da un anello di luce bianca posto intorno all'obiettivo e da alcuni supporti meccanici che permettono la regolazione e il collegamento con la macchina di trazione. Con questo sistema vengono acquisite, durante la prova di trazione, le immagini relative alla superficie di interesse del provino, la quale viene opportunamente verniciata con un pattern bianco e nero di tipo casuale indispensabile per il calcolo di correlazione che viene effettuato tramite il software GOM Correlate. Precedentemente allo studio sui provini di acciaio TWIP vengono effettuate delle prove di trazione uniassiali su provini di acciaio DP600 per testare il sistema DIC e valutare la bontà delle misurazioni effettuate, confrontandole con le misure raccolte tramite un estensimetro a clip.

2. Tecnica di Correlazione di Immagini Digitali(DIC)

2.1 Introduzione

La tecnica di correlazione di immagini o DIC (digital image correlation) è una tecnica di misura ottica che utilizza l'elaborazione di immagini digitali per misurare spostamenti e deformazioni della superficie di un oggetto. Tale tecnica è stata sviluppata presso l'Università della Carolina del Sud negli anni 80, è stata poi migliorata da numerose ricerche che hanno reso tale tecnica sempre più efficiente e meno invasiva. La DIC viene utilizzata per misurare campi di spostamento e deformazioni che si sviluppano sulla superficie dell'oggetto in esame, il quale, con questa tecnica, non subisce alterazioni nelle sue caratteristiche fisiche e chimiche in quanto l'acquisizione dei dati da elaborare viene fatta mediante una videocamera che non interagisce con l'oggetto. La tecnica si divide in due branche principali che sono rispettivamente:

La DIC 2D per le misurazioni di spostamenti e deformazioni di superfici piane, è richiesta quindi l'acquisizione di immagini bidimensionali e quindi l'utilizzo di una sola videocamera.

La DIC 3D per le misurazioni di spostamenti e deformazioni di superfici non piane, per raccogliere dati in forma tridimensionale è necessario l'utilizzo di due videocamere opportunamente posizionate.

La tecnica di correlazione di immagini non richiede un sistema ottico complicato e quindi è ampiamente utilizzata in moltissimi settori di ricerca e di lavoro, ad esempio in campo ingegneristico viene utilizzata per la misurazione dei campi di spostamento di oggetti sommersi, nelle misurazioni a temperature elevate, nelle misurazioni di piccole aree attraverso un microscopio, nelle misurazioni dinamiche necessarie a studiare il comportamento a fatica, per misurare l'avanzamento delle cricche e nelle misurazioni su infrastrutture come ponti stradali e ferroviari [3]. In ambito industriale viene utilizzata la DIC nei sistemi di controllo del processo ed altre applicazioni. Recentemente la ricerca sulla tecnica di correlazione delle immagini digitali si è concentrata sullo studio di algoritmi intenti ad alleggerire il calcolo, diminuire l'errore della misurazione e ad aumentare le prestazioni della tecnica in presenza di discontinuità, sono state sviluppate anche altre tecniche come la correlazione di volume digitale per misurare lo spostamento all'interno di un corpo tridimensionale da immagini tridimensionali ottenute utilizzando la tomografia a raggi X, è stata anche proposta anche una tecnica che utilizza una mesh ad elementi finiti detta correlazione di immagini digitali 'globale' che si differenzia da quella tradizionale denominata 'locale'[3].

La configurazione del sistema per effettuare l'acquisizione dati per l'utilizzo della DIC è concettualmente molto semplice ma è necessaria la definizione e la regolazione di alcuni parametri che possono influire sulla qualità della misurazione. La DIC calcola gli spostamenti operando sul livello di grigio definito nelle varie zone della superficie, sono quindi fondamentali una giusta illuminazione, una buona risoluzione ed un modello stocastico che permetta di distinguere al meglio i livelli di grigio e una buona stabilità generale del sistema.

Ci sono tecniche di misura più precise della DIC come l'utilizzo di un estensimetro o metodi di interferometria ottica che però richiedono costi maggiori e attrezzature specifiche difficili da utilizzare al di fuori del laboratorio. In tale senso la tecnica di correlazione di immagini digitali offre una serie di vantaggi quali:

- 1) Una semplice configurazione del sistema (telecamera CCD fissa) e una preparazione minima della superficie del campione che può essere eseguita semplicemente spruzzando vernici sul provino.
- 2) Bassi requisiti per l'ambiente di misurazione, basta una sorgente di luce bianca o luce naturale che rendono la tecnica utilizzabile sia in laboratorio che sul campo.
- 3) Un'ampia gamma di sensibilità e risoluzione di misurazione, il metodo DIC può essere utilizzato per elaborare immagini digitali catturate da un qualsiasi dispositivo apposito, quindi si entra anche nel settore della microscopia andando a lavorare su deformazioni molto piccole da micro a nanoscala. Si possono inoltre studiare fenomeni di deformazione istantanea andando ad utilizzare videocamere apposite ad elevato numero di fps.

2.2 DIC 2D

Qui e nei punti in seguito ci si sofferma sulla tecnica di correlazione di immagini digitali 2D, la quale è stata specificatamente utilizzata in laboratorio per l'attività di tesi. Rispetto alla tecnica 3D che richiede l'utilizzo di due camere per ottenere gli spostamenti in tutte e tre le direzioni spaziali, la tecnica bidimensionale è più semplice come configurazione in quanto richiede l'utilizzo di un singolo sensore fotografico per la cattura delle immagini.

L'implementazione del metodo DIC 2D in generale comprende tre passaggi consecutivi: (1) preparazione dei campioni soggetti a sperimentazione, (2) registrazione di immagini digitali della superficie planare del campione prima e dopo il caricamento della deformazione, (3) elaborazione delle immagini digitali utilizzando un programma apposito che contenga un algoritmo specifico di digital image correlation. Ognuno dei seguenti passi richiede particolari accortezze che verranno esposte nei punti successivi ma in generale è fondamentale comprendere che le immagini catturate sono la proiezione 2D della superficie del campione, quindi bisogna far sì che lo spostamento stimato di ciascun pixel moltiplicato per l'ingrandimento del sistema di acquisizione delle immagini (mm/pixels) fornisca lo spostamento del punto fisico effettivo sulla superficie del campione, in tal senso bisogna avere una superficie del campione piatta e parallela al sensore visivo, il quale durante il caricamento deve mantenersi ad una distanza costante poiché dalle immagini acquisite non si può ricavare il parametro della scala che viene poi aggiunto manualmente prima del calcolo effettivo. È necessario inoltre far in modo che non ci siano spostamenti del campione fuori dal piano che porta ad un cambiamento dell'ingrandimento delle immagini registrate producendo quindi spostamenti apparenti, questi spostamenti possono nascere anche da distorsioni geometriche figlie di ottiche non propriamente adatte e dalla distanza dalla superficie in esame. per risolvere questo problema è

consigliato l'utilizzo di obiettivi telecentrici o il posizionamento del sensore di cattura ad una distanza maggiore in modo da approssimare un sistema telecentrico, il quale permette di eliminare alterazioni del fattore di ingrandimento dovute a scostamenti dell'oggetto, distorsione dell'immagine ed errori prospettici, e a migliorare la risoluzione.

Per ricavare gli spostamenti, la tecnica DIC 2D confronta una sequenza di immagini con un'immagine di riferimento che rappresenta la condizione non deformata della superficie in esame. È fondamentale quindi avere sulla superficie del campione un pattern casuale che presenti nei vari blocchi di pixels range di contrasto e di intensità unici tra loro per ottimizzare ed evitare zone estromesse dal calcolo e per evitare errori di misurazione. Solitamente per ovviare a tale problema si imprime un pattern stocastico detto "speckle pattern" sulla superficie del campione attraverso la verniciatura con bombolette spray. Nei paragrafi successivi verranno esposti nel dettaglio i principi di funzionamento della DIC 2D e come è stato configurato il sistema in laboratorio.

2.3 Principi base di funzionamento

La DIC 2D come tecnica di calcolo degli spostamenti e delle deformazioni viene svolta successivamente all'acquisizione delle immagini digitali, la quale come descritto in precedenza necessita di regole che vanno a minimizzare tutti quei fattori che possono generare errori nel calcolo o creare spostamenti apparenti che possono falsare il risultato o rendere difficile il successivo calcolo delle deformazioni. Le immagini raccolte possono essere ad esempio quelle di un provino metallico sottoposto ad una prova di trazione al quale come detto prima è stato impresso un motivo casuale sulla superficie. Vengono quindi raccolte una serie di immagini della superficie dell'oggetto in esame prima e dopo la deformazione, l'immagine prima della deformazione viene detta immagine di riferimento mentre tutte le immagini successive che riguardano la deformazione sono dette immagini deformate. Il lavoro che viene svolto dalla tecnica sarà quello di trovare una correlazione tra queste immagini andando a cercare la posizione di un sottoinsieme dell'immagine di riferimento, denominato "subset", nell'immagine deformata agendo sulla corrispondenza di livelli di grigio univoci tra le due immagini. Questo principio di funzionamento si basa naturalmente sul presupposto che le caratteristiche della superficie dell'oggetto, dal punto di vista del modello casuale impresso, seguano fedelmente gli spostamenti della superficie fisica vera e propria fino alla fine della deformazione.

Entrando più nello specifico nella tecnica, una volta che sono state raccolte le immagini, viene specificata nell'immagine di riferimento l'area di calcolo o regione di interesse ROI (figura 1a). L'area di calcolo viene successivamente suddivisa in sotto regioni tramite una griglia virtuale arbitraria nella quale i punti di intersezione corrispondono ai punti nei quali viene calcolato lo spostamento nelle immagini deformate (figura 1b).

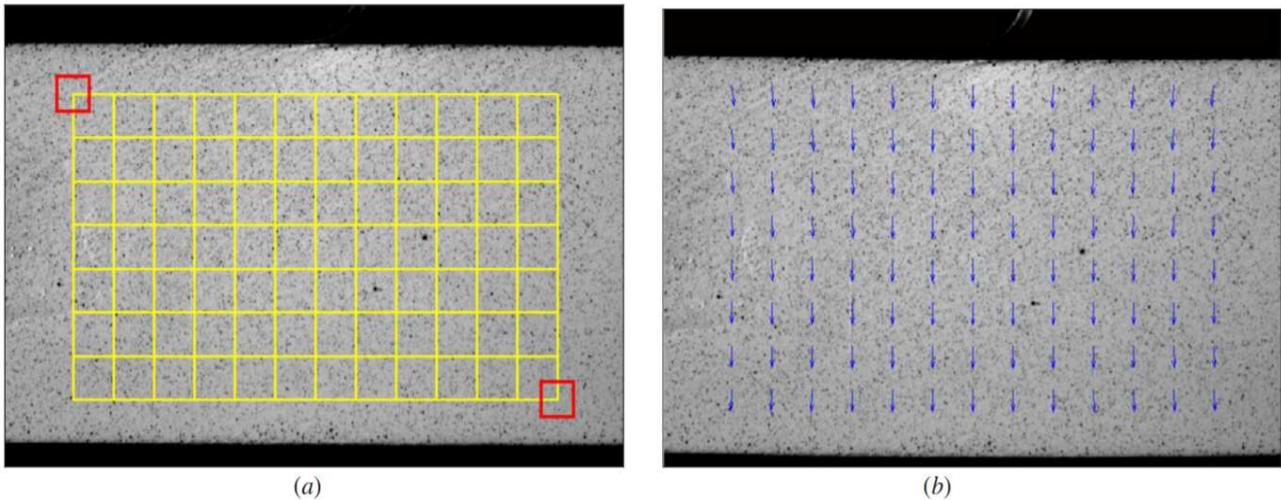


Figura 1: a) il ROI è rappresentato dal rettangolo giallo ed è suddiviso tramite una griglia, nei punti di intersezioni viene effettuato il calcolo dei vettori spostamento (b), tramite la correlazione dei subset, rappresentati in figura dai quadrati rossi [2].

Si può immediatamente comprendere che per correlare diversi punti dall'immagine di riferimento a quella deformata non si può agire sul livello di grigio del singolo pixel, questo perché tale livello di grigio non sarà mai univoco e può ripetersi in diversi punti dell'immagine, inoltre anche la deformazione stessa, ad esempio una dilatazione della superficie, può alterare il livello di grigio del singolo pixel. La correlazione dei punti di interesse necessita dunque di più informazioni per essere effettuata. In tal senso la ROI viene suddivisa in piccoli quadrati i cui centri sono posizionati nei punti di interesse precedentemente ricavati dalla griglia virtuale, queste aree sono comunemente dette "subset", sono caratterizzate da un maggior numero di pixels e quindi di informazioni, con le quali è possibile trovare l'effettiva correlazione tra le zone nelle diverse immagini e trovare quindi lo spostamento del punto di interesse che corrisponde per costruzione al punto centrale del subset (figura 2).

Si sottolinea l'importanza di applicare sulla superficie del provino in esame un modello dal carattere il più aleatorio possibile e non periodico proprio per avere dei subset con caratteristiche univoche, altrimenti le configurazioni possibili potrebbero essere molteplici generando indeterminatezza nella correlazione.

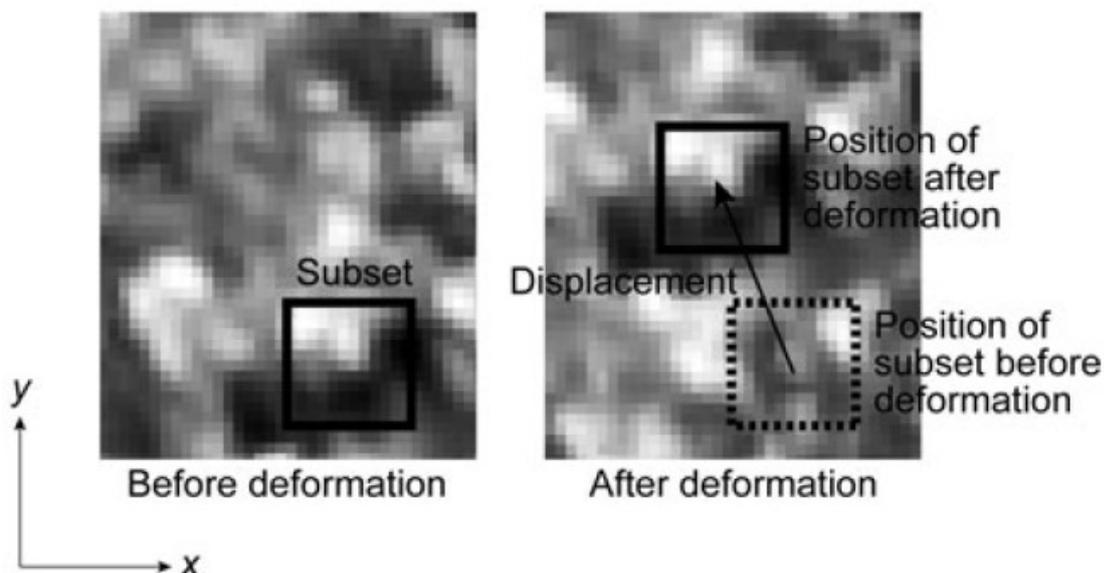


Figura 2 principio base della Digital image correlation [1].

2.3.1 Corrispondenza tra subset prima e dopo la deformazione

L'algoritmo della correlazione di immagini digitali 2D lavora prendendo in considerazione i subset, i quali sono rappresentati, nell'immagine di riferimento, come un'area quadrata di lato $2M+1$ pixel e centro $P(x_0, y_0)$ la cui rispettiva posizione nell'immagine deformata designerà il vettore spostamento corrispondente.

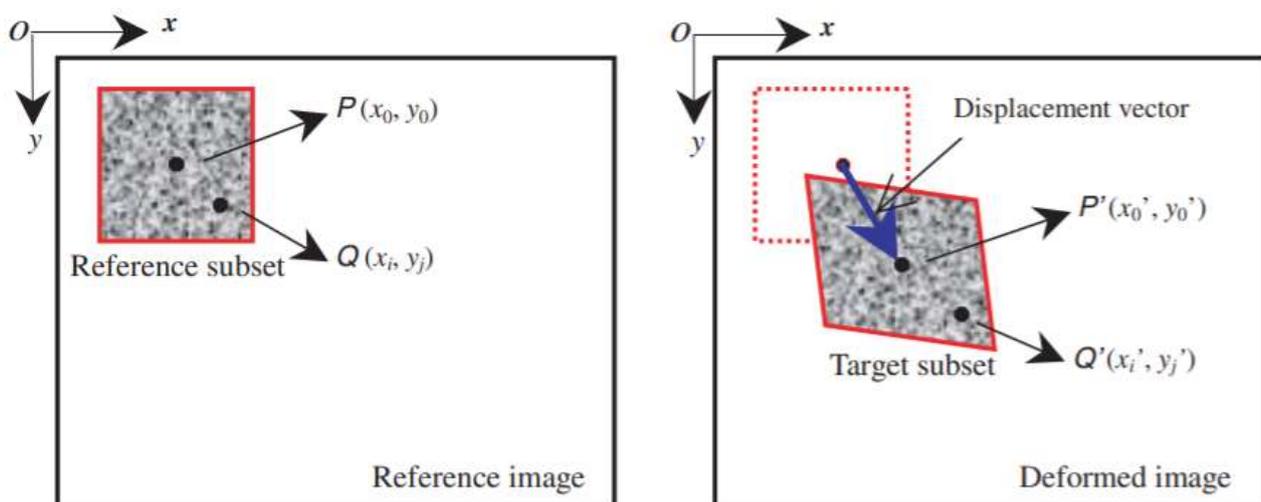


Figura 3 rappresentazione schematica del subset prima della deformazione, nella condizione di "riferimento" e dopo la deformazione, nella condizione "deformata"[2].

Per valutare il grado di somiglianza tra il subset di riferimento e il subset deformato bisogna predefinire in generale un criterio di correlazione, si può scegliere o un criterio di cross-Correlation (CC) o di sum-squared difference (SSD) correlation; il primo corrisponde alla ricerca del massimo della funzione di correlazione e il secondo alla minimizzazione della funzione di errore di

correlazione, tali criteri verranno approfonditi in seguito. Una volta trovato il valore ricercato di correlazione risulta determinata la posizione del subset elaborato nell'immagine deformata, da cui si determina di conseguenza la posizione del centro del subset $P'(x_0', y_0')$ che confrontata alla posizione di riferimento conduce all'identificazione del vettore spostamento, come illustrato in figura 3.

Si può presumere che la forma del subset di riferimento cambi durante la deformazione, altrimenti si potrebbero valutare solo spostamenti rigidi, tale cambiamento di forma è attribuibile alla deformazione che subisce la superficie dell'oggetto in esame, per riuscire a valutare ogni generico campo di deformazione si introducono le "funzioni di forma" che deformano virtualmente il subset di riferimento in modo da riuscire a trovare il valore di corrispondenza massimo.

2.3.2 Funzioni di forma

Il compito delle funzioni di forma è quello di trasformare le coordinate dei pixels appartenenti ai subset dell'immagine di riferimento in modo tale che tali subset possano essere rappresentati a seguito di una generica deformazione della superficie. In generale si avrà:

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_i) \quad (i, j = -M: M) \quad (1)$$

$$y'_i = y_i + \eta(x_i, y_i)$$

Nella (1) x_i e y_i sono le coordinate dei pixels nel subset di riferimento e x'_i e y'_i sono le coordinate dei pixels che rappresentano lo stesso subset nell'immagine deformata, il cambiamento di coordinate viene gestito dalle funzioni di forma $\xi(x_i, y_i)$ e $\eta(x_i, y_i)$ che possono essere di diverso grado a seconda della deformazione che si vuole rappresentare.

$$\xi_0(x_i, y_i) = u \quad (2)$$

$$\eta_0(x_i, y_i) = v$$

Ad esempio, la (2) è una funzione di forma di ordine 0 che può rappresentare solamente spostamenti rigidi nel piano u e v . si passa quindi all'utilizzo di funzioni più complesse come quelle di primo ordine (3) e di secondo ordine (4) le quali permettono di approssimare deformazioni più complesse caratterizzate da spostamenti quadratici.

$$\xi_1(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (3)$$

$$\eta_1(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y$$

$$\xi_2(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \quad (4)$$

$$\eta_2(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y$$

Dove $\Delta x = x_i - x_0$, $\Delta y = y_i - y_0$, u e v sono gli spostamenti lungo le direzioni x e y riferite alla posizione del centro del subset di riferimento $P(x_0, y_0)$; u_x, u_y, v_x, v_y sono i gradienti di spostamento del primo ordine e $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$ quelli del secondo ordine.

Una funzione di forma di grado elevato è sicuramente in grado di riprodurre con estrema fedeltà deformazioni virtuali sempre più complesse e varie che quindi si potranno adattare al meglio alla

configurazione del subset deformato, tale precisione però rende il problema estremamente complesso, è quindi necessario un compromesso. Si è dimostrato che un'approssimazione sufficiente risulta raggiungibile con l'utilizzo di funzioni di forma di secondo ordine e subset di dimensioni adeguatamente piccole. Questo è il compromesso utilizzato nella maggior parte dei programmi che implementano algoritmi DIC 2D [2].

2.3.3 Interpolazione sub-pixel

Per via della natura discreta dell'immagine digitale è possibile calcolare con facilità solamente spostamenti con precisione di 1 pixel o multipli. Molto spesso, però, gli spostamenti non coincidono con i pixel interi e quando un subset si deforma i punti che caratterizzavano i pixels del subset di riferimento si troveranno nella condizione deformata in una posizione identificabile solamente con una precisione del subpixel. Per ottenere tale precisione è necessario implementare nell'algoritmo DIC 2D una fase di interpolazione dei livelli di grigio su tutto il dominio del subset in modo tale che i livelli di grigio non siano discretizzati ma rappresentati da una funzione continua la quale permette di applicare l'operazione di correlazione in posizioni non intere e quindi con una precisione del subpixel.

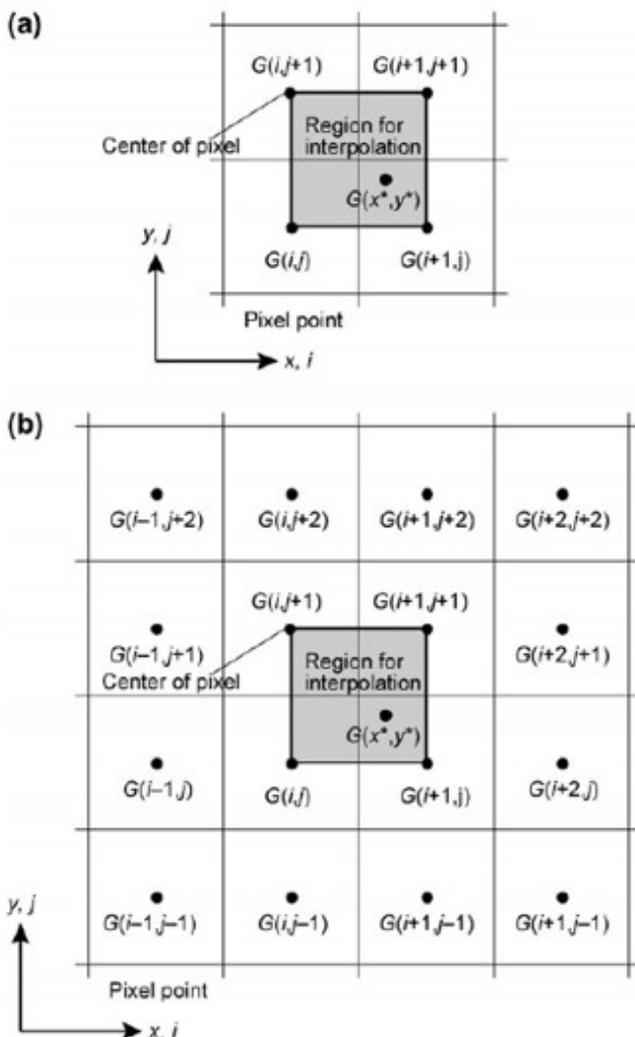


Figura 4 posizione dei pixel e regione di interpolazione: (a) bilineare, (b) bicubica [1].

Le funzioni più utilizzate per l'interpolazione dei livelli di grigio sono funzioni bilineari o funzioni bicubiche. Come viene mostrato in figura 4 ad ogni quadratino corrisponde un pixel, il cui livello di grigio rappresenta il valore medio della distribuzione dell'intensità di luce sull'area, poiché è impossibile conoscere la distribuzione spaziale di tale intensità e il valore viene considerato al centro del pixel. Quando viene utilizzata l'interpolazione bilineare invece, il livello di grigio in una posizione tra pixel interi può essere espresso come mostrato di seguito, dove $x' = x^* - i$ e $y' = y^* - j$

$$G(x^*, y^*) = a_{11}x'y' + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{00} \quad (5)$$

$$a_{11} + a_{10} + a_{01} + a_{00} = G(1 + i, j + 1)$$

$$a_{10} + a_{00} = G(1 + i, j)$$

$$a_{01} + a_{00} = G(i, j + 1)$$

$$a_{00} = G(i, j)$$

Per un'interpolazione migliore si utilizza invece una funzione bicubica (3b) che sfrutta a tale scopo i 16 pixels adiacenti, e la cui equazione sarà:

$$\begin{aligned} G(x^*, y^*) &= b_{33}x'^3y'^3 + b_{32}x'^3y'^2 + b_{31}x'^3y' + b_{30}x'^3 + b_{23}x'^2y'^3 + b_{22}x'^2y'^2 + b_{21}x'^2y' + b_{20}x'^3 \\ &+ b_{13}x'y'^3 + b_{12}x'y'^2 + b_{11}x'y' + b_{10}x' + b_{03}y'^3 + b_{02}y'^2 + b_{01}y' + b_{00} \\ &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 b_{ij}x'^i y'^j \end{aligned} \quad (6)$$

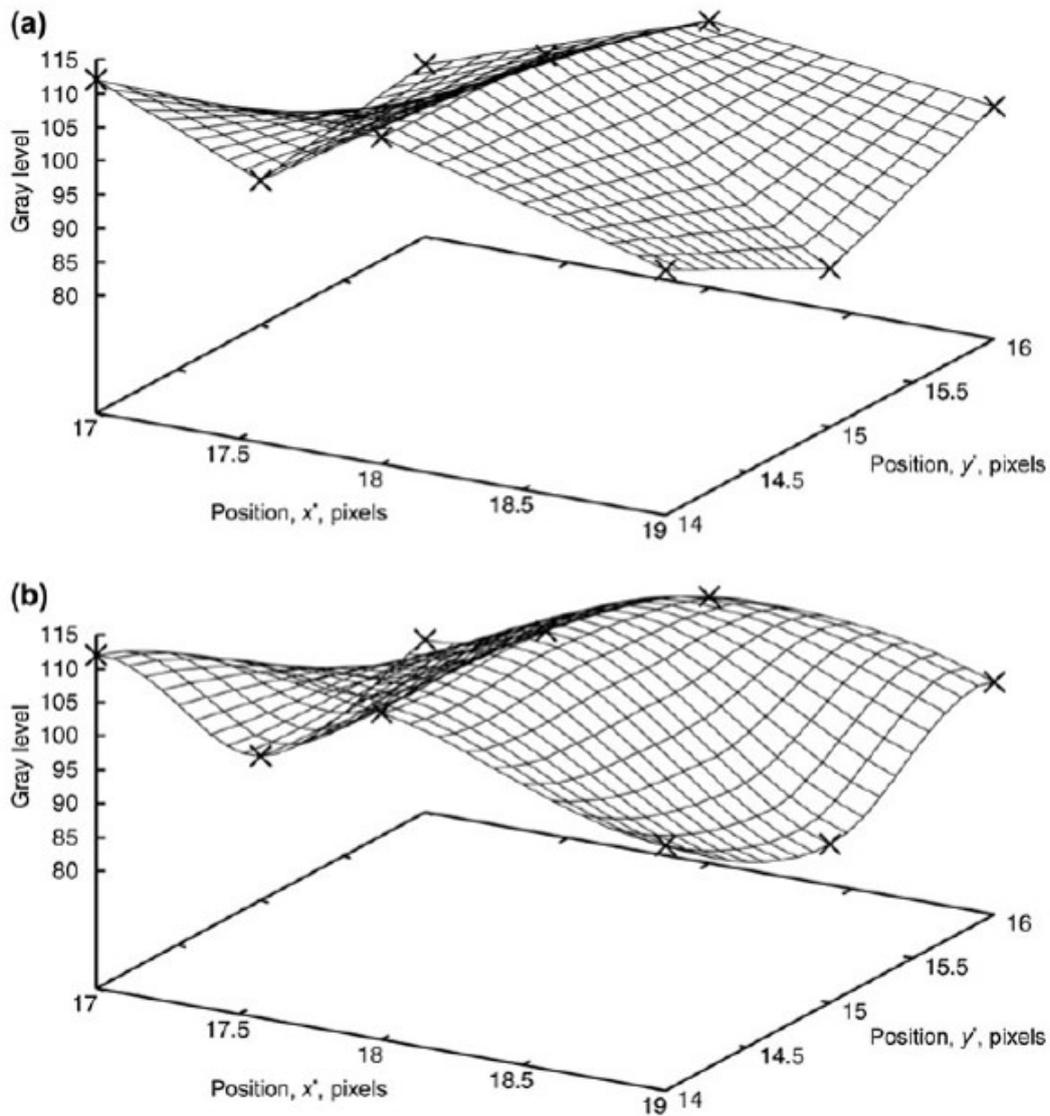


Figura 5 interpolazione dei livelli di grigio: (a) bilineare, (b) bicubica [1].

Nella figura 5 viene mostrata la distribuzione del livello di grigio dopo l'interpolazione di una regione 2×3 pixel, dove le superfici a reticolo mostrano i valori di grigio interpolati. Nella pratica, viene utilizzata come minimo un'interpolazione bicubica poiché quella bilineare, anche se molto più leggera dal punto di vista dello sforzo computazionale, non è necessariamente regolare. Inoltre, a prescindere dal livello di interpolazione adottato, il livello di grigio nel subpixel rimane una stima e non coinciderà mai con la realtà: nascerà dunque un errore sistematico che dipenderà anche dalla qualità del pattern casuale e dell'immagine. Tale errore si presenta come una sinusoide e per un'interpolazione bicubica è dell'ordine di 0,01 pixel (figura 6). Per ottenere poi interpolazioni ancora più efficaci della bicubica si utilizzano funzioni Spline bicubiche o biquintiche [1].

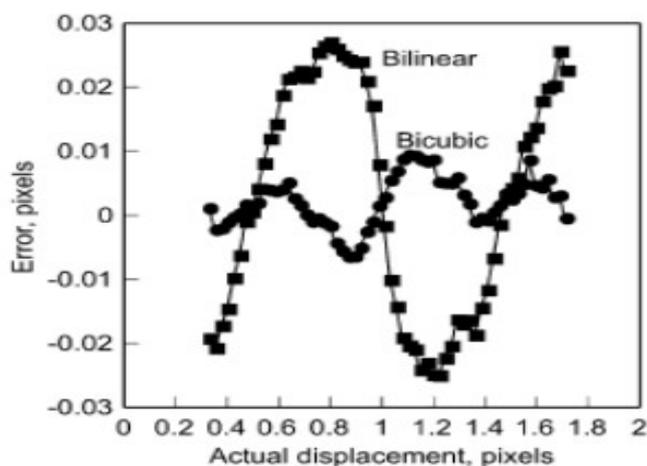


Figura 6: errore sistematico causate dall'interpolazione dei livelli di grigio [1].

2.3.4 Criteri di correlazione e misurazione del campo di spostamenti

Solo dopo aver effettuato la fase di interpolazione è possibile procedere con le operazioni di correlazione tra i subset. Per fare ciò vengono adoperati dei criteri di correlazione, negli algoritmi DIC i criteri utilizzabili possono essere molteplici, i più comuni si dividono in due famiglie principali: i criteri di cross-correlazione (CC) e i criteri basati sulla somma delle differenze dei quadrati (SSD). Tali criteri verranno analizzati nel paragrafo dal punto di vista prestazionale e non da quello puramente matematico. In generale è comunque importante capire che i criteri CC e SSD sono strettamente collegati fra loro e possono essere derivati gli uni dagli altri.

CC correlation criterion	Definition
Cross-correlation (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)]$
Normalized cross-correlation (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}\bar{g}} \right]$
Zero-normalized cross-correlation (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

Tabella 1: Criteri di cross-correlation (CC) più utilizzati [2].

SSD correlation criterion	Definition
Sum of squared differences (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Normalized sum of squared differences (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Zero-normalized sum of squared differences (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Tabella 2 Criteri sum-squared difference correlation SSD più utilizzati [2]

Nelle tabelle sono mostrati i principali criteri di correlazione, dove f e g sono rispettivamente i valori di grigio dei pixel prima e dopo la deformazione ed M è il parametro dimensionale del subset, inoltre:

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_i),$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_i),$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i)]^2},$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i) - f_m]^2},$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x_i, y_i)]^2},$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x_i, y_i) - g_m]^2},$$

Il problema principale che lega i criteri di correlazione all'acquisizione delle immagini è l'illuminazione variabile o comunque la disuniformità luminosa sulla superficie che viene presa in considerazione. Nelle prove per l'acquisizione delle immagini l'illuminazione svolge un ruolo fondamentale, spesso si fa uso di illuminazione artificiale il modo tale da garantire la massima separazione in termini di livello di grigio della parte nera da quella bianca del pattern senza però giungere a saturazione, anche in presenza di una buona illuminazione possono comunque verificarsi problemi quali una alterazione della scala luminosa o un offset d'illuminazione. Le cause che possono far insorgere tali problemi sono molteplici, ad esempio se si vogliono studiare grandi deformazioni oppure durante prove molto lunghe è difficile mantenere un'illuminazione uniforme, anche la riflessività delle vernici può creare dei problemi, durante le prove è quindi necessario seguire delle linee guida che in generale permettono di minimizzare i rischi. Variazione di luminosità e criteri di correlazione sono strettamente collegati. I criteri più semplici come il CC e il SSD sono particolarmente veloci per via della loro struttura molto semplice ma non permettono di tener conto di alcun cambiamento di luminosità, sono quindi sconsigliati e non vengono praticamente mai usati. I criteri NCC e NSSD implementano al loro interno un'operazione di normalizzazione sui livelli di grigio e rendono tali criteri insensibili ad un'alterazione della scala luminosa, sono quindi più robusti dei precedenti e possono essere utilizzati nella maggior parte delle analisi. I criteri che però forniscono le prestazioni migliori sono i ZNCC e ZNSSD, i quali grazie alla loro formulazione sono insensibili sia ad una alterazione della scala luminosa che ad un

offset della luminosità. Sono i criteri più robusti, forniscono i risultati migliori e sono quelli utilizzati nella maggior parte degli algoritmi DIC 2D [2].

Il campo di spostamenti viene calcolato mediante un calcolo iterativo. Utilizzando una funzione di forma del primo ordine si ottiene l'equazione 7 che descrive la relazione che lega le posizioni di un punto nelle due diverse condizioni: di riferimento e dopo la deformazione del subset.

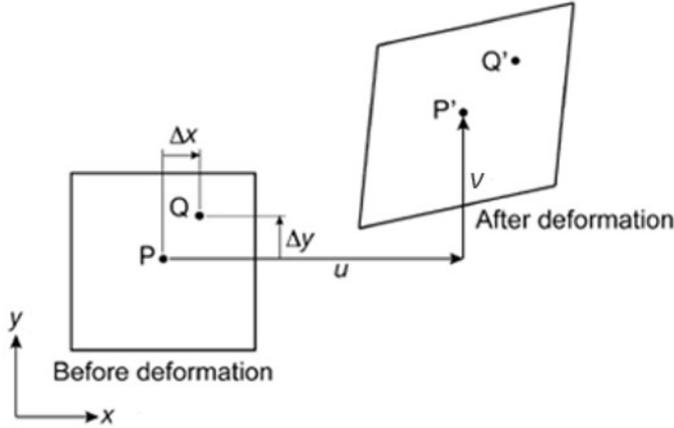


Figura 7 subset prima e dopo la deformazione

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_j &= y_j + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (7)$$

Dove u e v indicano le componenti di spostamento del centro del sottoinsieme, Δx e Δy sono le componenti della distanza di un punto generico (x, y) rispetto al centro del subset e i restanti quattro parametri sono i gradienti di spostamento. Il problema è a 6 incognite espresse dal vettore \bar{u} , ma per migliorare l'accuratezza della misurazioni si possono considerare anche i gradienti di deformazione del secondo ordine ed arrivare a 12 incognite.

$$\bar{u} = \{u \ v \ u_x \ v_x \ u_y \ v_y\}^T \quad (8)$$

La soluzione viene trovata ricercando l'insieme degli spostamenti e dei rispettivi gradienti che massimizzano il coefficiente di correlazione $C(x, y, u)$ nel caso di criteri CC o che lo minimizzano nel caso di criteri SSD; quindi, le derivate parziali del coefficiente di correlazione rispetto agli spostamenti e ai coefficienti di spostamento devono essere nulle; pertanto, devono essere risolte le seguenti equazioni simultanee:

$$\begin{aligned} \nabla C(\mathbf{u}) &= \frac{\partial C(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{i=1 \sim 6} \\ &= \frac{\sum F^2 \frac{\partial G(\mathbf{u})}{\partial u_i}}{(\sum F^2 \sum G(\mathbf{u})^2)^{1/2}} - \frac{\sum FG(\mathbf{u}) \sum G(\mathbf{u}) \frac{\partial G(\mathbf{u})}{\partial u_i}}{(\sum F^2)^{1/2} (\sum G(\mathbf{u})^2)^{3/2}} \Big|_{i=1 \sim 6} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Il metodo più utilizzato per la risoluzione di tali equazioni è il metodo iterativo di Newton-Raphson, il quale nella sua applicazione fornisce la seguente equazione:

$$\nabla C(u_k)(u_{k+1} - u_k) = -\nabla C(u_k) \quad (10)$$

dove uk rappresenta i valori del vettore di spostamento alla k -esima iterazione; $uk + 1 - uk$ esprime i valori di correzione e $\nabla C(uk)$ e $\nabla\nabla C(uk)$, rispettivamente, rappresentano le matrici Jacobiana e Hessiana. Per applicare il metodo iterativo è necessario fare una stima del vettore u iniziale per poi procedere con le iterazioni. Si usano come valori di spostamento iniziali quelli calcolati a seguito di una ricerca grossolana con precisione non inferiore ad 1 pixel, per quanto riguarda i gradienti, di solito nella prima iterazione vengono posti a zero. È interessante notare come tale metodo per il calcolo della matrice Jacobiana ed Hessiana (derivate di primo e secondo ordine del coefficiente di correlazione) necessita delle funzioni di interpolazione descritte in precedenza, ma che comunque, anche se i gradienti dello spostamento vengono utilizzati per aumentare la precisione del calcolo, questi non possono comunque essere utilizzati per una stima accurata delle deformazioni poiché non risultano abbastanza precisi.

Le iterazioni procedono fino a quando non si raggiungono valori di correzione sufficientemente piccoli, in genere il valore di soglia per il giudizio della convergenza per il metodo NR si assesta a 0,01 pixel o meno. Andare oltre risulta inutile poiché come mostrato in precedenza un valore di circa 0.01 pixel rappresenta anche l'errore sistematico e quindi imprescindibile dovuto all'interpolazione sub-pixels. Al termine del calcolo iterativo si ottiene la distribuzione dello spostamento.

Per una distribuzione più regolare dello spostamento è preferibile un subset di dimensioni elevate, questo però, a discapito della risoluzione che migliora al diminuire delle dimensioni del subset. Per l'algoritmo descritto le dimensioni più appropriate risultano essere 19x19 o 35x35 pixels ma in generale può dipendere anche dalla qualità dell'immagine digitale e del pattern casuale presente sulla superficie del pezzo. Ovviamente la dimensione a cui si fa riferimento in un'immagine è il pixel, per ottenere i valori di spostamento reali della superficie è necessaria l'operazione di conversione alla scala metrica desiderata, per fare ciò basta conoscere le dimensioni reali del provino sottoposto alla prova e riportarle all'immagine di riferimento in modo da generare un fattore di correzione che permette di passare dai pixel ai millimetri [1][2].

2.3.5 Stima delle deformazioni

Con le procedure di calcolo viste in precedenza viene restituito il campo di spostamenti con una precisione sub-pixel, per gli studi ingegneristici, d'altronde, più che gli spostamenti sono richieste le deformazioni. Nella teoria matematica le deformazioni possono essere calcolate dagli spostamenti applicando un'operazione di differenziazione, questa operazione è però instabile e rischiosa perché amplifica il rumore contenuto nello spostamento calcolato. Ad esempio, per un errore di 0.02 pixel sullo spostamento, ad una distanza tra i punti di misura di 5 pixels, l'errore di deformazione risulta essere minimo 4000 $\mu\epsilon$, che risulta essere eccessivo e quindi inutile per una stima accettabile del campo delle deformazioni. Per risolvere tale problema di accuratezza vengono implementate tecniche preliminari alla differenziazione, chiamate "di smoothing", che permettono di ridurre il rumore presente in tutto il set di dati discreti che rappresentano lo spostamento della superficie.

Negli anni sono diverse le soluzioni di smoothing proposte, ci sono tecniche ad elementi finiti come la "penalty finite element", altre che utilizzano funzioni spline come "thin-plate spline smoothing". I metodi più efficaci ed utilizzati sono la tecnica dei minimi quadrati mobili (MLS) e soprattutto la tecnica dei minimi quadrati locali. I due metodi sono molto simili e permettono di ricostruire

funzioni continue da un insieme di punti non organizzati. La tecnica dei minimi quadrati locali può essere spiegata come segue:

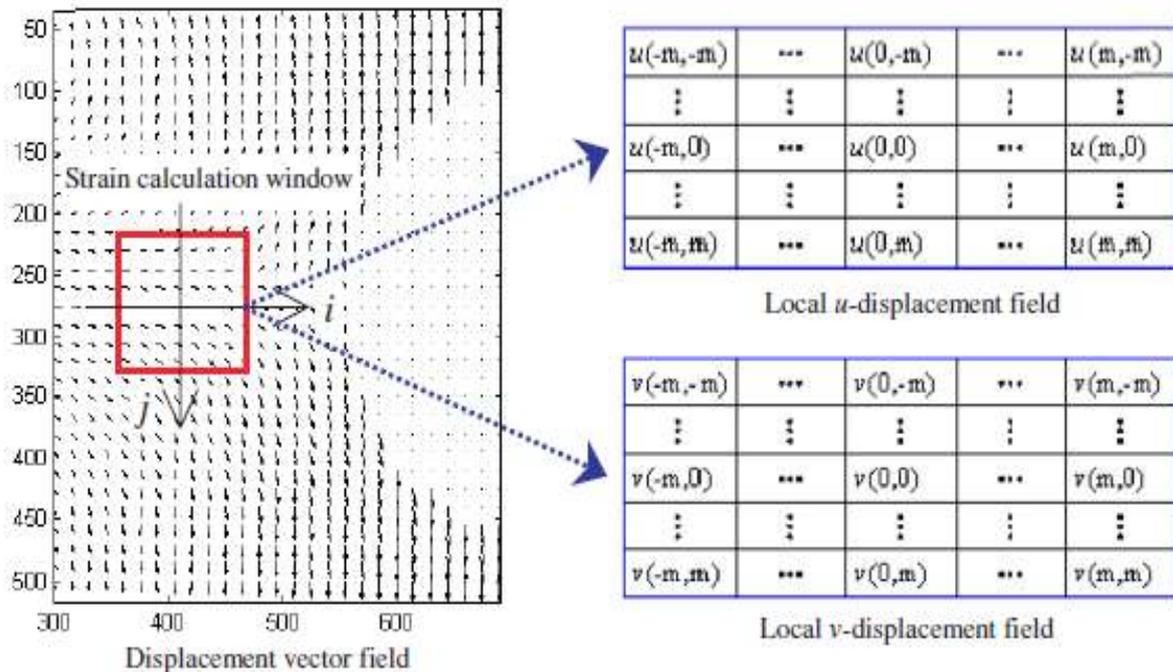


Figura 8 finestra di calcolo della deformazione locale $(2M+1) \times (2M+1)$ contenente i dati degli spostamenti discreti utilizzati per la stima della deformazione [2].

Viene selezionata, come mostrato in figura 8, una finestra di calcolo delle deformazioni contenente $(2m+1) \times (2m+1)$ punti discreti, se tale finestra è sufficientemente piccola allora la distribuzione dello spostamento può essere approssimata ad un piano lineare come segue:

$$\begin{aligned}
 u(i,j) &= a_0 + a_1x + a_2y \\
 v(i,j) &= b_0 + b_1x + b_2y
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

dove $u(i,j)$ e $v(i,j)$ sono i valori di spostamento noti dall'analisi DIC per i diversi punti della finestra, mentre i sei coefficienti "a" e "b" sono quelli da determinare con il metodo dei minimi quadrati. Una volta noti differenziando è possibile trovare i valori di deformazione del punto centrale della finestra. È importante per avere accuratezza nei risultati finali anche la scelta delle dimensioni della finestra di calcolo, poiché una finestra di calcolo troppo piccola non riesce a sopprimere il rumore degli spostamenti mentre se troppo grande può portare ad una irragionevole approssimazione lineare della deformazione [2].

2.4 Configurazione e setup del sistema

Per effettuare l'acquisizione delle immagini necessarie alla correlazione è necessario impostare una configurazione del sistema adeguata, in questo paragrafo verrà descritta la configurazione adottata per il lavoro di tesi, nello specifico per l'acquisizione di immagini della superficie di un provino durante prove di trazione. In generale la superficie del provino sottoposto alla prova deve essere illuminata uniformemente ed avere un buon contrasto nell'immagine, la quale non deve sbilanciarsi né verso il troppo chiaro e neanche verso il troppo scuro. È consigliabile ma non è strettamente necessario utilizzare una fonte di luce artificiale che illumini la superficie di interesse, la quale deve

essere inoltre perpendicolare al sensore fotografico in modo tale da non indurre spostamenti apparenti dovuti alla deformazione delle immagini.

