

Collegio di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale

**Corso di Laurea Magistrale**

**in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio dell'effetto Portevin Le Chatelier  
nella lega di alluminio ad alta resistenza  
8090-T8 con il metodo della correlazione  
d'immagini digitali (DIC)**



**Relatore**

prof. Roberto Doglione

**Candidato**

Dario Marzola

Aprile 2018

# INDICE

## Sommario

1. Correlazione digitale di immagini.....	5
1.1 Introduzione.....	5
1.2 Digitalizzazione delle immagini.....	7
1.3 Le facets.....	7
1.4 Il pattern.....	8
1.5 La correlazione delle immagini.....	9
1.6 Corrispondenza delle facets e funzioni di forma.....	13
1.7 Interpolazione sub-pixel.....	14
1.8 Criteri di correlazione.....	15
1.9 Il metodo delle approssimazioni successive.....	17
1.10 Il metodo di Newton-Raphson.....	18
1.11 Stima del calcolo delle deformazioni.....	18
1.12 Principali cause di errore nel DIC2D.....	19
2. Le leghe Al-Li.....	21
2.1 Caratteristiche delle leghe Al-Li.....	21
2.2 Trasformazioni durante l'invecchiamento.....	23
2.3 Ulteriori caratteristiche delle leghe Al-Li.....	26
2.4 Caratteristiche meccaniche della lega Al-Li 8090T8.....	27
3. L'effetto Portevin-Le Chatelier.....	31
3.1 Introduzione.....	31
3.2 Effetto PLC.....	31
3.3 Tipologia di bande PLC.....	33

4. Parte sperimentale: Configurazione e prove preliminari.....	35
4.1 Configurazione del sistema.....	35
4.2 Sistema d'illuminazione.....	36
4.3 Il sensore e la scheda d'acquisizione.....	37
4.4 Il software di elaborazione dati.....	37
4.5 Calibrazione del sistema.....	38
4.6 Il pattern.....	42
4.7 Il gain, lo shutter time e la distorsione ottica.....	43
4.8 Prove sperimentali preliminari di traslazione.....	44
4.9 Prove sperimentali preliminari di deformazione.....	50
4.10 Prove sperimentali preliminari di contrazione.....	62
4.11 Prove di deformazione con calibratore da 2mm.....	66
4.12 Prove di deformazione sull'acciaio con calibratore da 2mm.....	72
4.13 Influenza del pattern.....	76
5. Parte sperimentale: Prove di trazione.....	89
5.1 Trazione della lega 8090T8 R57LT.....	89
5.2 Panoramica delle leghe trazionate.....	94
6. Conclusioni.....	104
Bibliografia.....	105



# CAPITOLO 1

## 1. Correlazione digitale di immagini

### 1.1 Introduzione

La Correlazione digitale d'immagini (DIC) è una tecnica di misura senza contatto, basata sull'elaborazione e sul calcolo numero di immagini digitali, per un'accurata analisi sui campi di spostamento e deformazione.

Essa è basata principalmente sull'acquisizione di un certo numero di foto attraverso una camera con all'interno un sensore CCD, in cui la prima foto viene presa come quella di riferimento e viene divisa in quadrati di dimensione più o meno variabile chiamati facets o subset. Questi comprendono più pixel, in cui il generico subset di riferimento, che è selezionato nell'immagine di riferimento, viene usato per tracciare la sua locazione nelle successive immagini, per determinare, attraverso opportuni algoritmi, il vettore spostamento del generico centro del subset e la sua deformazione attraverso opportune funzioni di forma.

La tecnica DIC offre molti vantaggi, in quanto è richiesto un semplice setup sperimentale, come visibile nella figura 1.1, e preparazione del campione, in quanto viene richiesta solamente una camera CCD ed una preparazione del campione che può essere effettuata con dei spray commerciali. Inoltre non è richiesta la risorsa laser, ma soltanto una luce bianca o naturale che serve ad illuminare il provino durante la fase di sollecitazione.

Alcuni svantaggi sono che la superficie dell'oggetto deve avere una distribuzione di intensità di scale di grigio random ed inoltre che le misurazioni effettuate dipendono dalla qualità dell'immagine digitale.

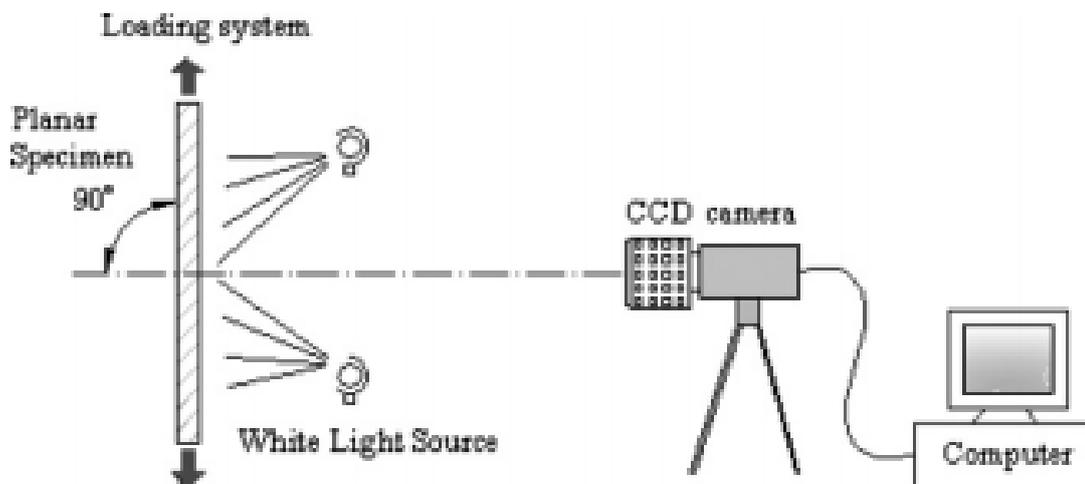


Figura 1.1: Setup sperimentale per la tecnica DIC 2D [1]

L'implementazione del DIC 2D è fatto di 3 passaggi fondamentali, che sono la preparazione del campione e quella sperimentale, la registrazione delle immagini della superficie del campione prima e dopo il caricamento del campione stesso e il processare tali immagini acquisite per ottenere il campo di spostamenti e deformazioni che si vuole.

E' importante far notare che la camera CCD deve essere posizionata con il suo asse ottico in modo normale all'asse del campione e si ha che la superficie del campione deve restare per tutta l'operazione di caricamento del campione parallela al sensore CCD. Si dovrebbe fare in modo che gli spostamenti fuori dal piano, che possono essere dovuti alla curvatura del campione, siano i più piccoli possibili, in modo da avere delle stime di spostamento e deformazione più accurate; inoltre si ha anche che in quel caso la distorsione geometrica nell'immagine dovrebbe essere trascurabile, in quanto essa dà degli spostamenti addizionali, che portano ad ulteriori errori di stima di campi di spostamento e deformazione. Per questa problematica, si potrebbero utilizzare anche alcune tecniche per correggere la distorsione geometrica, per cercare di arrivare a risultati più precisi[1].

Si ha che l'immagine viene genericamente suddivisa in facets, come si vede nella figura 1.2, in quanto non si può avere una chiara corrispondenza tra un pixel facente parte dell'immagine di riferimento e dell'immagine deformata, in quanto si ha che ad ogni pixel è associato un certo valore di grigio e quest'ultimo può essere ricercato in moltissimi pixel dell'immagine deformata, facendo in modo che non vi sia una corrispondenza unica; per tale motivo si considera una piccola regione quadrata di più pixel (i facets) ed è importante, per avere dei risultati soddisfacenti, che vi sia applicato un pattern random, prima dell'applicazione della prova meccanica [2].

Pertanto si ha che per il calcolo di uno spostamento generico, si considera un facet quadrato nell'immagine di riferimento, con il suo centro e da questa si va a ricercare il suo posizionamento nell'immagine dopo il caricamento del campione.

Si ha che considerando due immagini, quella di riferimento e quella deformata, per avere la posizione del centro del facet nella condizione deformata, si considera la condizione che massimizza una certo coefficiente di cross-correlazione tra le due immagini (CC) oppure che minimizza una certa funzione di errore di differenza della somma dei quadrati (denominato SSD) tra le due immagini[2].

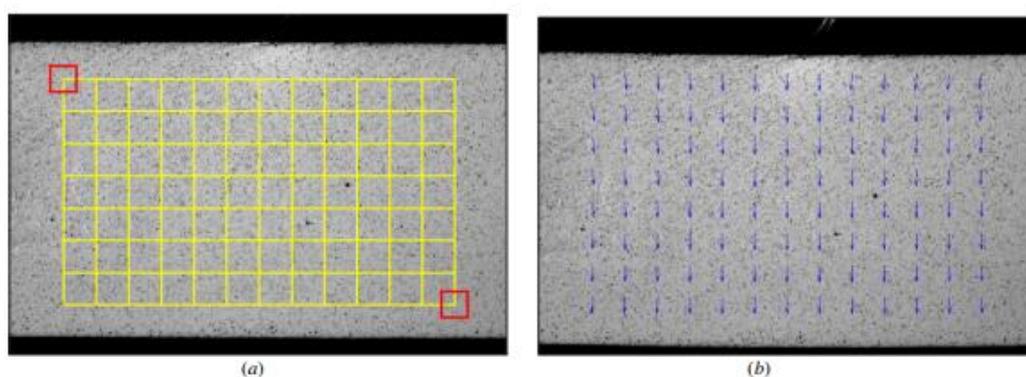


Figura 1.2: divisione dell'immagine in facets(a) con i relativi vettori di spostamento(b)

## 1.2 Digitalizzazione delle immagini

Le varie immagini analogiche acquisite dal sensore vengono passate in digitale attraverso un opportuno convertitore.

In generale si ha che per la determinazione dello spostamento di un generico punto dall'immagine di riferimento in quella deformata si considera la distribuzione dell'intensità intorno al punto P generico, per poi andare a cercare nell'immagine, dopo il caricamento del campione, quel facet la cui distribuzione di intensità si avvicina maggiormente a quella nell'immagine di riferimento e in tal modo si arriva ad avere la posizione del punto deformato.

Nel paragonare i due facets si considerano sia gli spostamenti che le deformazioni, pertanto il secondo subset subisce un'opportuna deformazione e per far ciò si utilizzano le leggi della meccanica del continuo. Generalmente si ha che il paragone viene fatto tra un facet di riferimento quadrato e il facet deformato che, nell'ipotesi di piccoli spostamenti, può avere una forma a parallelogramma o rettangolare, come visibile nella figura 1.3.

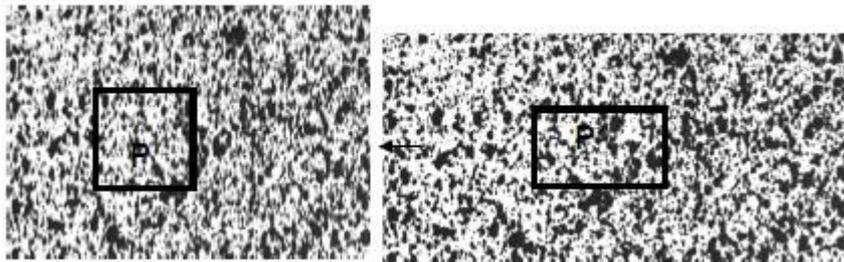


Figura 1.3: Facets nella condizione di riferimento e deformata

Si ha che dopo la digitalizzazione, l'immagine è formata da punti discretizzati, i pixel, e ogni pixel ha un determinato livello del valore di grigio e si ha che, a seconda della risoluzione, si possono avere più o meno pixel nell'immagine e man mano che questi aumentano, e quindi la risoluzione sarà maggiore, si avrà una più grande quantità di memoria richiesta[3].

## 1.3Le facets

Le immagini, come già detto, sono in scale di grigio, dove, internamente ad ogni subset, si hanno valori discreti di grigio per ogni pixel.

Affinchè si abbia un andamento continuo e non discreto, si effettua un'interpolazione dei vari livelli di grigio ed i metodi di interpolazione solitamente utilizzati sono la bilineare, la bicubica e la b-spline (figura 1.4).

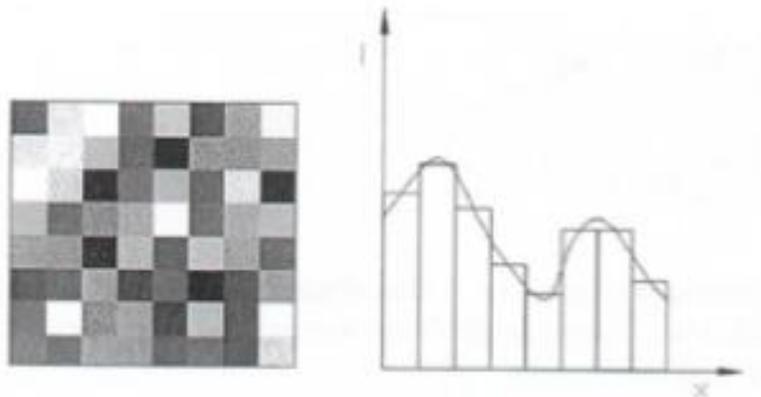


Figura 1.4: Interpolazione dei livelli di grigio dei vari pixel

I singoli subset possono avere dimensioni diverse e sono sovrapposti tra di essi e l'area in cui essi si incontrano viene denominata "overlapping area". Maggiore sarà tale area, maggiore sarà la vicinanza tra i pixel.

In generale si ha che una dimensione maggiore del facet permette di ridurre il rumore di fondo, ma darà anche una minore risoluzione spaziale, perdendo gli effetti locali. Invece una dimensione minore del subset aumenta la risoluzione spaziale, ma di contro non risolve i problemi dovuti al rumore.

## 1.4 Il pattern

In generale si ha che sulla superficie del provino bisogna realizzare un pattern stocastico, con una dispersione random tra bianco e nero pari a 50/50 [4].

Il pattern utilizzato nella correlazione digitale di immagini viene denominato "speckle pattern" e viene realizzato in modo da avere dei punti neri su uno sfondo bianco o viceversa.

In [5] si considera che il diametro medio dei puntini scuri su fondo bianco è meglio farla variare da 5 a 3 pixel, così come il "fattore di riempimento", che dà il valore percentuale dei pixel neri, deve variare da un minimo del 40% ad un massimo del 70%.

Inoltre si ha che la dimensione dello speckle sulla superficie del campione non dovrebbe essere inferiore alla dimensione stessa del pixel, in quanto si ha che in tale modo non vengono presi in considerazione i movimenti che sono inferiori al pixel stesso; invece un puntino che ha delle dimensioni molto più grande di quelle del subset non dà risultati soddisfacenti, come mostrato in figura 1.5.

Pertanto è molto importante cercare di avere delle dimensioni dello speckle adeguato per avere dei buoni risultati di misura.

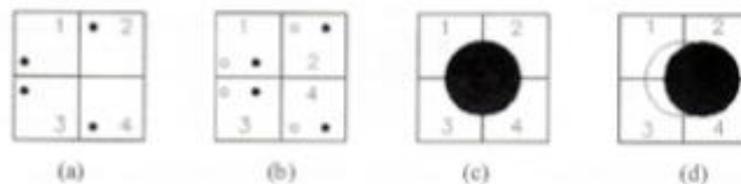


Figura 1.5: Dimensione dei puntini rispetto a quelle dei pixel

## 1.5 La correlazione delle immagini

Si è visto che dopo aver acquisito e digitalizzato le immagini nello step di riferimento e in quello preso dopo una certa deformazione del campione, è molto importante che il livello di grigio che dà il valore di intensità luminosa dei vari pixel venga espresso in maniera continua attraverso opportuni metodi di interpolazione all'interno dei subset.

Infatti si ha che ogni subset ha al suo interno un certo numero di pixel e pertanto sarà caratterizzato da una certa distribuzione di intensità luminosa, che denominiamo I.

Si ha che ogni spostamento o deformazione subita dal campione di prova fa in modo che tali pixel si muovano e il software basato sulla correlazione digitale di immagini fa in modo che vengono rintracciate le macchioline scure sulla superficie del campione nelle fotografie acquisite prima e dopo la deformazione, in modo da arrivare al calcolo di spostamenti e deformazioni.

Per paragonare due facet nello step di riferimento ed in quello deformato si applicano le formule che derivano dalla meccanica del continuo, nell'ipotesi di piccoli spostamenti.

Si consideri la figura 1.6 sottostante e si prenda il punto P di coordinate  $(x_P, y_P)$  ed il successivo punto Q di coordinate  $(x_Q, y_Q)$ .

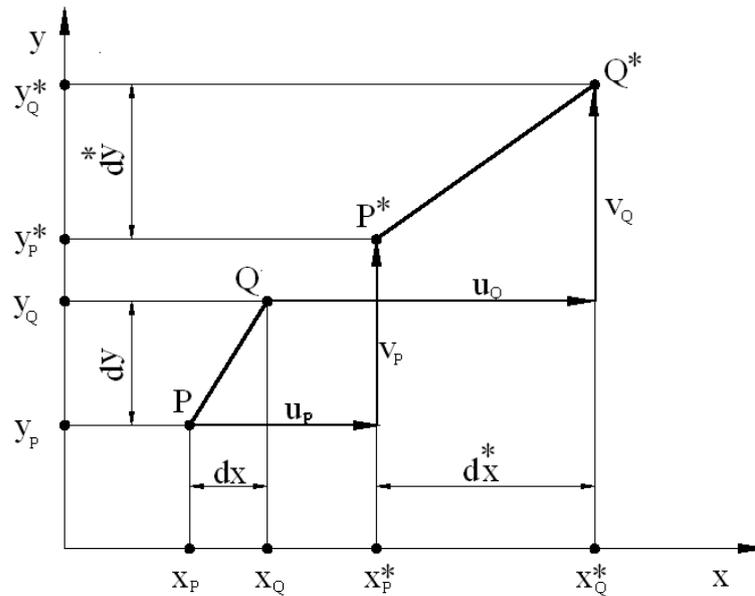


Figura 1.6: Spostamenti del segmento PQ

Si ha che nella condizione deformata e quindi dopo aver subito deformazione, si viene ad avere che i punti P e Q si spostano in P\* e Q\*, le cui coordinate sono date da  $(x_P^*, y_P^*)$  e  $(x_Q^*, y_Q^*)$ .

Pertanto si ha che:

$$x_P^* = x_P + u_P$$

$$y_P^* = y_P + v_P$$

dove con  $u_P$  e  $v_P$  si indicano gli spostamenti del punto P.

Inoltre si ha che in seguito alla deformazione le componenti del corpo indeformato  $dx$  e  $dy$  diventano pari a  $dx^*$  e  $dy^*$ , in modo che:

$$dx^* = dx + u_Q - u_P$$

$$dy^* = dy + v_Q - v_P$$

dove sono relazionate in tal modo:

$$dx^* = dx + u_Q - u_P$$

$$dy^* = dy + v_Q - v_P$$

Pertanto si arriva a scrivere:

$$dx^* = dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

$$dy^* = dy + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

Pertanto si ha che il facet deformato varierà le sue forme a seconda di quali componenti di deformazione vi sono.

Nella sottostante figura 1.7 si fa notare come le derivate degli spostamenti influenzino le deformazioni:

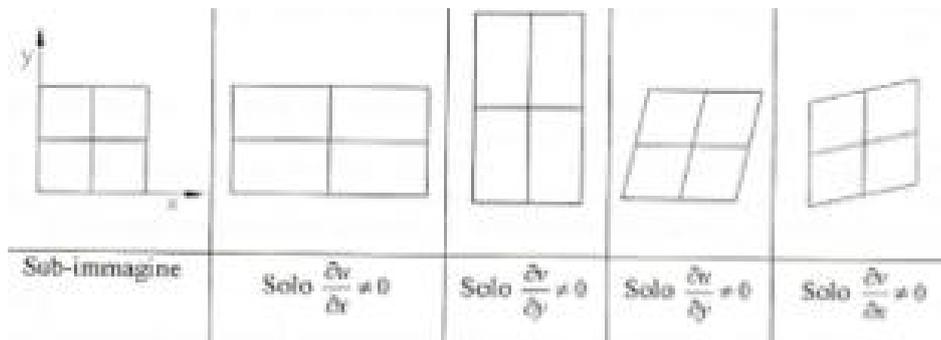


Figura 1.7: Effetto sulle deformazioni delle derivate degli spostamenti[4]

Quanto visto sopra può essere esteso ad un intero facet; infatti si consideri la figura 1.8 e si indichi con  $I(P)$  l'intensità luminosa del punto P e con  $I(Q)$  quella del punto Q.

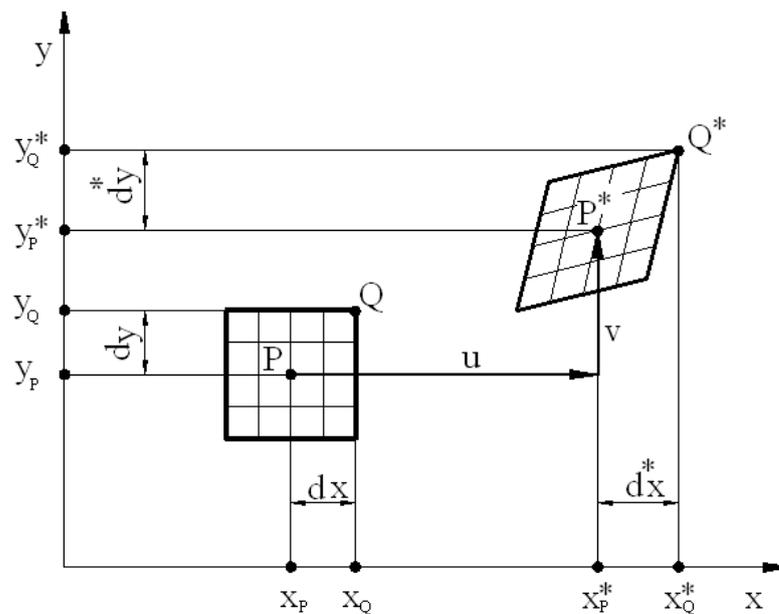


Figura 1.8: Spostamento e deformazione del generico facet [4]

Si ha che:

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

$$I(Q) = I(x_P + dx, y_P + dy)$$

mentre le intensità luminose dei punti del facet deformato saranno:

$$I^*(P^*) = I(x_{P^*}, y_{P^*})$$

$$I^*(Q^*) = I^*(x_{P^*} + dx^*, y_{P^*} + dy^*)$$

La correlazione digitale d'immagini fa in modo di trovare quel facet che in condizioni deformate presenta circa la stessa distribuzione di intensità luminosa del facet nello step di riferimento.

Pertanto le componenti di  $Q^*$  saranno:

$$x^*_{Q} = x_Q + u_P + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P dy$$

$$y^*_{Q} = y_Q + v_P + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P dy$$

Arrivando ad avere:

$$I^*(Q^*) = I^*\left[x_Q + u_P + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P dy, y_Q + v_P + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P dy\right] = I(Q) = I(x_Q, y_Q)$$

Pertanto per ogni facet vanno determinate le sottostanti sei grandezze:

$$u_P, v_P, \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P, \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P, \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P, \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P$$

A causa del rumore di fondo e dei vari errori, le intensità luminose nei facet di riferimento e nella condizione deformata non saranno uguali in nessun caso, pertanto verranno introdotti dei coefficienti di correlazione o delle funzioni errore che saranno mostrati in seguito.

## 1.6 Corrispondenza delle facets e funzioni di forma

Come già detto, la data immagine di riferimento viene suddivisa in piccoli quadrati, detti facet, le quali hanno al loro interno più pixel e per ognuno di queste piccole aree viene calcolato, una volta che si è ritrovata la corrispondenza con il facet in condizioni deformate, lo spostamento rispetto al punto centrale tra i due subset, come mostrato in figura 1.9.

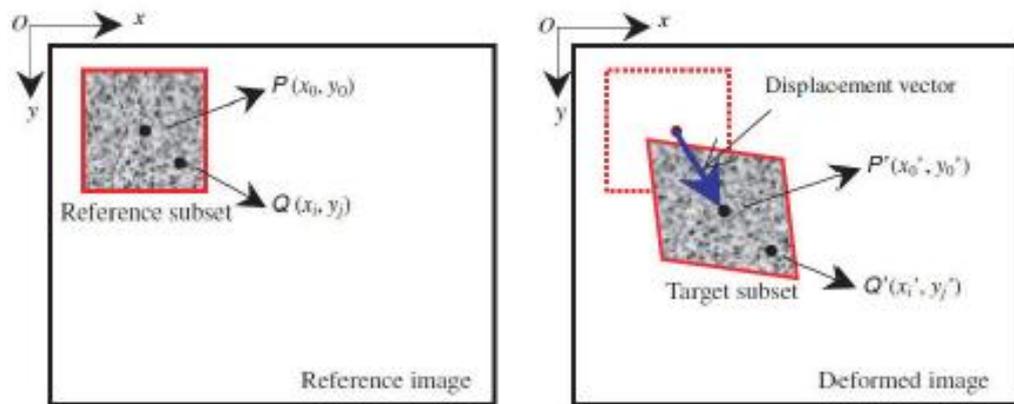


Figura 1.9: Facet nella condizione di riferimento e deformata e rappresentazione del vettore spostamento [1]

Si ha che per avere la corrispondenza tra due facet si attua una operazione di cross-correlazione con la ricerca del massimo oppure si cerca il minimo di una funzione errore, denominata come la differenza dei minimi quadrati.

Tuttavia si ha che man mano che la deformazione aumenta, il facet non sarà più quadrato nella condizione deformata, pertanto si avrà che il facet di riferimento dovrà essere deformato di volta in volta, in modo da avere la migliore corrispondenza con il facet nello step di riferimento; per far questo si utilizzano delle funzioni di forma.

Si consideri la figura 1.9 e si ha che il punto  $Q(x_i, y_j)$  può essere trovato nel subset deformato con il punto  $Q'(x_i', y_j')$  attraverso le funzioni di forma  $\xi(x_i, y_j)$  e  $\eta(x_i, y_j)$  [1].

Infatti si può scrivere che:

$$x_i = x_i + \xi(x_i, y_j)$$

$$y_j = y_j + \eta(x_i, y_j)$$

con  $i, j$  che variano da  $-M$  ad  $M$ , considerando il subset nella condizione di riferimento di dimensioni  $(2M+1) \times (2M+1)$  pixels, centrato in  $P(x_0, y_0)$ .

Nel caso di sola traslazione rigida, la funzione di forma sarà di ordine zero e si ha che:

$$\xi_0(x_i, y_j) = u$$

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

Sempre come si vede in [1] si possono avere funzioni di forma di primo ordine, che sono quelle più usate nel caso di deformazioni presenti, o anche del secondo ordine, usate in casi di stati di deformazione maggiormente complessi.

Nel caso di funzioni di forma del primo ordine, si ha che:

$$\xi_1(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y$$

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

dove  $\Delta x = x_i - x_0$ ,  $\Delta y = y_i - y_0$ ,  $u$  e  $v$  sono le componenti dello spostamento del facet di riferimento lungo gli assi  $x$  e  $y$  e, infine,  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  sono i gradienti dello spostamento del primo ordine sempre considerando il facet di riferimento.

Come sottolineato in [5] si ha che funzioni di forma del primo e del secondo ordine sono sufficienti per avere dei buoni risultati, in quanto funzioni di forma di più alto ordine richiederebbero un costo computazionale molto elevato.

## 1.7 Interpolazione sub-pixel

Le coordinate di un generico punto nel facet deformato possono essere localizzate in posizioni che sono frazioni di pixel, cioè in locazioni sub-pixel.

Pertanto deve essere utilizzato uno schema di interpolazione sub-pixel, rendendo pertanto fondamentale un'interpolazione dei valori di grigio all'interno del facet.

Le funzioni di interpolazione più utilizzate sono le bilineari, le bicubiche e le B-spline, anche se solitamente vengono utilizzate le ultime due, poiché viene richiesto un alto ordine di interpolazione per avere una più alta accuratezza, in quanto il metodo di interpolazione usato è causa di un errore sistematico, che dipende dalla posizione sub-pixel del facet in condizioni deformate [5].

Inoltre un migliore schema di interpolazione porta ad una più efficiente convergenza dell'algoritmo implementato nel software [1].

## 1.8 Criteri di correlazione

Per valutare la similarità tra i due facet nella condizione di riposo ed in quella deformata, deve essere definito dei criteri di correlazione.

Prevalentemente si usano due approcci, in quanto un punto generico nel facet deformato può essere cercato come la posizione che massimizza una funzione di cross-correlazione (CC) oppure che minimizza una funzione errore, il criterio della somma delle differenze quadrate (SSD) [2].

Si ha, come si vede in [1], che i più comuni criteri di cross-correlazione e di SSD sono riassunti nella sottostante tabella 1:

**Table 1.** Commonly used cross-correlation criterion.

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)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

**Table 2.** Commonly used SSD correlation criterion.

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 1: Tabella dei criteri di correlazione più utilizzati [1]

dove:

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

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

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

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2},$$

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

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}.$$

in cui  $f$  e  $g$  sono i valori di grigio dei vari pixel nel facet di riferimento ed in quello deformato,  $(x_i, y_i)$  e  $(x'_i, y'_i)$  sono le coordinate nei sistemi di riferimento del subset di riferimento e deformato,  $f_m$  e  $g_m$  sono i valori di grigio medi nei due facet considerati e la dimensione del subset presa in esame è di  $(2M+1) \times (2M+1)$  pixel.

Si ha che il criterio più utilizzato è lo “zero normalized cross correlation” o lo “zero normalized sum of squares differences”, in quanto è quello che dà la maggiore robustezza riguardo al problema del rumore di fondo ed, inoltre, è insensibile all’offset e alla scala lineare nel cambiamento dell’illuminazione.

Infatti si ha che durante le acquisizioni delle immagini si possono avere dei cambiamenti dovuti alle condizioni di illuminazione sulla superficie del campione, nonostante l’implementazione di una buona illuminazione.

Si ha che i cambiamenti dell’illuminazione si possono verificare in modo da avere un’alterazione della scala luminosa, dove, ad esempio, il facet nelle condizioni deformate può essere più o meno illuminato rispetto alle condizioni del facet di riferimento, oppure come un offset di illuminazione.

Questo problema si è visto essere un problema molto rilevante tanto più quanto è maggiore la deformazione.

Il criterio della “normalized cross correlation” e la “normalized sum of squared differences”, invece, sono insensibili al problema dell’alterazione luminosa, ma non al problema dato dall’offset di illuminazione e per questo sono meno utilizzati in campo pratico rispetto a ZNCC o ZNSSD (definiti in Tabella 1).

## 1.9 Il metodo delle approssimazioni successive

Il metodo delle approssimazioni successive è uno degli algoritmi di calcolo utilizzato nel DIC 2D.

Si ha che in un primo momento viene calcolata la correlazione nei due subset di riferimento e dopo la deformazione, tenendo in considerazione solamente gli spostamenti rigidi e si arriva ad una prima minimizzazione della funzione di correlazione. Si ottengono, in prima approssimazione, le componenti di traslazione del centro del subset.

In seguito vengono prese in esame le derivate dirette dello spostamento, trascurando, per ora, le derivate miste; anche in tal caso, minimizzando o massimizzando la funzione di correlazione, si hanno le prime componenti delle derivate dirette dello spostamento.

Poi si considerano le derivate miste ( $\partial u/\partial y$ ,  $\partial v/\partial x$ ), mantenendo costanti i valori di prima approssimazione degli spostamenti e delle derivate dirette calcolate in precedenza e si minimizza la funzione di correlazione. Si arriva alle prime componenti delle derivate miste, che sono anche quelle che danno i mutui scorrimenti.

Successivamente tale procedura viene ripetuta, considerando, per prima, gli spostamenti che possono variare in un intorno dei valori di spostamento trovati durante la prima iterazione e mantenendo costanti, invece, le derivate ai valori che sono stati calcolati nella prima approssimazione.

In seguito si mantengono fissi i valori di spostamento e delle derivate miste e si considera variabile il valore delle derivate dirette in un intorno rispetto al valore trovato durante la prima approssimazione.

Infine si mantengono costanti i valori di spostamento e derivate dirette trovati e si fa variare la derivata mista in un intorno rispetto ai valori trovati durante la prima iterazione.

La procedura viene iterata, fino ad arrivare a convergenza e pertanto così si ottiene il vettore ( $u$ ,  $v$ ,  $\partial u/\partial x$ ,  $\partial v/\partial y$ ,  $\partial u/\partial y$ ,  $\partial v/\partial x$ ) dei parametri che sono gli spostamenti, le deformazioni e gli scorrimenti del facet deformato rispetto al facet di riferimento.

Questa procedura viene fatta man mano per tutti i facets considerati nella regione di interesse.

In figura 1.11 viene mostrato l'iter di lavoro di tale algoritmo.

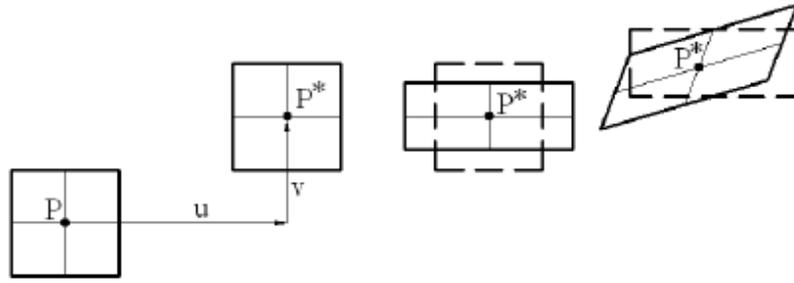


Figura 1.11: Rappresentazione del metodo delle approssimazioni successive [3]

## 1.10 Il metodo di Newton-Raphson

Tale metodo è anch'esso iterativo per il calcolo del vettore  $\mathbf{p} = (u, v, \partial u/\partial x, \partial v/\partial y, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x)$  ed è dato da:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 - \frac{\nabla C(\mathbf{p}_0)}{\nabla \nabla C(\mathbf{p}_0)},$$

dove  $\mathbf{p}_0$  è il vettore di prima approssimazione della soluzione cercata,  $\mathbf{p}$  è la generica soluzione dell'approssimazione iterativa,  $\nabla C(\mathbf{p}_0)$  è il gradiente del criterio di correlazione utilizzato e  $\nabla \nabla C(\mathbf{p}_0)$  è la derivata del secondo ordine del criterio di correlazione, anche chiamata comunemente matrice Hessiana. [1]

## 1.11 Stima del calcolo delle deformazioni

Per quanto riguarda la stima del calcolo delle deformazioni, si ha che esse derivano da un processo di differenziazione numerica del campo di spostamenti trovati e pertanto essi amplificano il rumore già presente nel campo di spostamenti.

Quindi per il calcolo del campo di deformazioni, è richiesta un'operazione di "smoothing" dei dati di spostamento acquisiti [1].

## 1.12 Principali cause di errore nel DIC 2D

Vi sono molteplici cause di errore nell'utilizzo della correlazione digitale di immagini 2D. In seguito, come scritto in [1], verranno classificate le principali e a cui bisogna cercare di stare attenti per migliorare l'accuratezza delle misure:

- 1) La qualità del pattern sul campione risulta molto importante, in quanto esso può dare un contrasto differente dell'immagine e dipende anche dalla dimensione degli speckle sul campione. Si ha che la qualità del pattern influenza la dimensione del facet e tendenzialmente nel caso di pattern con un forte contrasto si riescono a scegliere dimensioni dei subset più piccoli;
- 2) Gli spostamenti fuori dal piano e il non parallelismo tra il sensore e la superficie del campione sono un'altra causa molto importante di errore, anche se tendenzialmente è impossibile eliminare del tutto tale problematica, poiché durante un qualsiasi esperimento è impensabile pensare di avere un perfetto parallelismo tra il CCD ed il campione, così come ci saranno sempre delle curvature sulla superficie del campione durante il caricamento di esso. Tale effetto sarà tanto maggiore quanto più la telecamera è vicina alla superficie del campione;
- 3) Altro problema è dato dalla distorsione delle immagini, conseguenza della distorsione delle lenti. Tale problema è molto importante e da non sottovalutare soprattutto nel caso di lenti a basso costo;
- 4) Il rumore si presenta sotto varie forme e avviene soprattutto durante la fase di acquisizione e digitalizzazione delle immagini, infatti si ha che i sensori utilizzati sono influenzati dalla temperatura di lavoro, dalla loro qualità, così come dalle condizioni ambientali;
- 5) l'interpolazione dei livelli di grigio, che porta ad errori sistematici; in generale è consigliato in letteratura di utilizzare un alto ordine di interpolazione per ridurre tali errori.



## CAPITOLO 2

### 2. Le leghe Al-Li

#### 2.1 Caratteristiche delle leghe Al-Li

Le leghe di alluminio sono molto importanti in quanto combinano quelle caratteristiche di leggerezza e di resistenza, molto importanti nell'industria meccanica.

L'introduzione degli elementi leganti nelle leghe di alluminio è molto importante, in quanto migliora le sue caratteristiche meccaniche; come si evince dai grafici sottostanti 2.1 e 2.2, la presenza di determinati elementi leganti e, in particolar modo del litio nella lega di alluminio, fa sì che si riesca ad avere una maggiore durezza ed una minore massa volumica, che, come già detto, risultano caratteristiche molto apprezzate.

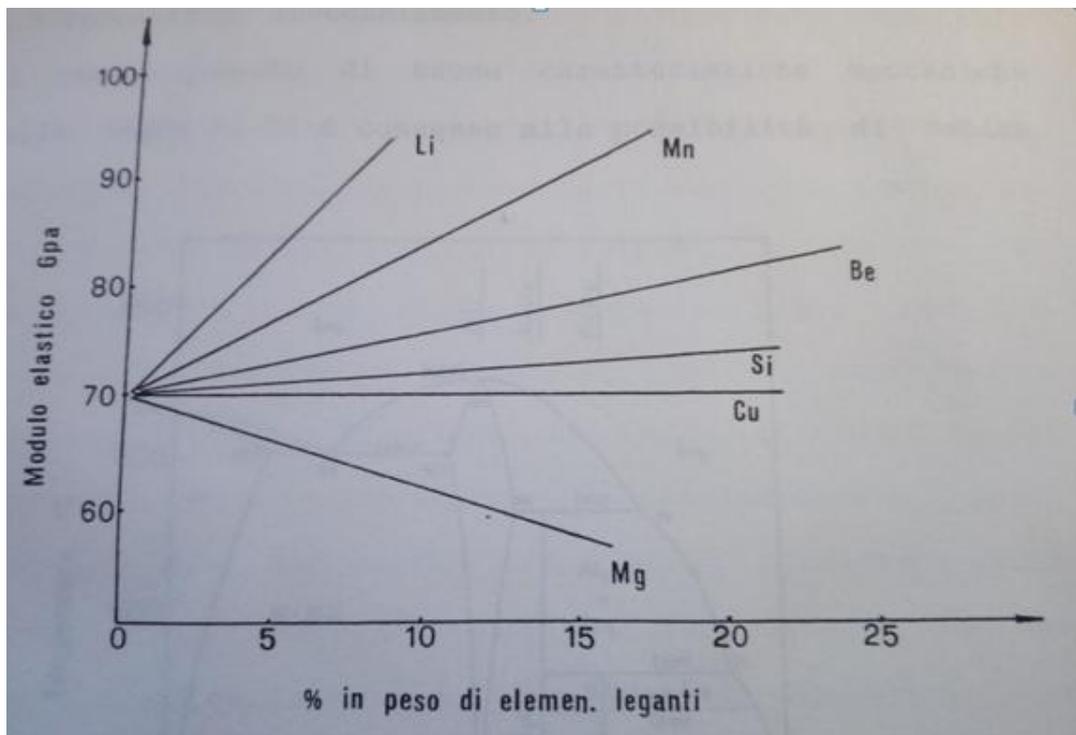


Figura 2.1: Variazione del modulo elastico al variare della percentuale in massa degli elementi leganti.

