

POLITECNICO DI TORINO

Classe di laurea n°L-9: INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

Rilevamento con metodologia DIC-2D delle proprietà meccaniche di materiali metallici



Relatore:

Prof. Paolo Matteis

Candidato:

Luca Di Tullio

Sommario

Il lavoro di tesi che ho svolto presso il Centro Ricerche Fiat si è focalizzato sull'utilizzo pratico di un video-estensimetro in una prova di trazione quasi statica uniassiale per provini ricavati su fogli di lamiera, con l'obiettivo di valutare a posteriori l'attendibilità delle informazioni ricavate durante l'acquisizione. In particolare nel corso dell'elaborato spesso verrà fatto riferimento a una tecnica basata sulla correlazione di due immagini successive in formato digitale (Digital Image Correlation).

La macchina di prova universale fornisce l'andamento del carico istantaneo applicato in funzione del tempo. Le deformazioni misurabili con il video-estensimetro e con metodi convenzionali verranno confrontati per stabilire la completezza delle proprietà meccaniche ricavabili. In particolare nelle prove di trazione verranno impiegati due materiali dal comportamento meccanico differente: un acciaio dual phase di uso comune in campo automobilistico (DP800) e una lega di alluminio (AA7075) poco diffusa nel medesimo settore.

Lo scopo principale sarà quello di ottenere una procedura semplice, efficace e all'avanguardia che possa fornire ai progettisti di FCA una maggiore mole di informazioni sulle proprietà meccaniche dei materiali studiati.

Indice

INTRODUZIONE	5
1. LA TECNICA DELLA DIC-2D.....	8
2. ACCENNO AGLI ALGORITMI PER LA CORRELAZIONE BIDIMENSIONALE.....	13
3. CONFIGURAZIONE DELL'HARDWARE	17
3.1 VIDEOCAMERA.....	17
3.2 OBIETTIVO FOTOGRAFICO.....	20
4. PROPRIETÀ OTTICHE DELLA LUCE	24
5. LA PROVA DI TRAZIONE UNIASSIALE	27
6. CENNI SULLA CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUTIVI.....	39
7. CONFIGURAZIONE DEL SOFTWARE DIC-2D.....	43
8. ANALISI DEI MATERIALI IMPIEGATI.....	49
8.1 DP800	49
8.2 AA7075	51
9. RACCOLTA DEI DATI NUMERICI.....	55
9.1 GEOMETRIE DEI PROVINI	55
9.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	58
9.3 ACQUISIZIONI DELLE IMMAGINI.....	59
9.4 SINCRONIZZAZIONE DEL VIDEO CON LA MACCHINA DI PROVA	61
9.5 ESTRAZIONE DEI FOTOGRAMMI DAL VIDEO	62
9.6 POST PROCESSING PRIMARIO.....	64
10. ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI.....	67
10.1 DP800 - PROVINI LISCI	67
10.2 DP800 - PROVINI INTAGLIATI (NOTCHED SPECIMEN)	83
10.3 DP800 - PROVINI FORATI	90
10.4 AA7075 – STUDIO DELLO STATO DI DEFORMAZIONE.....	96
11. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	100
12. BIBLIOGRAFIA.....	101

Introduzione

L'innovazione tecnologica in un'azienda automobilistica è l'elemento trainante più importante che consente uno sviluppo economico e di prestigio. Nel campo dei materiali il settore della ricerca è una pietra miliare per la buona riuscita del prodotto finale. Il numero di macchinari utilizzati è direttamente proporzionale alla quantità di test che si riescono a effettuare per caratterizzare le proprietà meccaniche di un materiale. È importante che venga mantenuto il cosiddetto “stato dell'arte” per ottenere un abbattimento dei costi di produzione e poter essere più competitivi nel mercato globalizzato, evitando di scendere a compromessi con la qualità dei materiali impiegati.

Nell'elaborato l'attenzione verrà rivolta a prove di trazione statica uniassiale, usando provini con diverse geometrie. Ci si concentrerà sullo studio di un nuovo metodo di misurazione delle deformazioni che possa affiancare gli estensimetri meccanici fornendo un maggior numero di informazioni.

L'analisi sperimentale delle tensioni/deformazioni è utilizzata in diversi stadi del ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione alla validazione del prototipo prima della produzione, dalle prove di sicurezza e sovraccarico fino alle prove per l'analisi di rotture in servizio, per questo motivo la prova di trazione statica uniassiale è determinante durante lo studio preliminare di un materiale.

Le informazioni acquisibili sono definite dai segnali in uscita scaturiti dalla cella di carico e dagli estensimetri meccanici a contatto. In particolare questi ultimi presentano una serie di problematiche relative all'inerzia e agli attriti limitanti dal punto di vista delle potenzialità che una prova del genere potrebbe offrire.

Attualmente in campo sperimentale utilizzare degli estensimetri meccanici per estrapolare la curva ingegneristica di un materiale è una pratica comune, un'esigenza che nasce da ragioni semplificative, in quanto spesso è sufficiente acquisire la deformazione ingegneristica del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura.

Tuttavia impiegando un estensimetro tradizionale la deformazione in uscita è valutata dall'elongazione tra le due estremità del tratto utile e vengono perse tutte le

informazioni di deformazione locale, osservabili nelle fasi della prova successive alla condizione di instabilità (strizione diffusa e locale). Maggiori informazioni verranno fornite in seguito nel capitolo dedicato alla prova di trazione.

Impiegando un video-estensimetro con la tecnica della Digital Image Correlation (DIC) si riesce a caratterizzare localmente il materiale anche dopo la condizione d'instabilità, riuscendo così a valutare tutti i picchi di deformazione locale. Inoltre essendo la procedura di misurazione priva di contatti, sono permesse delle prove in forno ad alta temperatura per le prove di creep (applicazione di un carico costante).

L'obiettivo principale della tesi è l'ottenimento delle curve tensioni-deformazione nelle approssimazioni "ingegneristiche" e "reali", come pure l'andamento delle distribuzioni di deformazione su specifiche zone di interesse della superficie in provini in lamiera con diverse geometrie.

La Digital Image Correlation viene suddivisa in tre categorie:

- DIC-2D → prova con una sola videocamera. Gli spostamenti dei punti della superficie del corpo vengono misurati solo sul piano superficiale.
- DIC-3D → prova con due o più videocamere. Gli spostamenti dei punti vengono misurati anche fuori dal piano superficiale (stereoscopia).
- DIC-3D volumetrica → prova con sistemi tomografici a raggi x. Gli spostamenti dei punti vengono misurati anche all'interno del corpo.

Il passaggio da un sistema 2D a uno 3D (o tomografico) diminuisce il grado d'incertezza delle prove effettuate, a scapito di costi maggiori, ingombri più importanti e con una macchina più complessa da configurare e da calibrare.

Avendo a che fare con provini sottili di lamiera, ci si è concentrati esclusivamente sullo studio della prima tipologia. Per comodità d'ora in avanti la Digital Immagine Correlation bidimensionale verrà abbreviata con la sigla "*DIC-2D*".

I materiali impiegati nelle prove sperimentali effettuate hanno due allungamenti a rottura differenti, i quali implicano dei determinati livelli di duttilità. Il video-estensimetro effettua la misura delle deformazioni sulla superficie esposta del provino.

I risultati ottenibili in accordo con la norma internazionale per le prove di trazione quasi-statiche [8] hanno un certo margine di variabilità a seconda della forma dei provini e della velocità della traversa mobile imposta al provino.

In genere nelle prove di trazione standard viene impostata una velocità di trazione fissa compresa tra 0,25 e 2,5 mm/s (millimetri di corsa della traversa al secondo) nel tratto sino allo snervamento, e fino a 8 mm/s dalla condizione di instabilità in poi.

Le prove ad alta velocità di deformazione (fino a 20 m/s) utilizzate in genere per simulare un crash-test saranno escluse dalla trattazione.

1. La tecnica della DIC-2D

La Digital Image Correlation può essere considerata una tecnica molto utile in campo industriale per la misurazione delle deformazioni dei materiali. Il suo recente sviluppo è legato alle migliorie tecnologiche apportate ai sensori d'immagine, in grado di acquisire un maggior numero di frame al secondo (anche fino a 2000 fps) con una risoluzione elevata.

Dopo aver registrato la prova con il video-estensimetro, si estrapola in post-processing una quantità definita di immagini digitali a vari stadi di deformazione. Successivamente con un software specifico si correlano due immagini consecutive catturate in istanti temporali differenti: nel primo frame il provino si presenta nella condizione inalterata, mentre nel frame successivo viene evidenziata una deformazione nelle due direzioni principali per l'aumento del carico applicato.

La tecnica della DIC consente di misurare gli spostamenti e le deformazioni globali e locali dal tracciamento della posizione di più riferimenti superficiali (matrice di punti) in due immagini consecutive, utilizzando un algoritmo di correlazione.

Affinché l'algoritmo funzioni correttamente viene generata una distribuzione casuale di punti di riferimento sulla superficie del provino soggetta a deformazione e inquadrata dalla telecamera. Per garantire la correlazione digitale si applica una passata di vernice bianca uniforme, e successivamente, dopo l'asciugatura, un pattern stocastico di goccioline di vernice nera denominate "*speckles*", in maniera tale da accentuare il contrasto e ripartire le due tonalità al 50% sulla superficie del provino.

La dimensione media delle goccioline di vernice dipende dalla dimensione del campo visivo (*field of view*) e dalla risoluzione delle due immagini; inoltre la distribuzione e la forma degli *speckles* è totalmente casuale e non ripetitiva.

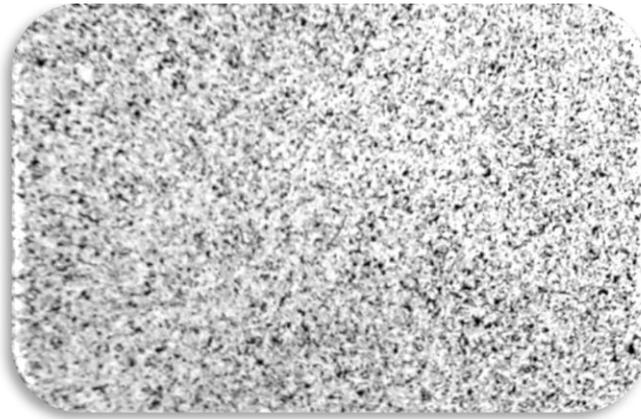


Fig. 1.1 - Pattern a "speckles" per la DIC.

Dalle prove sperimentali risulta che una vernice di tipo acrilico aderisce meglio alle superfici metalliche, rispetto alle vernici a base d'acqua. È meglio effettuare la prova di trazione subito dopo l'applicazione della vernice, evitando che quest'ultima diventi secca e che comporti problemi di scrostatura durante la deformazione del provino.

All'aumentare della deformazione unidirezionale si nota uno spostamento globale dei puntini neri nella stessa direzione in cui si muove la trasversa mobile della macchina di prova. La correlazione d'immagine digitale è basata sul riconoscimento globale del pattern stocastico e sulla analisi della differenza di posizione degli speckles tra le due immagini acquisite. È proprio il gradiente di posizione dei puntini che permette di ricavare informazioni sugli spostamenti e sulle deformazioni.

Nelle tecniche di misurazione ottica bidimensionale (DIC-2D) le coordinate, gli spostamenti e le deformazioni sono determinate unicamente sulla superficie dell'oggetto. Ciò comporta che la correlazione digitale risulta limitata alle deformazioni locali tangenti alla superficie, tuttavia è possibile determinare anche la riduzione di spessore applicando la conservazione del volume. Se la componente assiale è quella prevalente, nei provini sottili, la deformazione plastica equivalente è molto simile alla deformazione reale assiale e quindi costante lungo lo spessore.

L'immagine digitalizzata è composta da una matrice di pixel, ognuno dei quali contiene un numero che indica il livello di luminosità (scala di grigi) o il colore RGB. Per il pattern stocastico a macchioline è sufficiente l'utilizzo di una telecamera monocromatica, pertanto ogni pixel corrisponde a un numero intero che esprime

l'intensità del suo tono di grigio (variabile tra 0 e 16 per le immagini a 4 bit, 0 e 256 per quelle a 8 bit, ecc...). Il numero delle diverse gradazioni luminose è calcolabile dalla potenza 2^N , dove "N" è il numero di bit dell'immagine digitale acquisita.

Il valore d'intensità luminosa massima raggiungibile rappresenta la profondità dell'immagine e viene chiamato "*bit depth*" dell'immagine. L'applicazione del pattern (motivo grafico) di speckles sulla superficie del componente rende le intensità dei diversi pixel dell'immagine di tale superficie diverse tra loro in maniera idealmente stocastica.

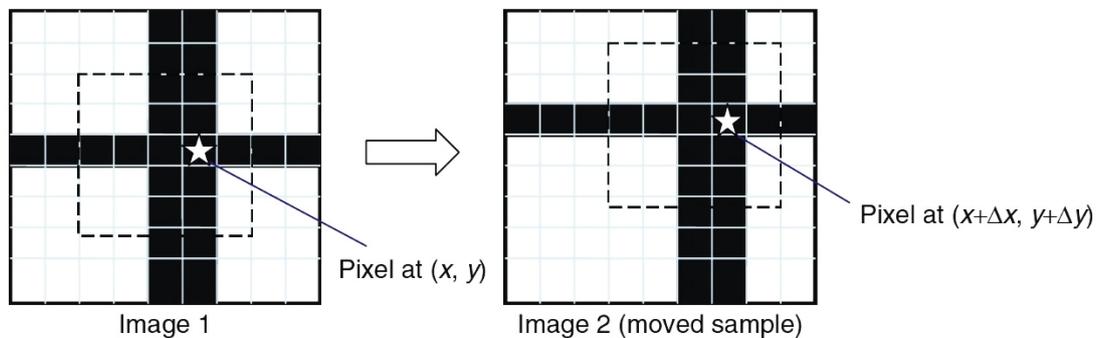


Fig. 1.2 – Immagini digitali prima e dopo la deformazione.

I contorni di aggregati di pixel ripetuti sulla superficie del provino definiscono i *subset* (o facet), ossia delle sottomatrici quadrate dell'immagine. La tecnica della DIC-2D si basa sulla ricerca del massimo nella matrice di correlazione tra le intensità luminose dei pixel all'interno dei subset in due o più immagini in sequenza, in maniera tale da ottenere gli spostamenti.

Una volta portata a termine la correlazione, con l'analisi dei valori di intensità luminosa, tra il subset dell'immagine di riferimento (frame prima della deformazione) e quello del fotogramma successivo (frame con il provino deformato) si conosce lo spostamento subito dagli speckles all'interno della sottomatrice considerata.

Per esempio, stabilendo una sottomatrice di 21x21 pixel, il subset centrato sul pixel A di coordinate (900,300) si colloca orizzontalmente dalla colonna 889 alla 910 e verticalmente dalla riga 289 alla 310.

La distribuzione delle intensità luminose dei pixel del subset costituisce una sorta di “impronta” del pixel su cui tale subset è centrato e, nelle ipotesi di pattern perfetto, è virtualmente impossibile che sequenze di subset centrati su pixel diversi abbiano la stessa distribuzione di intensità luminosa. In queste ipotesi ideali l’impronta è idonea al riconoscimento di ogni pixel tra tutti gli altri dell’immagine.

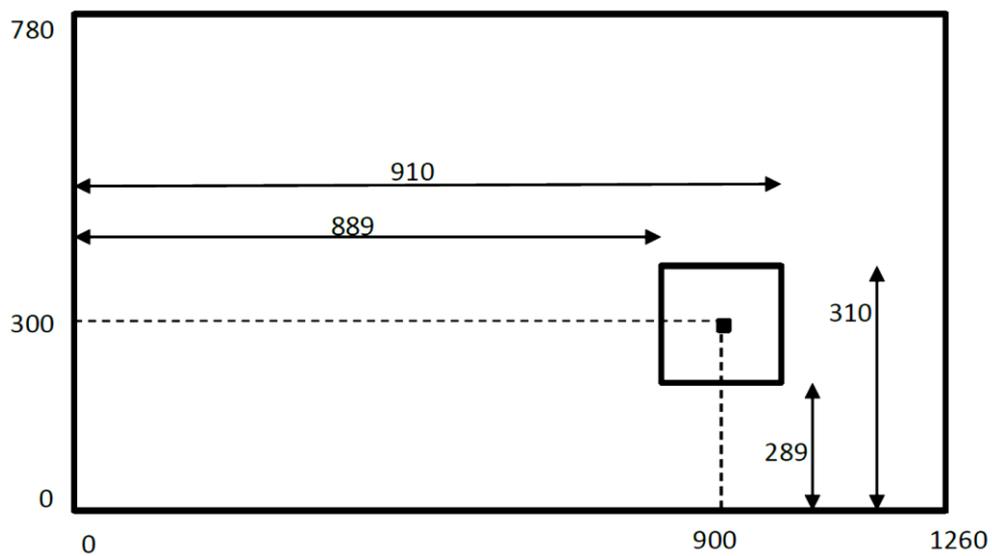


Fig. 1.3 - Esempio di subset quotato sul sistema di coordinate-pixel.

Il subset rimane riconoscibile, entro i limiti accettabili dalla deformazione, attraverso l'intensità luminosa dei suoi pixel anche in immagini acquisite a diversi stadi di deformazione, oggettivando e quantificando la sua impronta con le funzioni matematiche dette “di correlazione”. Gli algoritmi per identificare i subset e le loro posizioni sono applicati all'interno di coppie di fotogrammi: la prima immagine è relativa al componente/provino a riposo (prima della deformazione), mentre la seconda alla generica configurazione corrente deformata.

Rimanendo sull'esempio precedente, se la nuova posizione deformata del subset risulta $A^* = (950, 260)$, allora lo spostamento del pixel centrale del subset u_A vale (50, -40).

Se la faccetta adiacente in direzione orizzontale si trovava originariamente centrata sul pixel B in posizione (910,300), il passo Δx per il calcolo dello strain è di 10 pixel, e supponendo che la faccetta nella configurazione deformata si trovi in posizione $B^* = (970, 240)$, allora il suo spostamento risulta di (60, -60) e la deformazione ε_x può essere facilmente calcolata:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \cong \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_{xB} - u_{xA}}{x_B - x_A} = \frac{60 - 50}{910 - 900} = 1$$

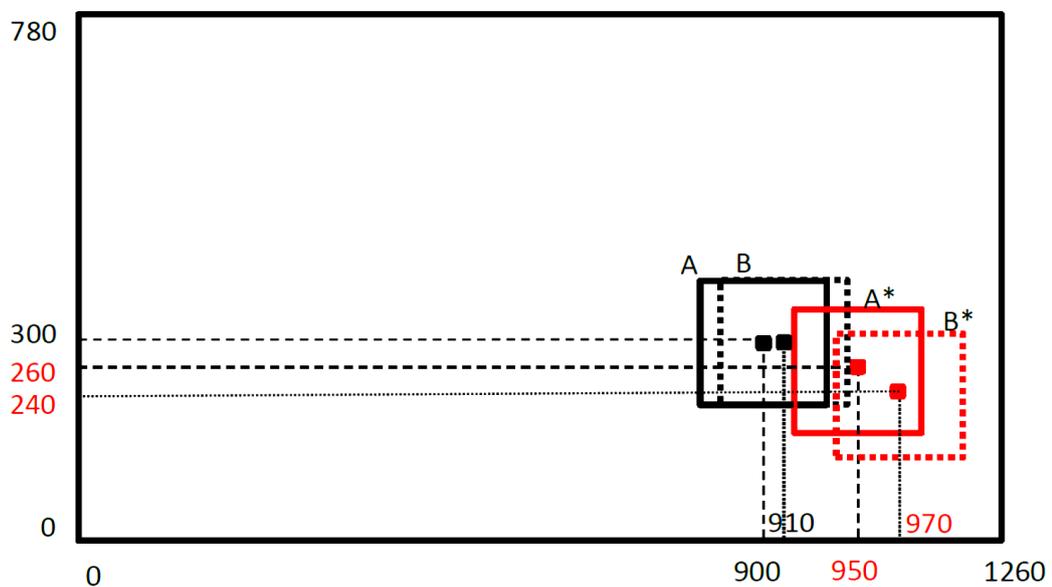


Fig. 1.4 - Calcolo della deformazione assiale con speckles adiacenti.

Impiegando lo stesso ragionamento è possibile calcolare le altre deformazioni nel piano ε_y e ε_{xy} .

Le coordinate di ogni punto, così come le distanze e gli spostamenti sono esprimibili in pixel. Per dare un senso fisico a tali grandezze è necessario individuare il rapporto *mm/pixel* da una distanza qualsiasi visibile nell'inquadratura misurata prima della prova, dividendo la misura ottenuta in millimetri al corrispettivo valore in pixel nel fotogramma con il componente non soggetto a deformazione. Riguardo alle deformazioni lineari, essendo ricavate da un rapporto tra grandezze della stessa specie, è possibile ottenerle senza la necessità di conoscere le misure reali del provino.

2. Accenno agli algoritmi per la correlazione bidimensionale

La procedura della DIC-2D, già introdotta nel capitolo precedente, consta di tre step fondamentali:

- realizzazione del pattern stocastico sulla superficie piana inquadrata dalla telecamera del provino.
- registrazione della prova di trazione con il video-estensimetro.
- applicazione del software DIC-2D per ottenere gli spostamenti e le deformazioni nel piano.

Durante il terzo step entrano in gioco algoritmi di correlazione che servono a individuare tutti i subset presenti nelle due immagini a confronto (indeformata e deformata) e collegarli tra di loro, creando una corrispondenza biunivoca. Un'immagine digitale può essere considerata una matrice i cui elementi sono numeri interi positivi che esprimono valori d'intensità luminosa. Ogni elemento della matrice è un pixel monocromatico dell'immagine.

Concettualmente gli algoritmi DIC interpolano i livelli di grigio dei pixel adiacenti con delle equazioni lineari.

Il seguente capitolo non intende dilungarsi in trattazioni di tipo numerico, bensì fornire i principi matematici elementari mediante i quali un software DIC-2D opera.

È ragionevole assumere un cambiamento di forma del subset con lo spostamento del suo centro durante lo stato di sollecitazione. Nella fig. 2.1, supponendo un subset con dimensioni $(2M+1) \times (2M+1)$ pixel prima della deformazione, siano (x_i, y_i) le coordinate generiche del punto arbitrario Q attorno al centro P di coordinate (x_o, y_o) del subset di riferimento e siano (x'_i, y'_i) le coordinate del punto Q' attorno al centro P' di coordinate (x'_o, y'_o) del subset deformato.

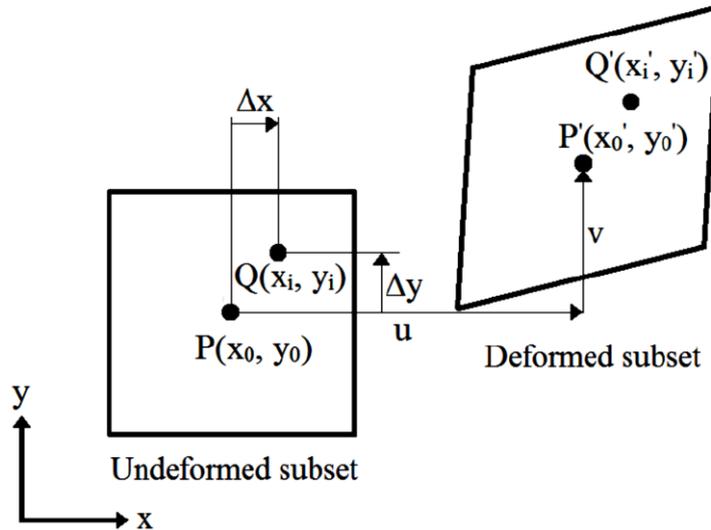


Fig. 2.1 - Subset indeformato e subset deformato.

La correlazione tra il subset di riferimento e deformato è definibile dalle seguenti “funzioni di mappatura” dello spostamento:

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_i)$$

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

ξ , η sono delle funzioni di forma le quali caratterizzano la deformazione del subset.

$$\xi(x_i, y_i) = u + \frac{du}{dx} \Delta x + \frac{du}{dy} \Delta y$$

$$\eta(x_i, y_i) = v + \frac{dv}{dx} \Delta x + \frac{dv}{dy} \Delta y$$

Si studiano gli elementi della funzione di forma:

- $\Delta x = x_i - x_0$
- $\Delta y = y_i - y_0$
- u e v sono le componenti dello spostamento del centro P del subset lungo l'asse x , y .

- $\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}$ e $\frac{dv}{dy}$ sono le deformazioni del subset di riferimento. È anche possibile esprimere la deformazione del subset come $\varepsilon_x = \frac{du}{dx}$, $\varepsilon_y = \frac{dv}{dy}$ e $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right)$.