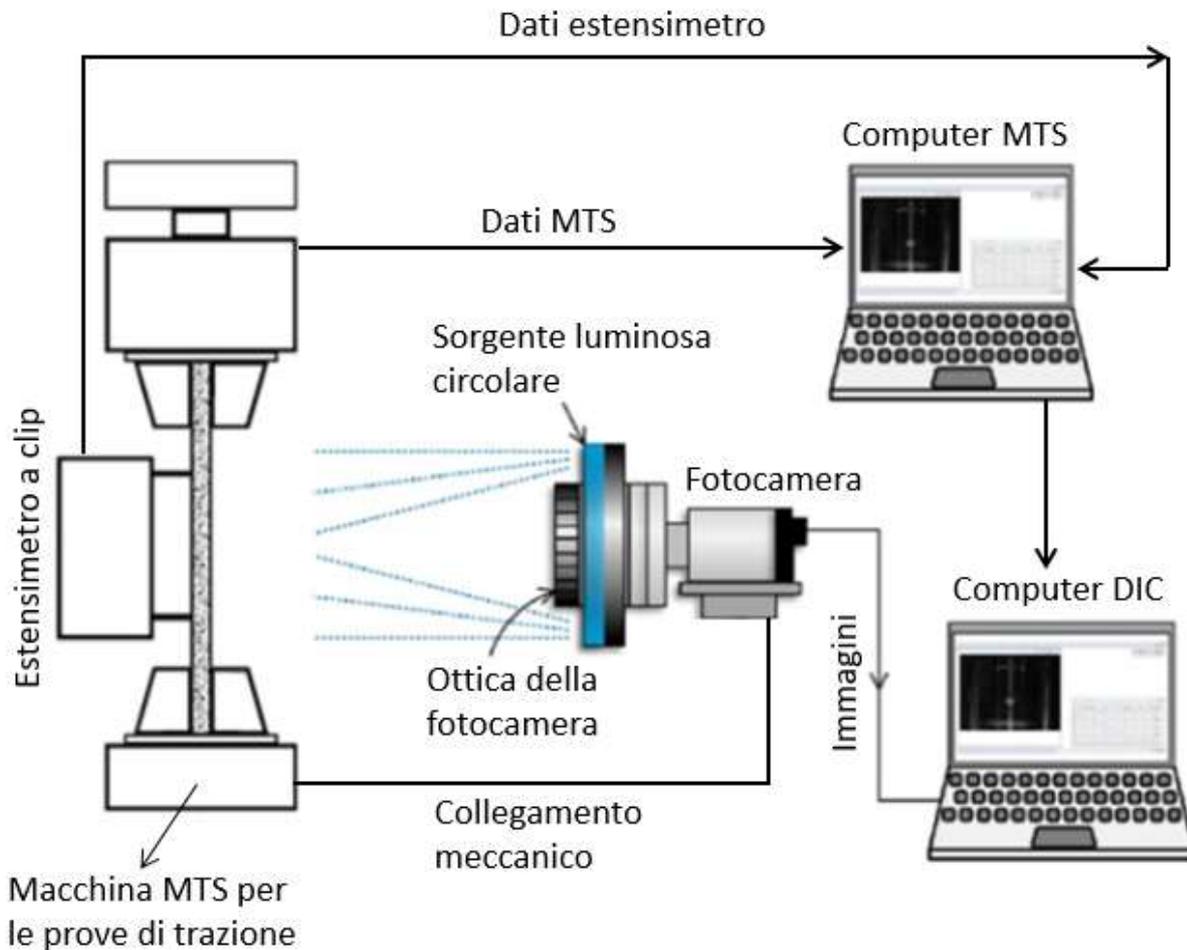


Figura 9 Setup del sistema utilizzato per studiare le prove di trazione sugli acciai DP600 e TWIP.

La telecamera utilizzata è la DMK 33UX249, come accessorio viene utilizzato un ring light di luce artificiale bianca che emette luce in modo continuo permettendo l'acquisizione di immagini ad alta frequenza senza variazione di luminosità, l'anello viene montato mediante delle apposite viti all'obbiettivo della telecamera in modo tale da avere l'emissione luminosa diretta e centrata sulla superficie del provino. La macchina di trazione MTS è stata utilizzata per condurre tutte le prove di trazione effettuate, essa viene gestita tramite un hardware specifico e da un software installato su di un computer che verrà chiamato "computer MTS". I provini preparati vengono montati sulla macchina in modo tale da avere la superficie con il pattern rivolta perpendicolarmente al sensore fotografico. Per bloccare il provino in posizione la macchina dispone di teste di afferraggio, le quali possono muoversi o attorno al proprio asse (per orientare la superficie del provino) o lungo l'asse (per trazionare il provino durante la prova). Il movimento lungo l'asse ed il movimento di apertura e chiusura delle morse sono comandati da due sistemi idraulici distinti. Durante la prova di trazione le due teste non si muovono in direzioni opposte per tirare il provino, bensì la testa superiore rimane ferma mentre quella inferiore esegue la corsa verso il basso di un tot di millimetri preimpostati nel programma che la macchina esegue, il provino sarà quindi caratterizzato da un'estremità fissa ed una mobile. Prima di effettuare le prove si è seguito il procedimento spiegato in seguito in modo da

migliorare la sicurezza e la ripetibilità delle prove stesse, il setup utilizzato è schematizzato in figura 9.

Per cominciare viene acceso il computer MTS e successivamente la macchina di trazione, viene quindi attivata la pompa idraulica mediante il programma presente sul computer MTS. Prima di iniziare le prove è sempre importante ripulire la macchina dalle perdite di olio con un panno carta in modo che questo non cali sulla superficie del provino durante la prova invalidandola. Successivamente all'attivazione dei sistemi idraulici vengono aperte le morse delle teste di afferraggio attraverso un sistema di controllo idraulico manuale separato dalla macchina. Viene quindi impostata dal computer MTS l'altezza della morsa superiore in modo da permettere una corsa durante la prova di trazione che sia sufficiente ad arrivare alla rottura del provino, viene poi regolata l'altezza della morsa inferiore in modo che il provino possa essere afferrato nelle sezioni apposite, a questo punto le morse vengono orientate manualmente in direzione della telecamera. La telecamera viene collegata con una vite ad un supporto meccanico forato, questo collegamento permette di orientare la telecamera ruotandola intorno l'asse della vite, il supporto è poi montato attraverso dei bulloni ad un braccio di alluminio che viene ancorato tramite una morsa direttamente alla macchina di trazione. La telecamera viene poi orientata nella direzione perpendicolare alla superficie del campione. Viene quindi posizionato il provino chiudendo prima la morsa superiore e poi quella inferiore tramite il sistema idraulico manuale, successivamente vengono applicate correzioni di orientamento che possono essere necessarie per correggere gli errori scaturiti dalla chiusura delle morse.



Figura 10 immagine di riferimento di una prova di trazione su acciaio TWIP 20 x 1.45mm

Con il provino inserito nella macchina, attraverso un programma specifico della fotocamera che permette di mostrare a schermo in tempo reale ciò che la camera riprende, vengono regolate, l'intensità luminosa della lampada, la messa a fuoco e l'apertura focale in modo tale da avere la massima qualità dell'immagine, la messa a fuoco viene regolata in base alla distanza della fotocamera dal provino, durante le prove si è provato con due configurazioni principali, una che prevede la fotocamera più vicina e che inquadra una porzione specifica della superficie del provino

(figura 11) ed una seconda con la telecamera che inquadra tutta la superficie libera del campione in esame (figura 10); ottimizzata la messa a fuoco si cerca di ottenere il miglior contrasto tra le parti bianche e le parti nere del pattern andando a massimizzare la luminosità della lampada e diminuendo l'apertura focale della fotocamera, in modo da avere una migliore qualità, viene poi regolato tramite il programma il tempo di esposizione luminosa, che dovrà essere sicuramente inferiore al tempo relativo alla frequenza di acquisizione delle immagini, in modo tale da avere le immagini rappresentate con tutto il range di grigi disponibile senza la presenza di zone esclusivamente bianche dove risulta impossibile distinguere i livelli di grigio.

Per ogni prova effettuata a seconda delle necessità sono stati impostati il tempo relativo alla frequenza di acquisizione delle immagini e la frequenza di acquisizione dei dati della macchina di trazione, quali corsa, carico, tempo e valori relativi ad un eventuale estensimetro. Tramite il programma di controllo della macchina viene impostato il programma della prova di trazione determinando le eventuali fasi di carico e scarico. Si procede quindi con la prova di trazione e l'acquisizione delle immagini digitali. Alla fine della prova vengono aperte le morse ed il provino o le sue parti vengono sfilate dalla macchina. Per le prove necessarie a validare le misurazioni DIC è stato posizionato un estensimetro sul provino pronto ad essere traziionato, l'estensimetro viene montato in modo tale da lasciare libera la superficie di interesse ed essere il più possibile centrato nelle immagini acquisite, i dati relativi all'estensimetro sono inviati tramite cavo direttamente al computer MTS.

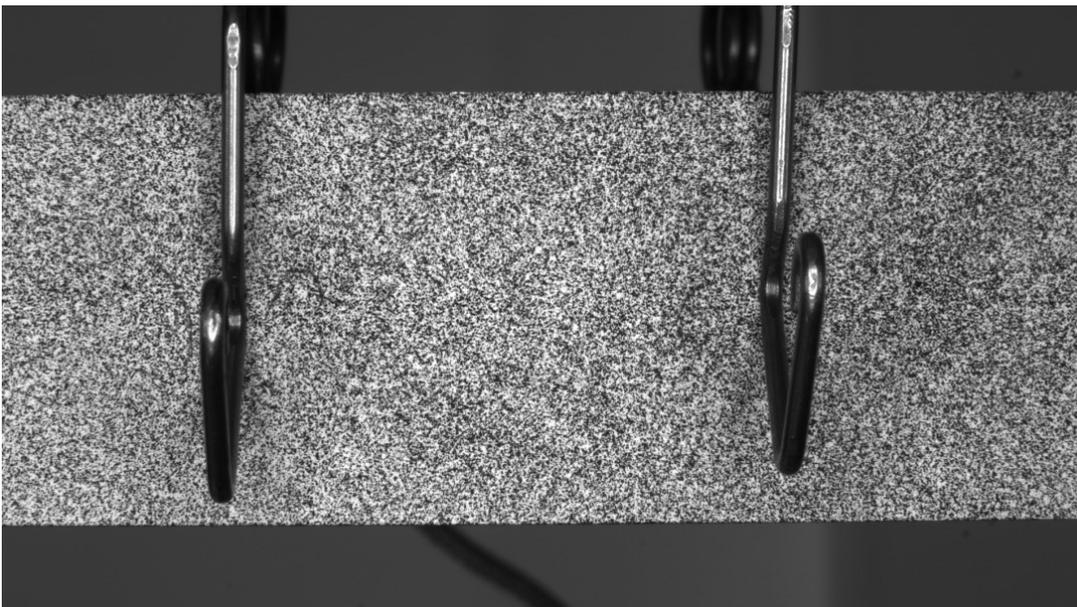


Figura 11 immagine di riferimento relativa ad una prova di trazione su un provino di acciaio DP600 con estensimetro

2.5 Il pattern

Per poter funzionare, la DIC deve lavorare con subset unici tra di loro per non incorrere in incongruenze di calcolo. Il modo più semplice per ottenere ciò è realizzare sulla superficie del provino un pattern di tipo casuale senza influenzare le caratteristiche del materiale. Il metodo più semplice ed efficace è utilizzare vernici spray di colore bianco e nero di tipo opaco per avere delle immagini prive di riflessi, i quali possono invalidare la prova. Tale metodo è veloce, economico e non richiede particolari abilità ed attrezzature, può inoltre essere utilizzato su provini di diversa

forma e misura. Il pattern non deve essere né troppo fine e né troppo grossolano, le dimensioni del pattern e quindi la sua qualità influenzano direttamente la correlazione dei subset e sono quindi strettamente collegate all'errore sulle misurazioni del modello DIC. Il pattern migliore si ottiene da una verniciatura composta dal 50% di nero e 50% di bianco in modo da ottenere, vista da lontano, una superficie grigia e uniforme. Nelle prove sperimentali si è seguita la seguente procedura: il provino è stato dapprima lavato con acqua e poi con acetone, successivamente sotto cappa si è verniciato di bianco una delle due superfici del provino e lasciato asciugare per una decina di minuti, si è poi spruzzata la vernice nera con dei movimenti veloci e da una distanza più elevata in modo da ottenere un pattern casuale ma uniforme e poi si è lasciato asciugare la vernice, in questa fase bisogna fare particolarmente attenzione a non creare delle grandi gocce di vernice nera che si traducono in zone dove non è applicabile il calcolo di correlazione. L'intera operazione di verniciatura richiede un minimo di esperienza, infatti, prima di ottenere risultati accettabili sono state effettuate diverse prove.

Le dimensioni dei puntini neri su sfondo bianco che costituiscono il pattern devono essere comprese tra i 3 e i 5 pixels di diametro, questo perché precedenti studi dimostrano che l'errore nelle misurazioni degli spostamenti aumenta se le dimensioni delle gocce nere sono inferiori al singolo pixel che caratterizza le immagini e se sono superiori alle dimensioni dei subsets di riferimento con cui è stata suddivisa l'immagine del pattern presente sulla superficie del campione. Inoltre, il fattore di ricoprimento deve essere compreso tra il 40% ed il 70%, in tal misura il pattern non risulta essere né troppo chiaro e né troppo scuro e può essere a questo punto utile per una misurazione DIC 2D. È bene utilizzare i provini poco dopo che questi sono stati verniciati poiché un invecchiamento eccessivo della vernice può tradursi in un distaccamento dalla superficie stessa durante l'allungamento del provino e quindi ad una prova non valida.

3. Prove preliminari su provini di acciaio DP600

Prima di eseguire lo studio sugli acciai TWIP, si è deciso di provare la validità delle misure effettuate tramite il sistema di acquisizione dati DIC da noi assemblato tramite prove di trazione uniassiali su provini di acciaio DP600. L'obiettivo è assicurarci che il sistema sia ben calibrato e che abbia una buona precisione nella misurazione degli spostamenti e delle deformazioni, per fare ciò sono stati confrontati per ogni prova i valori misurati tramite un estensimetro assiale a clip con quelli misurati tramite la tecnica DIC.

Per le prove vengono utilizzati dei provini di acciaio DP600 di 19,9mm di larghezza e 1 mm di spessore, su di una delle superfici del campione viene impresso il pattern stocastico. Per ogni prova il provino viene posizionato e fissato sulla macchina di trazione e successivamente viene montato l'estensimetro cercando di non danneggiare lo strato di vernice, naturalmente l'estensimetro a clip viene montato in modo che la telecamera DIC possa catturare la superficie di interesse. Successivamente al posizionamento del provino e dell'estensimetro vengono effettuate tutte quelle operazioni necessarie all'ottimizzazione della qualità delle immagini che verranno catturate, agendo quindi sulla luminosità della lampada, sul posizionamento della telecamera, sulla messa a fuoco e sull'apertura focale della telecamera. Per valutare l'influenza della distanza tra fotocamera e superficie di interesse sulla precisione del calcolo vengono effettuate due tipologie di prova: la prima con la telecamera posta ad una distanza di circa 30 cm dal campione in modo tale che questa inquadri la superficie utile del provino nella sua interezza e la seconda con la telecamera posta ad una distanza di circa 10 cm in modo da inquadrare solamente la zona in cui lavora l'estensimetro. Solo a questo punto si procede con la prova di trazione, la quale viene effettuata in controllo di

corsa del pistone con uno spostamento massimo preimpostato di 16,6 mm per poi scaricare fino a carico nullo, la velocità del pistone è stata impostata a 0,4 mm/s, la frequenza di acquisizione dati MTS a 16Hz e la frequenza di acquisizione delle immagini per la DIC a 4Hz. Si cerca di iniziare contemporaneamente la prova di trazione e l'acquisizione delle immagini digitali, questo per semplificare il successivo confronto dei dati.

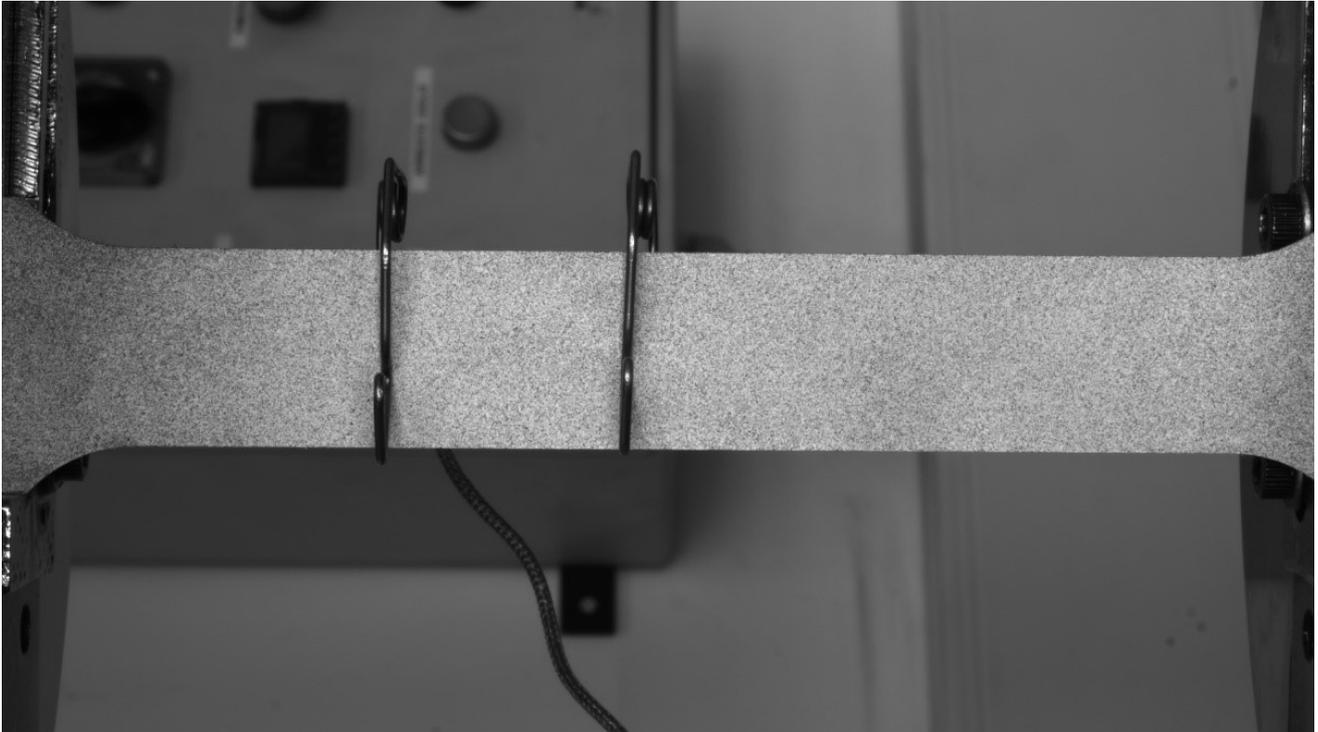


Figura 12 immagine di riferimento relativa ad una prova di trazione uniassiale di un provino DP600 con telecamera posta a circa 30cm dalla superficie di interesse

3.1 Calcolo degli spostamenti e delle deformazioni su GOM Correlate

Tramite il programma che controlla la telecamera è possibile impostare la velocità di acquisizione delle immagini, le quali verranno salvate durante la prova in una cartella dedicata. L'analisi di correlazione di immagini digitali viene effettuata a conclusione della prova di trazione sul programma GOM Correlate 2020. Le immagini relative alla prova di trazione effettuata vengono caricate in blocco nel programma, la prima immagine sarà di riferimento e tutte le altre saranno le immagini deformate. Prima di effettuare la correlazione viene definita la scala come mostrato in figura 13.

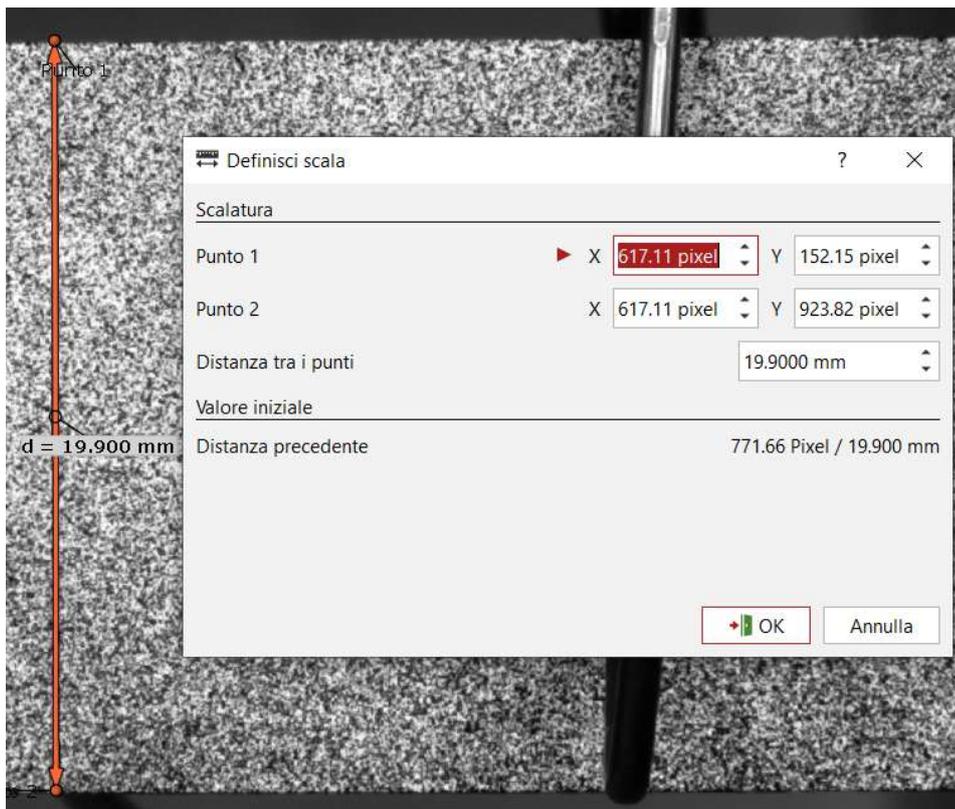


Figura 13 definizione della scala utilizzando come parametro la larghezza del provino di 19,9mm

Viene definito un sistema di riferimento destrorso con l'asse delle x positive verso destra in direzione dell'asse di trazione del provino tramite una procedura di allineamento a 3 punti. Per effettuare il calcolo il programma richiede la definizione della regione di interesse ROI, la quale viene definita manualmente sull'immagine di riferimento, durante questa fase vengono scelte le dimensioni del subset e il tipo di funzione per l'interpolazione sub-pixel, nel nostro caso sono stati scelti 19 x 19 pixel come dimensione del subset ed una funzione bicubica per l'interpolazione, al termine dell'operazione il programma crea e correla automaticamente i subset. A questo punto il programma permette di scegliere cosa valutare, in questo caso si è scelto di analizzare spostamenti e deformazioni lungo la direzione dell'asse x che corrisponde all'asse di trazione, al termine dell'analisi il programma mostra a schermo come la ROI si deforma e tramite una legenda a colori i valori di deformazione raggiunti sulla superficie. Per ottenere dei dati sottoforma di tabelle e diagrammi (figura 15) è necessario definire nel programma dei punti di calcolo. Nel caso in esame, poiché è necessario effettuare un confronto con le misure raccolte da un estensimetro, viene creato nel programma stesso un estensimetro virtuale (figura 14) le cui misure sono mostrate a schermo sottoforma di diagramma e vengono poi esportate su Excel in forma tabellare per confrontarle con i valori dell'estensimetro reale. Vengono riportati anche i dati relativi alla deformazione di un punto nella zona centrale del ROI sempre per un confronto con i valori riportati sia dall'estensimetro virtuale che reale.

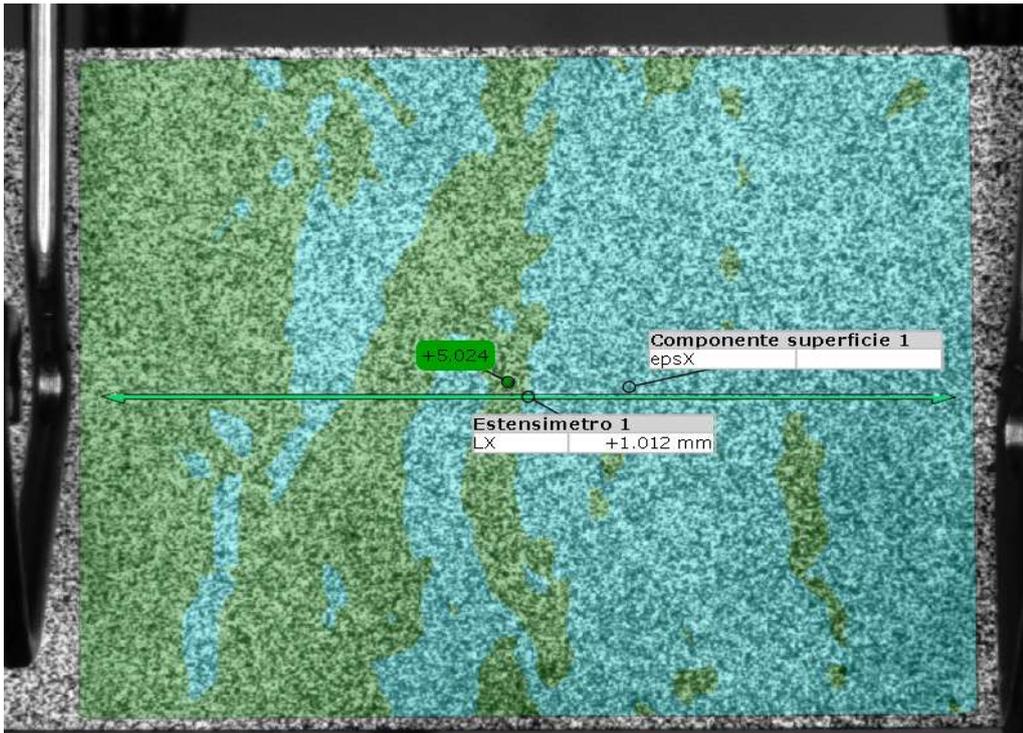


Figura 14 definizione su GOM Correlated di un punto di calcolo delle deformazioni al centro del ROI e di un estensimetro virtuale che registra la distanza relativa tra due punti.

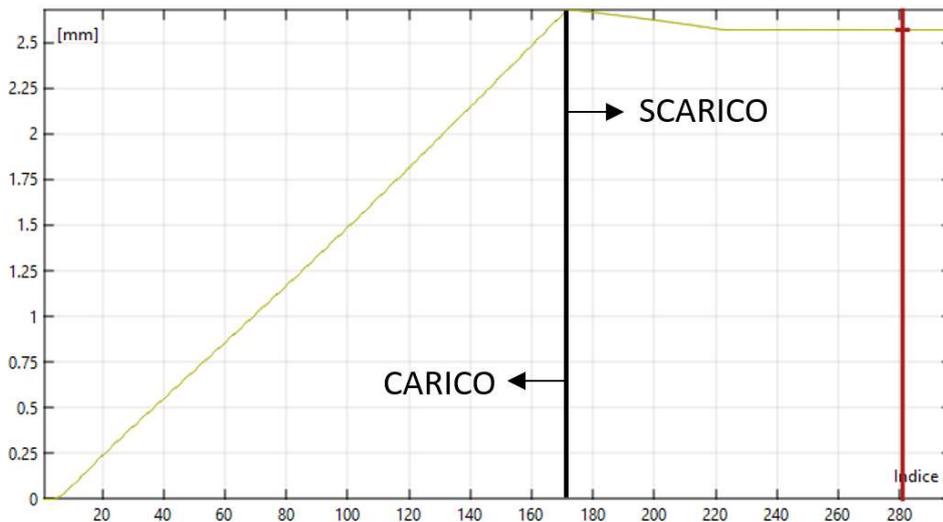


Figura 15 diagramma che mostra lo spostamento relativo dell'estensimetro in funzione del tempo, è possibile visualizzare la fase di carico e scarico impostata per la prova di trazione.

3.2 Confronto dei dati e valutazione degli scostamenti e degli errori

Il confronto tra le misure viene effettuato su Excel, le frequenze di acquisizione dei dati sono diverse: 16 Hz per l'estensimetro reale e 4Hz per le misurazioni DIC, si effettua quindi un'operazione di indicizzazione su tutto il set di dati dell'estensimetro reale che permette di selezionare un valore ogni 4 per passare da 16 Hz a 4 Hz rendendo così possibile la comparazione dei dati. Il

confronto non può essere effettuato sul valore misurato dagli estensimetri perché di lunghezze diverse, l'estensimetro reale è caratterizzato da una lunghezza a riposo di 25mm mentre quello virtuale risulta essere variabile a seconda dei casi ed il parametro che ne determina la lunghezza è esclusivamente la grandezza della regione di interesse (ROI).

Per diminuire l'incertezza dei risultati sono state effettuate 5 prove su provini di acciaio DP600: le prime 3: DP600/1, DP600/2, DP600/3 sono state effettuate ponendo la telecamera ad una distanza di circa 30 cm, in modo da inquadrare tutta la superficie utile del provino in trazione. Le restanti 2 prove: DP600/4 e DP600/5 sono state effettuate con la telecamera posta ad una distanza di circa 10 cm in modo da catturare solamente la regione nell'intorno dell'estensimetro. Il confronto dei dati tra le misure DIC e quelle con l'estensimetro viene effettuato sui livelli di deformazione. Per effettuare le misurazioni DIC è necessario specificare una regione di interesse (ROI), la quale nel nostro caso vuole essere la stessa area su cui lavora l'estensimetro. Vengono scelte come mostrato in figura 16 delle regioni di larghezza leggermente più piccola rispetto alla distanza dei braccetti dell'estensimetro di 25mm, questo perché i braccetti stessi coprono parte della superficie del campione. Gli estensimetri virtuali che vengono creati nel programma GOM Correlate saranno quindi di 21/22 mm, per via della differenza di lunghezza tra gli estensimetri reali e virtuali la comparazione tra i dati di misura viene effettuata sulle deformazioni le quali sono calcolate dividendo lo scostamento fornito dall'estensimetro, reale o virtuale, per la sua lunghezza relativa. Le deformazioni così calcolate vengono inoltre confrontate con le deformazioni ottenute dal programma GOM Correlate nel punto centrale della regione di interesse. Di seguito vengono riportati i risultati delle prove effettuate attraverso dei grafici a dispersione.

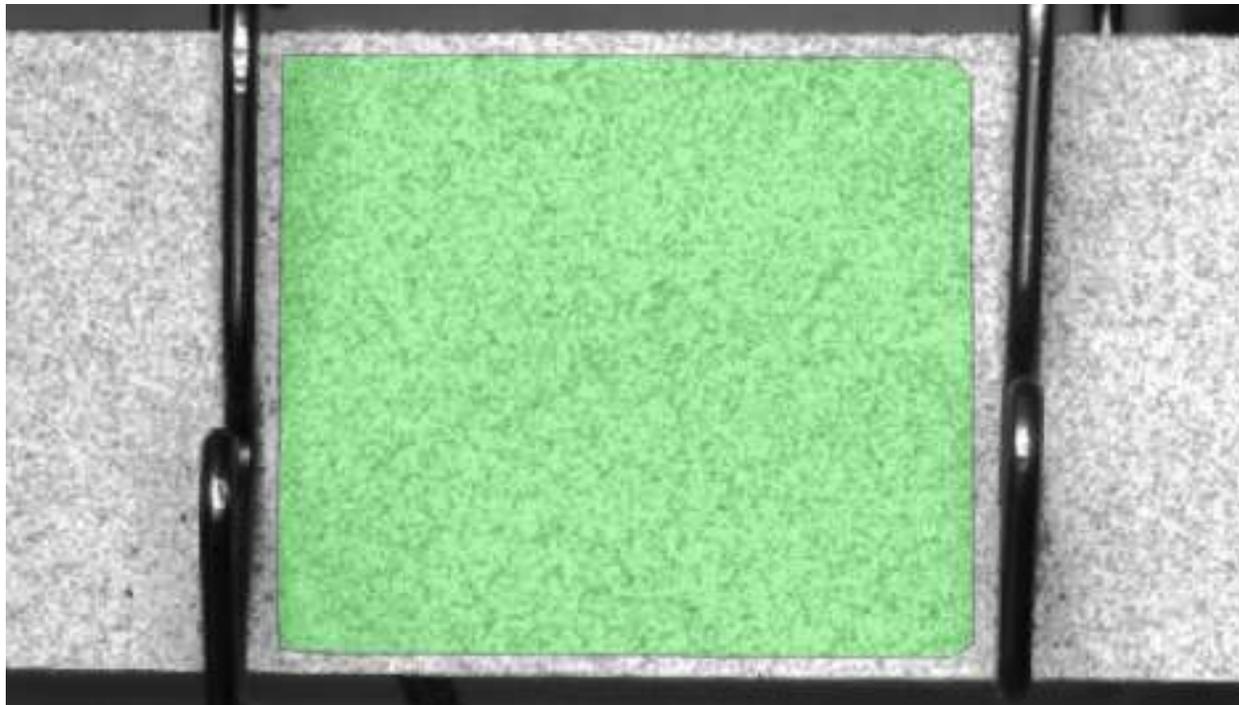


Figura 16 l'area verde rappresenta la regione di interesse (ROI) sulla quale vengono effettuate le operazioni di correlazione delle immagini

3.3 Prova di trazione DP600/1

La prova sul campione DP600/1 è stata condotta con la fotocamera posta ad una distanza di circa 30cm, in modo tale da inquadrare tutta la lunghezza utile del provino. Il grafico in figura 17 mostra tre curve forza-deformazione relative alla prova di trazione sul provino DP600/1, la curva blu è stata ricavata con i dati forniti dall'estensimetro reale e viene considerata in questo studio come esatta. Le altre due curve, la rossa e la verde sono state ricavate dalle deformazioni fornite rispettivamente dall'estensimetro virtuale e dal punto centrale della ROI.

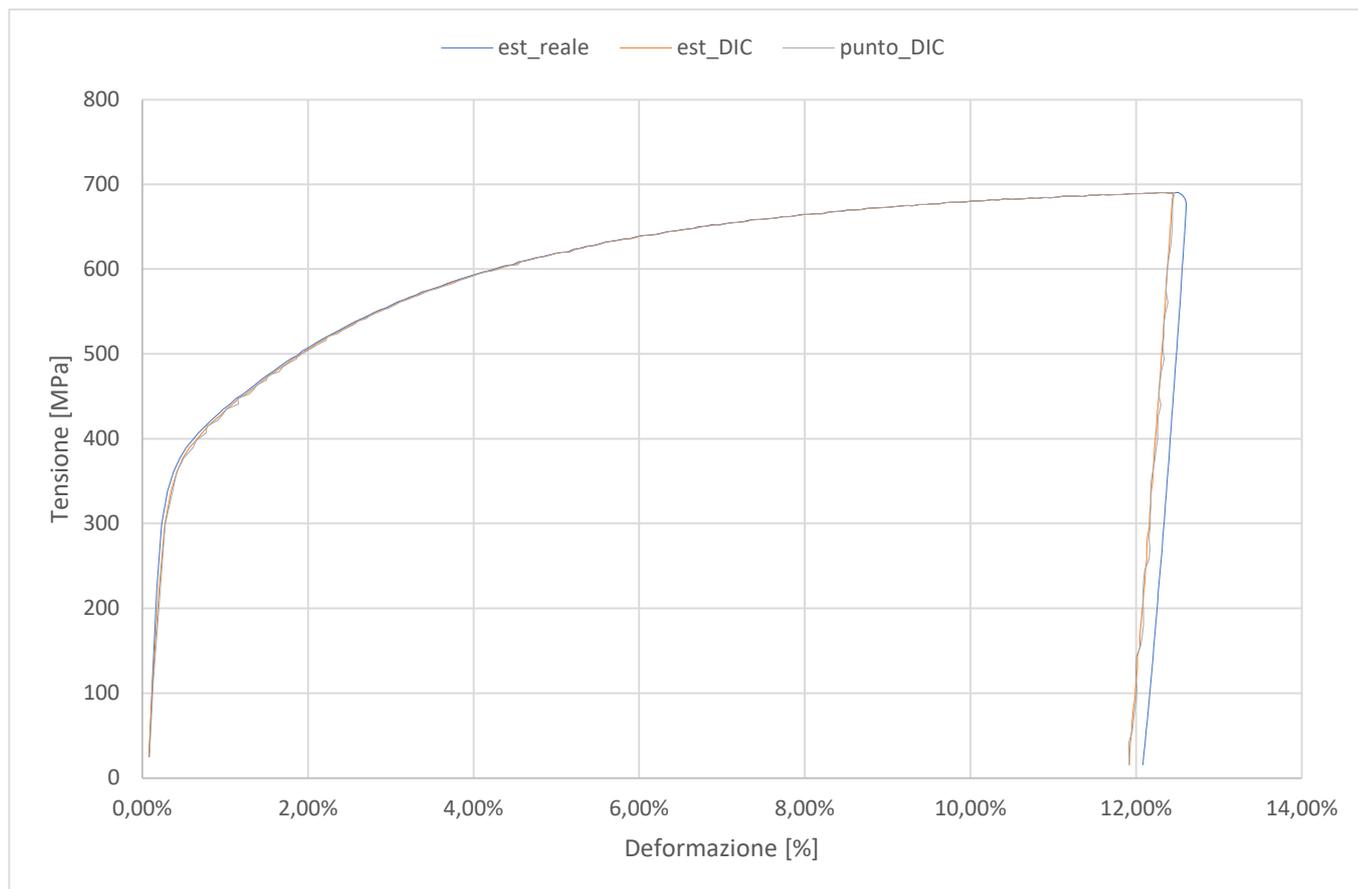


Figura 17 grafico Tensione-Deformazione relativo alla prova di trazione sul provino DP600/1

Analizzando il grafico è possibile confermare l'attendibilità delle misurazioni DIC fornite dal programma, infatti le curve mostrano nella fase di carico del provino lo stesso andamento, tanto che risulta anche difficile la distinzione tra queste, l'unico scostamento degno di nota è relativo alle curve in fase di scarico del provino, le quali hanno la stessa pendenza ma la curva relativa all'estensimetro reale risulta essere in ritardo rispetto a quelle relative alle misure DIC. L'unica differenza di forma tra le due curve si trova nella transizione tra fase di carico e scarico, nello specifico la curva rossa e verde (misure DIC) mostrano una transizione brusca e marcata mentre la curva blu (estensimetro reale) mostra una transizione più dolce e smussata.

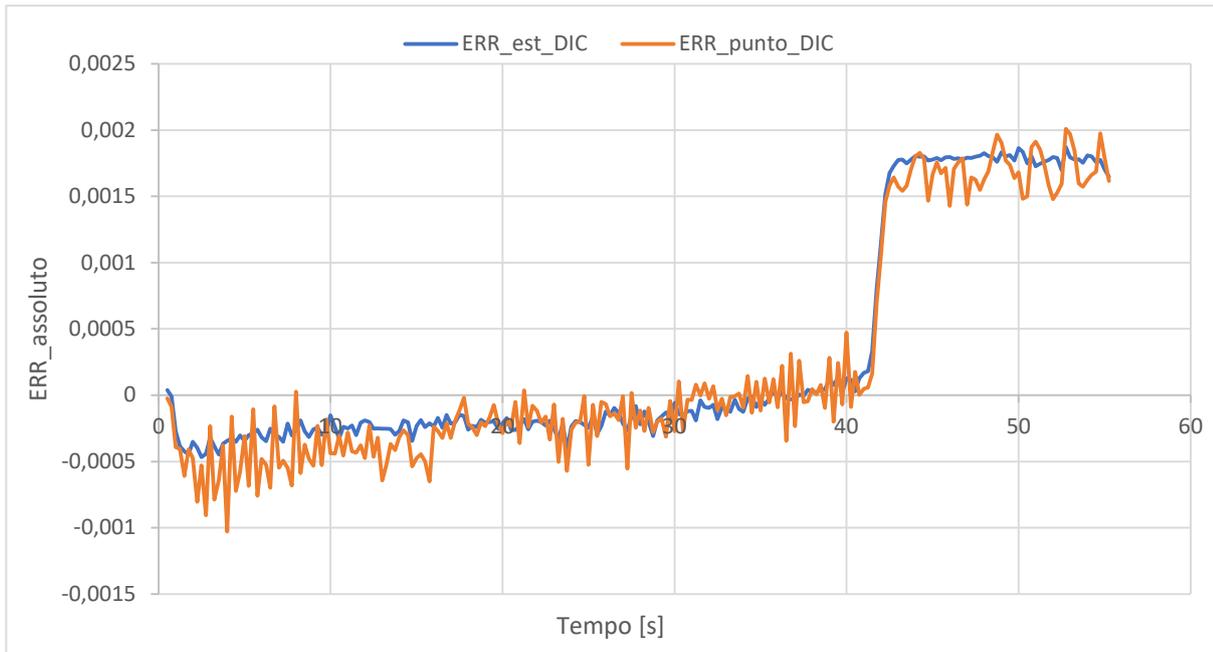


Figura 18 grafico dell'errore assoluto di misure DIC in relazione alla misura con l'estensimetro reale per il provino DP600/1

Il grafico in figura 18 mostra l'andamento nel tempo dell'errore assoluto; quindi, della differenza tra la misure della deformazione effettuata con metodi DIC e quella fornita dall'estensimetro reale, nello specifico la curva blu è relativa alla misura calcolata con l'estensimetro virtuale mentre la curva arancione è relativa alla misura della deformazione tramite DIC nel punto centrale della regione di interesse. Gli andamenti delle curve rimarcano quanto già detto per le curve forza-deformazione, si hanno quindi scostamenti quasi nulli per la fase di carico mentre nella transizione carico-scarico si assiste ad un salto della curva coerente con quanto detto in precedenza. La deformazione calcolata nel punto singolo è caratterizzata da un rumore maggiore, come si può vedere dalla curva arancione, inoltre in questa prova è possibile denotare che le misure effettuate tramite DIC mostrano lo stesso andamento di tendenza anche se una deriva dal campo di spostamenti (curva blu) e l'altra dal campo delle deformazioni (curva arancione). Dal grafico si nota come al di fuori di queste differenze l'errore risulti essere minimo, l'errore assoluto medio in termini percentuali, infatti, risulta essere 0,030% per la curva blu e 0,024% per la curva rossa.

3.4 Prova di trazione DP600/2

La prova sul campione DP600/2 è stata condotta con la fotocamera posta ad una distanza di circa 30cm, in modo tale da inquadrare tutta la lunghezza utile del provino. Il grafico in figura 19, come nel caso precedente rappresenta le curve forza-deformazione della prova di trazione, la curva blu viene ricavata dai dati dell'estensimetro reale, la verde dai dati dell'estensimetro virtuale e la rossa dalla sequenza di dati che rappresentano la deformazione nel punto centrale della ROI. Le tre curve risultano essere quasi sovrapposte, specialmente nella fase di carico della prova di trazione. Gli scostamenti maggiori si ottengono nella fase di scarico ma in questo caso sono meno evidenti rispetto alla prova precedente, anche le forme delle curve nella fase di transizione da carico a scarico risultano essere simili.

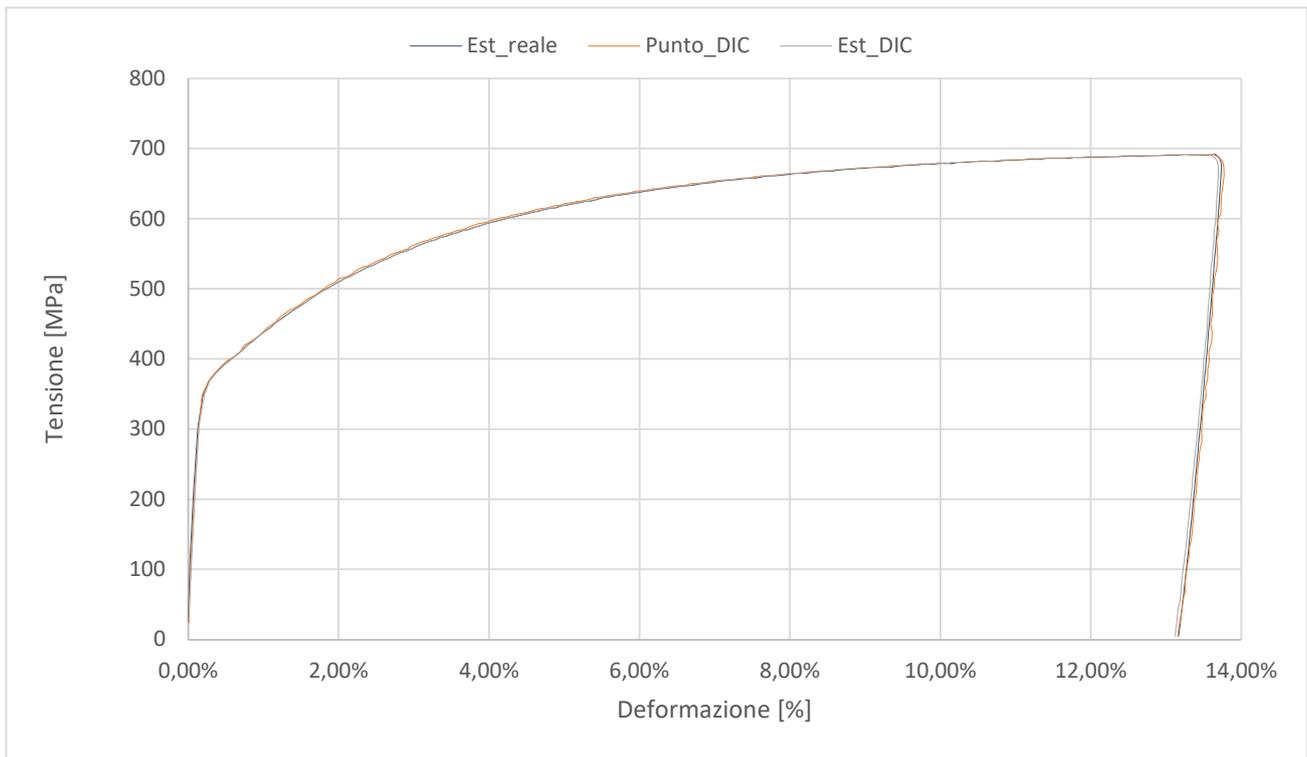


Figura 19 grafico Tensione-Deformazione relativo alla prova di trazione sul provino DP600/2

Il grafico in figura 20 mostra l'andamento temporale dell'errore assoluto; quindi, lo scostamento tra le misure delle deformazioni ricavate con l'estensimetro reale rispetto a quelle derivate dall'estensimetro virtuale (curva arancione) e dal calcolo della deformazione nel punto singolo (curva blu). Come nella precedente prova la deformazione associata al singolo punto della superficie è caratterizzata da un rumore elevato. Rispetto alla prova precedente le due curve hanno una linea di tendenza differente nella fase di carico del provino; infatti, la curva blu segue un andamento parabolico mentre quella arancione un andamento crescente. In questo caso il salto che caratterizza le due curve nella transizione tra carico e scarico risulta essere minore rispetto alla prova precedente, nel complesso l'errore assoluto medio espresso in termini percentuali risulta essere 0,048% per la curva blu e 0,034% per la curva rossa.