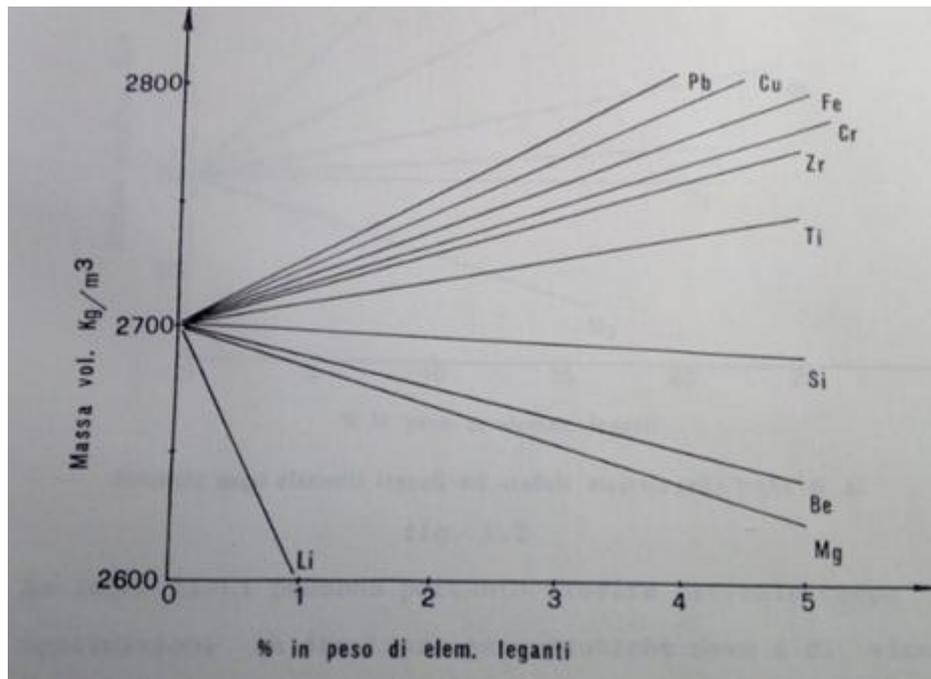


Figura 2.2: Variazione della massa volumica al variare della percentuale in massa degli elementi leganti nelle leghe di alluminio

Le leghe Al-Li, dopo solubilizzazione e tempra, possono subire determinati processi di invecchiamento, che sono molto importanti nel conferirle delle alte caratteristiche meccaniche.

In una lega di alluminio, l'invecchiamento avviene prima di tutto con la formazione delle zone GP (Guinier Preston), dove gli atomi di soluto si raggruppano nelle cosiddette "zone GP" quando sono alla temperatura d'invecchiamento. Si ha che man mano che la temperatura oppure il tempo di permanenza dei soluti in tali zone è maggiore, essi si espandono fino ad essere dissolti, oppure formano precipitati di tipo metastabile. Questi ultimi sono inizialmente coerenti ed omogenei con la matrice, in modo da deformare il reticolo cristallino e fare in modo che si abbia una diminuzione del movimento delle dislocazioni; inoltre si ha che man mano che aumenta la temperatura oppure l'invecchiamento del materiale, i precipitati crescono ancora fino ad arrivare a dei precipitati di equilibrio, che sono incoerenti con la matrice e aumentano di dimensioni man mano che aumenta la temperatura o l'invecchiamento, fino ad arrivare ad avere una fase pressoché distinguibile nella matrice anche al microscopio ottico.

Si ha che per ottenere l'invecchiamento artificiale si effettua il ciclo termico della "tempra di soluzione", in cui si fa prima di tutto un trattamento di riscaldamento, in modo che gli elementi rafforzanti nella lega di alluminio abbiano una solubilizzazione completa ed in seguito si effettua un rapido raffreddamento. Dopo tale processo, la soluzione solida viene lasciata a temperatura ambiente per un tempo tale da avere la formazione di piccoli precipitati, il quale migliorano le caratteristiche meccaniche della lega.

C'è da notare che durante il trattamento di tempra di soluzione, nella lega viene impedita la separazione dei componenti che non sono solubili e tale fenomeno viene chiamato sovrassaturazione.

Inoltre c'è da far notare che quando la sovrassaturazione raggiunge livelli alti e le temperature sono alte, si può avere la non formazione dei precipitati metastabili, ma vi è direttamente la formazione dei precipitati di equilibrio nella matrice, così come, per elevate temperature, può non avvenire la formazione delle zone GP.

Si ha che sia la formazione di precipitati metastabili che le zone GP sono la causa dell'incremento delle caratteristiche meccaniche nelle leghe di alluminio, poiché, per quanto riguarda le zone GP, essendo coerenti con la matrice, causano una distorsione tra i piani reticolari tra esse e la matrice stessa e pertanto vanno ad interferire con il movimento delle dislocazioni.

Il contributo del rafforzamento dato dai precipitati, invece, dipende da molti più fattori, come la loro spaziatura, il loro grado di coerenza con la matrice, la loro finezza ed anche dal fatto che essi sono aggirati oppure deformati a taglio durante l'attraversamento delle dislocazioni, nel momento in cui deformiamo plasticamente il componente [9].

## 2.2 Trasformazioni durante l'invecchiamento

Ciò che avviene durante l'invecchiamento della lega alluminio-litio è di più facile comprensione se si fa riferimento alla figura 2.3, dove si vede la formazione della fase metastabile  $\delta'$ , con composizione  $\text{Al}_3\text{Li}$ , dalla soluzione solida  $\alpha$ , oltre che alla formazione della fase di equilibrio  $\delta$ , di composizione Al-Li, sempre dalla soluzione solida  $\alpha$ ; generalmente si ha che la fase  $\delta'$  è formata per la precipitazione di particelle pressoché sferiche dalla soluzione  $\alpha$ .

Si ha che tale fase metastabile  $\delta'$  è ordinata ed essendo molto simile alla struttura reticolare della soluzione solida  $\alpha$ , fa in modo che durante il processo di invecchiamento, si venga a verificare una precipitazione piuttosto uniforme e fine della fase  $\delta'$  nella matrice  $\alpha$ .

Invece per quanto riguarda la fase di equilibrio  $\delta$ , si ha che essa precipita in maniera piuttosto irregolare sotto forma di precipitati piatti e sottili oppure, in taluni casi, in precipitati più rotondi, in un range di temperatura compreso tra 150°C e 500°C.

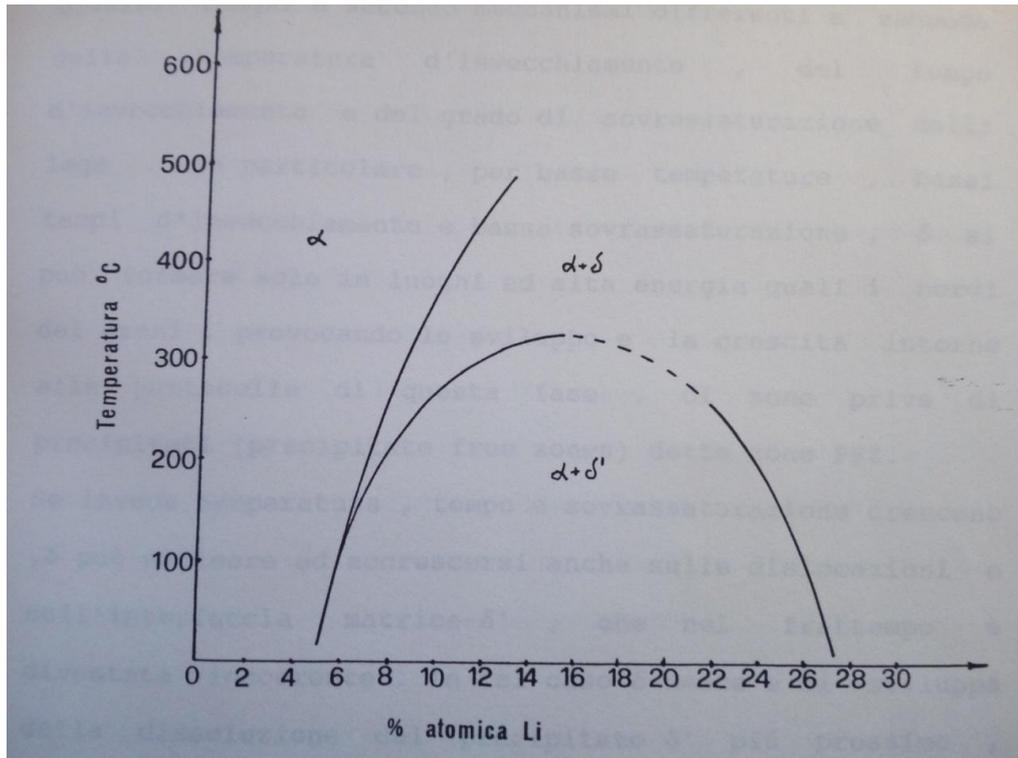


Figura 2.3: Linee di solvus per la precipitazione del composto metastabile  $\delta'$  e di equilibrio  $\delta$

Generalmente si ha che la fase metastabile  $\delta'$  è quella che dà il più alto contributo nell'incremento delle proprietà di resistenza della lega, rispetto alla fase  $\delta$ , in quanto si ha che quest'ultima è anche la causa di un peggioramento delle proprietà corrosive e di fragilità, nonché della tenacità a frattura della lega.

La presenza di  $\delta'$  aumenta le proprietà meccaniche della lega e tale fenomeno dipende dalla differenza di modulo elastico e l'energia interfacciale tra  $\delta'$  e la matrice, nonché dal grado di ordine di tali precipitati e dalle deformazioni che viene ad avere la matrice intorno ai precipitati.

Peraltro si ha che l'effetto più importante in tali leghe binarie Al-Li è dato dal grado di ordine dei precipitati nella matrice, in quanto, avendo la fase metastabile  $\delta'$  e la matrice una struttura reticolare molto simile, si ha che il contributo dato dall'energia interfacciale e dalle deformazioni della matrice si può ritenere molto basso.

Inoltre si ha che il modulo elastico di  $\delta'$  è molto più alto di quello della matrice, ma l'aumento di durezza dovuto alla presenza di tali precipitati si rispecchia in tutta la soluzione solida, rendendo, pertanto, tale contributo meno importante rispetto a quello dovuto all'ordine dei precipitati.

Generalmente si ha che il miglioramento delle proprietà meccaniche dipende anche da quanto siano grandi i precipitati, nonché dalla loro presenza uniforme e dalla loro spaziatura; infatti si ha che i precipitati  $\delta'$  immettono dei nuovi bordi di antifase, rendendo, pertanto, più faticoso il moto delle dislocazioni nel materiale.

Inoltre si ha che quando i precipitati  $\delta'$  aumentano di molto le loro dimensioni, le dislocazioni li aggirano secondo il meccanismo di Orowan, invece che attraversarli, soprattutto nel caso in cui si vengono ad avere delle forti deformazioni, dove l'interfaccia tra la matrice e i precipitati può diventare incoerente. In tal caso, pertanto, viene ad aversi un decadimento delle proprietà meccaniche.

Infatti si ha che, come ben visibile nella figura 3.4 sottostante, quando i precipitati raggiungono dei valori critici, si ha che, dal quel momento in poi, le dislocazioni non tagliano ma aggirano i precipitati e la tensione di taglio diminuisce, secondo l'andamento in figura 3.4.

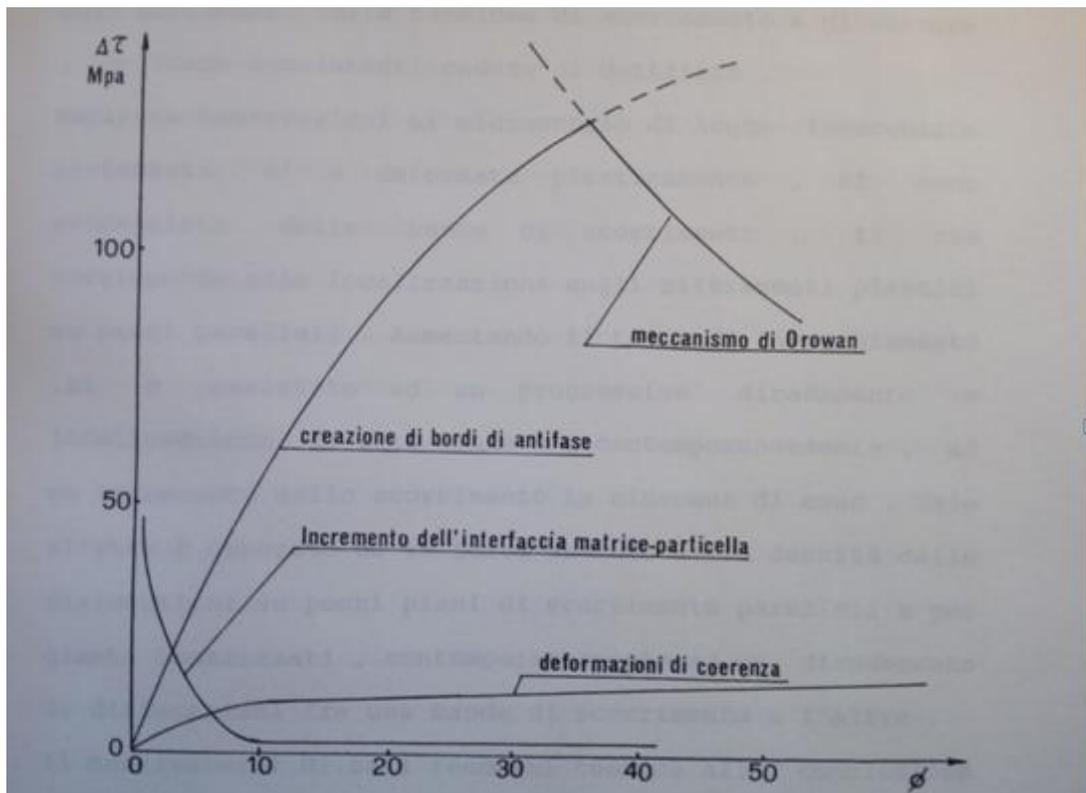


Figura 2.4: Andamento della tensione critica di taglio al variare del diametro del precipitato

Per quanto riguarda, invece, la formazione della fase  $\delta$ , si ha che essa dipende molto dalle condizioni del materiale in esame.

Infatti si ha che quando vi sono delle basse temperature, dei bassi tempi di invecchiamento e dei bassi gradi di sovrassaturazione, la fase di equilibrio  $\delta$  può formarsi solo in zone dove vi è un'alta energia, come può essere sui bordi di grano, in modo che nell'intorno di tali precipitati di equilibrio, si formano e man mano accrescono delle zone in cui non vi sono precipitati, denominati PFZ (che sta per "precipitate free zones").

Viceversa, se vi sono alte temperature, alti tempi di invecchiamento ed alti gradi di sovrassaturazione, si ha che i precipitati della fase  $\delta$  possono nascere e crescere sulle

dislocazioni, così come sull'interfaccia tra la matrice e i precipitati  $\delta'$ , avendo come conseguenza un aumento delle PFZ [9].

## 2.3 Ulteriori caratteristiche delle leghe Al-Li

Si ha che solitamente le percentuali di litio che sono introdotte nell'alluminio non risultano maggiori dell'1.5% in massa, in quanto dei forti inserimenti di tale elemento legante causano un minore allungamento percentuale a rottura, con conseguente decremento della duttilità.

Un'altra caratteristica delle leghe Al-Li con un'elevata concentrazione del precipitato  $\delta'$ , è che la deformazione non si manifesta in maniera uniforme e omogenea, ma tende per lo più a localizzarsi su determinati piani reticolari, facendo diminuire, di conseguenza, la tenacità e la duttilità della lega considerata; tale fenomeno di localizzazione della deformazione plastica aumenta tanto più è grande il tempo di invecchiamento.

Per cercare di ridurre questa problematica, si può pensare a rafforzare la lega considerata con il fenomeno dell'aggiramento dei precipitati attraverso il meccanismo di Orowan da parte delle dislocazioni, ma questo non è consigliabile farlo, in quanto i precipitati  $\delta'$  rimangono molto piccoli ed anche coerenti per lunghi tempi di invecchiamento, non rendendo, pertanto, consigliabile la strada del sovra invecchiamento della lega.

Pertanto spesso si utilizza il rame nella lega che ha il compito di ridurre l'energia dei difetti nella matrice e, pertanto, diminuendo il diametro critico delle particelle  $\delta'$ , rende minore la solubilità del litio nell'alluminio, provocando, nei primi stadi dell'invecchiamento, un maggiore aumento delle dimensioni di tali particelle.

Un'altra caratteristica dell'aggiunta del rame è la formazione di precipitati semi-coerenti come, ad esempio,  $\theta'$ , di forma piatta, con composizione  $Al_{3,6}Cu_2$ , il quale aumenta la durezza della lega.

Inoltre possono precipitare anche composti ternari Al-Li-Cu, come la fase semicoerente T1, anch'essa piatta, con composizione  $Al_2LiCu$  ed anche la fase T2, che presenta una composizione stechiometrica pari a  $Al_6CuLi_3$ .

Si ha che la fase T1 è quella che conferisce la maggiore durezza a tali leghe ternarie, soprattutto per alte temperature di invecchiamento, mentre la fase T2 nuclea solamente nei bordi di grano ad alto angolo e conferisce un decremento della duttilità e, di conseguenza, della tenacità a frattura.

Altra caratteristica delle leghe ternarie è che esse sono principalmente rafforzate con il contributo dell'aggiramento del precipitato coerente  $\delta'$  e con la precipitazione di T1 e  $\theta'$ , oltre che con la deformazione a taglio delle dislocazioni.

Pertanto si ha che con la precipitazione di  $\theta'$  e di T1, la deformazione diventa più uniforme e meno localizzata ed il principale contributo di ciò è dovuto alla minore presenza delle PFZ.

Altri tipi di leghe che si possono avere comprendono, ad esempio, lo zirconio, il quale rende la microstruttura maggiormente fine ed inoltre fa precipitare la fase coerente  $\beta'$ , di composizione stechiometrica  $Al_3Zr$ , il quale ha il compito di rendere più elevata la temperatura di ricristallizzazione.

Altro elemento che si può utilizzare nella lega alluminio-litio è il magnesio, che ne aumenta le caratteristiche meccaniche, grazie al fatto che il magnesio ha la funzione di ridurre la solubilità del litio nella matrice d'alluminio e, pertanto, provocare un aumento delle dimensioni delle particelle  $\delta'$ , così come un aumento delle precipitazioni stesse di tali particelle.

Altra funzione del magnesio nelle leghe considerate è quella di dare la fase rafforzante  $S'$ , di tipo semicoerente, che si trasforma, a sua volta, nella fase  $S$ , che è di equilibrio ed ha composizione stechiometrica  $Al_2LiMg$ .

Tale fase  $S'$  nuclea principalmente sulle dislocazioni e sui bordi di grano, è di tipo incoerente e permette la propagazione delle PFZ e genera un aumento delle caratteristiche meccaniche della lega, ma non della duttilità.

Qualora si volesse ulteriormente aumentare le caratteristiche meccaniche della lega considerata mediante rafforzamento per soluzione solida, un altro elemento che si può utilizzare per raggiungere tale scopo è il manganese.

Infine, c'è da sottolineare che le principali impurezze delle leghe alluminio-litio risultano essere il cesio, il potassio, il sodio, il tallio ed il rubidio, il quale possono formare determinati composti, che possono liquefare ad una temperatura che è minore di quella ambiente e, quindi, provocare, anche se presenti in parti piccolissime, la fragilità delle leghe alluminio-litio. [9].

## 2.4 Caratteristiche meccaniche della lega Al-Li 8090T8

Una delle leghe Al-Li più importanti è senz'altro la lega 8090, impiegata allo stato T8, in quanto essa ha subito dapprima il trattamento di solubilizzazione a  $535^\circ C$  per circa due ore, poi tempra in acqua a temperatura ambiente, deformazione plastica al 3% ed infine invecchiamento artificiale per circa 16 ore a  $190^\circ C$ , dove esso ha raggiunto il massimo di durezza.

In condizioni T8, la lega 8090 ha al centro della piastra una microstruttura anisotropa con grani che non sono ricristallizzati e sono allungati nella direzione in cui si è avuta laminazione; i cristalli hanno per lo più una forma parallelepipedica con lunghezze dell'ordine del millimetro, larghezze di circa  $350 \mu m$  e spessori di circa  $40 \mu m$ .

Sulla superficie, tuttavia, vi è una parte di materiale ricristallizzato, in cui la microstruttura risulta maggiormente fine.

Infatti si ha che la piastra è stata laminata e pertanto nella superficie del materiale vi è una deformazione plastica molto più grande rispetto al cuore; inoltre si ha che la

contemporanea presenza dello zirconio all'interno della lega fa in modo di limitare la ricristallizzazione alla temperatura in cui si ha solubilizzazione.

Pertanto vi è una struttura anisotropa ricristallizzata che sarà limitata solamente alla superficie.

Poi si ha che la deformazione del 3% è decisamente leggera per far sì che si abbia un cambiamento nella struttura del materiale; pertanto la sua funzione è solamente quella di aumentare il numero e la densità delle dislocazioni nella superficie, senza che essa vada a variare la forma del grano.

Si ha che il trattamento di invecchiamento artificiale a cui viene sottoposta la lega fa sì che al suo interno vengano prodotti un certo numero di precipitati:

- $\beta'$ , di composizione stechiometrica  $Al_3Zr$ , che per lo più fa in modo di inibire la ricristallizzazione e pertanto affina il grano;
- $\delta'$ , di composizione stechiometrica  $Al_3Li$ , coerente e metastabile, con forma sferica e di tipo rafforzante; esso precipita per lo più in forma omogenea nella matrice d'alluminio oppure si è visto che si può anche avere la precipitazione di tale elemento in modo eterogeneo sulle particelle  $\beta'$ ;
- $S'$ , di composizione stechiometrica  $Al_2CuMg$ , semicoerente e metastabile, è di tipo rafforzante, di forma piatta e nuclea per lo più lungo le dislocazioni in maniera eterogenea, che si formano durante il trattamento T8;
- $T_1$ , di composizione stechiometrica  $Al_2CuLi$ , anch'esso è di forma piatta, di equilibrio ed ha principalmente lo stesso comportamento di  $S'$ ;
- $\delta$ , di composizione stechiometrica  $AlLi$ , è di equilibrio e precipita nei bordi dei grani quando si raggiunge il sovra invecchiamento della lega;
- $T_2$ , di composizione stechiometrica  $Al_6CuLi_3$ , è di equilibrio, nuclea nei bordi di grano con un angolo alto e la sua presenza è la principale causa della diminuzione di duttilità e di tenacità a frattura.

Si ha che la precipitazione nella matrice di alluminio avviene in modo uniforme con una precipitazione preferenziale delle particelle  $\delta'$  nei bordi dei grani, che causa la formazione di "Precipitate free zones" estese all'incirca  $0.5 \mu m$ .

Si ha un alto valore della tensione di rottura e della tensione di snervamento, dovuto per lo più al fatto che si raggiunge l'invecchiamento al massimo della durezza; tuttavia questo provoca un decremento dell'allungamento a rottura, della duttilità e della tenacità a frattura.

La diminuzione del valore di tenacità a frattura si ha a causa della formazione dei precipitati lungo i bordi di grano, in quanto da essi possono nucleare micro vuoti, ed anche a causa del fenomeno di localizzazione delle deformazioni che si viene ad avere nelle zone in cui vi sono pochi precipitati.

Infine vi è da notare che le caratteristiche meccaniche, così come la tenacità a frattura e la duttilità, dipendono molto dall'orientazione dei cristalli, in quanto, come detto, la struttura

metallografica è fortemente anisotropa, con le maggiori differenze che si hanno lungo le direzioni del traverso corto ST e SL e le direzioni del traverso lungo LT e direzione di laminazione L [9].

La composizione chimica, i trattamenti termo meccanici e le proprietà meccaniche della lega in direzione LT sono riportate nelle sottostanti tabelle 2.1, 2.2 e 2.3:

Lega	Li	Cu	Mg	Zr	Ag
Al-Li 8090	2.2-2.7	1.0-1.6	0.6-1.3	0.04-0.16	/

Tabella 2.1: Composizione chimica della lega

Lega	8090 T8
Temperatura di solubilizzazione	535°C
Tempra	In acqua a temperatura ambiente
Deformazione plastica	3%
Temperatura di invecchiamento	190°C
Tempo di invecchiamento	16h

Tabella 2.2: Trattamenti termo meccanici della lega

Lega	Al-Li 8090
Direzione	LT
Limite elastico allo 0,2% (MPa)	474
Tensione di rottura (MPa)	547
Allungamento percentuale	6.2
Modulo di Poisson	0.34

Tabella 2.3: Caratteristiche meccaniche della lega in direzione LT



## **CAPITOLO 3**

### **3.L'effetto Portevin-Le Chatelier**

#### **3.1 Introduzione**

L'effetto Portevin Le Chatelier (denominato anche PLC) si verifica durante i test di trazione di alcune leghe diluite sotto determinati regimi di velocità di deformazione e temperatura ed esso si verifica come una deformazione plastica instabile, che diviene localizzata sotto forma di bande che si muovono lungo il campione; tale fenomeno causa il degrado delle proprietà strutturali intrinseche e della qualità superficiale dei materiali.

L'effetto PLC si verifica in molti acciai e in molte leghe di alluminio e il suo effetto è quello di incrementare la resistenza a trazione ed il tasso di indurimento, decrementando, invece, la duttilità del materiale considerato e l'allungamento a rottura; pertanto, le leghe che vengono caricate, aumentano il loro rischio di rottura, a causa di un ulteriore aumento dell'infragilimento e della minore resistenza alla frattura.

#### **3.2 Effetto PLC**

Come risaputo, la deformazione meccanica di solidi è dovuta alla nucleazione ed al moto delle dislocazioni. Si ha che il principale fattore dovuto all'instabilità della deformazione plastica è dovuta al fatto che le dislocazioni, all'interno di un materiale, possono interagire con atomi che risultano estranei, come, ad esempio, i soluti nelle soluzioni solide, in quanto questi ultimi tendono ad andare dove la loro energia è minore, ovvero nelle dislocazioni, ostacolando il movimento di queste ultime.

In generale si ha che quando le dislocazioni non vengono temporaneamente bloccate da qualche ostacolo e successivamente non si disancorano bruscamente, il flusso plastico osservato è stabile, invece quando il moto delle dislocazioni subisce un disturbo, come può essere la presenza dei soluti che la contrastano, allora la deformazione plastica diventa instabile.

Si ha che i fattori più importanti che influenzano la stabilità della deformazione plastica sono la temperatura e la velocità di deformazione, in quanto soprattutto la temperatura influenza il movimento, poichè il calore è una fonte di energia per il moto dei difetti, invece la velocità di deformazione influenza il numero delle dislocazioni formate e la loro mobilità in un materiale che è posto in trazione [6].

Si ha che quando il movimento delle dislocazioni è instabile, anche la deformazione plastica è instabile e la curva di trazione nella zona plastica mostra dei continui incrementi ed arresti nel tratto del flusso plastico.

Si ha che l'effetto PLC si verifica sia in soluzioni solide interstiziali, che in quelle sostituzionali e nel caso di una temperatura ed una velocità di deformazione costante, esso si verifica come delle dentellature nel tratto plastico con una certa frequenza ed una certa ampiezza delle cadute di tensione, come visibile in figura 3.1.

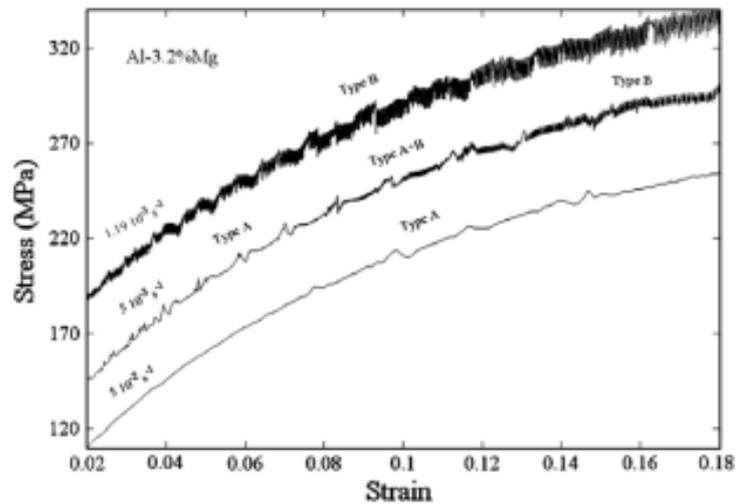


Figura 3.1: Effetto PLC in una lega Al-Mg [10]

La più importante caratteristica dell'effetto PLC è la localizzazione della deformazione in una certa sezione del campione ed il movimento di tale deformazione localizzata lungo il campione man mano che aumenta la deformazione.

Questa localizzazione della deformazione si manifesta sotto forma di bande, che hanno un piccolo spessore e possono essere inclinate di circa  $60^\circ$  rispetto all'asse di trazione, come mostrato in figura 3.2.

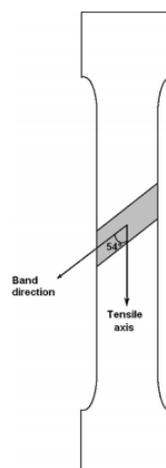


Figura 3.2: Banda PLC lungo un dato campione [11]

Si ha che le bande PLC sono di diverso tipo e cambiando la velocità di deformazione e la temperatura può avvenire la transizione tra una banda e l'altra [6].

La teoria più accettata per l'origine dell'effetto PLC è data dal modello, denominato "dynamic strain aging", che è data dall'interazione tra le dislocazioni mobili e gli atomi di soluto che diffondono.

Si ha che durante la deformazione plastica, le dislocazioni vengono bloccate in maniera temporanea da ostacoli localizzati, come ad esempio delle foreste di dislocazioni. Durante tale tempo di blocco, in cui le dislocazioni cercano di liberarsi con l'aiuto termico man mano che aumenta la deformazione, un ulteriore blocco ad esse è dato dalla diffusione di atomi di soluto intorno alle stesse.

Si ha che localmente viene a verificarsi la concentrazione degli atomi di soluto e lo sblocco delle dislocazioni mobili da tali agglomerati di soluto; tali fenomeni si ripetono continuamente quando la mobilità degli atomi di soluto diventa comparabile con quello delle dislocazioni ed in scala macroscopica questi processi possono essere visti con l'oscillazione e quindi con le dentellature della deformazione plastica e con la formazione di bande localizzate, chiamate appunto bande PLC [7].

### 3.3 Tipologia di di bande PLC

Esistono diversi tipi di bande PLC ed ognuna è caratterizzata da una forma ben definita delle dentellature nella curva di trazione e sono divise principalmente in tre tipi: bande di tipo A, di tipo B e di tipo C.

Si ha che i vari tipi di bande sono associate all'organizzazione spazio-temporale delle dislocazioni nel campione e generalmente le bande di tipo C nucleano in maniera random, non sono propaganti e sono bande saltellanti lungo il campione.

Nella curva di trazione si ha che per tali bande le dentellature hanno una certa consistenza sia nell'ampiezza che nella frequenza.

Per quanto riguarda le bande di tipo B, si ha che esse generalmente si propagano in maniera intermittente lungo il campione con intervalli circa uguali e nella curva di trazione le ampiezze e le frequenze appaiono meno regolari in confronto alle bande di tipo C.

Invece per le bande di tipo A, esse propagano in maniera continuativa lungo il campione con delle piccole cadute di tensione arbitrarie che avvengono in un flusso plastico tutto sommato regolare che si verifica nella curva di trazione.

Di solito si ha che ad alte temperature e basse velocità di deformazione è favorita la formazione di bande di tipo C, mentre a basse temperature ed alte velocità di deformazione quelle di tipo A; nelle condizioni intermedie solitamente si verificano le bande di tipo B.

Si ha che le bande possono formarsi in una singola posizione o in più parti all'interno del campione e generalmente la presenza di un tipo di banda implica la non presenza delle altre, a meno che non si raggiungono i valori critici di velocità di deformazione oppure di temperatura [6].

Nella figura 3.4 sottostante sono mostrati i tipici andamenti delle bande PLC, rispettivamente dall'alto verso il basso, di tipo A, B e C, nella curva di trazione tensione-deformazione.

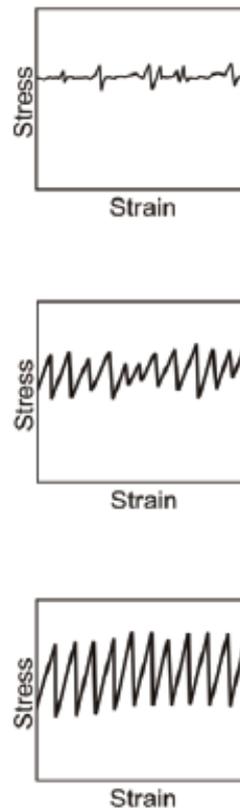


Figura 3.4: Tipici andamenti delle bande PLC di tipo A (sopra), di tipo B (al centro) e di tipo C (sotto) nella curva di trazione tensione-deformazione [6]

## CAPITOLO 4

### 4.PARTE SPERIMENTALE: CONFIGURAZIONE E PROVE PRELIMINARI

#### 4.1 Configurazione del sistema

L'attrezzatura utilizzata per l'analisi della correlazione di immagini digitali è principalmente fornita dalla Dantec Dynamics e dalla Limes. Innanzitutto si ha la macchina tensile fornita dalla MTS, utilizzata per fare le prove di trazione sui vari provini a vari carichi impostati dall'utente, che è l'elemento principale dove vengono fatte le prove per il calcolo degli spostamenti e delle deformazioni con la DIC. Inoltre si ha una fotocamera con obiettivo Canon, che è collegata tramite Express card 54 al laptop del computer portatile della "Dell" e al dispositivo di sincronizzazione DAQ della Limes, il quale permette la conversione dei segnali digitali in analogici ed inoltre mette in comunicazione l'unità di controllo della macchina di trazione e il portatile.

Nel nostro caso si ha che è il laptop che riceve un'informazione dall'unità di controllo, espressa in volt, il quale può essere un'informazione di spostamento, di carico o di qualsiasi altra cosa, elaborando, in seguito, le immagini acquisite [15].

Inoltre si ha il sistema d'illuminazione, formate dalle luci ad incandescenza, i quali ne vengono usate da un minimo di uno ad un massimo di tre, per garantire il miglior contrasto ed i minimi riflessi, un cavalletto per il supporto della fotocamera ed anche i primari di calibrazione del sistema.

Inoltre vi è tutta l'attrezzatura utilizzata con cui realizzare il pattern, senza la quale non si possono fare misurazioni.

In figura 4.1 viene mostrato lo schema dell'impianto che si è utilizzato in laboratorio.

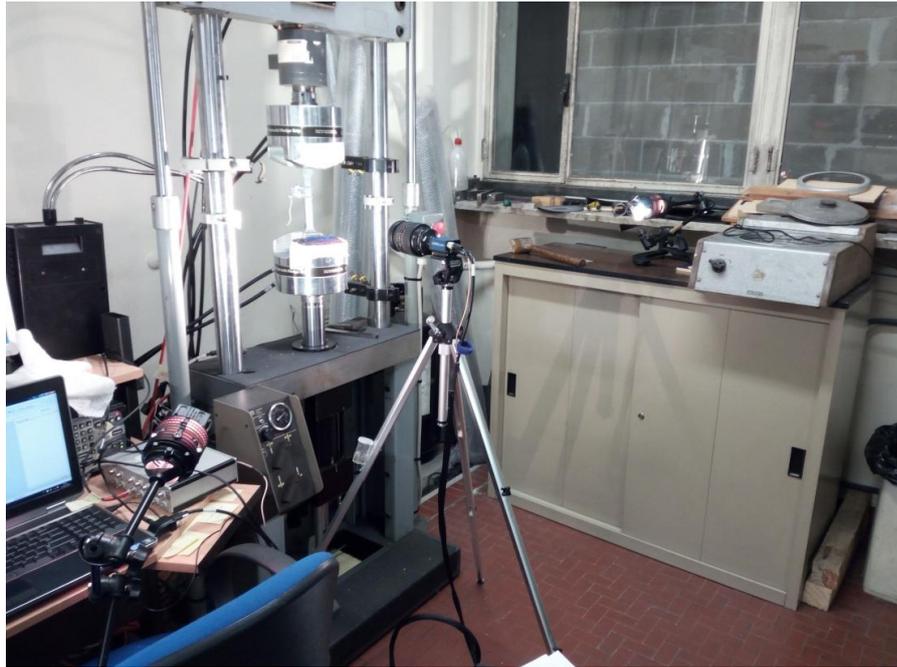


Figura 4.1: Schema impianto

## 4.2 Sistema d'illuminazione

Come già accennato, un aspetto molto importante per ottenere dei buoni risultati è come viene illuminato il provino, in quanto l'illuminazione deve permettere di individuare in maniera univoca il pattern ed è quello che deve dare la possibilità di inseguire lo speckle durante l'intera prova.

Essa deve essere uniforme ed intensa, in quanto il pattern deve essere illuminato bene sul campione, con il fine di non creare zone di indeterminazione ed inoltre deve essere uniforme per non avere dei riflessi sul campione che portano ad avere delle differenti illuminazioni oppure delle parti dove esso non è visibile al meglio.

Nel nostro caso sono state utilizzate da una a tre luci ad incandescenza, posizionate in modo da avere le caratteristiche sopraelencate per l'illuminazione del provino ed anche distante dalla telecamera e dal campione, in modo da fare attenzione all'aspetto termico legato all'illuminazione, che può portare ad ulteriori errori nelle misurazioni; in particolare si può avere il riscaldamento dell'aria, che porta al flusso termico tra campione e telecamere, la dilatazione stessa del provino, nonché il riscaldamento del sensore delle telecamere, che può dare degli elettroni vaganti che vanno a variare l'immagine che acquisisce il sensore e, pertanto, la misurazione seguente [4].

In figura 4.2 è mostrata una foto del sistema di illuminazione ad incandescenza utilizzato in laboratorio.



Figura 4.2: Foto luce ad incandescenza utilizzata in laboratorio

### **4.3 Il sensore e la scheda d'acquisizione**

Il sensore presente sulla fotocamera è del tipo CCD, cioè Charge-Couple Device ed è utilizzato soprattutto per il contenimento del rumore di fondo che esso attua.

L'acquisizione avviene in toni di grigio ad 8 bit, in modo che ogni pixel può assumere un valore che va da 0 a 255, cioè pari a  $2^8$  valori.

La scheda d'acquisizione (il dispositivo DAQ della Limes) permette di collegare la fotocamera con il PC e, pertanto, di acquisire e registrare sul portatile le immagini scattate; inoltre su di esso si possono collegare fino ad 8 dispositivi analogici, che possono ad esempio essere i valori in tensione della deformazione letta sull'estensimetro o i valori di carico assiale che viene applicata alla macchina.

### **4.4 Il software di elaborazione dati**

Il software disponibile con il sistema Dantec-Dynamics è Istra-4D. Tale software gestisce le operazioni di calibrazione e correlazione e fornisce i risultati finali. E' possibile esportare i dati finali in formati che possono essere utilizzati dai programmi comuni di elaborazione dei dati, come, ad esempio, Excel o Matlab.