Per applicazioni legate all'imaging con luminosità variabile nel tempo l'immagine digitale deve essere normalizzata, considerando che a causa delle fluttuazioni di corrente l'esposizione di un oggetto a una luce artificiale non rimane costante.

Le somiglianze tra i due subset temporalmente sfasati vengono individuate attraverso un criterio di correlazione opportuno in grado di riconoscere e associare i livelli di grigio per tutti i pixel del subset.

Un algoritmo di correlazione molto efficace è il NCC (*Normalized Cross Correlation*), il quale è basato sul calcolo del seguente coefficiente C_{NCC} , ovvero un coefficiente di correlazione:

$$C_{NCC} = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x_i, y_j)]^2}}$$

f rappresenta l'intensità luminosa dei pixel del subset nell'immagine di riferimento, mentre g l'intensità luminosa dei pixel del subset nell'immagine contenente il provino deformato. Perciò, la correlazione incrociata (cross-correlation) permette di accoppiare nelle due immagini tutti i subset contenenti il pattern stocastico realizzato sulla superficie del provino.

Per ottenere un coefficiente di correlazione C_{NCC} unitario i livelli di grigio dei pixel che costituiscono i due subset confrontati devono essere esattamente gli stessi. Le similitudini riguardanti le distribuzioni di intensità luminosa aumentano man mano che il coefficiente di correlazione si avvicina a uno. Il valore massimo di quest'ultimo mostra il posizionamento del pattern più affine contenuto nel subset nell'immagine del provino deformato rispetto all'immagine di riferimento. Il software DIC-2D ricerca, per ogni subset, i valori di $u, v, \frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}$ e $\frac{dv}{dy}$ per i quali il C_{NCC} è massimo.

L'esecuzione dell'algoritmo NCC avviene sui subset che inglobano il provino nell'immagine digitale: i lati di ogni subset generano delle forme geometriche quadrilatere, mentre i vertici di ogni subset costituiscono i nodi. L'insieme dei lati e dei nodi compone una griglia, pertanto la DIC può essere definita una procedura "mesh-based".

Una volta individuato il valore massimo del coefficiente C_{NCC} i punti considerati per lo spostamento nelle due immagini consecutive sono circondati da subset con il maggior numero di similitudini tra loro, correlando le porzioni di immagine aventi un pattern simile in due stadi di deformazione differenti. Ripetendo la ricerca del coefficiente C_{NCC} massimo per tutti i subset dell'immagine si riesce a ottenere l'intero campo degli spostamenti e delle deformazioni.

Dall'istante iniziale t_o in cui inizia la prova fino alla rottura del provino viene fornita una stima per gli spostamenti u e v , identificando nell'immagine di riferimento il subset attorno a un punto in una determinata posizione che viene comparata con quella del subset avente la stessa distribuzione d'intensità luminosa nell'immagine con il provino deformato. Il primo fotogramma utile contenente il provino indeformato viene confrontato con un numero elevato di fotogrammi fino alla condizione di rottura per misurare le deformazioni presenti in ogni coppia di immagini.

Un algoritmo alternativo molto diffuso nella DIC-2D è il ZNCC (*Zero mean Normalized Cross-Correlation*), il quale, sottraendo nei prodotti f e g l'intensità luminosa media locale, possiede una maggior robustezza rispetto al NCC dal momento che tollera meglio le variazioni di luminosità presenti in un'immagine digitale.

Nella formula seguente è mostrato il calcolo del coefficiente C_{ZNCC} , il cui funzionamento è analogo al C_{CNN} con la differenza che vengono sottratte ai prodotti f e g le intensità luminose medie $\mu(f(x, y))$ e $\mu(g(x'_i, y'_j))$:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \mu(f(x, y))] [g(x'_i, y'_j) - \mu(g(x'_i, y'_j))]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \mu(f(x, y))]^2} \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - \mu(g(x'_i, y'_j))]^2}} \quad (1)$$

3. Configurazione dell'hardware

Il setup sperimentale necessario per l'analisi DIC-2D include la macchina di prova universale, una videocamera con un'ottica opportuna (video-estensimetro) e un elaboratore dalla potenza di calcolo medio/alta.

Il provino deve essere illuminato in maniera opportuna, perciò nelle prove effettuate si è optato per l'utilizzo di illuminatori led anulari collegati a un alimentatore AC/DC a 24 V, in maniera tale da fornire una corrente quanto più possibile vicina ad un valore continuo, limitando eventuali oscillazioni di luminosità.

In seguito verranno elencati i dettagli più rilevanti nella scelta degli strumenti da impiegare nel test. Essendo una tecnica in via di sviluppo, la maggior parte delle informazioni elencate si basano sull'esperienza personale maturata dopo un certo numero di prove sperimentali effettuate.

3.1 Videocamera

Le caratteristiche tecniche di un video-estensimetro sono determinate soprattutto dalla qualità dell'immagine e del frame rate; dunque una scelta conforme risulta molto importante se si è intenzionati ad aumentare il grado di accuratezza di una misurazione con sistema DIC-2D. La videocamera è composta da un sensore ottico e da un protocollo trasmissione dati.

Riguardo al sensore, essendo obbligatorio impiegare immagini digitali monocromatiche nella correlazione, è importante che esso abbia una buona *gamma dinamica*, cioè un alto rapporto di contrasto tra la massima e la minima intensità luminosa misurabili nell'immagine. Inoltre, bisogna che l'esposizione sia regolata in maniera tale da far entrare nel sensore la giusta quantità di luce e da permettere una riproduzione fedele del provino nell'inquadratura (FOV - field of view).

Ciò comporta che una accurata misurazione con l'esposimetro dell'intensità luminosa che entra nel sensore permette l'ottimizzazione della gamma dinamica.

Sensori più grandi riescono a catturare una maggior quantità di luce, per questo motivo possono andar bene anche con ambienti poco illuminati.

Riguardo alla tecnica di correlazione digitale è preferibile utilizzare un sensore monocromatico privo di filtro RGB (CFA - Bayer Color Filter Array), evitando che durante un'eventuale conversione in post produzione da matrice a colori a bianco/nero gli algoritmi di demosaicizzazione sporchino il reale contenuto d'intensità luminosa di ogni pixel.

Tanto è più grande la *risoluzione* e tanto più accurata e dettagliata sarà la misura ottenuta delle deformazioni locali. Le videocamere normalmente impiegate hanno una risoluzione compresa 1,3 e 2 Megapixel; un'immagine più risolta comporta un aumento della memoria occupata nello storage e tempi più elevati per il trasferimento dei dati. Un buffer di memoria statica, ossia una piccola quantità di memoria RAM, è inclusa direttamente nell'involucro della telecamera per garantire una certa continuità al flusso dei comandi e dati in entrata e in uscita, permettendo lo storage permanente su disco fisso all'interno di un PC.

Il vincolo maggiore resta dovuto ai costi, per il resto una telecamera più costosa ha un buffer dinamico più performante (maggior fps), una risoluzione maggiore del sensore e consente di ottenere delle informazioni più dettagliate dalla prova, rispetto ai modelli più economici.

La *profondità in bit* dell'immagine è vincolata al software utilizzato per la correlazione digitale: lo standard attuale per camere industriali e da laboratorio è 12/14 bit. Nel caso del software utilizzato per le prove sperimentali è necessaria una conversione delle immagini a 8 bit.

Riguardo al *frame rate* le prove statiche prevedono strain rate nominali nell'ordine di $10^{-3} s^{-1}$ e gli incrementi effettivi dovuti al necking arrivano al massimo a valori intorno a $10^{-2} s^{-1}$. Basandosi sui suddetti valori sarebbe sufficiente acquisire un unico fotogramma al secondo per la caratterizzazione della curva true stress - true strain. In realtà nelle prove sperimentali sono stati impostati i frame massimi acquisibili dalla telecamera per secondo (33,75 fps). Valutando le deformazioni ricavate con DIC-2D un frame rate elevato può aiutare a migliorare la dispersione dei dati specialmente nella fase di necking locale, poco prima della rottura.

Un video può essere definito dalla sequenza di immagini digitali distanziate di un intervallo temporale, il quale rimane costante durante la registrazione.

Si è notato che per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati non è sufficiente acquisire un fotogramma ogni secondo, bensì nei punti più critici del diagramma sforzo-deformazione la frequenza minima dei fotogrammi acquisiti della telecamera dovrebbe attestarsi almeno attorno ai 5 fotogrammi acquisiti al secondo, almeno per quanto riguarda il necking locale. Tenendo conto di questo aspetto una maggiore quantità di fotogrammi catturati dal sensore fornisce dei vantaggi non trascurabili per l'esito della misurazione con il video-estensimetro.

Ad esempio per realizzare un diagramma FLD (Forming Limit Diagram) mediante un test di Nakajima la frequenza di campionamento stabilita dal software ARAMIS Professional è pari a 10 Hz, pertanto passati 4 secondi di prova le due telecamere (sistema stereoscopico) hanno effettuato un totale di 40 misurazioni di deformazione.

Il valore del sample rate indicato dipende dal tipo di prova e dal materiale, nel caso di acciaio DP800 e lega 7075 la prova di trazione è impostata a basse velocità di deformazione e i 33,75 fps sono più che sufficienti.

I sensori disponibili in commercio sono divisi in due tipologie: *charge coupled device* (CCD) e *active pixel sensor* (C-MOS). Il loro scopo è quello di trasformare un segnale luminoso in un segnale elettrico analogico (convertito in digitale) che permetta la memorizzazione dell'immagine acquisita.

I sensori CCD sono dispositivi ad accoppiamento di carica composti da un circuito integrato realizzato su del silicio che utilizza elementi sensibili alla luce, chiamati pixel. L'architettura comprende uno o più circuiti che trasferiscono all'esterno le cariche generate nei singoli pixel. Utilizzando una similitudine di tipo idraulico si può pensare a una matrice di secchi (i pixel) che raccolgono l'acqua (i fotoni della luce): ogni secchio è esposto per lo stesso tempo alla pioggia e, successivamente, si procede alla lettura di ogni secchio svuotandolo nella riga successiva fino all'arrivo alla riga adibita alla sola lettura. L'informazione si muove lungo due direzioni denominate parallela e seriale.

I sensori C-MOS sono più recenti, e a differenza dei CCD contengono gran parte delle funzionalità necessarie in ogni singolo pixel. Ciascun pixel contiene un sensore di luce e un amplificatore di segnale, in aggiunta sono allocati un convertitore A/D e un controllore digitale sempre nel circuito integrato. Una volta che la luce filtra attraverso la matrice, ogni singolo pixel converte la luce in una tensione amplificata che verrà elaborata dal resto del sensore.

I sensori C-MOS permettono di assolvere a diverse funzioni di post processing del segnale acquisito già all'interno dell'elettronica presente in ogni singolo pixel, permettendo frame rate maggiori a parità di categoria, e quindi sono i più diffusi nelle misurazioni tramite DIC.

I principali protocolli di trasmissione dati impiegati sono l'USB 3 (4,8 Gbps), il Camera link (5,44 Gbps) e l'USB 3.1 (10 Gbps). Nelle prove sperimentali effettuate sono stati adottati sensori Sony C-MOS monocromatici da un pollice.

3.2 Obiettivo fotografico

La scelta dell'obiettivo riguarda il campo visivo e serve per stabilire una FOV opportuna, nel caso di prova di trazione valutata con DIC bisogna mantenere in primo piano il tratto sollecitato del provino.

Lo scopo di un obiettivo fotografico è quello di raccogliere i raggi di luce e indirizzarli sul sensore. Possono essere classificati in due macro categorie:

- Obiettivi a lunghezza focale fissa.
- Obiettivi zoom.

In un sistema basato sulla DIC gli obiettivi zoom consentono di modificare la lunghezza focale effettuando un ingrandimento su una zona specifica del provino, tuttavia sono meno indicati a causa dei leggeri cedimenti della ghiera di zoom che potrebbero compromettere la correlazione digitale. Le immagini acquisite dal video della prova devono mantenere costante il rapporto mm/pixel rispetto al provino per essere correlate e utilizzando un'ottica a focale fissa si ha la certezza di non modificare accidentalmente la lunghezza focale durante la prova di trazione.

Il tempo di esposizione e la messa a fuoco sono regolati manualmente.

Mantenere il sensore fotografico parallelo alla superficie del provino è fondamentale per ottenere una buona correlazione digitale. Nella DIC bidimensionale si cerca di minimizzare la distorsione ai bordi privilegiando teleobiettivi, anziché obiettivi grandangolari.

In generale un obiettivo è definito grandangolare se presenta una lunghezza focale inferiore a 50 mm , e quindi, impiegato insieme ad un sensore con diagonale d , dà luogo ad un angolo di campo maggiore di 47° circa. L'angolo di campo è pari a $2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right)$, dove f è la lunghezza focale dell'obiettivo.

Se si usa un obiettivo grandangolare l'immagine ottenuta restituisce uno schiacciamento degli speckles ai bordi, di conseguenza gli spostamenti e le deformazioni avranno dei valori non attendibili.

La distorsione ottica, d'importanza cruciale per applicazioni stereoscopiche, è meno rilevante nel caso bidimensionale, a patto che si utilizzi un obiettivo opportuno con angolo di campo minore di 47° . Inoltre spesso, essendo la porzione di provino inquadrata collocata nella parte centrale del fotogramma, lo schiacciamento del soggetto verso i bordi dell'immagine risulta attenuato.

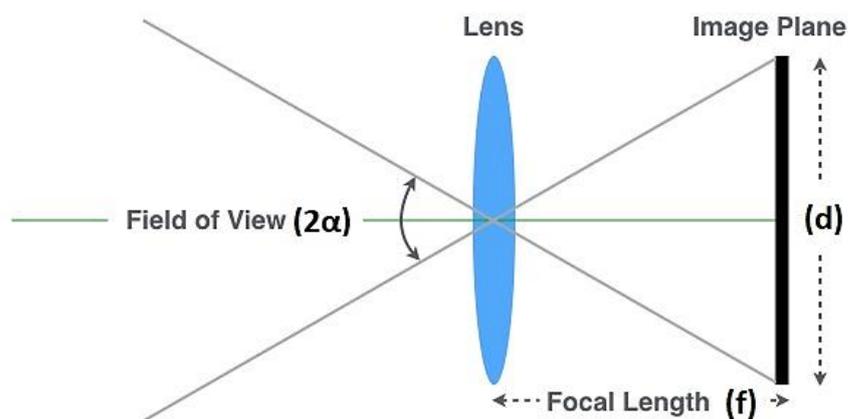


Fig. 3.1 – Effetto della lunghezza focale dell'obiettivo sul campo visivo.

Per la pellicola 35 mm standard con diagonale pari a 43,2 mm e per un obiettivo con una focale di 50 mm:

$$\text{Angolo di campo} = 2\alpha = 2 \arctan\left(\frac{43,2/2}{50}\right) \cong 47^\circ$$

In conclusione le distorsioni presenti in una rappresentazione visiva possono dipendere:

- Dalla configurazione geometrica della ripresa.
- Dal metodo di visualizzazione.
- Dalle caratteristiche delle ottiche.

Escludendo i primi due punti, con l'accuratezza di posizionare la telecamera perpendicolarmente rispetto alla superficie del provino da analizzare, si afferma che nella correlazione digitale bidimensionale la scelta dell'ottica è alla base del problema della distorsione: maggiore sarà la lunghezza focale, tanto minore risulterà l'effetto ai bordi dell'immagine.

La relazione approssimata tra le dimensioni del campo visivo inquadrato (base = FOV_b , altezza = FOV_h), la distanza di ripresa, le dimensioni del sensore (base = $Sensore_b$, altezza = $Sensore_h$), e la lunghezza focale di riferimento dell'obiettivo è:

$$\frac{FOV_{b-h}}{\text{distanza}} \approx \frac{Sensore_{b-h}}{f} \quad (2)$$

Da cui si ricava:

$$f \approx \frac{\text{distanza} \cdot Senso_{b-h}}{FOV_{b-h}} \quad (3)$$

Dalla relazione (3) è possibile scegliere in prima battuta l'obiettivo più adatto dalla lunghezza focale. In realtà il discorso è più complesso e ci sono da considerare altri parametri ottici e geometrici che influiscono sul legame tra l'ottica e la ripresa.

Nella DIC bidimensionale per prove di trazione su provini o su componenti tramite macchina di prova universale, sono da considerare campi visivi di dimensione variabile tra 30 e 300 mm, ripresi a distanze variabili tra 200 e 1500 mm.



Fig. 3.2 – Telecamera monocromatica per DIC-2D utilizzata nelle prove sperimentali.

In sintesi per rendere note le caratteristiche di posizionamento della telecamera i parametri che bisogna determinare possono essere classificati in:

- Parametri intrinseci (lunghezza focale della lente, caratteristiche principali dell'obiettivo, distorsione delle lenti radiali e tangenziali).
- Parametri estrinseci (spostamento del provino nelle morse sotto forma di rototraslazione in genere compensato dal software DIC).

Lo spostamento del video-estensimetro necessita di una nuova calibrazione dei parametri intrinseci.

4. Proprietà ottiche della luce

Prima di addentrarsi nell'esecuzione vera e propria dei test sperimentali con procedura DIC-2D è opportuno precisare alcune proprietà ottiche fondamentali che sono alla base della comprensione del fenomeno fisico. Il posizionamento dell'ottica singola è diverso rispetto a un impianto stereoscopico e prevede il raggiungimento dell'angolo retto rispetto alla superficie piana del provino.

La luce ha una natura corpuscolare e ondulatoria descritta dalle equazioni di Maxwell. Nel seguente capitolo verrà discussa la sua interazione tra un sistema di lenti e dei corpi solidi opachi aventi caratteristiche di trasmissione luminosa simili a quelle di un provino verniciato.

Quando la luce si infrange contro un corpo grande, dalle dimensioni rilevanti rispetto alla sua lunghezza d'onda, è possibile caratterizzare la sua traiettoria luminosa con una linea retta. Finché vale l'analogia con il raggio di luce la teoria presente in un'analisi ottica è composta da semplici relazioni di trigonometria.

La traiettoria luminosa può essere deviata secondo la *legge di riflessione*: il raggio di luce "rimbalza" sul corpo, pertanto durante l'utilizzo del video-estensimetro è importante caratterizzare il percorso deviato del raggio luminoso in ingresso. Essendo lo strato superficiale di vernice assimilabile a un corpo opaco l'energia luminosa trasmessa viene considerata nulla (può essere diversa da zero solo nei materiali trasparenti).

Nel caso di provini lucidi non verniciati l'effetto specchio dipende dalle proprietà microscopiche del materiale e il *coefficiente di riflessione* (R), misurato dal rapporto tra l'energia incidente e quella riflessa, vale $0,59$ per l'acciaio e $0,92$ per l'alluminio. La lucentezza del materiale non dipende dal suo colore, bensì con un inscurimento superficiale anche il riflesso prodotto tenderà a scurirsi.

Il coefficiente di assorbimento (A), invece, definisce l'energia elettromagnetica assorbita da un materiale. Quando il fascio di luce incide sulla superficie del provino una parte di energia luminosa viene assorbita dal materiale.

Dopo l'applicazione della coppia di vernici bianco-nero, essendo le goccioline scure ripartite sul 50% della superficie del provino, si ottiene all'incirca il seguente coefficiente di riflessione:

$$R_{provino} = \frac{R_{vernice-nera} + R_{vernice-bianca}}{2} \cong \frac{0,1 + 0,5}{2} \cong 0,3$$

Dato che la somma dei vari indici è unitaria e considerando un indice di rifrazione pressoché nullo si ricava il coefficiente di assorbimento del pattern monocromatico riprodotto sul provino:

$$R_{provino} + A_{provino} = 1$$

$$A_{provino} = 1 - R_{provino} \cong 0,7$$

La maggior parte dell'energia incidente viene assorbita in superficie, tuttavia una quantità modesta non trascurabile viene riflessa (30%).

Bisogna evitare di posizionare sorgenti luminose dietro la telecamera per evitare fenomeni di abbagliamento. Un posizionamento adeguato per una immagine correttamente esposta prevede lo spostamento ai lati della sorgente con il fascio luminoso diretto verso il tratto inquadrato (FOV) del provino.

La configurazione ottimale della sorgente luminosa rispetto al provino e alla telecamera è rappresentata nella fig. 4.1: l'asse ottico del video-estensimetro è perpendicolare alla superficie piana del provino, mentre la sorgente luminosa viene ripartita in maniera equidistante rispetto all'asse ottico e direzionata verso il provino per evitare le alterazioni dell'immagine dovute a una sensazione eccessiva di luce.

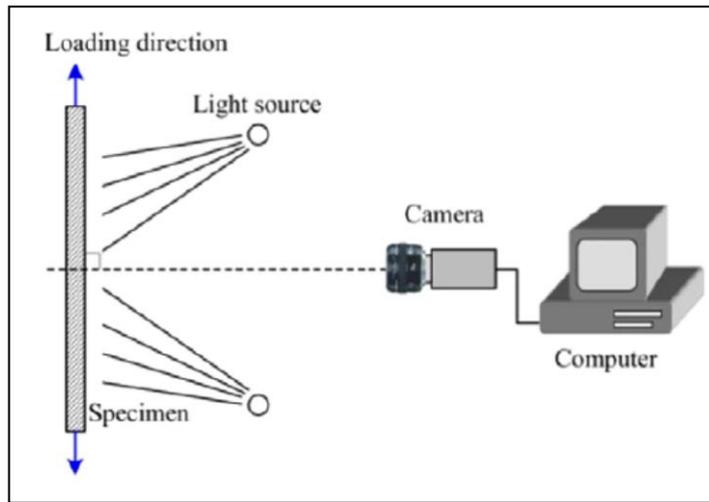


Fig. 4.1 - Schematizzazione del posizionamento ottimale della sorgente luminosa.

5. La prova di trazione uniassiale

La prova di trazione è un test importante per caratterizzare le proprietà meccaniche di un materiale. Essa può essere effettuata con una macchina di prova universale, la quale include tutti gli strumenti di misura necessari.

Lo strumento più utilizzato per valutare le deformazioni è l'estensimetro meccanico a contatto (extensometer) che fornisce la deformazione media sul tratto utile del provino; l'efficacia dell'acquisizione termina una volta che il materiale arriva nella zona di necking. L'estensimetro è composto da due coltelli disposti su un'incastellatura a una distanza di misura che è la base di misura dello strumento. Lo spostamento del coltello mobile rispetto a quello fisso determina l'elongazione del provino. È presente anche un trasduttore di misura in grado di convertire lo spostamento tra i coltelli in un segnale di tensione amplificato.

L'estensimetro meccanico agisce come una scatola nera: restituisce la deformazione media ignorando lo stato tensionale locale presente in ogni punto del provino. In caso di deformazione uniforme acquisire la deformazione media nel tratto utile è sufficiente, una condizione limitata che può essere rispettata solo in assenza di necking.

Per lo stato di deformazione non uniforme viene in aiuto la procedura DIC. Il videoestensimetro permette un'analisi "point by point" del campo delle deformazioni con l'identificazione di tutti i valori di picco.

Lo scopo dell'elaborato è quello di analizzare l'affidabilità della procedura nell'acquisire le deformazioni medie e locali dalla formazione del necking fino alla rottura, sempre ipotizzando uno stato di tensione bidimensionale.

La prova di trazione per un provino sottile composto da materiale duttile può essere composta da una serie di fasi caratterizzanti:

- Tratto elastico → nel grafico tensione - deformazione fase lineare con inclinazione pari al modulo di Young. La deformazione è di tipo reversibile.
- Hardening (o incrudimento) → aumento del limite di plasticità con l'evoluzione monotona delle deformazioni plastiche.

- Necking diffusivo → introduzione di una deformazione trasversale che porta a una riduzione della sezione resistente del provino.
- Necking locale (o localizzato) → la deformazione si concentra in un punto specifico della sezione resistente del provino. In generale anticipa la rottura.
- Rottura → si ottiene con la separazione delle due superfici di rottura. Inizia con l'apparizione della prima cricca non passante sul tratto utile. Se la rottura non avviene all'interno del tratto calibrato la prova non viene validata come da normativa.