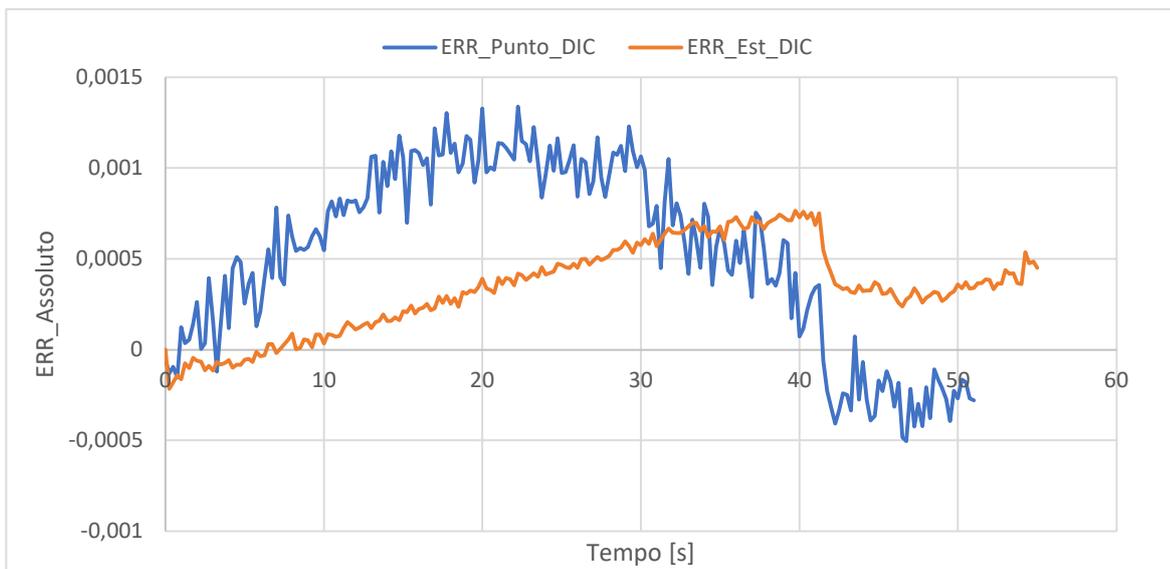


Figura 20 grafico dell'errore assoluto di misure DIC in relazione alla misura con l'estensimetro reale per il provino DP600/2

3.5 Prova di trazione DP600/3

La prova sul campione DP600/3 è stata condotta con la fotocamera posta ad una distanza di circa 30cm, in modo tale da inquadrare tutta la lunghezza utile del provino. In figura 21 è mostrato il grafico relativo alle curve forza-deformazione. La curva rossa rappresenta i dati dell'estensimetro reale, la blu dell'estensimetro virtuale mentre la verde i dati relativi al punto centrale della regione di interesse. In accordo con le prove precedenti le curve sono pressoché sovrapposte nella fase di carico mentre in quella di scarico le misure DIC presentano un offset rispetto alla curva dell'estensimetro reale. A differenza della DP600/1 la forma delle curve nella fase di transizione carico-scarico non presenta differenze.

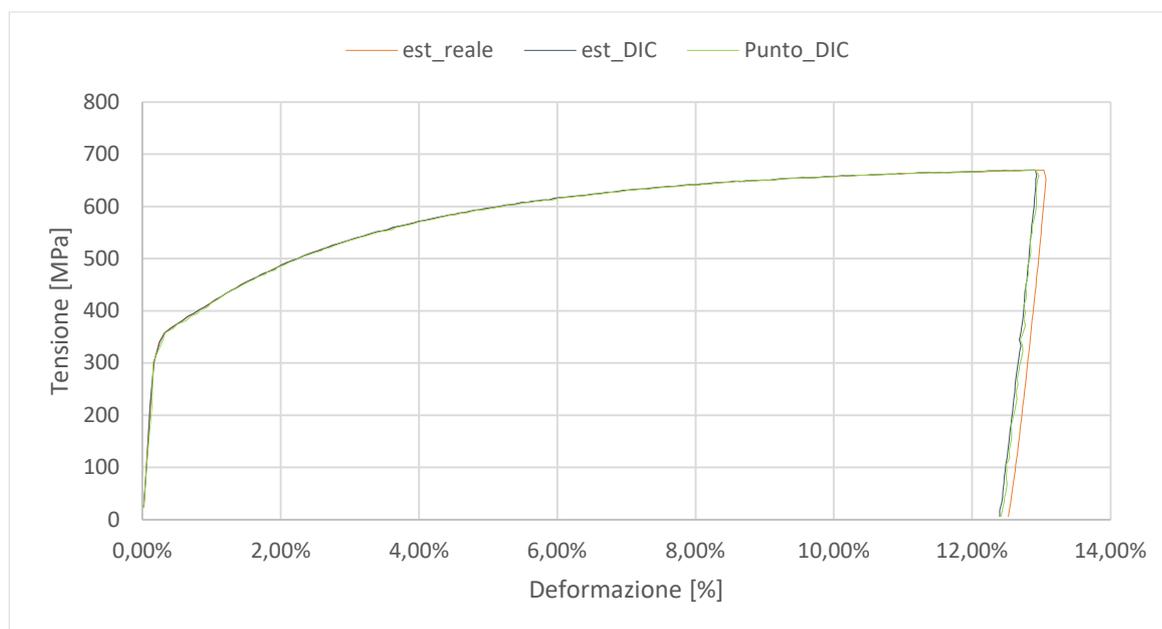


Figura 21 grafico Tensione-Deformazione relativo alla prova di trazione sul provino DP600/3

Il grafico in figura 22 mostra gli andamenti temporali dell'errore assoluto in relazione alla deformazione calcolata tramite le misure raccolte dall'estensimetro reale. La curva blu rappresenta gli scostamenti relativi all'estensimetro virtuale e la curva arancione mostra gli scostamenti relativi al punto centrale della ROI. Le curve presentano lo stesso comportamento e tra loro si scostano di poco. Il gradino che caratterizza la transizione da carico a scarico è inoltre poco evidente. La differenza di rumorosità è come nei casi precedenti attribuibile alla difficoltà nel calcolo delle derivate in un punto singolo. L'errore assoluto medio delle curve è come nelle prove precedenti molto basso ed è rispettivamente 0.070% per la curva blu e 0.034% per la curva rossa.

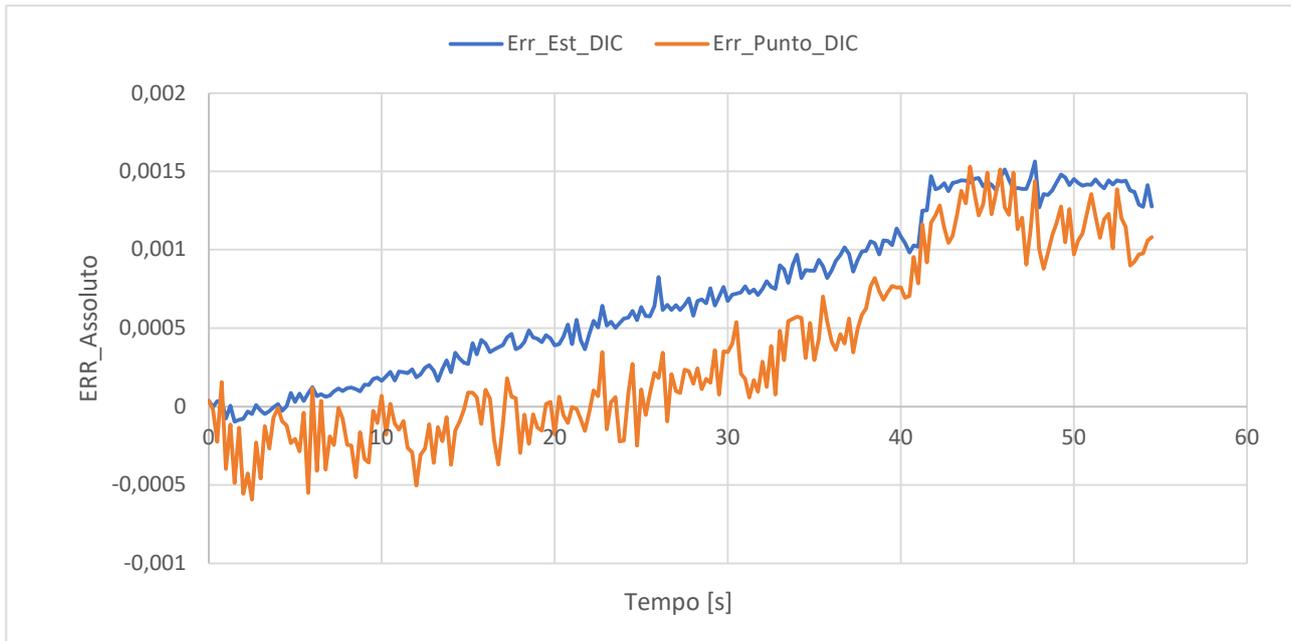


Figura 22 grafico dell'errore assoluto di misure DIC in relazione alla misura con l'estensimetro reale per il provino DP600/3

3.6 Prova di trazione DP600/4

La prova sul campione DP600/4 è stata condotta con la fotocamera posta ad una distanza di circa 10cm, in modo tale da inquadrare esclusivamente la regione interessata dall'estensimetro, il grafico in figura 23 mostra le curve forza-deformazione della prova di trazione in questione, la linea blu è stata tracciata dai dati dell'estensimetro reale posto sul campione, la verde dai dati dell'estensimetro virtuale e la rossa dalle deformazioni in un punto specifico della regione di interesse. Osservando il grafico si può notare come, rispetto ai casi precedenti, le curve si distanziano tra loro in modo marcato. Lo scostamento tra le curve è più evidente nella fase di scarico ma risulta visibile anche nella fase di carico, solo durante l'incrudimento del materiale le curve risultano approssimativamente sovrapposte. Le differenze maggiori si presentano nelle transizioni elastica-plastica e carico-scarico, e specialmente in quest'ultima le curve "DIC" presentano una linea più morbida e meno marcata rispetto alla curva dell'estensimetro reale.

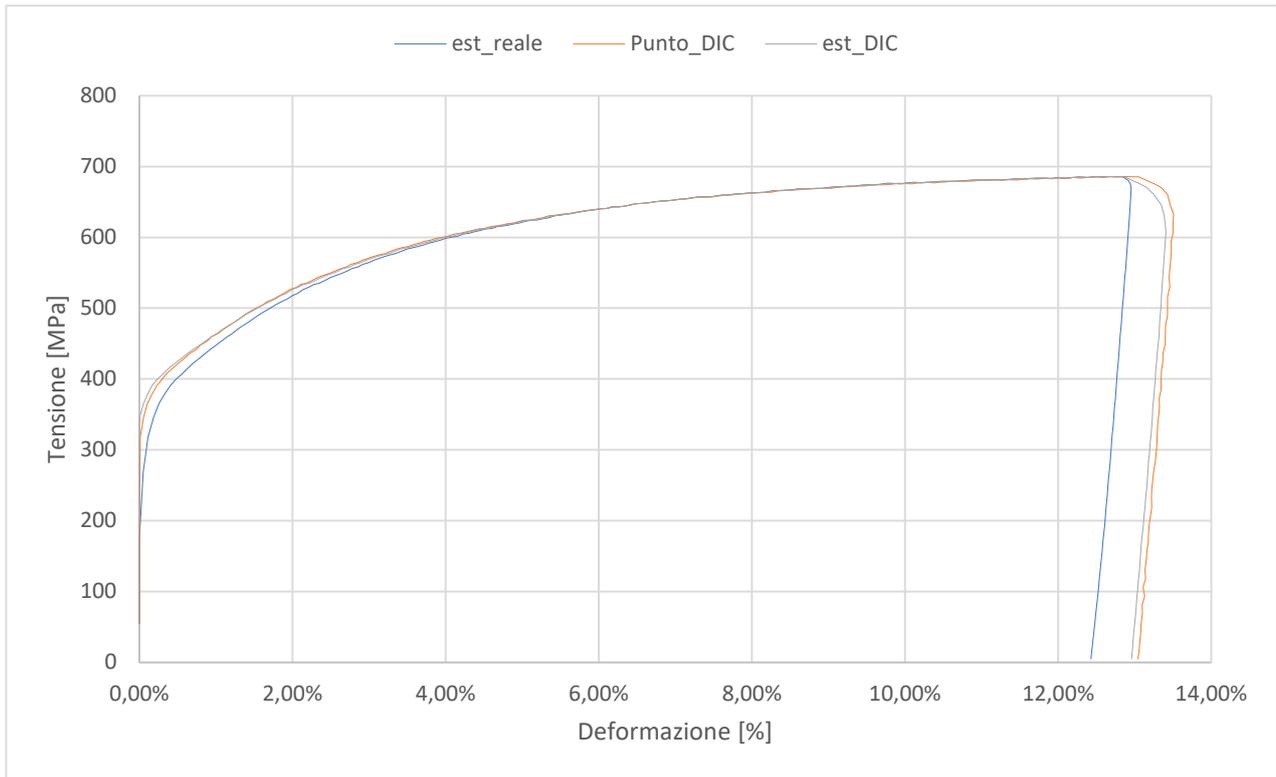


Figura 23 grafico Tensione-Deformazione relativo alla prova di trazione sul provino DP600/4

Come per le prove precedenti in figura 24 viene mostrato il grafico dell'errore assoluto sulla misura delle deformazioni analizzando nell'arco temporale della prova le differenze tra i dati forniti dalla digital image correlation con quelli forniti dall'estensimetro montato sul provino. La curva arancione fa riferimento all'estensimetro virtuale e la curva blu al punto centrale della ROI e sarà, infatti, caratterizzata da un rumore più elevato. Risulta evidente che gli errori sono più elevati rispetto alle prove precedenti. Le due curve sono simili tra loro con un andamento dell'errore praticamente sempre decrescente, il gradino che si trova in concomitanza con la transizione da carico a scarico del provino dimostra che è proprio in questa fase che si accumula la maggior parte dell'errore. Calcolando l'errore assoluto medio per le due curve si ottiene -0.084% per la curva arancione e -0.132% per la curva blu.

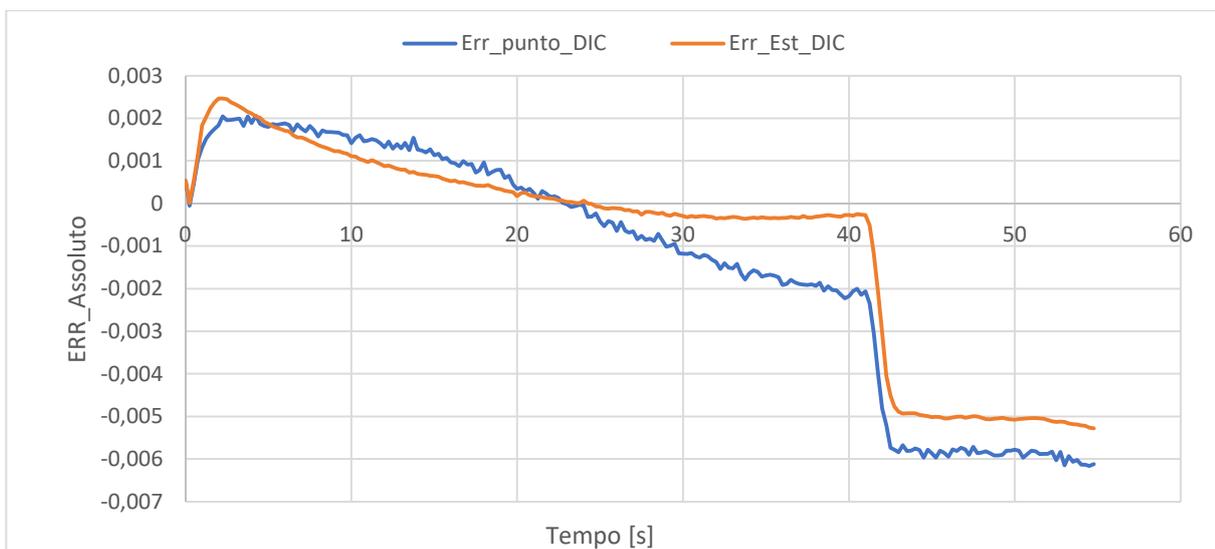


Figura 24 grafico dell'errore assoluto di misure DIC in relazione alla misura con l'estensimetro reale per il provino DP600/4

3.7 Prova di trazione DP600/5

La prova sul campione DP600/5 è stata condotta con la fotocamera posta ad una distanza di circa 10cm, in modo tale da inquadrare esclusivamente la regione interessata dall'estensimetro, il grafico in figura 25 mostra le curve forza-deformazione della prova di trazione in questione, la linea blu è stata tracciata dai dati dell'estensimetro reale posto sul campione, la verde dai dati dell'estensimetro virtuale e la rossa dalle deformazioni in un punto specifico della regione di interesse. Osservando il grafico si può notare come in questo caso le curve risultano quasi sovrapposte per tutta la fase di carico, inoltre a differenza dei casi precedenti, nella fase di scarico solo la curva rossa si discosta accumulando tale differenza durante il passaggio da carico a scarico che risulta meno marcato rispetto alle altre due curve.

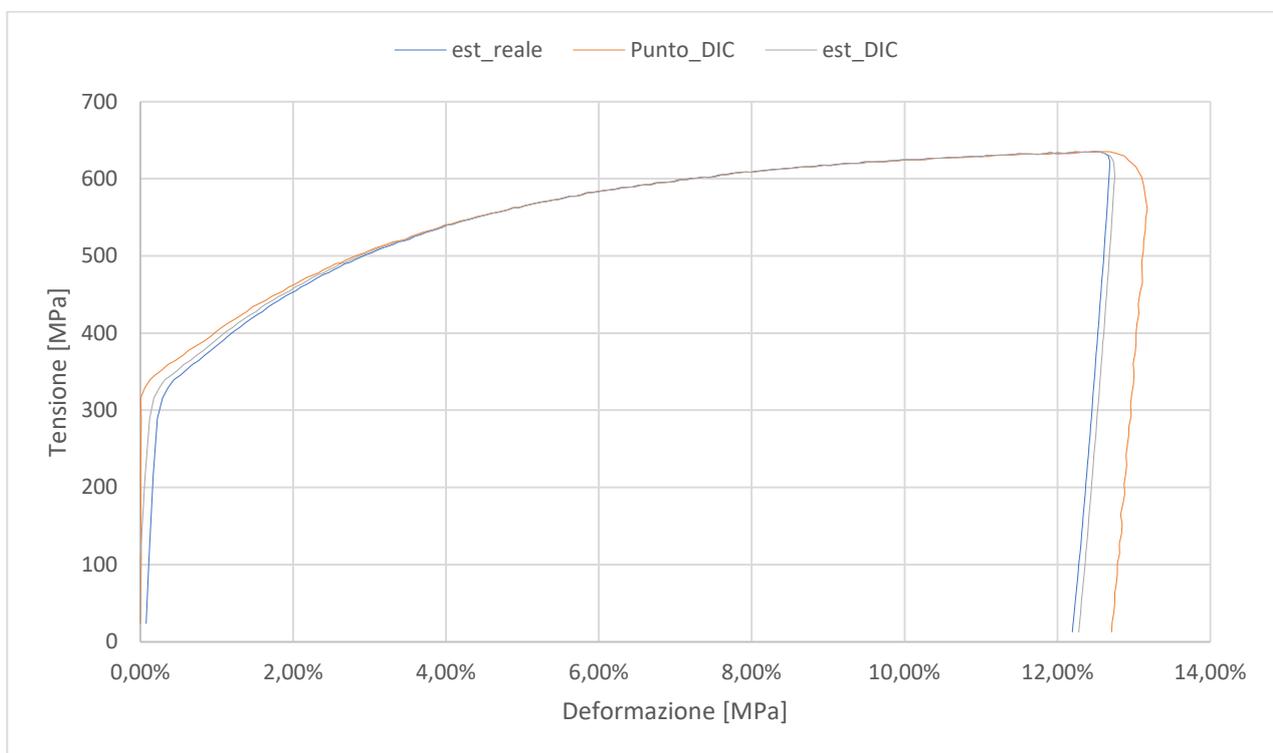


Figura 25 grafico Forza-Deformazione relativo alla prova di trazione sul provino DP600/5

Come per le prove precedenti in figura 26 viene mostrato il grafico dell'errore assoluto sulla misura delle deformazioni analizzando nell'arco temporale della prova le differenze tra i dati forniti dalla digital image correlation con quelli forniti dall'estensimetro montato sul provino. La curva arancione fa riferimento all'estensimetro virtuale e la curva blu al punto centrale della ROI e sarà, infatti, caratterizzata da un rumore più elevato. L'andamento delle due curve è il medesimo ma rispetto alla prova precedente DP600/4 il valore assoluto dell'errore è minore, specialmente nei dati forniti dall'estensimetro virtuale. Il gradino che caratterizza la transizione carico-scarico è anche qui visibile per le due curve ma per la blu risulta essere più marcato in accordo con quello mostrato nel grafico in figura 23.

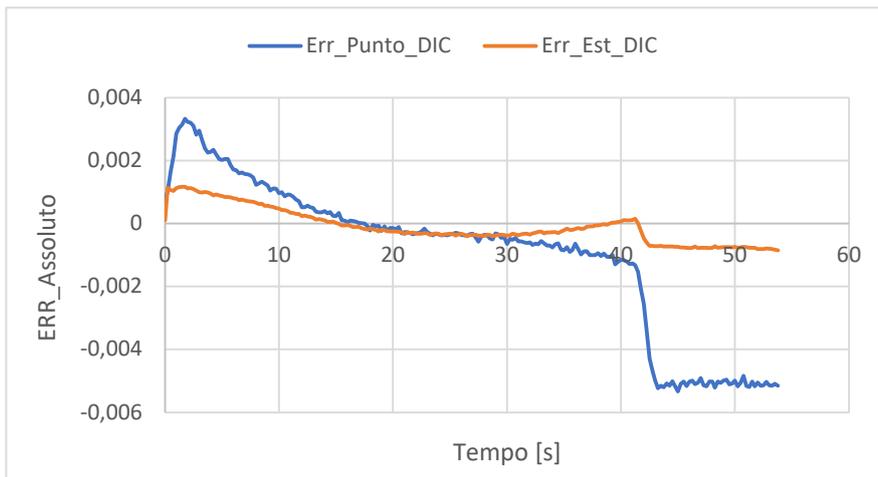


Figura 26 grafico dell'errore assoluto di misure DIC in relazione alla misura con l'estensimetro reale per il provino DP600/6

3.8 Conclusioni

Dall'analisi dei dati effettuata per le 5 prove in esame è possibile constatare la validità delle misurazioni tramite il sistema di acquisizione dati di Digital Image Correlation da noi assemblato. Si può anche concludere che avvicinare la fotocamera ad una distanza di 10 cm dalla superficie del provino non ha portato a miglioramenti dal punto di vista della precisione e dell'accuratezza della tecnica DIC, specialmente nel caso DP600/4 dove si è verificato addirittura un aumento dell'errore assoluto. Acquisire immagini con la fotocamera più vicina permette al sistema DIC di lavorare sulla stessa area ma con un numero maggiore di pixels, per questo motivo ci si aspettava un miglioramento nella valutazione dell'errore di misura che però non è arrivato, è necessario però considerare altri parametri di influenza quali il pattern impresso sulla superficie, il sistema di riferimento adottato e la genesi di deformazioni apparenti nelle immagini.

Per quanto riguarda la qualità del pattern, questa è stata valutata per ogni prova tramite un'analisi specifica del programma GOM Correlate. Nelle prove la qualità del modello è risultata essere sempre più che sufficiente ed anche nella prova che riporta i dati peggiori (DP600/4) risulta essere di 9.4/10. La qualità del modello non è quindi responsabile, se non in minima parte, del comportamento dell'errore assoluto mostrato nei grafici. Un altro problema che sorge avvicinando la telecamera al campione è l'insorgere di deformazioni apparenti dovute ad un allontanamento dalle caratteristiche di un sistema telecentrico, nel nostro caso tali deformazioni dovrebbero essere quasi del tutto annullate dalla tipologia di telecamera adottata, inoltre per ovviare a tale problema sia l'estensimetro virtuale che il punto singolo per la valutazione delle deformazioni sono stati posizionati al centro dell'immagine, dove è presente il minor grado di distorsione. Il candidato principale a spiegare il comportamento dei dati è l'errore nella costruzione/allineamento del sistema di riferimento. Nello specifico l'asse positivo delle x deve essere parallelo all'asse longitudinale del provino, tale allineamento è difficoltoso poiché il provino nelle immagini può risultare leggermente ruotato, inoltre anche se viene effettuato tale allineamento, la linea di misura dell'estensimetro che viene montato sul provino deve essere anch'essa il più coerente possibile nell'allineamento con il sistema di riferimento adottato. Tale problema viene inoltre accentuato nelle immagini relative alle prove DP600/4 e /5 che mostrano la superficie ingrandita. Si pensa dunque che sia un mancato allineamento tra sistemi di riferimento a generare quello che è il comportamento dei risultati ottenuti. Avvicinare quindi il sensore fotografico per migliorare le caratteristiche di precisione e

accuratezza del sistema DIC è teoricamente possibile ma più difficoltoso nella calibrazione dei sistemi di riferimento.

Analizzando i grafici di tutte le prove effettuate si evince inoltre la presenza di un errore sistematico più o meno evidente in concomitanza della transizione tra la fase di carico e di scarico della prova di trazione, è stato ipotizzato che tale scalino sia dovuto ad un assestamento dei braccetti metallici dell'estensimetro sulla superficie del pezzo, la quale essendo ricoperta di vernice risulta essere meno rigida. Questo assestamento viene visualizzato come un gradino nei grafici dell'errore assoluto e come un offset nelle curve forza-deformazione, l'ampiezza di questi dipende oltre che dalla prova in sé anche, come detto in precedenza, da quanto i sistemi di riferimento sono allineati correttamente. È importante però riconoscere che se l'errore fosse effettivamente dato dall'assestamento dei braccetti questo non va ad intaccare le misurazioni effettuate tramite le tecniche di correlazione di immagini digitali ma riguarda solamente i dati che vengono raccolti dall'estensimetro.

4. Effetto Portevin Le Chatelier

4.1 Introduzione

L'effetto Portevin Le-Chatelier (PLC) è un fenomeno di instabilità plastica, si manifesta in alcune leghe metalliche in determinati valori di velocità di deformazione e temperatura. L'effetto PLC viene studiato principalmente nelle prove di trazione e consiste in delle deformazioni plastiche localizzate che si presentano sottoforma di bande che si muovono in vari modi lungo tutto il provino in trazione. L'effetto PLC si verifica in materiali industriali di vitale importanza come leghe di alluminio ed acciai. Le deformazioni plastiche associate all'effetto PLC possono causare problemi sia estetici che strutturali, la maggior parte degli involucri in acciaio o leghe di alluminio possono presentare segni di deformazione localizzata PLC durante i processi di formatura. L'effetto PLC influisce sulle proprietà del materiale, aumenta la tensione di flusso plastico, il carico di rottura ed il tasso di incrudimento, diminuisce la duttilità e la tenacità a frattura. Gli effetti negativi dell'effetto PLC combinati con l'infragilimento legato alle condizioni ambientali possono provocare serie problematiche di cedimento, per materiali strutturali diventa quindi importante rilevare la loro suscettibilità all'effetto PLC ed effettuare un regolare monitoraggio dopo la messa in servizio.

L'effetto PLC viene scoperto nel 1909 e fin da subito diventa oggetto di un'intensa attività di ricerca. In aiuto alla prova di trazione convenzionale, negli anni sono state applicate varie tecniche che permettono di studiare le bande di deformazione localizzata e come queste si evolvono nel tempo, si parla di tecniche ottiche (DIC), acustiche, termografiche, magnetiche, elettromagnetiche ed elettrochimiche. Dagli studi empirici si può dedurre che le deformazioni plastiche localizzate, comunemente denominate "bande" sono causate principalmente da un meccanismo microscopico che consiste in un'interazione dinamica che può avvenire tra le dislocazioni e gli atomi di soluto presenti nella soluzione solida "dislocation pinning by solutes", i quali tendono a migrare verso le dislocazioni, dove la loro energia si abbassa, oppure interazioni tra le dislocazioni stesse che nucleano velocemente a seguito dell'incrudimento, sostanzialmente si formano dei blocchi ad un flusso plastico regolare andando a formare bande di deformazione localizzata, tali blocchi vengono superati con un aumento di tensione che sblocca il moto delle dislocazioni che corrisponde macroscopicamente alla presenza e al movimento delle bande che può essere osservato nelle prove sperimentali.

4.2 Parametri di influenza

I principali parametri che influenzano l'effetto PLC sono la temperatura e la velocità di deformazione (figura 27 e 28). La temperatura poiché il calore introdotto fornisce l'energia necessaria a facilitare il movimento dei difetti puntuali, influenza quindi la mobilità dei soluti e delle vacanze nel campione metallico. Allo stesso modo la velocità di deformazione altera il numero e la mobilità delle dislocazioni in un materiale sotto stress. In generale quando le dislocazioni si muovono liberamente senza interagire tra loro o con difetti puntuali, si osserva un flusso plastico costante, in caso contrario il movimento delle dislocazioni viene disturbato ed il flusso plastico diventa instabile. Temperatura e velocità di deformazione non sono gli unici parametri che influenzano la stabilità del flusso plastico, essa dipende anche da parametri come la rigidità e la geometria della macchina di prova, la qualità superficiale dei campioni; proprietà intrinseche come la composizione chimica della lega, il reticolo cristallino, la struttura, il tipo e la quantità dei soluti, la densità di dislocazione e le dimensioni del grano.

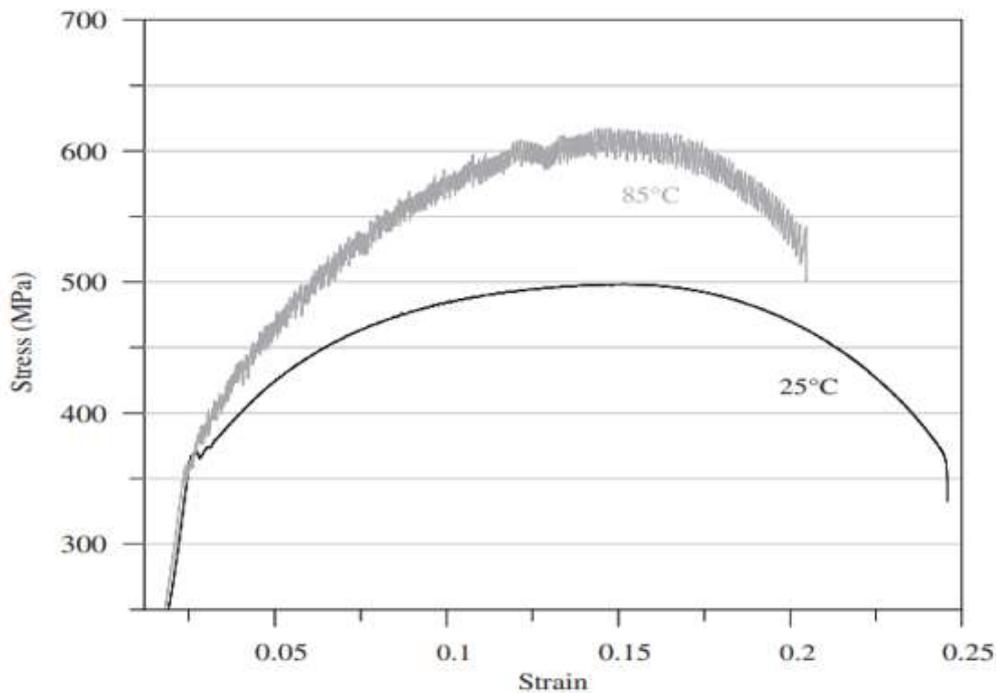


Figura 27 curve sforzo deformazione rappresentanti il flusso plastico regolare e seghettato di un acciaio a basso contenuto di carbonio a temperature di 25° e 85° ed uno strain rate di $1,6 \times 10^{-6} s^{-1}$ [7]

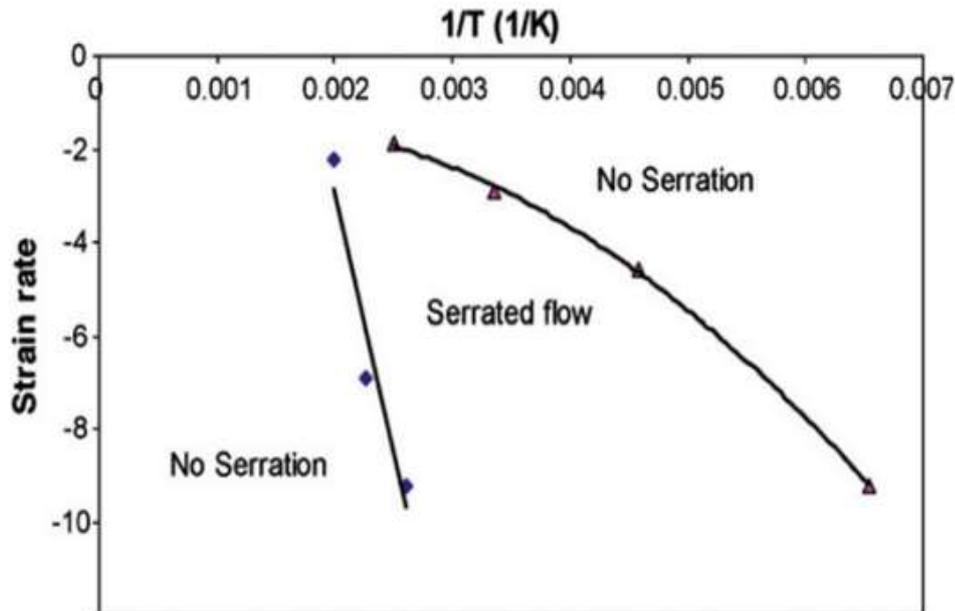


Figura 28 zona di temperatura e velocità di deformazione in cui si presentano effetti PLC in una lega di alluminio AA 5083 [7]

4.3 Effetto PLC

Durante le prove di trazione il flusso plastico instabile che rappresenta l'effetto PLC si manifesta nelle curve tensione-deformazione (sigma-epsilon) come delle dentellature di frequenza e ampiezza caratteristiche a seconda del tipo di bande che si vengono a creare, questo andamento irregolare, discontinuo e seghettato viene anche chiamato jerky flow. Tale effetto può presentarsi sia in leghe interstiziali che sostitutive. La caratteristica principale di tale effetto è una deformazione localizzata in una sezione del provino ed il movimento di questa deformazione localizzata lungo il provino al crescere della sollecitazione. La deformazione localizzata si presenta come una banda di pochi millimetri di spessore, inclinata di circa 55° rispetto all'asse di trazione. Ad ogni dentellatura della curva corrisponde un drop di tensione dovuto essenzialmente ad un movimento a scatti e non continuo del flusso plastico, infatti, il movimento delle dislocazioni viene ostacolato da atomi di soluto, precipitati ed altre dislocazioni creando degli ancoraggi, dove il loro superamento viene associato ad una specifica caduta di tensione, ed è proprio in questi punti che si manifestano le bande plastiche. Osservazioni sperimentali hanno dimostrato che le bande PLC sono di diversi tipi e che ci possono essere delle transizioni da un tipo di banda ad un altro al variare della temperatura e della velocità di deformazione.

4.4 Tipologia di bande di deformazione plastica localizzata

Esistono vari tipi di bande di deformazione plastica indotte dall'effetto PLC, ognuno di questi ha una frequenza e un'ampiezza caratteristica e quindi ad ogni tipo è associata una forma di dentellatura ben definita nella curva sforzo-deformazione della prova di trazione, come illustrato nelle figure 29,30,31,32,33 e 34. Comunemente si distinguono tre tipologie principali di banda:

bande di tipo A, bande di tipo B e bande di tipo C. uno stesso materiale può presentare diverse tipologie di bande plastiche al variare dei parametri di temperatura e velocità di deformazione.

- Le bande di tipo A, (figura 29-30) si propagano lungo il provino in modo continuo come un'onda longitudinale, solitamente si formano alle basse temperature e alte velocità di deformazione. Tra tutte le categorie di bande sono quelle che presentano l'andamento più irregolare con piccole cadute di tensione posizionate arbitrariamente lungo la curva sforzo-deformazione della prova di trazione. Le bande di tipo A vengono suddivise in due ulteriori sottogruppi: le bande di tipo A1 quando si evidenzia una caduta di tensione repentina e di tipo A2 quando la caduta di tensione è più graduale. Questo tipo di bande possono propagare arbitrariamente lungo il campione. Degli studi, effettuati tramite termografia IR, hanno mostrato che la propagazione avviene principalmente dall'estremità fissa verso l'estremità mobile del campione, le bande propagano fino alla formazione di un'onda stazionaria che causa poi la strizione del campione. Le bande che vengono riflesse all'estremità del campione o che attraversano difetti del materiale subiscono una variazione di inclinazione, sono proprio le resistenze dei difetti che arrestano momentaneamente le bande a creare quei salti di tensione lungo la curva sforzo-deformazione tipici delle bande di tipo A.

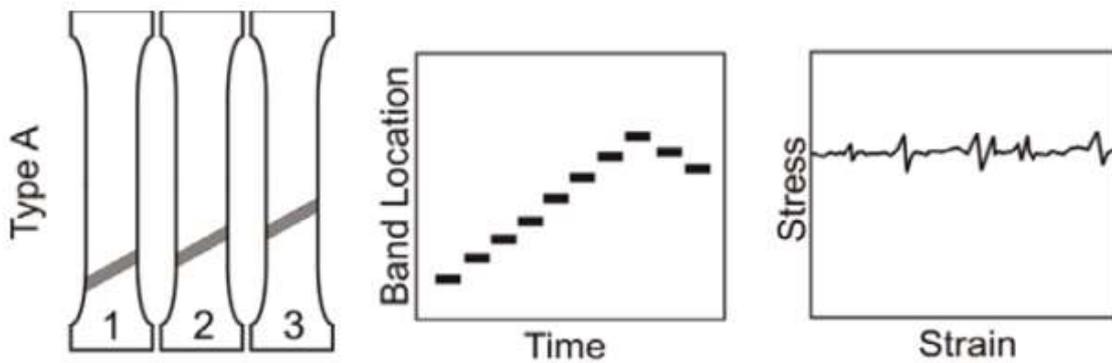


Figura 29 schemi del movimento, orientamento e delle caratteristiche della curva di trazione a deformazione controllata delle bande PLC di tipo A [7].

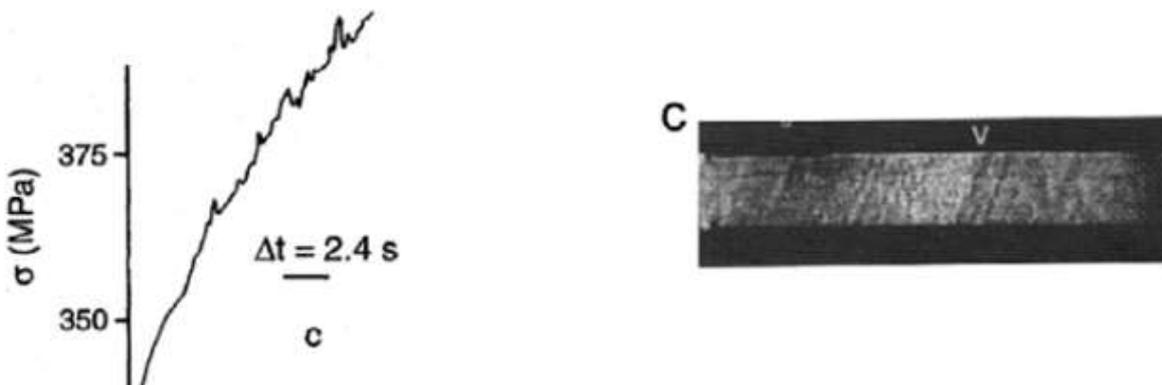


Figura 30 curva sforzo tempo e fotografia di bande PLC di tipo A di una lega Al-Mg a $T = 300K$ e $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} s^{-1}$ [7].

- Le bande di tipo B, si formano solitamente in condizioni di temperatura e velocità di deformazione intermedie, sono caratterizzate da cadute di tensioni maggiori rispetto alle bande di tipo A e l'ampiezza e la frequenza di oscillazione è più regolare, le bande di tipo B nucleano più velocemente delle bande di tipo A, possono farlo in posizioni casuali e la loro propagazione è continua per brevi tratti e discontinua e saltellante se si considera l'intera lunghezza utile del provino (figura 31 e 32), nelle fasi iniziali dell'effetto PLC è possibile osservare delle multi-bande che nucleano simultaneamente o durante la propagazione di un'altra banda. Comunemente a quelle di tipo A anche le bande di tipo B propagano fino alla formazione di una banda stazionaria nella quale si concentra una deformazione plastica di taglio che continua fino alla rottura. Anche queste bande cambiano inclinazione se vengono riflesse alle estremità o se attraversano precipitati o altri difetti che arrestano momentaneamente la banda.

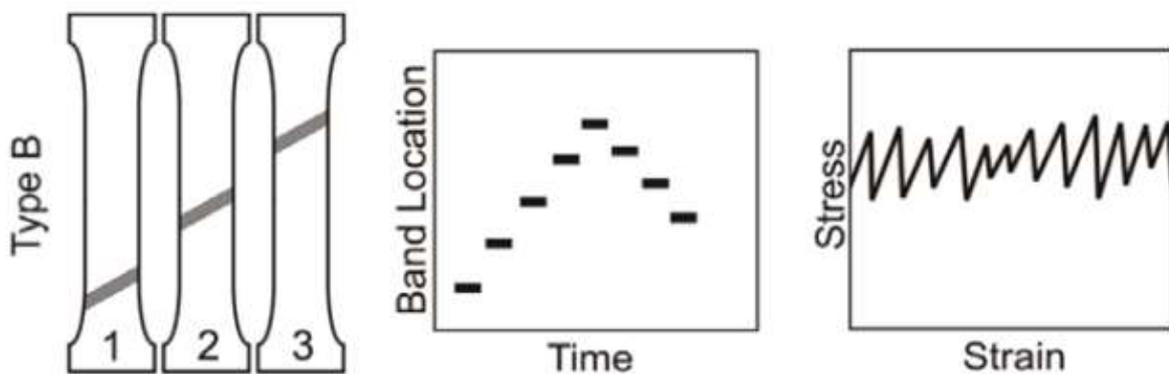


Figura 31 schemi del movimento, orientamento e delle caratteristiche della curva di trazione a deformazione controllata delle bande PLC di tipo B [7].

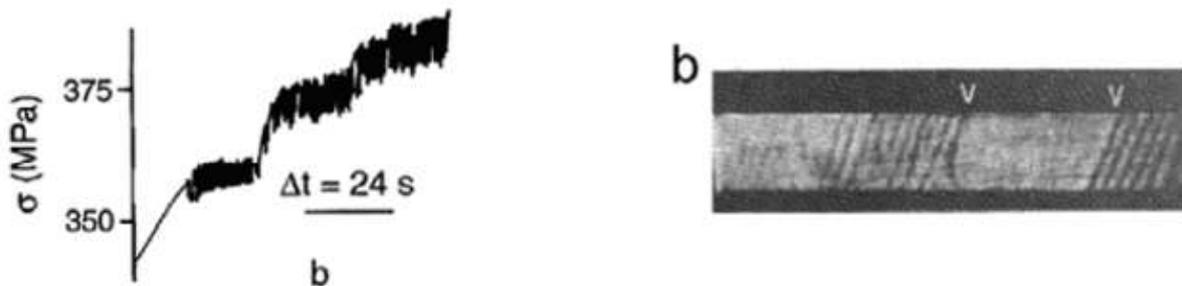


Figura 32 curva sforzo tempo e fotografia di bande PLC di tipo B di una lega Al-Mg a $T= 300K$ e $\dot{\epsilon}= 5 \times 10^{-4} s^{-1}$ [7].

- Le bande di tipo C, (figura 33-34) sono abbastanza regolari ed hanno un'ampiezza ed una frequenza approssimativamente costanti ed anche piuttosto elevate. Si verificano solitamente a velocità di deformazione basse ed a temperature elevate. A differenza dei tipi A e B le multi-bande si verificano più frequentemente. Questa tipologia di bande non propaga ma cambia inclinazione di continuo, le elevate cadute di tensione tipiche delle dentellature di tipo C sono riconducibili alle deformazioni plastiche localizzate che si sviluppano nella nucleazione della banda stessa che può avvenire in maniera casuale lungo tutta la lunghezza utile del provino.

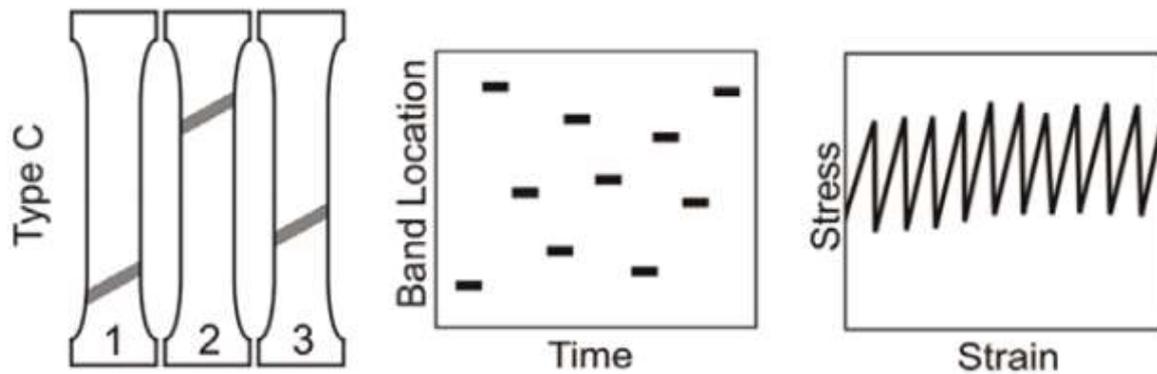


Figura 33 schemi del movimento, orientamento e delle caratteristiche della curva di trazione a deformazione controllata delle bande PLC di tipo C [7].