## 4.5 Calibrazione del sistema

Il primo passo importante da effettuare prima di iniziare le prove di acquisizione ed elaborazione dei dati è la calibrazione della camera.

Lo scopo della calibrazione è il calcolo dei parametri interni della camera, cioè delle caratteristiche ottiche e geometriche, ed anche dei parametri esterni, ovvero la posizione relativa e la rotazione della camera, in forma di locazione e rotazione in tre dimensioni del sistema della camera imaging, rispetto allo stesso sistema di coordinate globale. Tali parametri sono necessari per la conseguente correlazione delle immagini e valutazioni delle misurazioni.

Una cosa molto importante è che la calibrazione deve essere effettuata sotto le stesse condizioni delle acquisizioni delle immagini durante le prove meccaniche, pertanto con lo stesso settaggio della camera e delle lenti.

Si ha che l'utente nel menù della calibrazione, sceglie l'appropriato calibration target, la quale dimensione dovrebbe approssimativamente corrispondere alle dimensioni dell'area del provino oggetto di indagine.

Dal momento che la telecamera non è posizionata ad una distanza fissa dalla macchina tensile che è utilizzata per le prove, si ha che ogni volta che essa viene spostata oppure viene modificata la messa a fuoco o lo zoom o l'apertura del diaframma, poi è necessario ricalibrare il sistema.

Prima di effettuare la calibrazione, viene messo a fuoco il provino nel campo di visione della camera e si regola lo zoom e la messa a fuoco, in modo da avere un'ottima nitidezza e contrasto dell'immagine, così come un'illuminazione sufficiente e senza riflessi della sorgente luminosa, in modo da ottenere nel campo di visione della camera sul software un ottimo contrasto dell'immagine, così da avere differenze notevoli dei toni di grigio tra un pixel e quello adiacente e un'ottima visione del pattern stocastico, in modo che la dimensione del pattern sia coerente con la misura del pixel.

Inoltre la copertura tra vernice bianca e nera deve avere un rapporto di circa 50/50.

Una volta fatto questo, si procede posizionando il calibration target davanti al provino e si fa in modo che il software sia in grado di riconoscere gli spigoli dei quadrati dei componenti della scacchiera, che in tal caso verranno cerchiati di verde, ad indicare che un numero sufficiente di spigoli sono stati trovati; inoltre l'orientazione del calibration target è riconosciuta da tre cerchi aggiuntivi nel centro del pattern.

Qualora il software riesca a determinare l'orientazione, una freccia blu è disegnata nell'immagine live dal cerchio centrale al cerchio del quadrato vicino e tale freccia è quella che indica l'asse x nel sistema di riferimento della calibrazione. Pertanto l'asse perpendicolare a questo sarà l'asse y nello stesso sistema di riferimento.

Pertanto se il software riesce a vedere un numero sufficiente di spigoli del calibration target, gli spigoli saranno cerchiati di verde, altrimenti di rosso, ad indicare che è stato

trovato il sistema di coordinate del calibration target, ma non un numero sufficiente di spigoli, oppure i cerchi saranno blu, ad indicare che non è stato trovato neanche il sistema di coordinate (vedere figura 4.3); si sottolinea che la calibrazione può essere effettuata solamente se i cerchi sono verdi, cioè sono state trovate sia le coordinate del sistema, che un numero sufficiente di spigoli.

Green: Sufficient number of comers are detected	
Red: The coordinate system is detected but not enough comers	
Blue: The coordinate system can not be detected	

Figura 4.3: Indicazione degli spigoli trovati durante la calibrazione on-line

Per la ricerca degli spigoli, in un primo step le immagini sono trasformate in binarie; qualora si abbia un calibration target con black background (cioè sfondo nero) e white foreground (colore di primo piano), si ha che il conteggio dei pixel inizia dal massimo al minimo valore di grigio, invece se il foreground è nero si ha l'esatto opposto. C'è da sottolineare che il conteggio inizia sempre dal lato del colore di primo piano.

Pertanto al software andrà data la massima frazione di pixel totale che sarà in primo piano e la minima frazione di pixel che farà da sfondo (nel nostro caso nero) ed anche la posizione del threshold, che farà da separatore tra pixel bianchi e neri (vedere figura 4.4).

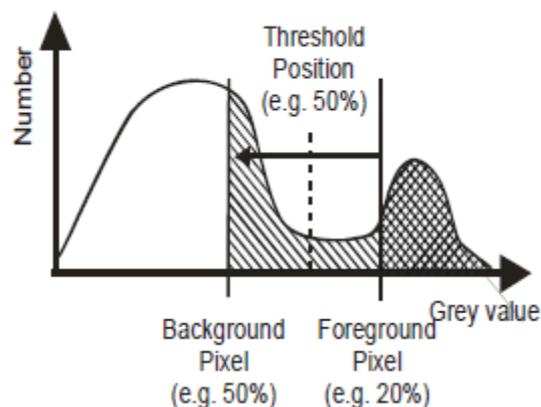


Figura 4.4 : Istogramma per il calcolo del threshold nel software

Per far sì che nel piano immagine della telecamera venga osservato un dato punto dell'oggetto, si deve far in modo di avere la trasformazione delle coordinate del punto

oggetto  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)^T$  nel sistema di coordinate della camera  $p_i(u_i, v_i)^T$ , come mostrato in figura 4.5.

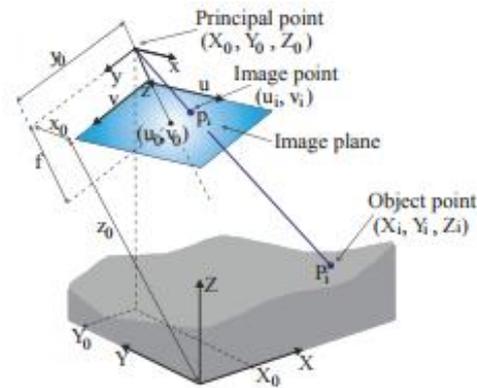


Figura 4.5 : Punto di vista dell'oggetto nel modello di camera Obscura [33]

Pertanto si ha che considerando lo spazio proiettivo, si può avere l'espansione dei due vettori precedenti rispettivamente con  $P'=[X, Y, Z, 1]$  e  $p'=[u, v, 1]$  e la relazione tra il punto  $P'$  nello spazio 3D e  $p'$  in quello 2D del piano immagine è data da:

$$s \cdot p' = A \cdot [R \ t] \cdot P',$$

dove  $R$  è la matrice di rotazione,  $t=[t_x, t_y, t_z]^T$  è il vettore spostamento e tali elementi sono conosciuti come i parametri estrinseci della telecamera che indicano la rotazione e la traslazione che mette in relazione rispettivamente i sistemi di coordinate globale e della telecamera;  $s$  è una costante opzionale e  $A$  è la matrice dei parametri intrinseci:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  rappresentano le coordinate della lunghezza focale espressa in pixel orizzontali ed in pixel verticali,  $u_0$  e  $v_0$  sono le coordinate del punto principale e  $\gamma$  è l'angolo di skew, che rappresenta la distorsione della vista di entrambi gli assi del sistema di riferimento.

Per avere modello di proiezione con una maggiore accuratezza, bisogna prendere in considerazione anche la distorsione sistematica, che sono date per lo più dalla scarsa qualità delle lenti, soprattutto nel caso di lenti a focale corta e a basso costo.

Il fenomeno più significativo è quello della distorsione radiale, che riguarda la curvatura delle lenti; poi si hanno anche gli effetti dovuti alle distorsioni tangenziali, che riguardano il decentramento dei componenti di un sistema delle lenti.

Tali distorsioni vengono trattati tramite una relazione non lineare tra i punti che sono osservati sul piano dell'immagine:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = L(r) \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d\tilde{x} \\ d\tilde{y} \end{pmatrix}$$

dove  $r$  è la distanza dal centro di distorsione  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$ , pari a:

$$r = \sqrt{(\tilde{x} - \tilde{x}_c)^2 + (\tilde{y} - \tilde{y}_c)^2}$$

$L(r)$  è denominata funzione di distorsione radiale ed è definita solo per  $r$  positivi.

Tale funzione viene approssimata tramite lo sviluppo di Taylor, che si può avere fino all' $n$ -esimo ordine, a seconda dell'accuratezza che si vuole raggiungere:

$$L(r) = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots$$

Per quanto riguarda il vettore di distorsione tangenziale, esso viene approssimato con:

$$\begin{pmatrix} d\tilde{x} \\ d\tilde{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2p_1 \tilde{x}\tilde{y} + p_2 (r^2 + 2\tilde{x}^2) \\ p_1 (r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2p_2 \tilde{x}\tilde{y} \end{pmatrix}$$

Si ha che i coefficienti per la correzione della distorsione radiale  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , con il centro di distorsione radiale  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  e i coefficienti di distorsione tangenziale  $p_1$  e  $p_2$  si aggregano all'insieme dei parametri intrinseci che si ha in un modello di telecamera [32].

Pertanto con l'operazione di calibrazione vengono calcolati i valori dei parametri intrinseci ed estrinseci della camera, come la distanza focale della lente, la distorsione radiale e tangenziale della lente, la messa a fuoco, nonché i vettori di rotazione e spostamento.

In seguito alle dimensioni dell'oggetto da considerare si andrà a scegliere il calibration target più opportuno. Nel nostro caso inizialmente il primario di calibrazione scelto è stata una griglia 9x9 su sfondo nero con dimensione dei lati dei quadrati pari a 4 mm, realizzata attraverso "Autocad", fatta stampare in una copisteria in modo che fosse contornata da uno sfondo opaco, per renderla il più possibile immune ai riflessi dell'illuminazione, come mostrato in figura 4.6.



Figura 4.6: Foto calibratore opaco da 4mm utilizzato in laboratorio

In seguito si è andati a misurare attraverso un microscopio l'effettiva lunghezza dei quadratini nel calibratore, per vedere gli effetti che ha dato la stampa di un pezzo realizzato su Autocad e si è calcolato l'errore medio.

Si è calcolata la lunghezza di ogni quadratino sia nero, che bianco in direzione orizzontale e verticale, che idealmente dovrebbe essere di 4 millimetri; si è visto che a causa della stampa, non vi erano dei veri e propri nodi, ma i quadratini neri risultavano sempre più grandi di quelli bianchi, arrivando a calcolare un errore medio pari al 2%.

Questo faceva sì che nel momento della calibrazione della camera con tale calibration target, non si poteva arrivare ad uno zoom elevato della fotocamera, in quanto poi essa non avrebbe più riconosciuto i nodi della scacchiera come tali.

Con tale calibratore sono state realizzate le prime prove di messa a punto del sistema, utilizzando dei campioni di polietilene, in modo da vedere come rispondeva il sistema e se vi era una buona stima degli spostamenti e delle deformazioni calcolate dal software con quelle calcolate dalla macchina tensile attraverso il moto del pistone per la traslazione e di un opportuno estensimetro MTS per la deformazione.

## 4.6 Il pattern

Il pattern è stato realizzato sulla superficie di ogni campione mediante spray commerciali bianchi e neri a lacche opache, facendo prima uno sfondo (bianco o nero, a seconda del target utilizzato nell'operazione di calibrazione) e poi cercando di spruzzare nel modo più casuale possibile il restante spray non utilizzato nello sfondo, cercando di dare il maggior contrasto possibile ed evitando zone di accumulo dello spray spruzzato sopra lo sfondo, in quanto si è visto che in tali zone il software non riesce a riconoscere le facets.

In figura 4.7 sono mostrati gli spray commerciali utilizzati in questa delicata operazione.



Figura 4.7: Spray commerciale utilizzato per la realizzazione del pattern

#### **4.7 Il gain, lo shutter time e la distorsione ottica**

Il gain rappresenta l'amplificazione del segnale in uscita dal sensore e si ha che più esso aumenta e più vi è la capacità di avere delle buone immagini in zone che non risultano molto illuminate.

Tendenzialmente si ha che più aumenta il guadagno e maggiore è il rumore digitale che si ha nelle immagini ed è per questo che i sensori fanno in modo di mantenere tale parametro a valori bassi.

Lo shutter time è proporzionale alla quantità di luce che passa nel sistema ottico nell'unità di tempo; pertanto se il valore di shutter time è molto alto, l'esposizione è molto alta e si avrà che l'immagine risulterà troppo chiara.

Inoltre un'altra problematica è fornita dalla distorsione delle lenti, in quanto essa per lo più influenza la forma degli oggetti che si stanno fotografando e solitamente si viene ad avere che per lunghezze focali minori si hanno distorsioni a botte, mentre per quelle più grandi vengono ad aversi le cosiddette distorsioni a cuscino.

Quest'ultimo problema può essere ridotto notevolmente effettuando una buona calibrazione.[4]

## 4.8 Prove sperimentali preliminari di traslazione

Come inizio si sono decise di fare prove di traslazione per vedere l'errore percentuale che vi era tra il calcolo dello spostamento effettuato dalla DIC e quello effettivo dato dalla traslazione del pistone della macchina.

E' stato preso un campione di polietilene, in cui è stato realizzato il pattern stocastico sulla superficie, è stato inserito tra gli afferraggi della macchina; in questa prima prova è stata inserita una sorgente di luce su un fianco del provino, in quanto in questo modo si era riuscito ad avere la calibrazione.

La scelta del gain, dello shutter time e delle condizioni di illuminazione più opportune è stata variata di volta in volta anche a seconda dell'illuminazione proveniente dall'esterno, in quanto il laboratorio era dotato di una grande finestra, la cui illuminazione esterna non poteva essere schermata.

Pertanto in questa prima prova si sono variati i sopracitati parametri in modo che il calibratore riuscisse a riconoscere i nodi del calibration target, che in queste prime prove era quello con diametro del quadrato di 4mm realizzato su Autocad.

Per eseguire una buona calibrazione si mette la fotocamera alla distanza che si vuole dal calibration target, poi si mette il campione, si regola lo zoom, la messa a fuoco e le condizioni di illuminazione in modo da avere un'ottima visione del campione da parte del software. In seguito si toglie il campione ed alla stessa distanza dalla fotocamera si mette il calibration target, variando i parametri dello shutter time in modo da avere che il software riesca a riconoscere i nodi della scacchiera utilizzata. Si è utilizzata la funzione "Autogain" del software, in modo che il software vari il gain in maniera automatica, come consigliato sul manuale "ISTRA 4D".

Un volta che il software riesce a riconoscere gli spigoli dei quadratini della paletta di calibrazione, essi si colorano di verde, come mostrato in figura 4.8, e pertanto viene iniziata l'operazione di calibrazione premendo il pulsante apposito sul software, che fa iniziare l'acquisizione automatica delle immagini della scacchiera.

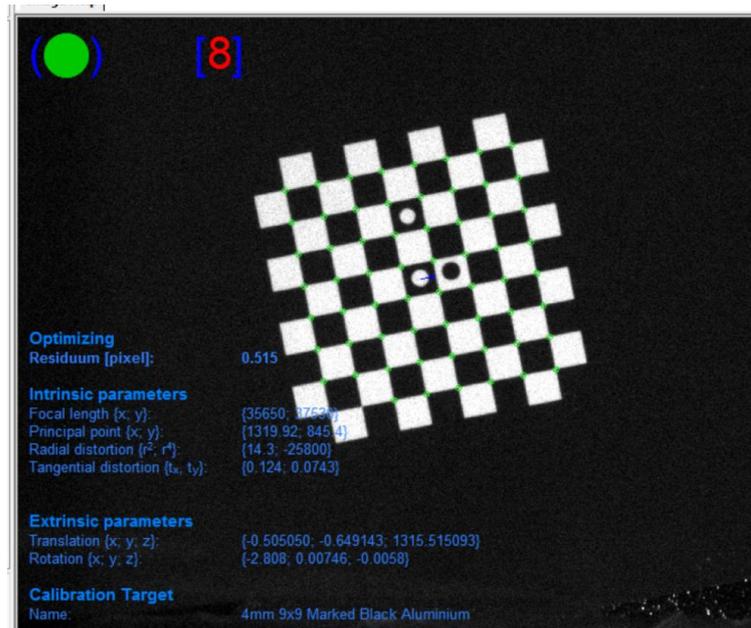


Figura 4.8 : Immagine durante l'operazione di calibrazione

La prima foto che il software fa durante l'operazione di calibrazione è quella identifica i sistemi di riferimento, dove come direzione dell'asse x viene presa quella tra il pallino bianco e il pallino nero al centro del calibration target e l'asse y è quello perpendicolare ad esso.

In seguito il calibration target viene inclinato in varie posizioni e vengono acquisite altre immagini; si è visto che una buona calibrazione si ottiene dopo circa 8 foto.

In questa prima prove con il calibratore di 4mm si è sempre avuto un valore di residuum superiore anche se di poco a 0.5, che è stato ritenuto accettabile.

Nella prima prova di traslazione, si è utilizzata la calibrazione che aveva un residuum di 0.536; in seguito si è reinserito il campione tra gli afferraggi e si è scelta una regione d'interesse ROI in modo da prendere solo la superficie del campione.

In seguito è stato regolato il software che governa la macchina di trazione in modo da far spostare il cilindro di 10mm.

Sono state realizzate 10 foto con una frequenza di acquisizione pari a 0.1 Hz.

In figura 4.9 sono riportati gli andamenti degli spostamenti calcolati dal DIC e quelli reali della macchina con un facet size utilizzato pari a 17 ed un grid spacing selezionato pari a 12:

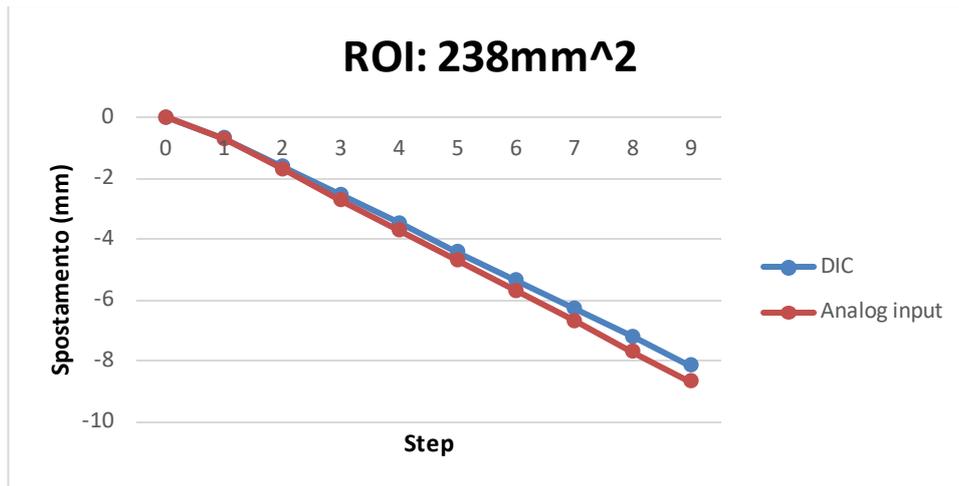


Figura 4.9 : Andamento dello spostamento calcolato con LVDT della macchina tensile e quella calcolata con il DIC

Pertanto in figura 4.10 è rappresentato l'andamento dell'errore percentuale, calcolato come la differenza tra il valore dato dall'LVDT e quello del DIC, il tutto diviso il valore calcolato dall'LVDT:

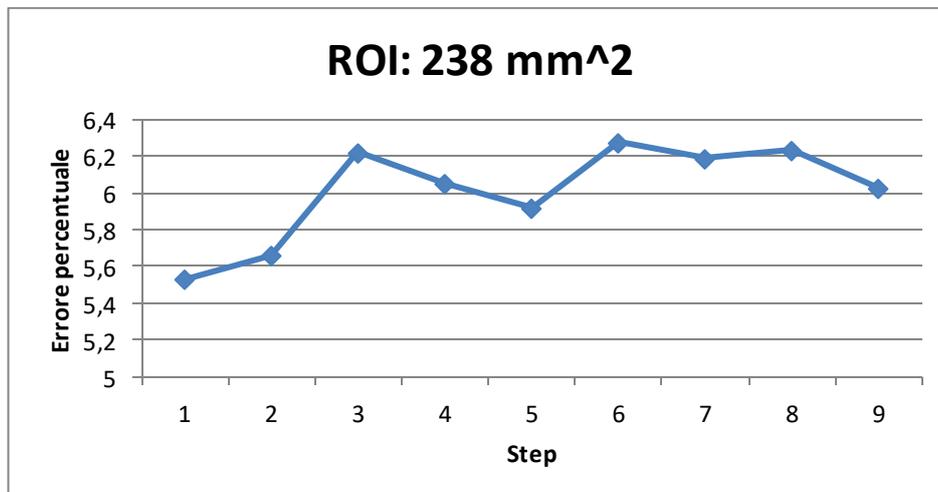


Figura 4.10 : Andamento dell'errore percentuale nella prima prova di traslazione

Si vede che l'errore percentuale si aggira intorno al 6%, in quanto, essendo una delle prime prove, vi erano ancora degli errori sperimentali dovuti alla non ottimizzazione del pattern.

La regione d'interesse è stata calcolata considerando un fattore di scala derivante dalle dimensioni reali del provino e quelle che apparivano nell'immagine del software. Pertanto con la moltiplicazione per il fattore di scala al quadrato sulle dimensioni visibili nell'immagine del software, si passa alle dimensioni reali del provino.

Inoltre non si prendono nell'immagine da considerare sul software i bordi del campione, per evitare gli effetti di bordo e si cercava di togliere il 10% sull'immagine.

Pertanto per il polietilene, che aveva una larghezza di 10mm, misurata con il calibro, si considerava una larghezza nella ROI di 9mm circa, che nell'immagine del software aveva una dimensione maggiore; pertanto si è reso necessario l'utilizzo dell'opportuno fattore di scala.

La prova è stata replicata, cercando di vedere se vi era qualche cambiamento le dimensioni della regione d'interesse, precisamente prendendo un punto e mantenendo costante il facet size e il grid spacing e sempre mantenendo l'interpolazione "spline bicubica".

In figura 4.11 e 4.12 si mostrano i risultati per un punto preso sulla superficie del campione:

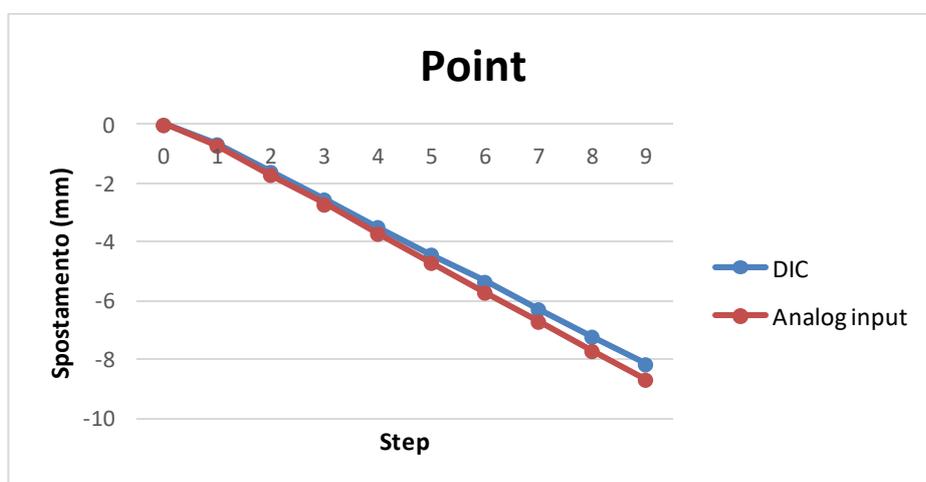


Figura 4.11 : Andamento DIC/Analog input per punto sulla superficie campione

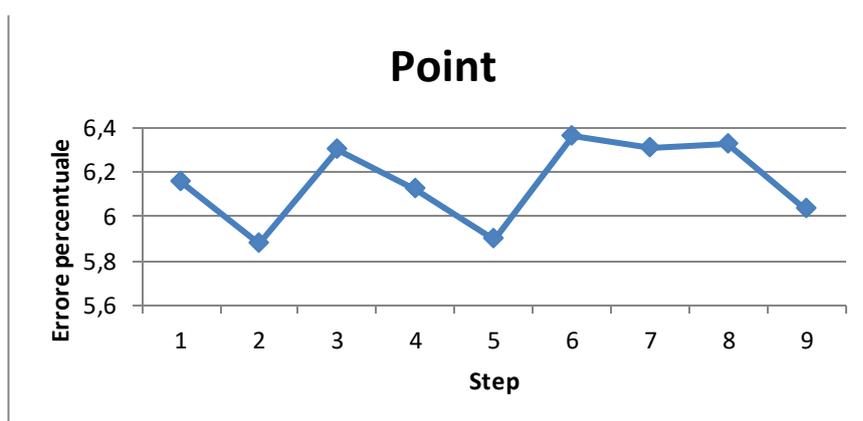


Figura 4.12: Errore percentuale per punto

Anche in tal caso si vede che l'errore percentuale si aggira sul 6%, non variando di molto rispetto a prima. In seguito è stata fatta un'altra prova facendo una traslazione solo di 1mm ed anche in questo caso si è visto l'errore percentuale; in figura 4.13 e 4.14 si

mostrano i grafici sempre utilizzando inizialmente un facet size di 17 e un grid spacing di 12, mediando su una ROI di 238mm<sup>2</sup>, che è decisamente più piccola rispetto all'area del calibratore pari a 1296mm<sup>2</sup>.

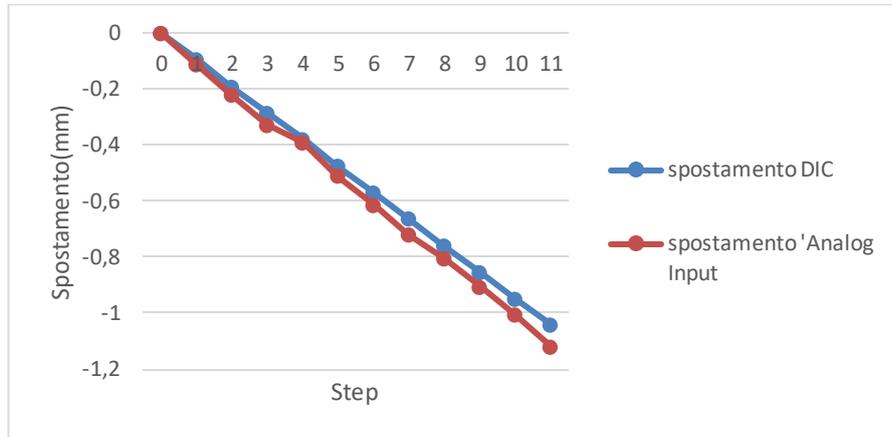


Figura 4.13 :Andamento DIC/Analog input nella prova di spostamento da 1 mm

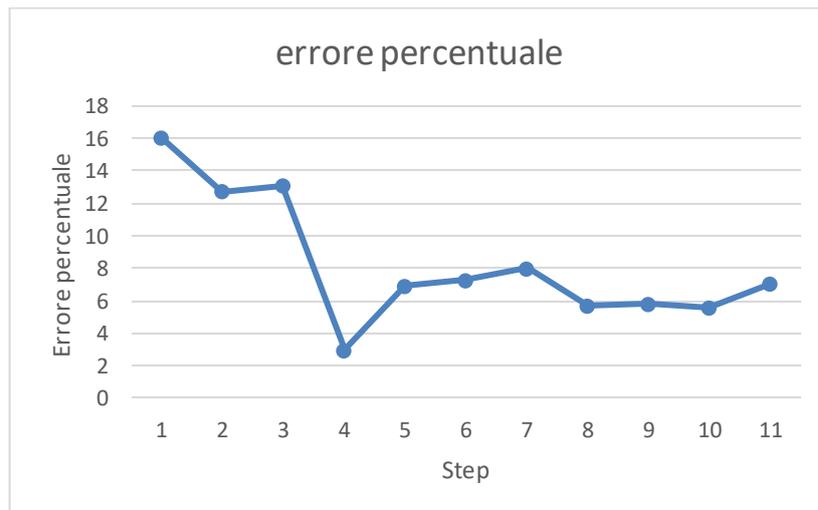


Figura 4.14 : Errore percentuale nella prova di spostamento da 1 mm

L'errore percentuale è stato calcolato come:

$$\text{Err\_perc} = (\text{spostamento analog input} - \text{spostamento DIC}) / \text{spostamento analog input}.$$

Si vede che inizialmente l'errore percentuale assume valori piuttosto elevati, dovuta ai primi valori molto piccoli di spostamento rilevati dall'analog input; si vede che dallo step 4 in poi l'errore si stabilizza sul 6%.

Anche in questo caso le prove sono state replicate per altri valori di facet size e grid spacing.

Nelle figure 4.15 ,4.16, 4.17 e 4.18 si riportano gli andamenti degli errori percentuali i risultati per un grid spacing pari a 12 ed un facet size pari, rispettivamente, a 23 e 31.

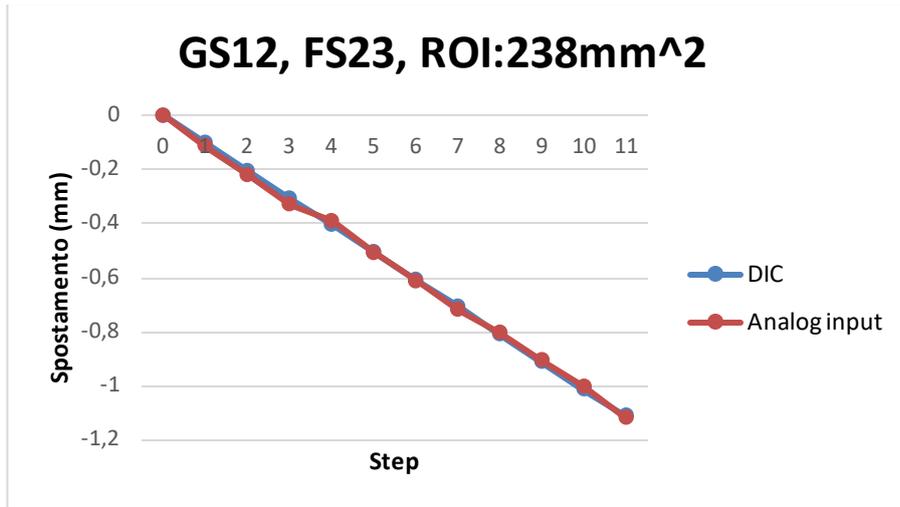


Figura 4.15: Spostamento DIC/Analog input per GS12, FS23

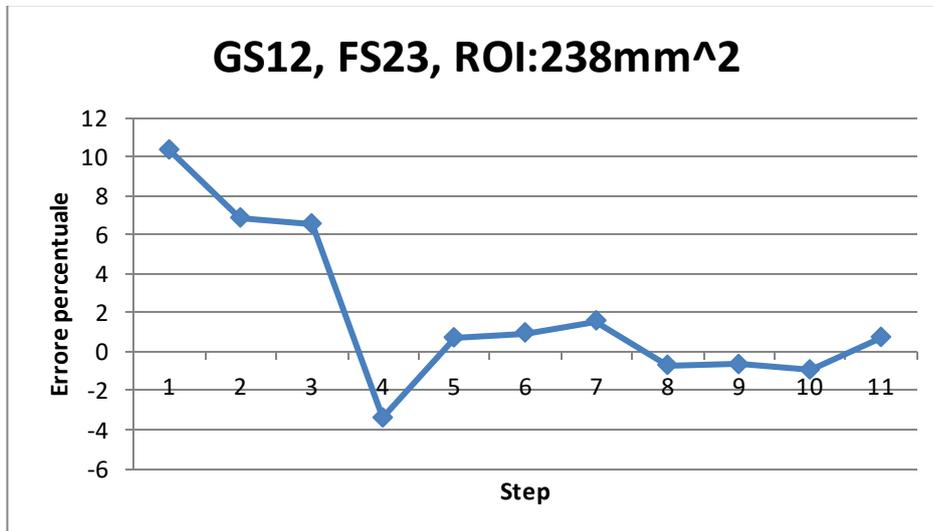


Figura 4.16: Errore percentuale spostamento DIC/Analog input GS12, FS23

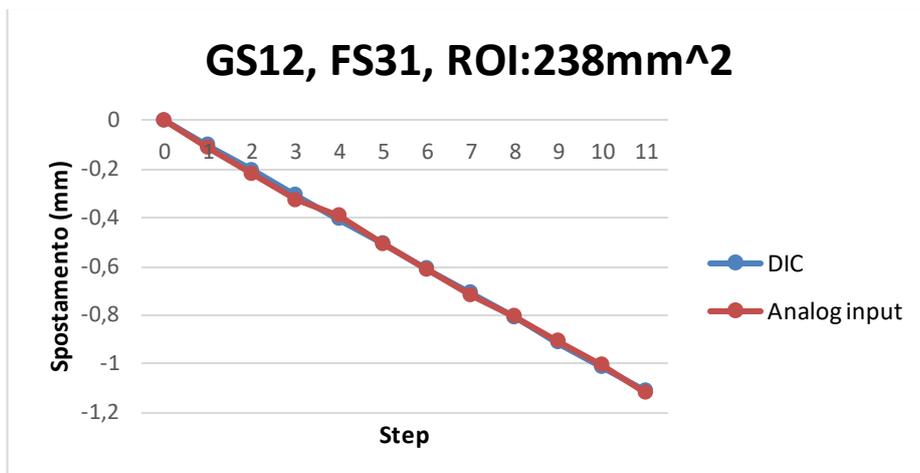


Figura 4.17: Andamento DIC/Analog input GS12, FS31

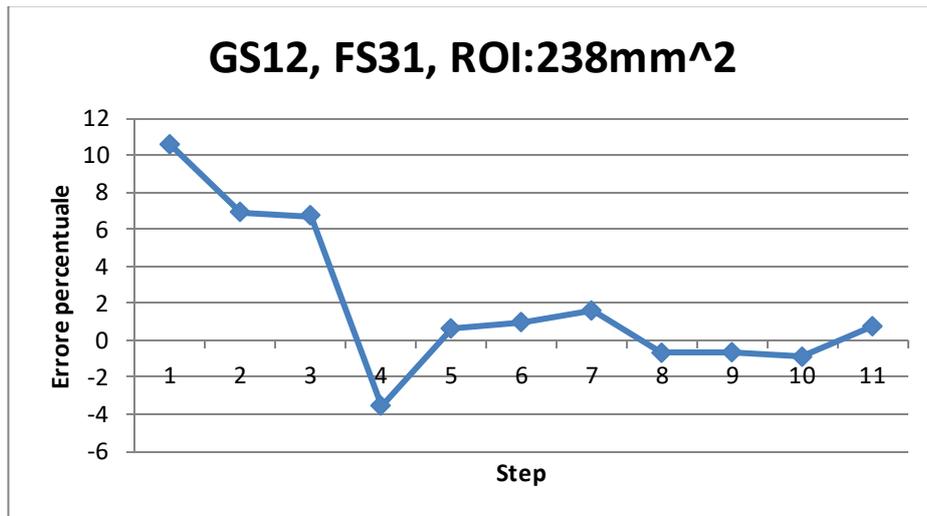


Figura 4.18: Errore percentuale GS12, FS31

Si riassumono i risultati di questa fase di messa a punto nella sottostante Tabella 4.1. In sintesi, nel caso dello spostamento del cilindro di 1 mm, si ha che aumentando il facet size diminuisce l'errore, anche se ci si può aspettare una qualche perdita di risoluzione, per ora non influente.

Prova	Area target (mm <sup>2</sup> )	Area ROI (mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	1296	238	12	17	Bicubica	6,14	Da step 4
Prova 2	1296	238	12	23	Bicubica	1,21	Da step 4
Prova 3	1296	238	12	31	Bicubica	1,22	Da step 4

Tabella 4.1: Dati spostamento 1 mm

## 4.9 Prove sperimentali preliminari di deformazione

In seguito si è voluto anche rilevare la precisione del software sui campi di deformazione; anche in questo caso è stato utilizzato inizialmente il calibration target da 4mm.

Anche in questo caso inizialmente è stato utilizzato il polietilene ad alta densità, anche qui con pattern stocastico realizzato attraverso spray con lacche opache con un primo strato nero e una seconda mano superiore bianca, in modo da cercare di avere un pattern bianco

e nero stocastico. Alla fine il rapporto di area fra le zone bianche e nere si deve avvicinare a circa 50 e 50.

Sul campione è stato montato un estensimetro MTS (vedere figura 4.19) per valutare la deformazione sul campione in modo da confrontarla con il campo di deformazioni calcolato con il software.



Figura 4.19: Estensimetro MTS utilizzato per il calcolo della deformazione

In questo caso sono state realizzate 22 foto sempre con una frequenza di 0.1 Hz, in modo da vedere come rispondeva il software con deformazioni che raggiungono il 4%.

La macchina tensile è stata impostata con una velocità di 0.02 mm/s, cioè in modo che il pistone si muovesse verso il basso con tale velocità.

In figura 4.20 e 4.21 vengono esposti i grafici; in questo caso si è utilizzato un facet size di 19 ed un grid spacing di 12, in quanto si è visto che forniva risultati più accurati:

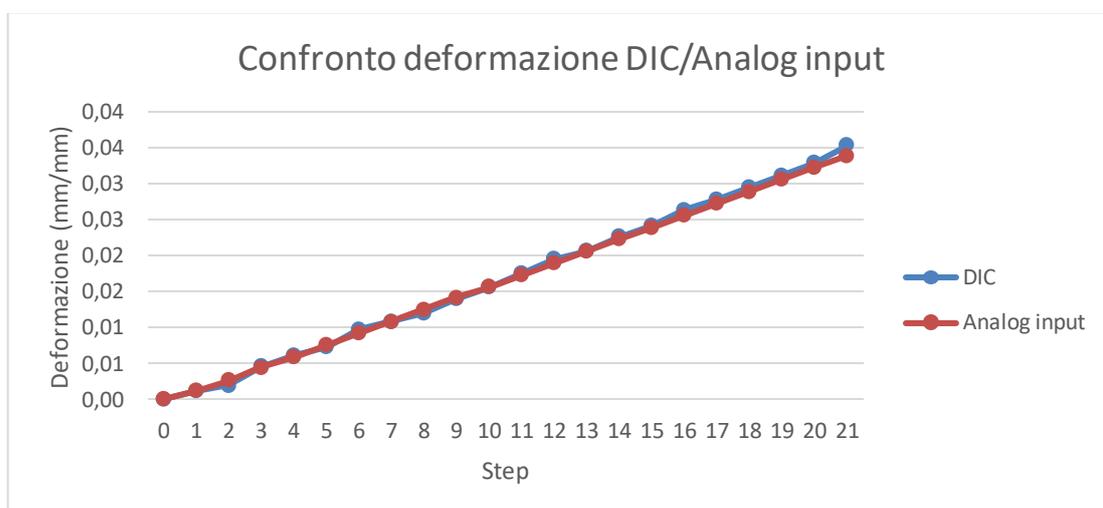


Figura 4.20 : Confronto deformazione DIC/Analog input

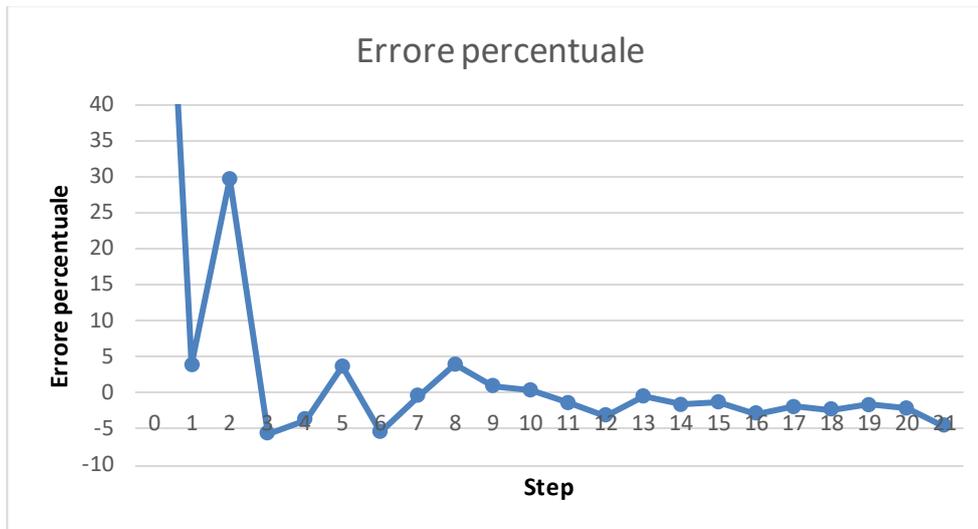


Figura 4.21 : Errore percentuale nella prova di deformazione

Si vede che nei primi step, l'errore percentuale è molto elevato, in quanto si ha che il rumore di fondo è molto simile alla deformazione, che a sua volta è molto piccola. Però, al passare degli step, si attenua a valori molto bassi, con un errore percentuale medio calcolato dallo step 3 in poi, pari al 2.32% .