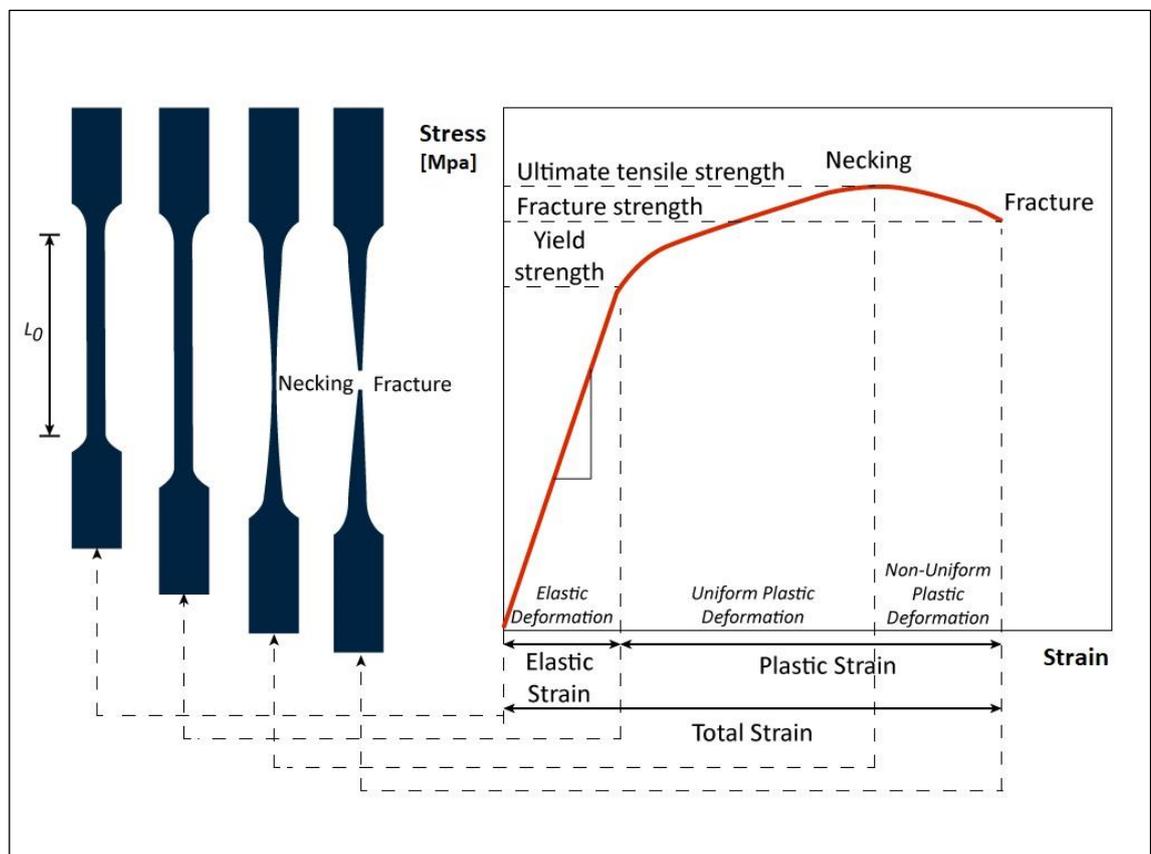


Fig. 5.1 – Rappresentazione delle fasi principali di una prova di trazione.

L'estensimetro meccanico a contatto utilizza i due coltelli (clip gages) alle estremità del tratto utile per valutare l'allungamento lungo la direzione longitudinale. Tuttavia solamente con la loro misura è impossibile valutare la strizione, per cui l'andamento sforzo-deformazione fornito dalla macchina di prova è di tipo ingegneristico: la tensione viene calcolata dal rapporto tra la forza fornita dalla cella di carico sulla sezione resistente calcolata sul tratto utile e considerata come costante.

Durante la prova, una volta raggiunta la condizione di instabilità, il provino inizia a opporsi con una resistenza minore a causa di una riduzione della sezione resistente (fenomeno della strizione). Tuttavia le curve ingegneristiche sforzo-deformazione, essendo calcolate con una sezione resistente costante nel tempo (quella iniziale) e pur mantenendo la diminuzione di carico, decrescono a partire dal necking.

Sostituendo l'estensimetro meccanico con uno strumento di misura ottico si possono ottenere le due deformazioni reali di ogni punto della superficie del provino. Ciò significa che se con l'estensimetro meccanico risulta impossibile ottenere la sezione istantanea dopo il necking, con uno strumento di misura ottico è possibile quantificare il fenomeno della strizione fornendo alla curva tensione reale – deformazione reale un andamento monotono crescente (curva reale).

La correlazione di immagini digitali fornisce le deformazioni nominali o ingegneristiche, per cui bisogna chiarire come ottenere le deformazioni reali. Le misure di deformazioni locali ottenute con la DIC sono riferite a lunghezze infinitesime tra punti materiali contigui, quindi è possibile convertire le deformazioni ingegneristiche (nominal strain) in reali (true strain) utilizzando la relazione lineare:

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (4)$$

Per misurazioni locali l'approssimazione è valida anche dopo il necking, mentre risulta inverosimile se la deformazione ingegneristica proviene da estensimetri con basi di misura finite. La sua validità può essere dimostrata sperimentalmente dal fatto che valutando con la procedura DIC-2D la deformazione ingegneristica media nel tratto utile e convertendola in reale si ha una curva sforzo-deformazione molto vicina alla curva ingegneristica ricavata con l'estensimetro meccanico (gauge effect).

La discordanza mostrata in fig. 5.2 della DIC-2D con l'estensimetro tradizionale è dovuta a un'area di misurazione della deformazione media leggermente più piccola rispetto al contorno del tratto utile, per non compromettere la correlazione digitale tra il fotogramma iniziale e quello deformato. Lo scostamento tra le due curve si ha dalla condizione di instabilità in poi nel passaggio da deformazione globale al valore di

picco. In sintesi, le deformazioni medie sull'asse trasversale (misurate sulle linee rosse) variano a seconda della posizione longitudinale, e inoltre, allontanandosi dalla regione di sollecitazione massima verso una delle estremità del tratto calibrato, la curva tensione reale – deformazione reale tende all'ingegneristica ottenuta con gli estensimetri meccanici (*gauge length effect*).

Supponendo di accorciare il tratto utile da 50 mm a 2 mm l'estensimetro meccanico mostrerebbe un incremento significativo della deformazione a rottura, perché la media verrebbe calcolata nell'intorno della zona maggiormente sollecitata.

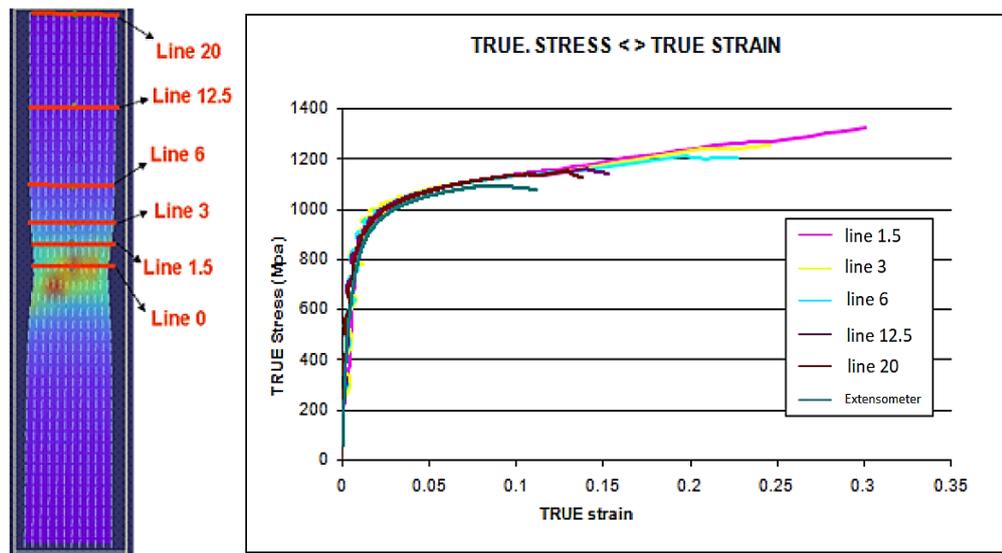


Fig. 5.2 – Esempio in [1] del “*gauge length effect*” nel grafico true stress – true strain.

Il software DIC, valutando globalmente la variazione di posizione degli speckles, fornisce in uscita gli spostamenti rispetto ai due assi principali e le deformazioni ingegneristiche e_x e e_y , poi convertite in deformazioni reali. La completezza dei dati sulle distribuzioni della deformazione nel tratto utile consente di ottenere qualsiasi misurazione globale e/o locale nel tratto verniciato inquadrato dal video-estensimetro.

In campo elastoplastico per ricavare la deformazione normale alla superficie del provino su scala locale viene applicata la conservazione del volume:

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (5)$$

Essendo le deformazioni sui tre assi del provino note, la deformazione plastica equivalente è facilmente determinabile su tutti i punti della superficie che costituisce il tratto utile calibrato. Nella prova di trazione uniassiale per provini ricavati dalle lamiere la deformazione plastica equivalente è approssimabile ragionevolmente con la deformazione longitudinale reale anche dopo la condizione di instabilità e può essere considerata costante lungo lo spessore (6).

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \cong \varepsilon_{true-x} \quad (6)$$

In una prova di trazione con il video-estensimetro l'unica misura sperimentale ottenibile solo dalla macchina è il carico istantaneo corrente. Bisogna necessariamente sincronizzare il tempo risultante dalla cella di carico con i fotogrammi del video della prova; uno sfasamento temporale falserebbe l'analisi dello stato tensionale.

Il carico, se non abbinato alla misura della sezione resistente istantanea, fornisce solamente la tensione assiale media ingegneristica, ottenuta dal rapporto tra il carico istantaneo e la sezione iniziale. Fino all'innescio del necking diffusivo la tensione nominale è facilmente convertibile in tensione reale:

$$\sigma_{true-x} = \sigma_{eng-x}(1 + \varepsilon_{eng-x}) \quad (7)$$

Fino al raggiungimento della condizione di instabilità il valore locale della tensione coincide con quello medio su tutta la superficie, pertanto non c'è discostamento con la tensione ingegneristica. Oltrepassando la fase di necking non è più possibile approssimare la tensione equivalente con la σ_{true-x} , perché subentra uno stato di tensione multiassiale e nel calcolo della tensione equivalente occorre considerare anche lo stress trasversale nella sezione ristretta e l'assottigliamento del provino.

In caso di provini spessi sono necessarie le tecniche stereoscopiche con una procedura basata sulla DIC-3D per ottenere le mappe di assottigliamento. Mentre la correlazione digitale bidimensionale necessita che il provino abbia il rapporto tra la sua larghezza e il suo spessore al di sopra di un certo valore per essere considerato come sottile.

Dalla condizione di instabilità in poi la deformazione media sul tratto calibrato non rappresenta lo stato di sollecitazione locale effettivo del provino, quindi per ottenere le deformazioni reali a meno di distacchi di vernice si considerano i valori massimi di deformazione. Inoltre, dal necking fino alla rottura la tensione equivalente non è più approssimabile con la tensione reale longitudinale a causa dell'evidente stato multi-assiale che porta a una riduzione della larghezza e dello spessore del provino.

Per correggere la misurazione canonica della cella di carico e degli allungamenti rilevati durante la prova di trazione è possibile utilizzare diversi approcci, i quali, in genere, combinano l'analisi digitale dell'immagine e le ottimizzazioni di modelli numerici, al fine di ricavare le curve true stress – true strain del materiale e, in seguito, identificare i parametri di modelli costitutivi elasto-plastici. Generalmente, nella letteratura scientifica, si procede utilizzando procedure inverse iterative basate su simulazioni numeriche o sul *Virtual Field Method*.

Per ricavare lo stress equivalente una buona approssimazione potrebbe essere:

$$\sigma_{eq} \cong \sigma_{true-x} \cdot MLR \quad (8)$$

Nella relazione precedente MLR è un fattore introdotto da Mirone in [2] indipendente dal tipo di materiale, ricavato con una regressione lineare multipla.

La σ_{eq} calcolata in questo modo (oppure con la procedura Bridgman per provini cilindrici [3], o anche con altri metodi simili) non dipende dalle caratteristiche geometriche del provino e del materiale; ciò costituisce una ragionevole approssimazione.

La prova di trazione uniassiale a temperatura ambiente per materiali metallici è definita nella normativa europea UNI EN ISO 6892-1.

Per stabilire il tempo di prova viene effettuata una classificazione in base alla velocità di deformazione, oppure considerando la velocità con la quale varia la tensione.

Mantenendo costante l'incremento di deformazione del provino nel tempo con un controllo di spostamento (perché si è interessati all'ultimo tratto della curva) viene minimizzata l'incertezza di misura dei risultati ottenuti nei grafici sforzo-deformazione.

Il tratto utile del provino avrà una certa lunghezza predefinita di riferimento che tenderà ad aumentare nel corso della prova a causa dello stato di sollecitazione. La lunghezza finale è valutata dopo la rottura.

Il provino viene ricomposto unendo le superfici di rottura per valutare l'allungamento (o elongazione) sull'asse longitudinale. Per l'allungamento a rottura in percentuale si valuta il delta che intercorre tra la lunghezza iniziale del tratto calibrato e la lunghezza finale a rottura:

$$\text{Allungamento}[\%] = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 = \frac{L - L_o}{L} \cdot 100$$

La strizione è valutata in base alla riduzione in percentuale della sezione resistente:

$$A = w \cdot t$$

$$A[\%] = \frac{A_o - A}{A_o} \cdot 100 = \frac{w_o t_o - w t}{w_o t_o} \cdot 100$$

Con w la larghezza (width) e t lo spessore (thickness) del provino di lamiera. Il loro prodotto, se ricavato in un istante generico, fornisce il valore della sezione resistente istantanea. La misurazione della sezione resistente iniziale A_o prevede la media di almeno tre misurazioni sul tratto calibrato con un'accuratezza dipendente dalla forma del provino e dal tipo di prova.

La prova di trazione termina in genere con la rottura del provino in due parti distinte e, nel caso di prove in condizioni standard, viene effettuata in un ambiente a temperatura controllata compresa tra $10\text{ }^\circ\text{C}$ e $35\text{ }^\circ\text{C}$ (in casi particolari c'è la necessità di mantenerla a $23 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$).

Dalla misura della deformazione reale e della tensione reale corrispondente, conoscendo il modulo elastico del materiale, si può calcolare la deformazione plastica. La relazione tra il valore massimo della tensione reale e la deformazione plastica non è di tipo lineare, in ogni caso la curva tensione - deformazione presenta di solito la derivata positiva e si può approssimare con la formula:

$$\sigma_{true_max} = \sigma_p + C \varepsilon_p^n \quad (9)$$

in cui n è il coefficiente di incrudimento o coefficiente di “work hardening”.

Da notare che, dopo l’inizio della strizione, considerando la deformazione media nel tratto utile si ha un fenomeno di work softening (diminuzione dello stress all’aumentare dello strain), mentre il work hardening si ottiene con la deformazione massima locale.

Per l’analisi della procedura DIC-2D si considerano provini con geometrie diverse, con lo scopo di valutare la flessibilità dell’algoritmo di correlazione digitale per porzioni di elaborazione con forme e dimensioni differenti, riuscendo a determinare le limitazioni ed eventuali problematiche della misura ottica. Nei provini lisci normati sono state realizzati due segni sulla superficie, per identificare gli estremi del tratto utile.

Il serraggio delle teste del provino nelle due morse deve avvenire mantenendo la superficie piana perpendicolare al gabbiotto della macchina di prova: un orientamento errato degli afferraggi (clip gages) rispetto alla colonna impedirebbe un’inquadratura corretta da parte del video-estensimetro.

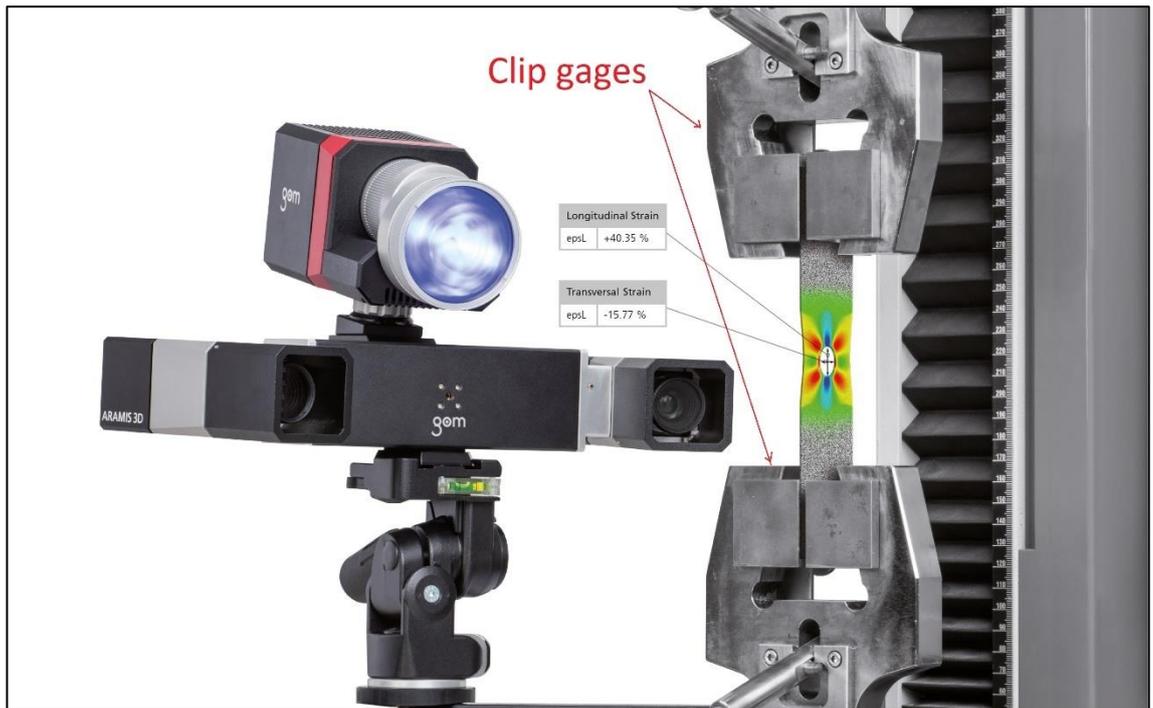


Fig. 5.3 – Posizionamento corretto degli afferraggi rispetto alla colonna.

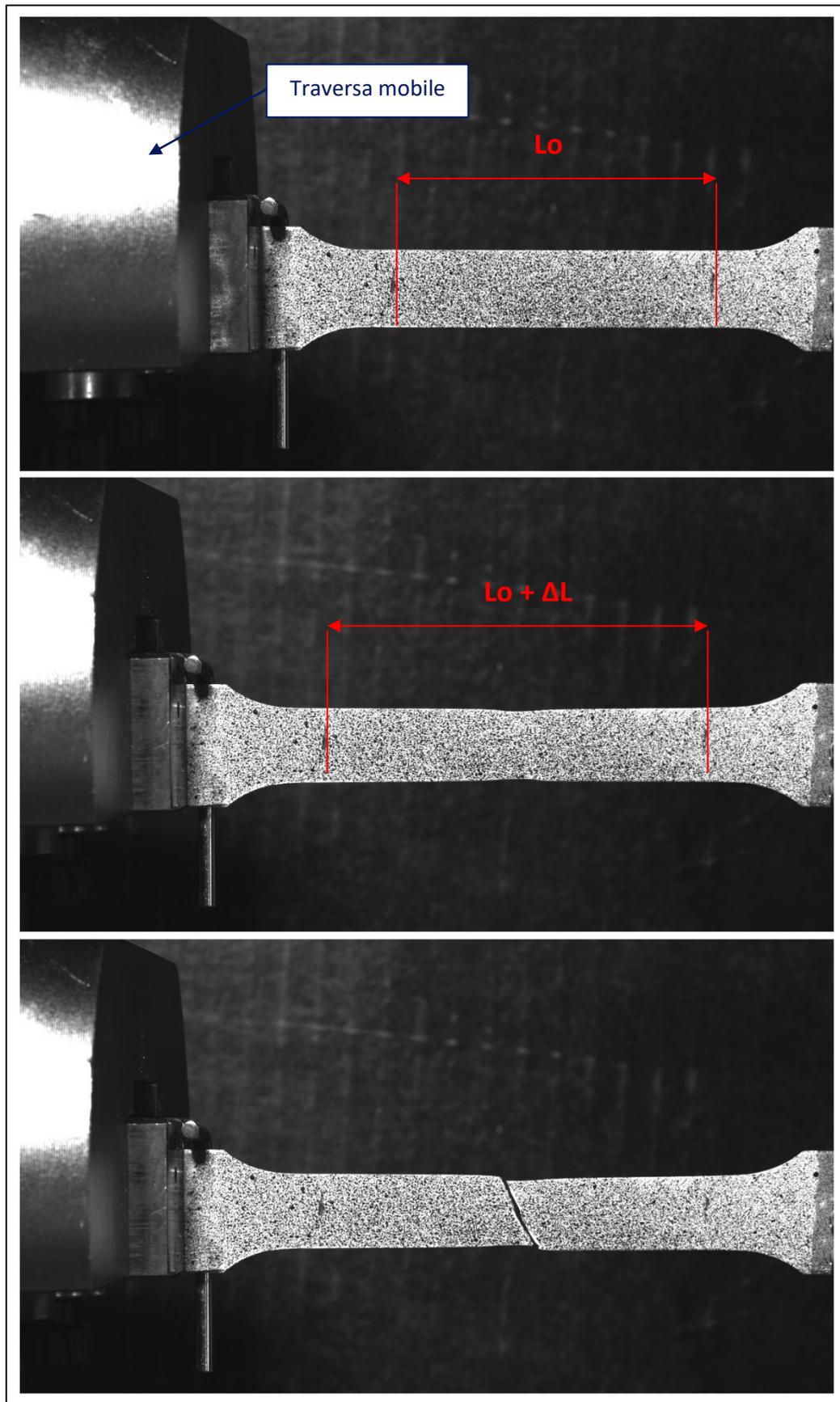


Fig. 5.4 – Fotogrammi che mostrano l'allungamento e la rottura del provino in acciaio.

Un altro parametro importante è la direzione di laminazione del foglio di lamiera sul quale verranno realizzati i provini da testare. In base all'orientamento dei rulli rispetto al foglio i grani cristallini tenderanno ad allungarsi verso una direzione predefinita.

L'anisotropia è una proprietà da tenere necessariamente in considerazione nel caso di lamiere: in base a come viene orientato il taglio rispetto alla direzione di laminazione una direzione preferenziale del piano di scorrimento durante la rottura conferirà delle proprietà meccaniche significativamente differenti pur testando lo stesso materiale.

Nel caso di provini con direzioni di laminazione differenti il grafico sforzo-deformazione mostra un certo scostamento e i rapporti tra le deformazioni che nascono durante la prova cambiano secondo direzioni differenti da quella di laminazione.

Il coefficiente di anisotropia r è funzione della deformazione reale ed è definito da:

$$r = \frac{\ln(w_o/w)}{\ln(t_o/t)} = \frac{\ln(w_o/w)}{\ln[(Lw)/(L_o w_o)]} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

Le condizioni di anisotropia sono definite dall'indice medio di anisotropia normale e dall'indice di anisotropia planare:

$$r_{mean} = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})$$

$$\Delta r_{planar} = \frac{1}{2}(r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})$$

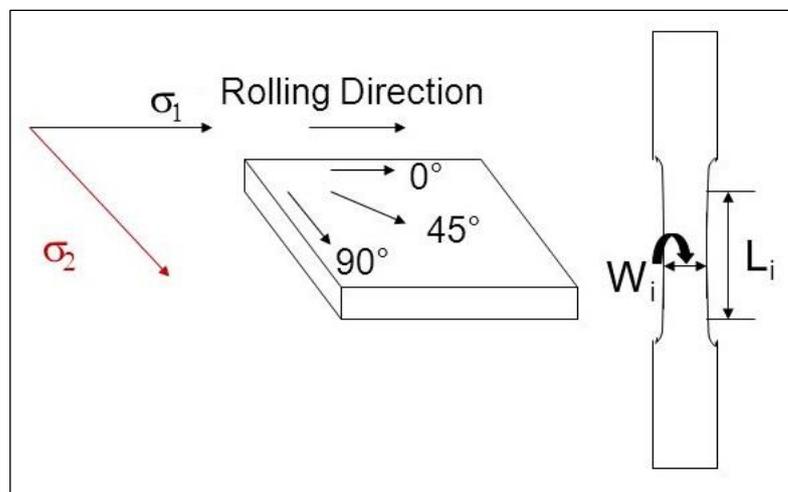


Fig. 5.5 – Direzioni di laminazione principali per il calcolo di r .