Figura 34 curva sforzo tempo e fotografia di bande PLC di tipo C di una lega Al-Mg a $T= 300K$ e $\dot{\epsilon}= 5 \times 10^{-3} s^{-1}$ [7].

4.5 Caratteristiche delle bande

Le bande PLC possono essere caratterizzate anche da un set di parametri di banda, quali l'angolo di banda, la larghezza, la velocità di propagazione e la deformazione locale nella banda. I valori di questi parametri subiscono l'effetto scala, quindi dipendono anche dalle dimensioni del campione in esame, inoltre per velocità della banda si fa riferimento solamente alle bande di tipo A.

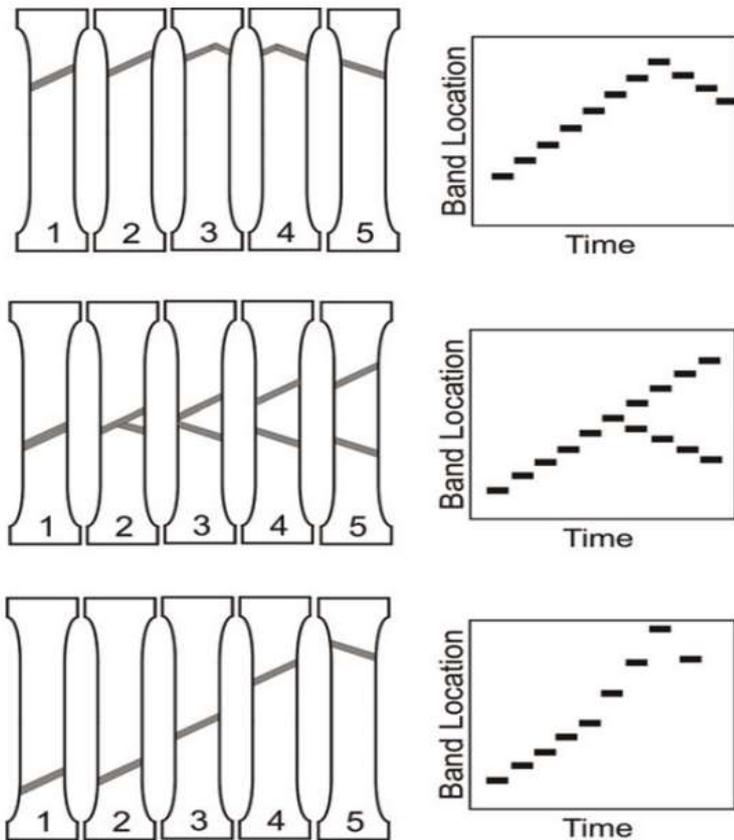


Figura 35 schema di riflessione, scissione ed emersione sequenziale di bande PLC (tipo A e tipo B) [7]

- Angolo di banda, gli angoli di banda vengono riferiti all'asse longitudinale del provino, l'asse lungo il quale viene applicato il carico durante la prova di trazione, possono essere determinati con precisione attraverso metodi ottici, gli angoli variano di solito tra i 50° e i 70° , valori più precisi misurati in studi dedicati rilevano angoli tra i 55° e i 57° , tali valori sono anche in accordo con quello che viene considerato l'angolo teorico di 60° [7].

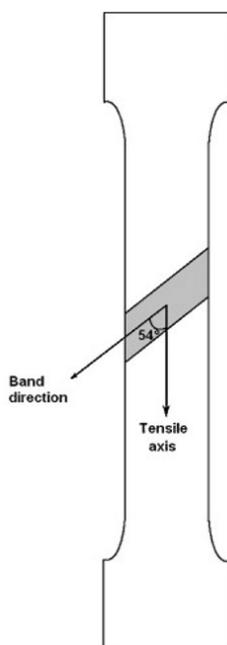


Figura 36 definizione dell'angolo di banda in relazione all'asse di trazione [4].

- La larghezza della banda PLC dipende da diversi parametri: spessore del campione, deformazione, velocità di deformazione e tipo di banda. La larghezza della banda varia da metà dello spessore del campione fino al doppio dello spessore con una relazione quasi lineare.
- Velocità della banda, questo parametro viene considerato esclusivamente per le bande di tipo A, studi dimostrano una diminuzione della velocità delle bande all'aumentare della velocità di deformazione con una legge esponenziale, solitamente per le bande plastiche di tipo A si assume una velocità di propagazione costante ed eventuali fluttuazioni vengono considerate rumore sperimentale. Le velocità di propagazione possono variare da pochi mm/s fino a valori dell'ordine di 100 mm/s.
- La deformazione localizzata, la quale viene misurata in punti percentuale rispetto alla deformazione totale del provino, il valore dipende dalla velocità di deformazione ed anche dal tipo di banda, quelle di tipo A arrivano a 2-3 punti percentuali in più rispetto alla deformazione totale mentre bande di tipo C possono arrivare sino a 2-3 volte il valore della deformazione totale.

5. Acciai TWIP

Scoperti da Sir Robert Hadfield nel 1888, gli acciai TWIP (TWinning Induced Plasticity) sono leghe ternarie Fe-Mn-C austenitiche ad alto contenuto di manganese e sono attualmente uno dei materiali più interessanti per applicazioni strutturali, specialmente nell'industria automobilistica, grazie alla loro combinazione unica di resistenza e allungamento, come riassunto in figura 37. In tal senso nel primo decennio degli anni 2000 si è registrato un forte aumento di pubblicazioni scientifiche e di brevetti, con nuove ricerche che propongono processi innovativi per fondere acciai TWIP sempre più altamente legati.

Negli ultimi vent'anni, gli acciai Fe-Mn-C austenitici ad alto contenuto di manganese sono stati oggetto di un'intensa attività scientifica, non solo per l'interesse delle case automobilistiche ma anche per comprendere i complessi e molteplici meccanismi di deformazione plastica che spiegano le loro eccellenti prestazioni meccaniche.

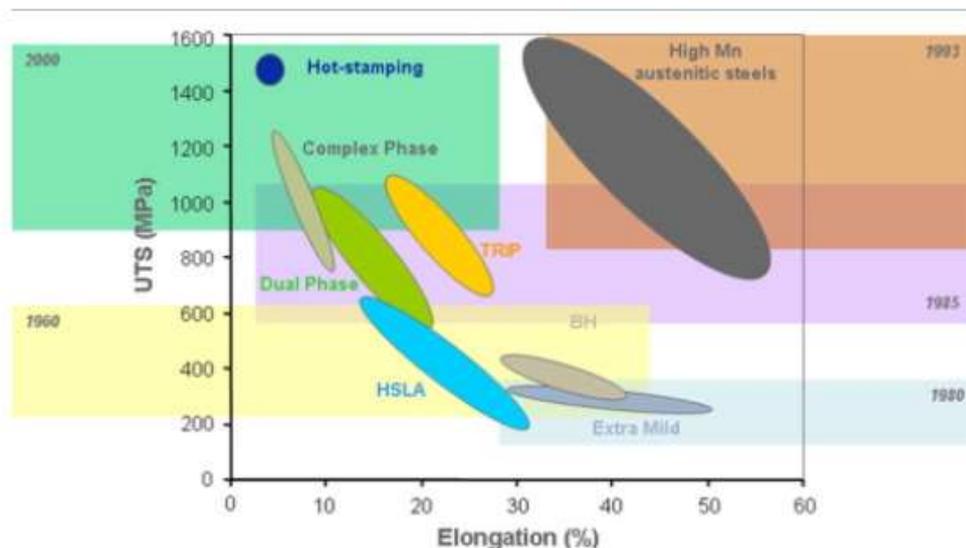


Figura 37 Allungamento a rottura a trazione in funzione del carico di rottura per acciai per applicazioni automobilistiche (gli anni indicati corrispondono all'inizio approssimativo dello sviluppo reale da parte dei produttori di acciaio) [5].

5.1 Composizione chimica

Non esiste uno standard per quanto riguarda la definizione della composizione chimica di acciai FeMnC TWIP. L'equazione di Schumann (12) mostra quello che è il confine stabile dell'austenite a 20°C quindi la combinazione di carbonio e manganese necessaria per sopprimere la martensite; tuttavia, questa equazione non è in grado di differenziare le leghe con plasticità indotta da geminazione dalle altre.

$$wt. \% Mn = -20wt. \% C + 32 \quad (12)$$

In tal senso studi hanno dimostrato che contenuti di carbonio superiori all'1,2% in peso non sono utili per via della formazione di cementite nell'austenite e che senza carbonio il contenuto di manganese deve essere superiore al 30% [5].

5.2 Meccanismi di deformazione plastica

Gli acciai TWIP presentano altri tipi di meccanismi deformativi in competizione con lo scorrimento delle dislocazioni, la geminazione e la formazioni di ϵ -martensite, entrambi i meccanismi sono fortemente legati alla SFE (Stacking Fault Energy), la quale controlla anche la morfologia finale e lo spessore dei geminati.

La Stacking Fault Energy (SFE) è l'energia che viene associata ad un difetto di impilamento, nello specifico in una struttura cristallina composta dalla sovrapposizione di piani a massima densità atomica, può nascere un difetto dovuto ad una alterazione della sequenza di impilamento, denominato Stacking Fault, come conseguenza del difetto si viene a creare una dislocazione, la quale tende a dissociarsi in due dislocazioni parziali di segno uguale che delimitano il difetto di impilamento (figura 38). Se la distanza tra le due dislocazioni è elevata il materiale possiede una bassa energia di Stacking Fault, se la distanza è invece bassa, il materiale possiede un'elevata energia di Stacking Fault. La SFE governa i meccanismi di deformazione plastica ed in generale un'elevata SFE corrisponde ad un'elevata duttilità del materiale e viceversa.

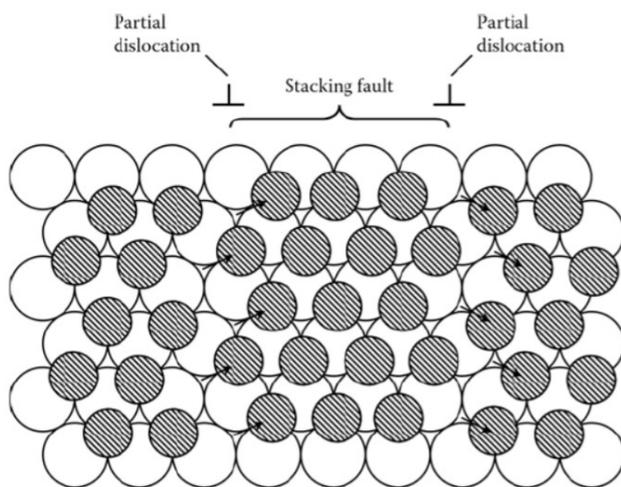


Figura 38 Stacking fault delimitato dalle due dislocazioni parziali in un materiale a bassa SFE

Il principale parametro di influenza che determina la tipologia di meccanismo di deformazione è la temperatura. In un acciaio TWIP per elevate temperature ed alta SFE il meccanismo favorito è lo scorrimento e il climb delle dislocazioni per via dell'attivazione di più sistemi di scorrimento. A temperature più basse si inibisce il fenomeno del cross-slip delle dislocazioni e viene favorita la dissociazione delle dislocazioni con una conseguente diminuzione della SFE, ciò consente alla geminazione di avvenire come un meccanismo competitivo allo scorrimento delle dislocazioni poiché il costo energetico diventa sufficientemente basso. Per temperature ancora più basse la geminazione viene sostituita dalla formazione di ϵ -martensite. I due meccanismi di deformazione sono mostrati in figura 39.

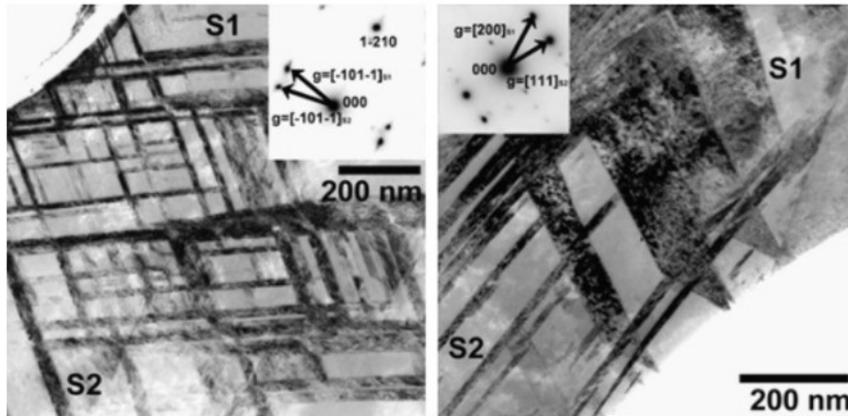


Figura 39 Micrografie TEM della microstruttura di un acciaio deformato Fe-22Mn-0.6C a 77 K (piastrine ϵ -martensite) a sinistra ed a temperatura ambiente (gemelli meccanici) a destra [5].

5.3 Geminazione

Una bassa SFE è una condizione necessaria per ottenere dei geminati, ma non è sufficiente, alcuni studi dimostrano che leghe binarie Fe-30Mn si deformano solo grazie al moto delle dislocazioni a differenza di leghe quali Fe-22Mn-0.6C, Fe-17Mn-0.9C, Fe-12Mn-1.2C che mostrano anche geminazione. Il carbonio sembra essere quindi il parametro che innesca i geminati andando a diminuire, rispetto alle leghe FeMn, la Critical Resolved Shear Stress (CRSS) relativa alla geminazione.

5.4 DSA ed effetto PLC

La caratteristica più riconoscibile dell'interazione tra atomi di carbonio e mobilità delle dislocazioni nelle leghe FeMnC è il verificarsi del fenomeno di invecchiamento dinamico della deformazione in un intervallo ristretto di temperature intorno alla temperatura ambiente. A questa temperatura e con velocità di deformazione quasi statiche un acciaio Fe-22Mn-0.6C presenta tipiche dentellature nella curva sforzo-deformazione (figura 40). La presenza di questo “flusso a scatti” è ben nota in letteratura, viene descritta in termini di effetto Portevin Le Chatelier (PLC) ed è ciò che si vuole osservare tramite il sistema di Digital Image Correlation adottato. Si pensa che questo fenomeno sia correlato all'interazione tra moto delle dislocazioni nel piano e atomi mobili di soluto, e viene denominato meccanismo di Dynamic Strain Aging (DSA). Gli acciai austenitici privi di carbonio non mostrano infatti questo effetto. La maggior parte degli studi sperimentali riporta bande PLC di tipo A, le altre due tipologie, B e C sono state raramente riportate in letteratura se non ad alte temperature.

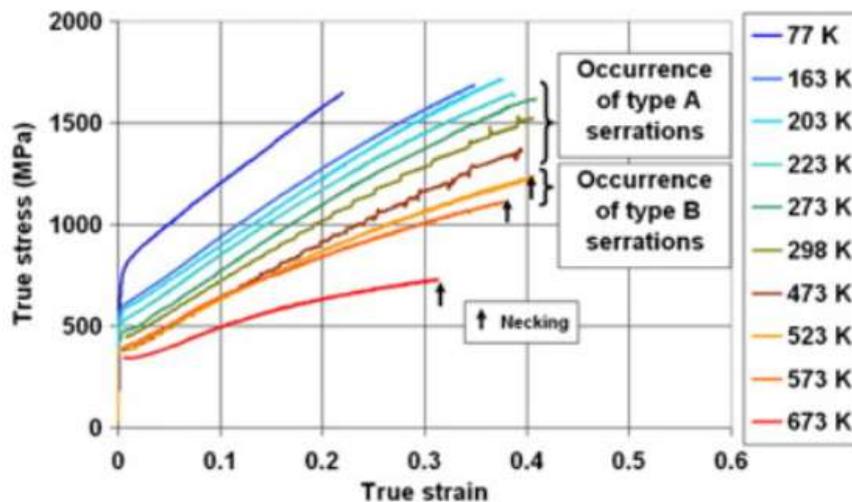


Figura 40 curva sforzo-deformazione vero di una lega Fe-22Mn-0.6C a diverse temperature [5].

Gli studi sulla localizzazione della deformazione nelle bande PLC sono rilevanti per le applicazioni industriali, poiché le bande potrebbero portare a guasti imprevisti. Tuttavia, è stato dimostrato che la localizzazione non è osservata in carichi biassiali o dopo lo stampaggio di componenti reali. Le bande però possono comunque controllare la modalità di frattura.

5.5 Incrudimento e tensione di snervamento

L'elevatissimo incrudimento degli acciai TWIP è la caratteristica più studiata in queste leghe. Tra tutti i meccanismi atti a spiegare l'elevato grado di incrudimento, solo la presenza di geminati come ostacolo alle dislocazioni è stata presa in considerazione, questo perché in assenza di geminazione l'incrudimento risulta inferiore ed inoltre una lega che gemina presenta un elevato tasso di incrudimento indipendentemente dalla presenza del carbonio in soluzione solida. Mentre l'effetto PLC nelle leghe FeMnC è riconducibile al meccanismo DSA, la geminazione risulta essere il meccanismo responsabile dell'elevato incrudimento di questi acciai. In tal senso sono stati sviluppati molteplici modelli di incrudimento che prevedono l'arresto delle dislocazioni in presenza di bordi di grano e di geminato.

Un limite degli acciai TWIP è il carico di snervamento relativamente basso rispetto a rispetto ad altri acciai alto resistenziali (AHSS). Essendo questa una caratteristica importante per l'implementazione di questi acciai nel settore automobilistico, possono essere utilizzate diverse strategie per aumentare il limite elastico, come l'affinamento del grano e la pre-deformazione mediante laminazione. Nello specifico il comportamento degli acciai TWIP in funzione della dimensione del grano può essere descritto da una legge di Hall Petch standard ed è mostrato in figura 41, tale metodo ha però un'importante limite industriale che non permette al grano di avere una dimensione inferiore a 2.5 μm , ottenendo quindi un carico di snervamento massimo dell'ordine di 450 MPa. Attraverso la pre-deformazione si possono ottenere tensioni di snervamento dell'ordine di 1000 MPa, tuttavia, seguendo questo approccio si riscontrano due problemi: il coefficiente di incrudimento istantaneo n si riduce notevolmente (da 0,4 a 0,18) e si introduce una notevole anisotropia nelle proprietà del materiale che si traduce in una perdita di duttilità particolarmente problematica [5].

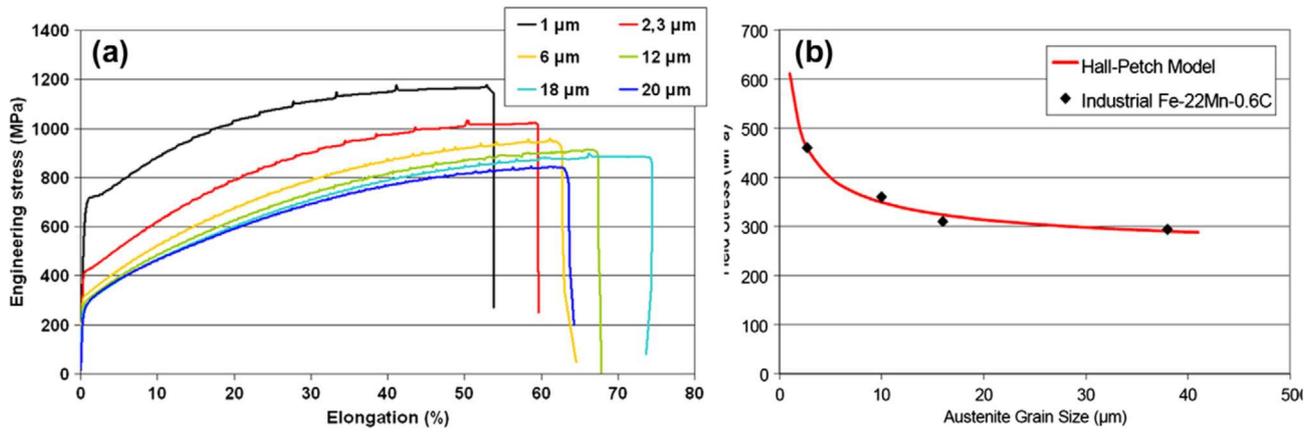


Figura 41 curve sforzo-deformazione della lega Fe-22Mn-0.6C per diverse dimensioni del grano (a) Tensione di snervamento in funzione della dimensione del grano (b) [5].

6. Prove di trazione su provini di acciaio TWIP

In seguito alle prove di trazione effettuate su provini di acciaio DP600, per verificare la validità delle misure acquisite tramite il sistema DIC da noi realizzato, si è deciso di sottoporre a trazione provini di acciaio TWIP. Lo scopo di queste prove di trazione è quello di andare a studiare, tramite la correlazione di immagini digitali, la deformazione plastica localizzata che si sviluppa nei provini, nello specifico si vuole caratterizzare l'effetto Portevin-Le Chatelier dove presente, andando a identificare la tipologia di bande plastiche e come la deformazione sia distribuita all'interno di esse, questa analisi è possibile grazie alla correlazione di immagini digitali che permette di ottenere l'intero campo di spostamenti e deformazioni della superficie del provino, è quindi possibile tramite la tecnica DIC analizzare nel tempo la deformazione in un punto specifico, analisi che non è possibile utilizzando l'estensimetro, il cui valore di deformazione fa riferimento ad un tratto di provino che può essere più o meno esteso.

Per queste prove sono stati utilizzati otto provini di acciaio TWIP prodotto dall'azienda metallurgica Posco e verranno denominati TWIP1, TWIP2, TWIP3, TWIP4, TWIP5, TWIP6, TWIP7, TWIP8. Con un calibro sono state misurate e verificate le dimensioni nominali dei provini che risultano essere uguali tra di loro, la lunghezza utile dei provini è di 110 mm, la larghezza di 20 mm e lo spessore è di 1,45 mm. L'analisi chimica dei provini di acciaio TWIP in questione è stata effettuata in studi precedenti [8],[9] ed è riportata nella seguente tabella:

C	Mn	Al	Ni	Cr	Si	Cu	Nb	V	P	S
0.65	18.3	1.5	0.41	0.023	0.05	0.045	n.m.	0.04	0.025	0.011

Tabella 3 Composizione chimica degli acciai esaminati (percentuali in peso, n.m.: non misurato) [8]

l'acciaio TWIP utilizzato presenta una microstruttura austenitica con una dimensione del grano di circa $4\ \mu\text{m}$ e la durezza misurata è di $261\pm 17\text{HV}$ [9].

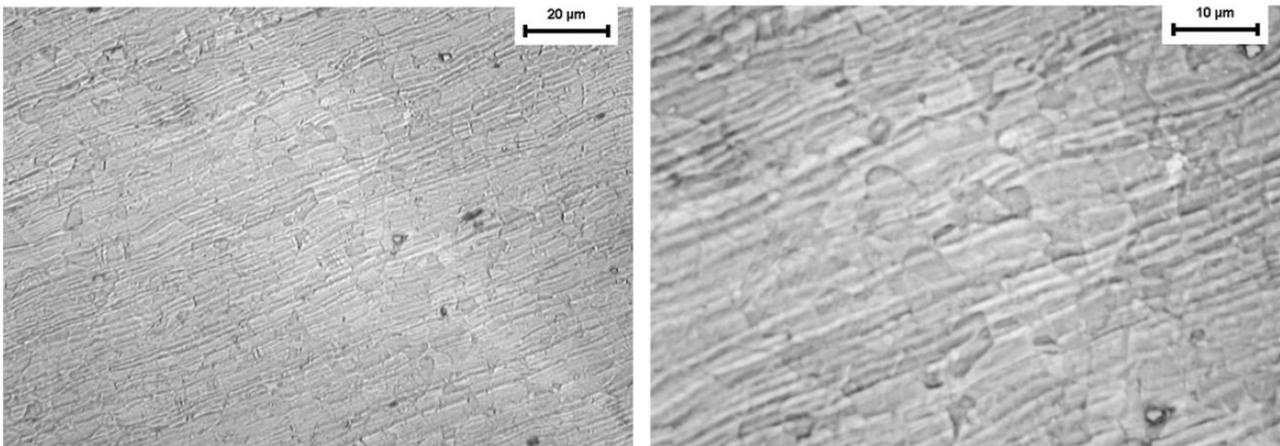


Figura 42 Microstruttura dell'acciaio TWIP esaminato, come rivelata dalla metallografia ottica ad ingrandimento crescente. [9]

I provini sono stati lavati con acqua e poi con acetone per ottenere una superficie libera dai residui di colla dello scotch che teneva insieme il set di provini, una volta asciugati su una delle due superfici libere del provino è stata applicata la vernice, come descritto nelle sezioni precedenti per ottenere un pattern casuale. Si è quindi lasciato asciugare le vernici. Non tutte le prove da noi effettuate su questo set di provini sono state realizzate nello stesso giorno. Questo per via del cospicuo intervallo di tempo che alcune prove hanno richiesto poiché condotte ad una velocità del

pistone molto bassa. Per questo motivo è stato necessario smontare e rimontare il sistema DIC sulla macchina di trazione diverse volte. Con lo scopo di ottenere la miglior qualità possibile nelle immagini acquisite e di confrontare i dati di prove differenti, si è deciso, per ogni prova, di effettuare tutte le calibrazioni necessarie ad ottenere immagini di qualità mantenendo costante, per tutte le prove, la distanza del sensore fotografico dalla superficie del provino. La distanza tra la fotocamera e il campione è di 30 cm, viene presa in modo tale che nell'immagine di riferimento sia visibile il provino nella sua interezza, si mantiene grosso modo lo stesso settaggio utilizzato per le prime tre prove con i provini di acciaio DP600. A differenza delle prove già effettuate, i provini di acciaio TWIP, essendo più duttili, presentano un allungamento molto maggiore rispetto ai DP600; quindi, parte del provino durante la trazione si sposta fuori dall'inquadratura e non sarà visibile nelle immagini deformate. Tutte le analisi, in tal senso, sono state condotte relativamente alla sezione di provino che rimane nell'inquadratura della fotocamera fino alla fine della prova che risulta essere, comunque, più della metà del provino stesso.

Tutte le prove sono state effettuate a temperatura ambiente, si è cercato poi di usufruire in maggior misura della luce artificiale in modo da evitare problemi legati alla variazione di luce naturale. Le prove sono state effettuate a diverse velocità del pistone: 4 mm/s, 0.4mm /s, 0.04 mm/s e 0.004 mm/s; ogni velocità è stata testata per almeno due provini. Per raccogliere la giusta quantità di dati, quindi per evitare perdite di informazioni utili e per minimizzare i tempi di elaborazione del calcolo; vengono modificati anche i valori della frequenza MTS di acquisizione dei dati e della frequenza di acquisizione delle immagini in funzione naturalmente della velocità del pistone. Tutti i valori utilizzati per le varie prove sono riassunti nella tabella 4 in basso. dalla macchina di trazione vengono acquisiti, in file di tipo testo, i dati relativi al carico e alla corsa in funzione del tempo della prova. Questi dati vengono poi analizzati su excel, sono quindi confrontati e completati con quelli provenienti dalla digital image correlation. Tramite il programma GOM Correlate sono state effettuate diverse analisi, riguardanti la qualità del modello, la deformazione, la velocità di deformazione e la velocità della superficie di interesse; di seguito verranno riportati i risultati ottenuti dalle prove più lente a quelle più veloci in modo tale da discutere ed analizzare al meglio l'influenza della velocità della deformazione indotta.

Nome	velocità pistone	freq. MTS	freq. DIC
	mm/s	Hz	Hz
TWIP 1	0,4	16	4
TWIP 2	4	128	10
TWIP 3	0,04	2	0,5
TWIP 4	0,04	2	0,5
TWIP 5	0,4	16	4
TWIP 6	4	128	10
TWIP 7	0,004	0,2	0,05
TWIP 8	0,004	0,2	0,05

Tabella 4 velocità del pistone e velocità di acquisizione dati per ogni prova effettuata

6.1 Prove alla velocità di 0.004 mm/s

La settima e l'ottava prova relativa agli acciai TWIP sono state condotte ad una velocità del pistone mobile di 0.004 mm/s, la durata della settima prova è di 5 ore e 48 minuti mentre quella dell'ottava è di 5 ore e 4 minuti. Il grafici presenti in figura 43 e 44 rappresentano lo studio relativo alla qualità del modello presente nelle immagini acquisite e fanno riferimento a cinque/sei punti di interesse equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. Tale analisi è necessaria per capire quanto le immagini acquisite tramite il sistema DIC siano adatte ad essere sottoposte ad un calcolo di correlazione digitale. Nella prova TWIP 7, la qualità del modello è in media di 6 rispetto ad un valore ottimale di 10, durante l'arco temporale della prova l'andamento della qualità è leggermente decrescente. Non ci sono segni di variazioni di qualità riconducibili ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata, questo perché la prova è stata condotta ad una velocità del pistone mobile molto bassa di 0.004mm/s. si nota come per la prima metà della prova la qualità del modello risulta più instabile, sono infatti presenti delle oscillazioni e andando ad analizzare le immagini relative a tali momenti, queste sono riconducibili a delle variazioni dell'intensità luminosa che però non influiscono negativamente sulla qualità del modello nelle immagini ed inoltre il calo repentino di qualità nella parte finale della prova è provocato dalla rottura del campione che avviene al di fuori dell'inquadratura.

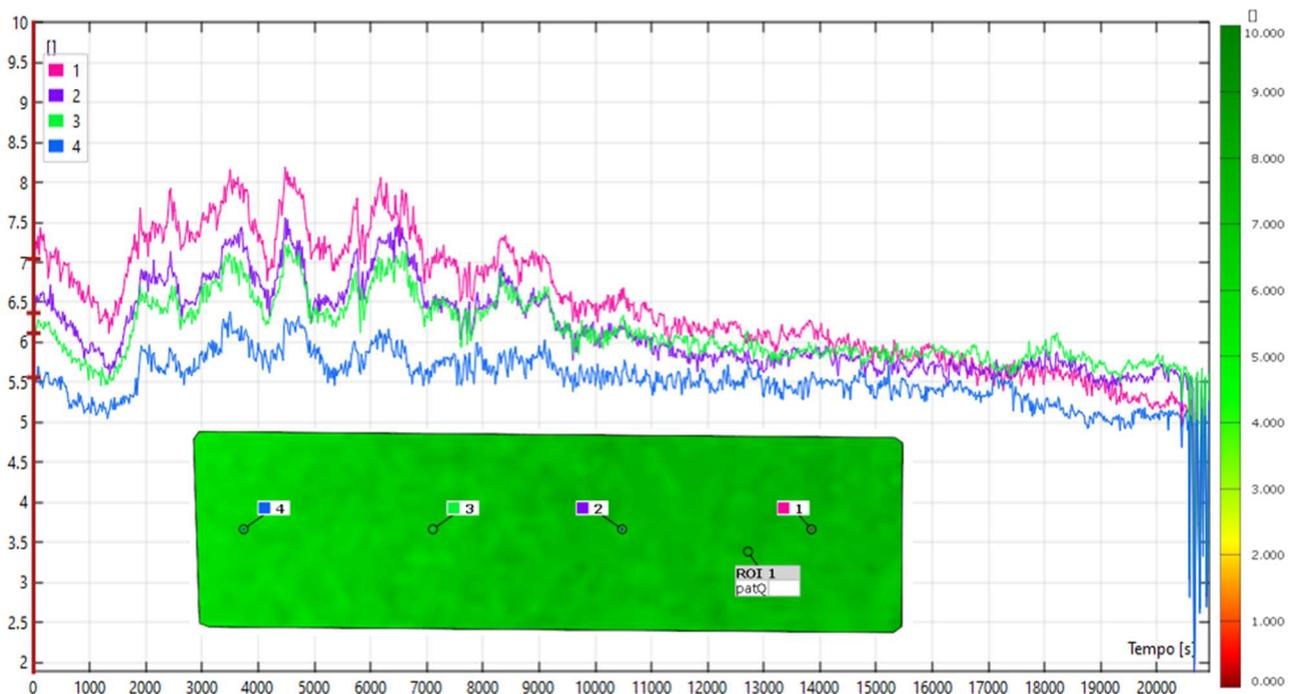


Figura 43 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 7

Nella prova TWIP 8, la qualità del modello è in media di 6.5 rispetto ad un valore ottimale di 10, anche in questo caso durante l'arco temporale della prova l'andamento della qualità è leggermente decrescente e non ci sono segni di variazioni di qualità riconducibili ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata data la bassa velocità del pistone mobile. Si notano nelle curve in questione delle discontinuità ancora più ampie rispetto a quelle viste in precedenza che non sono deleterie dal punto di vista della validazione della prova ma che comportano comunque un calo generale della qualità del modello nelle immagini. La causa di queste discontinuità sono delle forti

variazioni di luminosità nelle immagini corrispondenti, tali variazioni sono probabilmente la conseguenza di un aumento eccessivo del tempo di esposizione alla luce della fotocamera. Questo nuovo settaggio è stato adottato per cercare di migliorare la qualità delle immagini sfruttando un'acquisizione dei dati molto lenta (un'immagine ogni 20 secondi), ma ciò ha portato ad una maggiore instabilità della luminosità nelle immagini che varia molto ad ogni minima variazione della quantità di luce naturale presente nella stanza.

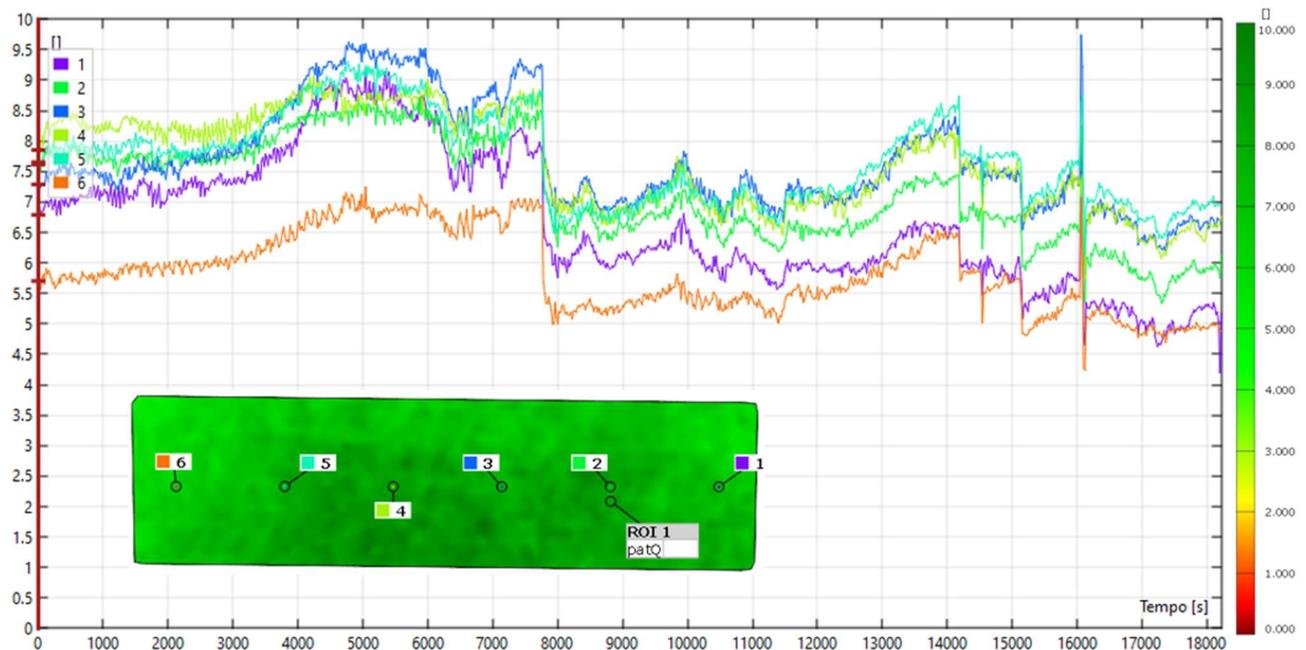


Figura 44 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 8

Accertata la qualità dei modelli e quindi la bontà dei calcoli effettuati si passa allo studio delle deformazioni per le prove TWIP 7 e 8, in particolare si vogliono analizzare quelle che sono le deformazioni localizzate riconducibili all'effetto Portevin-Le Chatelier. Nelle figure 45 e 46 vengono riportati i grafici relativi ai dati provenienti dalla macchina MTS, quali tensione e deformazione ingegneristiche, la tensione è stata ricavata dividendo il carico per la sezione iniziale del provino ed è espressa in MPa mentre la deformazione è stata ottenuta utilizzando un estensimetro virtuale molto grande similmente a quanto visto per le prove con l'acciaio DP600 ed è espressa in percentuale. Le curve Tensione-Deformazione che si ottengono sono caratterizzate da dei picchi irregolari, più o meno evidenti, che si formano nella parte plastica delle curve, questi picchi sono riconducibili alle bande di tipo A caratteristiche dell'effetto PLC.

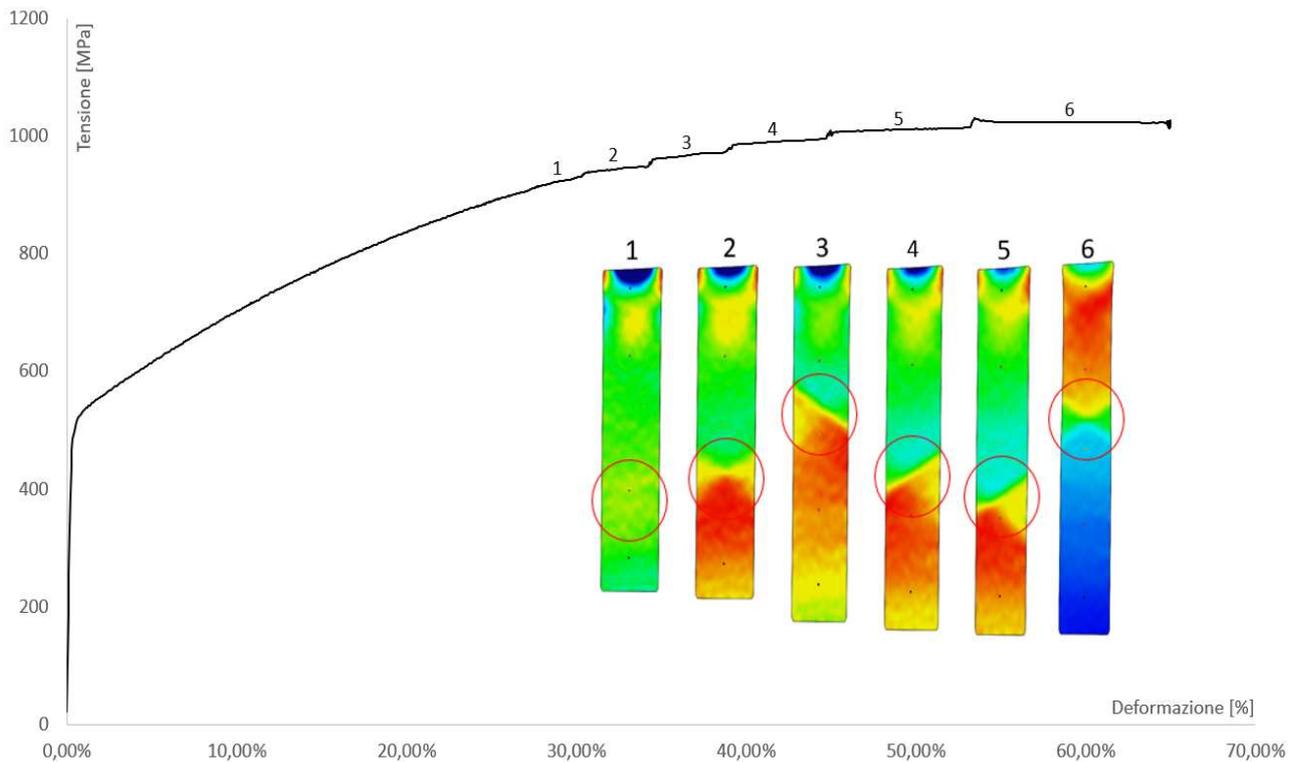


Figura 45 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 7.

Dalle curve in questione non si hanno evidenze di bande di tipo B e C caratterizzate, come visto nel capitolo 4, da ampiezza e frequenza di oscillazione più elevata. Nelle figure 45 e 46 sono inoltre riportate le immagini relative a tutte le bande che sono state riscontrate tramite la tecnica di correlazione DIC, le immagini che raffigurano le bande nella figura 45 non corrispondono ai picchi della curva di trazione ma alle zone tra un picco e l'altro, questo perché nel caso in esame la formazione delle bande plastiche è avvenuta al di fuori dell'inquadratura della telecamera ed è quindi impossibile da visualizzare, a differenza delle bande raffigurate nella figura 46 che corrispondono invece ai picchi della curva di trazione e alla formazione di una nuova banda PLC. Ogni immagine riportata nelle figure 45 e 46 fa riferimento a una legenda di colori differente con lo scopo di mettere in risalto i fenomeni di deformazione plastica localizzata. Dal punto di vista del calo di tensione, in entrambe le prove, il primo picco che viene evidenziato è praticamente quasi invisibile senza ingrandimento ma corrisponde ad una banda PLC di tipo A ben riconoscibile nell'analisi DIC. Gli altri picchi sono invece molto marcati e facilmente collegabili alla rispettiva banda di deformazione plastica localizzata.

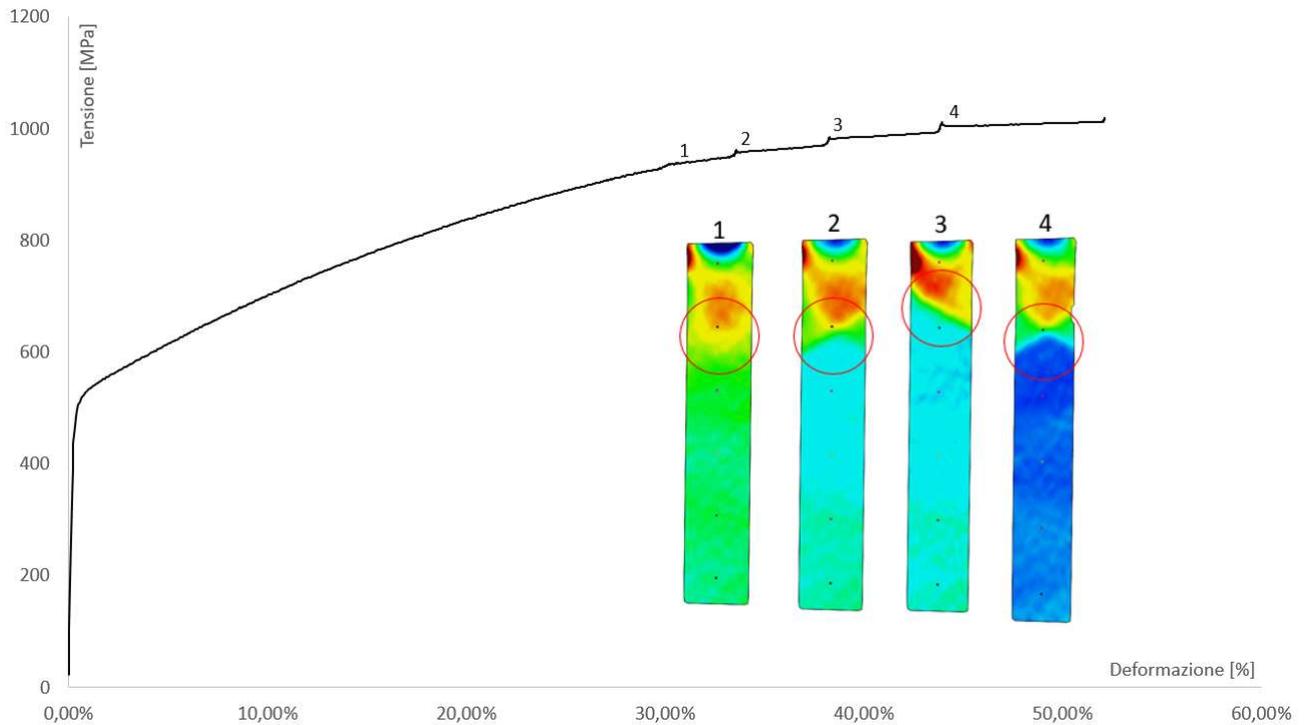


Figura 46 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 8.

Nelle figure 47 e 48 vengono riportate le analisi relative alla deformazione ingegneristica in direzione x; quindi, come questa si distribuisce sulla superficie di interesse e come evolve nel tempo. I grafici fanno riferimento a 5/6 punti di calcolo equidistanti e posti sull'asse longitudinale del provino. Il livello di deformazione raggiunto dai provini TWIP 7 e 8 sono rispettivamente del 67.5% e del 54%, per entrambi i provini i fenomeni di deformazione plastica localizzata iniziano ad un livello di deformazione generale di circa 25/26%, il passaggio di ogni banda plastica per uno dei punti di calcolo è caratterizzato nelle curve deformazione-tempo da un gradino la cui altezza aumenta con l'incrudimento del materiale, quindi ogni banda plastica causa un aumento di deformazione sempre maggiore rispetto alla banda precedente. Inoltre, la deformazione che subisce il provino è localizzata nella banda poiché prima e dopo il gradino le curve tendono all'orizzontale; quindi, le zone in cui non è presente la banda non subiscono una deformazione rilevante.