In base alle condizioni del pattern, che essendo fatto a mano con spray, e pertanto non essendo mai perfettamente riproducibile in maniera immediata, si è visto che di volta in volta era meglio variare i valori del facet size e del grid spacing, in modo da avere dei risultati più precisi.

Si ha che sono state effettuate altre due prove, una provando a ridurre la dimensione del facet a 15x15 pixel<sup>2</sup> e mantenendo il grid spacing pari a 12, l'altra allargando la dimensione del facet a 31x31 pixel<sup>2</sup>.

Nelle figure 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 si riportano i risultati.

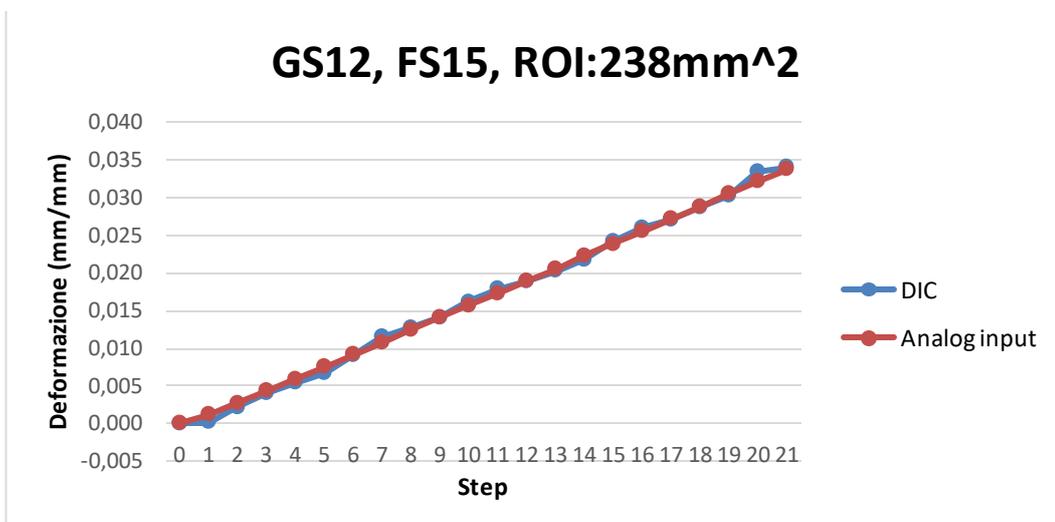


Figura 4.22 : Andamento DIC/Analog input GS12, FS15

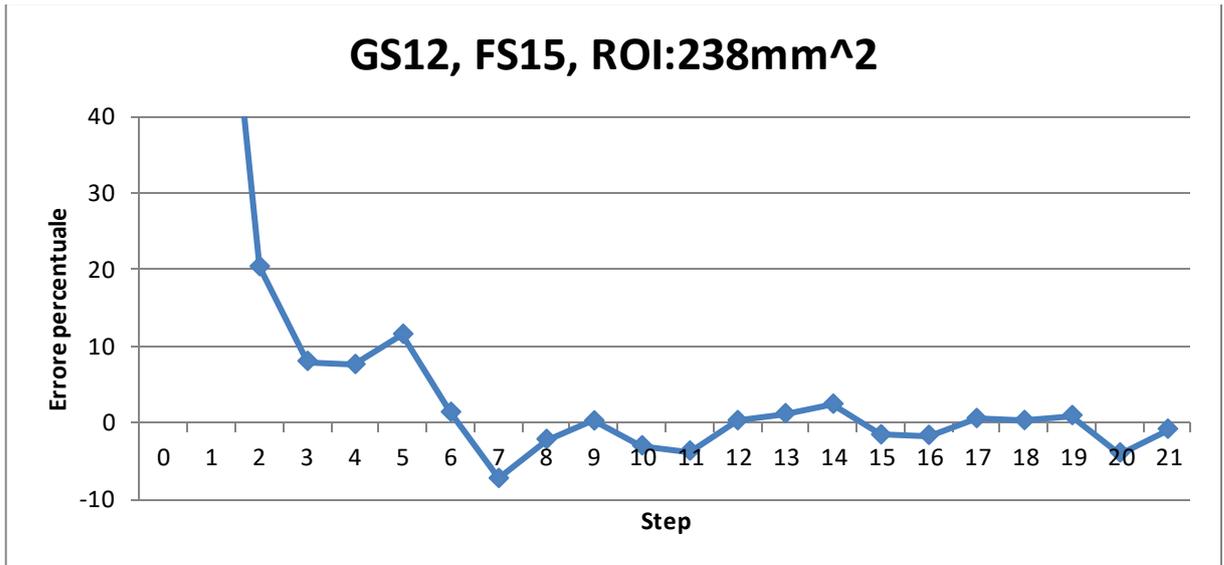


Figura 4.23 :Errore percentuale GS12, FS15

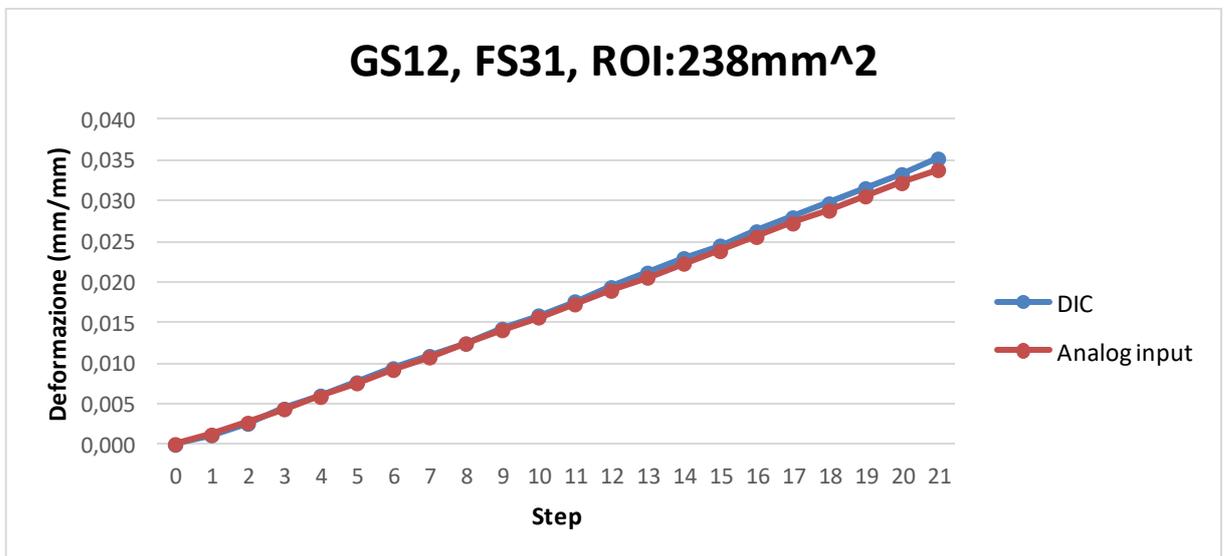


Figura 4.24: Andamento DIC/Analog input GS12, FS31

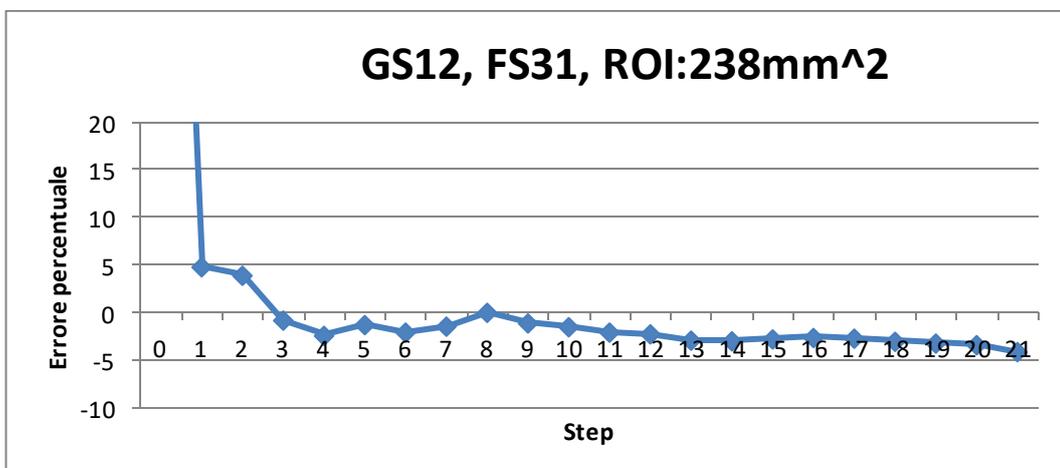


Figura 4.25 : Errore percentuale GS12, FS31

I dati esposti nei diagrammi precedenti possono essere sintetizzati nella Tabella 4.2. Dal suo esame si nota un generale miglioramento della precisione delle misure, che comincia ad essere di tutto rispetto, anche considerate le piccole deformazioni che sono state imposte al campione. Si può attribuire almeno parte del miglioramento ad un affinamento nella tecnica di produzione del pattern, che è risultato più fine e ben risolto, permettendo così di seguire meglio il campo degli spostamenti fisici del materiale.

Prova	Area target(mm <sup>2</sup> )	Area ROI(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	1296	238	12	19	Bicubica	2,32	da step 3
Prova 2	1296	238	12	15	Bicubica	3,08	da step 3
Prova 3	1296	238	12	31	Bicubica	2,25	da step 3

Tabella 4.2: Dati prima prova di deformazione

Ad esempio in una prova su un altro campione di polietilene, su cui è stato effettuato un altro pattern stocastico ed in altre condizioni di illuminazione, si ha che per avere un migliore fitting dei risultati del software, si è dovuto aumentare la dimensione del facet size, in quanto l'aumento di quest'ultimo causa la diminuzione degli errori random, come si deduce dai grafici sottostanti, in quanto si ha una dimensione del quadrato intorno al pixel maggiore, ma, inoltre, limita anche la risoluzione spaziale.

Nelle figure 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 sono riportati i risultati con il valore di grid spacing pari a 12 ed i valori di facet size pari rispettivamente a 19, 23 e 25 e con interpolazione bicubica dei livelli di grigio all'interno del facet; la ROI, calcolata con l'opportuna fattore di forma tra la dimensione reale e la dimensione nell'immagine del software, in questo caso è pari a 380mm<sup>2</sup>.

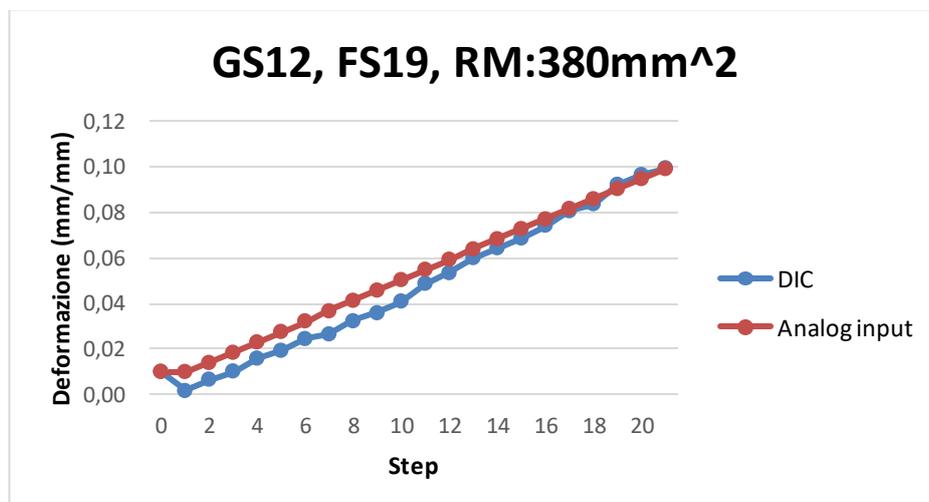


Figura 4.26: Andamento DIC/Analog input con grid spacing 12 e facet size 19

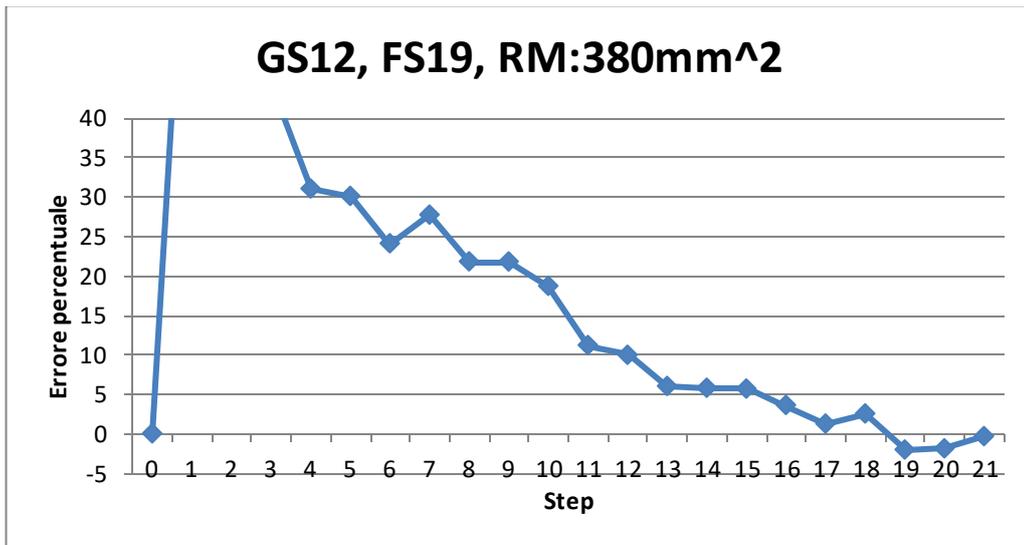


Figura 4.27 : Errore percentuale con grid spacing 12 e facet size 19

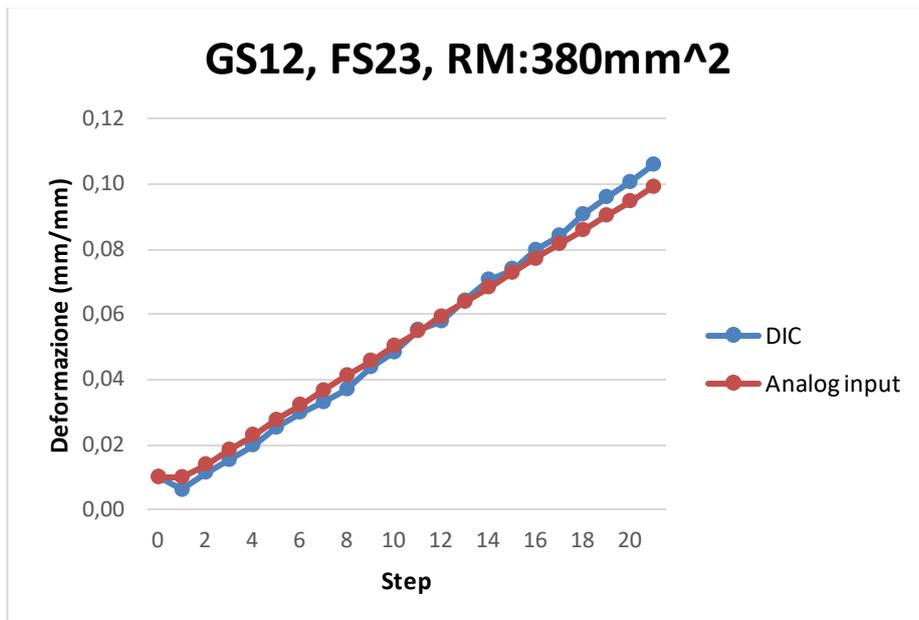


Figura 4.28 : Andamento DIC/Analog input con grid spacing 12 e facet size 23

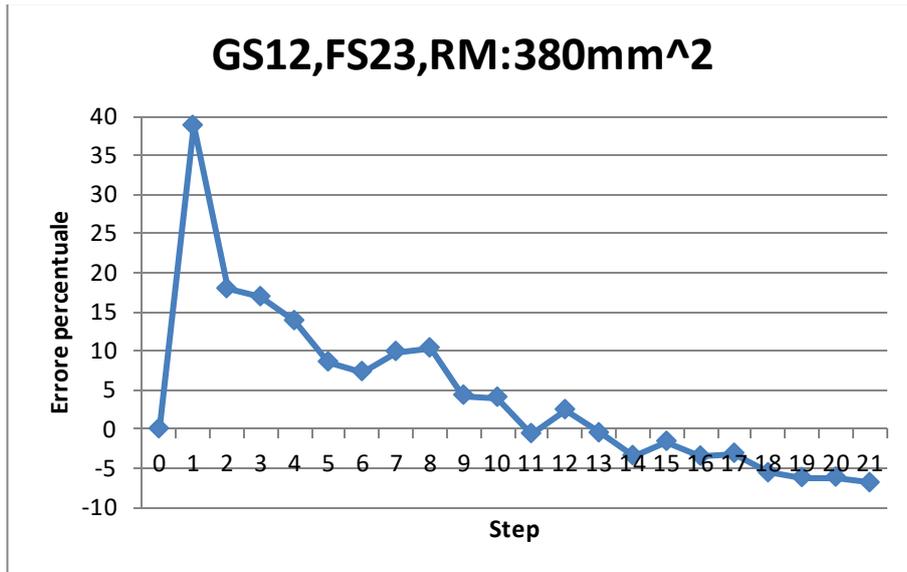


Figura 4.29 : Errore percentuale con grid spacing 12 e facet size 23

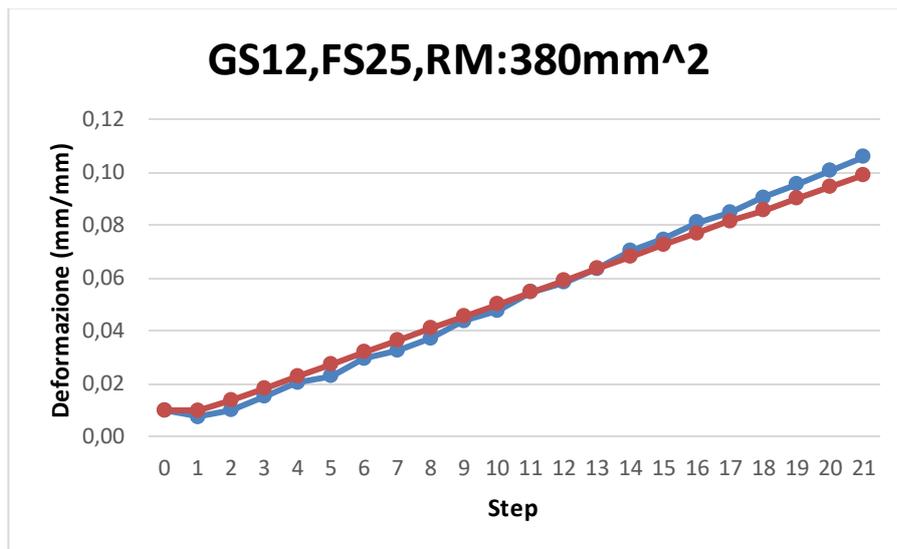


Figura 4.30 : Errore percentuale con grid spacing 12 e facet size 25

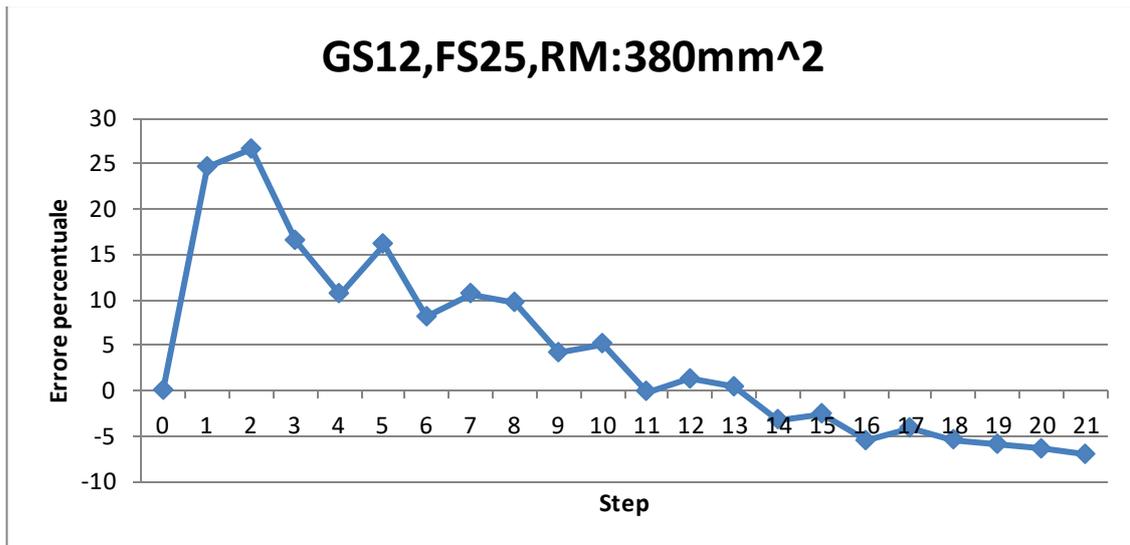


Figura 4.31 : Errore percentuale con grid spacing 12 e facet size 25

In questa prova si vede come la condizione con facet size pari a 19 e grid spacing pari a 12 non è la migliore scelta possibile, in quanto, come si deduce dal grafico 4.27, l'andamento dell'errore percentuale non si mantiene su dei valori sufficientemente bassi. Pertanto si è deciso di aumentare il valore della dimensione del facet prima ad un valore di 23x23 pixel<sup>2</sup> e poi a 25x25 pixel<sup>2</sup>, ottenendo una diminuzione dei valori di errore percentuale tra il valore dato dall'estensimetro e quello dato dal software.

Altre prove sono state realizzate diminuendo la regione di misura RM (che è un sottoinsieme della ROI) e vedendo che tipo di errori davano rispetto al valore mediato dato dall'estensimetro MTS; in queste prove si sono scelte regioni di misura RM molto piccole pari a, rispettivamente, 82mm<sup>2</sup>, 45mm<sup>2</sup> e 34mm<sup>2</sup>, mantenendo il valore di grid spacing pari a 12 ed il valore di facet size pari a 25x25 pixel<sup>2</sup>; nelle figure 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37 i risultati:

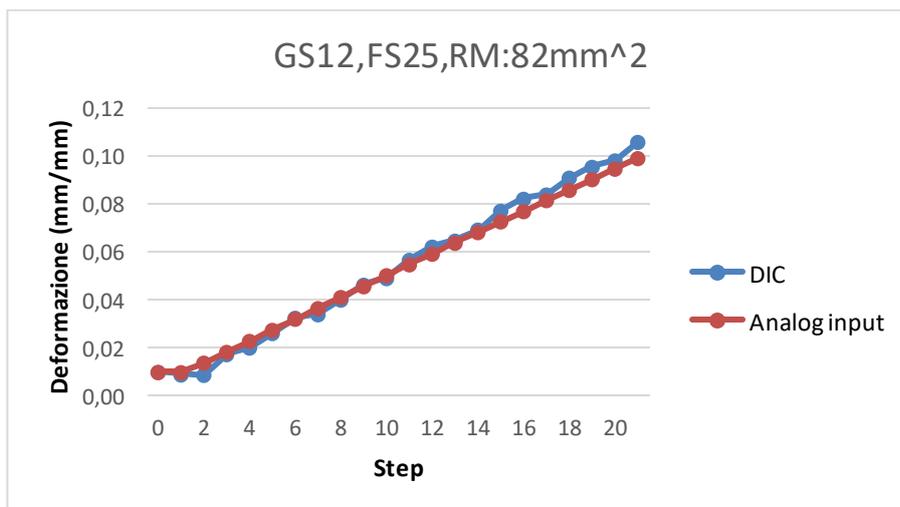


Figura 4.32: Andamento DIC/Analog input, GS12,FS25,RM:82mm<sup>2</sup>

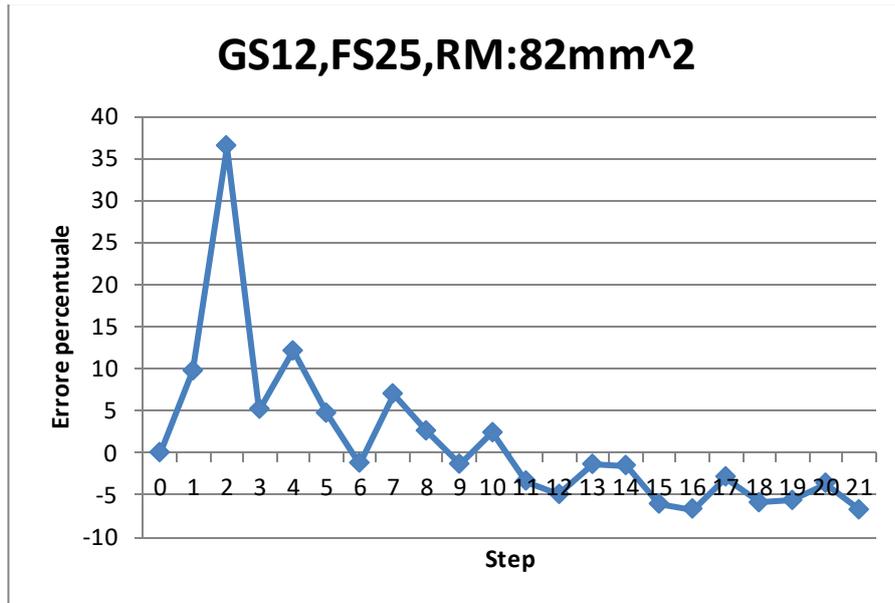


Figura 4.33: Errore percentuale GS12,FS25,RM:82mm<sup>2</sup>

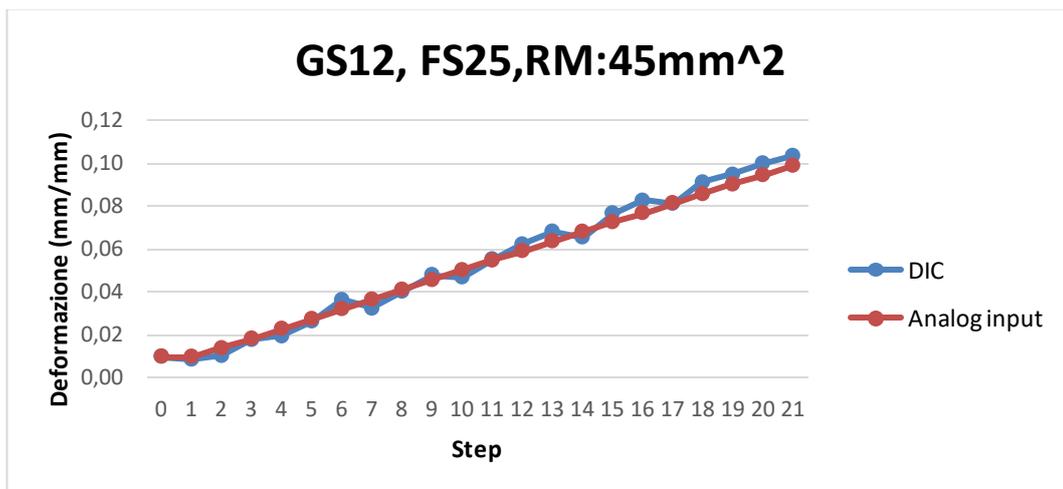


Figura 4.34: Andamento DIC/Analog input GS12, FS25, RM:45mm<sup>2</sup>

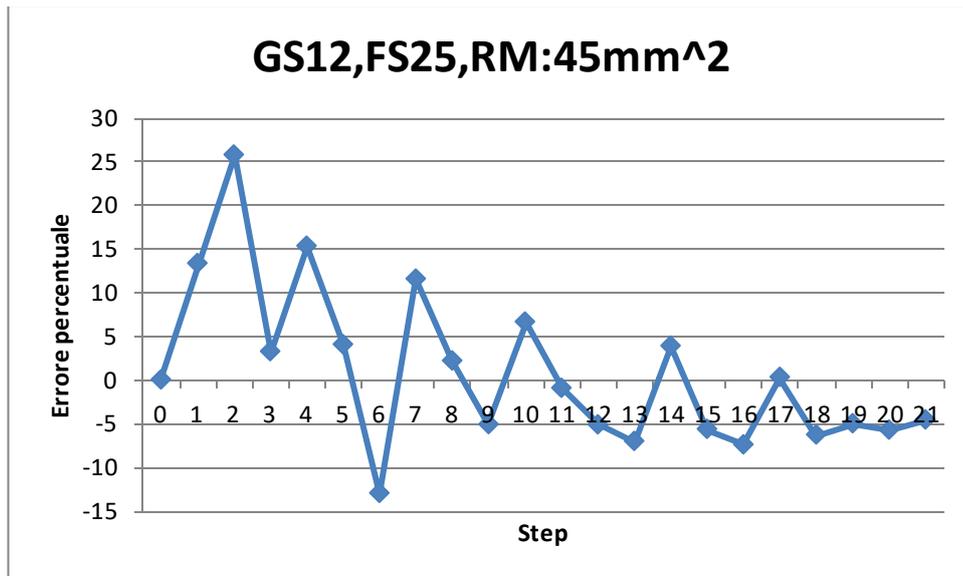


Figura 4.35: Errore percentuale GS12, FS25, RM:45mm<sup>2</sup>

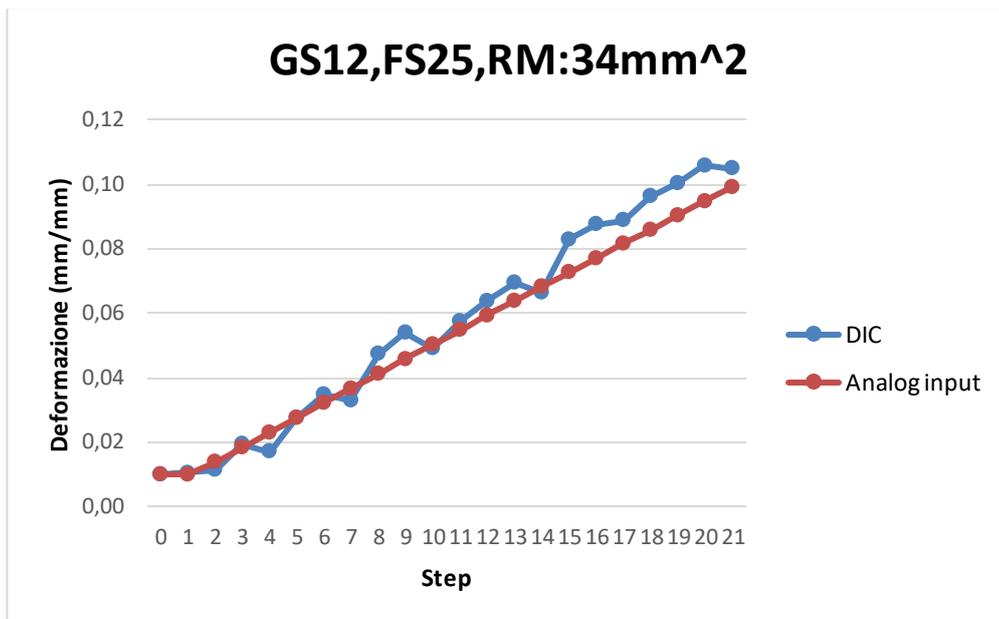


Figura 4.36: Andamento DIC/Analog input, GS12,FS25, RM:34mm<sup>2</sup>

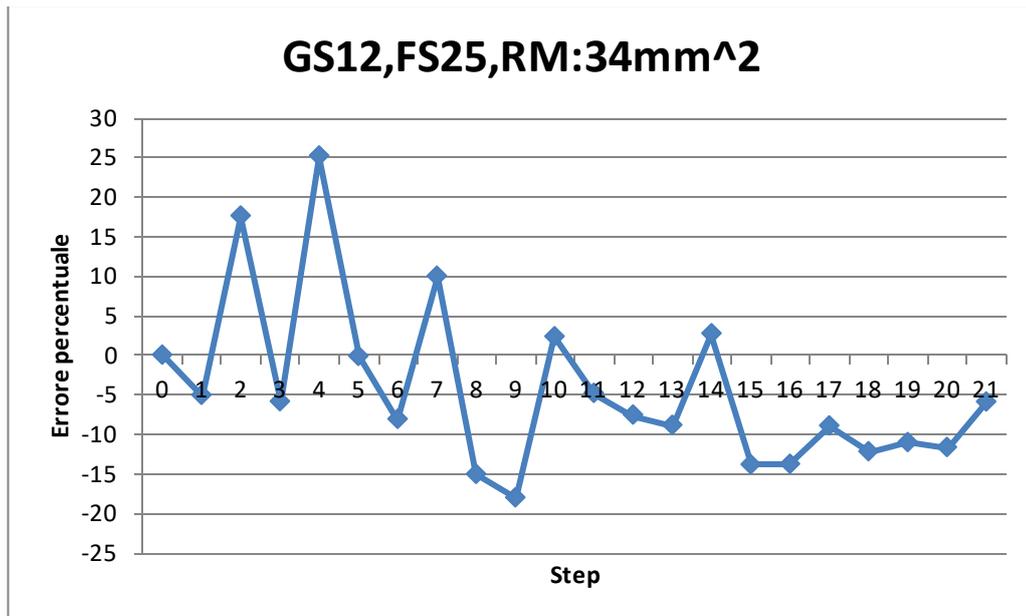


Figura 4.37:Errore percentuale GS12, FS25, RM:34mm<sup>2</sup>

I risultati dei diagrammi sopra esposti sono riassunti in tabella 4.3. Si può arguire che una diminuzione dell'area di misura comporta una dispersione dell'errore medio, perché ogni volta che si cambia RM si svolge la misura su un'area diversa da quelle precedenti, e quindi si risente dello stato locale del pattern.

Prova	Area target(mm <sup>2</sup> )	Area RM(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	1296	380	12	19	Bicubica	14,20	da step 3
Prova 2	1296	380	12	23	Bicubica	6,07	da step 3
Prova 3	1296	380	12	25	Bicubica	6,49	da step 3
Prova 4	1296	82	12	25	Bicubica	4,50	da step 3
Prova 5	1296	45	12	25	Bicubica	5,95	da step 3
Prova 6	1296	34	12	25	Bicubica	9,81	da step 3

Tabella 4.3: Dati de formazione

Si vede come per tale prova, si abbia un errore percentuale medio minore con facet size maggiori di 19 e questo può essere dovuto al fatto che aumentando la dimensione del subset si ha una perdita di risoluzione spaziale, ma anche una diminuzione della percentuale di errori casuali, come si vede dai grafici sottostanti 4.38, 4.39 e 4.40, che danno l'andamento della deviazione standard sulla de formazione  $\epsilon_y$ . I risultati della deviazione standard sono anche riassunti nella Tabella 4.4.

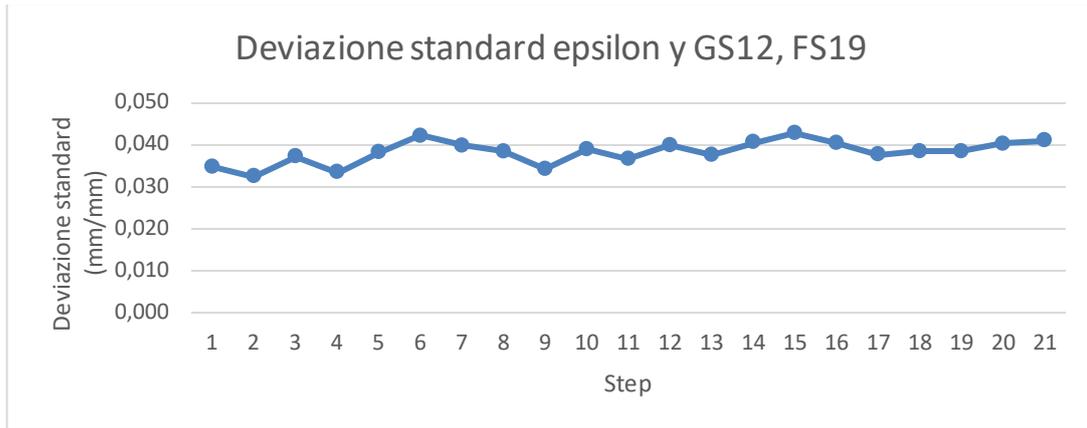


Figura 4.38 : Andamento deviazione standard della deformazione lungo y con GS12, FS19

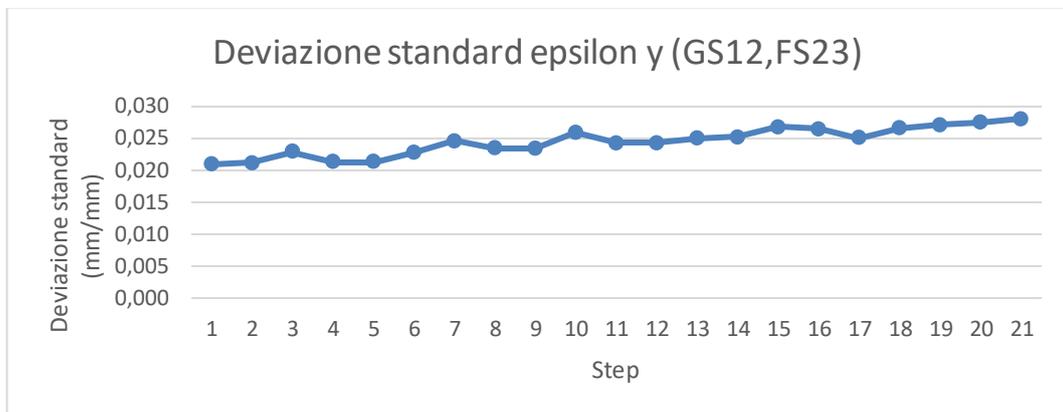


Figura 4.39 : Andamento deviazione standard della deformazione lungo y con GS12, FS23

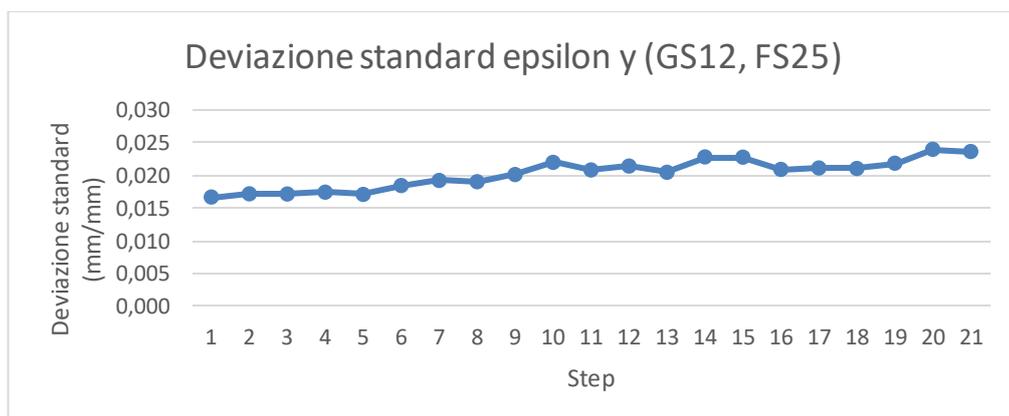


Figura 4.40 : Andamento della deviazione standard della deformazione lungo y con GS12, FS25

Prova	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Deviazione standard media
Prova 1	12	19	Bicubica	0,0402
Prova 2	12	23	Bicubica	0,0257
Prova 3	12	25	Bicubica	0,0213

Tabella 4.4: Dati deviazione standard

## 4.10 Prove preliminari di contrazione

In seguito sono state effettuate delle prove preliminari per valutare la bontà del calcolo della contrazione laterale con il software, vedendo la differenza che viene ad aversi con la misura della contrazione attraverso un estensimetro trasversale applicato tra i lati del campione



Figura 4.41 : Estensimetro MTS utilizzato per il calcolo della contrazione sul campione

Anche in questo caso, in base alle condizioni di illuminazione esterne, si sono scelti i valori di gain e shutter time opportuni, affinché il software riconoscesse i nodi della scacchiera di calibrazione, scegliendo l'opportuna distanza focale e l'opportuno zoom della camera.