A seconda della direzione di taglio sulla lamiera con cui vengono ricavati i provini rispetto alla direzione dei rulli di laminazione (0° , 45° e 90°) si presenta un materiale con quattro possibili condizioni differenti:

- Isotropia normale e planare

$$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1$$

- Anisotropia normale e isotropia planare

$$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} \neq 1$$

- Anisotropia planare

$$r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ}$$

- Anisotropia normale e planare

$$r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} \neq 1$$

Per valori bassi di anisotropia normale si accentua l'assottigliamento a rottura del provino con una riduzione di spessore più evidente e cresce il pericolo di riscontrare fratture duttili della lamiera. Mentre l'anisotropia planare è sempre presente nelle lamiere da stampaggio influenzando il processo di formatura. Essa può essere motivo di un assottigliamento localizzato o di formazione di grinze. Il coefficiente di anisotropia viene valutato una volta arrivati a rottura.

La presente ricerca sulla DIC-2D non è finalizzata alla valutazione del comportamento anisotropo del materiale, di conseguenza nelle prove sperimentali effettuate il confronto è tra provini ricavati con lo stesso orientamento di taglio rispetto alla direzione di laminazione.

6. Cenni sulla calibrazione dei parametri costitutivi

La tecnica della DIC-2D non permette di acquisire l'intera curva tensione reale – deformazione reale fino al punto di rottura, dal momento che risulta limitata al calcolo della deformazione media nella sezione di strizione ed esclude ogni possibilità di ricavare i valori locali di tensione.

Un metodo efficace molto diffuso per caratterizzare la localizzazione della strizione consiste nella estrapolazione dell'ultimo tratto della curva da un modello agli elementi finiti, i cui modelli costitutivi sono calibrati sulla prova sperimentale effettuata con la DIC-2D. La corrispondenza tra il modello numerico e quello fisico non è immediata: inizialmente può essere presente una discordanza modesta e, inoltre, la procedura di calibrazione può richiedere molto tempo.

Sebbene il metodo degli elementi finiti (FEM) permetta di ottenere l'intera curva tensione reale – deformazione reale, a seconda delle leggi costitutive introdotte durante la modellazione è possibile ottenere delle curve tensione-deformazione differenti. Per tale ragione è necessario introdurre nel modello numerico solamente le relazioni che descrivono più fedelmente il comportamento del materiale nei vari stadi di deformazione.

Nella meccanica dei corpi solidi per materiale si intende un modello ideale di comportamento (elastico, plastico, viscoso...). Bisogna stabilire a priori quali sono i modelli fisici che caratterizzano il comportamento del materiale in fase di sperimentazione, nel seguente caso specifico in una prova quasi statica di trazione uniassiale.

Per relazionare gli spostamenti alle deformazioni vengono inserite le equazioni costitutive del materiale nel software FEM, secondo il modello stabilito (es. modello elastoplastico di Swift). Esso permette di descrivere il comportamento del materiale fino alla rottura, nello specifico la condizione di work hardening, introducendo in ingresso un certo numero di costanti tipiche del materiale (parametri costitutivi).

$$\sigma_{eq} = K(\varepsilon_o + \varepsilon_{eq}^{pl})^n \quad (10)$$

I parametri costitutivi da calibrare nella relazione di Swift (10) sono i seguenti:

- K – coefficiente di resistenza alla deformazione.
- ε_o – deformazione dovuta al precarico.
- n – coefficiente di incrudimento.

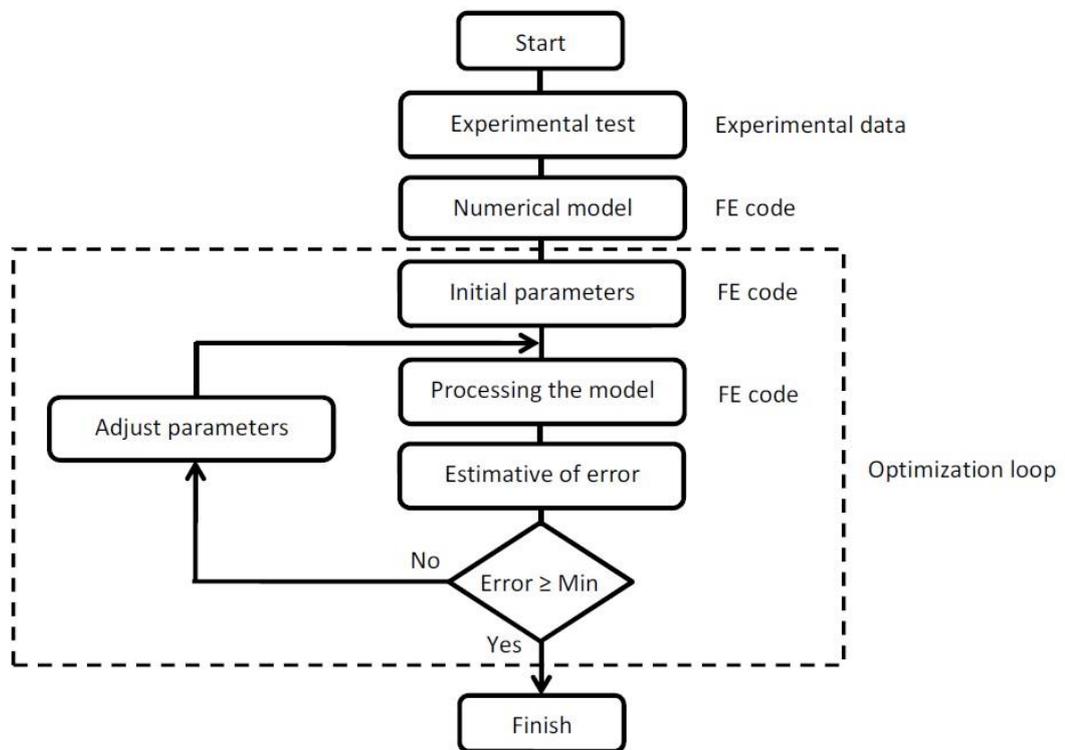


Fig. 6.1 – Ciclo iterativo di ottimizzazione dei parametri costitutivi in [9].

La procedura complessiva per la calibrazione dei parametri costitutivi è riassunta nel diagramma in fig. 6.1 e consiste nei seguenti punti principali:

- Esecuzione delle prove sperimentali con la DIC-2D.
- Realizzazione del modello numerico FEM.
- Introduzione della card del materiale nel modello.

- Confronto tra legame costitutivo sperimentale/simulato e stima dell'errore.
- Ottimizzazione dei parametri della card (solo se l'errore supera una certa soglia).

Oltre al modello elastoplastico è possibile introdurre, a seconda del materiale analizzato, la dipendenza dallo strain rate, le condizioni di instabilità, il criterio di accumulo del danneggiamento e la condizione di rottura.

La taratura dei parametri è di tipo inverso (*metodologia inversa*), il cui approfondimento è contenuto in [6]: il modello numerico viene impiegato in maniera iterativa, cercando di aggiustare la risposta ottenuta per farla avvicinare a quella ottenuta nelle prove sperimentali. Un tuning fine dei parametri inseriti nella card del materiale è alla base del ciclo di ottimizzazione.

Nello specifico, le costanti tipiche del materiale vengono ritoccate cosicché il modello numerico della prova di trazione uniassiale dia lo stesso andamento ricavato sperimentalmente nel diagramma carichi-spostamenti e si ottenga in uscita una calibrazione più precisa della material card.

Il risultato dell'intera procedura è l'ottenimento dall'analisi FEM di più curve tensione reale – deformazione reale con degli andamenti molto simili a quelli sperimentali, ma con la differenza di una miglior caratterizzazione prima della rottura della fase di strizione locale, risolvendo il problema della sottostima dei picchi locali di tensione da parte di un sistema basato sulla DIC-2D. Dopo che i parametri costitutivi sono stati ottimizzati la card del materiale viene aggiornata e risulta sempre reperibile in un database contenente tutte le informazioni sui materiali analizzati.

Esiste un metodo inverso alternativo agli elementi finiti per identificare i parametri che governano un'equazione costitutiva (*VFM – virtual fields method*). La sua spiegazione in dettaglio viene rimandata nell'articolo [7].

In breve, la procedura di calcolo del VFM è basata sulla minimizzazione della differenza tra i lavori virtuali interni ed esterni e presenta numerosi vantaggi (non è iterativa, non richiede un modello ad elementi finiti, è insensibile alle distribuzioni dei carichi...), tuttavia per il setup sperimentale utilizzato basato sulla DIC-2D si tratta di

un metodo poco accurato, poiché nel calcolo dei lavori virtuali non vengono inclusi le deformazioni fuori dal piano superficiale del provino, per cui, è preferibile dare priorità all'accuratezza dei risultati con un metodo più lungo e laborioso. Ciò non toglie che il VFM sia un metodo preciso e molto impiegato: con una coppia di telecamere basate sulla DIC-3D, o utilizzando un sistema DIC-2D con lente telecentrica bilaterale, risulta più veloce e affidabile rispetto al FEM.

7. Configurazione del software DIC-2D

Il software di correlazione d'immagine digitale utilizzato nelle prove sperimentali è il freeware Moire. Rispetto a un programma a pagamento è meno intuitivo e più elaborato da utilizzare, tuttavia per un primo approccio con uno strumento ottico di misurazione rimane una soluzione valida che permette di contenere l'investimento iniziale.

Dopo aver concluso la prova di trazione si procede con il salvataggio del video sul computer e con una serie di passaggi necessari alla post-elaborazione dei dati:

- a) Estrazione mirata dei fotogrammi dal filmato.
- b) Sincronizzazione del video con la cella di carico.
- c) Conversione in scala di grigio a 8 bit dei frame scelti (se previsto dal software di correlazione).
- d) Apertura dei fotogrammi a coppie nel software di analisi DIC-2D.
- e) Utilizzo degli algoritmi di correlazione per ricavare spostamenti e deformazioni nel piano (post-elaborazione primaria).
- f) Esportazione dei risultati su un foglio di calcolo (post-elaborazione secondaria).
- g) Raccolta e calcolo dei dati.
- h) Elaborazione dei grafici.

I fotogrammi estratti dal video vengono salvati in formato bitmap, adatto alla memorizzazione temporanea delle immagini per lettura veloce e senza perdite di qualità. Può accadere che a seconda del software DIC utilizzato bisogna effettuare un downsizing dei bit del fotogramma da 24 bit a 16 bit (Gom Correlate Professional) o a 8 bit (Moire), con conseguente diminuzione della profondità di campo dell'immagine analizzata. Si passa dai 16777216 livelli di grigio del frame a 24 bit ai 256 di quello a 8 bit, più che sufficienti per caratterizzare gli spostamenti degli speckles.

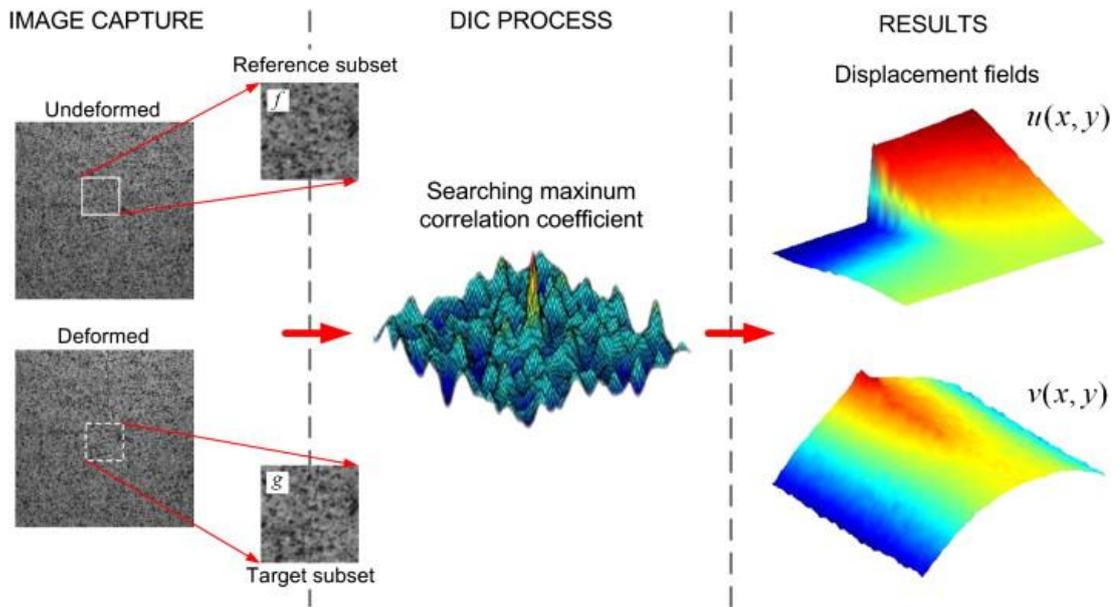


Fig. 7.1 – Operazioni effettuate dal software DIC-2D nella post-elaborazione primaria.

Un software in grado di elaborare una mole di bit più elevata restituisce dei risultati di deformazione più accurati, ma necessita di una maggiore potenza di calcolo da parte dell'elaboratore e di costi maggiori che in un primo approccio al sistema si cercano di limitare.

Moire consente di creare una zona di interesse nel fotogramma (*region of interest* o ROI) in cui verrà effettuata la DIC-2D, escludendo tutta la parte circostante e in tal modo confinando l'analisi agli speckles all'interno della regione. L'isolamento di una porzione dell'immagine ha il vantaggio di eliminare eventuali errori dovuti all'applicazione dell'algoritmo di correlazione anche sullo sfondo dietro al provino (sconfinamento rispetto ai bordi), causando degli insiemi vuoti restituiti dalla fotogrammetria DIC sul tratto calibrato.

La regione di interesse viene realizzata direttamente sul primo fotogramma del video che raffigura il provino indeformato.

Nella fig. 6.2 si nota la differenza dimensionale tra il campo visivo della telecamera e la regione d'interesse considerata, che nel caso di provini lisci è un rettangolino coincidente con la superficie delimitata dal tratto calibrato.

In realtà viene considerata una porzione leggermente più piccola lasciando un piccolo margine dai bordi, questo perché lo slittamento minimo del provino all'interno degli afferraggi durante la deformazione e la riduzione della sezione resistente porterebbero la ROI ad inglobare un pezzetto dello sfondo generando degli insiemi vuoti in fase di correlazione.

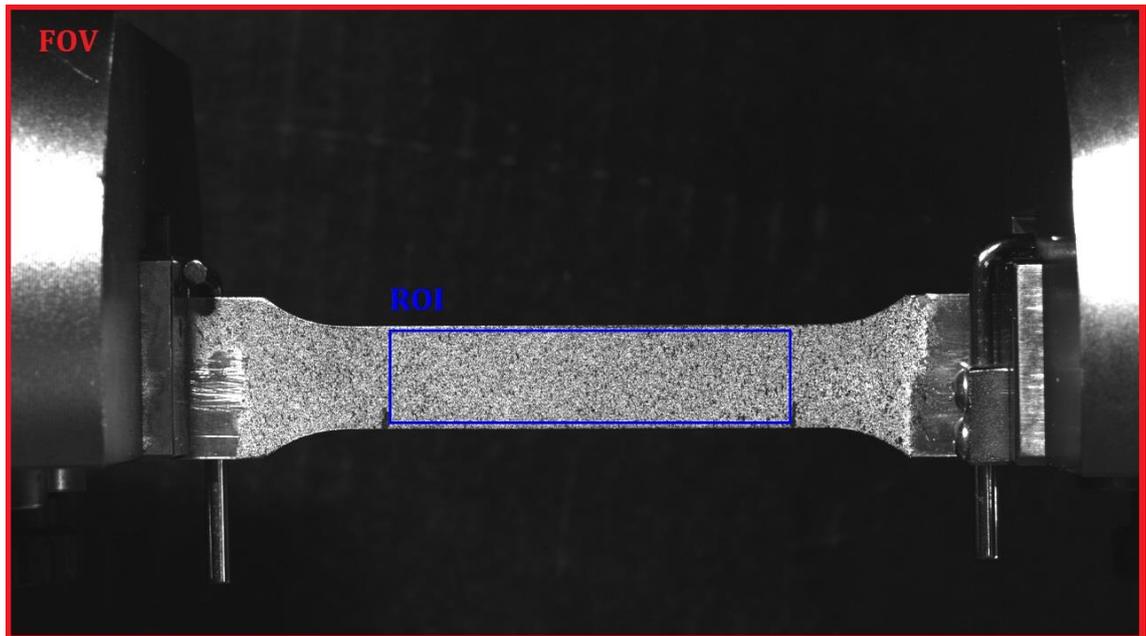


Fig. 7.2 – Definizione della ROI per un provino liscio con tratto calibrato pari a 50 mm.

La regione di interesse considerata cambia con la geometria del provino: si cerca di includere la zona maggiormente sollecitata in cui avviene la rottura. Al fine di evitare errori, il fotogramma che precede il distacco delle due superfici di rottura può essere preso come riferimento per la realizzazione della ROI.

Le impostazioni del software sono numerose e non tutte necessarie. Innanzitutto viene regolato lo stato di sollecitazione scegliendo la taglia delle deformazioni. Nel caso di provini in DP800 e lega 7075 l'allungamento a rottura copre una porzione ampia dell'immagine, perciò si procede scegliendo la modalità estesa (2D: large deformations or rotations). Eventuali rototraslazioni rispetto all'asse dovute a micro slittamenti del provino negli afferraggi saranno compensate in automatico.

In seconda battuta si sceglie se utilizzare una ROI o procedere con il riconoscimento automatico dei contorni del provino nell'immagine. In tal caso valgono le considerazioni fatte in precedenza e conviene quasi sempre confinare la correlazione digitale in una porzione limitata di interesse.

Le modalità con cui le due immagini vengono confrontate devono essere definite: si può procedere manualmente scegliendo uno o più pixel di riferimento nei due fotogrammi (procedura utile se la deformazione non è uniforme sul tratto utile o l'immagine risulta leggermente sfocata) altrimenti è più comodo impostare la ricerca automatica dei pixel.

Le dimensioni di un eventuale "subset flessibile" (flexible subset) introdotto nella correlazione variano in funzione della zona dell'immagine e aumentano con il diametro delle goccioline. Ingrandendo un determinato subset comporterebbe un impoverimento della precisione del picco di deformazione locale; al contrario un rimpicciolimento aumenterebbe il grado di dettaglio locale, se la risoluzione e le dimensioni delle goccioline lo permettono.

Per una regione di interesse dalla forma semplice (es. rettangolo) si può impostare una dimensione fissa del subset, dopodiché risulterà praticamente impossibile che tutti i facet con i lati uguali riempiano tutta la porzione sottoposta alla correlazione e ne scaturisce un "effetto di bordo" che diminuisce il grado di precisione per valori di deformazione misurati globalmente, cioè calcolando la media su tutta la regione d'interesse. L'effetto deriva dallo spazio vuoto rimanente tra l'insieme dei subset e i bordi della ROI e se dei pixel immobili finissero in pasto all'algoritmo di correlazione la mappa degli spostamenti elaborati potrebbe risultare compromessa.

Dal software si può scegliere se escludere o includere parzialmente tutti i subset vuoti facendo attenzione ai pixel immobili, i quali in caso di valutazione abbasserebbero la deformazione media nella regione d'interesse a causa dei loro valori di deformazione erroneamente nulli.

Per limitare la perdita d'informazione è preferibile realizzare una ROI con un certo margine rispetto ai bordi del provino, in tal modo scegliendo l'inclusione totale dei subset si è certi di essere lontani dai pixel immobili (dello sfondo) e di conseguenza le letture di deformazione media sul tratto utile risultano più affidabili.

La binarizzazione delle immagini, se impostata, facilita il riconoscimento dello sfondo da parte del software, tuttavia senza livelli di grigio un pixel che può essere letto come bianco o nero comporta una falsificazione importante dei risultati nel caso delle tonalità intermedie.

Un'altra possibilità è l'introduzione di un filtro passabasso che agisce in maniera opposta al filtro di binarizzazione, utile per l'eliminazione del rumore nell'immagine quando la superficie del provino non è sufficientemente illuminata, ma ciò comporta una perdita di nitidezza e necessariamente di accuratezza.

Moire permette una scelta più approfondita dell'algoritmo di correlazione utilizzato per la DIC-2D e in genere la funzione migliore viene settata di default.

Nella Fig. 14 vengono mostrati tutti gli algoritmi: ognuno presenta una soluzione differente al problema di correlazione e può essere identificato da una sigla. La maggior parte sono basati sulla *zero-mean normalized cross correlation* (ZNCC) e sulla *zero-mean normalized sum of squared difference* (ZNSSD). Riguardo all'impostazione manuale di una ROI è quasi sempre conveniente utilizzare la prima tipologia di algoritmo (il funzionamento è descritto nella equazione (1)).

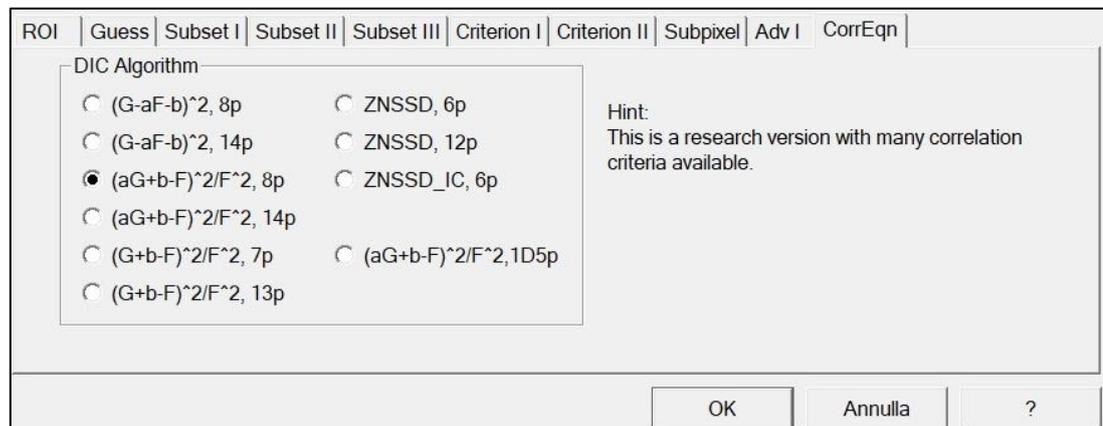


Fig. 7.3 – Finestra di Moire per la scelta dell'algoritmo DIC-2D.

Una volta confermati su schermo tutti i parametri vengono mostrati i livelli di errore stimati per le combinazioni possibili dei parametri di subset: viene mostrata una colonna con i livelli e a ogni livello corrisponde un range dimensionale di subset che

forniscono un determinato livello d'errore. Le dimensioni del subset possono essere corrette dopo la correlazione basandosi sui livelli d'errore rilevati.

In breve impostare correttamente un software DIC risulta una fase molto importante per ottenere un buon grado di precisione, tuttavia non esiste una precisione assoluta della correlazione digitale a causa dei seguenti fattori:

- Bordi della ROI non coincidenti con quelli del provino (effetto di bordo).
- Rumore nelle zone scure dovuto a scarsa illuminazione.
- Agglomerati di speckles che aumentano le dimensioni minime imponibili del subset.
- Binarizzazione b/n dei fotogrammi.
- Conversione a 8 bit delle immagini (diminuisce profondità di campo).
- Presenza nella ROI di pixel immobili non appartenenti al provino o senza speckles.

Ognuno dei precedenti fattori elencati, se ottimizzato, consente un miglioramento del livello di accuratezza generale raggiungibile durante la post-elaborazione primaria della correlazione digitale.

8. Analisi dei materiali impiegati

I materiali utilizzati per le prove sperimentali sono l'acciaio DP800 e la lega d'alluminio 7075. Mentre gli acciai dual phase sono più diffusi in ambito automotive, le leghe 7xxx risultano ancora poco impiegate, per tale motivo l'attenzione è riservata maggiormente alle potenzialità delle seconde, trattandole come un materiale innovativo per componenti in lamiera della scocca.

8.1 DP800

Gli acciai dual phase DP800 (assieme ai DP600 e ai DP1000) fanno parte della famiglia degli AHSS, o anche acciai alto-resistenziali di alta gamma caratterizzati da elevati carichi e allungamenti a rottura. Essi offrono un notevole equilibrio in termini di costi, peso, resistenza, durabilità, alti livelli di formabilità (DP-HF high formability steel) e prestazioni riguardo l'assorbimento dell'energia (caratterizzate da un rapporto tra carico di snervamento e di rottura basso e da una fase d'incrudimento molto estesa).

La microstruttura di un acciaio dual phase è composta da una matrice ferritica con particelle di seconda fase di martensite dispersa aggregata in isole. Aumentando la frazione di martensite viene incrementata la resistenza, mentre la ferrite conferisce all'acciaio una buona duttilità.