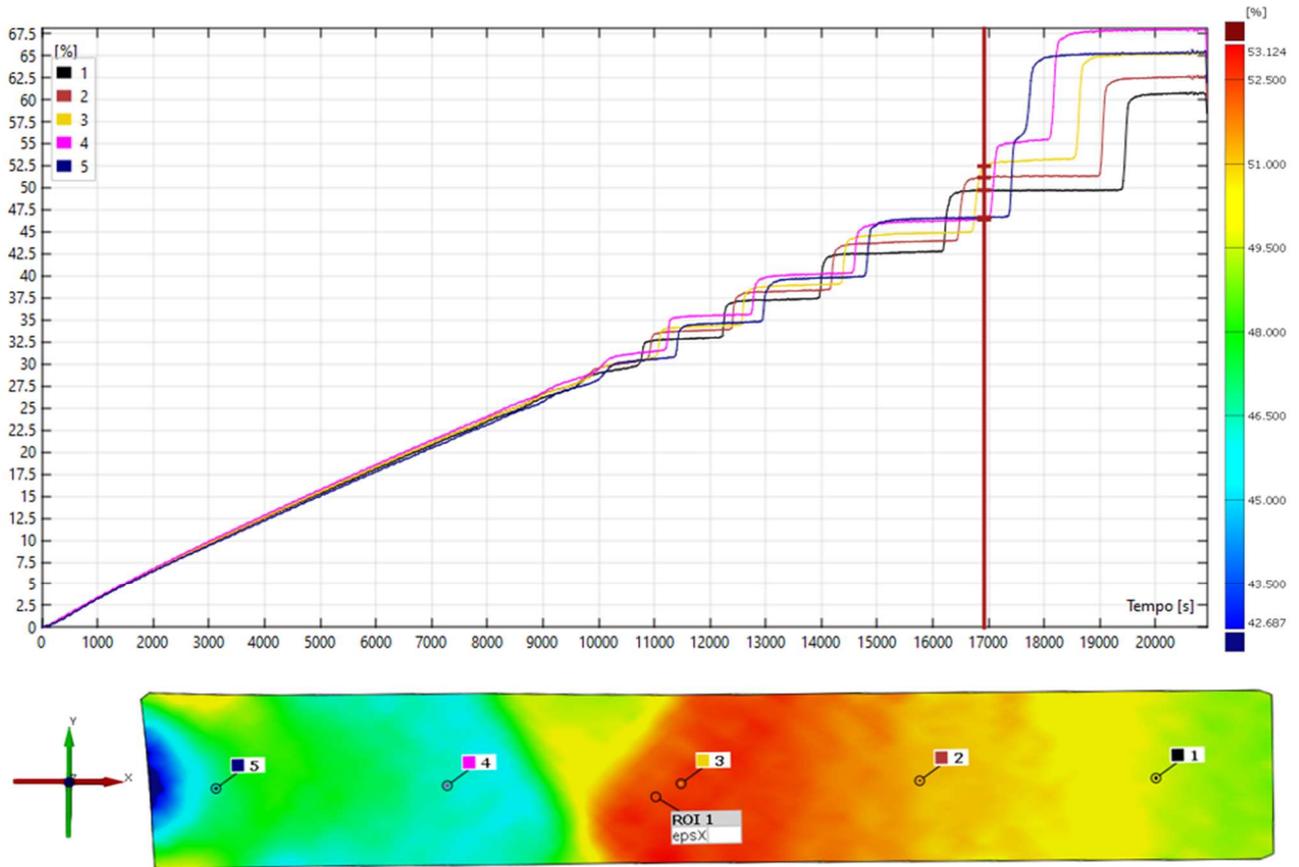


Figura 47 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 7 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

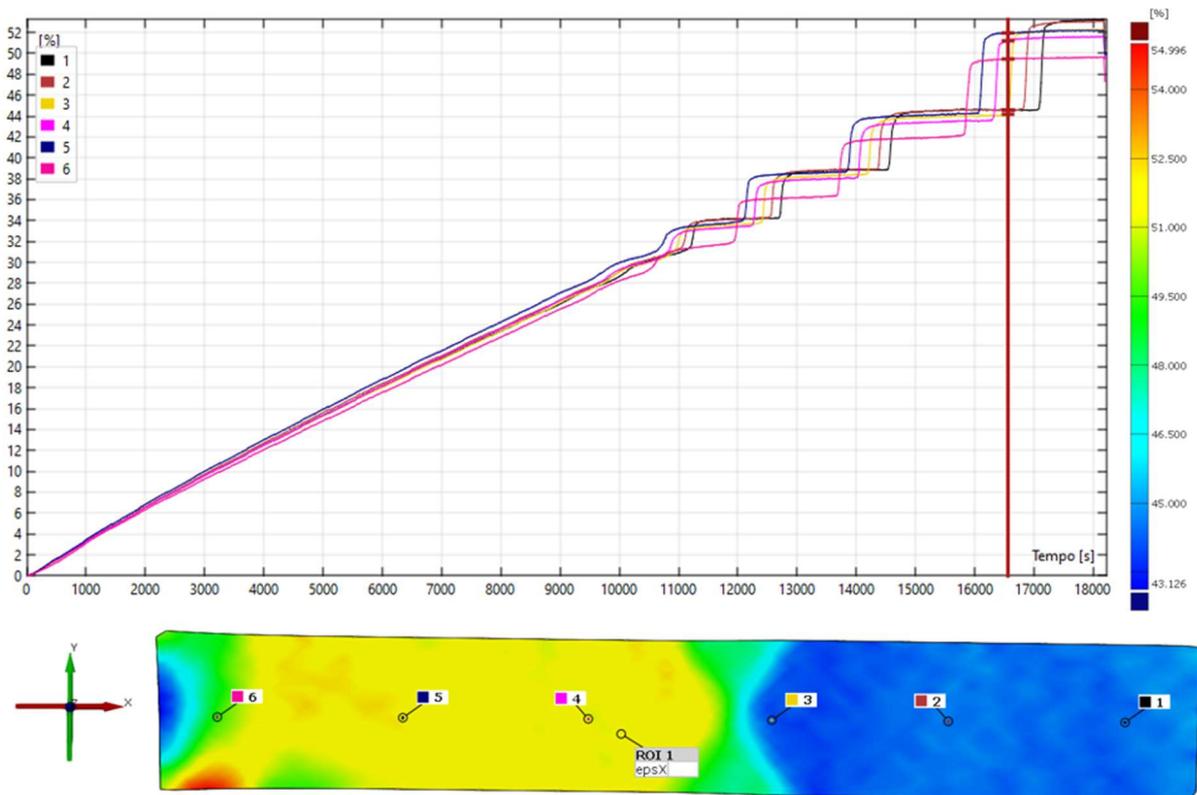


Figura 48 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 8 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

Nelle figure 50 e 51 vengono presentate le analisi dello strain-rate in direzione x, i grafici relativi fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino. Da tale analisi è subito evidente come la deformazione introdotta con la macchina di trazione viene concentrata, dopo l'inizio degli effetti PLC, nelle bande di deformazione plastica di tipo A.

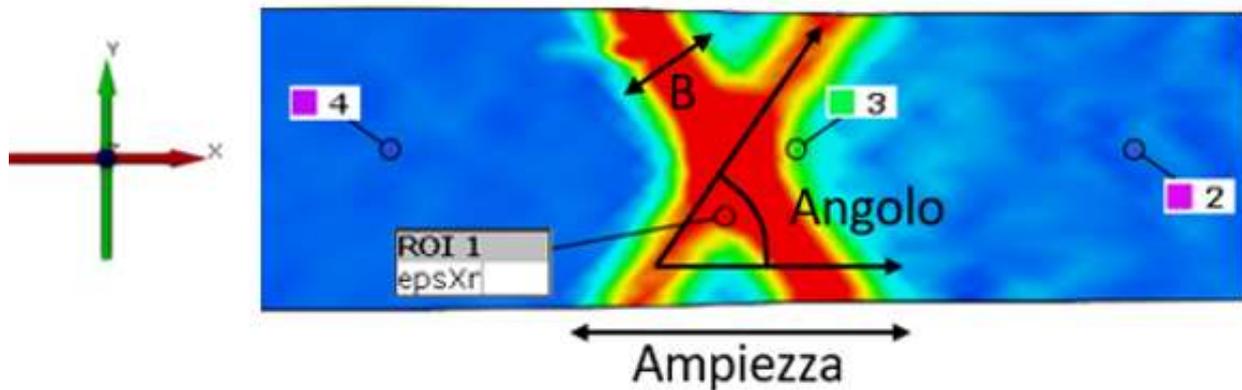


Figura 49 esempio di ampiezza della coppia di bande, di ampiezza della singola banda (B) e angolo di inclinazione della banda

L'analisi dello strain-rate è la migliore per studiare le dimensioni e le forme delle bande ed infatti si nota come, nella maggior parte dei casi, quelle che sembravano essere delle singole bande sono invece delle coppie di bande che viaggiano insieme lungo il provino. L'ampiezza di ogni singola banda è di 5/6mm mentre l'ingombro della coppia di bande va dai 16 ai 19mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale in modulo è di circa 56° - 57° , ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. Nella prova TWIP 7 si sono formati sei fenomeni di deformazione localizzata PLC di tipo A, i quali tranne il primo, sono molto ben riconoscibili e attraversano il provino nella sua interezza. Il fenomeno in questione è composto da una coppia di bande nel caso 2,5 e 6 e da bande singole speculari tra loro nel caso 3 e 4 (figura 45), la maggior parte delle bande viaggia lungo il provino dall'estremità mobile a quella fissa e solo l'ultima coppia di bande viaggia in direzione opposta. La rottura del provino TWIP 7 avviene nei pressi dell'estremità mobile al di fuori dell'inquadratura e non si può, in questo caso, sapere se questa viene causata dall'ultima banda rilevata oppure da ulteriore banda plastica. La superficie di frattura è in questo caso inclinata e presenta le tracce di una strizione.

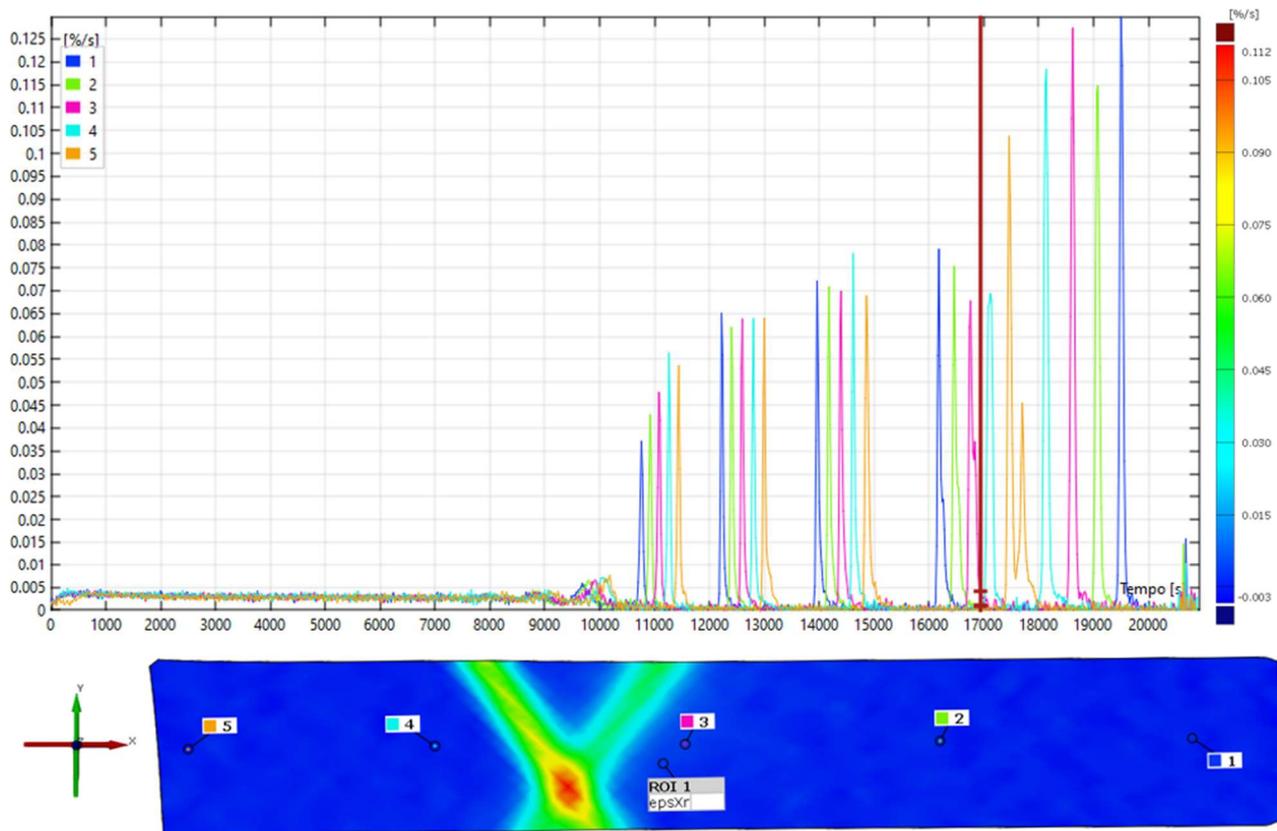


Figura 50 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 7 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Nella prova TWIP 8 tutte le bande formatesi viaggiano verso l'estremità mobile del provino, contrariamente a quanto avviene in tutte le altre prove. La forma della prima banda non è ben riconoscibile mentre la banda 4 (figura 46) in realtà è una coppia di bande incidenti tra loro, in questi casi nella zona centrale della banda viene misurato un livello di strain-rate più elevato poiché tale zona rappresenta l'incrocio delle due bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio delle bande la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y). Le restanti bande studiate, nello specifico la 2 e la 3 (figura 46) sono singole per quasi tutto il loro tragitto e sono speculari tra loro. La rottura del provino, anche in questo caso, avviene nei pressi dell'estremità mobile al di fuori dell'inquadratura e non si può sapere se viene causata dall'ultima banda rilevata oppure da ulteriore banda plastica. La superficie di frattura in questione risulta essere inclinata e presenta le tracce di strizione.

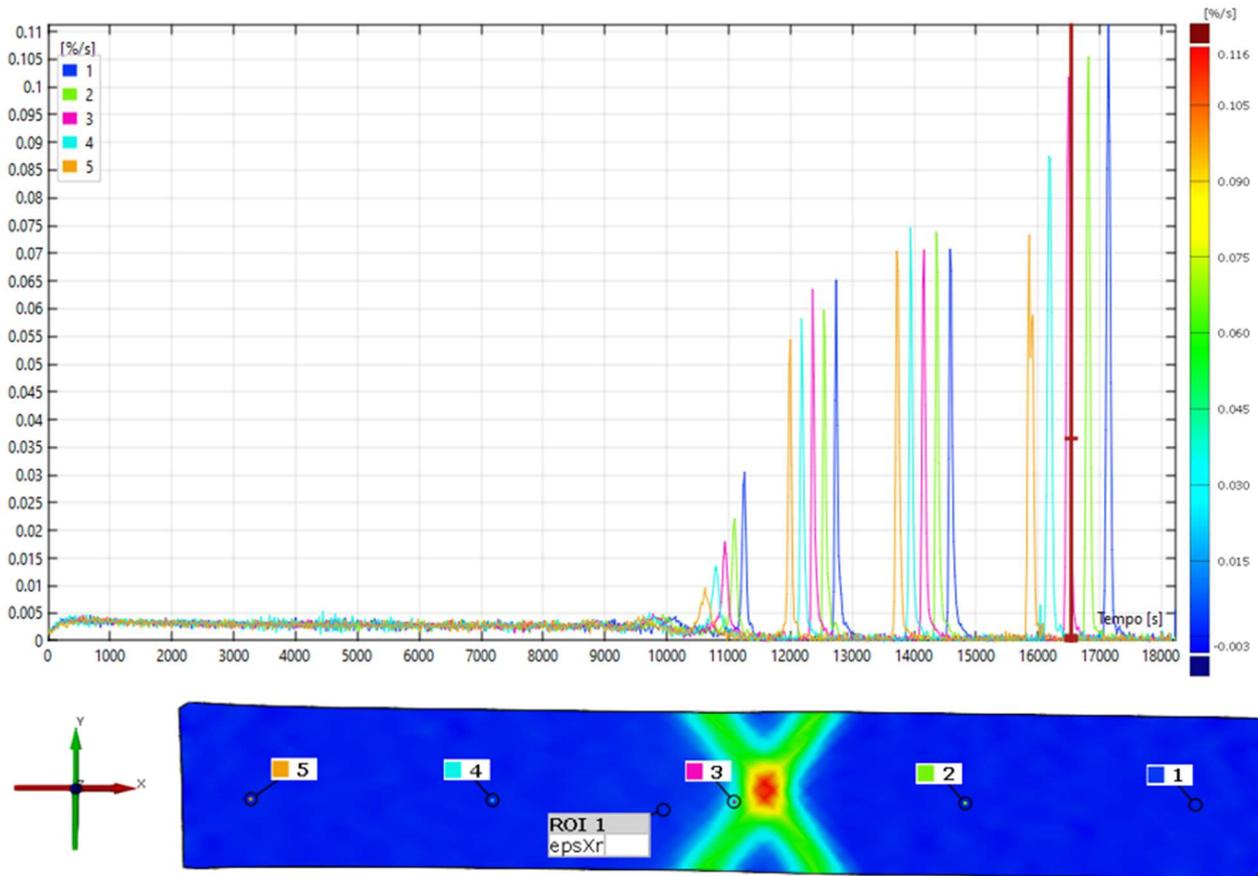


Figura 51 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 8 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Le ultime analisi che vengono effettuate sulle immagini delle prove TWIP 7 e 8 sono presentate in figura 52 e 53 e rappresentano lo studio delle velocità in direzione x, in particolare i grafici fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. I grafici permettono di distinguere come il provino, durante la prova di trazione, cambia il modo di reagire a delle deformazioni imposte. Il primo tratto distinguibile è il transitorio relativo alla curva di deformazione elastica, successivamente le deformazioni si stabilizzano durante il tratto di deformazione plastica uniforme e la distribuzione delle velocità risulta lineare dalla parte fissa a quella mobile del provino. Dal momento in cui incominciano i fenomeni di Portevin-Le Chatelier (7500-8000 secondi dall'inizio delle prove) le curve cominciano ad oscillare e la velocità diventa sempre più esclusiva delle aree che sono state attraversate dalla banda plastica corrente in quel momento (area rossa), mentre il resto dell'area del provino che ancora deve essere attraversata rimane ferma (area blu). I risultati trovati sono precisi in quanto viene riscontrato che sulla superficie del campione non si supera mai la velocità del pistone mobile della macchina di trazione di 0.004mm/s.

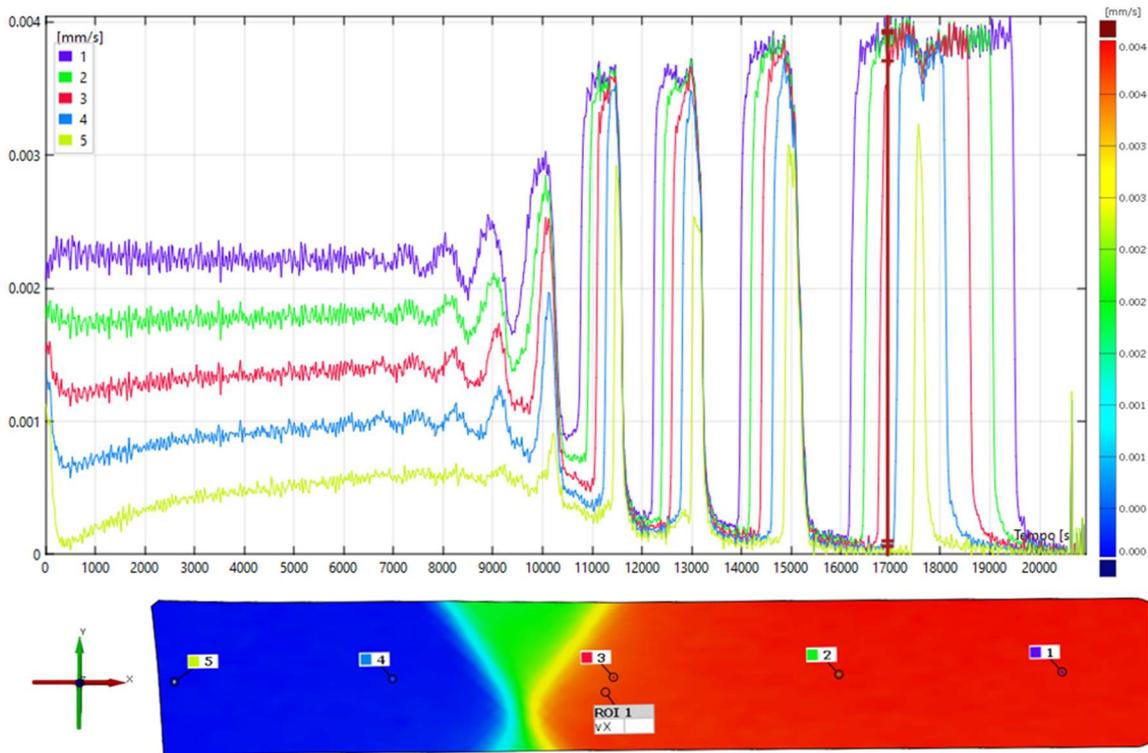


Figura 52 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 7 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

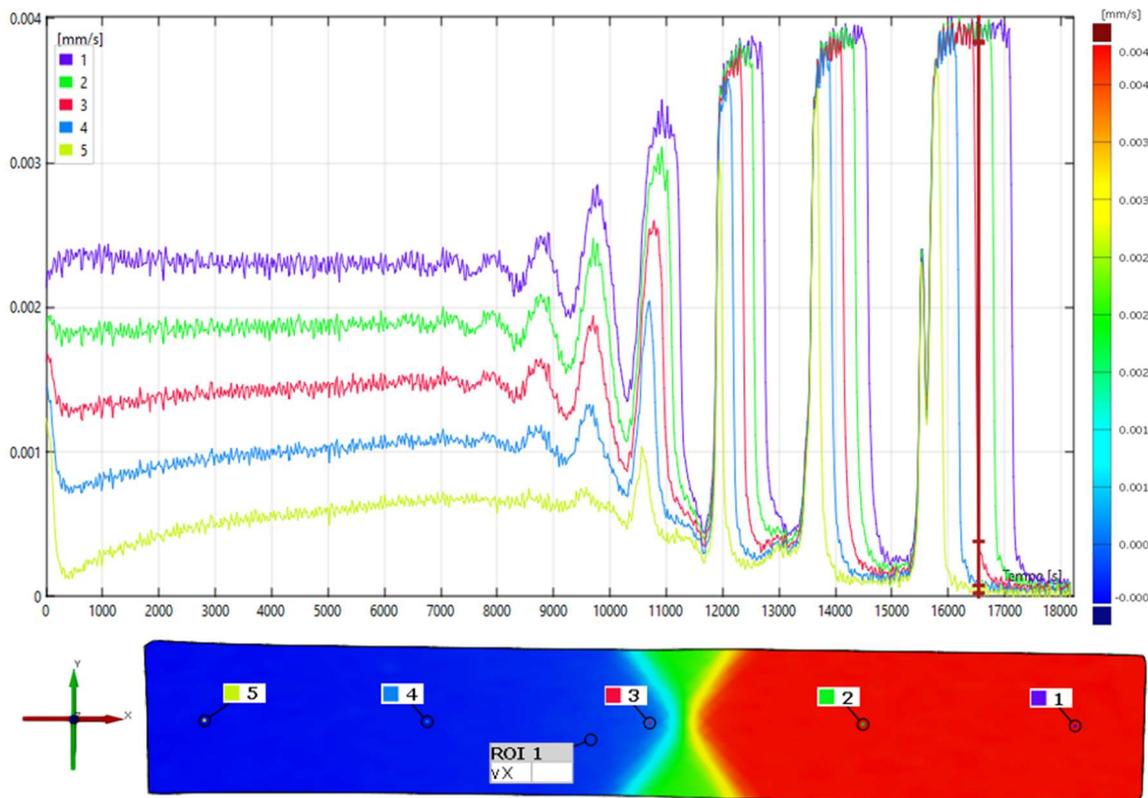


Figura 53 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 8 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

6.2 Prove alla velocità di 0.04 mm/s

La terza e la quarta prova relativa agli acciai TWIP sono state condotte ad una velocità del pistone mobile di 0.04 mm/s, la durata della terza prova è poco più di 30 minuti mentre quella della quarta è di poco più di 34 minuti. Il grafici presenti in figura 54 e 55 rappresentano lo studio relativo alla qualità del modello presente nelle immagini acquisite e fanno riferimento a cinque/sei punti di interesse equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. Tale analisi è necessaria per capire quanto le immagini acquisite tramite il sistema DIC siano adatte ad essere sottoposte ad un calcolo di correlazione digitale. Nella prova TWIP 3, come visibile nel grafico (figura 54), i valori calcolati nei vari punti di interesse della ROI sono compresi tra 4 e 6.5 rispetto ad un valore ottimale di 10, non sono valori eccelsi ma sono comunque accettabili per intraprendere il calcolo di correlazione, tali valori possono dunque essere ricondotti ad una scarsa qualità del pattern impresso con le vernici spray sulla superficie del provino. La qualità del modello si mantiene stabile per tutta la durata della prova e non ci sono grandi segni di variazioni di qualità riconducibili ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata, questo perché la prova è stata condotta ad una velocità del pistone mobile molto bassa di 0.04mm/s. Dal grafico però si può notare che tutte le curve studiate presentano un tratto dove aumenta l'instabilità e diminuisce in generale la qualità del modello, il tratto in questione inizia a circa 570 secondi dall'inizio della prova e termina a circa 780 secondi. Indagando sulle immagini acquisite relative a questo intervallo di tempo si comprende immediatamente che l'evento sopra-descritto è causato da molteplici variazioni dell'intensità luminosa. Si conclude che il criterio di correlazione adottato dall'algorithmo del programma GOM Correlate risulta essere sensibile alle variazioni di luminosità. Bisogna quindi accertarsi, per effettuare delle prove ottimali, che la quantità di luce incidente sulla superficie di interesse sia uniforme e costante per tutta la durata della prova.

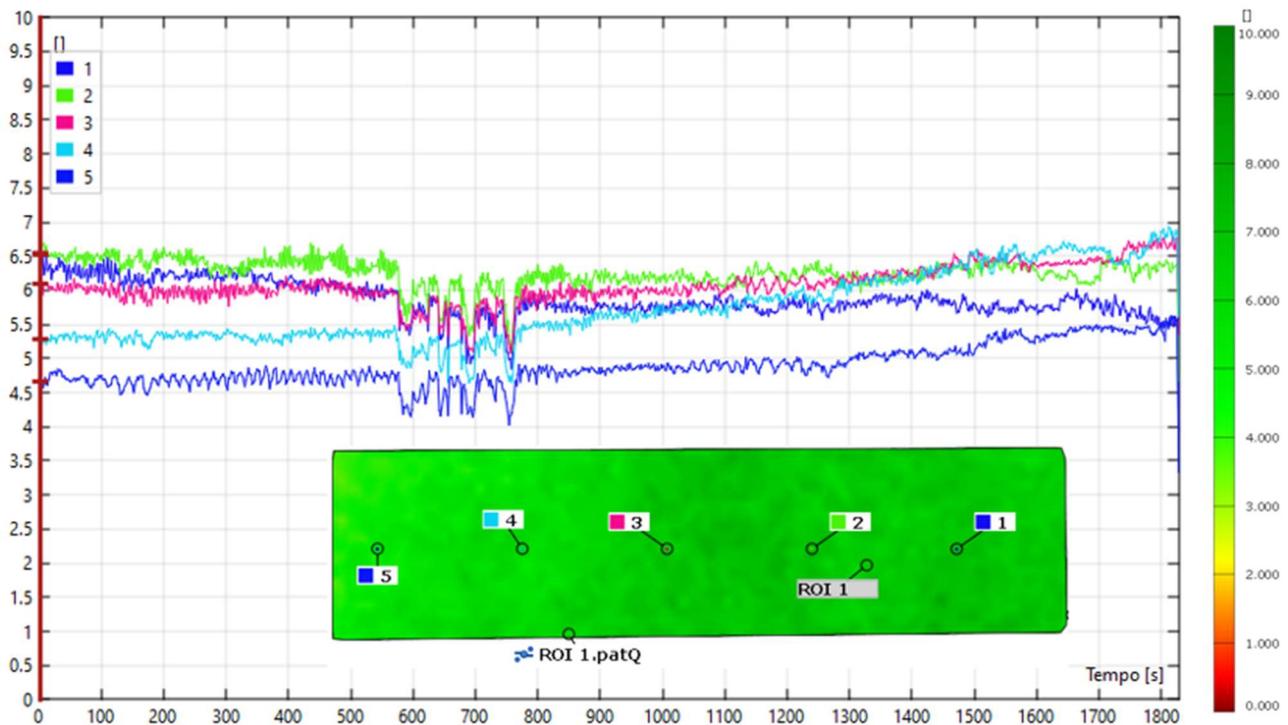


Figura 54 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 3

Nella prova TWIP 4, la qualità del modello è in media di 6.5 rispetto ad un valore ottimale di 10, durante l'arco temporale della prova l'andamento della qualità è leggermente decrescente. Non ci sono segni di variazioni di qualità riconducibili ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata, poiché la prova è stata condotta ad una velocità del pistone mobile molto bassa di 0.04mm/s. Per concludere la qualità del pattern impresso sulla superficie del provino tramite le vernici spray rimane accettabile per quasi tutta la durata della prova, nella fase finale una parte di vernice salta via dalla superficie del provino rendendo quella zona inutilizzabile ai fini del calcolo di correlazione, tale porzione è visibile in figura 55 e si presenta come un foro che risulta essere comunque abbastanza piccolo, il calcolo viene portato comunque a termine sulla superficie verniciata rimasta integra e la prova viene considerata valida. Ciò che ha causato il distacco della vernice dalla superficie è stato l'olio lubrificante della macchina di trazione MTS, infatti durante il posizionamento del provino, la superficie verniciata è stata accidentalmente toccata con un dito unto di olio della macchina di trazione.

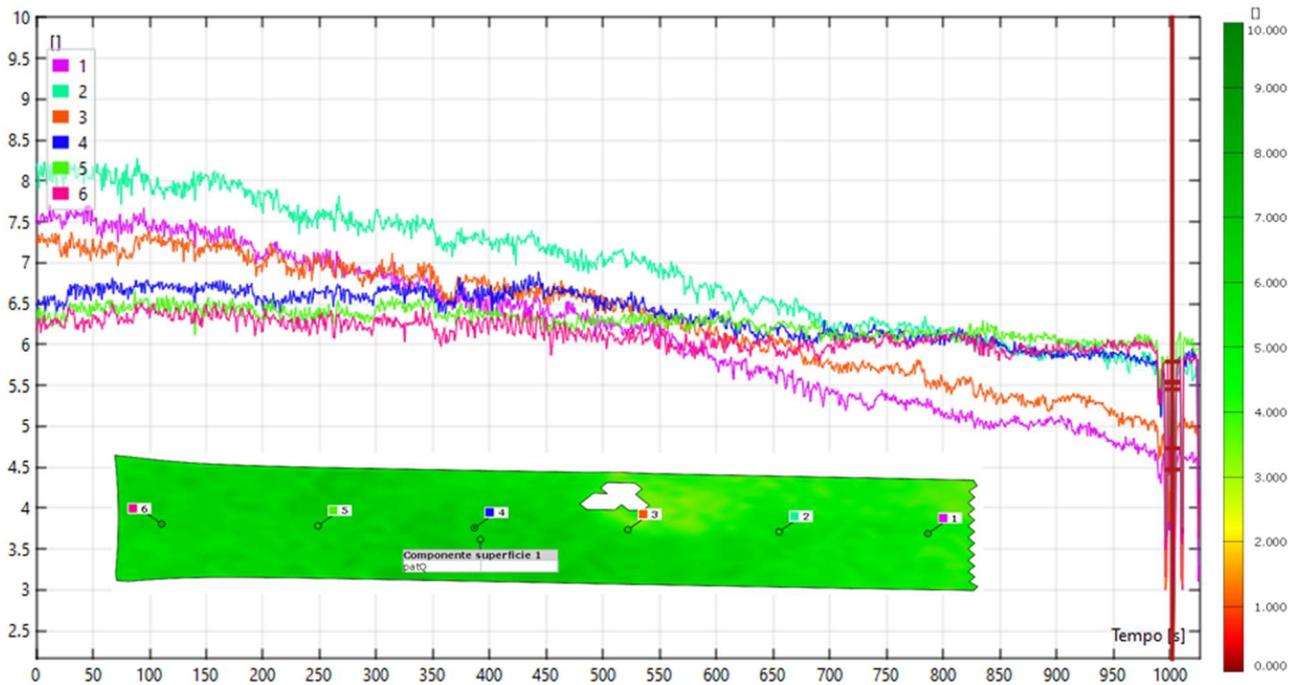


Figura 55 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 4

Accertata la qualità dei modelli e quindi la bontà dei calcoli effettuati si passa allo studio delle deformazioni per le prove TWIP 3 e 4, in particolare si vogliono analizzare quelle che sono le deformazioni localizzate riconducibili all'effetto Portevin-Le Chatelier. Nelle figure 56 e 57 vengono riportati i grafici relativi ai dati provenienti dalla macchina MTS, quali tensione e deformazione ingegneristiche, la tensione è stata ricavata dividendo il carico per la sezione iniziale del provino ed è espressa in MPa mentre la deformazione è stata ottenuta utilizzando un estensimetro virtuale molto grande similmente a quanto visto per le prove con l'acciaio DP600 ed è espressa in percentuale. Le curve Tensione-Deformazione che si ottengono sono caratterizzate da dei picchi irregolari, più o meno evidenti, che si formano nella parte plastica delle curve, questi picchi sono riconducibili alle bande di tipo A caratteristiche dell'effetto PLC. Dalle curve in questione non si hanno evidenze di bande di tipo B e C caratterizzate, come visto nel capitolo 4, da ampiezza e frequenza di oscillazione più elevata. Nelle figure 56 e 57 sono inoltre riportate le immagini relative a tutte le bande che sono state riscontrate tramite la tecnica di correlazione DIC, le immagini che raffigurano le bande relative alla prova TWIP3 corrispondono a zone della curva di trazione che sono successive ai picchi, questo perché nel caso in esame la formazione delle bande plastiche in questione è avvenuta al di fuori dell'inquadratura della telecamera, inoltre ogni immagine presenta una legenda di colori diversa in modo da evidenziare i fenomeni di deformazione plastica localizzata. Nello specifico sulla curva sono stati evidenziati tre picchi ben chiari (3,4,5) e due avvallamenti (1,2) (figura 56), il primo avvallamento (1) è riconducibile ad una zona di leggera deformazione plastica localizzata senza però la formazione di una vera e propria banda PLC di tipo A, il secondo avvallamento (2) è invece riconducibile ad una banda plastica di tipo A ben riconoscibile che si muove lungo il provino. I restanti tre picchi sono anche loro riconducibili a bande plastiche ben distinte.

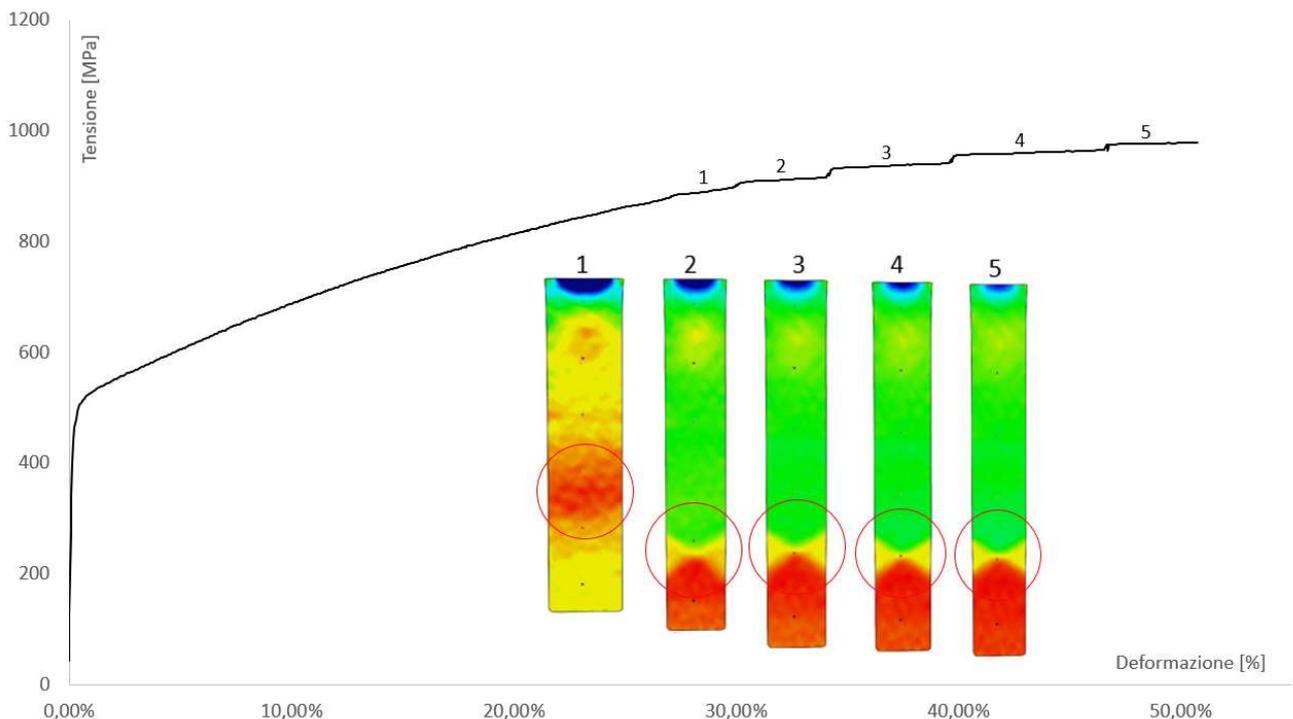


Figura 56 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 3.

Per la prova TWIP4 le immagini che raffigurano le bande non corrispondono ai picchi della curva di trazione ma alle zone tra un picco e l'altro, questo perché, come successo in altre prove, la formazione delle bande plastiche è avvenuta al di fuori dell'inquadratura della telecamera. Ogni immagine riportata nella figura 57 fa riferimento a una legenda di colori differente con lo scopo di mettere in risalto i fenomeni di deformazione plastica localizzata. Nello specifico, a differenza della prova TWIP 3, sulla curva sono visibili sei picchi ben riconoscibili, tutti collegati alla formazione di bande plastiche PLC di tipo A.

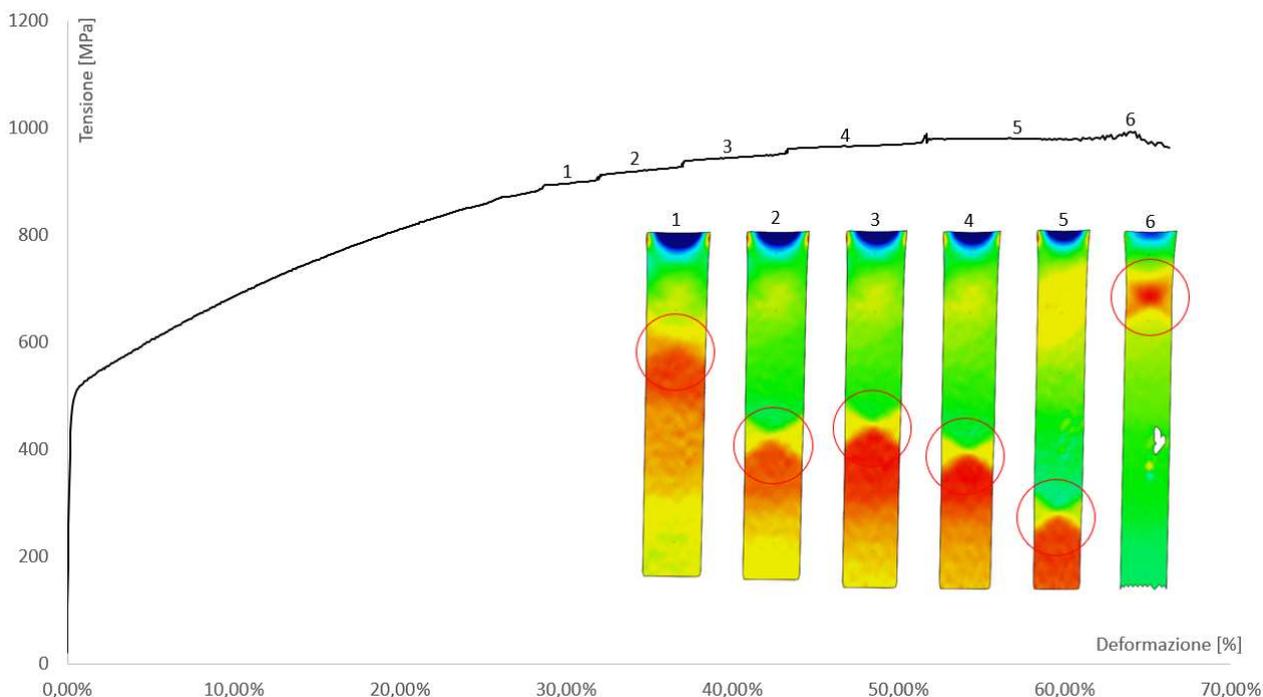


Figura 57 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 4.

Nelle figure 58 e 59 vengono riportate le analisi relative alla deformazione ingegneristica in direzione x; quindi, come questa si distribuisce sulla superficie di interesse e come evolve nel tempo. I grafici fanno riferimento a 6 punti di calcolo equidistanti e posti sull'asse longitudinale del provino. Il livello di deformazione raggiunto dai provini TWIP 3 e 4 sono rispettivamente del 57.5% e del 70%, per il provino della prova TWIP3 i fenomeni di deformazione plastica localizzata iniziano ad un livello di deformazione generale del 25%, mentre per il provino TWIP 4 iniziano ad un livello del 23%, il passaggio di ogni banda plastica per uno dei punti di calcolo è caratterizzato nelle curve deformazione-tempo da un gradino la cui altezza aumenta con l'incrudimento del materiale, quindi ogni banda plastica causa un aumento di deformazione sempre maggiore rispetto alla banda precedente. Inoltre, come per le prove precedenti la deformazione che subisce il provino è localizzata nella banda poiché prima e dopo il gradino le curve tendono all'orizzontale; quindi, le zone in cui non è presente la banda non subiscono una deformazione rilevante.

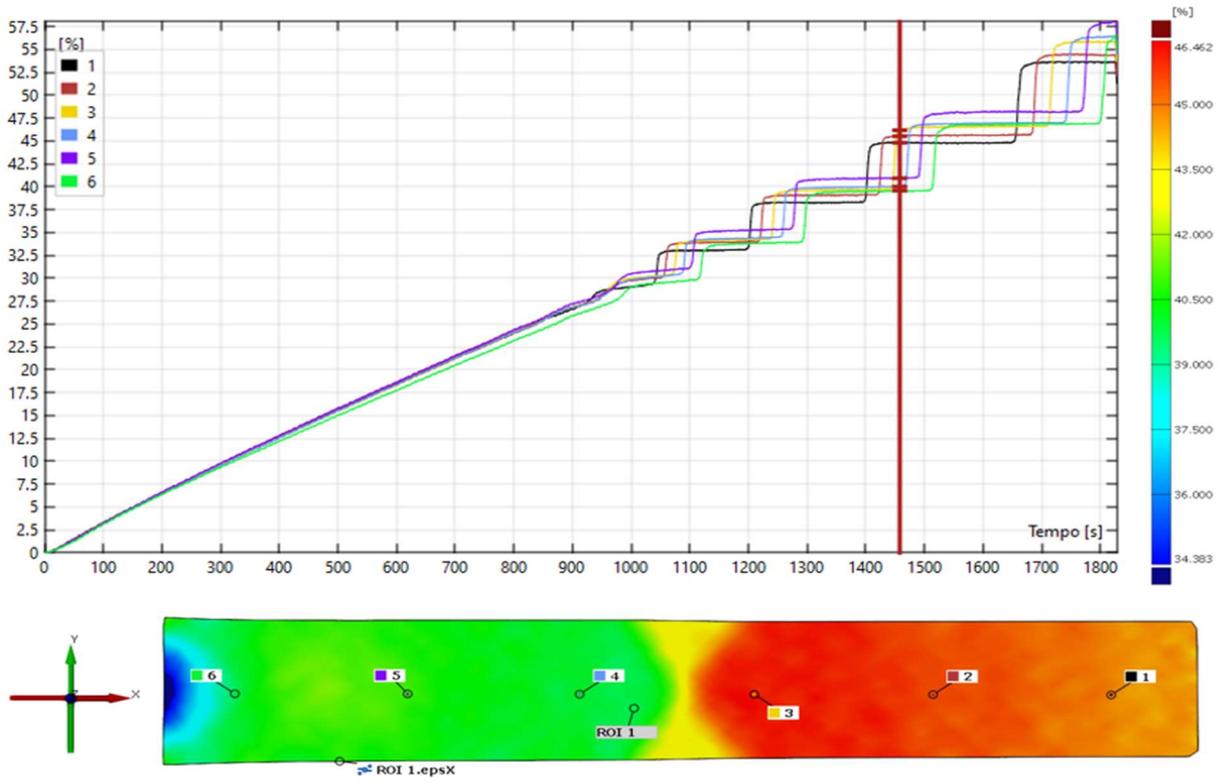


Figura 58 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 3 in sei punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

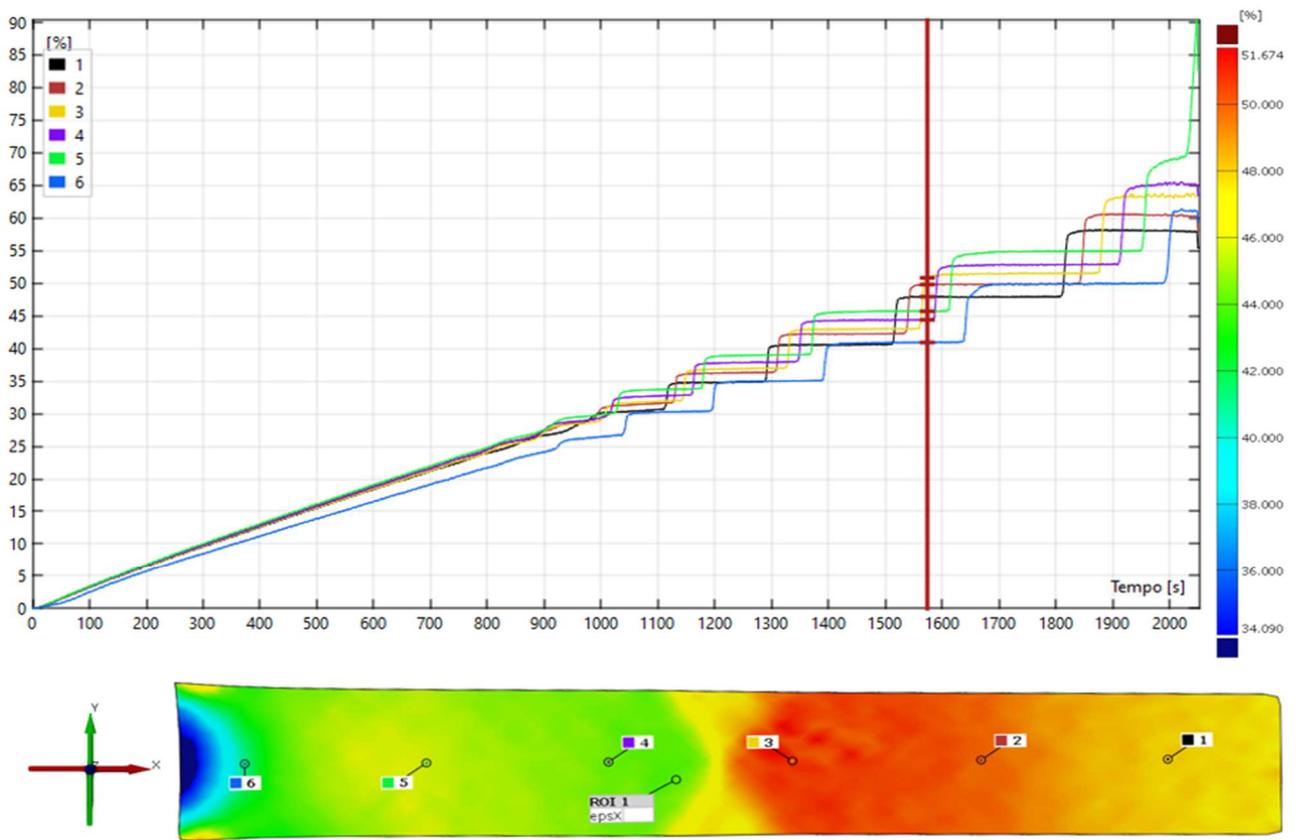


Figura 59 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 4 in sei punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

Nelle figure 60 e 61 vengono presentate le analisi dello strain-rate in direzione x, i grafici relativi fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino. Da tale analisi è subito evidente come la deformazione introdotta con la macchina di trazione viene concentrata, dopo l'inizio degli effetti PLC, nelle bande di deformazione plastica di tipo A. L'analisi dello strain-rate è la migliore per studiare le dimensioni e le forme delle bande ed infatti si nota come, nella maggior parte dei casi, quelle che sembravano essere delle singole bande sono invece delle coppie di bande che viaggiano insieme lungo il provino. L'ampiezza di ogni singola banda è di 5/6mm mentre l'ingombro della coppia di bande va dai 16 ai 20mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale in modulo è compreso all'incirca tra i 55° e i 57°, ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. In generale quando si è in presenza di una coppia di bande la zona centrale della banda è caratterizzata da un livello di strain-rate più elevato, questo perché tale zona rappresenta l'incrocio delle due bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio della banda la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y). Le bande studiate per la prova TWIP 3 sono molto simili tra loro nella forma e nelle dimensioni, presentano anche lo stesso comportamento. Ogni banda in questione nasce vicino l'estremità mobile e percorre tutta la lunghezza del provino fino all'estremità fissa dove diventa una banda stazionaria e si estingue. Il provino si rompe nel momento successivo all'estinzione dell'ultima banda. La superficie di frattura, rispetto ai casi precedenti, non è inclinata ma è perpendicolare alla direzione di applicazione del carico. Il cedimento in questo caso non presenta una chiara strizione come nelle prove precedenti ma avviene in maniera fragile presso il raccordo dell'estremità fissa.