Sono state realizzate 22 foto con la frequenza di 0.1 Hz e i valori forniti dall'estensimetro, che sono analogici, vengono digitalizzati ed arrivano al computer tramite il dispositivo DAQ.

Si ha che per il calcolo della contrazione, si è considerato il campo di deformazioni costante nella regione di interesse considerata, in quanto, il polietilene, essendo un materiale amorfo, è stato considerato come un materiale omogeneo e isotropo.

Pertanto per il calcolo di  $\Delta l$  dato dal DIC, si considera la deformazione lungo l'asse  $x$ ,  $\varepsilon_x$  e la si moltiplica per la larghezza iniziale  $l_0$  del provino in condizioni di riposo, che è stata calcolata con un calibro ed è risultata pari a 10.2 mm. Pertanto:

$$\Delta l = \varepsilon_x \times l_0$$

Per quanto riguarda i valori dati dall'estensimetro, si è fatta la differenza tra i valori in ogni step con il valore dello step di riferimento, cambiandolo opportunamente di segno, per poterla confrontare con i valori dati dal DIC.

Anche in questo caso i calcoli sono stati fatti mediando su tutta l'area scelta attraverso la regione di interesse.

Nelle figure 4.42 e 4.43 si espongono gli andamenti considerando un grid spacing di 12 ed un facet size di 19 ed interpolazione bicubica, con regione d'interesse  $336\text{mm}^2$ :

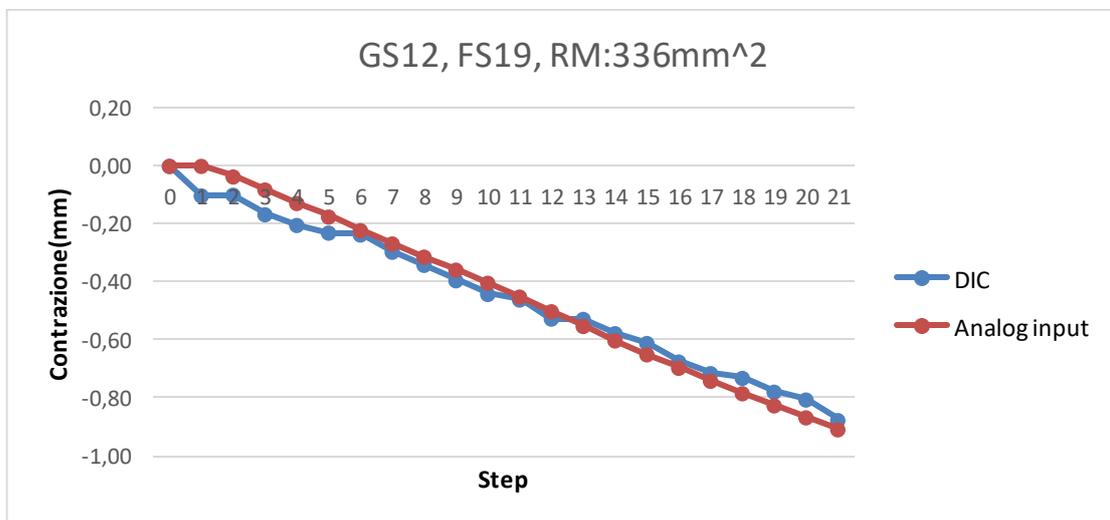


Figura 4.42 : Andamento della contrazione con FS19 e GS12

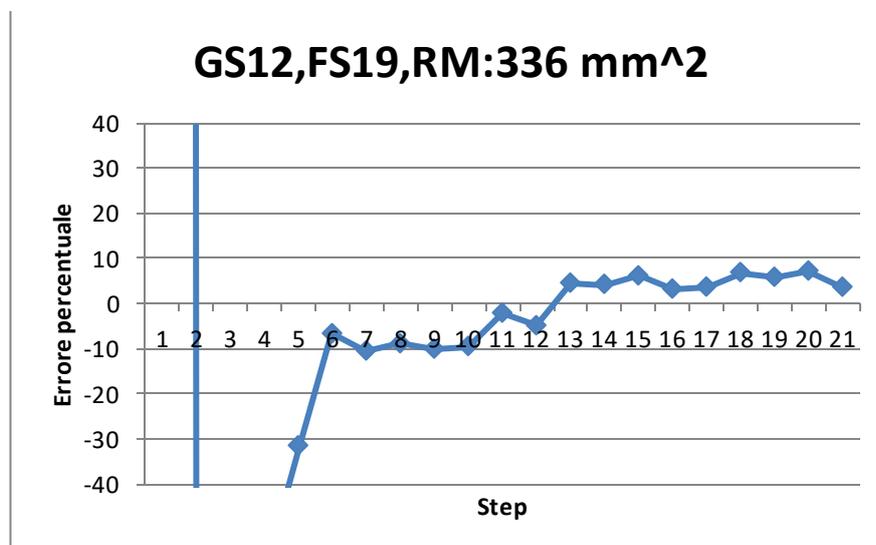


Figura 4.43 : Errore percentuale sulla prova di contrazione con GS12, FS19

Anche in tal caso si è visto che prendendo una regione d'interesse più piccola gli errori tra i parametri dati dal software e quelli dati dall'estensimetro trasversale aumentano, come mostrato nelle figure 4.44 e 4.45 :

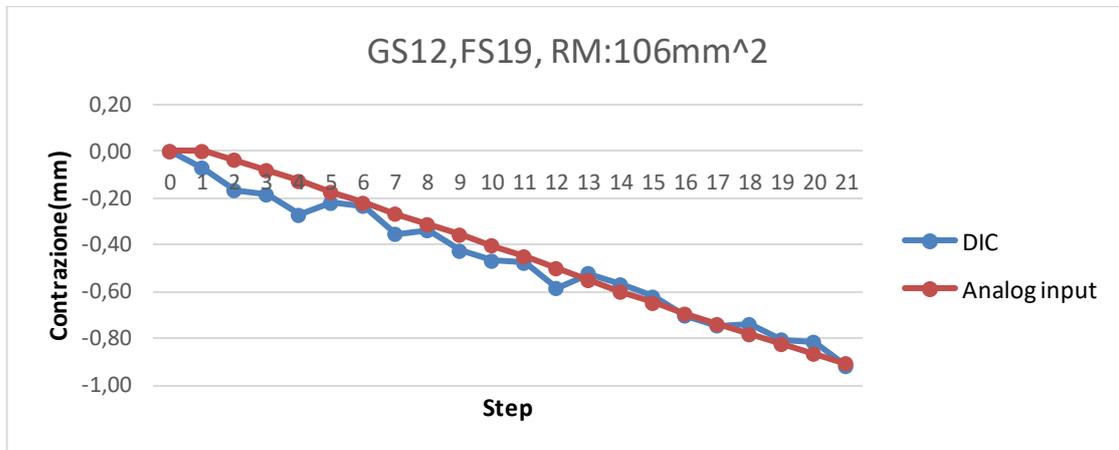


Figura 4.44 : Andamento DIC/Analog input con GS12, FS 19 e RM pari a  $106\text{mm}^2$

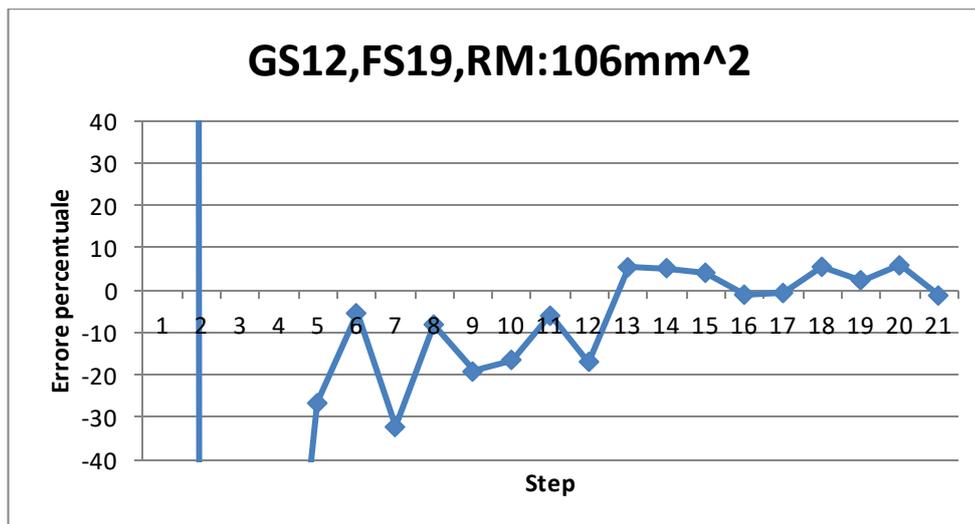


Figura 4.45 : Errore percentuale nella prova di contrazione con RM pari a  $106\text{mm}^2$

Un'altra prova è stata effettuata con regione di misura pari a  $336\text{mm}^2$ , provando ad aumentare la dimensione del facet size, mantenendo costanti gli altri parametri (risultati in figura 4.46 e 4.47):

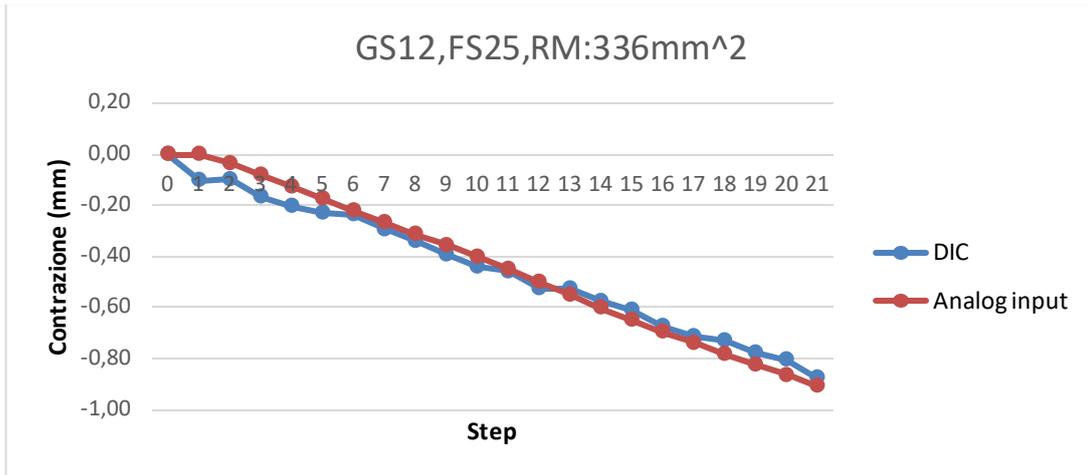


Figura 4.46: Andamento contrazione DIC/Analog input GS12,FS25,RM:336mm<sup>2</sup>

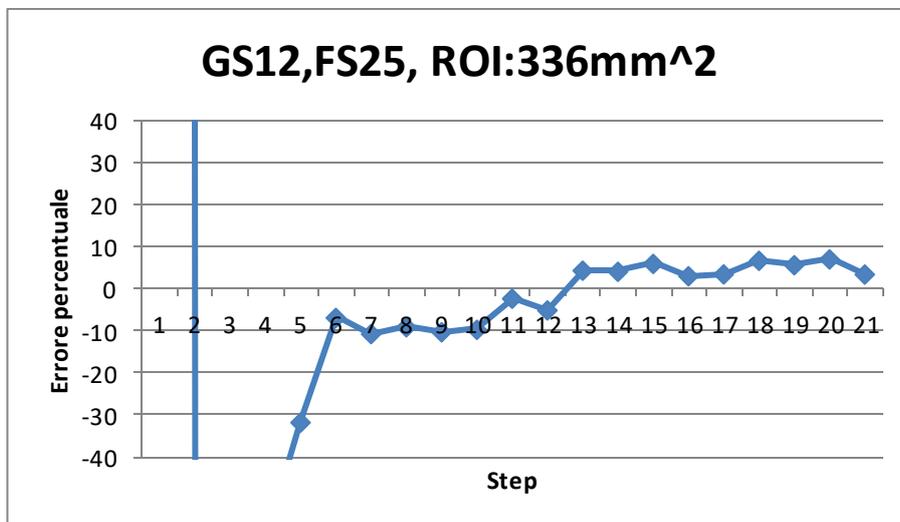


Figura 4.47: Errore percentuale nella prova di contrazione con RM pari a 336mm<sup>2</sup>, GS12 e FS25

I risultati dei diagrammi sopra esposti sono riassunti nella Tabella 4.5, dove si vede che gli errori di misura si mantengono sufficientemente piccoli e si può giudicare il sistema di misura affidabile.

Prova	Area target(mm <sup>2</sup> )	Area RM(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	1296	336	12	19	Bicubica	6,11	da step 6
Prova 2	1296	106	12	19	Bicubica	8,50	da step 6
Prova 3	1296	336	12	25	Bicubica	6,11	da step 6

Tabella 4.5: Dati contrazione

Ragionando ora sul fatto che i campioni in lega di alluminio una larghezza molto piccola, dell'ordine di 6mm, per avere una migliore accuratezza dei risultati si è deciso di comperare un calibratore commerciale con dimensione di ogni quadratino pari a 2 mm e con un supporto di vetro, visibile in figura 4.48.

Esso è stato comperato direttamente dall'azienda "Dantec Dynamics" e pertanto non presenta gli errori di sovrastima dei quadratini neri che vi erano nel calibratore precedente realizzato su Autocad e stampato in una copisteria.



Figura 4.48: Foto calibratore commerciale da 2mm

Dopo l'arrivo del calibratore si sono replicate solo le prove di deformazione sul polietilene, per valutare che l'accuratezza sui risultati dati da tale calibratore siano buoni e, se possibile, migliore dei precedenti, soprattutto per ROI minori.

#### 4.11 Prove di deformazione con calibratore da 2mm

Con l'arrivo del calibratore da 2mm, si è visto che con le operazioni di calibrazione si riusciva ad arrivare ad un residuum minore di 0.5, come richiesto dal manuale "ISTRA 4D" ed inoltre, durante le prime calibrazioni, con la presenza delle luci, il software non riusciva a riconoscere i nodi della scacchiera. Pertanto si è deciso di togliere le luci

utilizzate in precedenza con il calibratore da 4mm ed agire solamente sull'apertura del diaframma della camera e sui valori di shutter time.

Considerando che il calibration target ha un supporto di vetro, si ha che il pattern richiesto al provino doveva avere un primo sfondo bianco ed in seguito dei puntini neri sparsi sopra in maniera piuttosto casuale.

In realtà facendo le prove si è visto che il software, nonostante l'utilizzo di tale calibratore, riuscisse a riconoscere bene e, pertanto, a dare dei risultati con una buona accuratezza, anche se si lasciava uno sfondo nero nel campione con sopra uno spruzzo di liquido bianco, come fatto in precedenza.

Pertanto, dopo l'operazione di calibrazione, avvenuta con successo, si è inserito il campione all'interno degli afferraggi della macchina MTS e la si è impostata in modo da dare al campione una deformazione di circa il 2%.

Sono state realizzate tre tipologie di prove con valori di grid spacing pari ad 8 nel primo caso e 12 negli altri due casi e con quelli di facet size rispettivamente pari a 15, 19 e 31.

Si è impostato un valore di grid spacing pari a 8, in quanto, avendo un calibratore preciso dell'ordine di 2mm, si è cercato di vedere che risultati si ottenevano aumentando la risoluzione spaziale.

Sono state realizzate sempre 22 foto con frequenza di 0.1 Hz.

Nel caso di grid spacing 8, facet size 15 ed interpolazione bicubica, si sono avuti i risultati esposti nelle figure sottostanti 4.49 e 4.50. Dalle figure sotto esposte, che mostrano i risultati delle misure, si nota subito l'aumento di precisione e l'eliminazione degli errori molto grandi che si riscontravano usando il calibratore fatto in casa invece di quello professionale.

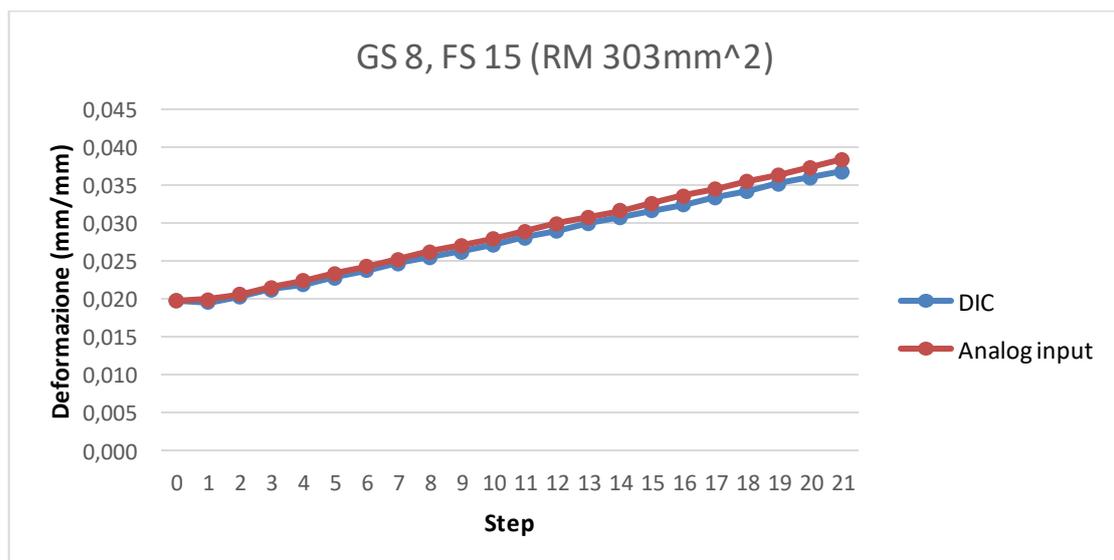


Figura 4.49: Andamento deformazione DIC/Analog input (GS 8, FS 15) con calibratore da 2 mm

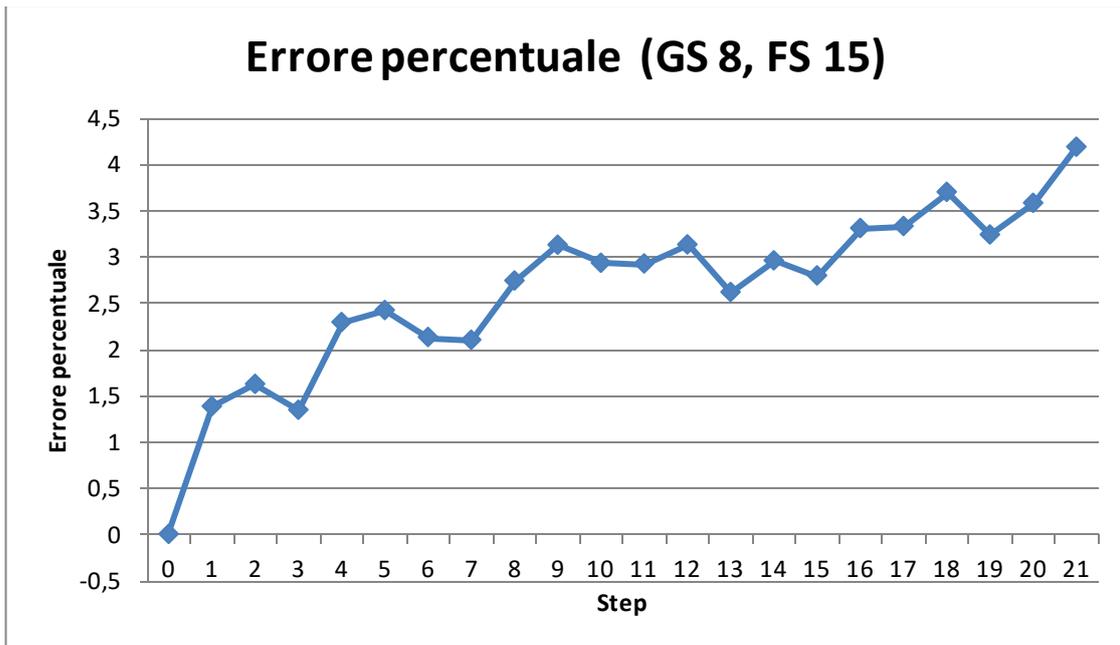


Figura 4.50 : Errore percentuale con GS 8, FS 15, calibratore da 2 mm

Nel caso di grid spacing 12 e facet size, rispettivamente, 19 e 31 si ottengono i risultati riportati nelle Figure 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54.

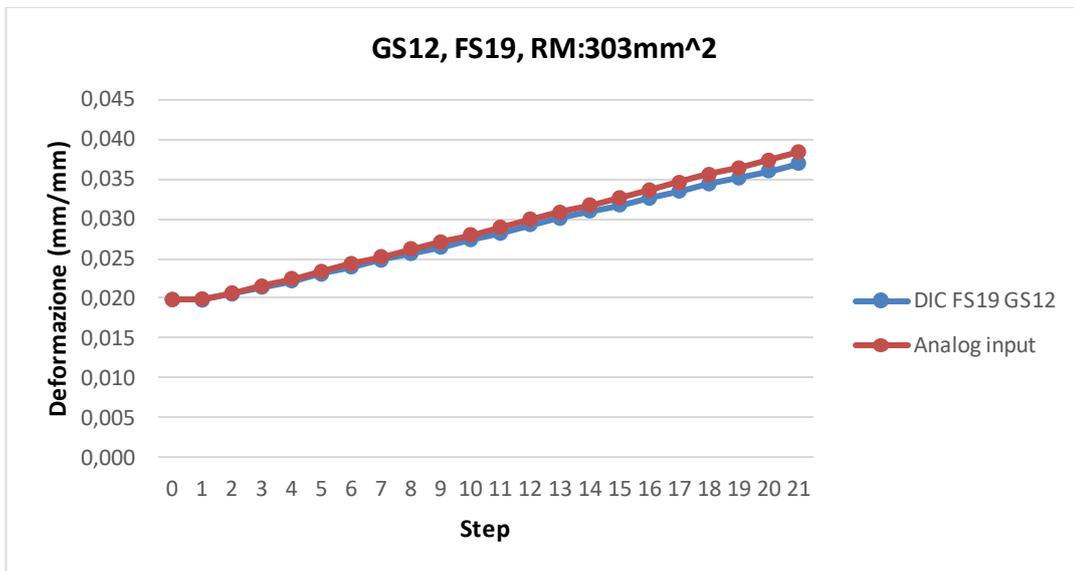


Figura 4.51 : Andamento deformazione DIC/Analog input GS12, FS19, calibratore 2mm

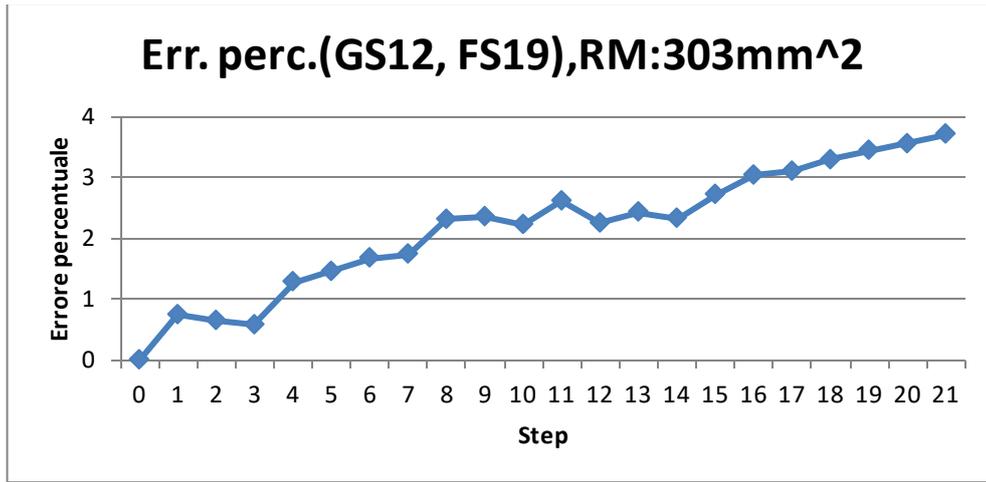


Figura 4.52 : Errore percentuale DIC/Analog input, GS12 FS19, calibratore 2mm

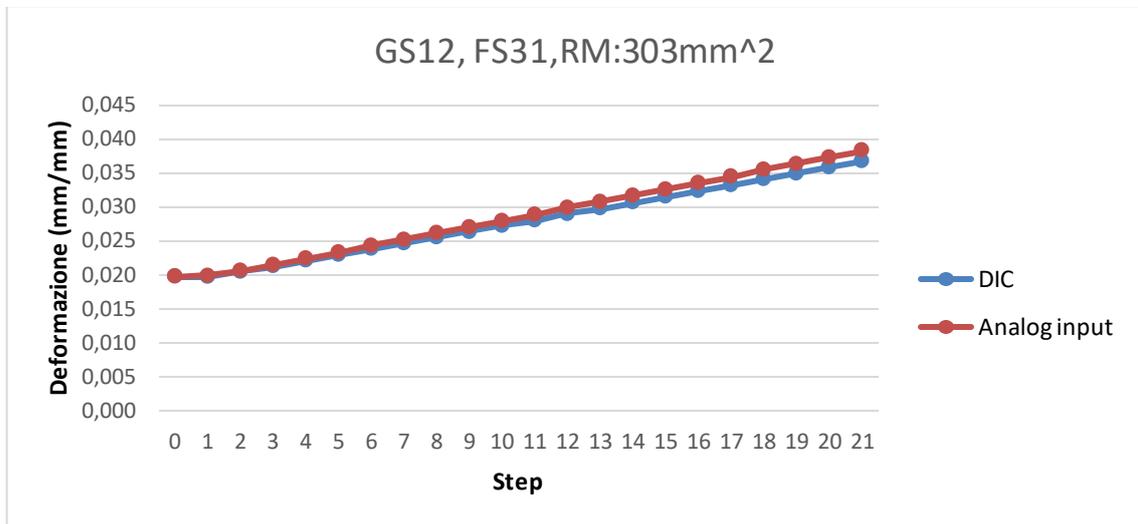


Figura 4.53 : Andamento DIC/Analog input GS12, FS31, calibratore 2mm

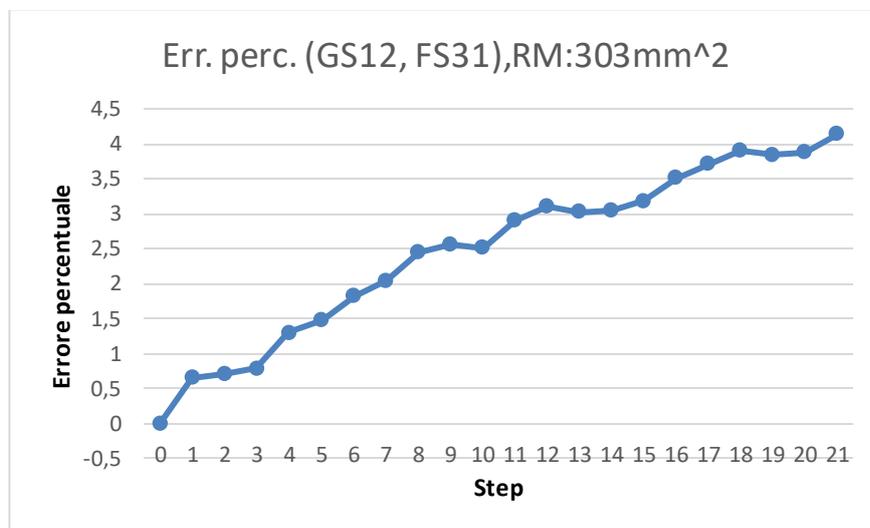


Figura 4.54 : Andamento errore percentuale GS12, FS31, calibratore 2mm

In seguito si sono volute replicare le stesse prove con i stessi parametri precedenti, diminuendo, però, la regione di misura (RM) che il software deve valutare per cercare di vedere se i risultati migliorano rispetto al caso dell'utilizzo del calibratore da 4mm. I risultati sono mostrati nelle sottostanti figure 4.55, 4.56, 4.57, 4.58.

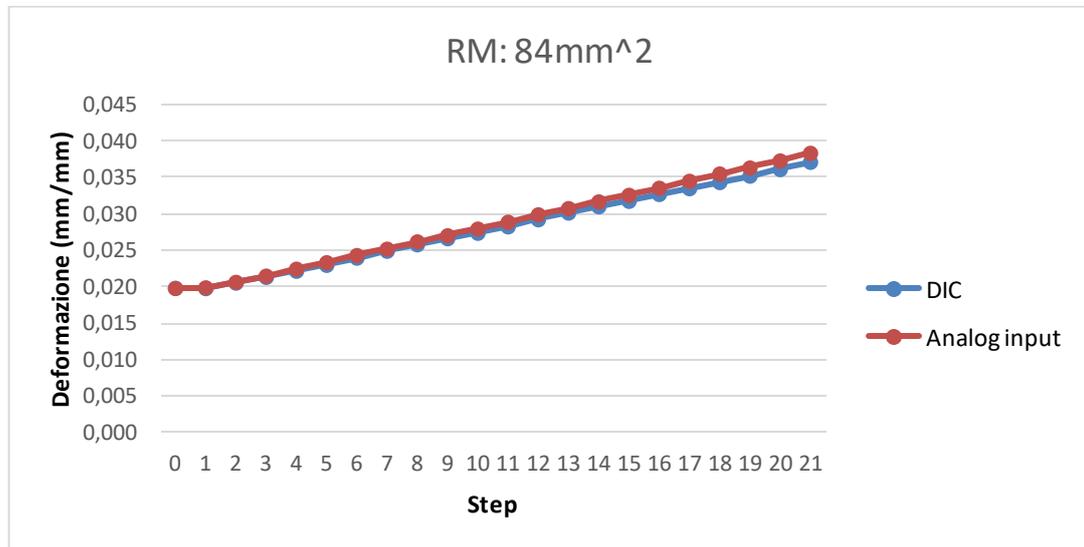


Figura 4.55: Andamento DIC/Analog input, RM:84mm<sup>2</sup>, GS12, FS19

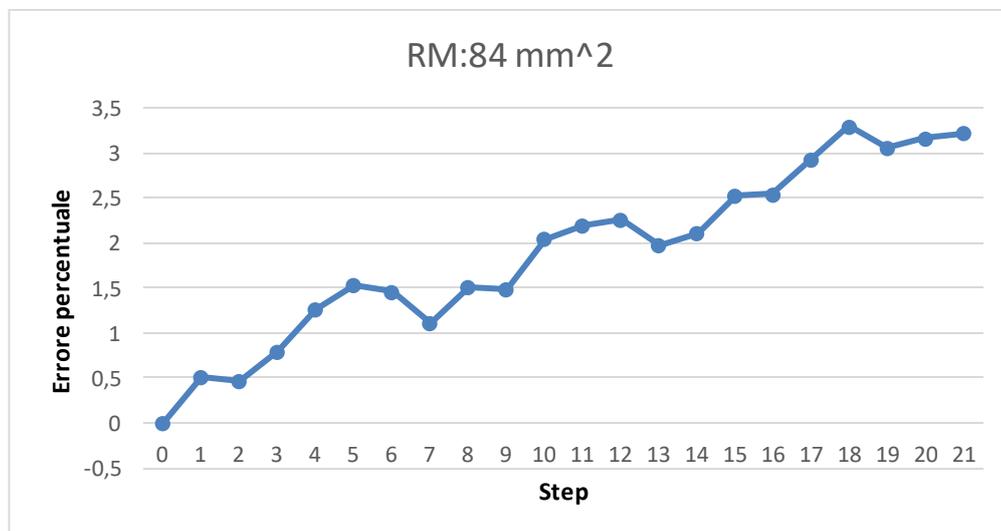


Figura 4.56 :Andamento errore percentuale, RM:84mm<sup>2</sup>, GS12, FS19

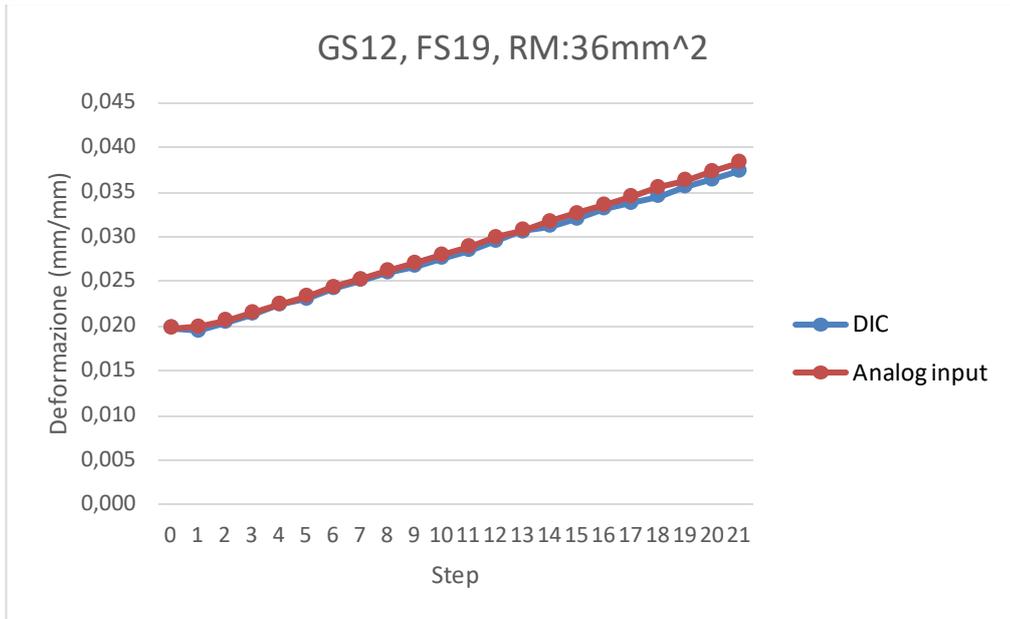


Figura 4.57: Andamento DIC/Analog input, RM:36mm<sup>2</sup>, GS12, FS19

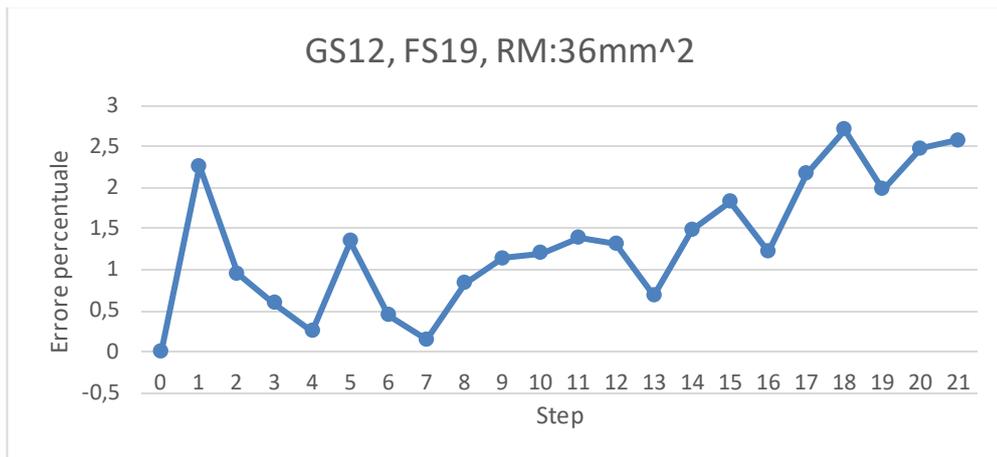


Figura 4.58: Andamento errore percentuale, RM:36mm<sup>2</sup>, GS12, FS19

I risultati della campagna di misura sono riassunti nella tabella sottostante 4.6, dove si conferma la diminuzione dell'errore di misura, soprattutto per deformazioni molto piccole.

Prova	Area target(mm <sup>2</sup> )	Area RM(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	324	303	8	15	Bicubica	2.63	da step 0
Prova 2	324	303	12	19	Bicubica	2.15	da step 0
Prova 3	324	303	12	31	Bicubica	2.48	da step 0
Prova 4	324	84	12	19	Bicubica	1.88	da step 0
Prova 5	324	36	12	19	Bicubica	1.32	da step 0

Tabella 4.6: Dati deformazione con calibratore da 2mm

#### 4.12 Prove di deformazione sull'acciaio con calibratore da 2mm

Dopo aver provato il polietilene, si è deciso di fare altre prove con un altro materiale diverso, l'acciaio, per valutare come risponde il software.

Anche in tal caso si è impostata la macchina tensile in modo da avere una velocità di spostamento dell'attuatore di 0.005 mm/s, in modo da far raggiungere all'acciaio una deformazione di circa il 2%.

Sono state realizzate 32 foto con la frequenza di 0.1Hz.

Anche in tal caso si è deciso di utilizzare valori di grid spacing pari ad 8 e 12, con valori di facet size che sono, rispettivamente, 15, 19 e 31.

Di seguito, nelle figure 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64 sono riportati gli andamenti di deformazione calcolati dal software, confrontati con quelli trovati dall'estensimetro MTS.