Nel caso di acciai dual phase è presente l'effetto bake hardening (BH), il quale avviene combinando la deformazione plastica e l'invecchiamento dovuto a un ciclo termico di cottura (es. nel processo di verniciatura), con lo scopo di ottenere un incremento della tensione di snervamento e di conseguenza della resistenza meccanica del materiale. L'estensione del BH dipende dalla composizione chimica dell'acciaio e dalla sua storia termica.

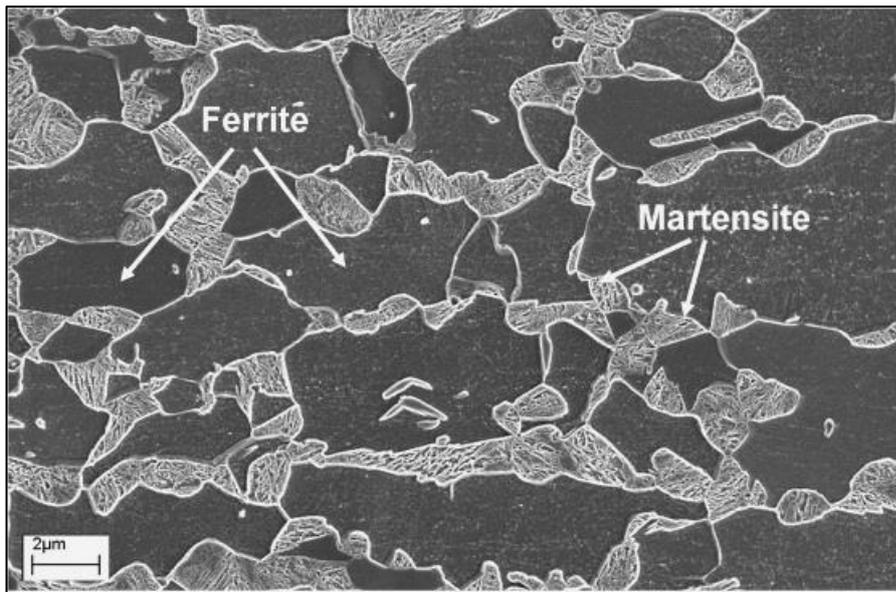


Fig. 8.1 – Microstruttura di un acciaio DP800 (fonte *ispatguru.com*).

Nel caso di acciai DP800 laminati a caldo aumentando la percentuale di carbonio e con velocità di raffreddamento controllate viene favorita la formazione di martensite dall'austenite e si riesce a ottenere un incrudimento maggiore. Lo stesso risultato viene raggiunto inserendo elementi microleganti come Manganese, Cromo, Molibdeno, Vanadio e Nickel. Il carbonio e i microleganti si controllano in percentuale non solo per la resistenza meccanica, ma anche per mantenere una buona saldabilità del materiale (le saldature a punti sono molto frequenti nei componenti della carrozzeria).

Gli acciai DP800 ottenuti mediante solubilizzazione e laminazione a freddo (cold rolling) presentano in generale dei carichi a rottura più importanti rispetto ai laminati a caldo, a seconda del trattamento effettuato, del tenore di carbonio e di una serie di altre caratteristiche del materiale. Si tratta dello stesso tipo di trattamento termomeccanico utilizzato per realizzare il materiale dei provini utilizzati nella prova di trazione. Nel Grafico 1 viene riportata una curva ingegneristica tipica per un DPC800 (la "C" indica un trattamento di "cold rolling").

Per un acciaio DP800 laminato (allo stesso modo dei provini delle prove sperimentali) le proprietà meccaniche in direzione longitudinale previste sono presentate nella seguente tabella:

DP CR Grade	Rpo2 min [MPa]	Rm min [MPa]	A50% min
DP800	420 - 550	780	14

Tabella 8.1 – Proprietà meccaniche previste dalla prova sperimentale per il DP800.

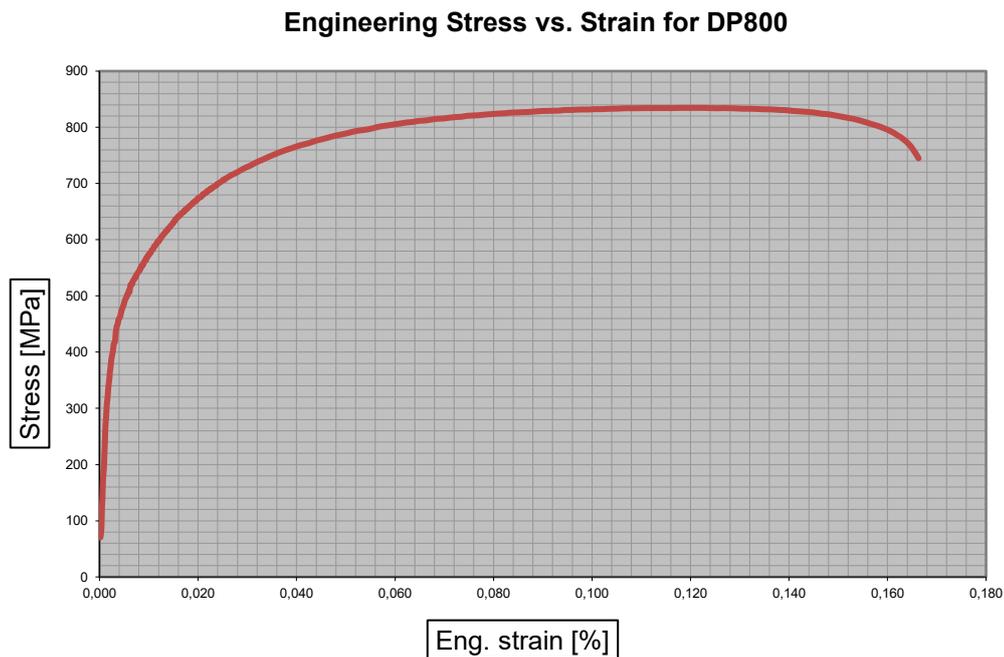


Grafico 8.1 – Curva di trazione tipica per un DPC800, tratta da [4].

8.2 AA7075

Attualmente la tendenza più diffusa in campo automobilistico è quella di utilizzare leghe Al-Mg (serie 5xxx) e Al-Mg-Si (serie 6xxx) per componenti di lamiera leggeri. Si preferisce impiegare materiali che possano consentire una riduzione di peso ma che al contempo riescano a resistere ai carichi medio/alti e alla corrosione. Per la prova di trazione sono state prese in considerazione le leghe Al-Zn-Mg(Cu) (serie 7xxx).

Tra i benefici garantiti da questa tipologia di materiale vi è la possibilità di resistere a carichi superiori a 700 MPa (come indicato in [5]), con carichi di snervamento anche doppi rispetto alle leghe 6xxx e un rafforzamento che avviene per precipitazione.

Le proprietà meccaniche della lega AA7075 (AlZn5, 5MgCu) nel caso di forme semplici possono essere ottimizzate con un trattamento T6, che secondo lo standard ASTM prevede un ciclo termico (in fig. 7.3) composto da solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale. Lo stampaggio a tiepido (con temperature comprese tra 170 e 200 °C) in una pressa idraulica consente di ottenere il prodotto finito.

In tal modo le proprietà meccaniche vengono mantenute costanti, riducendo i costi di produzione. Un abbassamento del tempo d'invecchiamento o della temperatura di invecchiamento al di sotto dei 200 °C causa una diminuzione delle proprietà meccaniche fino a rendere il materiale non conforme all'utilizzo.

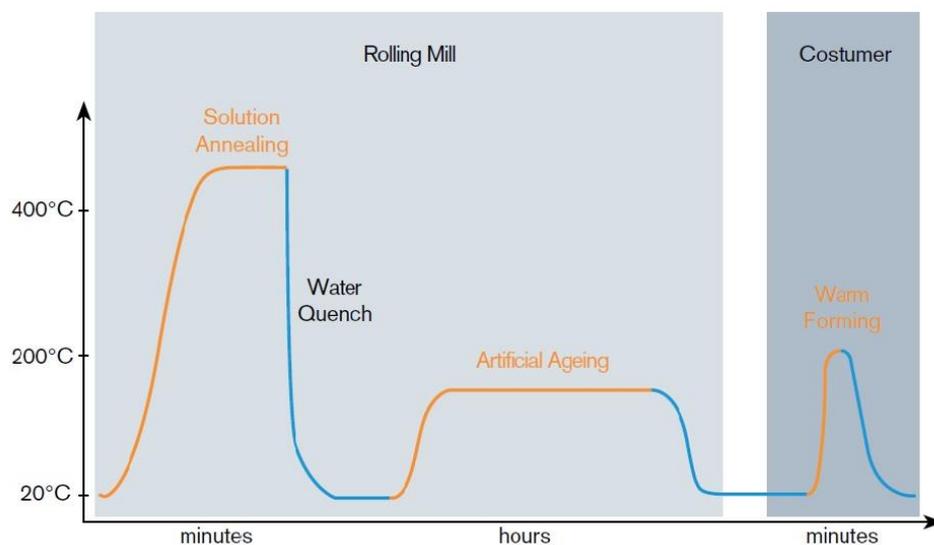


Fig. 8.3 – Ciclo termo-meccanico tipico per una lega AA7075 alto resistenziale.

Le leghe Al-Zn-Mg(Cu) sono particolarmente adatte a subire un rafforzamento per invecchiamento, tuttavia risultano più sensibili alla corrosione. Le caratteristiche meccaniche principali sono dovute alla precipitazione della fase η ($ZnMg_2$) e comprendono un limite di snervamento e a rottura migliori rispetto alle altre serie, massima resistenza, tenacità e miglior comportamento a compressione.

Il rame viene aggiunto con una percentuale superiore all'1% per incrementare la resistenza attraverso l'indurimento per soluzione solida, il quale non altera il processo base di precipitazione. Una sua aggiunta in genere migliora la resistenza alla tensocorrosione (SCC - stress corrosion cracking) dovuta all'azione combinata della

corrosione e dell'applicazione di un carico costante, tuttavia aumenta il degrado estetico del materiale il quale non compromette le sue proprietà meccaniche.

Il trattamento T6 consente di raggiungere delle buone proprietà meccaniche e una bassa resistenza alla SCC. Il T7, invece, rimedia alla bassa resistenza alla tensocorrosione, ma con un peggioramento delle proprietà meccaniche.

La lega 7075 in questione utilizzata nelle prove sperimentali ha subito un trattamento T6, cioè uno dei trattamenti termici più diffusi in ambito industriale.

La microstruttura è composta da una matrice di alluminio e da fasi disperse: $Al_{18}Mg_3Cr_2$ (dispersoidi), Al_7Cu_2Fe e $(Fe, Cr)_3SiAl_2$, ossia fasi dovute alla presenza di elementi come il Cr che durante il raffreddamento dallo stato fuso si uniscono con l'alluminio creando dei composti intermetallici. I dispersoidi tendono a formarsi a temperature elevate; essi migliorano la stabilità del grano cristallino e tendono a prevenire una sua crescita eccessiva, mantenendo una dimensione fine dei grani e, di conseguenza, evitando un calo della resistenza meccanica.

Durante l'invecchiamento, avvengono le seguenti trasformazioni:

Soluzione solida → *Zone GP* → *η' metastabile* → *η(MgZn₂) stabile*



Fig. 8.4 – Microstruttura di un AA7075-T6 (fonte *Centro Ricerche Fiat*).

L'addensamento del soluto in cluster dispersi nella matrice avviene attraversando una serie di stadi. Nelle zone di Guinier-Preston i cluster crescono e iniziano a opporsi al moto delle dislocazioni, generando un rafforzamento. Procedendo con l'invecchiamento si forma prima un precipitato semicoerente (η') con la matrice di alluminio e per questo, nonostante la stechiometria finale, il reticolo cristallino risulta distorto con un picco di deformazione reticolare che porta a valori massimi di durezza. In seguito si genera un'interfaccia incoerente fra matrice e precipitato, il quale acquisisce la forma finale.

La condizione ideale per il rafforzamento è l'introduzione omogenea di piccoli precipitati all'interno del grano. Ciò può avvenire innalzando il corpo del grano a un livello di energia paragonabile a quello del bordo di grano: si possono introdurre tensioni residue, aumentare la concentrazione delle vacanze oppure forzando una soluzione solida sovrassatura. In tal modo si ottiene una nucleazione spontanea e contemporanea in tutto il grano, tale da garantire una buona dispersione dei precipitati.

Nelle due tabelle 7.2 e 7.3 sono indicate la composizione chimica e le proprietà meccaniche della lega 7075-T6 utilizzata nelle prove di trazione. Si è scelto di studiare il comportamento della AA7075-T6 con una percentuale alta di rame (>1%). L'infragilimento da idrogeno e la corrosione da pitting rimangono comunque un ostacolo più importante rispetto alle leghe 6xxx.

Analisi chimica lega [%]	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Cr	Al
AA7075-T6	1.6	0.1	0.18	0.04	2.7	6.1	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.21	rest

Tabella 8.2 – Composizione chimica della lega AA7075-T6 impiegata nella prova.

Lega	R _{p02} [Mpa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
AA7075-T6 (range)	450 - 560	460 - 580	12 - 15

Tabella 8.3 – Proprietà meccaniche previste per la AA7075-T6.

9. Raccolta dei dati numerici

Una volta acquisite le nozioni più importanti sul funzionamento del videoestensimetro bisogna stabilire una metodologia valida per ottenere tutti i dati necessari. Ogni fotogramma estratto dal video della prova sperimentale corrisponde a un punto del grafico sforzo-deformazione (procedura point by point).

Avendo salvato in una cartella di lavoro tutte le immagini monocromatiche si procede con una fase di post-elaborazione primaria che prevede l'acquisizione della mappa degli spostamenti associati al sistema di riferimento e del modulo delle deformazioni ingegneristiche.

Successivamente si prosegue mediante una post-elaborazione secondaria, trasferendo le informazioni ottenute sul foglio di calcolo elettronico e calcolando per ogni fotogramma correlato i valori della deformazione reale e da essi quelli della tensione reale, riuscendo a rappresentare sul grafico tutti i punti acquisiti della curva tensione reale – deformazione reale.

Anche le accortezze più banali se non vengono rispettate rischiano di falsare i punti acquisiti, per questo motivo nel seguente capitolo verrà approfondita la procedura di acquisizione dei dati sperimentali. La configurazione dell'hardware costituente il setup sperimentale e del software DIC sarà data per acquisita da ora in poi.

9.1 Geometrie dei provini

I provini considerati nelle prove sperimentali hanno tre geometrie diverse:

- Liscio con tratto calibrato di 50 mm (smooth).
- Intaglio centrale (notch).
- Forato al centro.

La direzione di laminazione è sempre longitudinale per tutte le geometrie. A causa della scelta del materiale e del processo di taglio in officina i provini reali presentano

alcune dimensioni discordanti rispetto ai disegni quotati. In ogni caso le misure più rilevanti sono state acquisite con il calibro digitale prima della prova: gli spessori dei fogli sono mediamente di 0,8 mm per il DP800 e di 1,8 mm per la lega 7075.

Eventuali quote mancanti è possibile determinarle a posteriori dalle distanze espresse in pixel tramite il rapporto mm/pixel del fotogramma, avendo almeno una misura nota sul piano dell'immagine, con un errore dimensionale trascurabile rispetto alla quota reale (<10%).

La terna di riferimento comune in tutte le prove è mostrata in figura 8.3. Le dimensioni misurate con il calibro sono in genere la larghezza (w) e lo spessore (t).

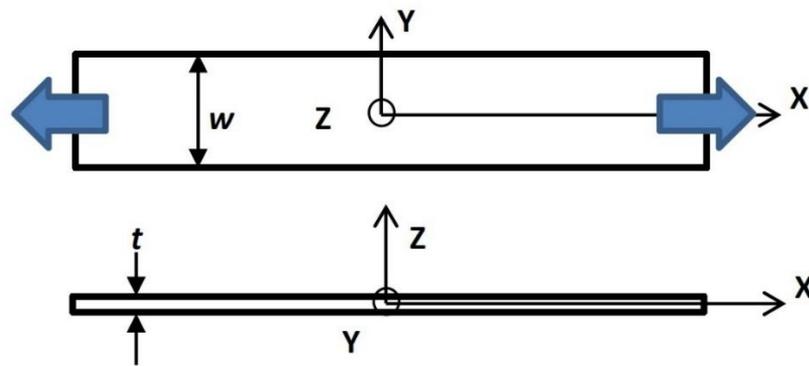


Fig. 9.1 – Sistema di riferimento per la DIC-2D.

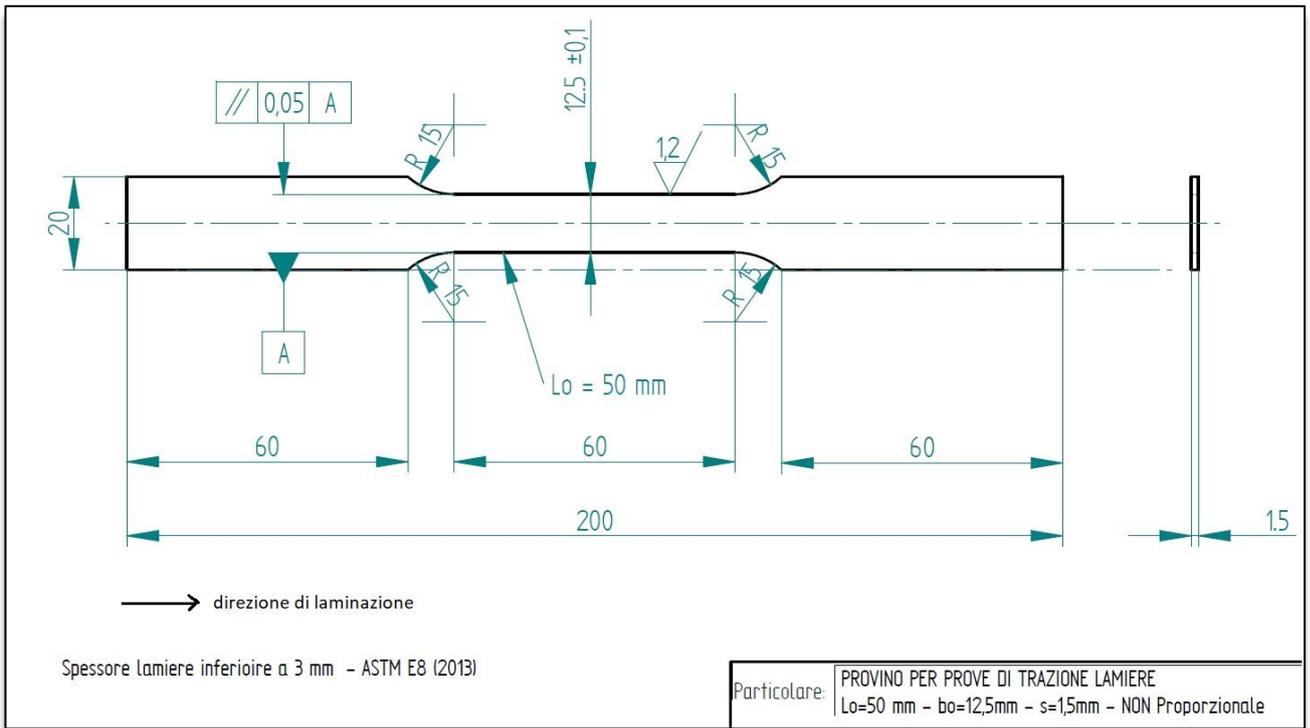


Fig. 9.2 – Disegno quotato del provino liscio (smooth).

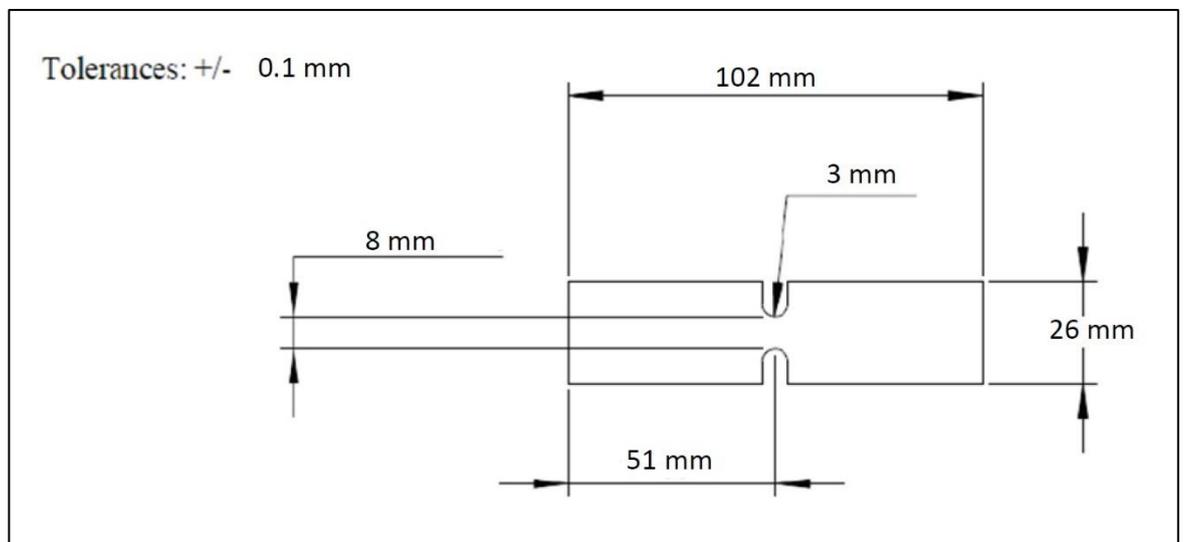


Fig. 9.3 – Disegno quotato del provino (notched specimen).

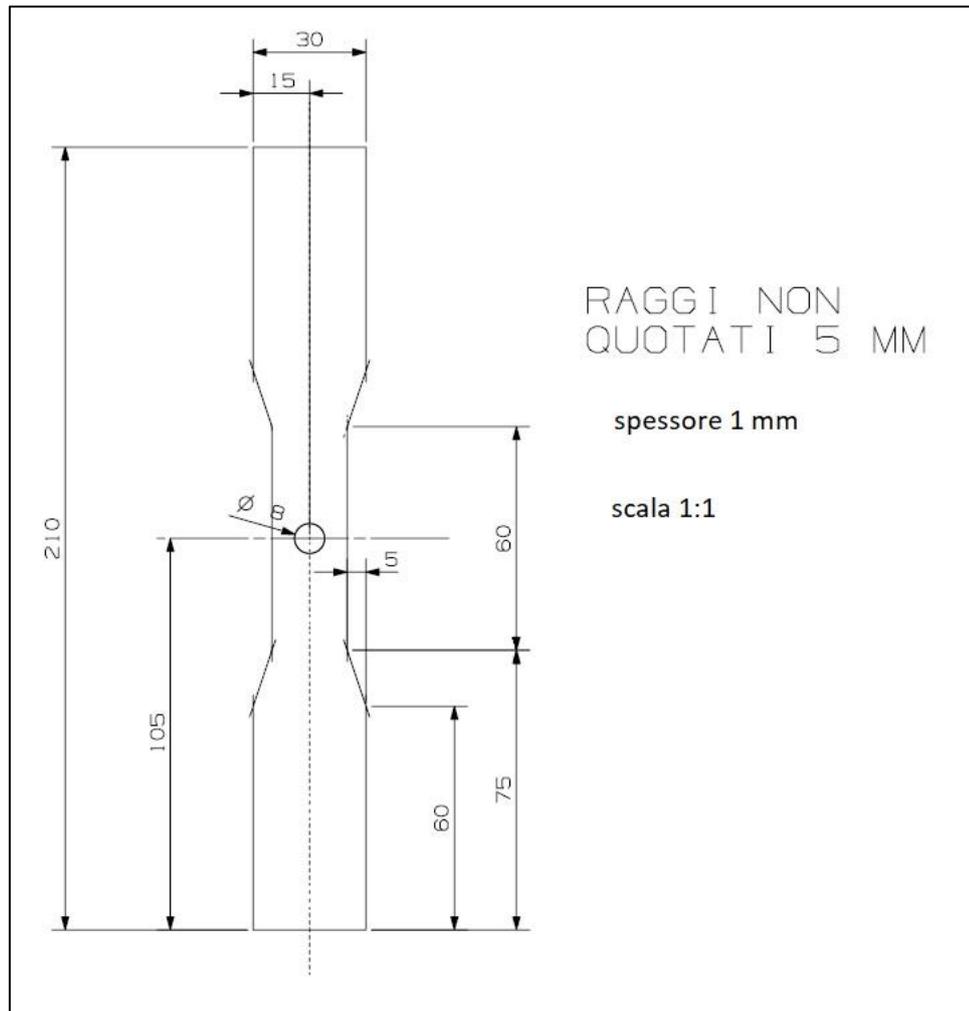


Fig. 9.4 – Disegno quotato del provino con il foro centrale.