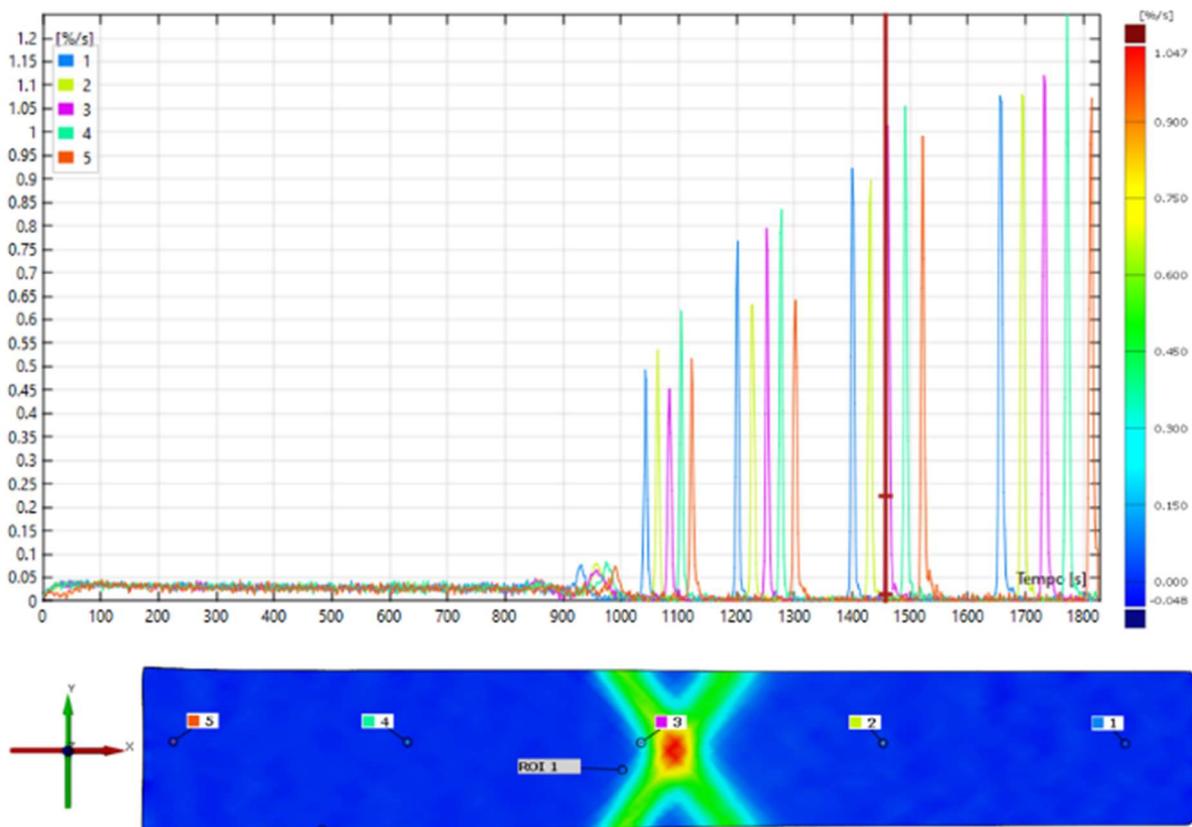


Figura 60 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 3 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Anche le bande studiate per la prova TWIP 4 sono molto simili tra loro nella forma e nelle dimensioni e presentano anche lo stesso comportamento. Nello specifico la prima banda che si viene a formare è caratterizzata da un dislivello di deformazione molto piccolo e percorre solo un piccolo tratto di provino, le successive 5 bande sono molto più marcate, nascono al di fuori dell'inquadratura vicino all'estremità mobile e percorrono l'intera lunghezza del provino fino ad arrivare all'estremità fissa dove diventano bande stazionarie e si estinguono. Nel momento in cui si estingue la sesta banda se ne crea un'altra poco più a destra, questa viaggia lungo il provino per un piccolo tratto nel verso opposto a quello delle precedenti bande finché non si arriva alla rottura del provino. Quest'ultima banda è un po' più instabile nel tempo poiché in alcuni istanti risulta essere singola ed in altri composta da una coppia di bande, inoltre cambia inclinazione di continuo. Il materiale in questo caso si rompe quando l'ultima banda diventa stazionaria e la deformazione non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino, si arriva dunque ad una strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

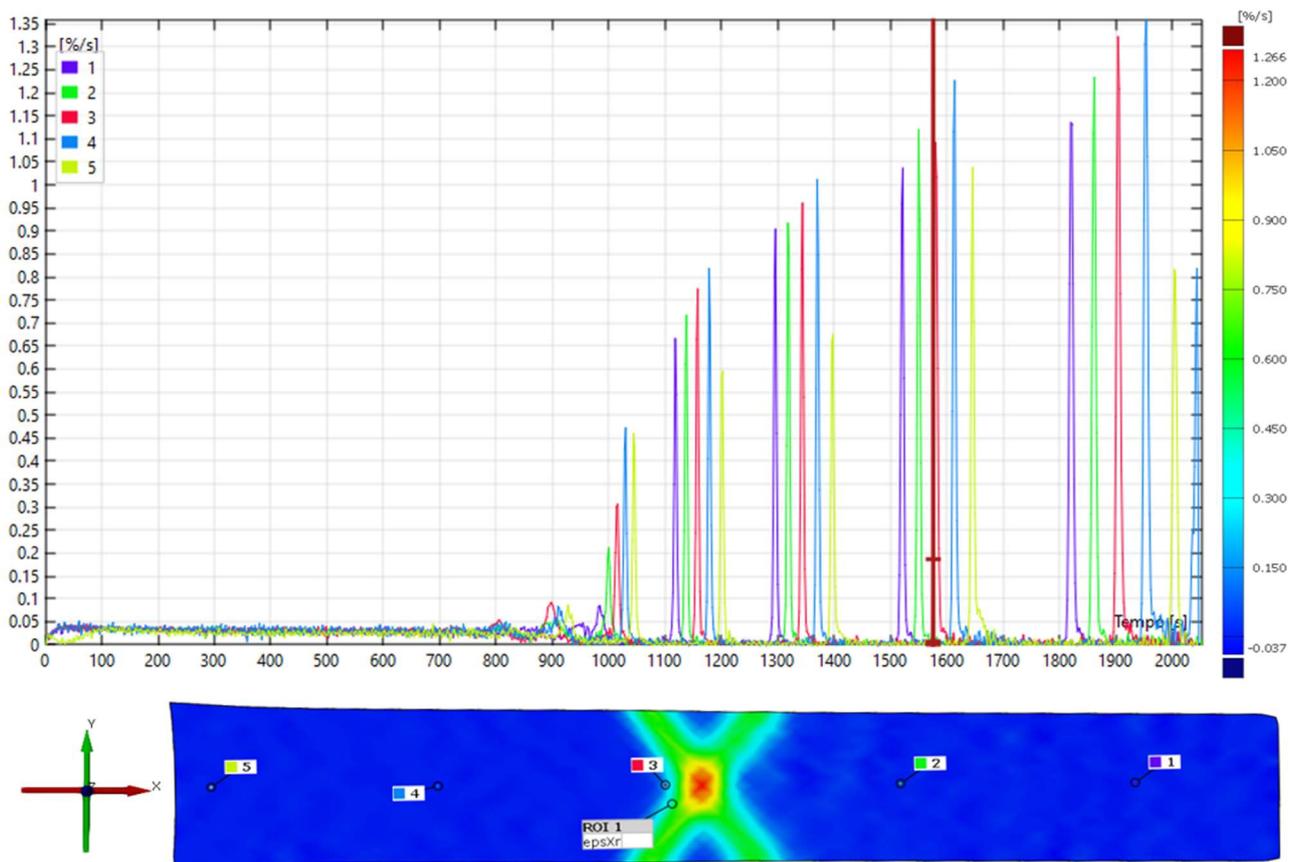


Figura 61 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 4 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

Le ultime analisi che vengono effettuate sulle immagini delle prove TWIP 3 e 4 sono presentate in figura 62 e 63 e rappresentano lo studio delle velocità in direzione x, in particolare i grafici fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. I grafici permettono di distinguere come il provino, durante la prova di trazione, cambia il modo di reagire a delle deformazioni imposte. Il primo tratto distinguibile è il transitorio relativo alla curva di deformazione elastica, successivamente le deformazioni si stabilizzano durante il tratto di deformazione plastica uniforme e la distribuzione delle velocità risulta lineare dalla parte fissa a quella mobile del provino. Dal momento in cui incominciano i fenomeni di Portevin-Le Chatelier (dopo 920s per la prova TWIP3 e dopo 720s per la prova TWIP4) le curve cominciano ad oscillare e la velocità diventa sempre più esclusiva delle aree che sono state attraversate dalla banda plastica corrente in quel momento (area rossa), mentre il resto dell'area del provino che ancora deve essere attraversata rimane ferma (area blu). I risultati trovati sono precisi in quanto viene riscontrato che sulla superficie del campione non si supera mai la velocità del pistone mobile della macchina di trazione di 0.04mm/s.

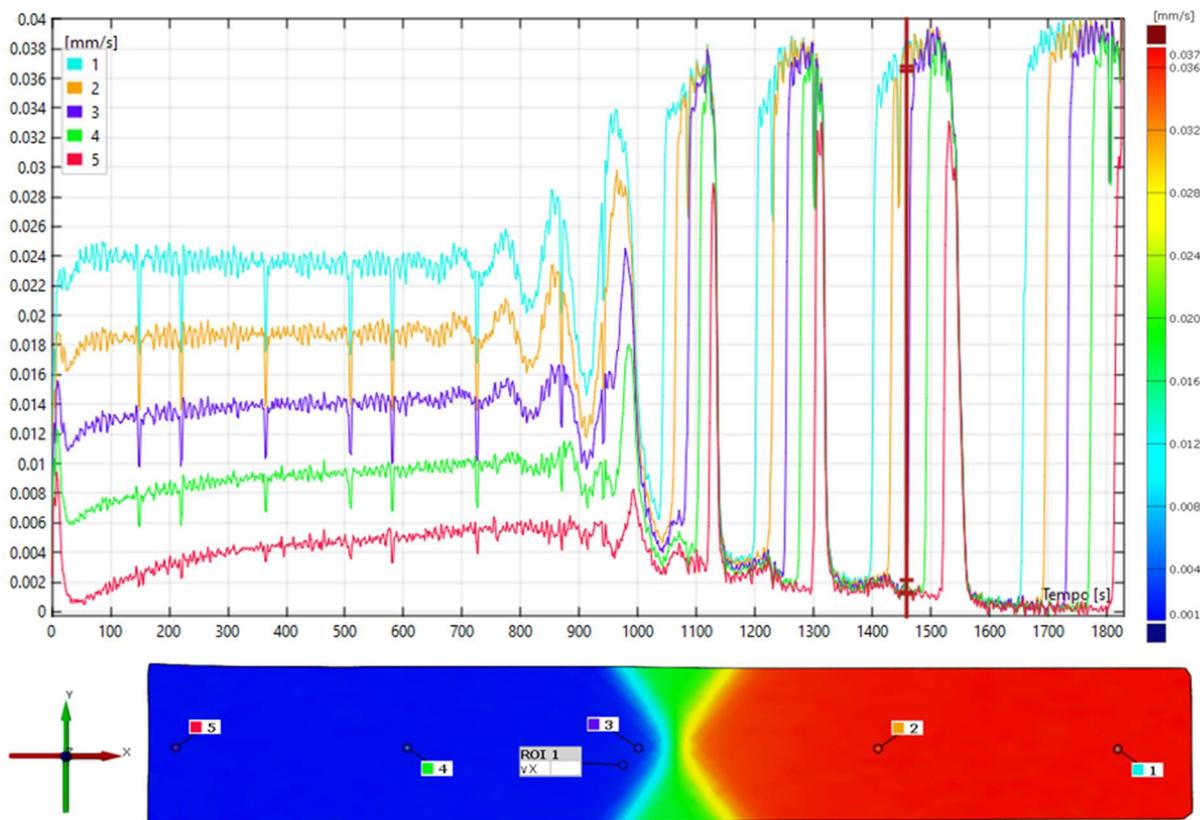


Figura 62 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 3 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

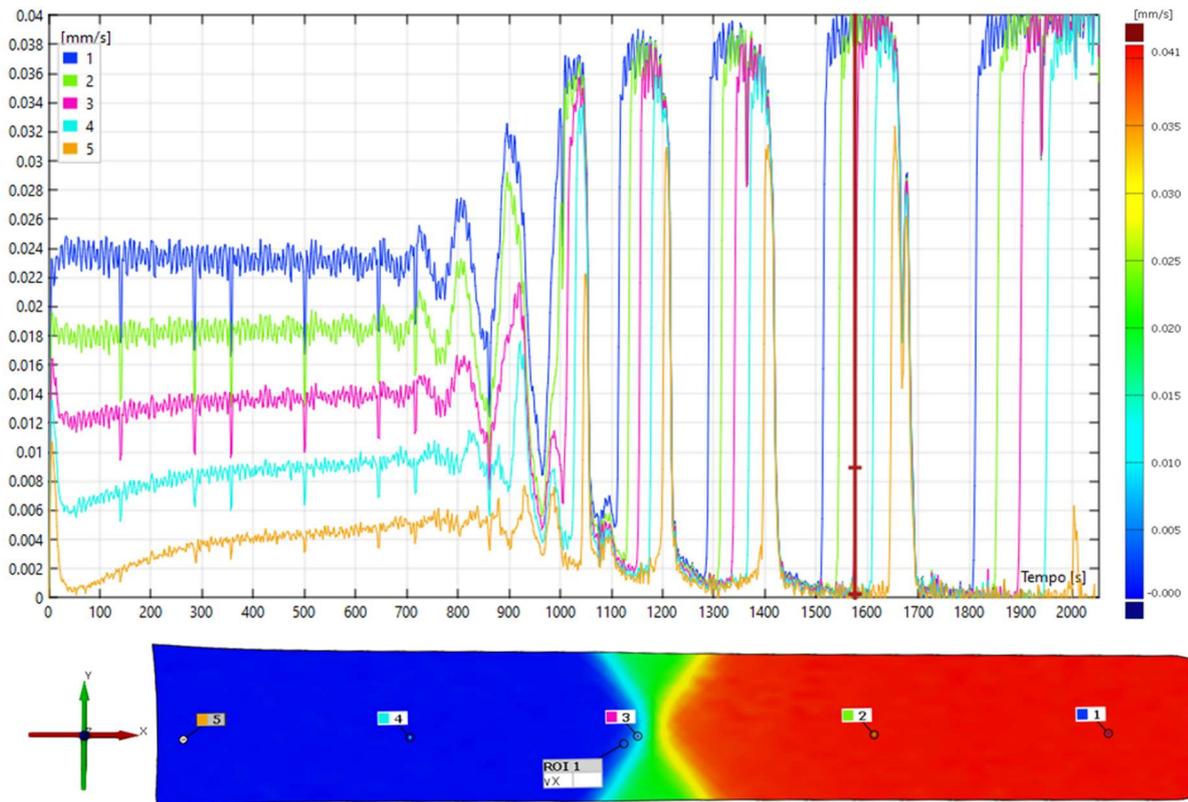


Figura 63 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 4 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

6.3 Prove alla velocità di 0.4 mm/s

La prima (TWIP1) e la quinta (TWIP5) prova relativa agli acciai TWIP sono state condotte ad una velocità del pistone mobile di 0.4 mm/s, la durata della prima prova è di 205 secondi mentre quella della quarta è di 175 secondi. Il grafici presenti in figura 64 e 65 rappresentano lo studio relativo alla qualità del modello presente nelle immagini acquisite e fanno riferimento a cinque/sei punti di interesse equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. Tale analisi è necessaria per capire quanto le immagini acquisite tramite il sistema DIC siano adatte ad essere sottoposte ad un calcolo di correlazione digitale. Nella prova TWIP 1, come visibile nel grafico (figura 64), i valori calcolati nei vari punti di interesse della ROI sono compresi tra 4.7 e 9, in particolare i punti di calcolo che si trovano all'estremità del provino hanno una qualità minore dei punti centrali, c'è quindi una disuniformità causata da una verniciatura spray poco uniforme sulla superficie di interesse del provino. Anche se non eccelsi i valori si mantengono stabili per tutta la durata della prova e sono comunque ampiamente accettabili per intraprendere il calcolo di correlazione, non ci sono grandi segni di variazioni di qualità riconducibili ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata e nemmeno dei drop improvvisi dovuti a delle alterazioni dell'intensità luminosa.

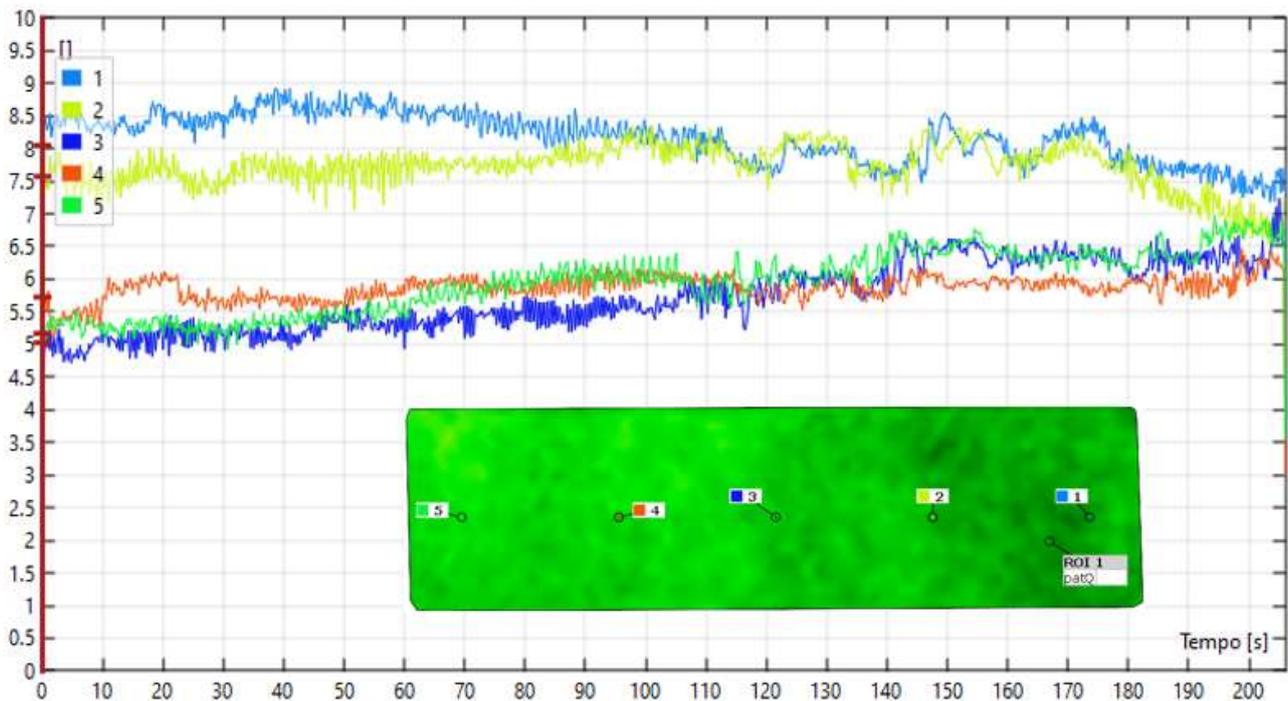


Figura 64 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 1

Nella prova TWIP 5, la qualità del modello è in media un 8 rispetto ad un valore ottimale di 10, in alcuni punti durante l'arco temporale della prova si registra un andamento leggermente decrescente ma poco significativo. A differenza del caso TWIP1, sono visibili variazioni di qualità dell'immagine dovute ad un cambiamento della velocità della superficie inquadrata. Si verificano dei drop della qualità in corrispondenza del passaggio di bande plastiche nei punti di interesse ma in questo caso l'intensità dei drop è molto piccola perché funzione della velocità con la quale viene condotta la prova che risulta essere ancora non troppo elevata. In generale la qualità del modello rimane più che accettabile per tutta la durata temporale della prova come conseguenza di un ottimo pattern casuale impresso sulla superficie del provino.

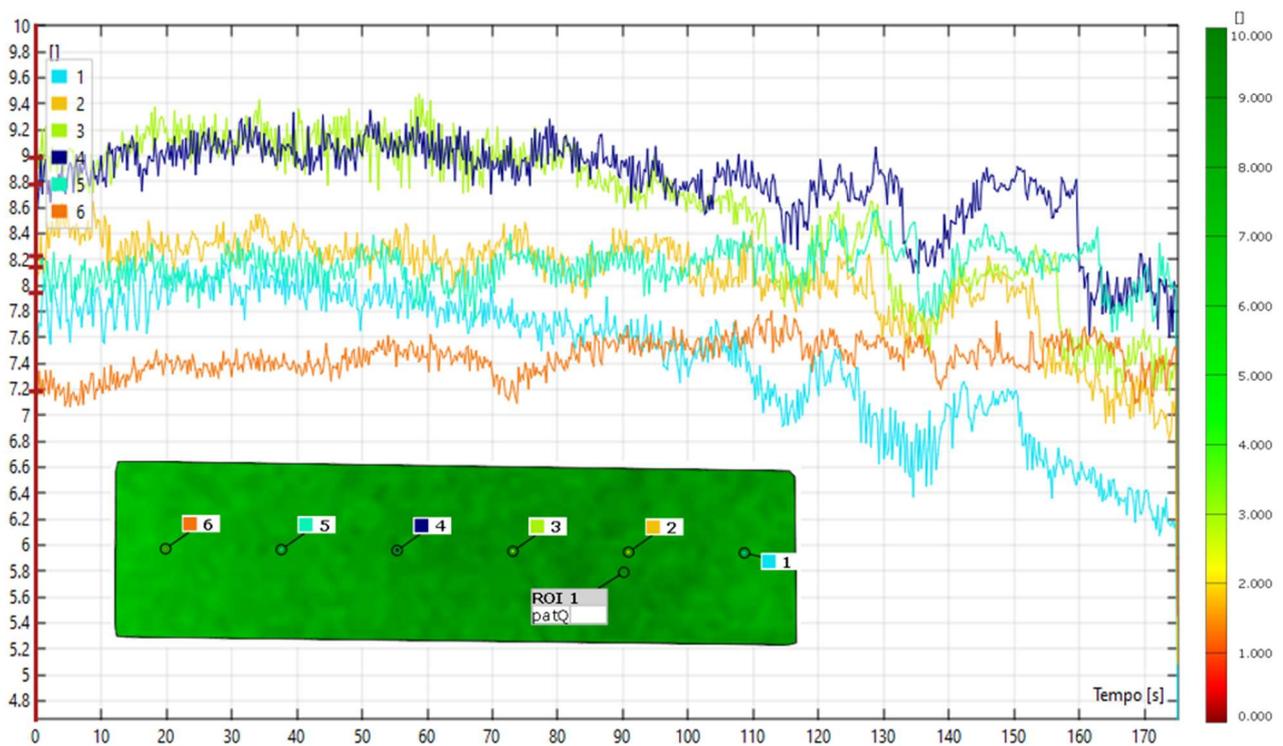


Figura 65 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 5

Accertata la qualità dei modelli e quindi la bontà dei calcoli effettuati si passa allo studio delle deformazioni per le prove TWIP 1 e 5, in particolare si vogliono analizzare quelle che sono le deformazioni localizzate riconducibili all'effetto Portevin-Le Chatelier. Nelle figure 66 e 67 vengono riportati i grafici relativi ai dati provenienti dalla macchina MTS, quali tensione e deformazione ingegneristiche, la tensione è stata ricavata dividendo il carico per la sezione iniziale del provino ed è espressa in MPa mentre la deformazione è stata ottenuta utilizzando un estensimetro virtuale molto grande similmente a quanto visto per le prove con l'acciaio DP600 ed è espressa in percentuale. Le curve Tensione-Deformazione che si ottengono sono caratterizzate da dei picchi irregolari, più o meno evidenti, che si formano nella parte plastica delle curve, questi picchi sono riconducibili alle bande di tipo A caratteristiche dell'effetto PLC. Dalle curve in questione non si hanno evidenze di bande di tipo B e C caratterizzate, come visto nel capitolo 4, da ampiezza e frequenza di oscillazione più elevata. Nelle figure 66 e 67 sono inoltre riportate le immagini relative a tutte le bande che sono state riscontrate tramite la tecnica di correlazione DIC e ogni immagine presenta una legenda di colori diversa in modo da evidenziare questi fenomeni di deformazione plastica localizzata, le immagini che raffigurano le bande relative alla prova TWIP1 corrispondono per la maggior parte dei casi ai picchi di tensione della curva di trazione poiché, ad eccezione della sola banda numero 6, le altre si generano nella parte del provino ripresa dalla fotocamera che corrisponde alla parte fissa. Nello specifico sono stati evidenziati tre picchi poco chiari (1,2,3) corrispondenti a bande di tipo A di piccola intensità e di breve durata e quattro picchi ben distinguibili (4,5,6,7)(figura43) che corrispondono a bande meno fragili che attraversano il provino nella sua interezza.

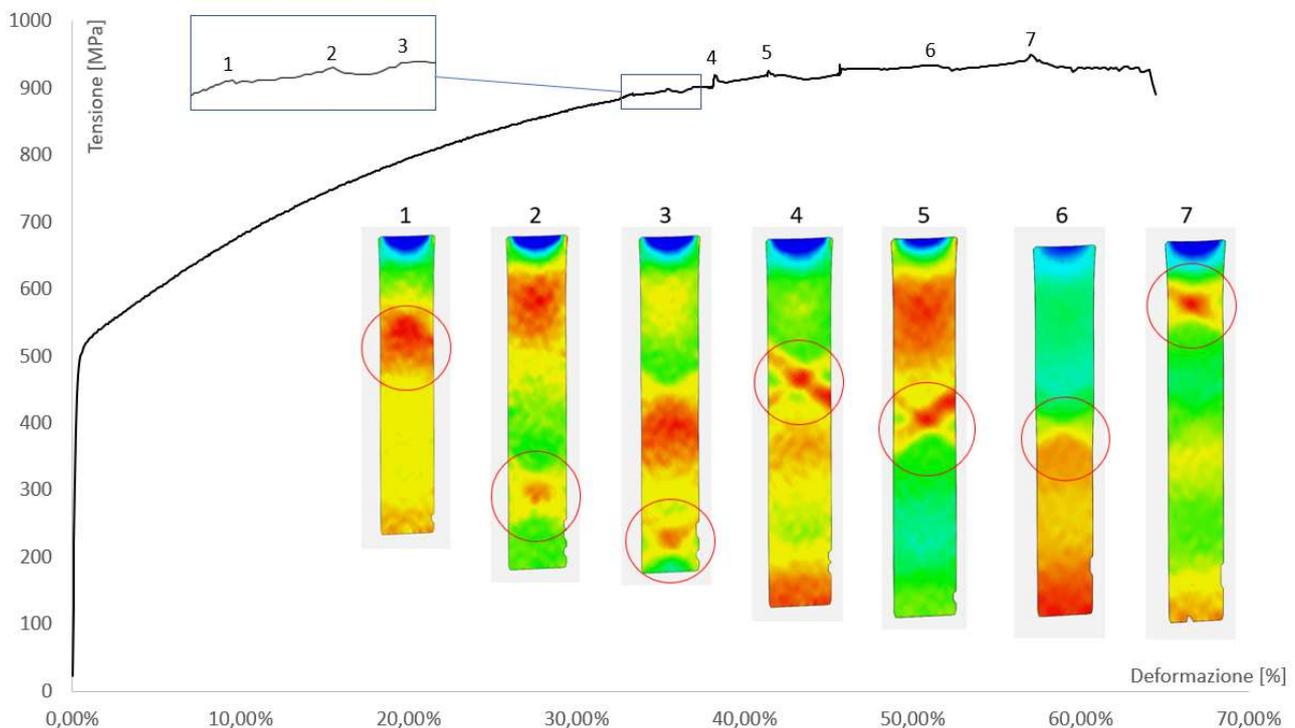


Figura 66 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 1.

Le immagini che raffigurano le bande relative alla prova TWIP5 corrispondono invece a zone della curva di trazione che sono successive ai picchi, questo perché nel caso in esame la formazione delle bande plastiche in questione è avvenuta al di fuori dell'inquadratura della telecamera, inoltre ogni immagine presenta una legenda di colori diversa in modo da evidenziare i fenomeni di deformazione plastica localizzata. Nello specifico sulla curva sono stati evidenziati tre picchi poco evidenti (1,2,3)(figura 67) che però corrispondono a bande PLC di tipo A molto robuste sia dal punto di vista dell'intensità della deformazione che della durata. L'unico picco molto evidente è quello relativo alla formazione dell'ultima banda (4)(figura 67) che poi porta alla rottura del campione.

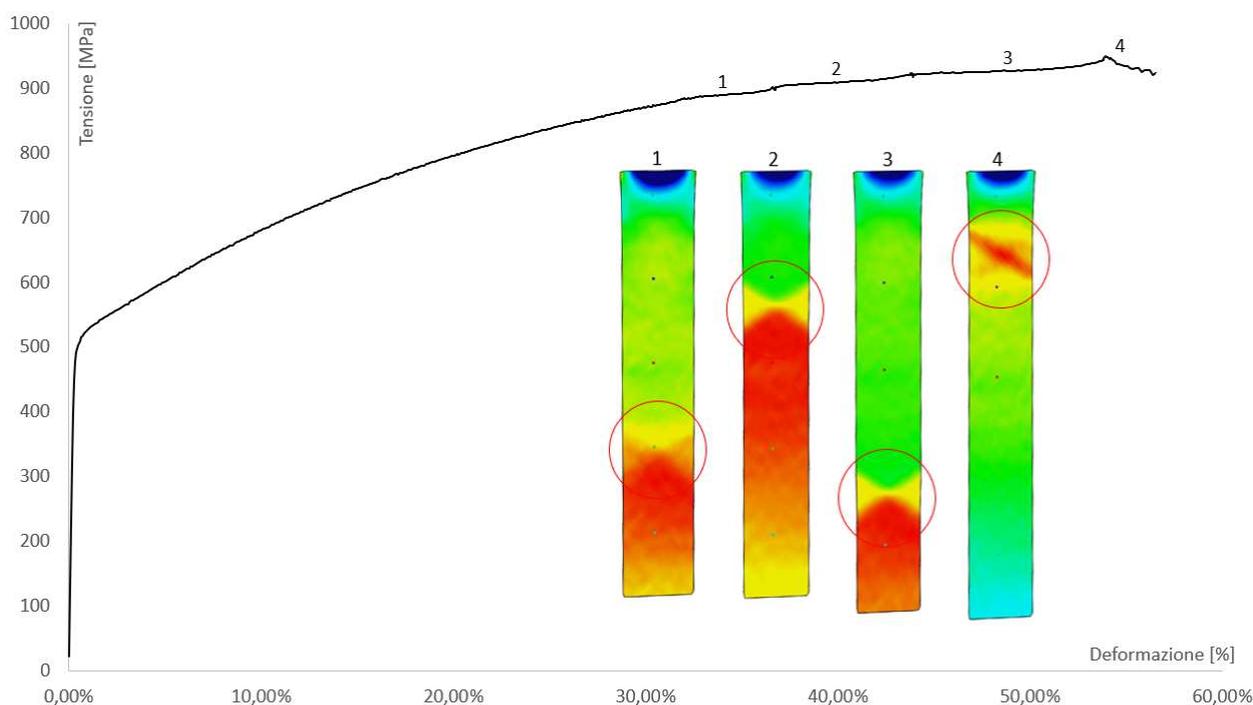


Figura 67 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 5.

Nelle figure 68 e 69 vengono riportate le analisi relative alla deformazione ingegneristica in direzione x; quindi, come questa si distribuisce sulla superficie di interesse e come evolve nel tempo. I grafici fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti e posti sull'asse longitudinale del provino. Il livello di deformazione raggiunto dai provini TWIP 1 e 5 sono rispettivamente del 73% e del 57.5%, per il provino della prova TWIP3 i fenomeni di deformazione plastica localizzata iniziano ad un livello di deformazione generale del 25%, mentre per il provino TWIP 4 iniziano ad un livello del 30%, il passaggio di ogni banda plastica per uno dei punti di calcolo è caratterizzato nelle curve deformazione-tempo da un gradino la cui altezza aumenta con l'incrudimento del materiale, quindi ogni banda plastica causa un aumento di deformazione sempre maggiore rispetto alla banda precedente. Inoltre, come per le prove precedenti la deformazione che subisce il provino è localizzata nella banda poiché prima e dopo il gradino le curve tendono all'orizzontale; quindi, le zone in cui non è presente la banda non subiscono una deformazione rilevante.

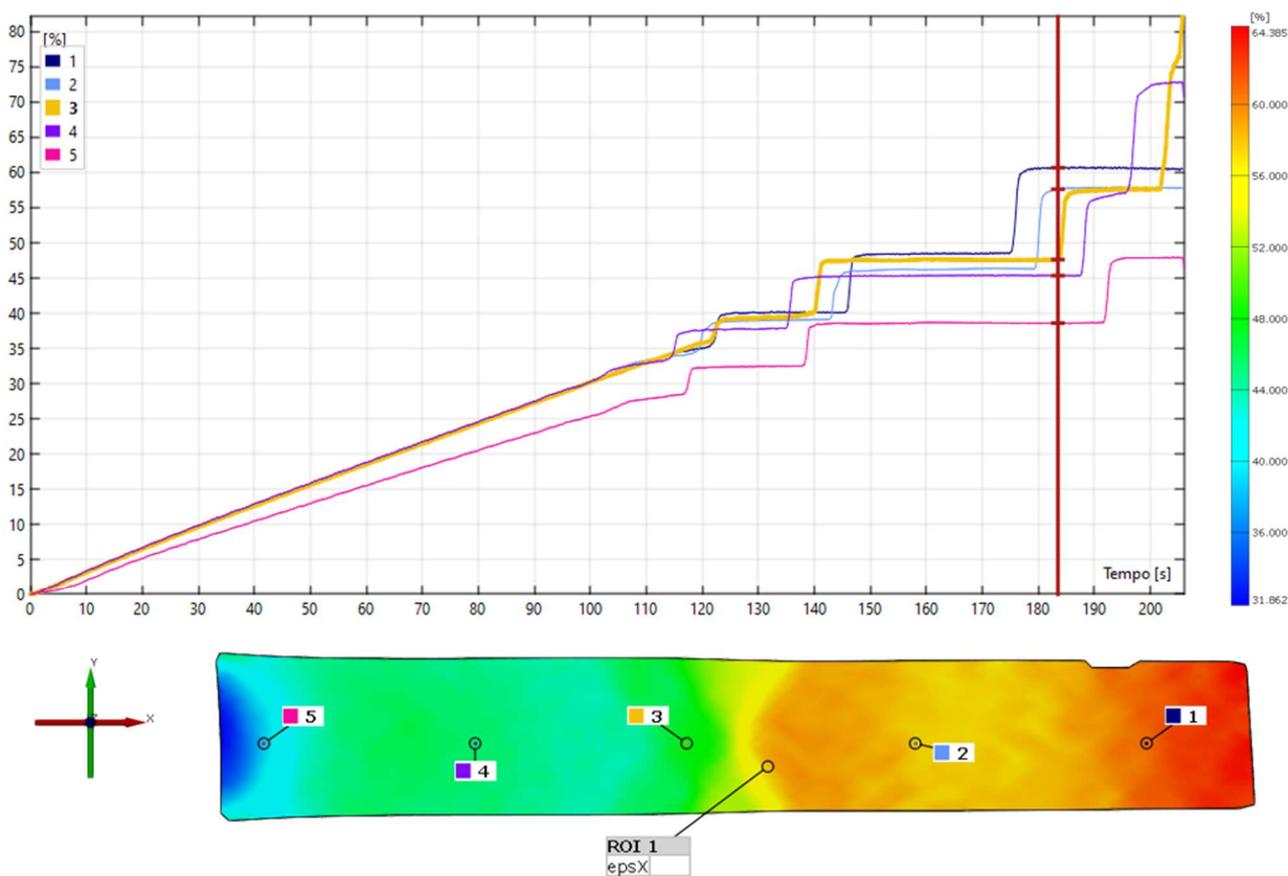


Figura 68 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 1 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

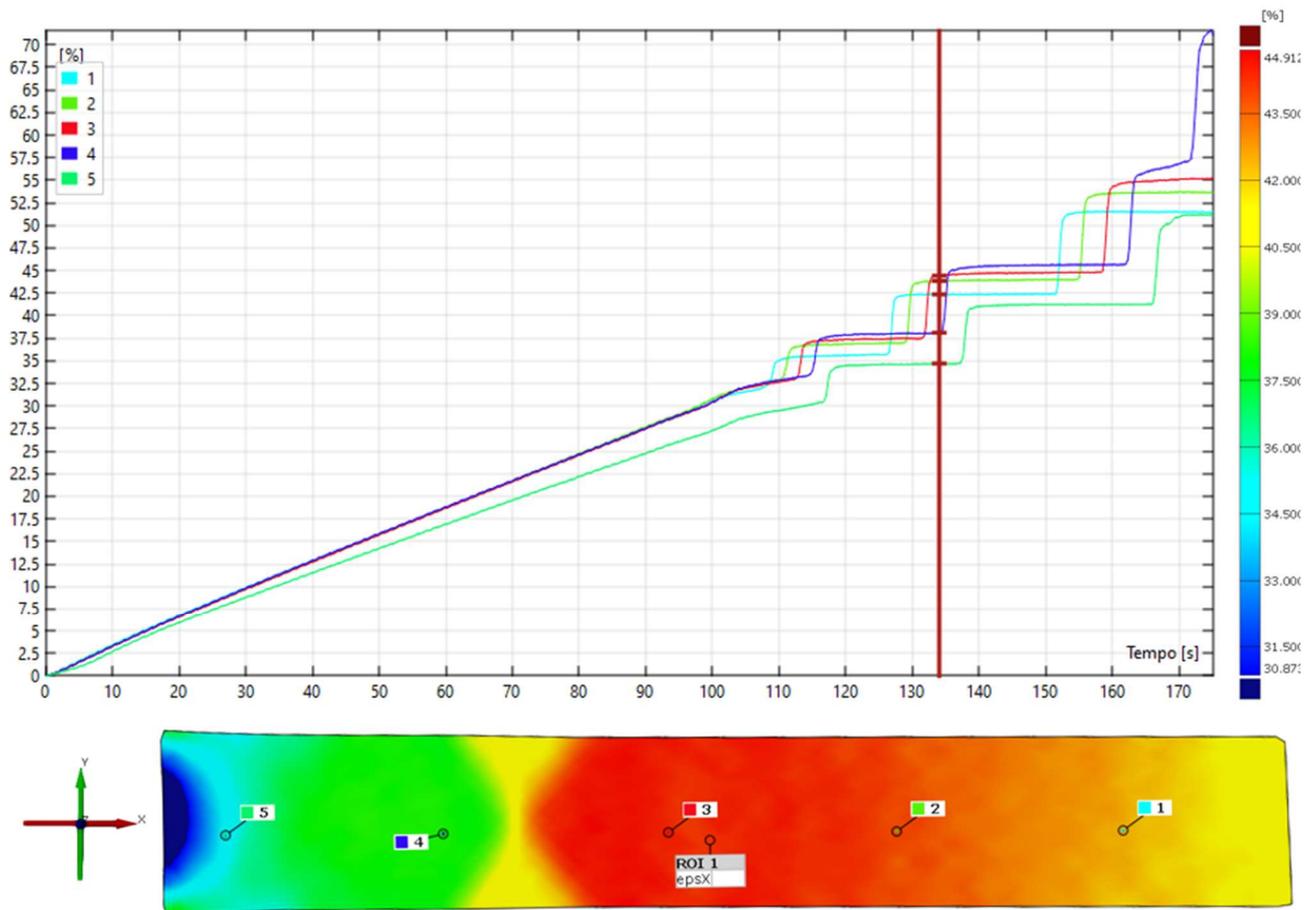


Figura 69 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 5 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

Nelle figure 70 e 71 vengono presentate le analisi dello strain-rate in direzione x, i grafici relativi fanno riferimento a sei punti di calcolo equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino. Da tale analisi è subito evidente come la deformazione introdotta con la macchina di trazione viene concentrata, dopo l'inizio degli effetti PLC, nelle bande di deformazione plastica di tipo A. L'analisi dello strain-rate è la migliore per studiare le dimensioni e le forme delle bande ed infatti si nota come, nella maggior parte dei casi, quelle che sembravano essere delle singole bande sono invece delle coppie di bande che viaggiano insieme lungo il provino. L'ampiezza delle singole bande per la prova TWIP1 è di 6/8mm mentre l'ingombro della coppia di bande va dai 18 ai 22mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale in modulo è compreso all'incirca tra i 53° e i 60°, ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. In generale quando si è in presenza di una coppia di bande la zona centrale della banda è caratterizzata da un livello di strain-rate più elevato, questo perché tale zona rappresenta l'incrocio delle due bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio della banda la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y). Nella prova TWIP 1 si formano inizialmente tre/quattro bande con una deformazione intrinseca molto bassa che viaggiano per brevi tratti e nella maggior parte dei casi dall'estremità mobile a quella fissa, successivamente le bande che si formano sono più stabili e percorrono tutta la lunghezza utile del provino, in alcuni casi anche dall'estremità fissa a quella

mobile. Il materiale poi si rompe quando l'ultima banda diventa stazionaria e la deformazione non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino, si arriva dunque ad una strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

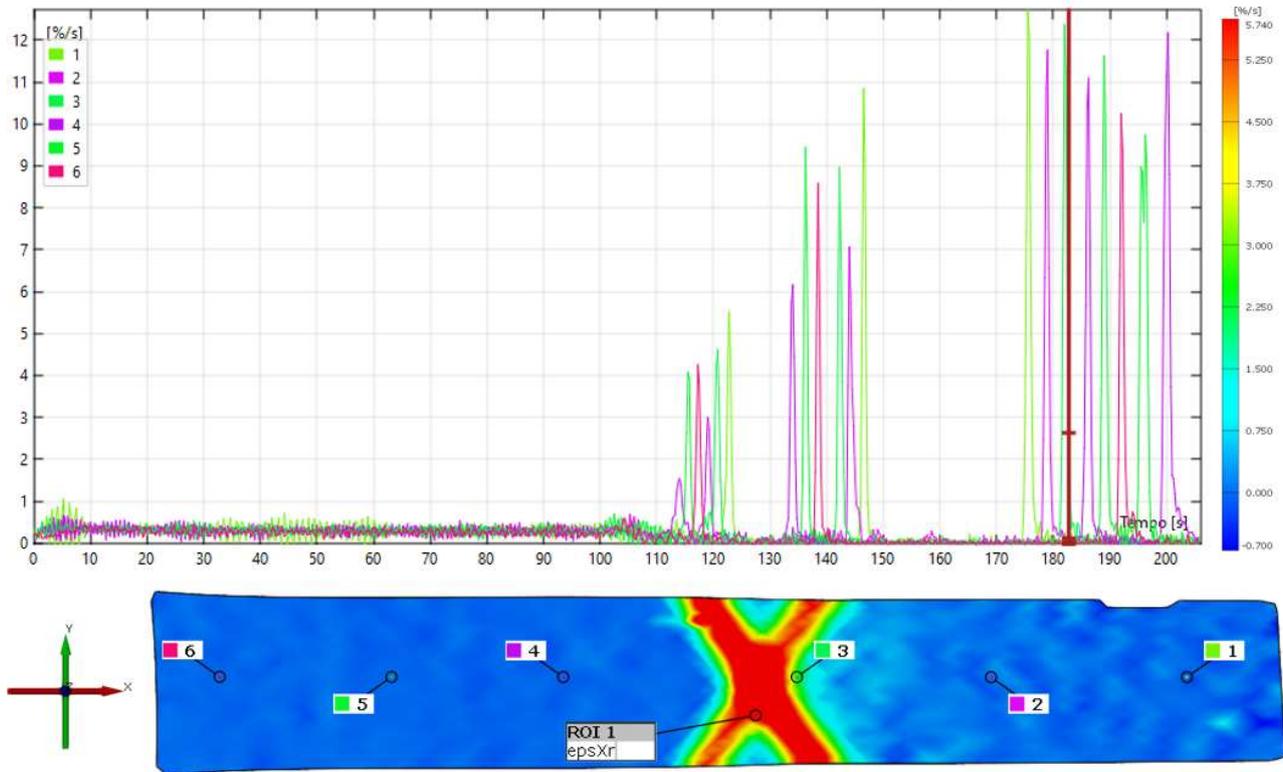


Figura 70 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 1 in sei punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