1)Grid spacing: 8, facet size: 15, interpolazione: bicubica

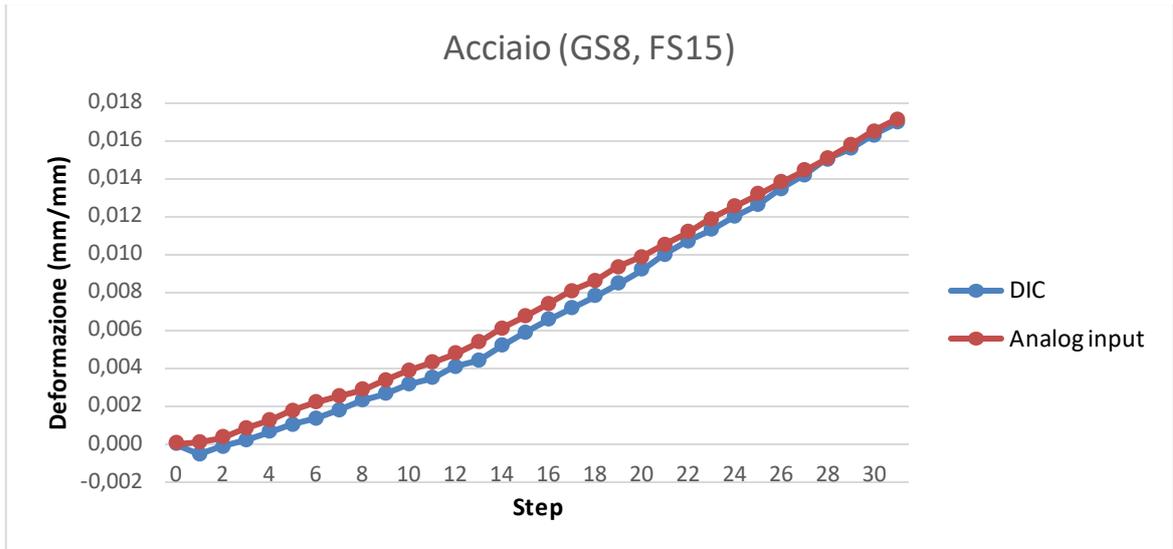


Figura 4.59: Andamento DIC/Analog input (GS8, FS15), acciaio, calibratore 2mmù



Figura 4.60: Andamento errore percentuale, GS8, FS15, acciaio, calibratore 2mm

2)Grid spacing:12, facet size: 19, interpolazione: bicubica

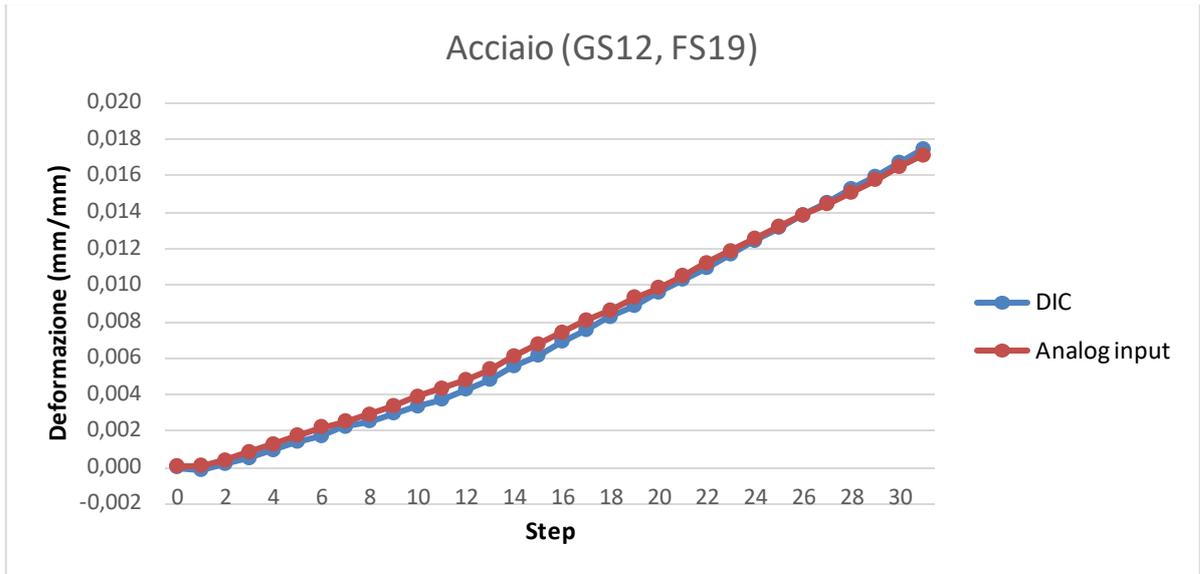


Figura 4.61 : Andamento DIC/Analog input, acciaio, GS:12, FS:19, calibratore 2mm

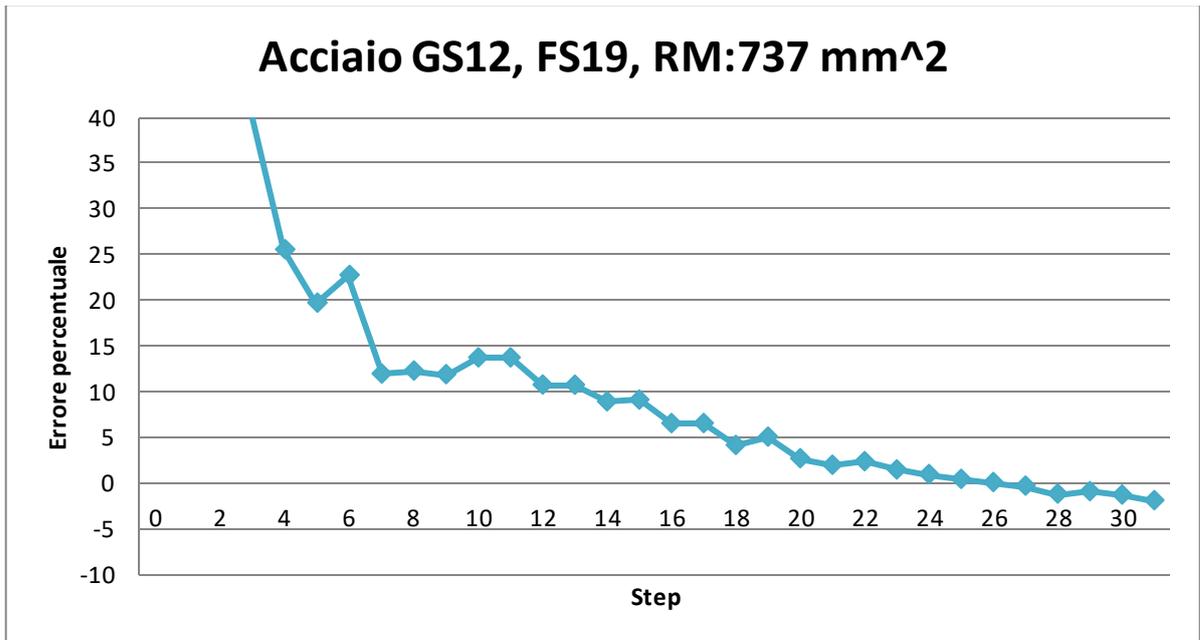


Figura 4.62 : Andamento errore percentuale, GS12, FS19, acciaio, calibratore 2mm

3)Grid spacing:12, facet size: 31, interpolazione: bicubica

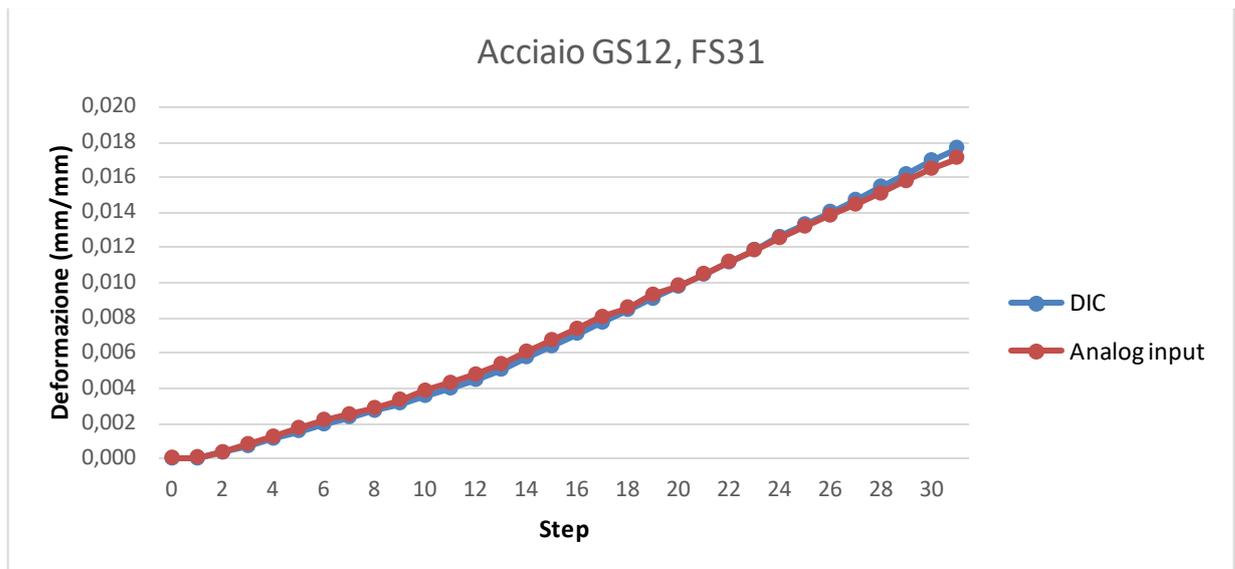


Figura 4.63 : Andamento DIC/Analog input, GS12, FS31, acciaio, calibratore 2mm

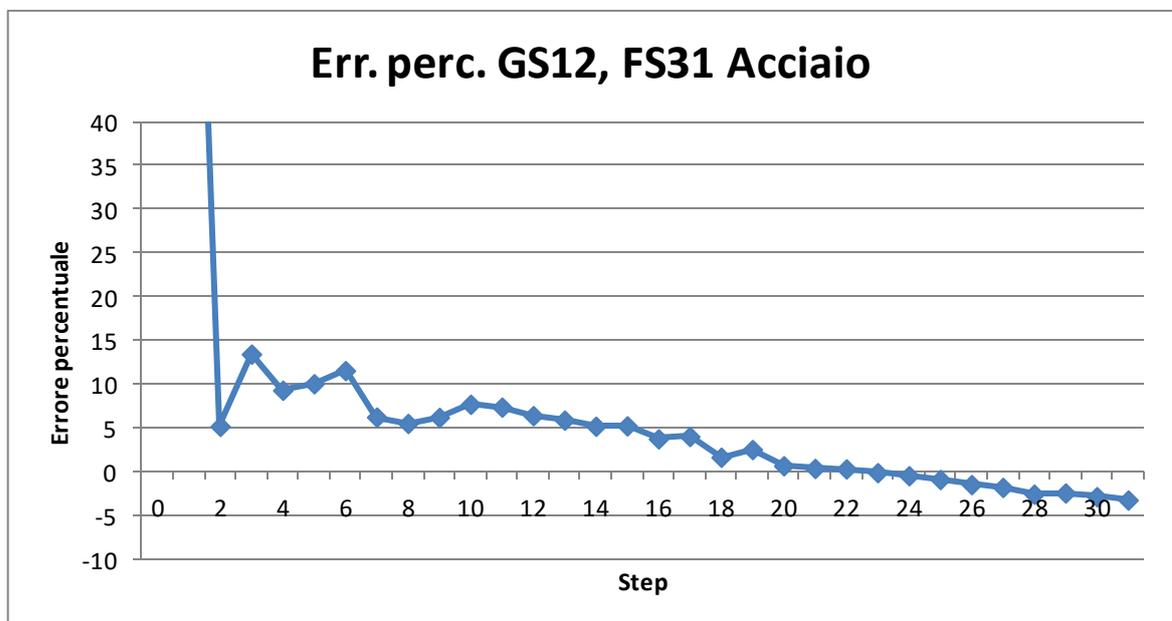


Figura 4.64: Andamento errore percentuale GS12, FS31, acciaio, calibratore 2mm

I risultati esposti nei diagrammi precedenti sono sintetizzati nella Tabella 4.7, dall'esame della quale si deduce che il sistema DIC produce risultati affidabili, cioè con errore contenuto, svolgendo sui risultati un'analisi focalizzata alla ricerca dei grid spacing e facet size più adatti per il pattern prodotto. Considerata la variabilità del pattern, un grid spacing di 12 accoppiato ad un facet size di 31 hanno permesso di attenuare il rumore di fondo e raggiungere un errore percentuale medio del 4% circa.

Prova	Area Target(mm <sup>2</sup> )	Area RM(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Prova 1	324	737	8	15	Bicubica	13,45	da step 4
Prova 2	324	737	12	19	Bicubica	7,41	da step 4
Prova 3	324	737	12	31	Bicubica	4,13	da step 4

Tabella 4.7 : Tabella dati acciaio

### 4.13 Influenza del pattern

In seguito si è voluto evidenziare l'influenza del pattern sui risultati offerti dal software, in modo da vedere se vi fosse qualche errore sistematico che esso forniva nei risultati.

Si sono mantenuti costanti i valori di grid spacing e facet size rispettivamente a 12 e 19 e sono stati realizzati diversi pattern sulla superficie dei campioni di polietilene; sono stati utilizzati sia il calibratore da 4mm che quello da 2mm, pertanto sono state effettuate due calibrazioni.

Con l'utilizzo del calibratore da 4mm il pattern è stato fatto attraverso uno sfondo nero con uno spruzzo di spray bianco al di sopra, così come richiesto dal calibration target.

Invece con l'utilizzo del calibratore da 2mm, si è dapprima utilizzato uno sfondo bianco con puntini neri al di sopra, come richiesto dal calibration target, ma, siccome questa soluzione presentava dei problemi, dovuti alla consistenza dello spray bianco sulla superficie del campione, sono state provate anche altre soluzioni, come l'utilizzo di un primo sfondo nero, ricoperto da uno sfondo bianco e con puntini neri soprastanti o anche si è provata la soluzione con semplice sfondo nero e al di sopra spray bianco, come nel caso del calibratore da 4mm.

Si è visto che lo sfondo deve avere uno spessore non troppo piccolo, altrimenti poi lo spray tende a diradarsi e pertanto il software non trova più facets e quindi non fornisce risultati accurati; inoltre per avere che il software riconosca un più alto numero di subset bisogna fare in modo che lo spray spruzzato al di sopra dello sfondo (non importa se bianco o nero) abbia sulla superficie del campione un andamento casuale e sia più o meno nella stessa percentuale dello spray usato come sfondo.

In poche parole bisogna evitare delle forti concentrazioni di liquido in alcune zone della superficie del campione, ma esso deve avere un andamento più casuale possibile.

Nelle prove sottostanti è stato variato anche il ROI per vedere che effetto dava la variazione di tale parametro sulla qualità del pattern utilizzato.

1) Fondo bianco con sopra spray nero, RM: 283mm<sup>2</sup>, calibratore 2mm

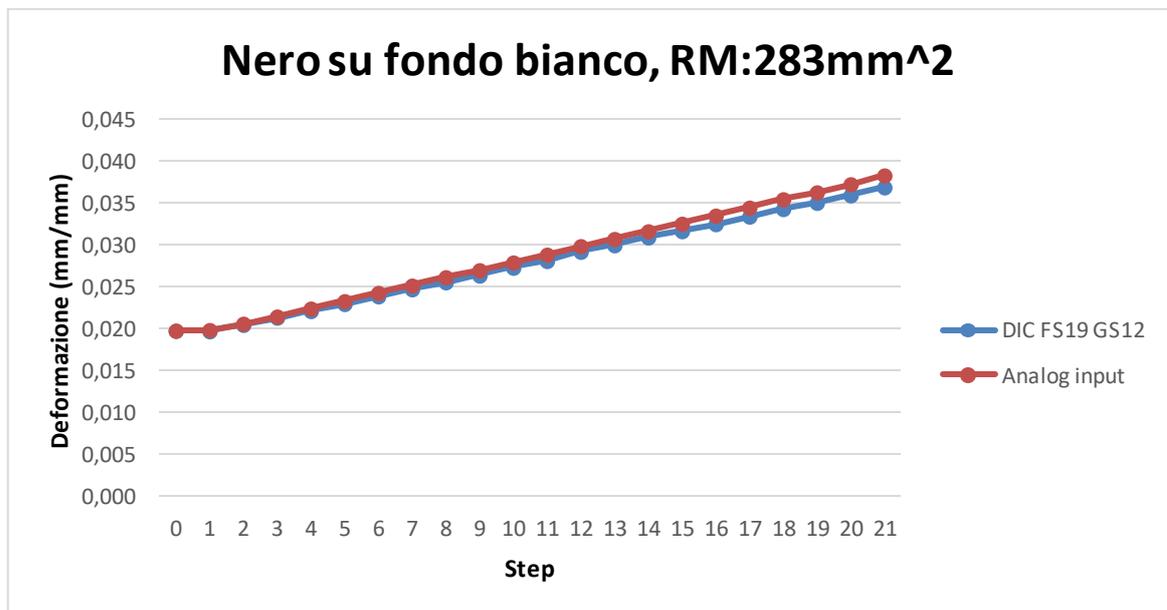


Figura 4.65 : Andamento DIC/Analog input RM:283mm<sup>2</sup>

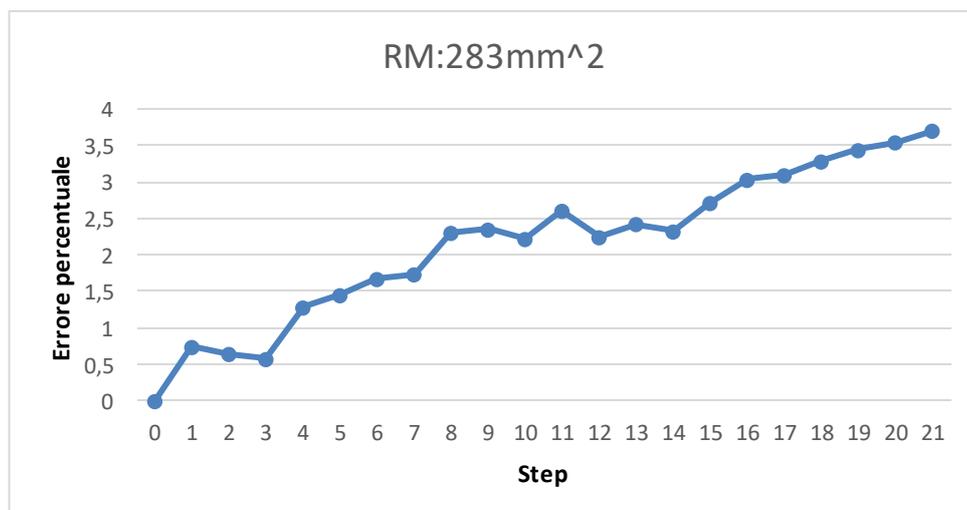


Figura 4.66 : Andamento errore percentuale RM:283mm<sup>2</sup>

1bis) Fondo bianco con spray nero, RM: 84mm<sup>2</sup>, calibratore 2mm

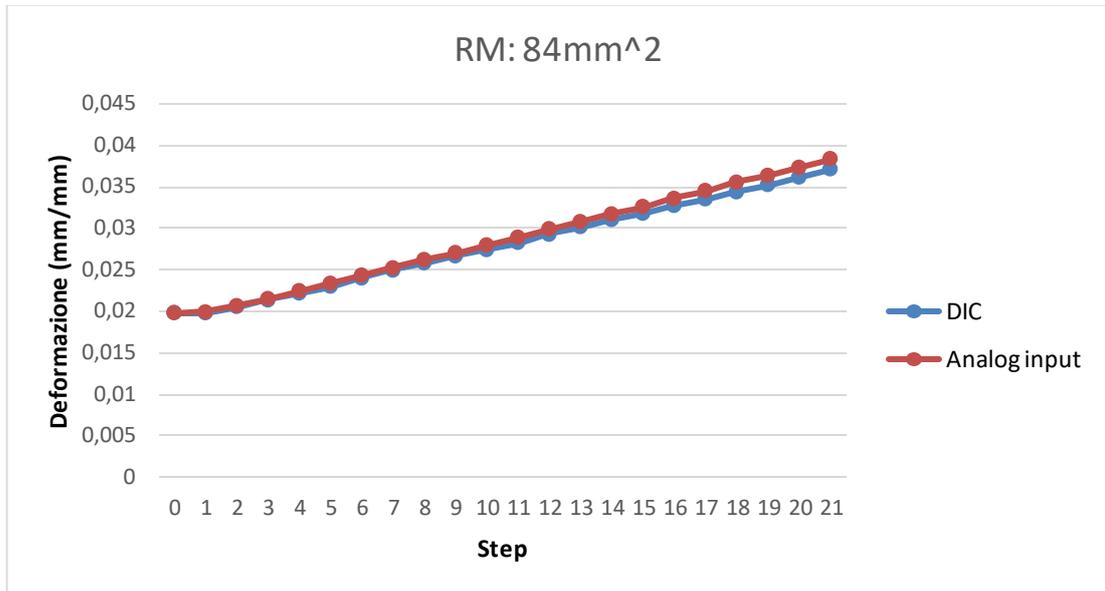


Figura 4.67 : Andamento DIC/Analog input RM 84mm<sup>2</sup>

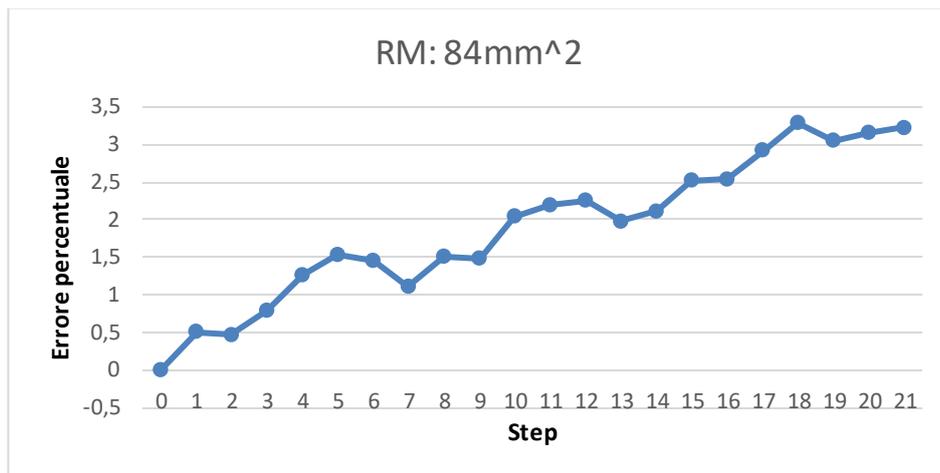


Figura 4.68 : Errore percentuale RM 84mm<sup>2</sup>

2) Nero su fondo bianco, RM: 283mm<sup>2</sup>, calibratore 2mm

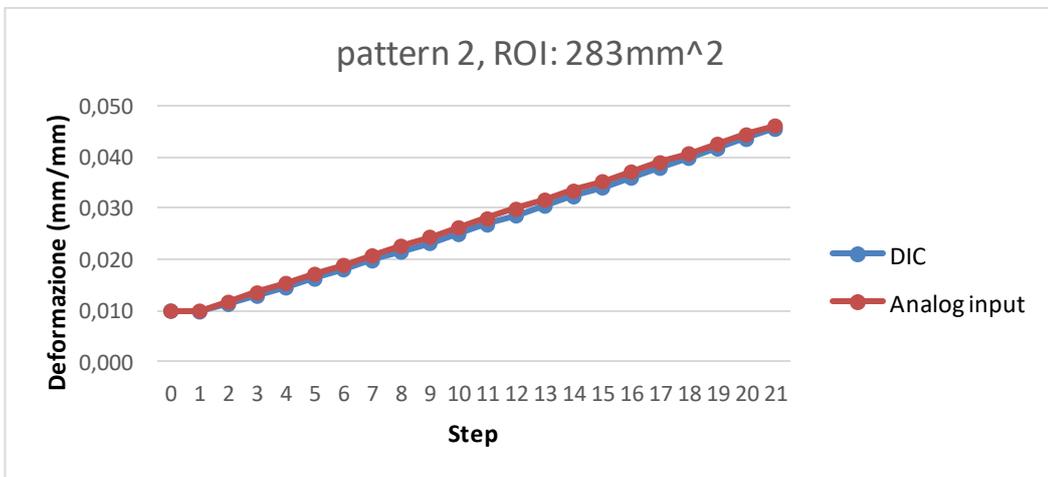
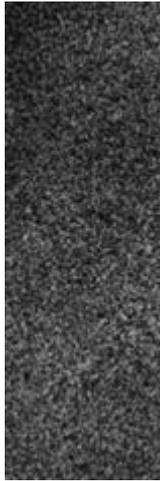


Figura 4.69 : Andamento DIC/Analog input, RM:283mm<sup>2</sup>

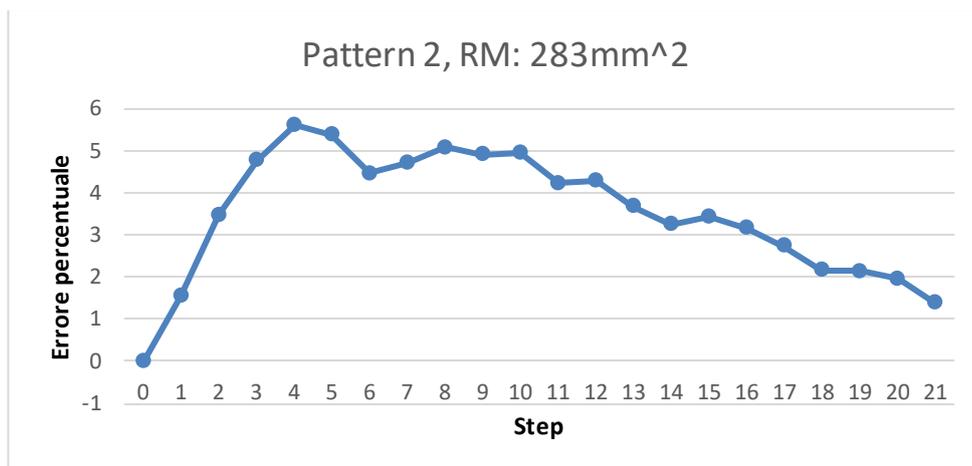


Figura 4.70: Andamento errore percentuale, RM:283mm<sup>2</sup>

2bis) Nero su fondo bianco, RM:  $78\text{mm}^2$ , calibratore 2mm

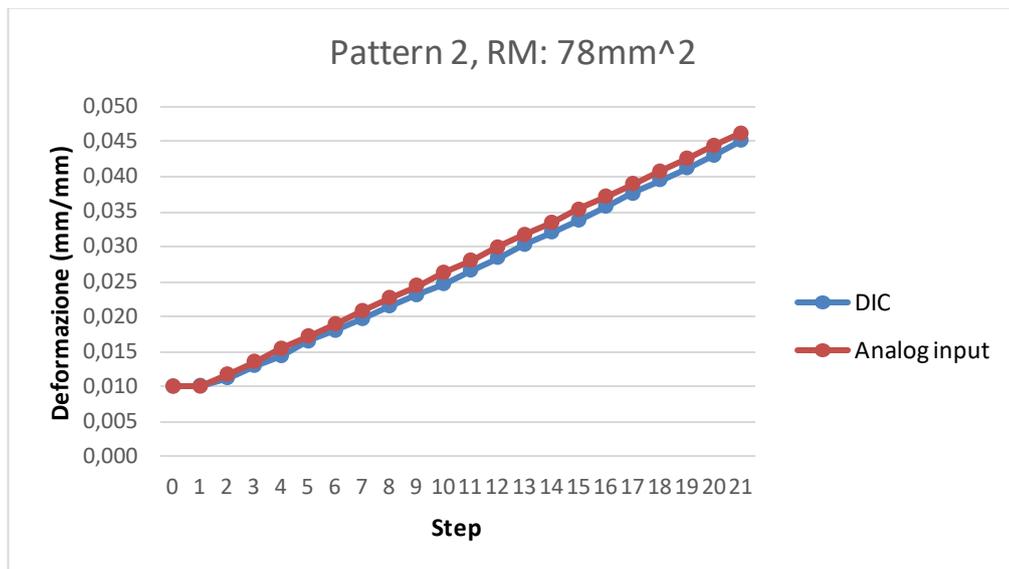


Figura 4.71 : DIC/Analog input, RM: $78\text{mm}^2$

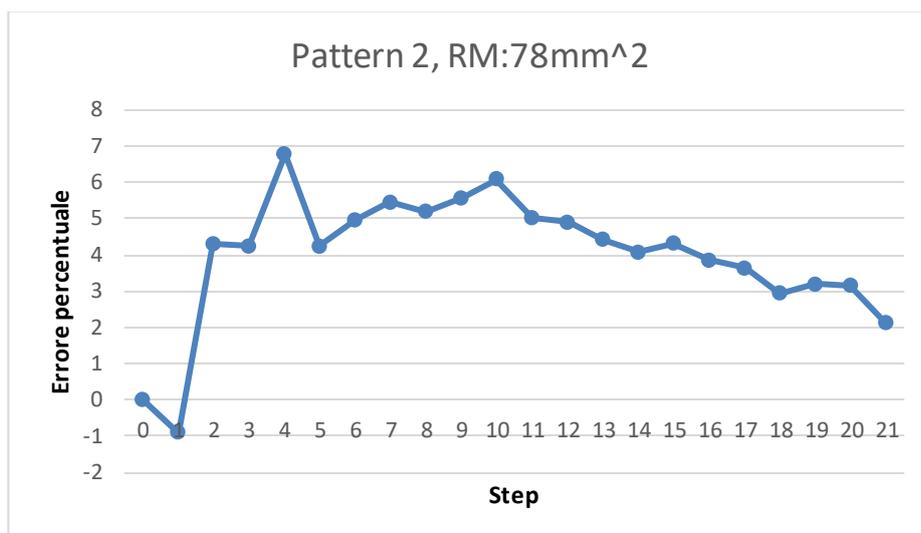


Figura 4.72: Errore percentuale, RM:  $78\text{mm}^2$

3) Bianco su fondo nero, RM:  $283\text{mm}^2$ , calibratore 2mm

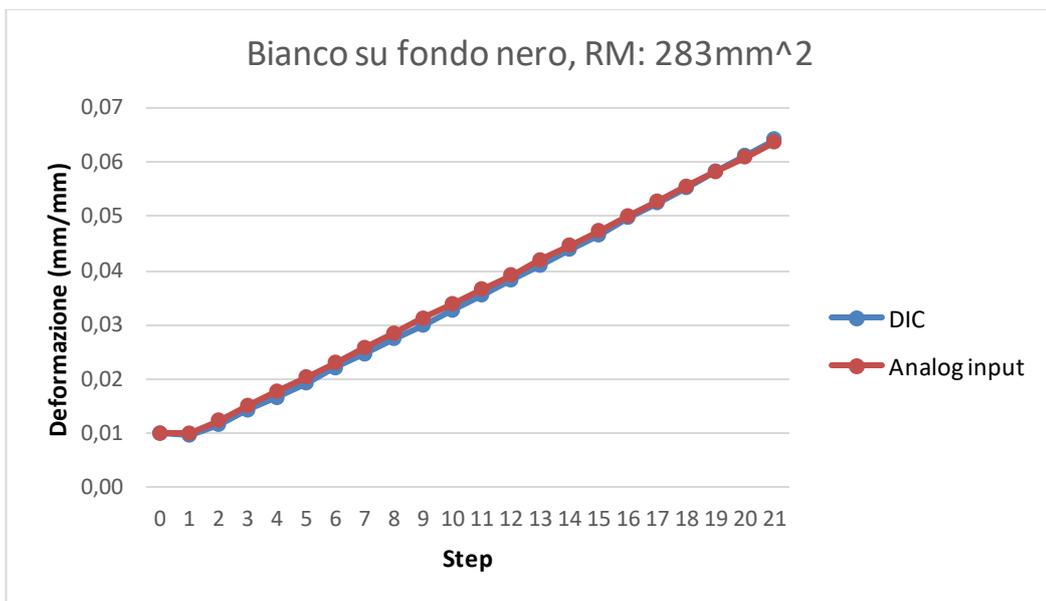


Figura 4.73: DIC/Analog input, RM: 283mm<sup>2</sup>

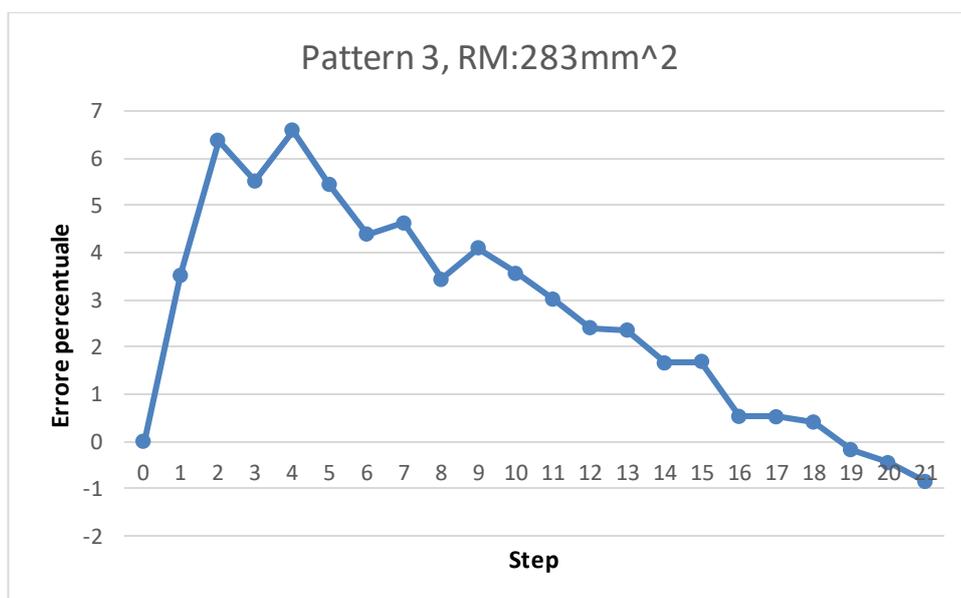


Figura 4.74 : Errore percentuale, RM: 283mm<sup>2</sup>

3bis) Bianco su fondo nero, RM: 66mm<sup>2</sup>, calibratore 2mm

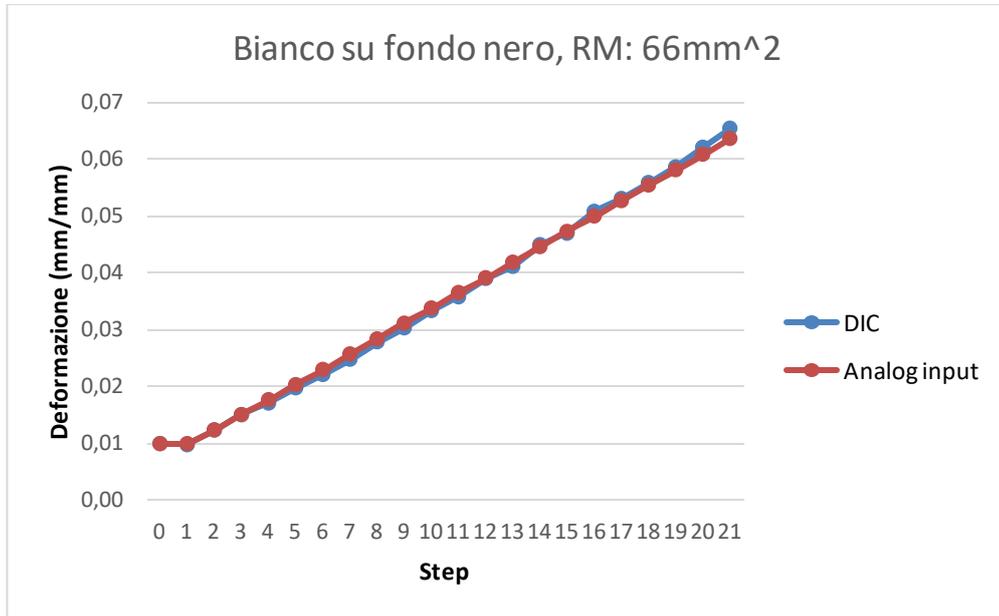


Figura 4.75: DIC/Analog input, RM: 66mm<sup>2</sup>

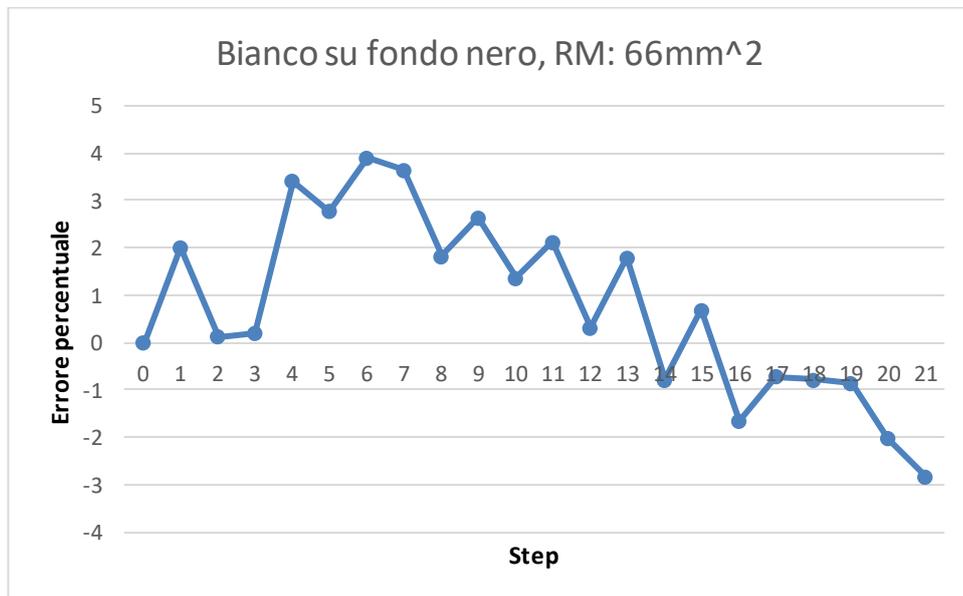


Figura 4.76 : Errore percentuale, RM: 66mm<sup>2</sup>

4)Pattern con fondo doppio strato con sotto nero, sopra bianco e sopra puntini neri, RM:283mm<sup>2</sup>, calibratore 2mm

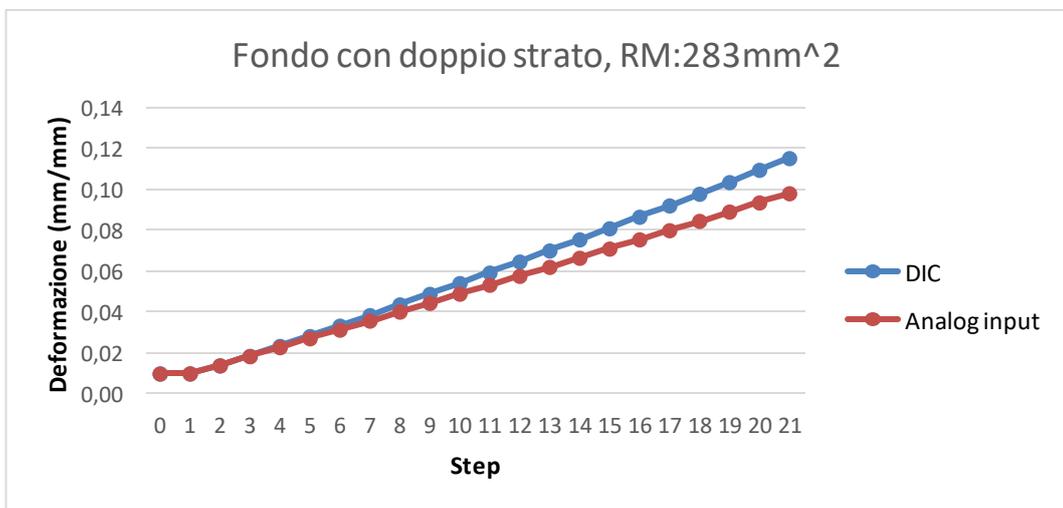


Figura 4.77: DIC/Analog input, doppio strato, RM:283mm<sup>2</sup>

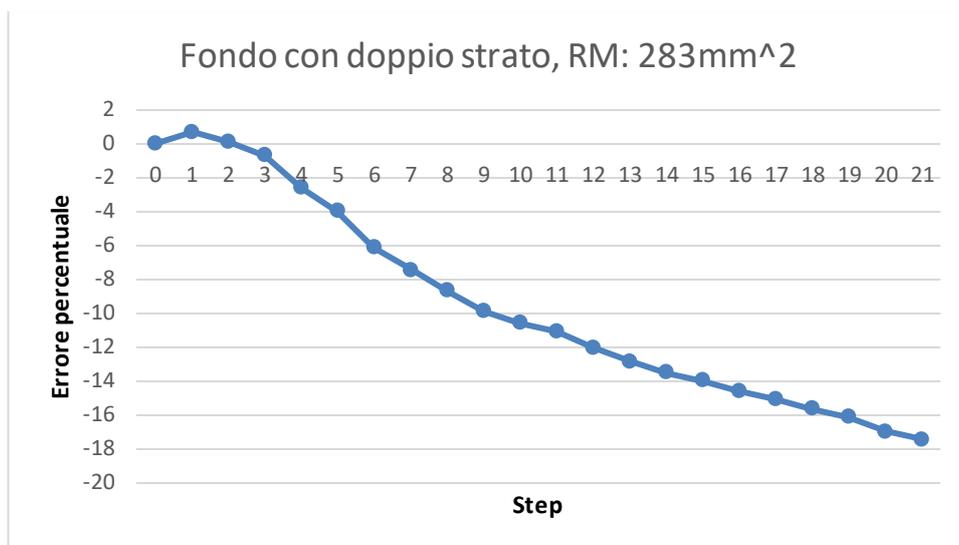


Figura 4.78 : Errore percentuale, doppio strato, RM: 283mm<sup>2</sup>

La prova con tale pattern non è stata replicata per RM minori, considerando il fatto che l'errore percentuale era già molto grande, considerando un'area di interesse più grande.