9.2 Preparazione dei provini

I campioni sono stati preparati nella maniera seguente:

- Pulizia della faccia del provino da verniciare con un panno imbevuto di alcol etilico.
- Passata uniforme di vernice acrilica bianca sul tratto utile.
- Attesa di una decina di minuti affinché la vernice aderisca meglio al campione senza essiccarsi eccessivamente.

- Realizzazione manuale degli speckles con una bomboletta di vernice nera, cercando di mantenere un rapporto del 50% con la parte precedentemente verniciata di bianco.
- Posizionamento del provino negli afferraggi della macchina di prova.

Per ottenere una maggior precisione nella realizzazione del pattern è consigliabile l'utilizzo di un aerografo. Durante la verniciatura il provino deve essere tenuto in posizione verticale, mentre il getto circa orizzontale. La densità della vernice acrilica deve essere elevata ma non eccessiva da formare grumi in superficie del componente e intasamenti dell'aerografo.

Un eventuale distaccamento di vernice in caso di provini soggetti ad alte deformazioni può essere escluso dalla regione di interesse se non compromette la misurazione di zone critiche. Per limitare il distacco di vernice a fine prova si esegue la prova di trazione poco dopo la verniciatura, quando il colore è ancora fresco.

Il colore del pannello situato nello sfondo non influisce sulla validità della correlazione digitale, tuttavia è meglio scegliere una tinta unita poco riflettente per evitare di generare riflessi di luce in corrispondenza del provino.

9.3 Acquisizioni delle immagini

Le caratteristiche del sistema di misura DIC-2D impiegato sono le seguenti:

- Sensore 1/1.2'' ($d = 13,33$ mm).
- Lunghezza focale = 25 mm.
- $FOV_b = 25,5^\circ$, $FOV_h = 16,2^\circ$.
- Risoluzione impostata 1280x720 pixel.
- Frame rate = 33,75 fps.
- Sistema di illuminazione anulare.

La distanza di ripresa tra l'obiettivo e il campione non è fissa, bensì viene scelta in base ad alcune caratteristiche della prova come la geometria del provino o l'ingrandimento che si vuole ottenere nella zona di rottura.

Le dimensioni ottimali degli speckles (di 3 pixel) sono legate alla risoluzione dell'immagine, alle dimensioni in pixel del componente nel campo visivo, alla deformazione massima prevedibile del materiale e alla distanza di ripresa. È utile stimare in eccesso l'allungamento del provino a fine prova per tenere conto dell'inquadratura iniziale di riferimento, altrimenti la porzione contenente lo stato di sollecitazione massimo potrebbe sfuggire dal campo visivo prima del termine della prova.

Il subset per essere perfettamente correlabile con delle goccioline di 3 pixel dovrebbe avere delle dimensioni di 31 x 31 pixel. La dimensione del subset, se aumentata, limita la decorrelazione da saturazione sul nero in zone con goccioline grandi, tuttavia facilita la decorrelazione da saturazione sul bianco in zone con goccioline piccole o sporadiche. Per scegliere la dimensione giusta bisogna trovare il miglior compromesso tra il grado di discretizzazione delle misure locali e la diminuzione di rumore dei dati prelevati (che può essere filtrata con le tecniche numeriche di curve fitting).

Al di sotto dei 10 pixel per ogni millimetro del provino è probabile che il software dia delle problematiche di elaborazione della mappa con le deformazioni dovute a una distanza di ripresa troppo grande. Per risolvere il problema è consigliabile inquadrare solamente le zone da analizzare in cui avviene la rottura.

La videocamera è sensibile alle interferenze elettromagnetiche: la ripresa della prova può essere danneggiata irreversibilmente a causa dell'alta sensibilità della strumentazione ottica ai disturbi irradiati. Un possibile rimedio si può ottenere collegando la videocamera al computer con dei cavi schermati e mantenendo le fonti di disturbo (come cellulari) lontane dalla telecamera. Eventuali bande d'interferenza che compaiono nel video possono causare dei buchi d'informazione sul diagramma sforzo – deformazione, compromettendo la post-elaborazione dei dati.

9.4 Sincronizzazione del video con la macchina di prova

Una procedura comune in tutte le prove elaborate con DIC è quella di sincronizzare il tempo fornito dalla cella di carico con il tempo del video della prova sperimentale. Occorre associare i carichi e i fotogrammi appartenenti agli stessi istanti temporali.

La sincronizzazione è eseguita in base all'istante di rottura del provino calcolando la differenza tra i seguenti tempi di rottura:

- Tempo di rottura della macchina → condizione di rottura incipiente identificabile graficamente con la caduta del valore di carico.
- Tempo di rottura nel video → calcolabile dal rapporto del numero di frame che precedono l'apparizione della frattura superficiale con il frame rate della telecamera (33,75 fps).

L'avvio della registrazione video precede di qualche istante l'azionamento della macchina di prova per tener conto delle due tempistiche differenti, mentre l'acquisizione del carico termina solo dopo la separazione delle due superfici di rottura, a carico idealmente nullo.

La sincronizzazione tiene conto di un *delta acquisizioni* (Δ_{acq}), calcolabile come la differenza tra il tempo di rottura video e il tempo di rottura della macchina di prova. La durata del video in secondi può essere convertita in fotogrammi e viceversa; per individuare l'istante preciso in cui inizia la strizione si considera il tempo associato al carico massimo (nel diagramma carichi-tempi) e si calcola il fotogramma corrispondente con la formula (11).

$$\text{Frame}_{\text{neck}} = (t_{\text{neck-macchina}} + \Delta_{\text{acq}}) \cdot \text{fps} \quad (11)$$

Frame Camera	Tempo Camera [s]	Tempo macchina di prova [s]	CARICO SINCRONIZZATO [N]
6543	193,87	169,95	7042
6535	193,63	169,71	7187
6530	193,48	169,56	7257
6520	193,19	169,27	7361
6510	192,89	168,97	7432
6500	192,59	168,68	7491
6490	192,30	168,38	7539
...

Tab. 9.1 – Esempio di sistemazione dei dati su un foglio elettronico.

9.5 Estrazione dei fotogrammi dal video

L'estrazione dei fotogrammi dal video avviene partendo al ridosso della rottura del provino. Conviene stabilire un intorno per la cattura delle immagini: si può escludere il tratto dalla rottura in poi, in quanto non avrebbe un senso fisico.

Il fotogramma che precede la separazione delle superfici di rottura è il primo a essere acquisito, successivamente si procede a ritroso con un'acquisizione inizialmente periodica fino alla condizione iniziale della prova, estrapolando il fotogramma di riferimento per la misura degli spostamenti e delle deformazioni.

Nel video bisogna fare attenzione a trovare manualmente il fotogramma preciso in cui avviene la rottura. La prima immagine da correlare è quella che precede l'apparizione della prima cricca sulla superficie del provino, quando avviene la propagazione della frattura. In caso di incertezza può essere utilizzato un software di post-produzione dell'immagine per regolare la luminosità e il contrasto, anche se una regolazione fine delle impostazioni video prima della prova dovrebbe consentire una percezione chiara della condizione di rottura.

Un altro fotogramma importante da individuare è quello in cui ha inizio la fase di strizione. Non è necessario elaborare fotogrammi al di sotto della condizione di instabilità perché il tratto elastico e l'incrudimento comprendono deformazioni

uniformi sull'intero tratto e sono già acquisibili dall'estensimetro meccanico, tuttavia per valutare la precisione del video-estensimetro verranno eseguite alcune misurazioni prima che inizi il fenomeno della strizione.

Risulta utile adottare una coppia di strumentazioni per un'acquisizione più esaustiva delle deformazioni: un video-estensimetro basato sulla DIC-2D di fronte alla macchina e un estensimetro meccanico a lettura diretta. Per ottenere la tensione ingegneristica dal carico prima di avviare la prova bisogna ricordarsi di impostare il valore della sezione resistente iniziale calcolabile moltiplicando lo spessore per la larghezza del provino, entrambi misurabili con un calibro.

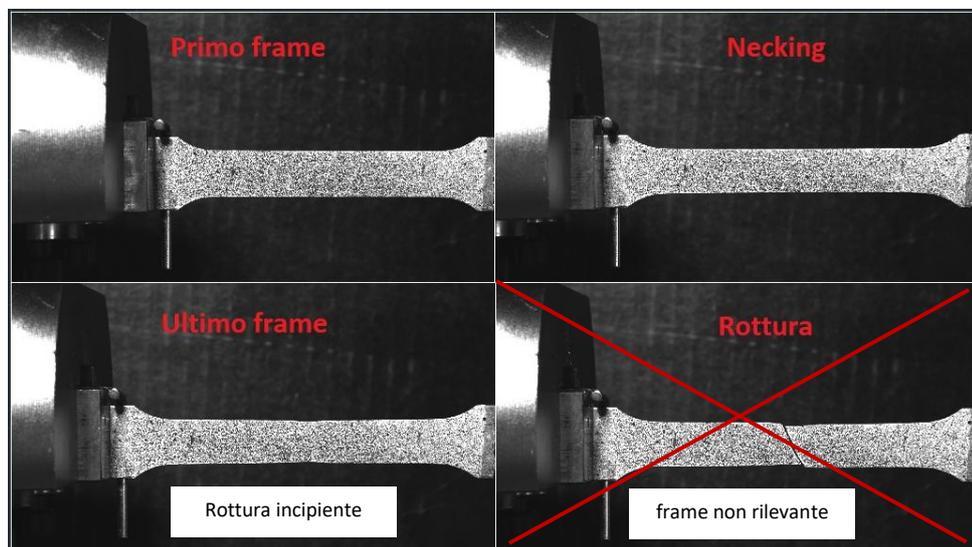


Fig. 9.5 – Fotogrammi più rilevanti in una prova con DIC-2D.

Per individuare il fotogramma preciso in cui inizia la condizione di instabilità bisogna sincronizzare il tempo del video con quello della cella di carico. La sincronizzazione va impostata subito dopo aver individuato il fotogramma che contiene la condizione di rottura incipiente. In questo modo l'operazione di estrazione dei fotogrammi dal video è limitata tra il fotogramma in cui inizia la condizione di strizione e l'ultimo utile prima della rottura.

Ogni immagine bitmap viene rinominata con il numero del fotogramma corrispondente e trasferita nella cartella di lavoro. Una volta che i fotogrammi sono

stati tutti correlati, se ci si accorge che le deformazioni non sono sufficienti è possibile riestrarre ulteriori fotogrammi a posteriori e aggiungere i punti necessari a coprire eventuali buchi nella curva tensione-deformazione.

9.6 Post processing primario

Il post processing primario, le cui impostazioni software sono state già ampiamente discusse, comprende l'utilizzo del software DIC-2D per l'acquisizione degli spostamenti e delle deformazioni ingegneristiche in determinati istanti temporali e in determinati punti e/o zone del provino.

Inserendo in ingresso i due fotogrammi da correlare viene restituita la mappa degli spostamenti in pixel lungo le due direzioni del provino longitudinale e trasversale.

Per le deformazioni vengono effettuate delle operazioni di derivazione dello spostamento rispetto alla sua direzione. Le distanze tra punti nello stato indeformato sono espresse a meno dello stesso fattore di scala.

La correlazione viene eseguita confrontando ciascun fotogramma di interesse con il fotogramma iniziale.

Il tratto della curva che necessita di più punti di acquisizione è compreso tra la condizione di instabilità e la rottura incipiente del provino.

È possibile tracciare l'andamento degli spostamenti o delle deformazioni lungo una direzione preferenziale nella regione di interesse, o in alternativa si può ottenere il valore medio in una certa porzione del tratto calibrato. L'elaborazione DIC-2D effettuata nei provini lisci comprende l'acquisizione del valore medio di deformazione calcolato sul:

1. Tratto calibrato.
2. Traccia di necking (su fascia trasversale).
3. Picco locale.

A seconda della superficie di misurazione considerata verrà ricavata una curva tensione reale – deformazione reale differente.

La deformazione media nel tratto calibrato corrisponde all'incirca a quella valutata dall'estensimetro meccanico e permette di ricavare la curva ingegneristica, mentre le deformazioni sul necking diffusivo e locale, avendo uno stato di sollecitazione più significativo, forniscono una curva più allungata.

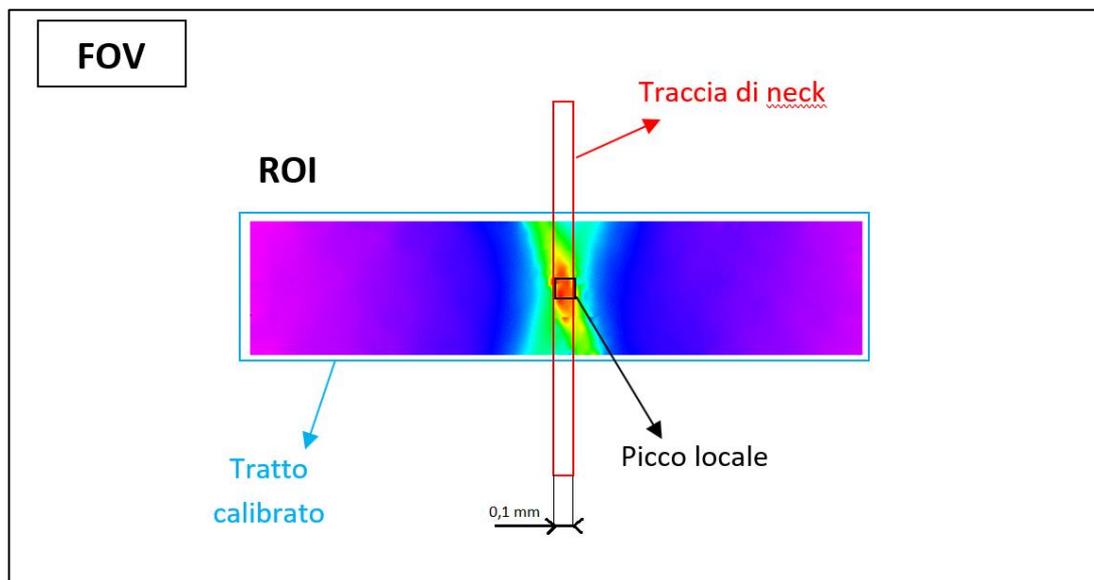


Fig. 9.6 – Zone considerate per la misura dello strain medio in un provino liscio.

La deformazione di picco locale evidenziata in rosso nella tabella 8.2 è calcolata effettuando la media in una porzione d'immagine molto piccola (massimo 2x2 pixel) la quale ingloba la zona più sollecitata del tratto calibrato, poiché con una stima puntuale l'algoritmo di correlazione, essendo funzionale a partire dai pixel e non da un punto dell'immagine, potrebbe fornire un valore di deformazione non conforme allo stato di sollecitazione effettivo. Mentre la deformazione media nella sezione di strizione viene calcolata considerando la media in una fascia di circa 0,1 mm che incorpora la zona in cui è avvenuta la strizione.

Frame Camera	Deformazione X ingegneristica da DIC – media tratto calibrato	Deformazione X ingegneristica da DIC – media sez. resistente	Deformazione X ingegneristica da DIC – media picco locale
6543	0,190	0,470	0,580
6535	0,19	0,457	0,548
6530	0,189	0,448	0,54
6520	0,189	0,432	0,514
6510	0,188	0,422	0,499
6500	0,187	0,409	0,474
6490	0,187	0,399	0,453
6460	0,185	0,369	0,406
...

Tab. 9.2 – Esempio raccolta delle varie deformazioni ingegneristiche sul foglio elettronico.

10. Elaborazione dei dati e risultati

La caratterizzazione di un materiale con la procedura della DIC-2D può essere ottenuta determinando la curva tensione – deformazione e i limiti di deformabilità a rottura con storie di carico differenti su diverse geometrie del provino.

Rispetto alla grande quantità di prove sperimentali effettuate con l'estensimetro meccanico ci limiteremo ad analizzare al massimo due prove per ogni geometria. La decisione deriva dal fatto che la curva tensione reale – deformazione reale ottenuta con un sistema di correlazione digitale delle immagini è più complessa da ottenere. I punti della curva aumentano in proporzione al tempo dedicato al data processing di ogni singola prova e le acquisizioni si concentrano in prevalenza nel tratto compreso tra la condizione di instabilità e la rottura del provino.

Un sistema basato sulla correlazione digitale delle immagini consente di ottenere una quantità notevole di informazioni anche con un numero limitato di prove sperimentali, rispetto a un sistema di tipo tradizionale.

Il pattern a speckles distribuito sulla superficie equivale a posizionare un numero illimitato di estensimetri clip-on sull'intero tratto calibrato con la differenza che i risultati potenzialmente ottenibili sono di gran lunga più completi, aggiungendo la possibilità di misurare la deformazione locale su tutto il tratto calibrato.

10.1 DP800 - Provini lisci

Di seguito le tabelle relative alle dimensioni dei provini lisci testati e alla sincronizzazione con la macchina di prova universale:

DP800 – provino 1		
Tempo di rottura su macchina di prova	169,95	s
Frame rottura video	6543	"..."
Tempo rottura video	193,87	s
Delta acquisizioni	23,92	s
w - larghezza	12,3	mm
t - spessore	0,8	mm
So - Sezione resistente iniziale	9,84	mm ²

DP800 – provino 2		
Tempo di rottura su macchina di prova	163,73	s
Frame rottura video	6159	"_..."
Tempo rottura video	182,49	s
Delta acquisizioni	18,76	s
w - larghezza	13	mm
t - spessore	0,8	mm
So – Sezione resistente iniziale	10,4	mm ²

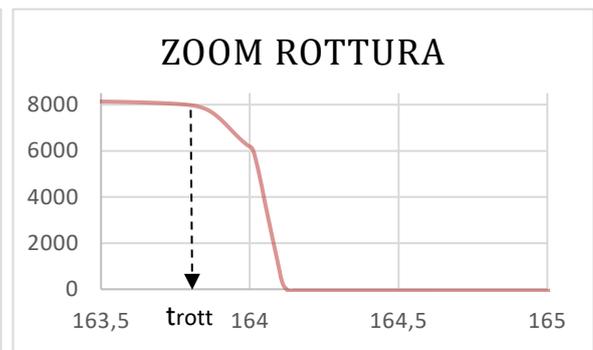
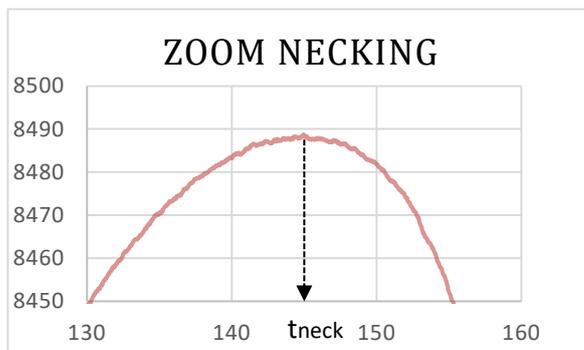
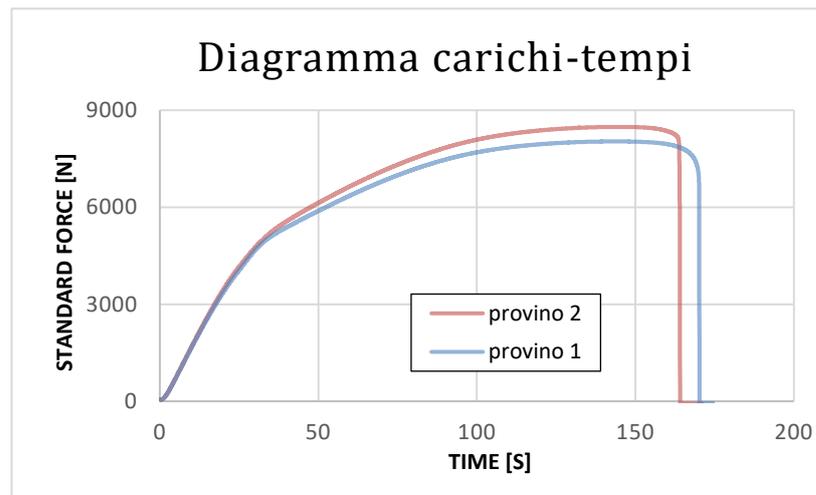


Grafico 10.1 – Carichi acquisiti dei due provini lisci in DP800.

Dall'andamento dei carichi rispetto al tempo si evince un certo scostamento tra le due prove dovuto probabilmente alla conformazione della microstruttura del materiale, ovvero a una percentuale differente di imperfezioni presenti nel reticolo cristallino che devia leggermente la curva di carico dalla condizione di incrudimento in poi.

Per il grafico sforzo-deformazione si è scelto di elaborare 41 punti per il primo provino e 34 per il secondo, la maggior parte di essi collocati dopo la condizione di instabilità. A ogni fotogramma è associato un valore di carico nel diagramma carichi-tempi.

Si è deciso di riportare la maggior parte delle informazioni ricavate per il provino 2, dato che i valori dei carichi sono confrontabili e unendo le curve di tutte le prove in un singolo grafico si creerebbe confusione. Eventuali differenze tra le prove sperimentali verranno discusse in seguito.

Rapportando il carico sincronizzato con la sezione resistente iniziale viene ottenuta la tensione ingegneristica istantanea (12) e accoppiando le tensioni nominali con le deformazioni ingegneristiche (ricavate con DIC-2D) è possibile rappresentare la curva sforzo-deformazione per tutte le superfici analizzate. Pertanto nel caso di provini lisci il calcolo della deformazione media avviene sul tratto calibrato, sulla fascia di necking (di 0,1 mm) e sul picco locale.

$$\sigma_n = \frac{F}{S_o} \quad (12)$$

La deformazione massima locale viene misurata considerando la media in un quadratino di circa 10x10 pixel. Sperimentalmente, come si osserva nel Grafico 10.2, la deformazione media nel quadratino che va dal pixel 16 al 26 coincide in pratica con il valore di picco puntuale.

L'attendibilità del valore di deformazione locale è verificata se la distribuzione delle deformazioni risulta uniforme in almeno 3-4 coppie di subset adiacenti. La verifica serve ad evitare eventuali errori apportati dall'algoritmo di correlazione nelle superfici molto piccole del provino in cui il pattern potrebbe risultare interamente bianco o nero.

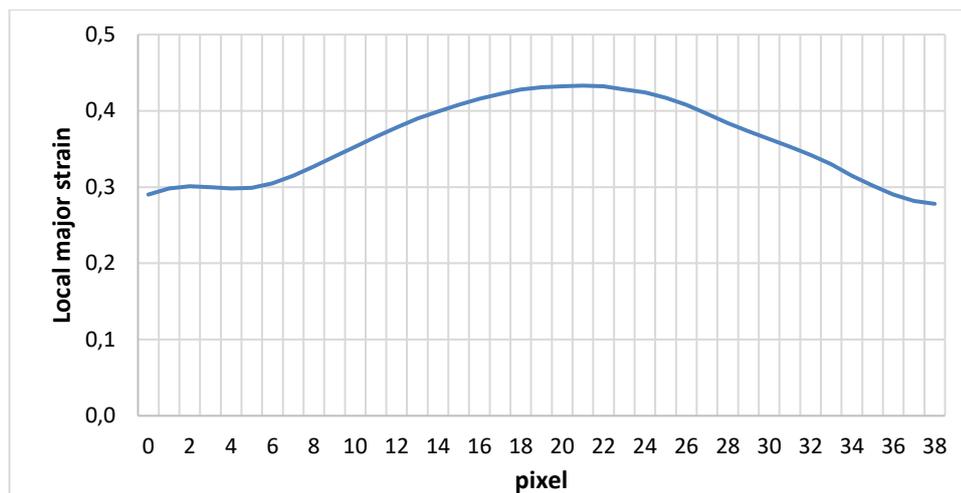


Grafico 10.2 – Distribuzione delle deformazioni locali nell’ultimo frame del provino 2.