L'ampiezza delle singole bande per la prova TWIP5 è di 8mm per la prima banda e 4/5mm per le successive mentre l'ingombro della coppia di bande va dai 17 ai 19mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale in modulo è compreso all'incirca tra i 54° e i 57°, ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. In generale quando si è in presenza di una coppia di bande la zona centrale della banda è caratterizzata da un livello di strain-rate più elevato, questo perché tale zona rappresenta l'incrocio delle due bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio della banda la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y). Le bande studiate per la prova TWIP 5 sono molto simili tra loro nella forma e nelle dimensioni, presentano anche lo stesso comportamento. Le prime tre bande nascono al di fuori dell'inquadratura vicino all'estremità mobile e percorrono l'intera lunghezza del provino fino ad arrivare all'estremità fissa dove diventano bande stazionarie e si estinguono. L'ultima banda nasce vicino all'estremità fissa e viaggia lungo il provino per un piccolo tratto nel verso opposto a quello delle precedenti bande finché non si arriva alla rottura del provino. Quest'ultima banda risulta essere un po' più instabile nel tempo poiché in alcuni istanti è singola ed in altri composta da due semi-bande, inoltre cambia inclinazione di continuo. Nello specifico il materiale si rompe quando l'ultima banda

diventa stazionaria e la deformazione non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino, si arriva dunque ad una strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

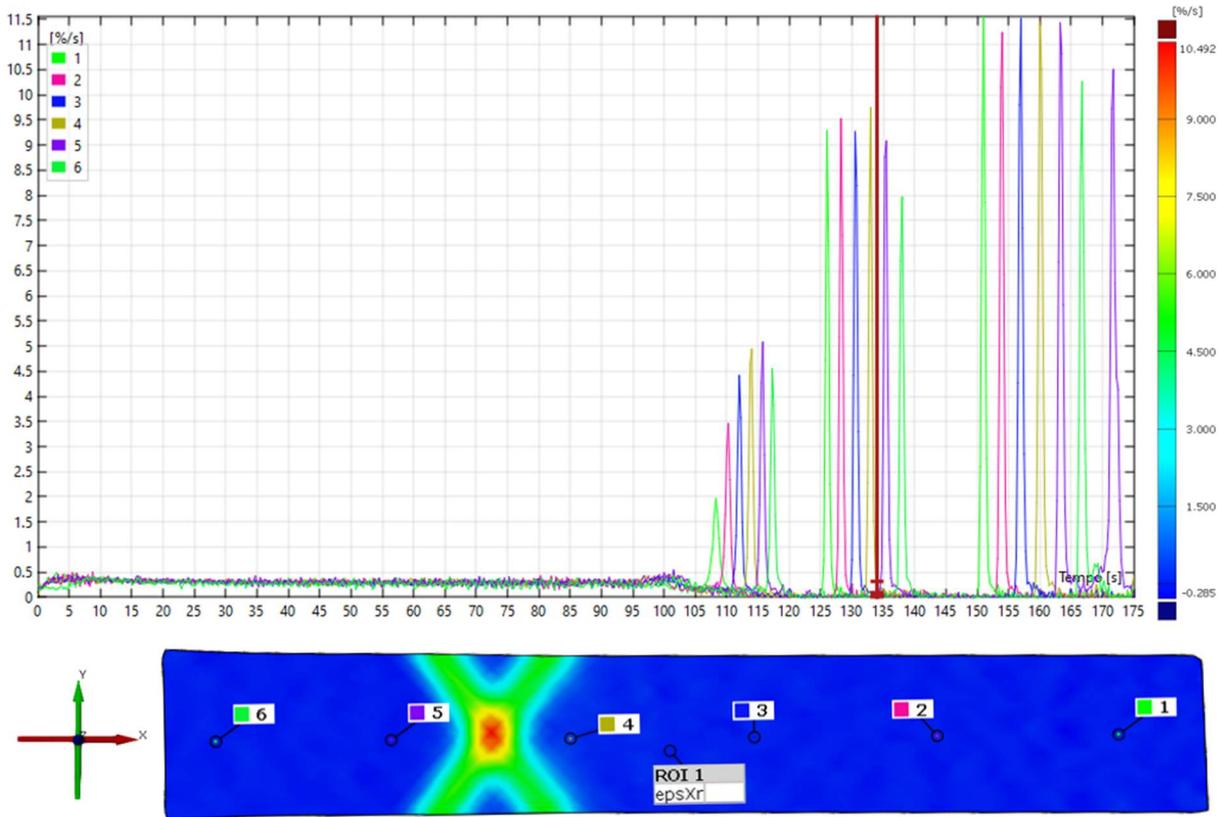


Figura 71 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 5 in sei punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Le ultime analisi che vengono effettuate sulle immagini delle prove TWIP 1 e 5 sono presentate in figura 72 e 73 e rappresentano lo studio delle velocità in direzione x, in particolare i grafici fanno riferimento a dieci punti di calcolo per la prova TWIP1 e cinque punti di calcolo per la TWIP2 equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. I grafici permettono di distinguere come il provino, durante la prova di trazione, cambia il modo di reagire a delle deformazioni imposte. Più nello specifico, dopo un transitorio corrispondente alla deformazione elastica, i punti della superficie si muovono con una velocità distribuita linearmente lungo tutta la dimensione maggiore del provino, questo per rispettare le condizioni al contorno che impongono velocità nulla per la parte fissa e 0,4mm/s per la parte mobile del provino. Questa situazione di plasticità uniformemente distribuita è presente fino a circa 100 secondi dall'inizio della prova, valore temporale coincidente con la formazione delle prime bande PLC di tipo A. Il passaggio da deformazione uniforme a deformazione localizzata è veloce ma non repentino; infatti, le prime bande non riescono ad "assorbire" tutta la deformazione introdotta nel provino durante la prova, a dimostrazione di ciò nelle analisi relative alla deformazione e allo strain-rate le prime bande sono caratterizzate rispettivamente da una dimensione del gradino e un'altezza dei picchi minore rispetto ai valori relativi alle bande PLC presenti nella parte finale della prova. Questo comportamento è visibile anche nello studio delle velocità, infatti il livello di "concentrazione" della deformazione all'interno

della banda è correlabile al dislivello di velocità che si crea tra la parte che è stata attraversata dalla banda e quella che ancora deve esserne attraversata. Nei casi in esame si arriva alla condizione limite, rappresentata nelle figure 72 e 73, dove l'area colorata in blu, che rappresenta la zona ancora non attraversata dalla banda, è praticamente ferma mentre l'area colorata in rosso, cioè quella già attraversata dalla banda, si muove circa a 0,4mm/s che difatti è la velocità con cui si muove il pistone mobile della macchina di trazione. Questo dato è anche un indicatore della bontà delle misurazioni effettuate tramite DIC che rimangono coerenti con la fisica del problema.

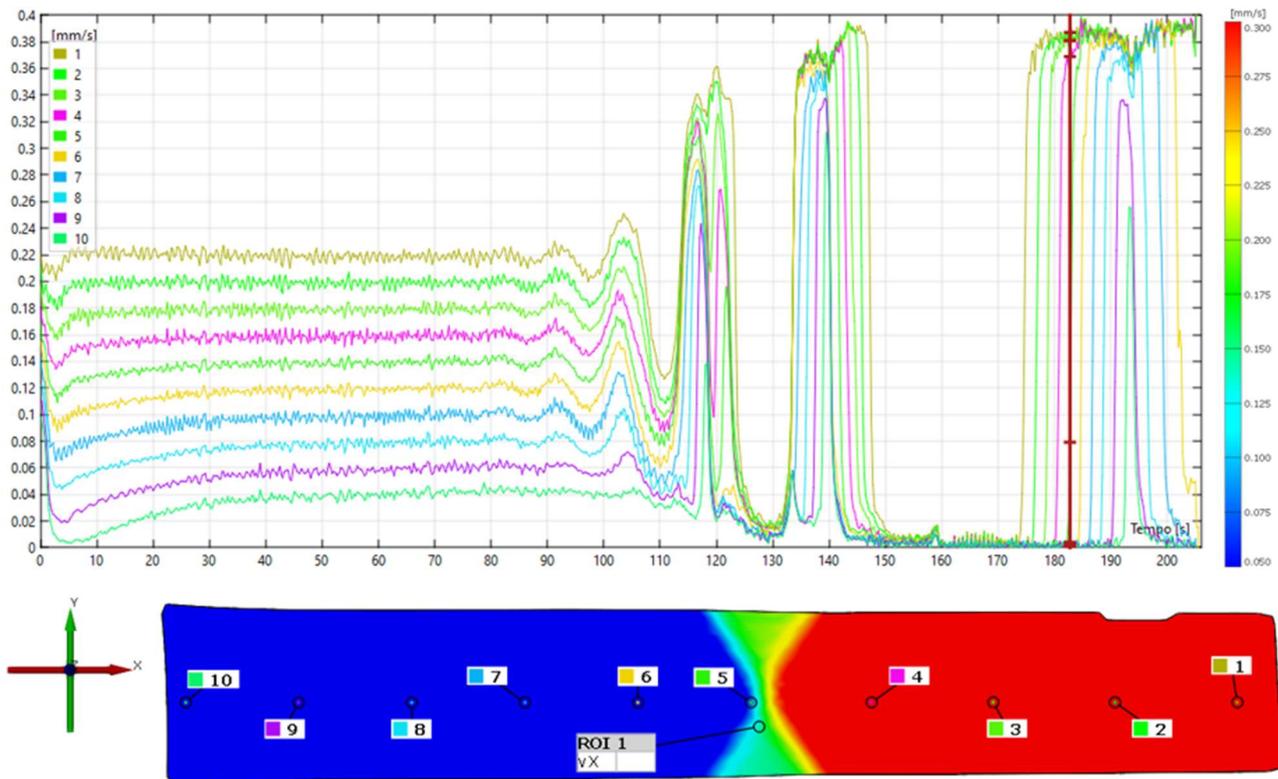


Figura 72 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 1 in dieci punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

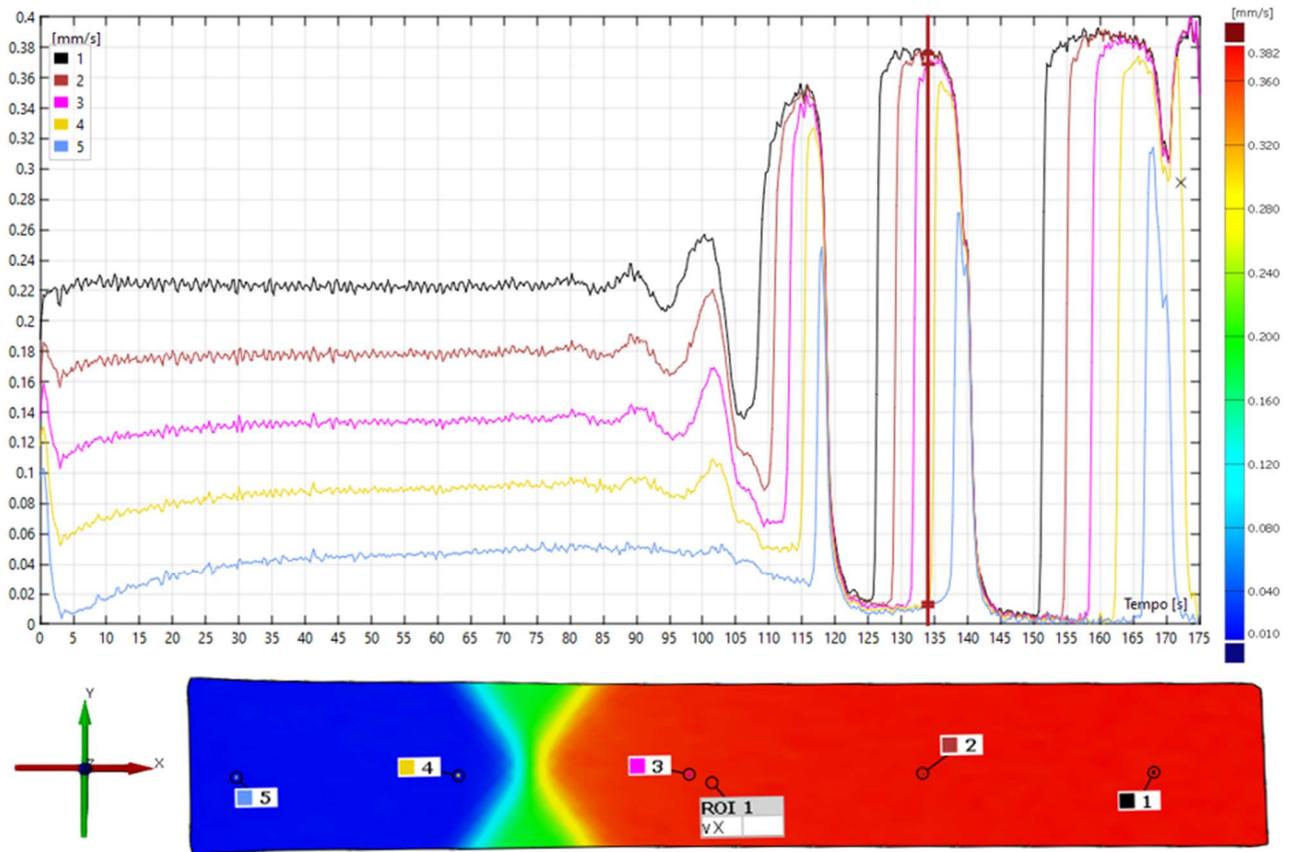


Figura 73 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 5 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

6.4 Prove alla velocità di 4 mm/s

La seconda (TWIP2) e la sesta (TWIP6) prova relativa agli acciai TWIP sono state condotte ad una velocità del pistone mobile di 4 mm/s, tale velocità fa sì che le prove siano molto brevi, la durata della TWIP2 è di 16,5 secondi e la durata della TWIP6 di 18,3 secondi. I grafici presenti in figura 74 e 75 rappresentano lo studio relativo alla qualità del modello presente nelle immagini acquisite e fanno riferimento a quattro/cinque punti di interesse equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. Tale analisi è necessaria per capire quanto le immagini acquisite tramite il sistema DIC siano adatte ad essere sottoposte ad un calcolo di correlazione digitale. Lo studio relativo alla prova TWIP2 è riportato nel grafico presente in figura 74 dove è possibile evidenziare due drop importanti a cui viene associato un calo della qualità. Il primo drop si presenta all'inizio della prova, infatti la prima immagine acquisita risulta avere una qualità del modello media superiore anche di 3 punti rispetto alle immagini immediatamente successive, passando all'incirca da un 10 ad un 7. Questo primo calo non è un problema poiché 7 risulta essere un valore più che accettabile per effettuare la correlazione delle immagini. Il secondo drop si verifica verso la fine della prova e abbassa la qualità del modello di altri 4 punti, le immagini relative alla parte finale della prova vengono quindi giudicate a malapena sufficienti per il calcolo di correlazione. In particolare, la qualità del modello era molto elevata nell'immagine di riferimento, ciò ha permesso di escludere la qualità del pattern stocastico impresso sulla superficie come una delle cause dei drop che sono stati registrati. Analizzando cosa succede nel provino durante la prova si è trovato che il primo drop coincide con l'inizio della prova stessa e quindi con la messa in moto del pistone mobile, dal grafico inoltre si nota come nel primo drop i punti caratterizzati da un calo maggiore della qualità sono quelli che si trovano vicino alla parte mobile del provino e quindi che si muovono a velocità più elevata. Questo perché in una condizione di deformazione plastica uniforme la velocità è distribuita linearmente da 0mm/s (parte fissa) a 4mm/s (parte mobile) per tutta la lunghezza utile del provino. Il secondo drop coincide con la formazione di una banda PLC di tipo A che sostanzialmente divide il provino in due metà, una che rimane ferma dove si registra una risalita in termini di qualità del modello, e una che si muove ad una velocità prossima a quella del pistone e quindi caratterizzata da un importante calo della qualità del modello. Indagando le cause di questi cali repentini di qualità, si può dedurre che l'unico fattore responsabile è la velocità con cui si muove la superficie del campione sottoposto alla prova che fa risultare le immagini sfocate. Poiché si usa un'ottica a fuoco fisso, il problema non è riconducibile alla messa a fuoco ma probabilmente è dovuto ad un eccessivo tempo di esposizione e quindi le immagini risultano mosse poiché la superficie si muove eccessivamente durante il tempo di esposizione. Non si verificano invece alterazioni riconducibili a dei cambiamenti improvvisi dell'intensità luminosa.

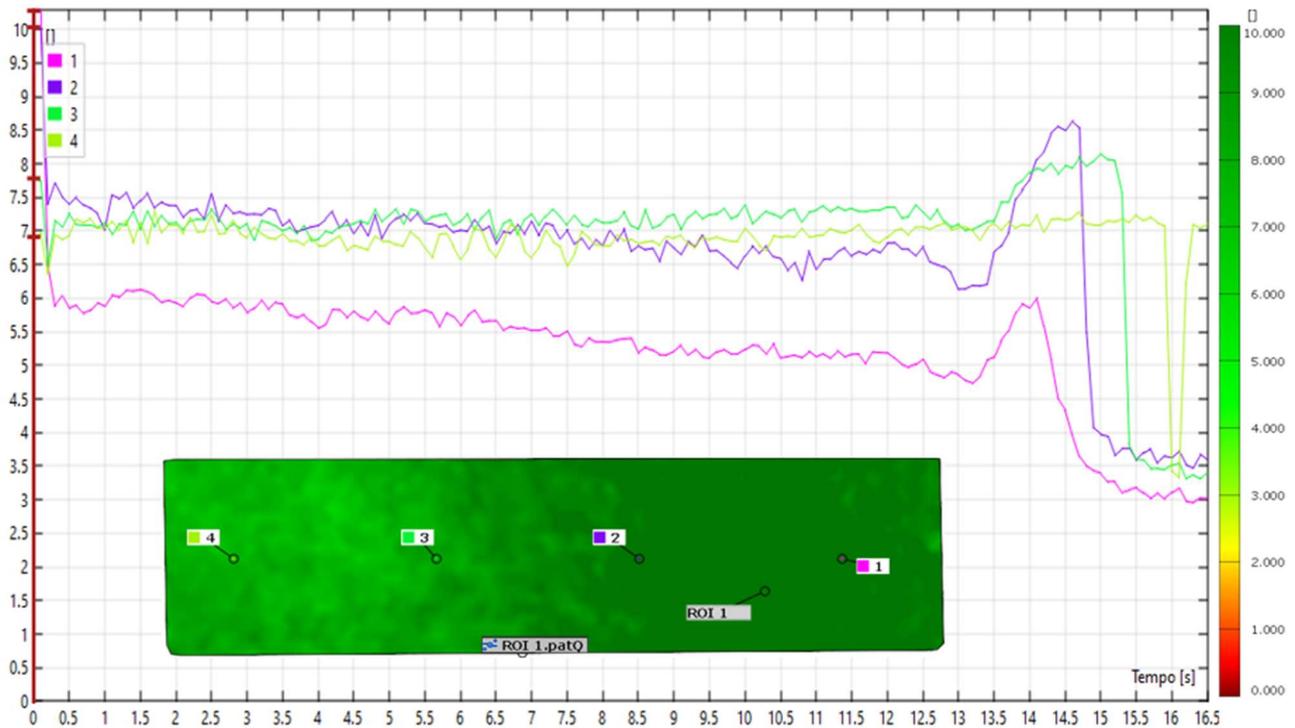


Figura 74 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 2

Anche per la prova TWIP6 è possibile evidenziare due drop importanti a cui viene associato un calo della qualità. Il primo drop si presenta all'inizio della prova, infatti la prima immagine acquisita risulta avere una qualità del modello molto alta e di 3 punti superiore rispetto alle immagini immediatamente successive, passando all'incirca da un 12-10 ad un 9-7. Questo primo calo non è un problema poiché 7 risulta essere un valore più che accettabile per effettuare la correlazione delle immagini. Il secondo drop si verifica verso la fine della prova e abbassa la qualità del modello di altri 4 punti, le immagini relative alla parte finale della prova vengono quindi giudicate a malapena sufficienti per il calcolo di correlazione. Indagando le cause di questi cali repentini di qualità, si può dedurre, come fatto in precedenza, che l'unico fattore responsabile è la velocità con cui si muove la superficie del campione sottoposto alla prova che va in conflitto con un tempo di esposizione troppo elevato. Nel caso in esame la qualità del modello era molto elevata nell'immagine di riferimento, ciò ha permesso di escludere la qualità del pattern stocastico impresso sulla superficie come una delle cause dei drop che sono stati registrati e non si verificano alterazioni riconducibili a dei cambiamenti improvvisi dell'intensità luminosa.

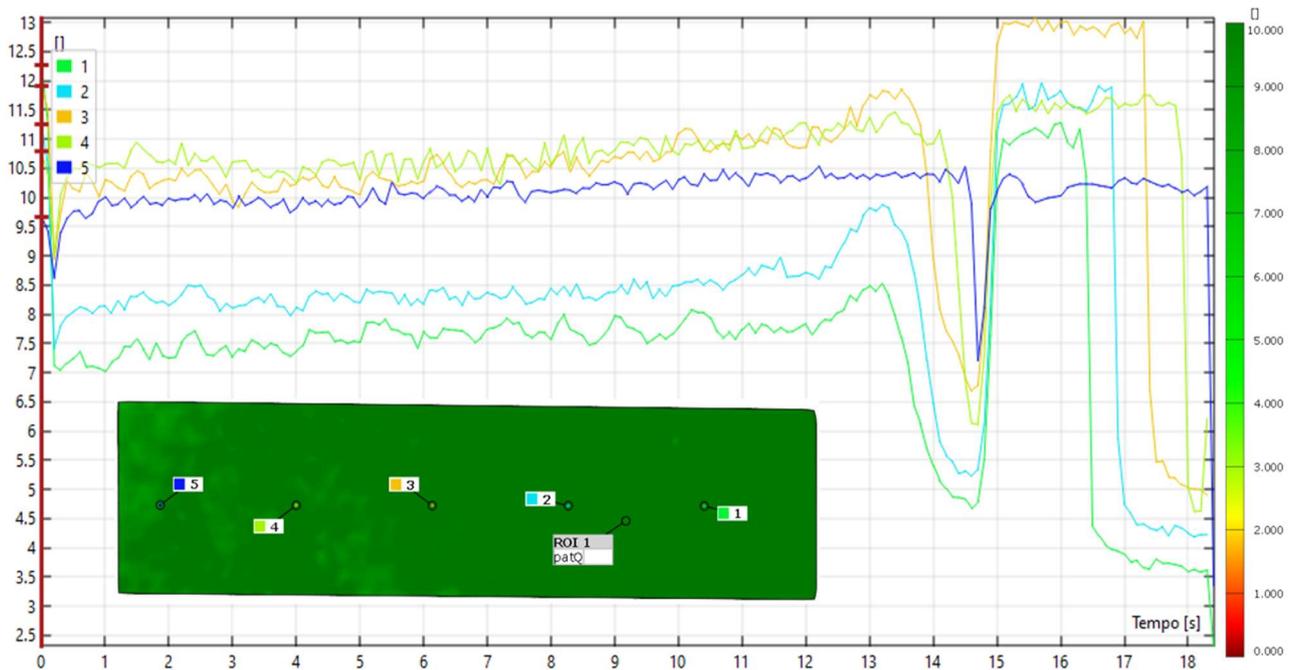


Figura 75 rappresentazione grafica della qualità del modello stocastico durante l'arco temporale della prova di trazione TWIP 6

Accertata la qualità dei modelli e quindi la bontà dei calcoli effettuati si passa allo studio delle deformazioni per le prove TWIP 2 e 6, in particolare si vogliono analizzare quelle che sono le deformazioni localizzate riconducibili all'effetto Portevin-Le Chatelier. Nelle figure 76 e 77 vengono riportati i grafici relativi ai dati provenienti dalla macchina MTS, quali tensione e deformazione ingegneristiche, la tensione è stata ricavata dividendo il carico per la sezione iniziale del provino ed è espressa in MPa mentre la deformazione è stata ottenuta utilizzando un estensimetro virtuale molto grande similmente a quanto visto per le prove con l'acciaio DP600 ed è espressa in percentuale. Le curve Tensione-Deformazione che si ottengono sono caratterizzate da dei picchi irregolari, più o meno evidenti, che si formano nella parte plastica delle curve, questi picchi sono riconducibili alle bande di tipo A caratteristiche dell'effetto PLC. Dalle curve in questione non si hanno evidenze di bande di tipo B e C caratterizzate, come visto nel capitolo 4, da ampiezza e frequenza di oscillazione più elevata. Nelle figure 76 e 77 sono inoltre riportate le immagini relative a tutte le bande che sono state riscontrate tramite la tecnica di correlazione DIC e ogni immagine presenta una legenda di colori diversa in modo da evidenziare questi fenomeni di deformazione plastica localizzata. Per quanto riguarda la prova TWIP2 il primo picco è poco evidente nella curva carico-corsa ed è stato annotato perché dalla correlazione di immagini digitali corrisponde alla formazione di una zona di localizzazione della deformazione plastica. Il secondo picco è invece più netto e il calo di carico/tensione coincide indiscutibilmente con la formazione di una banda plastica di tipo A che viaggia fino all'estremità fissa del provino per poi rimbalzare su di essa e continuare in senso opposto fino a quando la banda diventa stazionaria e la deformazione non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino, si arriva dunque ad una strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

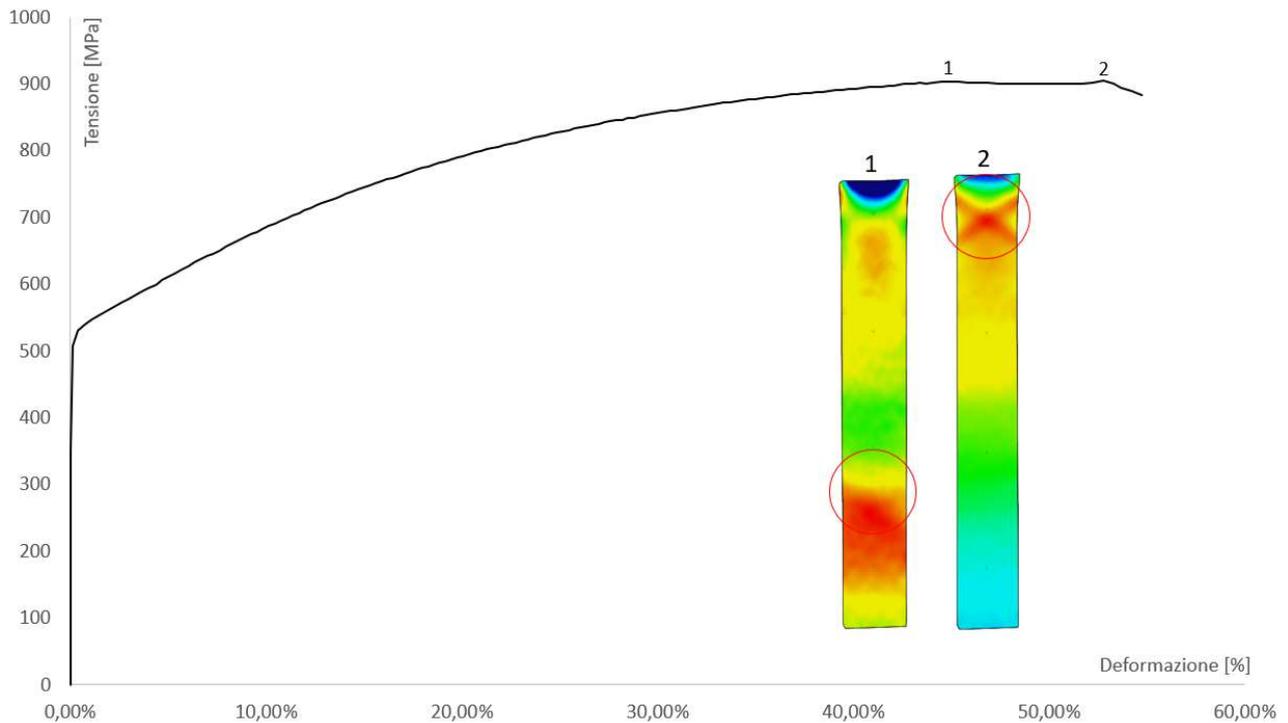


Figura 76 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 2.

Nel caso della prova TWIP6 le immagini 1 e 2 (figura 77) non corrispondono ai picchi della curva di trazione ma alle zone tra un picco e l'altro, questo perché nel caso in esame la formazione delle bande plastiche è avvenuta al di fuori dell'inquadratura della telecamera. In questo caso come prevedibile dalla letteratura e come riscontrato nella prova TWIP2, il numero di bande che si vengono a formare durante la prova diminuisce all'aumentare della velocità di deformazione adottata. In questo caso si formano tre bande principali a fronte di un solo picco evidente nella curva di trazione, che corrisponde alla banda rappresentata in (2), la quale risulta essere l'unica che percorre il provino per un tratto considerevole dall'estremità mobile verso quella fissa. La prova si conclude con la formazione di un'ultima banda stazionaria; quindi, la deformazione non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino, si arriva dunque ad una strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

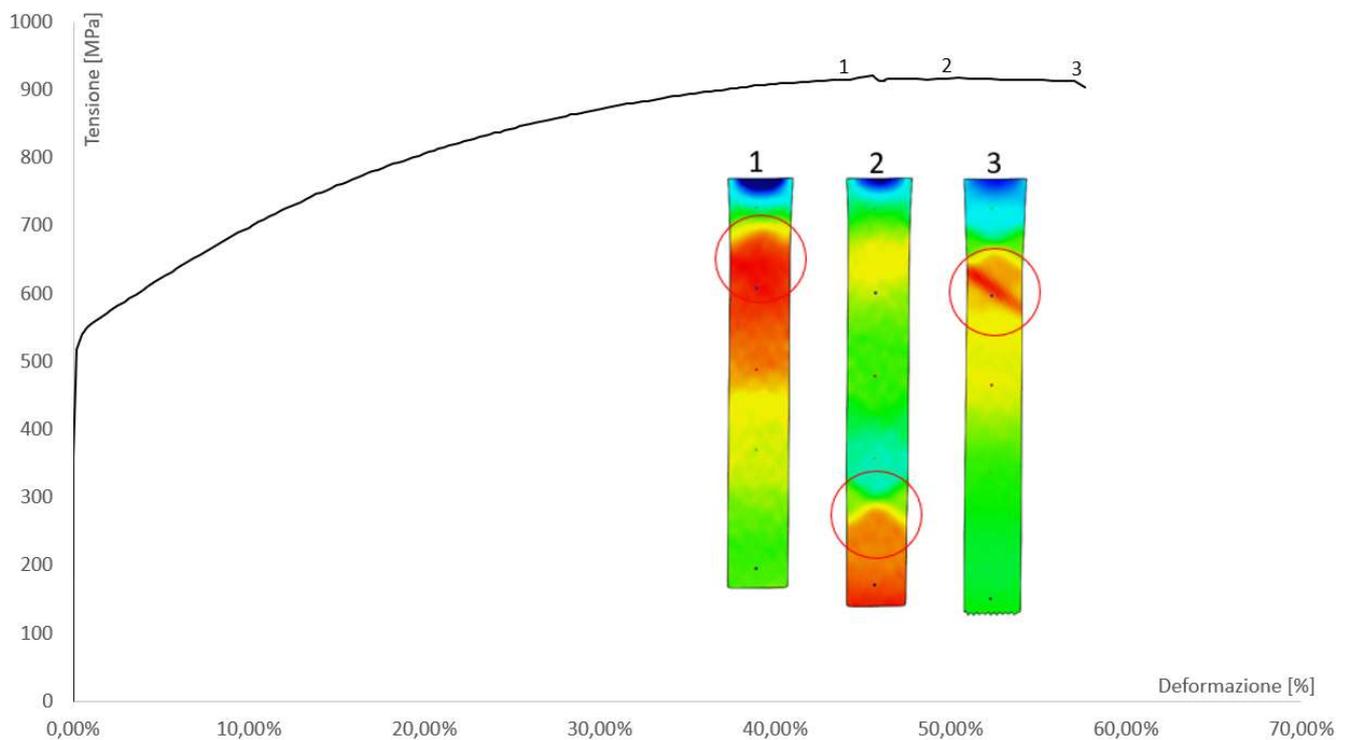


Figura 77 Curva Tensione-Deformazione e mappe di deformazione per ogni banda comparsa nell'area di studio durante la prova di trazione TWIP 6.

Nelle figure 78 e 79 vengono riportate le analisi relative alla deformazione ingegneristica in direzione x; quindi, come questa si distribuisce sulla superficie di interesse e come evolve nel tempo. I grafici fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti e posti sull'asse longitudinale del provino. Il livello di deformazione raggiunto dai provini TWIP 2 e 6 sono rispettivamente del 60% e del 65%, per entrambi i provini i fenomeni di deformazione plastica localizzata iniziano ad un livello di deformazione generale del 37,5-40%, il passaggio di ogni banda plastica per uno dei punti di calcolo è caratterizzato nelle curve deformazione-tempo da un gradino la cui altezza aumenta con l'incrudimento del materiale, quindi ogni banda plastica causa un aumento di deformazione sempre maggiore rispetto alla banda precedente. Inoltre, come per le prove precedenti la deformazione che subisce il provino è localizzata nella banda poiché prima e dopo il gradino le curve tendono all'orizzontale; quindi, le zone in cui non è presente la banda non subiscono una deformazione rilevante. Nello specifico la prova TWIP2 è caratterizzata da un unico gradino mentre nella prova TWIP6 se ne identificano due.

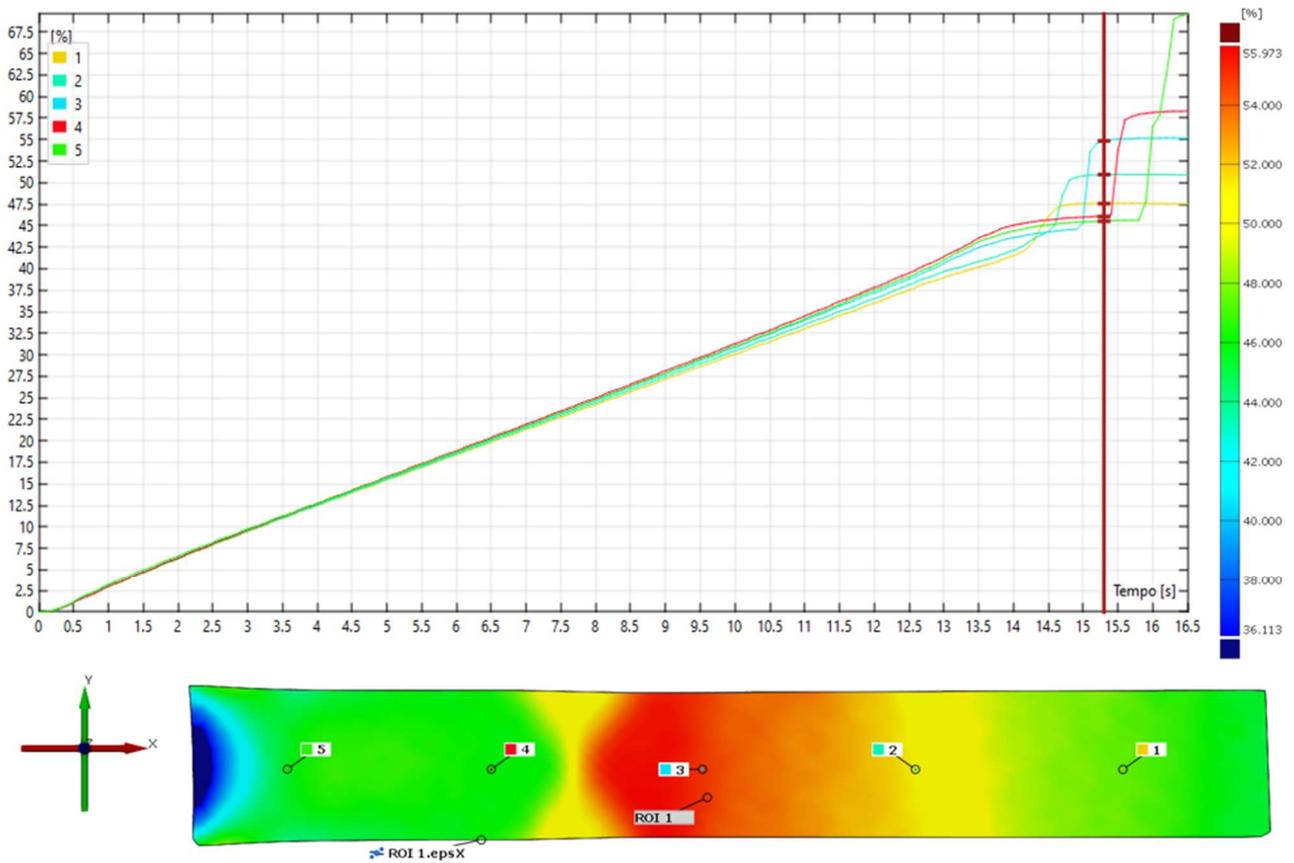


Figura 78 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 2 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

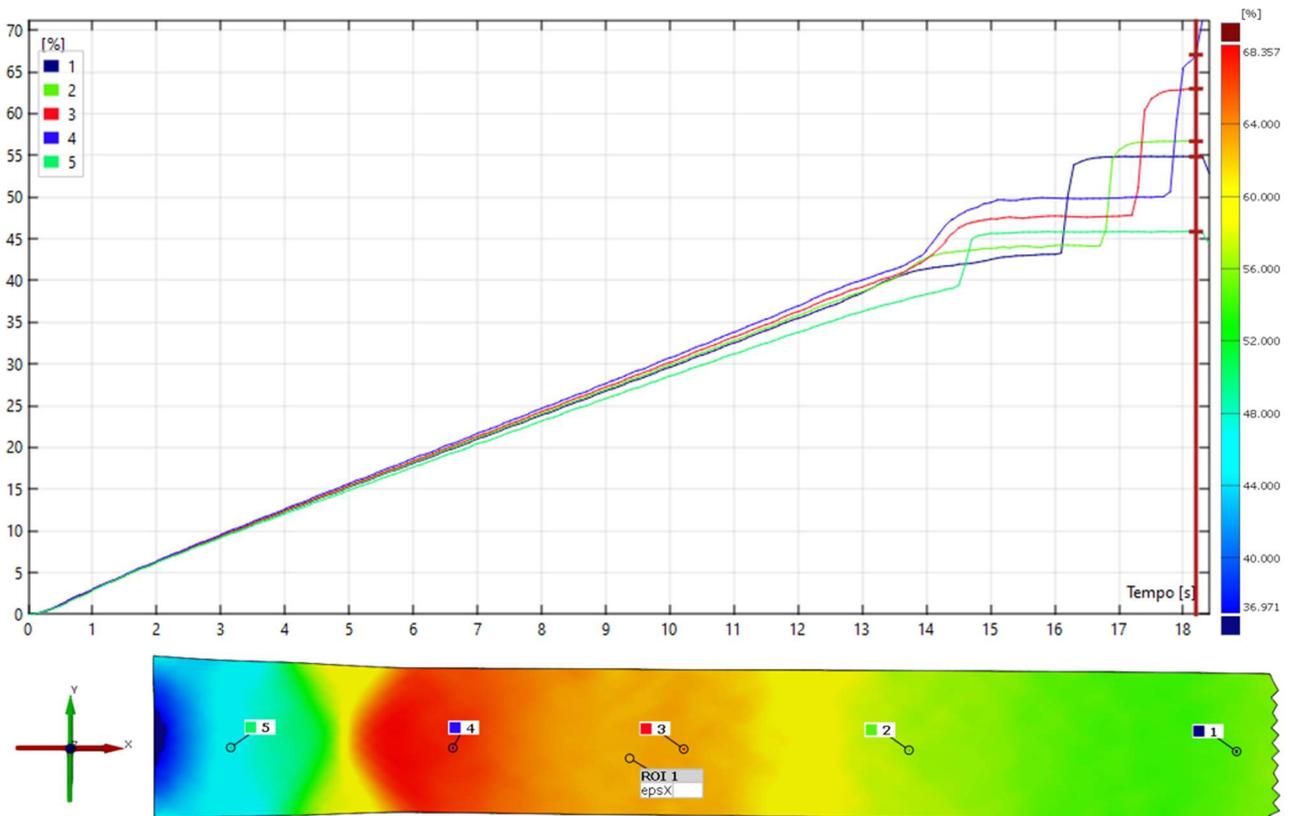


Figura 79 Analisi della deformazione(x) nell'arco temporale della prova di trazione TWIP 6 in cinque punti equidistanti tra loro disposti lungo l'asse longitudinale del provino.

Nelle figure 80 e 81 vengono presentate le analisi dello strain-rate in direzione x, i grafici relativi fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino. Da tale analisi è subito evidente come la deformazione introdotta con la macchina di trazione viene concentrata, dopo l'inizio degli effetti PLC, nelle bande di deformazione plastica di tipo A. L'analisi dello strain-rate è la migliore per studiare le dimensioni e le forme delle bande ed infatti si nota come, nella maggior parte dei casi, quelle che sembravano essere delle singole bande sono invece delle coppie di bande che viaggiano insieme lungo il provino. L'ampiezza della singola banda per la prova TWIP2 è di 8/9mm mentre l'ingombro della coppia di bande va dai 16 ai 20mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale in modulo è compreso all'incirca 56° , ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. In generale quando si è in presenza di una coppia di bande la zona centrale della banda è caratterizzata da un livello di strain-rate più elevato, questo perché tale zona rappresenta l'incrocio delle due semi-bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio della banda la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y).

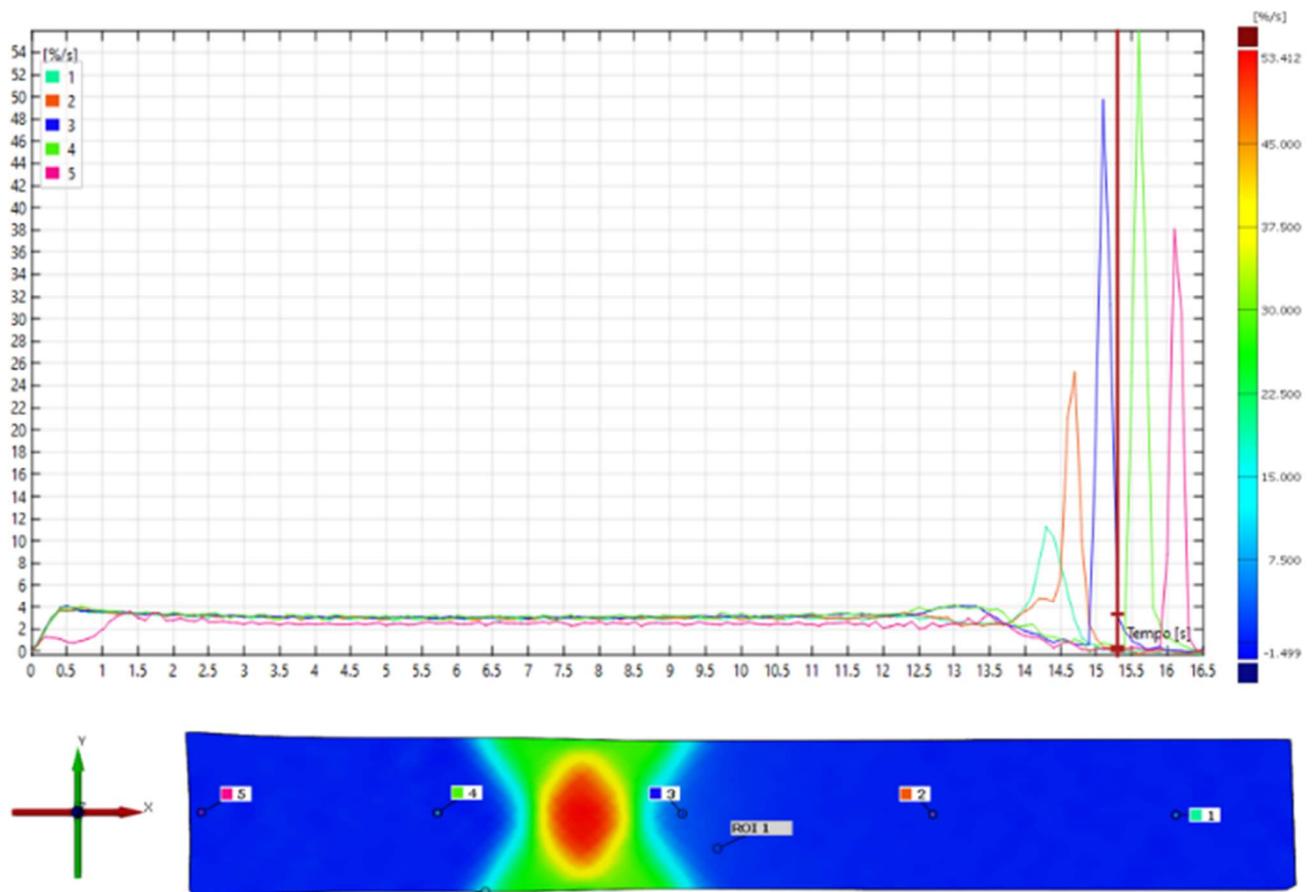


Figura 80 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 2 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Nel caso TWIP6 l'ampiezza delle singole bande è di 8/9mm mentre l'ampiezza della coppia di bande va dai 20 ai 21mm, l'angolo di inclinazione delle bande rispetto all'orizzontale è in modulo di circa 56° , ciò è in linea con quanto riportato in letteratura. Non si riesce a trovare una correlazione tra ampiezza della banda e angolo della banda e neanche un collegamento di questi due parametri con l'incrudimento del materiale del provino sottoposto alla prova di trazione. La zona

centrale della banda è caratterizzata da un livello di strain-rate più elevato questo perché tale zona rappresenta l'incrocio delle due bande ed i rispettivi valori di strain-rate si sommano, i risultati sono quindi coerenti con la fisica in quanto dopo il passaggio della banda la distribuzione della deformazione deve essere uniforme per tutta la larghezza del provino (y). Nello specifico i primi fenomeni PLC riscontrati sono una coppia di bande, in questo caso come nella prova TWIP 2 la larghezza delle bande singole che compongono la coppia è più grande del solito e porta ad una zona centrale della banda più estesa e uniforme. Le prime due bande si muovono dalla parte mobile a quella fissa, nel momento in cui la prima si estingue se ne forma una stazionaria al centro del provino che si dissolve subito dopo, la seconda banda si estingue poco prima di arrivare all'estremità fissa del provino e mentre si dissolve si forma l'ultima banda registrata composta da una singola semi-banda stazionaria, la deformazione quindi non si distribuisce più per tutta la lunghezza del provino e si arriva alla strizione che crea una superficie di frattura inclinata dello stesso angolo della banda da cui si è stata originata.