Sono stati provati altri due tipologie di pattern con fondo nero e sopra spray bianco con il calibratore da 4mm, per vedere l'effetto del pattern utilizzato sui risultati:

5) Fondo nero con sopra spray bianco, RM:253mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

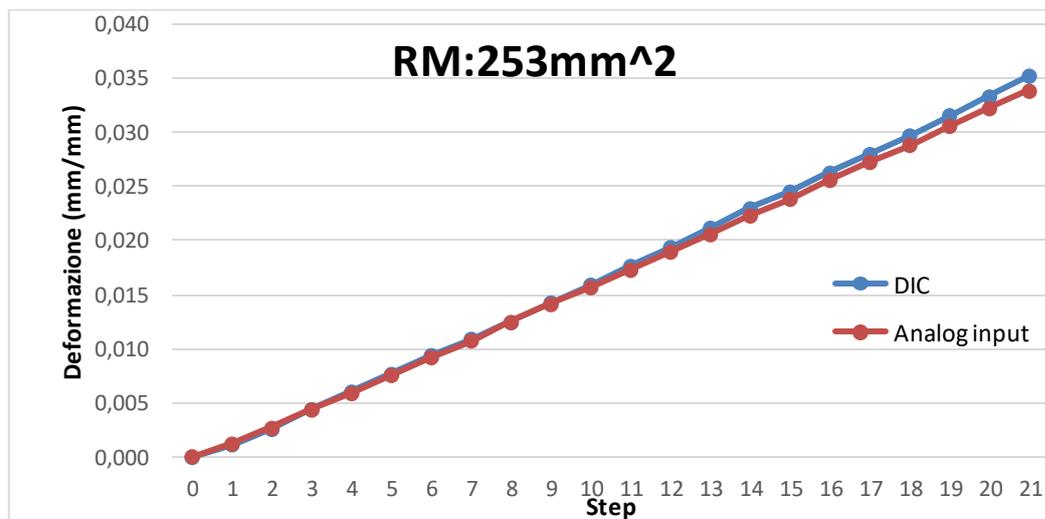
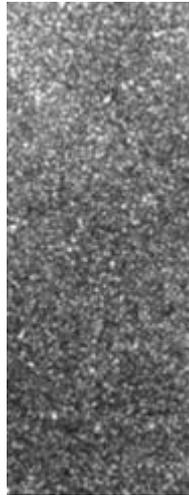


Figura 4.79 : Pattern 5, RM 253mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

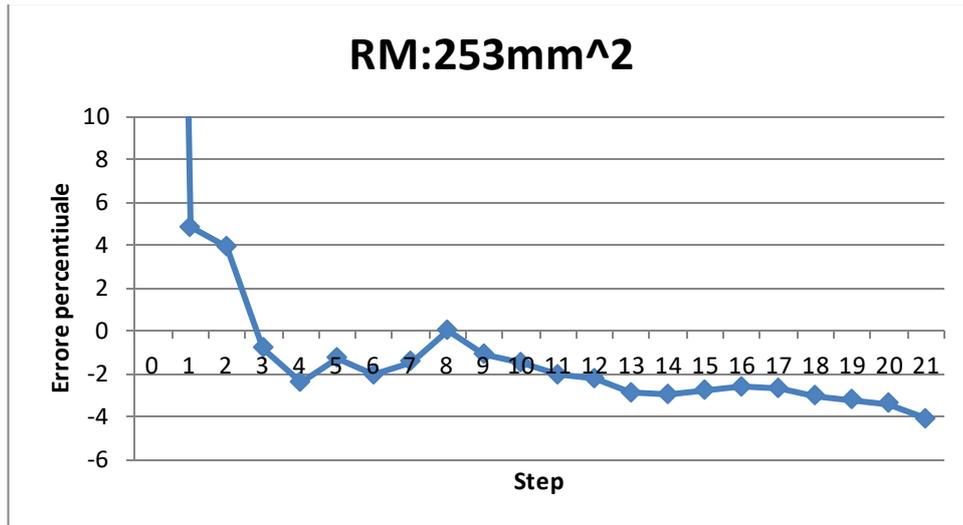


Figura 4.80: Pattern 5, RM 253mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

5bis) Fondo nero con sopra spray bianco, RM:87mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

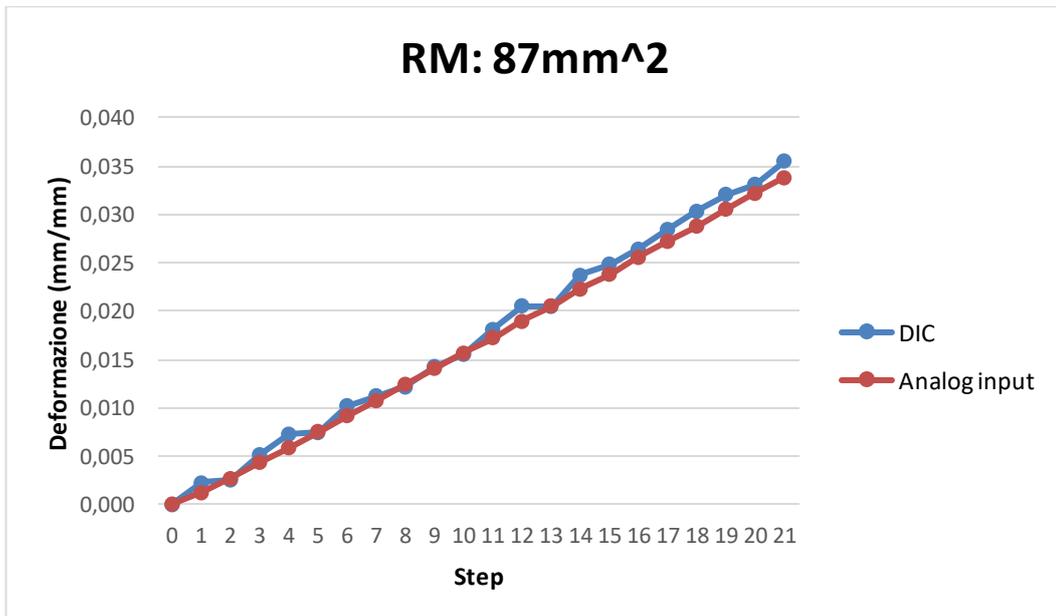


Figura 4.81 : Pattern 5, RM 87mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

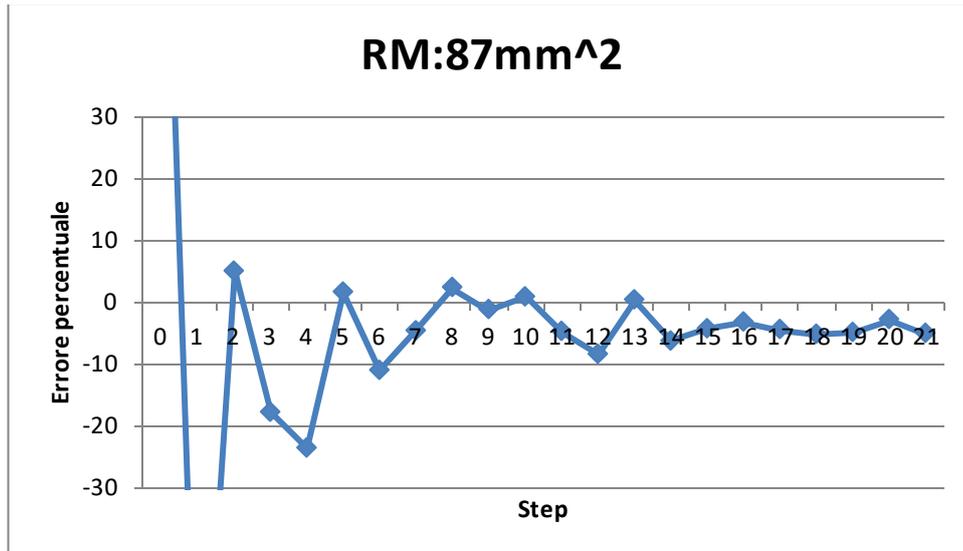


Figura 4.82 : Pattern 5, RM 87mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

6) Fondo nero con sopra puntini bianchi, RM 213 mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

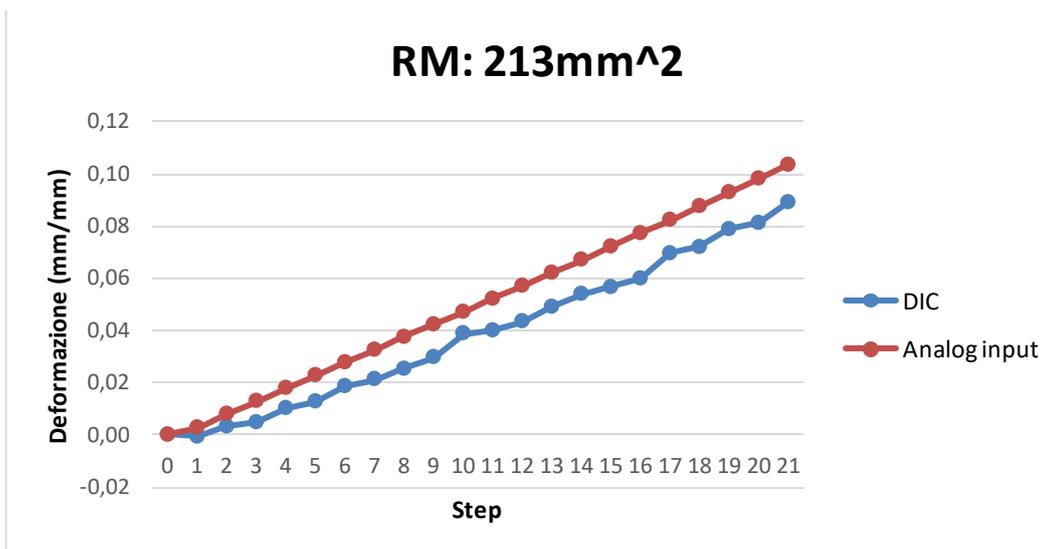
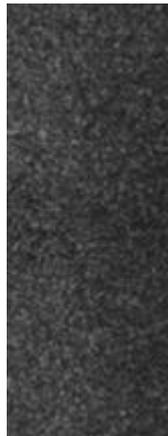


Figura 4.83: Pattern 6, RM 213mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

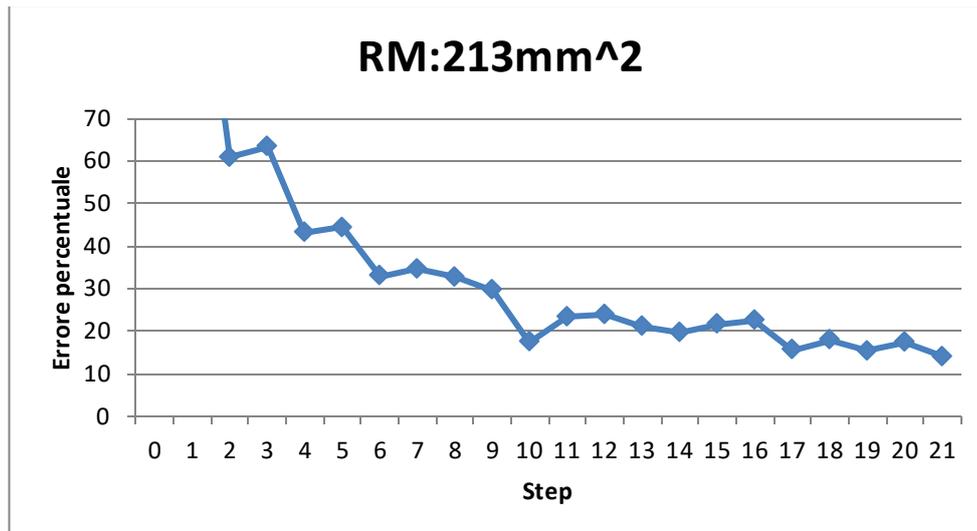


Figura 4.84: Pattern 6, RM:213mm<sup>2</sup>, calibratore 4mm

Anche in tal caso le prove con una RM più piccola non sono state effettuate, in quanto risultava già alto l'errore percentuale con una RM più grande.

I dati sono riassunti nella sottostante tabella 4.8, dove si vede che l'errore si mantiene relativamente basso per quasi tutti i tipi di pattern utilizzati, ad eccezione del pattern realizzato con un fondo a doppio strato e del pattern 6 e per quest'ultimo la causa può essere dovuta al fatto che non ci sia un sufficiente contrasto tra bianco e nero nell'immagine e questo fa sì che il software non riesca a riconoscere gli speckle caratteristici durante il caricamento del campione, che poi utilizza per tracciare i facets.

Inoltre si vede come gli errori che si hanno con l'utilizzo del calibratore da 2mm gli errori sono minori rispetto al caso della calibrazione con il target fatto con Autocad da 4mm, così come il fatto che se si prendono regioni misura molto piccole la deformazione data dal software si discosta di più rispetto a quella data dall'estensimetro nel caso dell'utilizzo del calibratore da 4mm e questa cosa non accade nel caso del target da 2mm, anzi si vede che gli errori tendono, nella maggior parte dei casi, a diminuire con regioni di misura minori.

Pattern	Area target(mm <sup>2</sup> )	Area RM(mm <sup>2</sup> )	Grid spacing	Facet size	Interpolazione	Errore % medio	Note
Pattern 1	324	283	12	19	Bicubica	2.15	da step 0
Pattern 1	324	84	12	19	Bicubica	1.88	da step 0
Pattern 2	324	283	12	19	Bicubica	3.52	da step 0
Pattern 2	324	78	12	19	Bicubica	4.06	da step 0
Pattern 3	324	283	12	19	Bicubica	2.80	da step 0
Pattern 3	324	66	12	19	Bicubica	1.66	da step 0
Pattern 4	324	283	12	19	Bicubica	9.57	da step 0
Pattern 5	1296	253	12	19	Bicubica	2.33	da step 2
Pattern 5	1296	87	12	19	Bicubica	5.95	da step 2
Pattern 6	1296	213	12	19	Bicubica	28.52	da step 2

Tabella 4.8: Dati pattern

## CAPITOLO 5

### 5. PARTE SPERIMENTALE: PROVE DI TRAZIONE

#### 5.1 Trazione della lega 8090T8 R57LT

Dopo aver fatto una serie di prove per mettere a punto il sistema, si è deciso di mettere in trazione la lega d'alluminio 8090T8 R57LT per studiare il suo campo di deformazione plastica ed, in particolare, per vedere se erano visibili le bande PLC tramite il sistema DIC ed in particolare che tipi di bande si vengono ad avere a determinate condizioni di lavoro.

Come prima cosa il campione è stato preso ed è stato levigato superficialmente con carte al SiC, fino a 1200 grani per pollice quadro, per migliorare la finitura, in modo che questa facilitasse l'applicazione del pattern e nel contempo non influenzasse morfologia e comportamento delle bande plastiche che si verificano con l'effetto PLC.

In seguito si è calcolata l'area della sezione del campione, facendo tre misurazioni con il calibro e mediando le tre misurazioni sia per la larghezza che per lo spessore del campione, arrivando ad avere una larghezza di 5.95mm(media su tre prove) ed uno spessore di 3.90mm(media su tre prove).

Poi si è realizzato un pattern con fondo nero e sopra puntini bianchi sparsi nel modo più casuale possibile, si sono trovati i parametri più adeguati al software per effettuare la calibrazione, arrivando ad avere un residuum di 0.421. In seguito il campione è stato reinserito sulla macchina di prova per essere caricato, dopo essere già stato inserito una prima volta sulla macchina antecedentemente alla prova di calibrazione per essere messo a fuoco in maniera adeguata.

Come prima prova, per imporre al campione una velocità di deformazione pari a  $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , si è dovuto imporre alla macchina una velocità di spostamento del pistone di  $3 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ .

Sono state effettuate 10 foto al secondo per 5 minuti come primo tentativo, adottando un grid spacing pari a 12 ed un facet size pari a 19, sincronizzando il valore di deformazione dato dall'estensimetro con quello letto dal software tramite il canale analogico d'ingresso inserito nel dispositivo Limes LQ con un opportuno fattore di scala ed un opportuno offset.

Si è avuta la curva tensione-deformazione visibile nella figura sottostante 5.1:

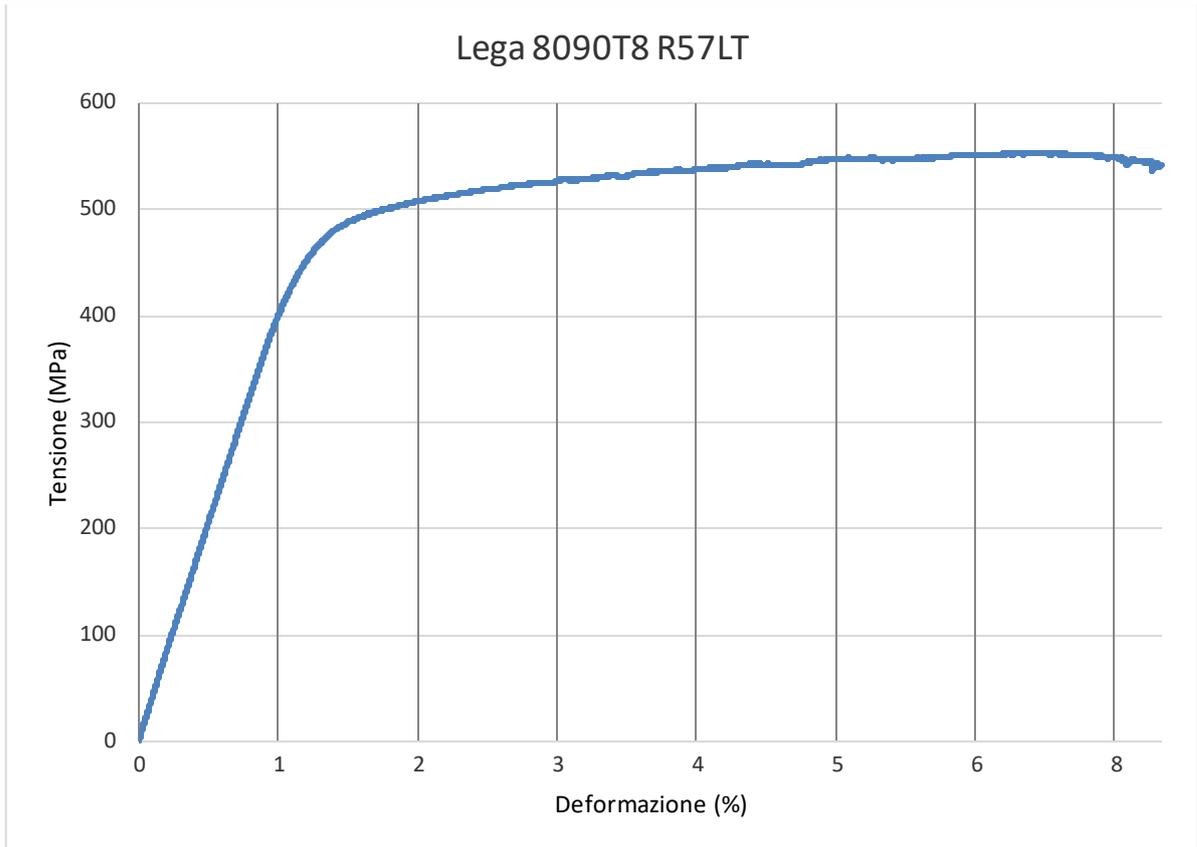


Figura 5.1 : Curva tensione-deformazione lega 8090T8 R57LT, velocità di deformazione:  $2.8 \cdot 10^{-4} s^{-1}$

Si ha che ingrandendo solamente nella parte di deformazione plastica si vedono maggiori dettagli (figura 5.2).

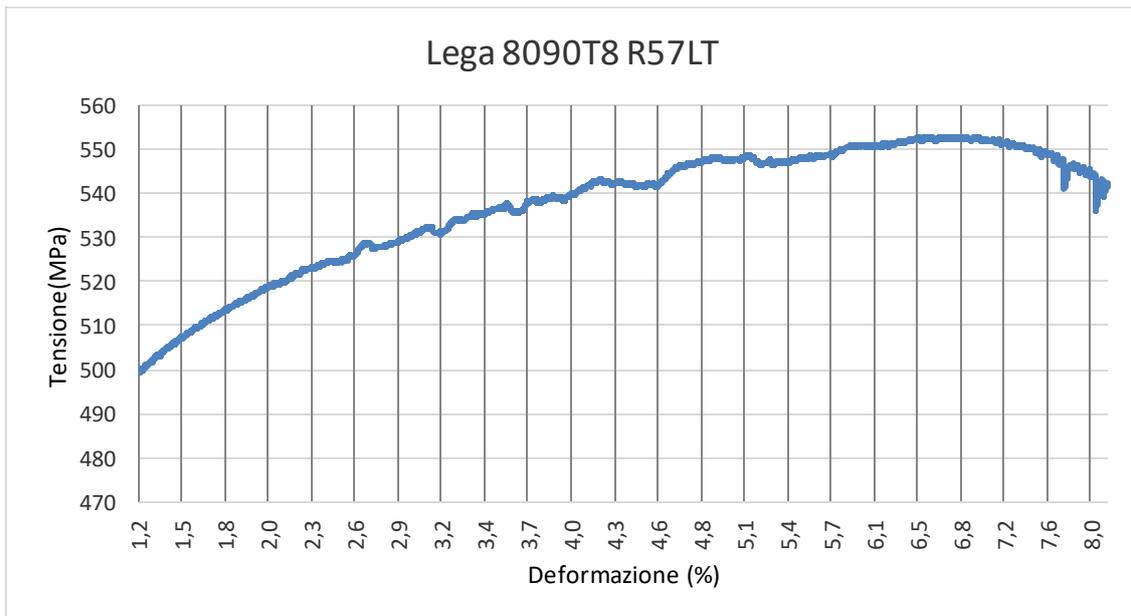


Figura 5.2 : Zona di deformazione plastica della lega 8090T8 R57LT, velocità di deformazione  $2.8 \cdot 10^{-4} s^{-1}$

Sono state osservate per lo più bande stazionarie di tipo B, che verso la fine (prima della rottura), si trasformano in bande di tipo C, come si vede anche dall'ampiezza delle dentellature maggiore nel diagramma tensione-deformazione.

Si è valutato il campo di deformazione  $\varepsilon_y$ . A seguire si mostrano le immagini dei risultati di calcolo di alcuni step significativi, in cui vi è la presenza delle sopracitate bande stazionarie:

1. Step 1530, che corrisponde ad una deformazione del 3.6% nominale compressiva

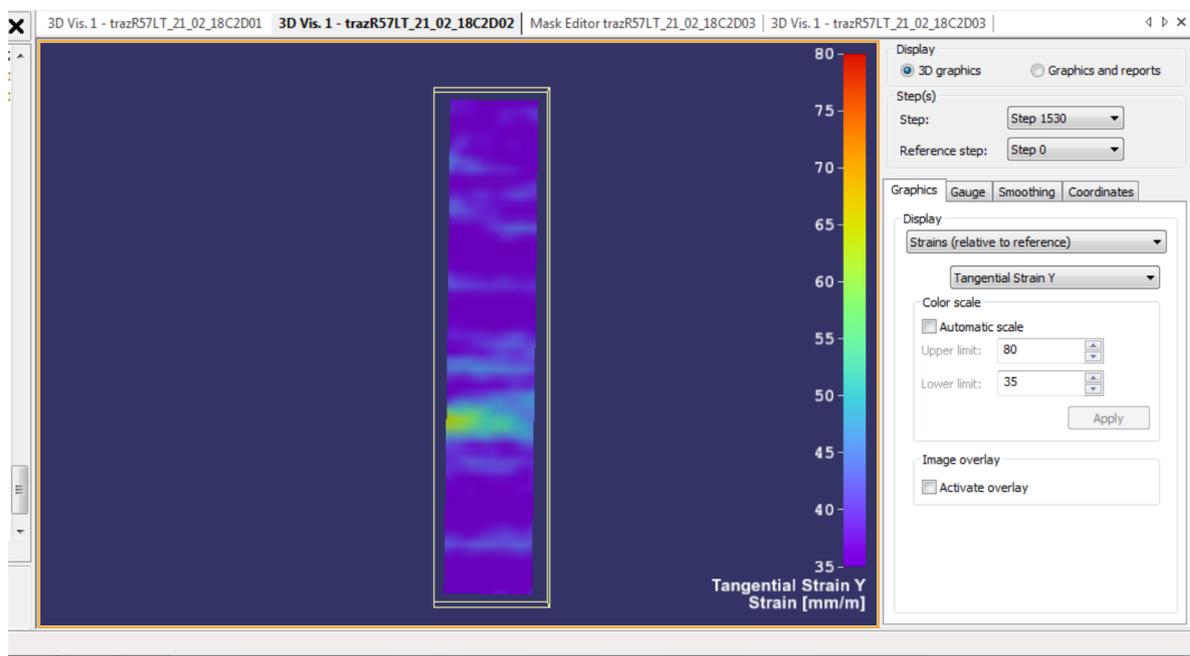


Figura 5.3: Bande allo step 1530, corrispondente ad una deformazione misurata dall'estensometro del 3.6%.

In tale step si vede come si sono avute bande di deformazione localizzata di tipo B lungo il campione. Tali bande, come si vede anche nelle sottostanti figure, tendono a rimanere stazionarie e ad ingrandirsi man mano che avanza la deformazione, fino ad arrivare a formazione di bande di tipo C, anch'esse stazionarie, che portano a rottura il campione.

2. Step 2272, che corrisponde ad una deformazione del 5.73%

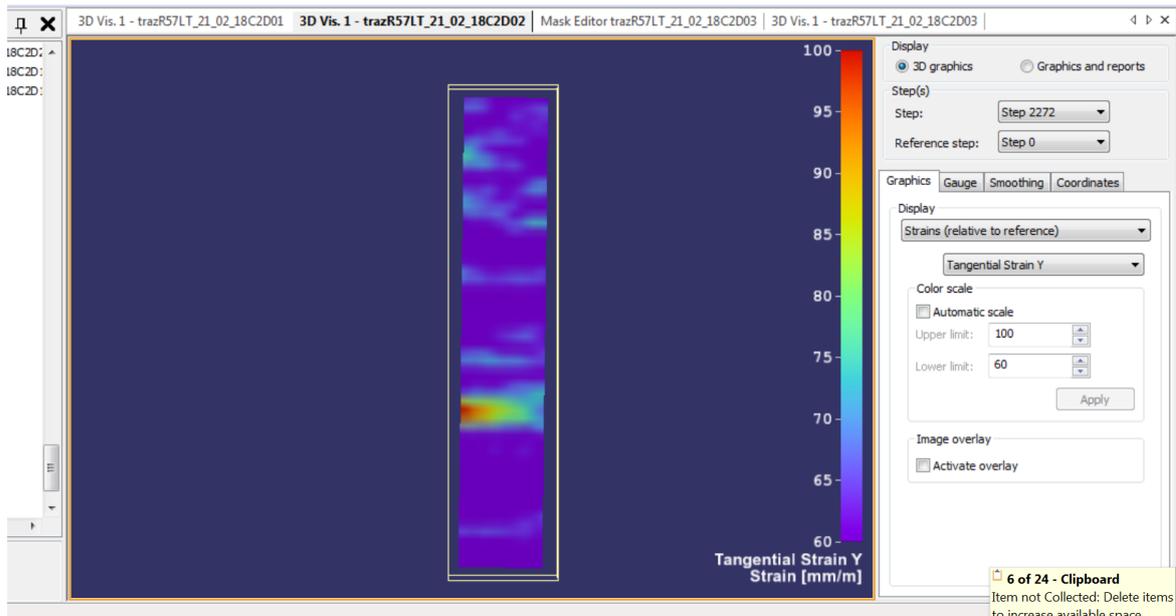


Figura 5.4: Bande allo step 2272, corrispondente ad una deformazione del 5.73%

3. Step 2364, che corrisponde ad una deformazione del 6% circa

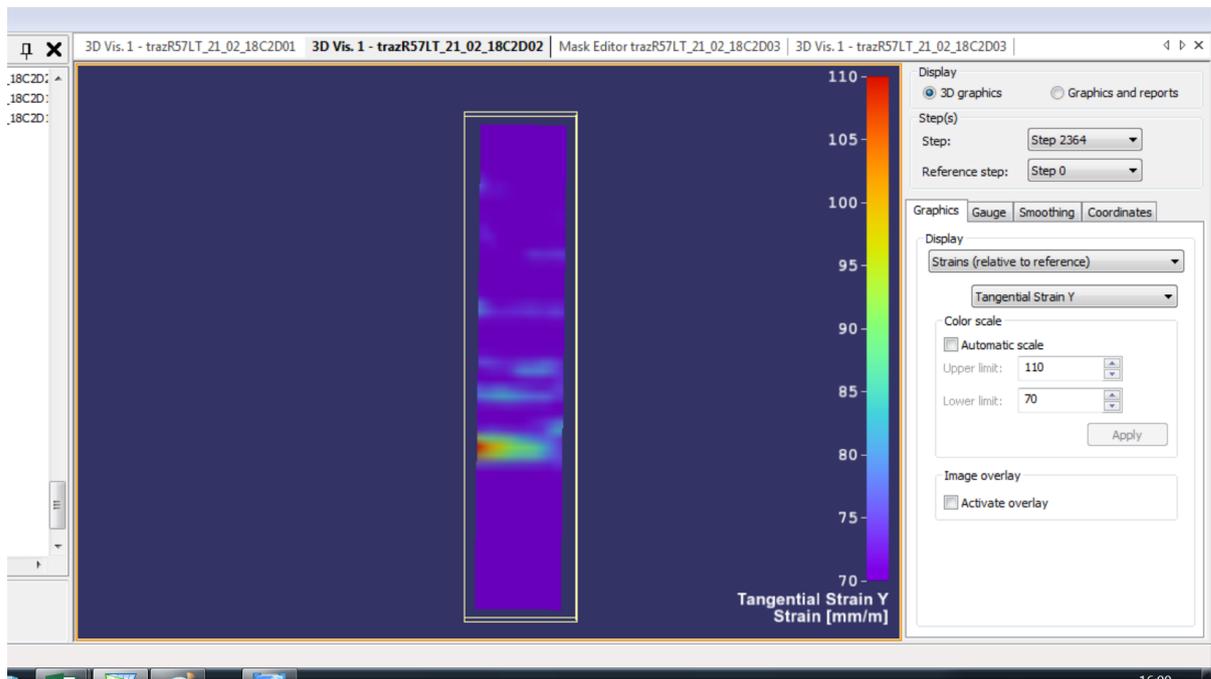


Figura 5.5 : Bande allo step 2364, che corrisponde al 6% di deformazione

Si vede come la deformazione aumenta (vedere la scala dei valori della deformazione alla destra della figura 5.5) e vi è una banda che tende ad intensificarsi, raggiungendo al suo interno valori prossimi all'11% di deformazione, che, come si vede dall'analisi delle successive figure, sarà quella che porterà a rottura il campione.

Gli ultimi due step che sono riportati nelle figure 5.6 e 5.7 corrispondono a bande che da B si sono trasformate in tipo C e sono quelle che portano a rottura il componente. In particolare si è focalizzata l'attenzione sulla banda macroscopica più importante, che causerà la rottura del componente:

4.Step 2783, con deformazione del 7.6%

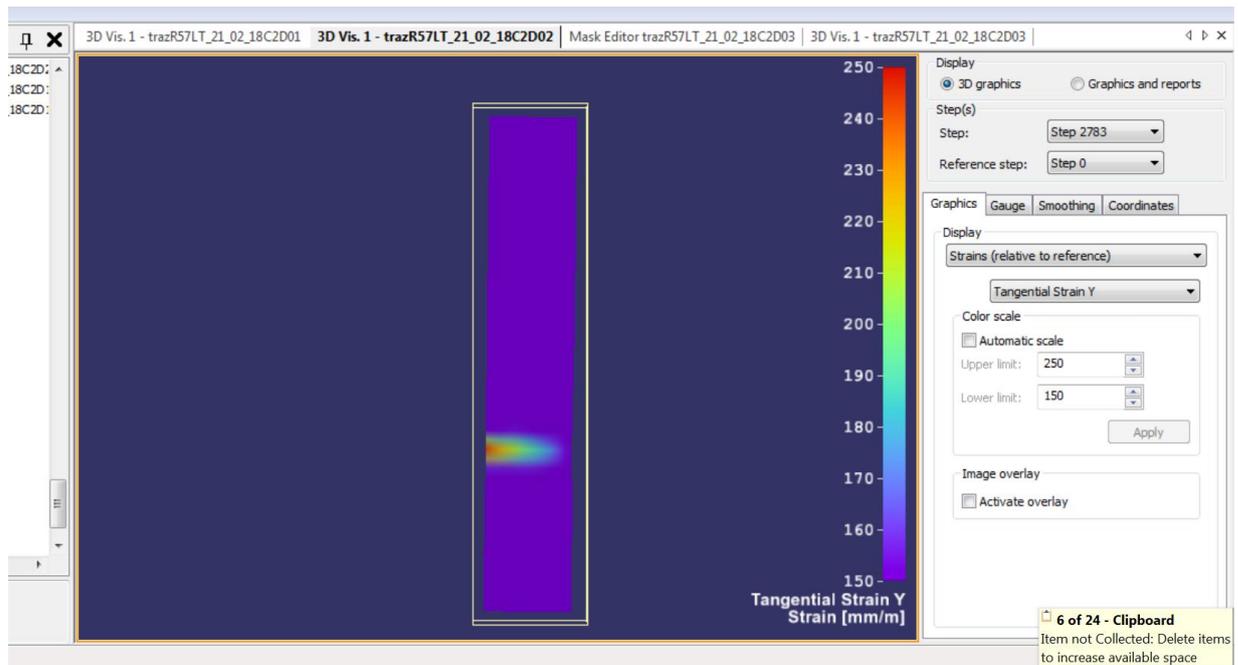


Figura 5.6: Banda stazionaria divenuta di tipo C allo step 2783, con deformazione del 7.6%

Si vede come all'interno della banda si raggiungono deformazioni prossimi al 25%, rispetto alla deformazione media calcolata dall'estensimetro, che è pari al 7.6%

5.Step 2879, poco prima della rottura, corrispondente all'8% di deformazione circa:

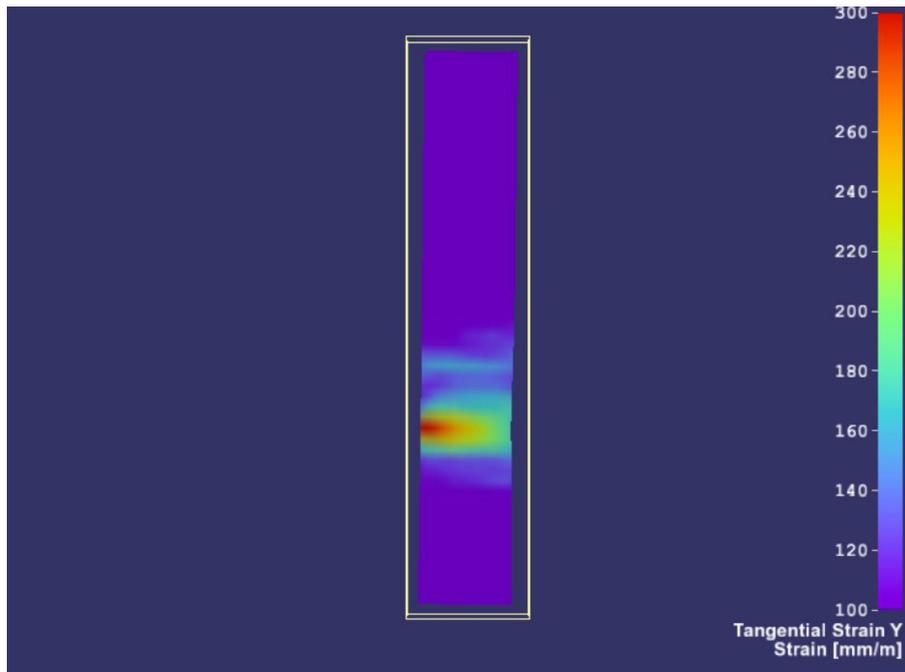


Figura 5.7 : Banda di tipo C allo step 2879, poco prima della rottura, alla deformazione media di circa l' 8%

Si vede bene che la banda si è ingrandita molto ed è stazionaria di tipo C e questa porterà a rottura il componente.

## 5.2 Panoramica dei campioni trazionati

Sono state trazionate altri campioni: R58LT, R63L, R64L. Si è avuto che per quanto riguarda la deformazione i campioni R58LT e R63L si è utilizzata una frequenza di foto rispettivamente pari a 2 Hz e 5Hz, che si è rilevata piccola e talvolta non si è riusciti ad avere una panoramica chiara della dinamica delle bande all'aumentare della deformazione; nonostante questo è stato possibile visualizzare anche in tal caso bande di tipo stazionario.

Nelle figure 5.8 e 5.9 sono riportate una panoramica delle bande osservate, rispettivamente per i campioni R58LT e R64L, all'inizio della deformazione plastica e poco prima che il componente arrivasse a rottura, quando le bande sono diventate maggiori e, presumibilmente, di tipo C:

- R58LT:

Il campione R58LT è stato messo in trazione ad una velocità di deformazione pari a  $6.1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , con una frequenza di acquisizione delle foto pari a 2 Hz. Nella figura 5.8 è riportata la curva tensione-deformazione, in cui si focalizza su particolari tratti della deformazione, dove si vede bene la localizzazione della deformazione sul campione rilevata dal DIC.