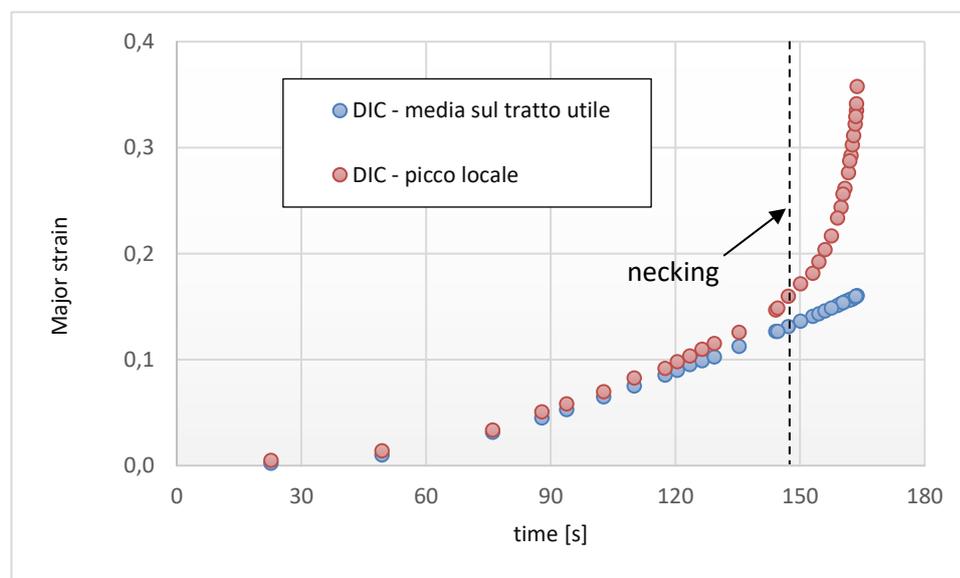


Grafico 10.3 – Differenza di profilazione dello strain longitudinale tra deformazioni medie sul tratto utile e di picco locale.

Dalle curve ingegneristiche ricavate con la DIC-2D è evidente che dopo la condizione di instabilità i valori locali di deformazione nell’intorno della zona di strizione sono molto più elevati rispetto a quelli determinabili con la media sul tratto utile e quindi impiegando un metodo di misurazione tradizionale (estensimetri meccanici) vengono perse tutte le informazioni sugli andamenti locali.

Accorciando il tratto calibrato la deformazione media tra tacche è collocabile tra la curva relativa alla deformazione media su tutto il tratto calibrato (estensimetro meccanico) e il picco locale. Per distanze tra tacche infinitesime la media nel tratto utile coincide con la deformazione media sulla fascia di necking nella sezione resistente del provino e si viene a creare un effetto analogo al *gauge length effect*, il quale aiuta nella sperimentazione a corroborare la validità della procedura basata sulla DIC-2D.

La conversione dei valori ingegneristici in reali avviene sul foglio di calcolo utilizzando le seguenti formule, già introdotte in precedenza nel capitolo 5:

$$\varepsilon_{true-x} = \ln(1 + \varepsilon_{eng-x}) \quad (13)$$

$$\sigma_{true-x} = \sigma_{eng-x} \cdot (1 + \varepsilon_{true-x}) = \sigma_{eng-x} \cdot \exp(\varepsilon_{true-x}) \quad (14)$$

La relazione (14) risulta valida solo se viene rispettata la conservazione del volume. Di fatto si tratta di una semplificazione di ciò che avviene nella realtà, in quanto la deformazione totale contiene una componente elastica che provoca una variazione di volume diversa da zero, tuttavia sovrastimare il valore della tensione (ipotizzando una deformazione elastica nulla) risulta un compromesso accettabile dal punto di vista ingegneristico.

La lunghezza iniziale del tratto utile è di *50 mm* e, considerando la metodologia della DIC, per il calcolo della deformazione media nella regione di interesse o in una sua porzione vengono considerate le deformazioni di ogni singolo subset.

Le tensioni reali verranno calcolate avendo a disposizione la tensione ingegneristica e le deformazioni reali medie sul tratto calibrato (considerando tutta la ROI) e sulla sezione resistente situata al centro della banda in cui la strizione è diffusa. In tal modo verranno ottenute due curve tensione-deformazione distinte.

Il picco locale di deformazione è utile da conoscere ai fini delle proprietà meccaniche del materiale, ma non può essere impiegato nella (14) perché non è estensibile a tutta

la sezione del provino, cioè ne considera solamente una piccola porzione per il calcolo della tensione massima locale.

Nei grafici 10.4 e 10.5 vengono raffigurate le curve tensioni-deformazione prima della conversione (valori ingegneristici) e dopo (valori reali):

- Nel caso di tensioni-deformazioni ingegneristiche si nota un allungamento della curva per le deformazioni medie nella sezione resistente e l'andamento risulta più piatto dopo la condizione di instabilità con un aumento del 103% rispetto alla deformazione media nel tratto utile.
- Nel caso di tensioni-deformazioni reali la curva risulta monotona crescente anche dopo la condizione di instabilità (work hardening). La differenza tra la deformazione media nella sezione resistente e la media nel tratto utile è più contenuta rispetto ai valori ingegneristici (aumento del 94%).

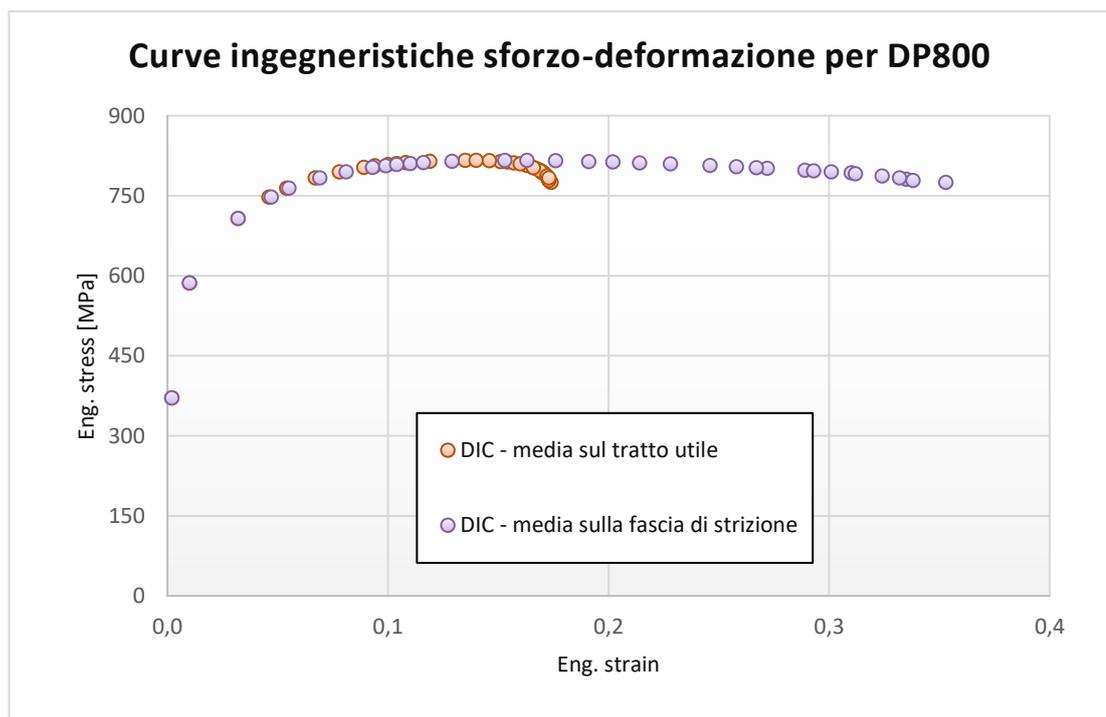


Grafico 10.4 – Curve ingegneristiche tensione-deformazione ricavate nel provino 2.

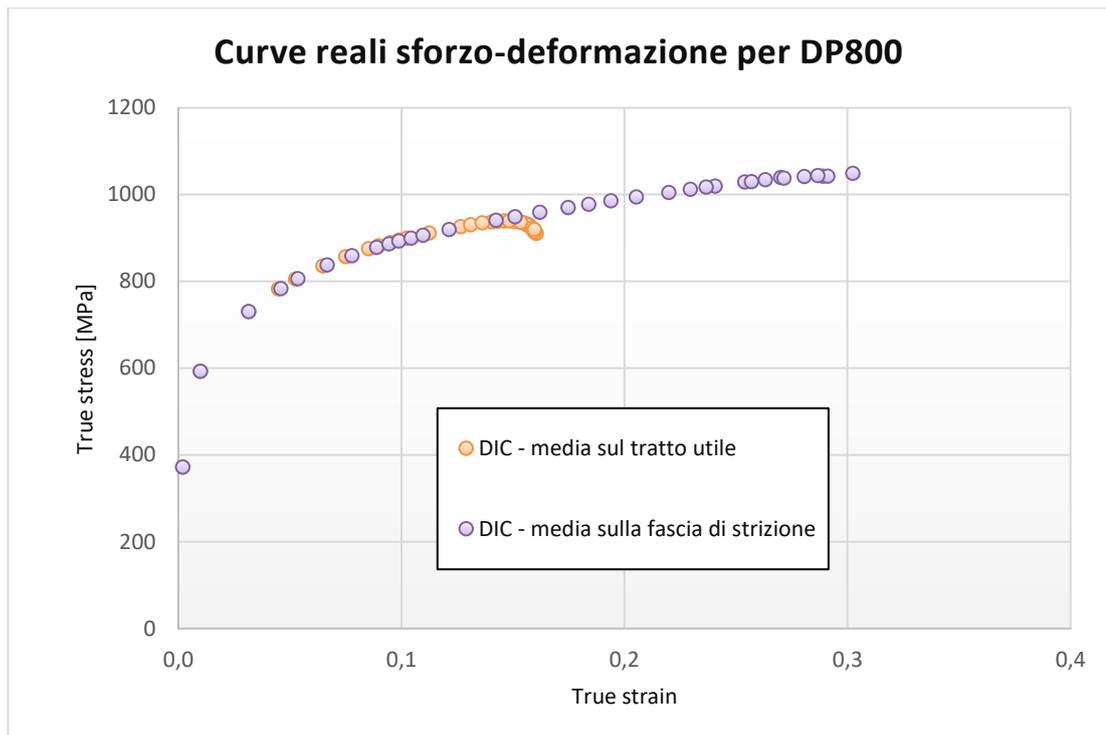


Grafico 10.5 – Curve reali tensione-deformazione ricavate nel provino 2.

La curva tensione reale – deformazione reale ottenuta considerando le deformazioni medie nella sezione resistente tiene conto della sezione minima effettiva, la quale viene ottenuta con il principio della conservazione del volume applicato localmente, tuttavia non tiene conto dei fattori seguenti:

- Componenti triassiali di σ e ϵ .
- Effetto di intaglio.
- Disomogeneità di σ e ϵ .

Gli errori generati trascurandoli sono piccoli, ma comunque presenti. Gli scorrimenti massimi durante la rottura avvengono lungo dei piani inclinati rispetto alla direzione di trazione, tuttavia una fascia di 0,1 mm parallela alla direzione trasversale del provino garantisce una buona approssimazione della deformazione media nella sezione di strizione.

Dalla mappa tridimensionale delle deformazioni (fig. 10.2) in condizione di rottura incipiente è visibile la zona del provino che contiene la regione di strizione, ovvero nella parte in cui si concentrano i picchi di deformazione longitudinale e trasversale.

La prima cricca sulla superficie del provino inizia a manifestarsi nel punto più deformato e solitamente con un solo valore di picco non si riesce a capire se la deformazione massima risulta autentica.

Il problema risiede nella distribuzione casuale delle goccioline nere e nella sensibilità maggiore dell'algoritmo di correlazione alle porzioni di area più piccole della regione di interesse. In aggiunta il video è influenzato dalle condizioni di luce non perfettamente stazionarie dell'immagine, pertanto bisogna controllare se i picchi di deformazione locale misurati risultano fittizi o fisicamente accettabili. Eventualmente per diminuire il rumore nell'andamento delle deformazioni si può procedere con un *curve fitting* previsto dal software DIC.

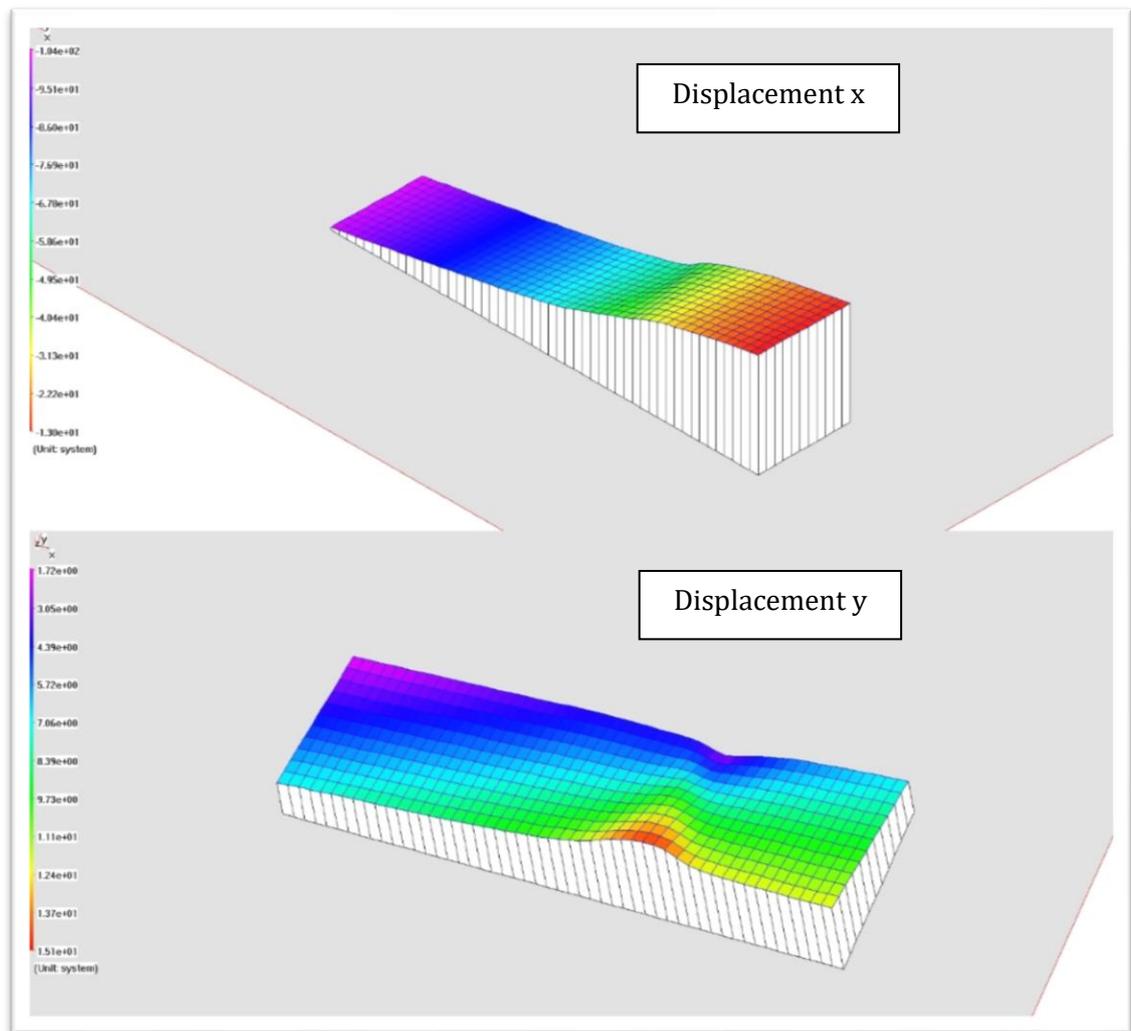


Fig. 10.1 – Rappresentazione 3D degli spostamenti massimi nel provino 2.

Dopo aver effettuato la correlazione digitale dei due fotogrammi il software restituisce due mappe, una con gli spostamenti lungo x, l'altra lungo y. Per ottenere le deformazioni nominali il software DIC effettua la derivata degli spostamenti.

Dalle mappe tridimensionali è possibile verificare se l'esame DIC è stato eseguito correttamente e se la zona più sollecitata corrisponde con la rottura del provino. In figura 10.1 lo spostamento longitudinale lungo l'asse x è crescente e la strizione viene individuata nella zona verde caratterizzata dal cambio di pendenza.

Gli spostamenti sono espressi in base al sistema di riferimento collocato sul bordo del campo visivo del fotogramma in alto a sinistra, quindi il primo punto misurabile sulla regione di interesse presenta delle coordinate in pixel positive sugli assi x e y.

Questo significa che gli spostamenti trasversali lungo i bordi del provino hanno valori numerici con segni diversi, poiché dopo la condizione di instabilità (durante il restringimento della sezione resistente) presentano lo stesso modulo ma dei versi opposti rispetto al sistema di riferimento considerato.

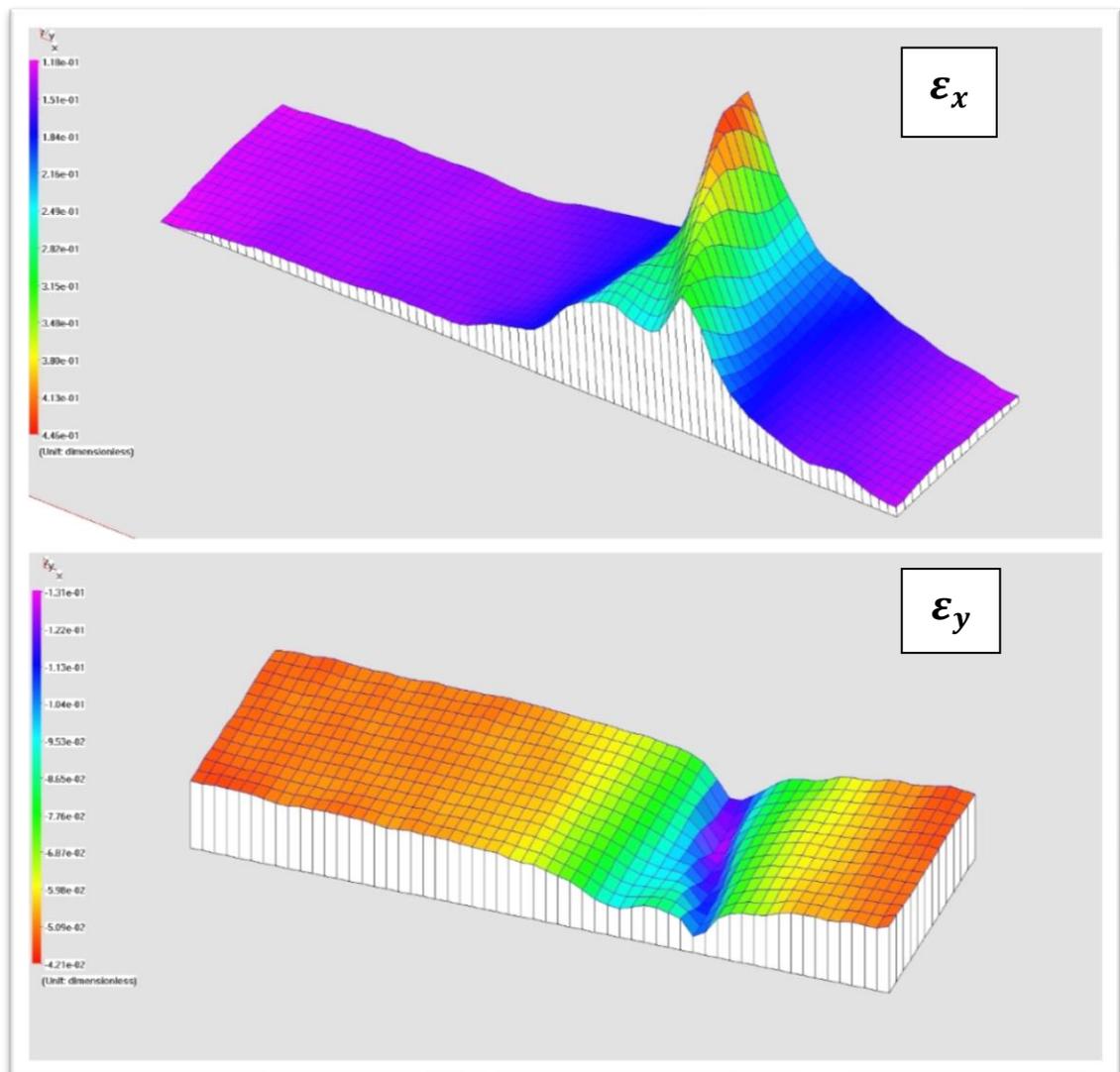


Fig. 10.2 – Rappresentazione 3D degli strain longitudinali e trasversali massimi nel provino.

Superato il limite di elasticità durante l'incrudimento si ha la formazione delle bande di scorrimento a taglio diffuse, le quali nel caso dei provini lisci in DP800 prima della rottura risultano all'incirca di 70° con una ampiezza di 2 mm.

La misura della larghezza delle bande di scorrimento è stata ottenuta dopo aver effettuato la correlazione digitale dell'ultimo fotogramma in condizioni di rottura incipiente, misurando con il software la distanza in pixel direttamente nella mappa bidimensionale delle deformazioni, e convertendo il valore in millimetri.

Il passo successivo consiste nello studio degli andamenti delle due deformazioni ingegneristiche ϵ_x e ϵ_y lungo il tratto calibrato del provino.

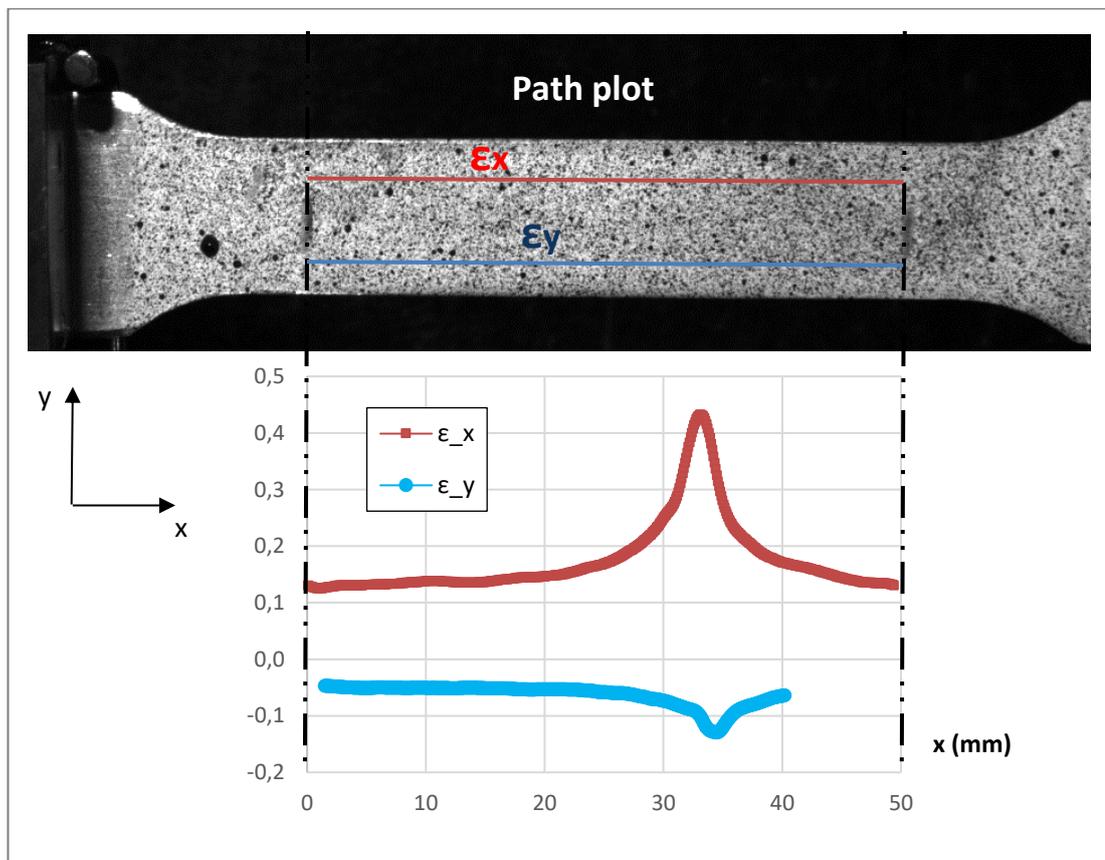


Grafico 10.6 – Andamento delle deformazioni ϵ_x e ϵ_y lungo le linee sul tratto calibrato in condizioni di rottura incipiente.

I path plot sono dei percorsi lineari sui quali il software DIC restituisce il valore degli spostamenti e delle deformazioni. Nel grafico 10.6 la curva rossa e quella azzurra sono riferite a delle tracce impostate che risultano parallele all'asse x. I percorsi impostati sono disposti in maniera tale da includere il valore massimo lungo y della

deformazione assiale (ε_x) e quello minimo lungo x della deformazione trasversale (ε_y), entrambi misurati sull'ultimo frame prima della rottura del provino.