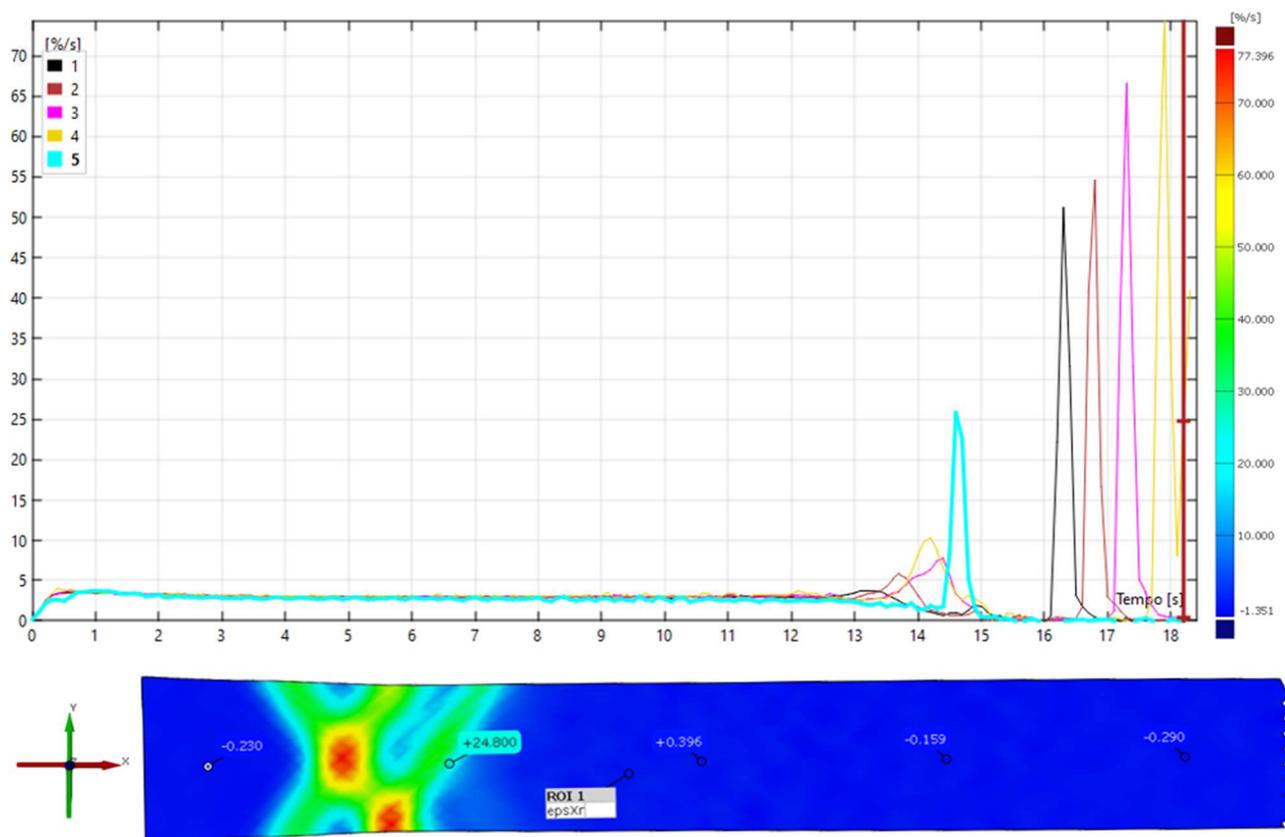


Figura 81 Analisi dello strain-rate(x) per la prova di trazione TWIP 6 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino

Le ultime analisi che vengono effettuate sulle immagini delle prove TWIP 2 e 6 sono presentate in figura 82 e 83 e rappresentano lo studio delle velocità in direzione x, in particolare i grafici fanno riferimento a cinque punti di calcolo equidistanti e posti lungo l'asse longitudinale del provino. I grafici permettono di distinguere come il provino, durante la prova di trazione, cambia il modo di reagire a delle deformazioni imposte. Più nello specifico, dopo un transitorio corrispondente alla deformazione elastica, i punti della superficie si muovono con una velocità distribuita linearmente lungo tutta la dimensione maggiore del provino, questo per rispettare le condizioni al contorno che impongono velocità nulla per la parte fissa e 4mm/s per la parte mobile del provino. Questa

situazione di plasticità uniformemente distribuita è presente per le due prove fino a circa 12/13 secondi dall'inizio della prova, valore temporale coincidente con la formazione della prima banda PLC di tipo A. Il passaggio da deformazione uniforme a deformazione localizzata è veloce ma non repentino; infatti, le prime bande non riescono ad “assorbire” tutta la deformazione introdotta nel provino durante la prova, a dimostrazione di ciò nelle analisi relative alla deformazione e allo strain-rate le prime bande sono caratterizzate rispettivamente da una dimensione del gradino e un'altezza dei picchi minore rispetto ai valori relativi alle bande PLC presenti nella parte finale della prova. Questo comportamento è visibile anche nello studio delle velocità, infatti il livello di “concentrazione” della deformazione all'interno della banda è correlabile al dislivello di velocità che si crea tra la parte che è stata attraversata dalla banda e quella che ancora deve esserne attraversata. Nel caso in esame si arriva alla condizione limite, rappresentata nelle figure 82 e 83, dove l'area colorata in blu, che rappresenta la zona ancora non attraversata dalla banda, è praticamente ferma mentre l'area colorata in rosso, cioè quella già attraversata dalla banda, si muove circa a 4mm/s che difatti è la velocità con cui si muove il pistone mobile della macchina di trazione. Questo dato è anche un indicatore della bontà delle misurazioni effettuate tramite DIC che rimangono coerenti con la fisica del problema. Ogni analisi, che sia deformazione, strain-rate o velocità dimostra come la deformazione si concentri nella banda plastica che poi viaggia lungo il provino. Inoltre, le prove TWIP2 e 6 dimostrano che aumentando la velocità di esecuzione della prova si vanno ad inibire l'insorgere dei fenomeni di Portevin-Le Chatelier.

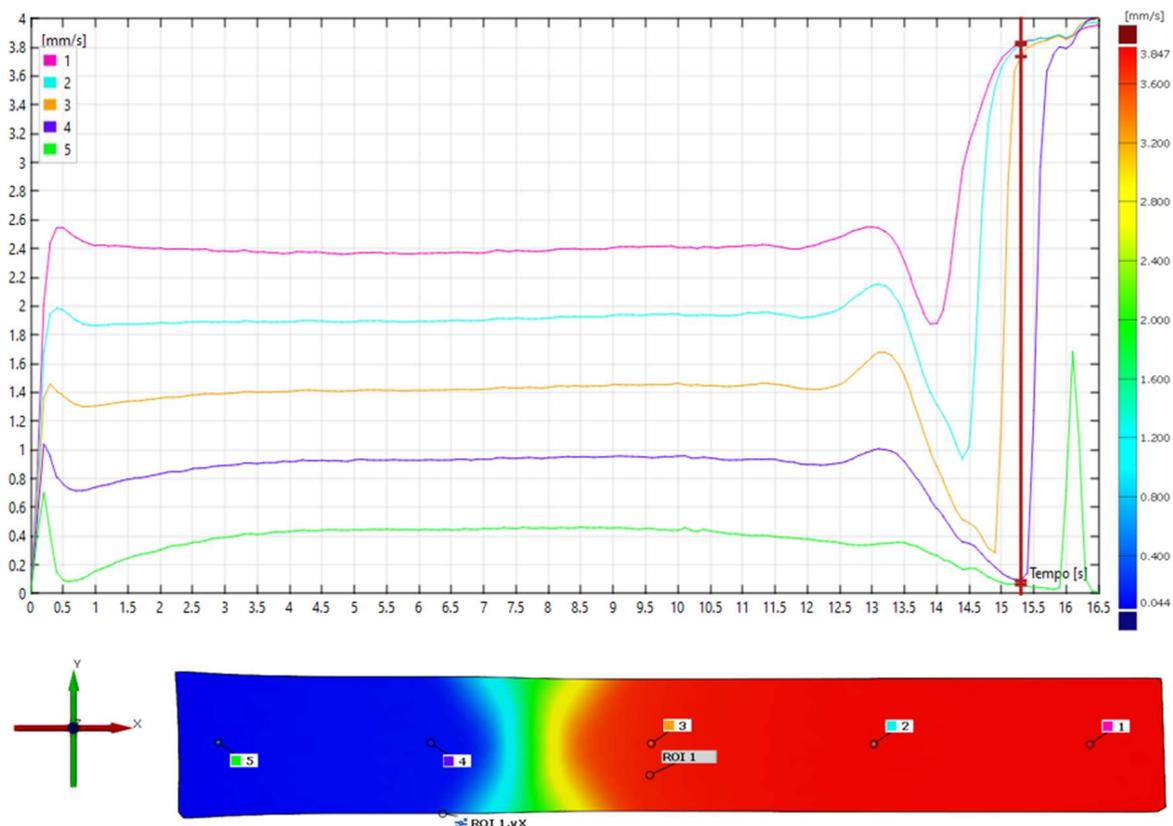


Figura 82 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 2 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

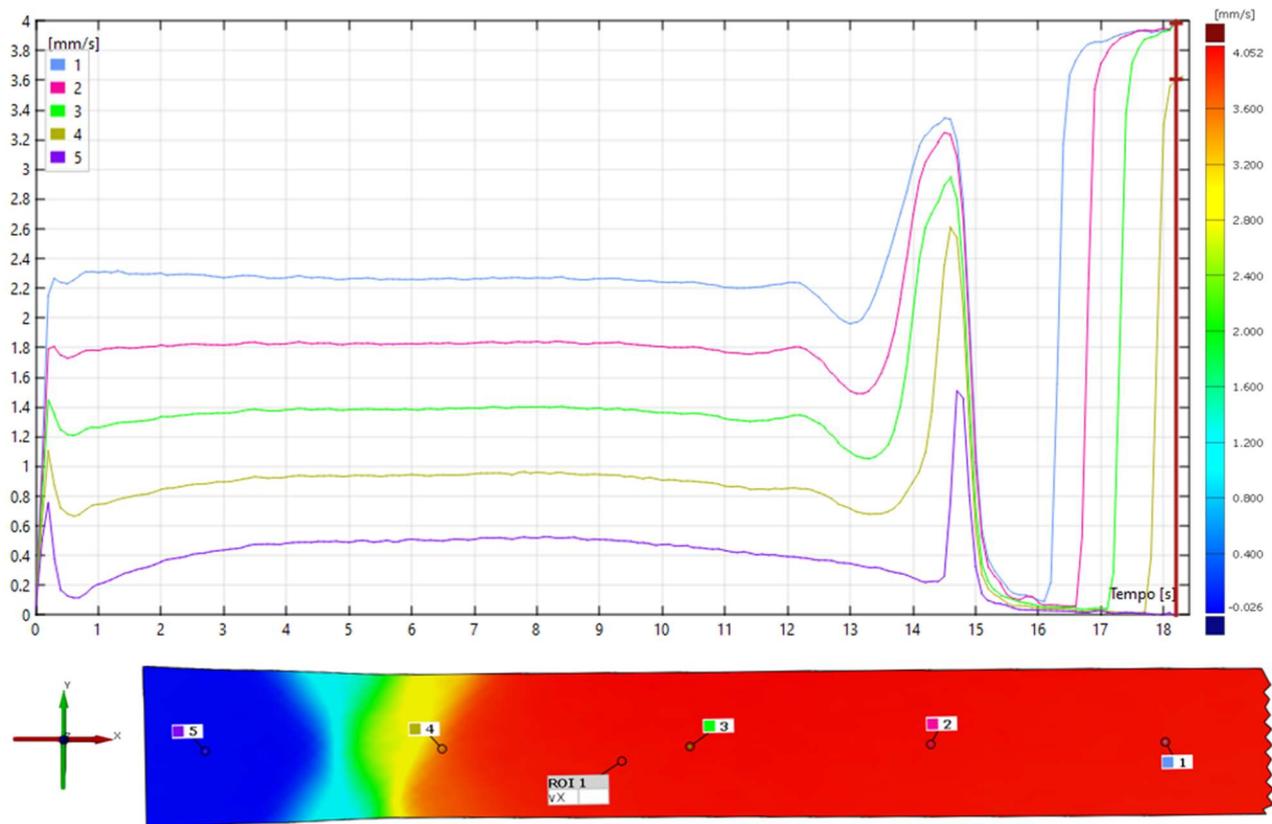


Figura 83 Analisi della velocità(x) per la prova di trazione TWIP 6 in cinque punti equidistanti posti sull'asse longitudinale del provino.

6.5 Confronto con acciaio TWIP diverso

Un'analisi molto simile, al variare della velocità della prova di trazione, a quella riportata nei precedenti sotto capitoli è stata condotta da Scavino et al. [6] per un acciaio (TWIPB) sempre ad alto contenuto di manganese ma con una granulometria di 3 μ m (rispetto ai 4 μ m di TWIPA) ed una composizione chimica differente che viene riportata in tabella e confrontata con quella dell'acciaio qui utilizzato (TWIPA):

	C	Mn	Al	Ni	Cr	Si	Cu	Nb	Mo	V	P	S
TWIPA	0.65	18.3	1.5	0.041	0.023	0.05	0.045	n.m.	n.m.	0.04	0.025	0.011
TWIPB	0.5	22.4	n.m.	n.m.	0.13	0.16	n.m.	n.m.	0.7	n.m.	0.025	<0.001

Tabella 5 Composizione chimica degli acciai esaminati (percentuali in peso, n.m.: non misurato) [8][6]

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori di allungamento totale e carico di rottura di entrambi gli acciai al variare della velocità del pistone mobile della macchina di trazione:

TWIPA	Velocità (mm/s)	Carico di rottura (Mpa)	Allungamento totale (%)
	0.004	1029	65
	0.004	1019	52
	0.04	994	67
	0.04	993	56
	0.4	949	57
	0.4	949	64
	4	920	58
	4	905	55

Tabella 6 Carico di rottura e allungamento totale in relazione alla velocità di spostamento del pistone mobile della macchina di trazione per l'acciaio TWIPA

TWIPB	Velocità (mm/s)	Carico di rottura (Mpa)	Allungamento totale (%)
	0.05	1178	61
	0.5	1118	61
	5	1093	65

Tabella 7 Carico di rottura e allungamento totale in relazione alla velocità di spostamento del pistone mobile della macchina di trazione per l'acciaio TWIPB [6]

Da questo primo confronto l'acciaio TWIPB risulta essere leggermente più resistente ed è probabilmente dovuto alla dimensione del grano minore, mentre in media i valori di allungamento sono più o meno gli stessi, si nota inoltre in entrambi i casi che più è sollecitato lentamente e più l'acciaio resiste a carichi elevati mentre gli allungamenti variano in modo casuale, specialmente nel caso di provini di acciaio TWIPA.

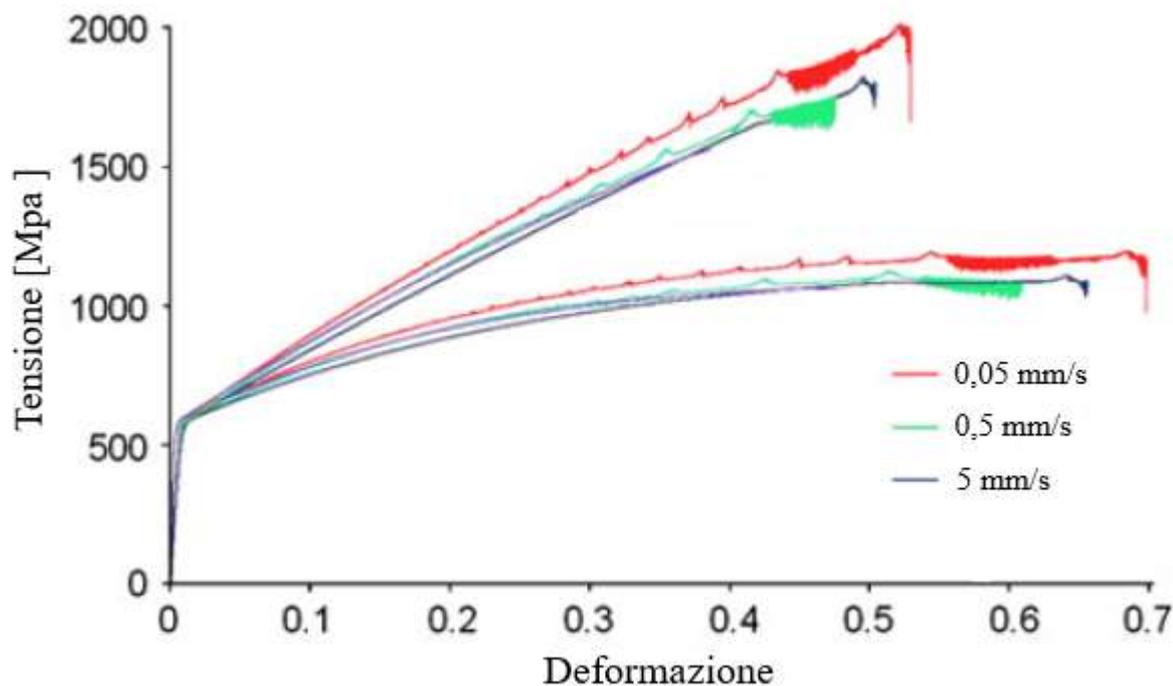


Figura 84 curve tensione-deformazione ingegneristiche (in basso) e vere (in alto) dell'acciaio TWIPB in funzione della velocità della prova [6].

In figura 84 sono presenti le curve tensione-deformazione ingegneristiche e vere dell'acciaio TWIPB in funzione della velocità della prova. Rispetto al comportamento osservato per l'acciaio TWIPA si notano tre differenze considerevoli:

- 1) La comparsa di bande PLC di tipo B e C, queste sono osservate direttamente tramite termografia e sono riconoscibili nella parte finale curva di trazione perché caratterizzate da una frequenza dei picchi molto più alta e regolare, questo tipo di bande scompaiono nella prova a 5 mm/s.
- 2) Un numero di picchi molto maggiore, specialmente nelle prove a bassa velocità
- 3) Per l'acciaio TWIPB l'influenza della velocità di deformazione sul numero di bande formatesi inizia molto prima rispetto all'acciaio TWIPA, infatti già alla velocità di 0,5 mm/s ci sono molte meno bande rispetto alla prova a 0,05 mm/s.

Queste differenze sono riconducibili ad una maggiore propensione da parte dell'acciaio TWIPB a sviluppare fenomeni di deformazione plastica localizzata riconducibili all'effetto PLC, in questo acciaio viene favorito il meccanismo DSA; quindi, la diffusione degli atomi di soluto (C) verso le dislocazioni e come questi interagiscono con esse. Essendo in questo caso simili le condizioni di temperatura e velocità, le differenze sono da ricondurre principalmente alla differente composizione chimica degli acciai.

6.6 Analisi della velocità di propagazione delle bande PLC

Grazie alla tecnica ottica di Digital Image Correlation è stata effettuata un'analisi sulla velocità delle bande plastiche PLC di tipo A. Per ogni prova effettuata sugli acciai TWIP è stata calcolata la velocità delle bande che si sono formate. La velocità in questione non è istantanea ma è stata calcolata come una velocità media lungo un tratto di provino non ancora attraversato dalla banda stessa. Le misurazioni sono state effettuate nello studio dello strain-rate in direzione x, il quale mostra con maggior chiarezza la forma ed il movimento delle bande. Per ogni provino lungo il proprio asse longitudinale sono stati creati 10 punti di calcolo equidistanti collegati tra loro da nove estensimetri virtuali. Quando una banda plastica arriva in uno dei punti non ancora deformati dalla banda stessa viene segnato il tempo T1 e la distanza dal punto successivo S guardando il valore dell'estensimetro corrispondente. Nel momento in cui la banda arriva al secondo punto viene preso il tempo T2 e si procede con il calcolo della velocità $v_b = S/(T2 - T1)$. I risultati sono stati riportati nei grafici seguenti, tranne per le prove TWIP 2 e TWIP 6 nelle quali si formano poche bande ben visibili.

Le misure mostrano che le velocità di percorrenza delle bande sono strettamente dipendenti dalla velocità di deformazione e quindi dalla velocità del pistone mobile della macchina di trazione. Nelle prove più rapide, condotte a 4 mm/s, si è registrata la velocità $v_b = 46,56 \text{ mm/s}$ relativa a TWIP 2 e le velocità $v_{b1} = 39,86 \text{ mm/s}$ e $v_{b2} = 43,34 \text{ mm/s}$ relative a TWIP 6. Nelle prove condotte a 0.4 mm/s sono state registrate v_b che vanno dai 3 agli 8 mm/s, per quelle condotte a 0.04 mm/s la velocità v_b va da 0.4 a 1.2 mm/s ed infine per le prove condotte a 0.004 mm/s la velocità delle bande v_b varia da 0.04 a 0.12 mm/s. In tutte le prove si nota come all'aumentare della velocità di deformazione le bande si spostano lungo il provino ad una velocità che è all'incirca di un ordine di grandezza maggiore rispetto a quella con cui si muove il pistone mobile della macchina di trazione.

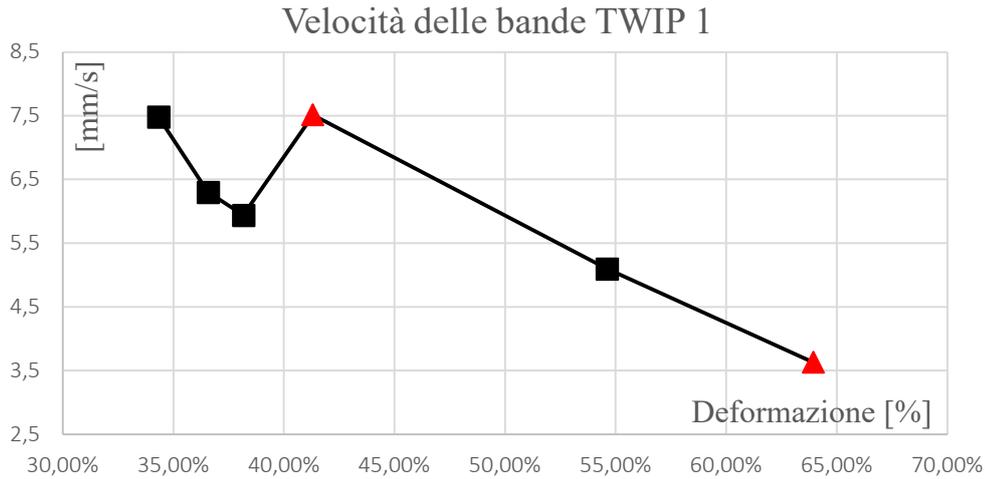


Figura 85 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 1 condotta a 0,4 mm/s

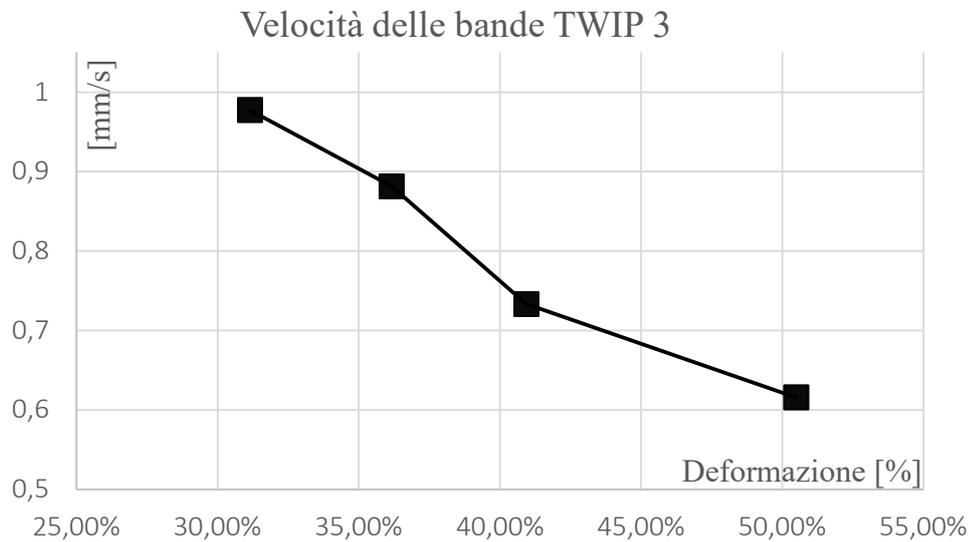


Figura 86 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 3 condotta a 0,04 mm/s.

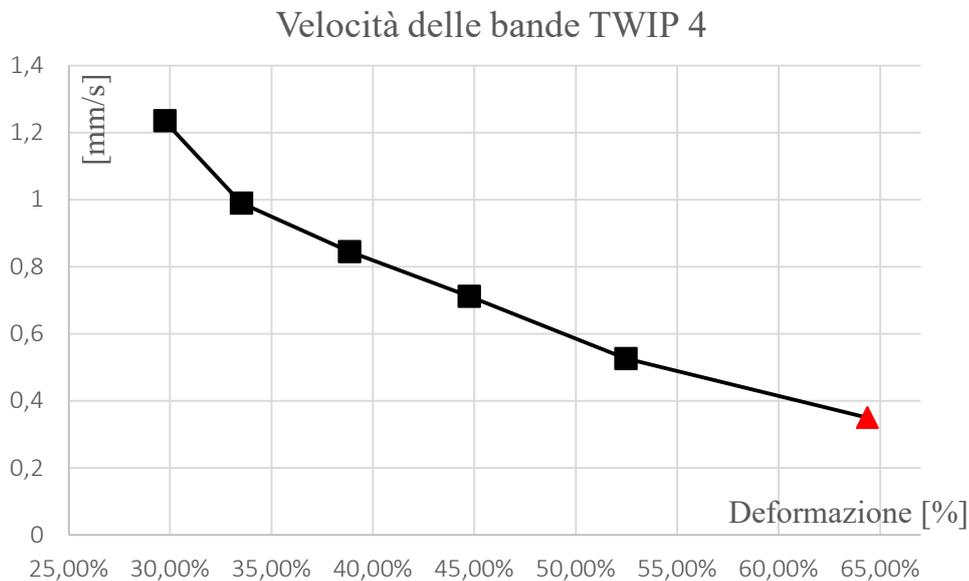


Figura 87 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 4 condotta a 0,04 mm/s.

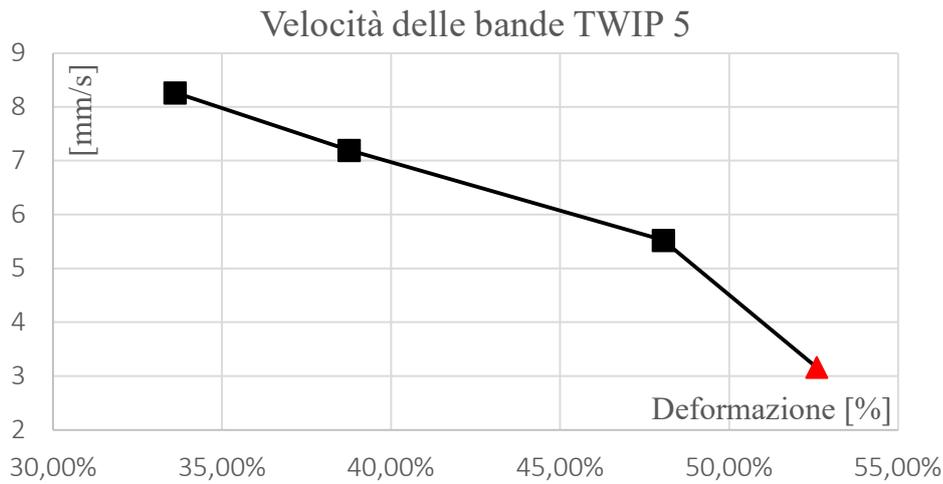


Figura 88 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 5 condotta a 0,4 mm/s.

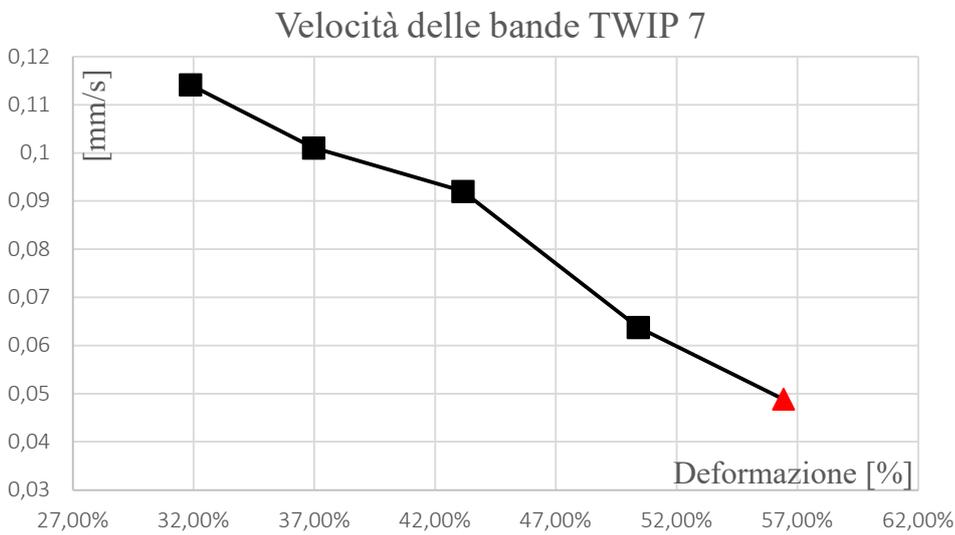


Figura 89 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 7 condotta a 0,004 mm/s.

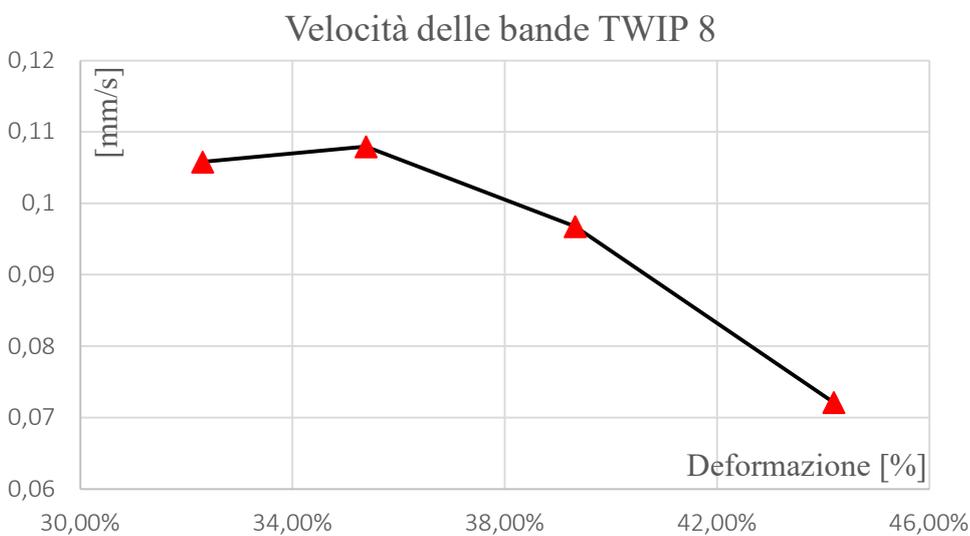


Figura 90 velocità delle bande PLC di tipo A in relazione alla corsa del pistone mobile per la prova TWIP 8 condotta a 0,004 mm/s.

Nelle prove caratterizzate da un numero di bande elevato si è studiato anche l'andamento della loro velocità in funzione del livello di deformazione introdotto nel provino. Nello specifico ogni grafico mette in relazione la velocità delle bande con la deformazione ingegneristica che è strettamente riconducibile al livello di incrudimento del materiale. Nei grafici sono presenti due simboli, il quadratino nero ed il triangolo rosso, il primo rappresenta una banda che si muove dall'estremità mobile del provino verso quella fissa ed il secondo una banda che si muove dall'estremità fissa verso quella mobile. In accordo con quanto viene riportato in vari articoli [4][6], la maggior parte delle bande percorre il provino dall'estremità mobile a quella fissa, in più del 60% dei casi l'ultima banda che si viene a formare e porta a rottura il campione percorre il provino in direzione opposta alle precedenti. Nei restanti casi tutte le bande si muovono nello stesso verso che può essere anche dall'estremità fissa a quella mobile come dimostrato nella prova TWIP 8 (figura 90).

Dai grafici (da figura 85 a figura 90) è evidente che la velocità di propagazione delle bande si riduce gradualmente passando da una banda a quella successiva, ci sono solamente due bande che sono più veloci della precedente, una nella prova TWIP 1 e una nella TWIP 8, anche con queste eccezioni la tendenza dei grafici rimane decrescente e ciò riflette il rafforzamento del materiale man mano che le bande di deformazione si propagano attraverso il campione. Dalle analisi precedenti si è visto anche come bande successive acquisiscono al loro interno un livello di deformazione sempre maggiore. Quindi in ogni singola prova le bande più lente sono caratterizzate da una deformazione intrinseca maggiore. I risultati ricavati sono stati confrontati con quelli di altri due studi simili [4][6], nel caso riportato in figura 91 è stata analizzata la velocità delle bande e la loro deformazione associata in funzione della deformazione ingegneristica per l'acciaio TWIPB, composto da 22% Mn, 0,5% C, con microstruttura austenitica a grano fine (3 μm) a velocità di deformazione di 0.0004s^{-1} (velocità del pistone mobile di 0.05mm/s) [6], anche se l'acciaio TWIPB in questione ha una composizione chimica ed una microstruttura differente le bande plastiche di tipo A che si formano mostrano un andamento simile a quello da noi riscontrato, quindi con una diminuzione della velocità di propagazione all'aumentare della loro deformazione interna.

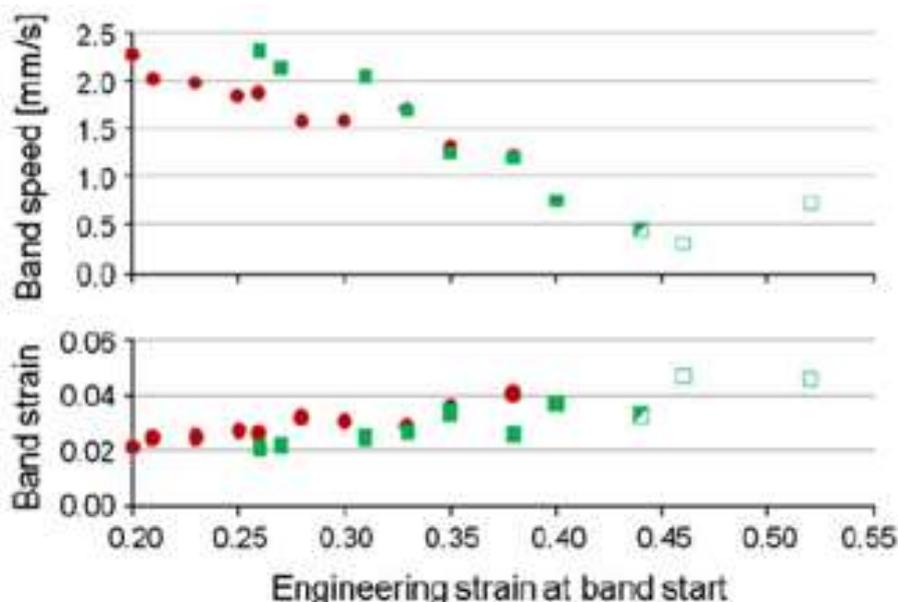


Figura 91 velocità delle bande tipo A e la loro deformazione associata in relazione alla deformazione ingegneristica per un provino di acciaio TWIPB a velocità di deformazione di 0.0004s^{-1} (0.05mm/s), misure DIC (quadrati), misure termografiche (cerchi) [6].

Lo stesso andamento decrescente della velocità di propagazione delle bande è riportato anche nello studio riportato in figura 92 effettuato su un acciaio con una composizione chimica molto simile a quella dell'acciaio TWIP Posco qui utilizzato 18% Mn e 0.6% C [4].

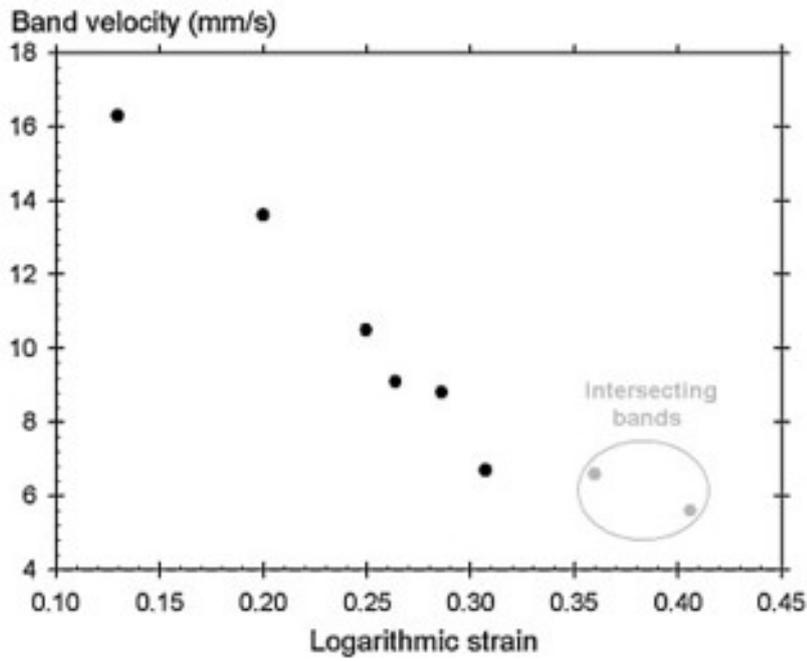


Figura 92 velocità delle bande in funzione della deformazione ingegneristica ad una velocità di deformazione media di $1,8 \times 10^{-3} s^{-1}$ [4]

7. Conclusioni

Le analisi effettuate su entrambi i set di provini hanno permesso di mettere in luce le criticità del sistema DIC adottato. Per ogni provino sottoposto a trazione è stata condotta un'indagine specifica sulla qualità del modello superficiale e delle immagini, e come questa evolve durante l'arco temporale della prova. Da questo punto di vista sono quattro le principali problematiche:

- 1) La qualità del pattern di vernice impresso sulla superficie del campione, questa si riferisce all'immagine di riferimento e deve rispettare quanto più possibile le specifiche descritte nella sezione 2.5, questo fattore è indipendente dal sistema DIC e un miglioramento da questo punto di vista, al di fuori di processi automatici, dipende solamente dalle abilità dell'operatore che effettua la verniciatura.
- 2) La velocità con cui si muove la superficie in esame. Durante le prove condotte alla velocità del pistone di 4 mm/s si registra un brusco calo della qualità dell'immagine nella porzione di superficie che si muove a tale velocità. Il calo di qualità può essere così elevato da impedire la correlazione delle immagini.
- 3) La variazione di luminosità, la quale comporta delle oscillazioni nella qualità del modello che passa continuamente dall'essere troppo scuro ad essere troppo chiaro e viceversa, ciò che aiuta a correlare delle immagini con differenti livelli di luminosità sono i criteri di correlazione adottati ma questi possono non bastare se la differenza è troppo elevata.
- 4) L'allineamento, in generale per delle misurazioni ottimali è necessario che la fotocamera sia perfettamente perpendicolare alla superficie del provino e bisogna far coincidere i vari sistemi di riferimento all'interno del programma, specialmente quello dell'estensimetro nel caso si vogliono confrontare le misure.

Le problematiche descritte possono essere del tutto o in parte risolte, per la prima si richiede solamente una maggiore esperienza in questa specifica verniciatura. Per quanto riguarda la scarsa qualità delle immagini dovuta all'elevata velocità di spostamento della superficie durante le prove, può essere migliorata diminuendo il tempo di esposizione nei settaggi della fotocamera mentre per prove ad alta velocità potrebbe essere necessario un sensore fotografico specifico. Il problema delle variazioni di luminosità riguarda principalmente le prove effettuate a bassa velocità, queste variazioni sono causate dall'intensità della luce naturale che cambia durante la prova e dal tempo di esposizione scelto troppo elevato, diminuendo tale parametro e affidandosi esclusivamente alla luce artificiale è possibile attenuare tale problematica. L'allineamento è invece un problema generale del sistema che può essere mitigato utilizzando strumenti di calibrazione che aiutano nel posizionamento della fotocamera e dell'estensimetro. In generale il sistema di acquisizione dati DIC costruito in laboratorio ed utilizzato durante tutte le prove di trazione ha permesso di ottenere ottimi risultati dal punto di vista delle misurazioni che risultano essere sempre coerenti sia con la fisica del problema che con le misure effettuate dall'estensimetro a clip. È importante inoltre sottolineare la semplicità del sistema che non riguarda solamente le componenti ma anche la facilità e la velocità di assemblamento e calibrazione, che anche se imperfetta permette comunque di ottenere ottimi risultati. Grazie a queste caratteristiche l'utilizzo di tale sistema è conveniente soprattutto considerando la mole di informazioni in più che permette di ottenere rispetto ad una semplice prova di trazione con estensimetro.

Tramite la tecnica di Digital Image Correlation è stato esaminato il comportamento plastico uniassiale, a temperatura ambiente, di un acciaio TWIP Posco, la composizione di tale lega FeMnC è 0.65% in peso di Carbonio e il 18,3% in peso di Manganese più altri elementi leganti e la microstruttura è di tipo austenitica. L'acciaio in questione presenta un'ottima combinazione di resistenza e duttilità, tali prestazioni sono riconducibili principalmente alla presenza di una struttura austenitica stabile e alla formazione di geminati meccanici. Le curve di trazione ottenute a diverse velocità di deformazione mostrano chiaramente dei fenomeni di deformazione plastica disomogenea e localizzata riconducibili all'effetto di Portevin-Le Chatelier (PLC), tali deformazioni localizzate vengono denominate bande e possono essere di vario tipo, nel caso in esame sono state osservate solo bande di tipo A che si muovono lungo la direzione di trazione. Per le prove condotte ad una velocità del pistone mobile della macchina di trazione pari o inferiore a 0,4 mm/s i fenomeni di deformazione plastica localizzata PLC iniziano ad una deformazione globale dei provini del 25% circa e si formano da quattro a sei bande plastiche di tipo A. Alla velocità di 4 mm/s aumenta al 37,5% il grado di deformazione globale richiesto per la genesi degli effetti PLC e cala anche ad uno/due il numero di bande. Tali risultati mostrano come l'effetto PLC dei provini di acciaio da noi indagati è influenzato dallo strain-rate solo per velocità del pistone mobile maggiori di una compresa tra 0,4 e 4 mm/s. Tramite la tecnica DIC di estensimetria ottica le bande di tipo A sono state osservate dettagliatamente nella loro formazione, nel loro moto e come esse portano a rottura il provino, è stata osservata la loro forma e come questa cambia nel tempo, si è visto che la maggior parte delle bande registrate sono formate da una coppia di bande che si intersecano tra loro in una struttura ad "X", tramite la tecnica DIC è stata misurata l'ampiezza della singola banda, della X completa e l'inclinazione delle bande stesse. In particolare, è stato avvalorato quanto riportato in altri studi [4][6] e cioè come la deformazione plastica sia concentrata esclusivamente all'interno delle bande stesse e come ogni picco di tensione osservato lungo le curve di trazione corrisponda alla formazione di una banda PLC di tipo A. Inoltre, è stato effettuato uno studio sulla velocità di propagazione delle bande, la quale diminuisce all'aumentare della deformazione globale del provino. Tutti i risultati ottenuti tramite DIC sono coerenti con la fisica del sistema e rafforzano la validità delle misure effettuate, inoltre tali risultati sono in linea con la letteratura riguardante gli acciai TWIP ed anche con altri studi analoghi [4],[6]. Come visto nei capitoli 4 e 5 sia l'effetto PLC che i meccanismi di deformazione plastica caratteristici degli acciai TWIP sono molto complessi e quindi molto difficili da prevedere, dai risultati delle prove riportate nel capitolo 6 si è visto come anche per provini dello stesso tipo di acciaio nelle medesime condizioni si ottengono differenze in termini di allungamento e di numero di bande plastiche PLC, bastano infatti piccole differenze di temperatura, velocità di deformazione, dimensione del grano e composizione chimica per ottenere risultati significativamente diversi tra loro.

RIFERIMENTI

- [1] YONEYAMA, Satoru. *Basic principle of digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement. Advanced Composite Materials*, 2016, 25.2: 105-123.
- [2] PAN, Bing, et al. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Measurement science and technology*, 2009, 20.6: 062001.
- [3] HASSAN, Ghulam Mubashar. *Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106394.
- [4] RENARD, Krystel; RYELANDT, Sophie; JACQUES, P. J. *Characterisation of the Portevin-Le Chatelier effect affecting an austenitic TWIP steel based on digital image correlation. Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527.12: 2969-2977.
- [5] BOUAZIZ, Olivier, et al. *High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. Current opinion in solid state and materials science*, 2011, 15.4: 141-168.
- [6] SCAVINO, Giorgio, et al. *Portevin–Le Chatelier effects in a high-Mn austenitic steel. Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44.2: 787-792.
- [7] YILMAZ, Ahmet. *The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings. Science and technology of advanced materials*, 2011.
- [8] HOLOVENKO, O., et al. *Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels. La Metallurgia Italiana*, 2013.
- [9] MATTEIS, Paolo, et al. *Fatigue Behavior of Dual-Phase and TWIP Steels for Lightweight Automotive Structures. steel research international*, 2012, 83.10: 950-956.