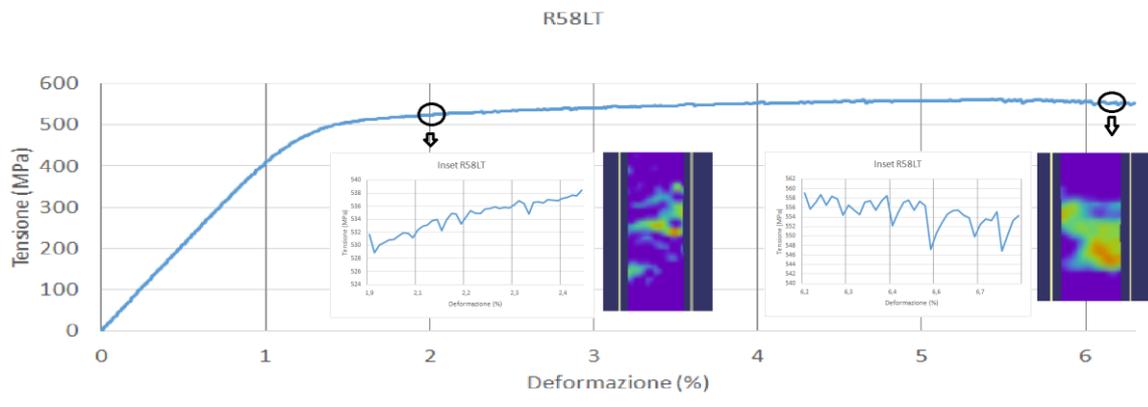


Figura 5.8: Panoramica delle bande osservate sulla lega R58LT

Nella figura 5.9 si mostra la deformazione massima raggiunta dalla zona interessata che porterà a rottura il componente, che raggiunge valori superiori al 20%:

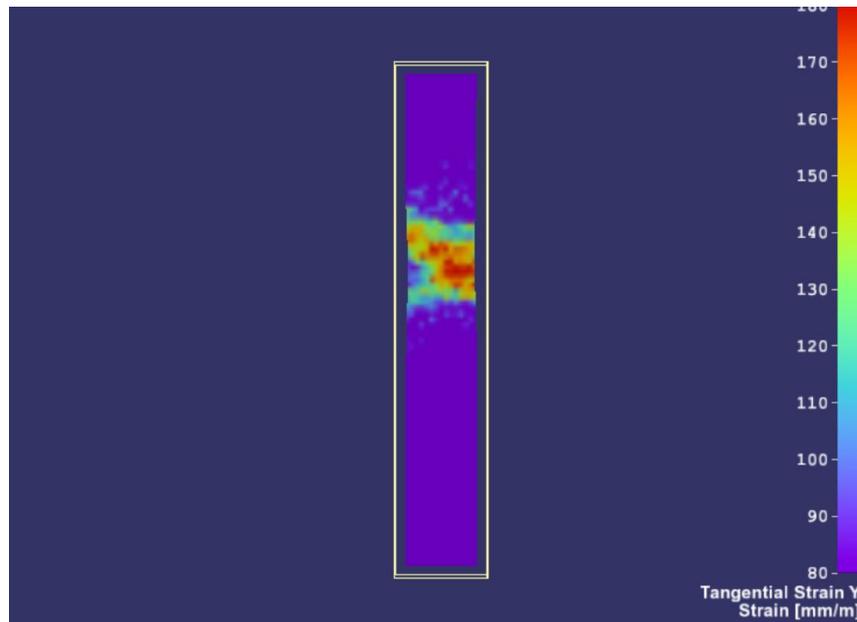


Figura 5.9: Deformazione massima raggiunta nel campione R58LT prima della rottura del componente

- R64L:

Il campione R64L è stato messo in trazione ad una velocità di deformazione pari a  $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , con una frequenza di acquisizione delle foto pari a 5 Hz. In figura 5.10 si riporta l'andamento della curva tensione-deformazione, con particolari tratti di deformazione plastica messi in evidenza, dove si focalizza l'attenzione sullo sviluppo delle bande localizzate di deformazione.

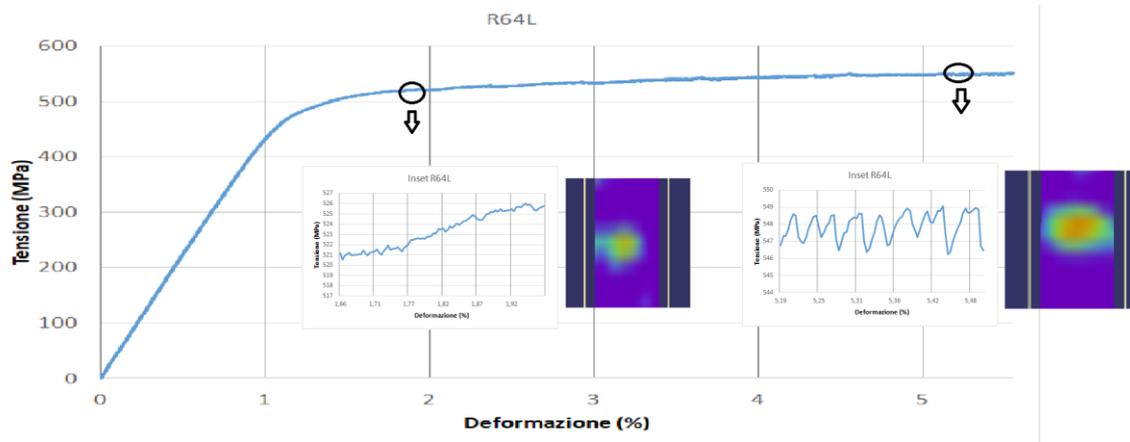


Figura 5.10: Panoramica delle bande osservate nella lega R64L

Nella figura 5.11 si mostra la deformazione massima raggiunta dalla lega che porterà a rottura il componente, visibile attraverso il software “ISTRA 4D”:

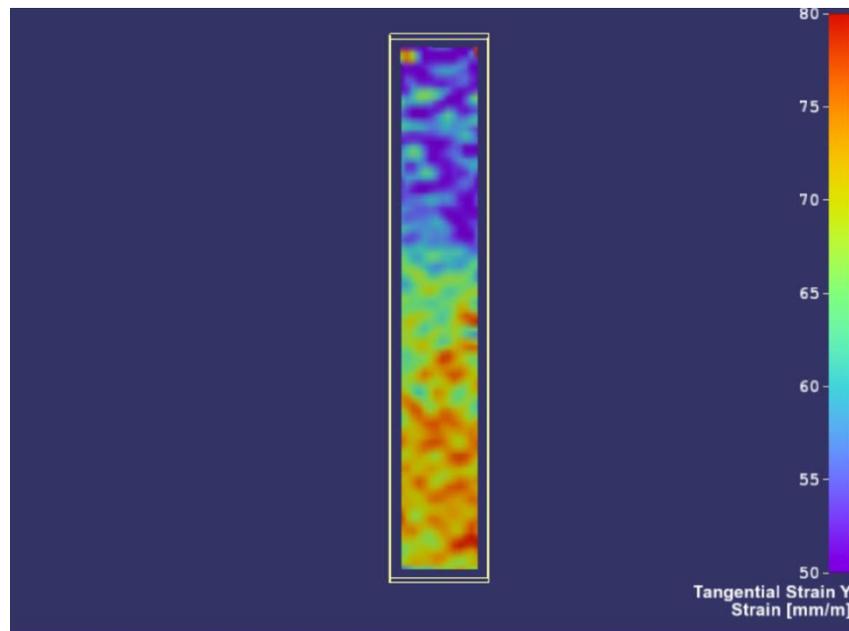


Figura 5.11: Deformazione massima nella lega R64L

- R63L:

In figura 5.12 è mostrato l'andamento della curva tensione-deformazione del campione R63L, traziionato con una velocità di deformazione pari a  $2.6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , con una frequenza di acquisizione delle foto pari a 10 Hz.

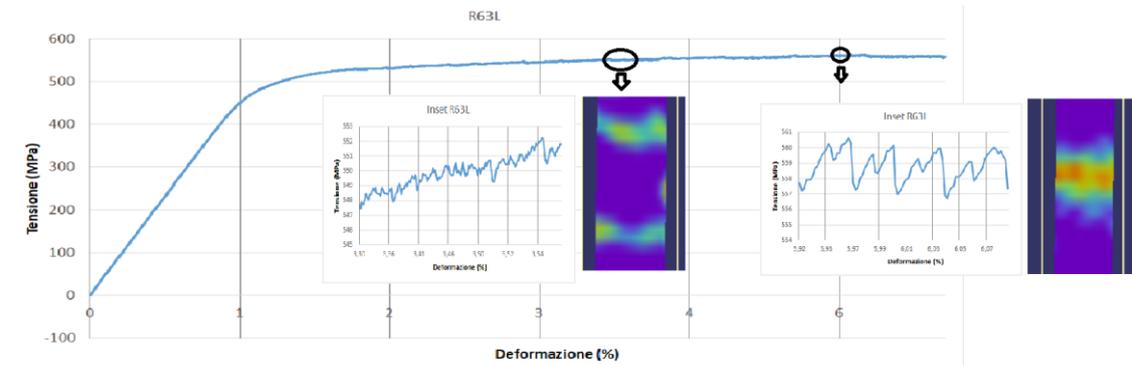


Figura 5.12: Panoramica sulle bande PLC nella lega R63L

In figura 5.13 è mostrata la zona di massima deformazione calcolata dal software che porterà a rottura il campione; si vede che si raggiunge una deformazione massima sulla banda di tipo C che raggiunge valori maggiori del 10%.

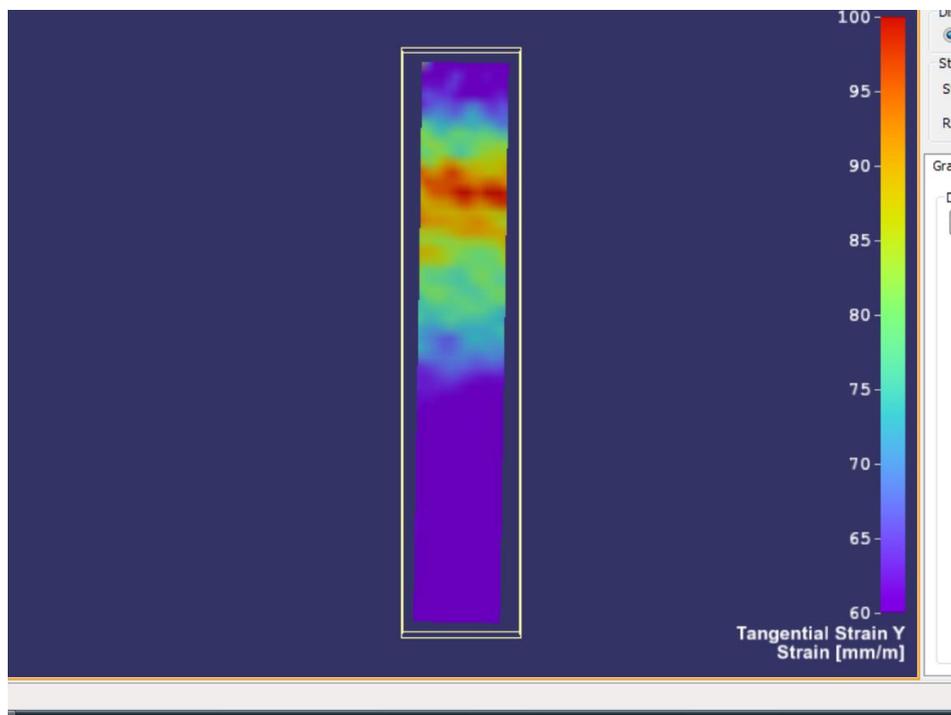


Figura 5.13: Deformazione massima calcolata dal software nella banda di tipo C che raggiunge almeno il 10% e porta a rottura il campione

Il campione R63L è stato fotografato, come il R57LT, con una frequenza di 10 Hz e, pertanto, in tali campioni è stato potuto osservare molto meglio il fenomeno PLC, dove si sono osservate delle bande stazionarie, classificabili inizialmente di tipo B, che alla fine si ingrandiscono, trasformandosi, presumibilmente, in bande di tipo C, che, pertanto portano a rottura il campione.

Nelle figure 5.12 e 5.13 sono mostrati degli scatti relativi alla formazione di tali bande, sempre prendendo i casi di inizio di deformazione plastica, quando le bande sono ancora piccole e sono state classificate come di tipo B, e, poco prima della rottura, quando le bande diventano più grandi e sono state classificate come di tipo C:

- R57LT:

Il campione R57LT è stato messo in trazione ad una velocità di deformazione pari a  $2.8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  con una frequenza di acquisizione delle foto pari a 10 Hz. In figura 5.14 si mostra l'andamento della curva tensione-deformazione, dove sono chiaramente visibili delle bande localizzate di deformazione in due particolari tratti di deformazione plastica.

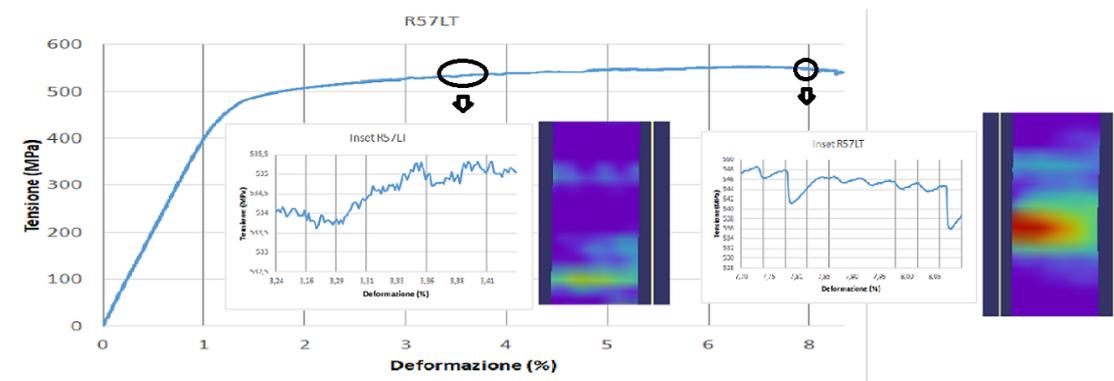


Figura 5.14: Panoramica sulle bande PLC osservate nella lega R57LT

La deformazione massima raggiunta nella zona interessata è già stata mostrata nella figura 5.7 e si vede che raggiunge valori prossimi al 30%.

- R66L:

L'andamento della curva tensione-deformazione nel campione R66L è mostrata in figura 5.15, dove le foto sono state acquisite con una frequenza di 10Hz, la velocità di deformazione è stata stimata pari a  $2.7 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , imponendo al cilindro una velocità di traslazione pari a  $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ mm/s}$ .

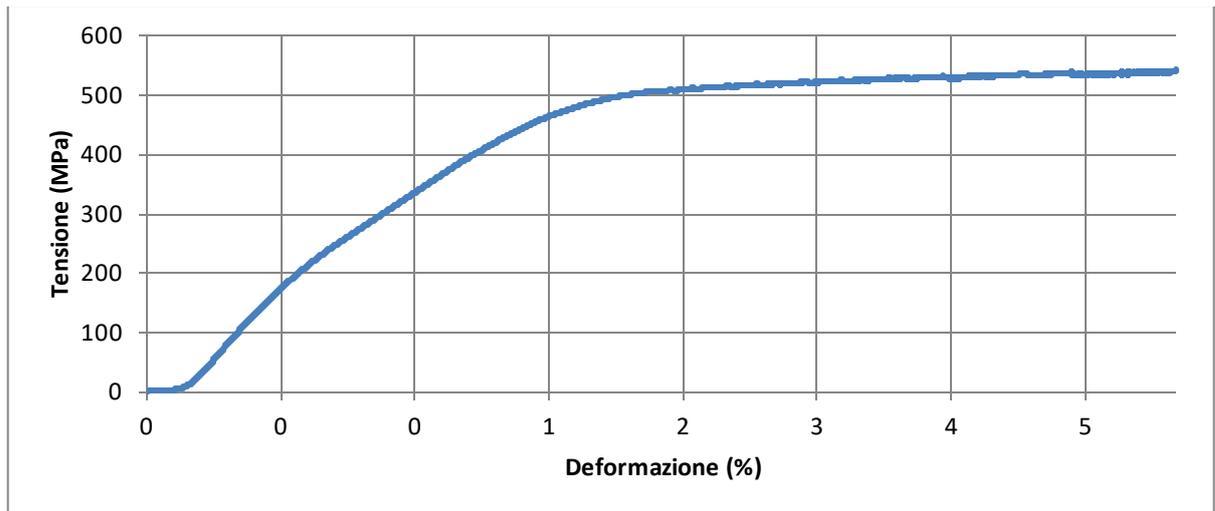


Figura 5.15: Andamento della curva tensione-deformazione nella lega R66L

Nella figura 5.16 è mostrato la deformazione massima raggiunta dalla zona interessata poco prima della rottura visibile attraverso il software.

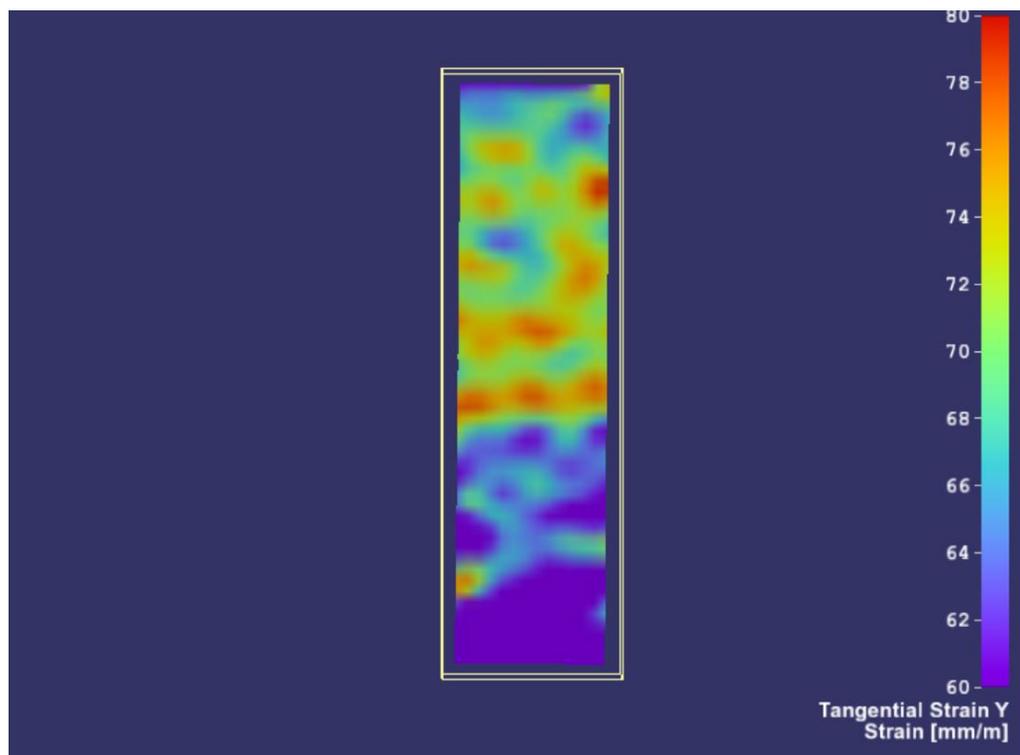


Figura 5.16: Deformazione massima calcolata dal software nella lega R66L

- R65L

In figura 5.17 è mostrata la curva tensione-deformazione del campione R65L, acquisita con frequenza delle foto pari ad 1Hz, con una velocità di deformazione pari a  $1.6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , imponendo una velocità di traslazione al pistone pari a  $6 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$ .

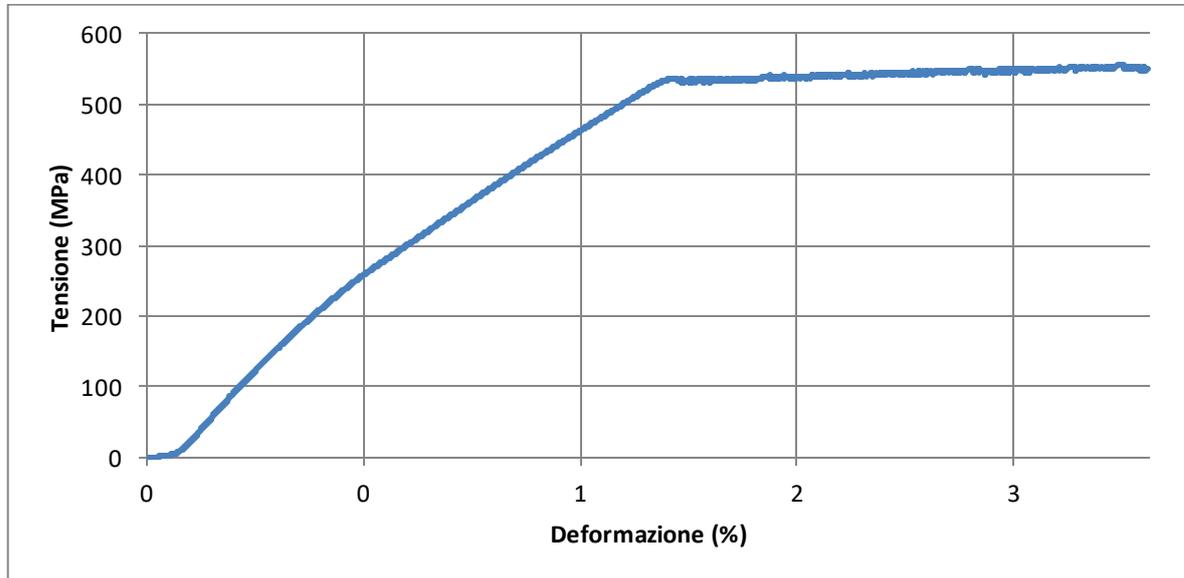


Figura 5.17: Andamento tensione-deformazione nella lega R65L

In tale caso la rottura è avvenuta nella zona al di fuori della regione di interesse considerata, pertanto non è stata possibile stimare la deformazione massima a rottura del campione nella zona interessata, presumendo dal grafico 5.17, che essa sia dovuta ad una banda di tipo C. Nella regione di interesse considerata si vedono prevalentemente bande stazionarie, classificate di tipo B.

In figura 5.18 è mostrata la distribuzione della deformazione nel campione, con la zona di rottura non presente.

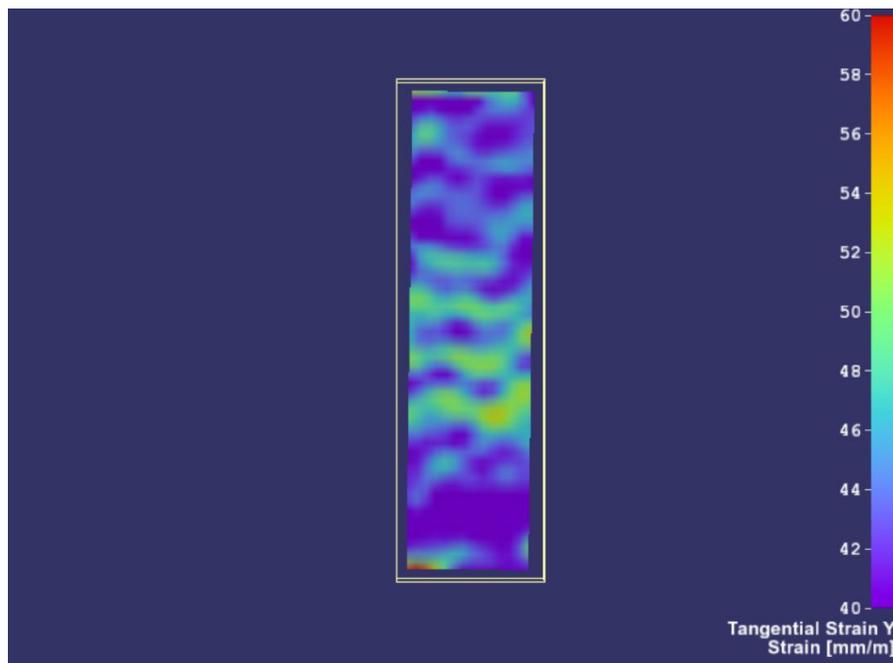


Figura 5.18: Distribuzione della deformazione nella lega R65L, con zona di rottura non all'interno della ROI

- R56LT:

In figura 5.19 è mostrata l'andamento della curva di tensione-deformazione del campione R56LT, traziionato ad una velocità di deformazione di  $6 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ , imponendo al cilindro una velocità di traslazione di  $3 \cdot 10^{-2} \text{mm/s}$ . Si è imposta una frequenza di acquisizione delle immagini pari a 17Hz, che si è rilevata essere troppo alta per la fotocamera utilizzata. Infatti le immagini sono apparse molto rumorose, ma, nonostante questo, poco prima della rottura si è riusciti a valutare la deformazione massima nella zona interessata calcolata dal software, che arriva a raggiungere valori superiori al 15%, come mostrato nella figura 5.20.

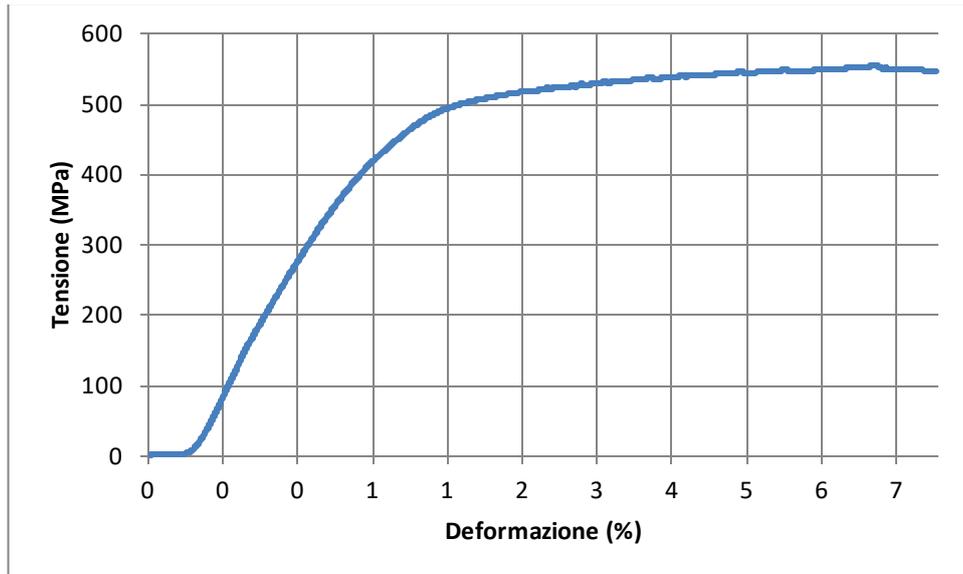


Figura 5.19: Andamento tensione-deformazione lega R56LT

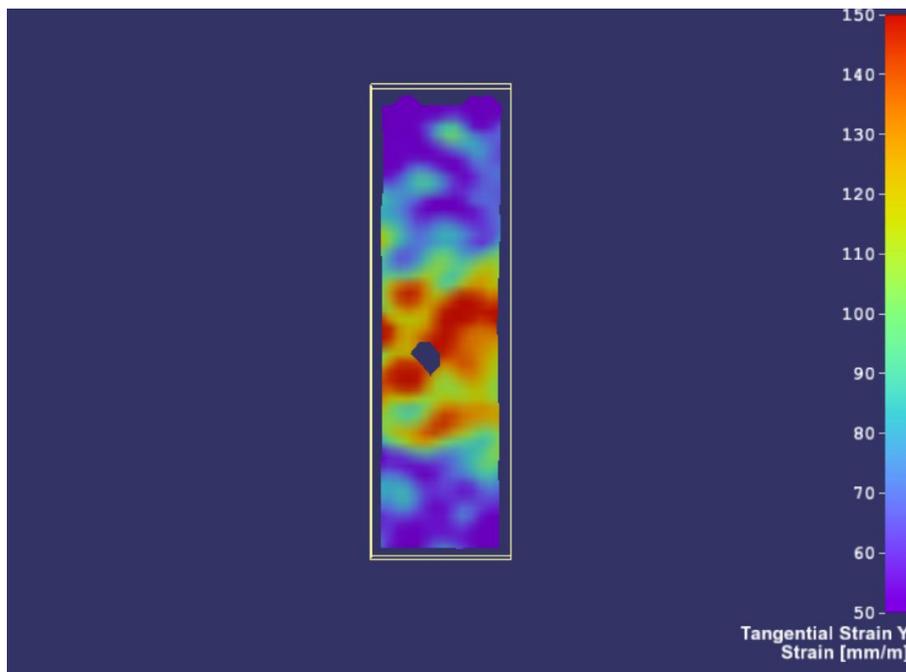


Figura 5.20: Deformazione massima calcolata dal software nel campione R56LT

In seguito, nella tabella 5.1, si evidenzia il comportamento delle leghe trazionate:

Campione	Frequenza d'acquisizione(Hz)	velocità di deformazione( $s^{-1}$ )	Tipo banda	Max deformazione a rottura(%)	Osservazioni	Note sulla superficie di frattura
R57LT	10	$2.8 \cdot 10^{-4}$	B,C	30	Dall'analisi della curva	2 bande
R58LT	2	$6.1 \cdot 10^{-5}$	B,C	Maggiore del 20%	Dall'analisi della curva	Bande multiple
R64L	5	$5 \cdot 10^{-4}$	B,C	Non visibile	Dall'analisi della curva	Banda singola
R63L	10	$2.6 \cdot 10^{-4}$	B,C	Maggiore di 11%	Dall'analisi della curva	banda singola
R66L	10	$2.7 \cdot 10^{-4}$	B,C	Non visibile	Dall'analisi della curva	Banda singola
R56LT	17	$6 \cdot 10^{-4}$	B,C	Maggiore del 15%	Frequenza troppo alta	Bande multiple
R65L	1	$1.6 \cdot 10^{-5}$	B,C	Non visibile	Rottura fuori dalla ROI	2 bande

Tabella 5.1: Comportamento delle leghe trazionate

Dalla tabella 5.1 emergono le seguenti osservazioni:

- Nonostante le diverse velocità di deformazione imposte ai vari campioni, le bande osservate sono per lo più stazionarie e classificabili di tipo B e C;
- Il metodo DIC ha mostrato i tratti di localizzazione della deformazione sui campioni, ma la classificazione delle bande è stata fatta anche attraverso l'analisi delle varie curve tensione-deformazione;
- Nella maggior parte dei campioni la massima deformazione a rottura risulta non stimabile e una delle cause può essere ricercata nel fatto che la banda che porta a rottura il componente può non essere nel tratto di superficie analizzato dal DIC;
- Analizzando le superfici di frattura dopo la rottura del componente, si è visto che in alcuni campioni vi sono più bande che si sono sviluppate;
- Nella maggior parte dei campioni analizzati si può pensare che le bande di tipo B si sviluppano, trasformandosi in bande di tipo C all'aumentare della deformazione, portando a rottura il componente.

## 6. Conclusioni

In questo progetto di ricerca la finalità è stata quella di mettere a punto il sistema di correlazione di immagini digitali, per lo studio delle bande PLC all'interno dei campioni della lega 8090T8 e per la valutazione della deformazione all'interno di esse al momento della rottura.

A tal fine è stata utilizzata la seguente metodologia: in una prima fase è stata fatta la messa a punto del sistema valutando l'influenza del calibratore sugli errori di misura calcolati dal DIC sulla deformazione, mediando in regioni di misura diverse e confrontando tali valori con quelli forniti da un estensimetro MTS. Si sono utilizzati due calibration target: il primo, con supporto di alluminio e area da 1296 mm<sup>2</sup>, realizzato attraverso "Autocad" e il secondo, con supporto di vetro e acquistato da un'azienda specializzata nel settore, con area da 324 mm<sup>2</sup>.

Si è visto che il calibratore con supporto di vetro fornisce risultati più accurati soprattutto in caso di piccole deformazioni e con regioni di misura più piccole, sottoponendo a tensione campioni di polietilene e di acciaio.

Nell'analisi del pattern, eseguita in una seconda fase, si è visto che con l'utilizzo del calibration target con area da 324 mm<sup>2</sup>, era possibile mantenere un pattern con fondo nero puntinato di bianco nei vari campioni, in quanto il software manteneva risultati accurati nel calcolo della deformazione. Tale scelta ha reso possibile la risoluzione del problema dato dallo sgretolamento di un pattern realizzato con fondo bianco e puntinato di nero, auspicato dal manuale del software, con un calibratore con supporto di vetro, che veniva a verificarsi in caso di maggiori deformazioni.

In seguito sono stati trazionati diversi campioni della lega Al-Li 8090, valutando le localizzazioni della deformazione all'interno di essi e si è osservato che la concentrazione delle deformazioni nelle bande al momento della rottura può raggiungere valori molto più alti rispetto all'allungamento a rottura.

Nell'analisi del campo di deformazione attuato attraverso il software "ISTRA 4D", sono state osservate per lo più bande stazionarie, classificate, attraverso l'utilizzo della curva tensione-deformazione, come bande di tipo B e C.

## Riferimenti bibliografici

- [1] B. Pan; K. Qian; H. Xie; A. Asundi; “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science and Technology*, vol.20, 2009
- [2] P.Mazzoleni, “Uncertainty estimation and reduction in digital image correlation measurements”, Phd Thesis, Politecnico di Milano, 2013
- [3] R.Coatti, “Analisi comparativa di metodi ottici per la meccanica sperimentale”, Tesi di Laurea, Università di Bologna, 2008-09
- [4] M.Palanca, “Ottimizzazione dei parametri di acquisizione ed elaborazione per l’analisi dei segmenti ossei tramite correlazione digitale di immagini”, Tesi di Laurea, Università di Bologna, 2012/13
- [5] G.Musotto, “Digital Image correlation: applicazione di tecniche convenzionali e sviluppo di soluzioni innovative per la stima e l’incremento dell’accuratezza”, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2011/12
- [6] Ahmet Yilmaz (2011) The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings, *Science and Technology of Advanced Materials*, 12:6, 063001, DOI: 10.1088/1468-6996/12/6/063001
- [7] Z.Jiang,Q.Zhang,H.Jiang,Z.Chen,X.Wu, “Spatial characteristics of the Portevin Le Chatelier deformation bands in Al-4at%Cu polycrystals”, *Materials Science and Engineering A* 403 (2005) 154–164
- [8] N.Ranc, D.Wagner, “Experimental study by pyrometry of Portevin–Le Chatelier plastic instabilities—Type A to type B transition”, *Materials Science and Engineering A* 474 (2008) 188–196
- [9] L.Montevecchi, “Caratteristiche meccaniche delle leghe Al-Li”, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 1990-1991
- [10] H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas, “Crossover from continuous to discontinuous propagation in the Portevin–Le Chatelier effect”, *Acta Materialia* 58 (2010) 1342-1349
- [11] K. Renard, S. Ryelandt, P.J. Jacques, “Characterisation of the Portevin-Le Châtelier effect affecting an austenitic TWIP steel based on digital image correlation”, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 2969–2977
- [12] Sun Yaofeng, John H.L. Pang, “Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images”, *Optics and Lasers in Engineering* 45 (2007) 967–974
- [13] Sze-Wei Khoo , Saravanan Karuppanan, Ching-Seong Tan, “A review of surface deformation and strain measurement using two-dimensional digital image correlation”, *Metrology and measurement systems*, Vol. 23 (2016), No. 3, pp. 461–480
- [14] Liping Yu, Bing Pan, “The errors in digital image correlation due to overmatched shape functions”, *Measurement Science and Technology*, 26 (2015) 045202 (9pp)

- [15] F.Tenaglia, “Sviluppo di tecniche per la misurazione di spostamenti e deformazioni con correlazione di immagini digitali (DIC)”, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2016
- [16] Zeren Gao, Qingchuan Zhang , Yong Su, Shangquan Wu, “Accuracy evaluation of optical distortion calibration by digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering* 98 (2017) 143–152
- [17] Y.H. Huang, C.Quan, C.J. Tay, L.J. Chen, “Shape measurement by the use of digital image correlation”, *Optical Engineering* 44(8), 087011 (August 2005)
- [18] Schreier HW, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Exp Mech* 2002;42(3):303–10
- [19] Xiaohai Xu, Yong Su, Qingchuan Zhang, “Theoretical estimation of systematic errors in local deformation measurements using digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering* 88 (2017) 265–279
- [20] Xiang Guo, Jin Liang, Zhenzhong Xiao, Binggang Cao, “Digital image correlation for large deformation applied in Ti alloy compression and tension test”, *Optik* 125 (2014) 5316–5322
- [21] Bing Pan , Anand Asundi, Huimin Xie , Jianxin Gao, “Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements”, *Optic and Lasers in Engineering* 47 (2009) 865-874
- [22] G. Crammond, S.W. Boyd, J.M. Dulieu-Barton, “Speckle pattern quality assessment for digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering* 51 (2013) 1368–1378
- [23] Tao Hua, Huimin Xie, Simon Wang, Zhenxing Hu , Pengwan Chen , Qingming Zhang, “Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation”, *Optics and Laser Technology* 43 (2011) 9-13
- [24] Hubert W. Schreier, Joachim R. Braasch, Michael A. Sutton, “Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation”, *Optical Engineering* 39(11) 2915–2921 (November 2000)
- [25] H. Ait-Amokhtar , P. Vacher , S. Boudrahem, “Kinematics fields and spatial activity of Portevin–Le Chatelier bands using the digital image correlation method”, *Acta materialia* 54 (2006) 4365-4371
- [26] Y. Cai, Q. Zhang, S. Yang, S. Fu, Y. Wang, “Experimental Study on Three-Dimensional Deformation Field of Portevin–Le Chatelier Effect Using Digital Image Correlation”, *Experimental Mechanics* (2016) 56:1243–1255 DOI 10.1007/s11340-016-0138-1
- [27] Wei Tong , Hong Tao , Nian Zhang , Louis G.Hector Jr. , “Time-resolved strain mapping measurements of individual Portevin–Le Chatelier deformation bands”, *Scripta Materialia* 53 (2005) 87–92
- [28] Van-Thuong Nguyen, Seong-Jin Kwon, Oh-Heon Kwon, Young-Suk Kim, “Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method”, *Procedia Engineering* 184 ( 2017 ) 381 – 389

- [29] G.F. Bomarito, J.D. Hochhalter, T.J. Ruggles, A.H. Cannon, “Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization”, *Optics and Lasers in Engineering* 91 (2017) 73–85
- [30] Bing Pan, Zixing Lu, Huimin Xie, “Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2010) 469-477
- [31] Ritupan Sarmah, G. Ananthakrishna, “Correlation between band propagation property and the nature of serrations in the Portevin–Le Chatelier effect”, *Acta Materialia* 91 (2015) 192–201
- [32] Samuele Salti, Luigi Di Stefano, “Modello della telecamera, calibrazione e rettificazione”, [http://www.t3lab.it/wp-content/uploads/download/20110512/02%20-%20Camera\\_Model-Calibration-Rectification.pdf](http://www.t3lab.it/wp-content/uploads/download/20110512/02%20-%20Camera_Model-Calibration-Rectification.pdf)
- [33] Róbert Huňady, Martin Hagara, Martin Schrötter, “Impact Assessment of Calibration Parameters on Accuracy Method of Digital Image Correlation”, *Acta Mechanica Slovaca* 16 (2): 6 - 13, 2012 DOI: 10.2478/v10147-012-0022-7