Il restringimento a rottura lungo la direzione trasversale è ricavabile conoscendo la larghezza della sezione resistente minima nell'ultimo fotogramma, misurata direttamente nell'immagine:

$$w_f = 11,66 \text{ mm}$$

$$\Delta w = w_o - w_f = 1,34 \text{ mm}$$

Per calcolare lo spessore medio finale nella sezione resistente minima si utilizza la formula seguente:

$$t_f w_f L_f = t_o w_o L_o$$

$$t_f = \frac{w_o t_o}{w_f \left(\frac{L_f}{L_o}\right)} = \frac{w_o t_o}{w_f (1 + \varepsilon_{eng-x})} = 0,66 \text{ mm}$$

Nel grafico 10.7 sono rappresentati gli andamenti delle deformazioni ingegneristiche longitudinali ricavati in fotogrammi appartenenti a diversi stadi di deformazione:

- 3200 – tratto elastico.
- 5514 – inizio della condizione di instabilità.
- 5700 – fase di strizione diffusa.
- 6000 – fase di strizione diffusa avanzata.
- 6159 – condizione di rottura incipiente.

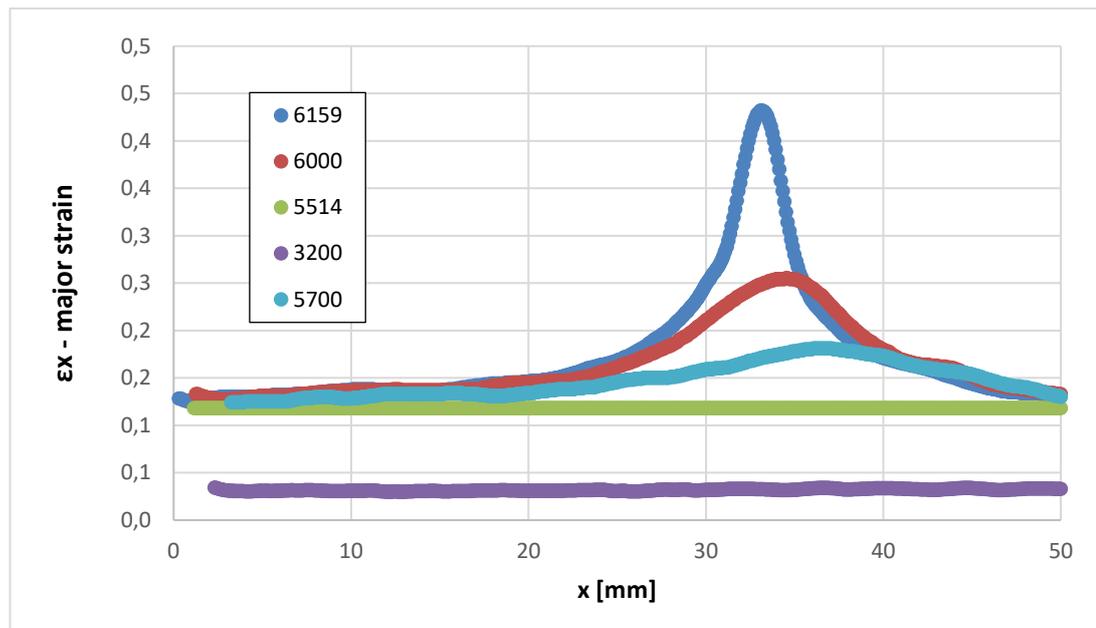
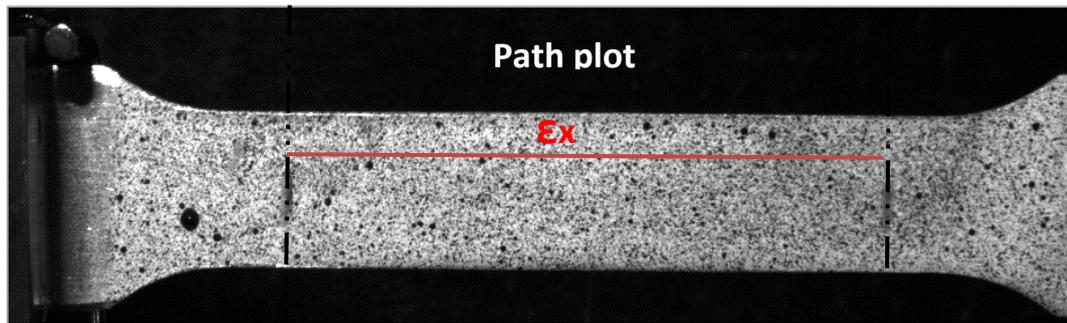


Grafico 10.7 – Strain assiali lungo il tratto utile per diversi stadi di deformazione.

Le distribuzioni di deformazione sul tratto utile mostrano che il picco aumenta di intensità in base alla progressione del fenomeno di strizione. Durante il tratto elastico le deformazioni sono piccole e uniformi su tutta la superficie del provino. Dalla fase di incrudimento la deformazione cresce e si mantiene uniforme traslando verso l'alto la distribuzione sul tratto utile delle deformazioni assiali. Sorpassata la condizione di instabilità l'aumento delle deformazioni genera un picco nella zona di strizione: la distribuzione diventa disuniforme rispetto a x e y con tendenza alla localizzazione in prossimità della sezione resistente, mentre alle estremità del tratto utile subisce un aumento contenuto.

All'avvicinarsi della condizione di rottura è presente una traslazione verso sinistra del picco massimo di deformazione dovuta allo spostamento della traversa mobile, mentre

a destra della regione sottoposta a strizione nel provino gli spostamenti sono limitati dall'afferraggio fisso.

Nei provini lisci in DP800 il grado di disuniformità delle deformazioni sul tratto utile dopo l'inizio della strizione è molto accentuato. Gli afferraggi non sono ideali e durante la deformazione i provini subiscono delle piccole roto-traslazioni, tuttavia il software le compensa tutte in automatico.

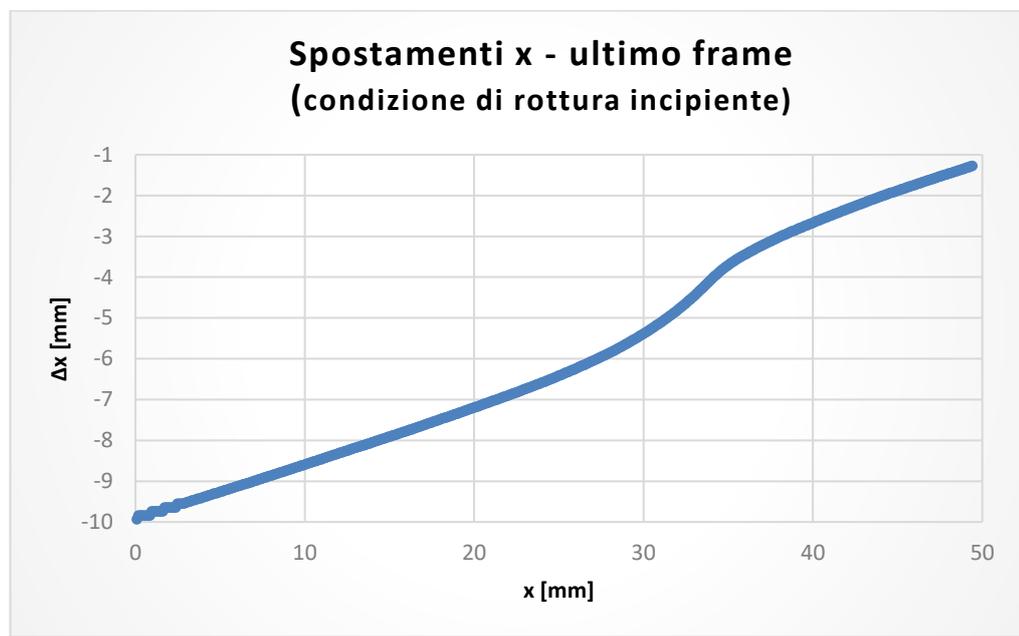


Grafico 10.8 – Andamento degli spostamenti lungo il tratto calibrato nella rottura incipiente.

Il Grafico 10.8 mostra lo spostamento assiale in millimetri nella traccia lineare parallela all'asse x e contenente la deformazione massima lungo y, prima della rottura, in ogni punto lungo il tratto utile. Gli spostamenti assiali risultano costanti lungo l'asse trasversale del provino; la traversa mobile è situata a sinistra rispetto alla curva per gli spostamenti più elevati (in valore assoluto), mentre in corrispondenza del vincolo fisso gli spostamenti sono prossimi allo zero. I valori negativi indicano che il sistema di riferimento considera l'asse x rivolto verso destra.

Stabilendo un confronto delle deformazioni locali, in condizioni di rottura incipiente, le due prove analizzate presentano dei valori di picco differenti. Dal grafico tensione reale – deformazione reale il primo provino raggiunge dei valori medi di deformazione

nella sezione resistente maggiori, nonostante un valore inferiore del carico sincronizzato massimo, con delle deformazioni longitudinali reali mediamente più alte del 28%.

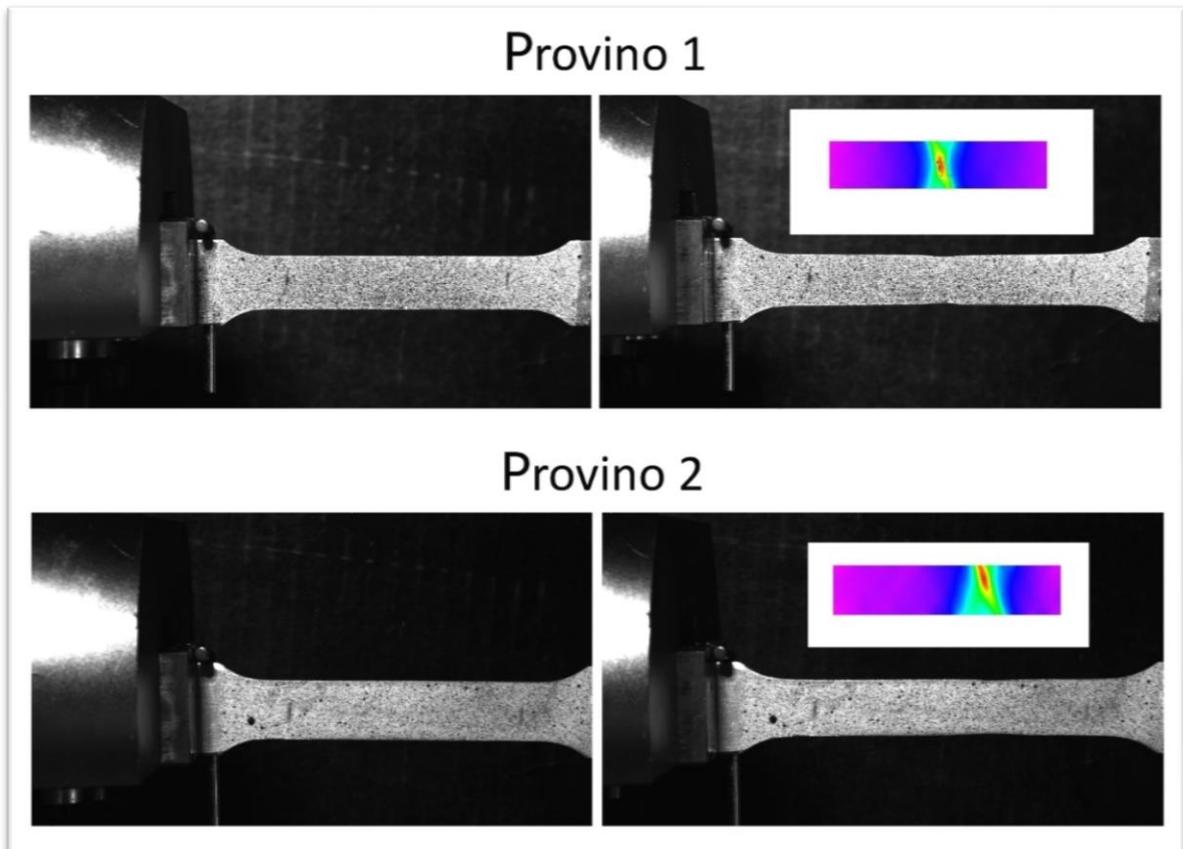


Fig. 10.4 – Confronto della correlazione digitale dell'ultimo frame per i due provini lisci.

Dalla mappa bidimensionale delle deformazioni (fig. 10.4) sul tratto utile risulta che il primo provino ha il picco locale di deformazione centrato rispetto alla ROI (su x e y), mentre nel secondo il picco è situato sul bordo superiore del provino motivo per cui probabilmente raggiunge più in fretta la condizione di rottura.

Mettendo a confronto le curve tensione reale - deformazione reale dei due provini (grafico 10.9), ricavate dalle deformazioni medie nella sezione in cui avviene la strizione, è possibile caratterizzare le differenze per quanto concerne la resistenza meccanica. Gli andamenti ottenuti sono sovrapponibili, almeno fino all'inizio della strizione localizzata nel primo provino che coincide con la rottura del secondo.

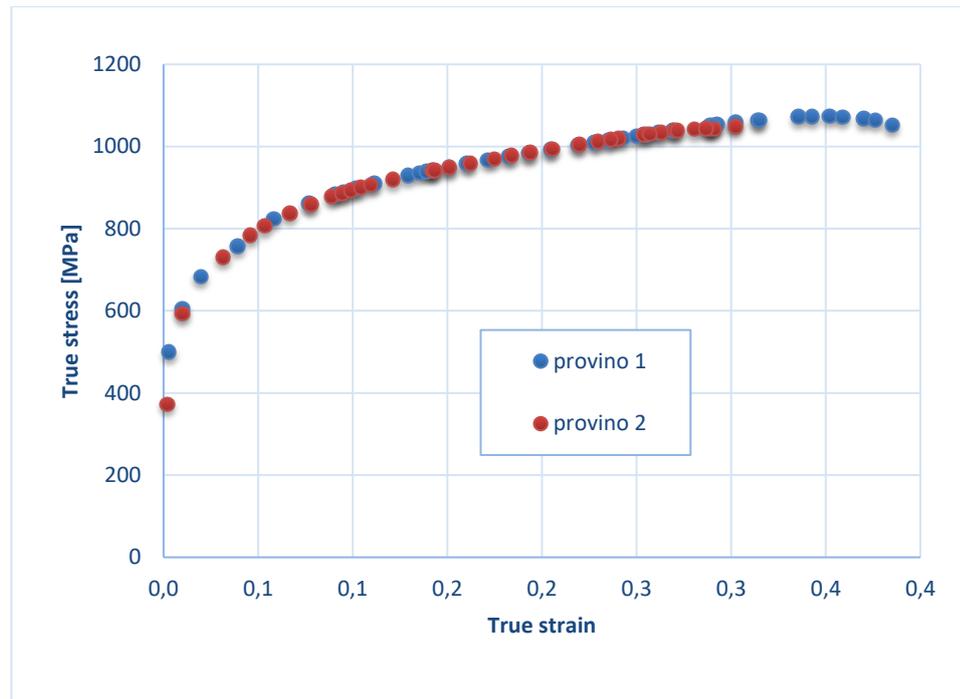


Grafico 10.9 – Andamenti tensione reale – deformazione reale dei due provini a confronto (deformazioni medie nella fascia di strizione).

La curva tensione reale-deformazione reale del primo provino possiede una fase di strizione locale che tende a decrescere leggermente prima della rottura, sebbene risulti più allungata rispetto al secondo provino. Tale decrescita monotona può trovare una spiegazione logica nella microstruttura del materiale: durante la formazione delle bande di scorrimento diffuse si formano delle coalescenze di microvuoti di forma lenticolare e dal diametro di qualche micron che causano un aumento di volume del provino con un conseguente aumento di duttilità prima della rottura.

Nel grafico 10.9, sebbene le tensioni reali siano più o meno sovrapponibili, le deformazioni reali possono variare anche per il contenuto di imperfezioni nella microstruttura, le quali aiutano a generare microporosità durante la deformazione plastica.

10.2 DP800 - Provini intagliati (notched specimen)

I provini intagliati sono molto diffusi per lo studio della fatica dei materiali. A causa della loro geometria la strizione avviene sempre esattamente nella stessa zona del provino, cioè nella parte centrale dell'intaglio. La sezione resistente presenta delle dimensioni molto ridotte rispetto ad altri provini (spessore: 0,7 mm, larghezza dell'intaglio: 8 mm), per questo motivo è sufficiente un minimo errore di configurazione della prova o un'alta percentuale di imperfezioni nella microstruttura per far variare i carichi percepiti dalla cella di carico da una prova rispetto a un'altra.

Nel grafico 10.10 si osserva un andamento ottenuto dei carichi conforme alle dimensioni, alla geometria del provino e alla tipologia di materiale (DP800).

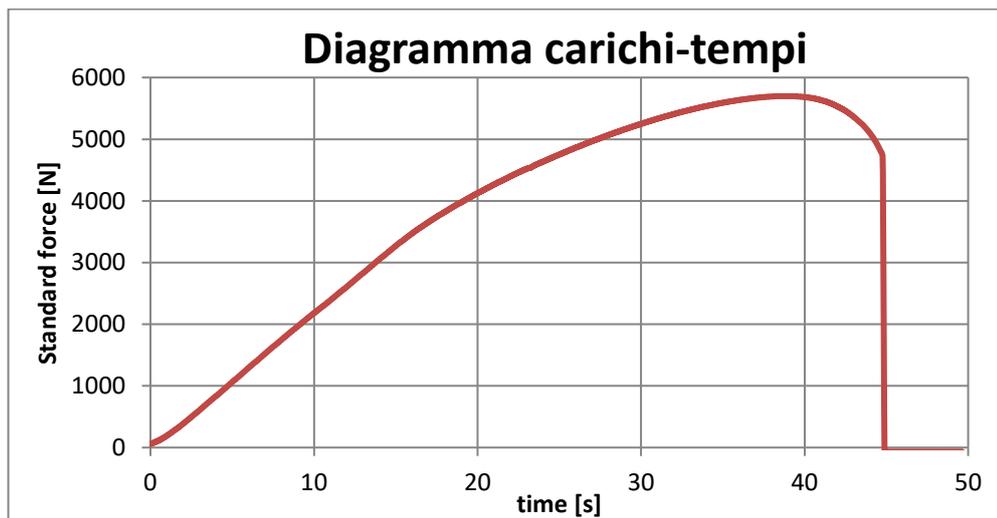


Grafico 10.10 – Diagramma carichi-tempi di un provino notch analizzato.

Durante la prova di trazione i parametri variabili influiscono in maniera più importante in un provino intagliato: è sufficiente un disassamento minimo rispetto agli afferraggi o un'alta concentrazione di imperfezioni nella sezione al centro dell'intaglio per compromettere il test. Meccanicamente da un provino intagliato ci si aspetterà un comportamento meno duttile, con un tempo di rottura ridotto e un valore di tensione massima che si avvicina a quello del provino liscio.

Dalla rappresentazione tridimensionale delle deformazioni longitudinali risulta che il valore di picco è situato nella parte più profonda della gola, mentre al di fuori di essa le deformazioni sono da considerare trascurabili.

Nella condizione di sollecitazione massima il fenomeno di strizione è più significativo sullo spessore (la riduzione è di 0,1 mm), mentre la larghezza subisce una diminuzione contenuta in relazione alle due grandezze (di 0,5 mm), le quali sono state misurate sulla sezione resistente minima dall'ultimo fotogramma e con deformazioni trasversali di picco aventi un ordine di grandezza pari a 10^{-2} .

A differenza del provino liscio lo scostamento tra i diversi valori di spostamento assiale è più marcato da una parte all'altra dell'intaglio, ragion per cui la derivata degli spostamenti porta una localizzazione più fine delle deformazioni nella gola.

In figura 10.5 gli spostamenti assiali sono maggiori in valore assoluto nella parte di provino colorata di viola, mentre la zona rossa corrisponde alla zona di vincolo fisso. Il problema degli spostamenti negativi è legato al fatto di dover considerare un sistema di riferimento con la direzione x opposta al verso di traslazione della traversa mobile.

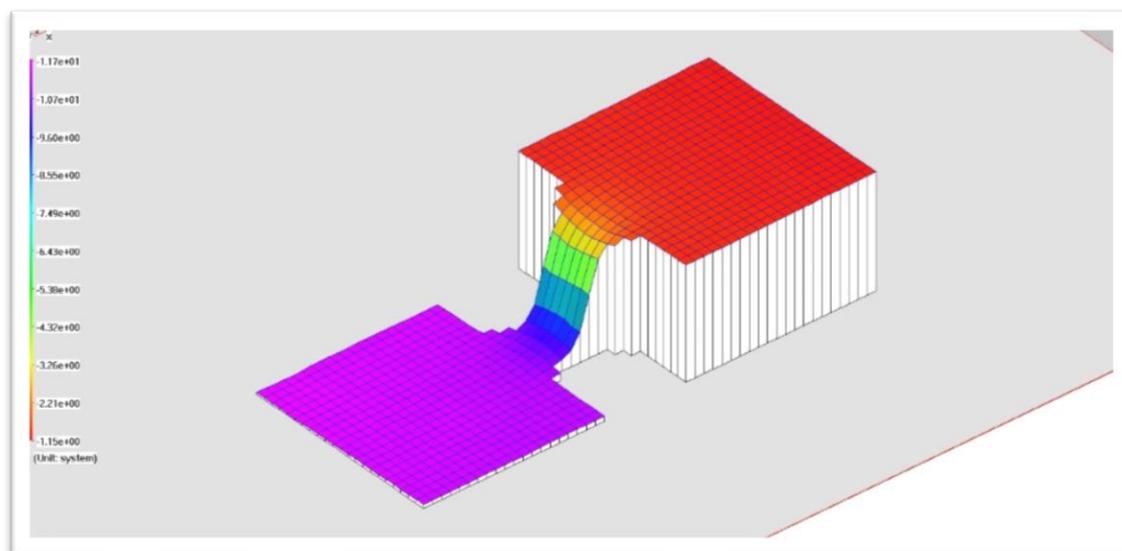


Fig. 10.5 – Rappresentazione 3D degli spostamenti assiali massimi in un notched.

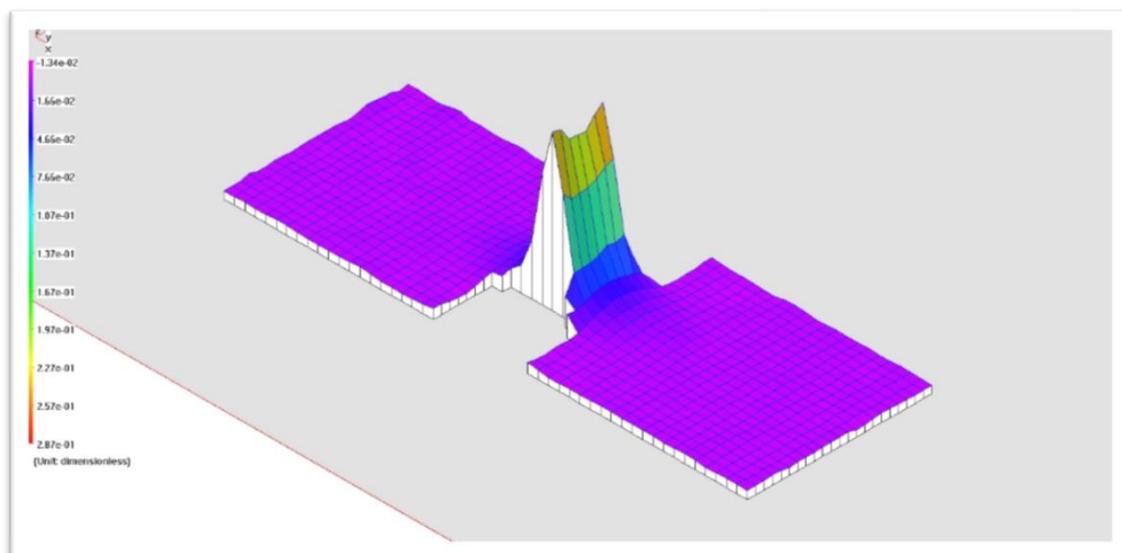


Fig. 10.6 – Rappresentazione 3D degli strain assiali massimi in un notched.

Il diagramma carichi-spostamenti raffigura in ascissa gli spostamenti misurati con la DIC-2D di un punto scelto della ROI (rispetto alla direzione x o y) e in ordinata la condizione di carico associata allo spostamento ad un determinato istante di tempo. Il carico subisce un incremento lineare con lo spostamento nei primi fotogrammi, raggiungendo un valore massimo e in fine una diminuzione graduale. L'ultimo tratto della curva decresce fino al raggiungimento dello spostamento massimo e quindi della rottura.

Nel grafico 10.11 il punto considerato per la misurazione degli spostamenti longitudinali è situato sul bordo all'inizio della gola, in corrispondenza della parte di provino afferrata dalla traversa mobile. Oltre un certo spostamento e anche oltre una certa deformazione il carico decresce mentre la sezione resistente subisce un certo ridimensionamento, dovuto alla strizione sulla larghezza e sullo spessore del provino.

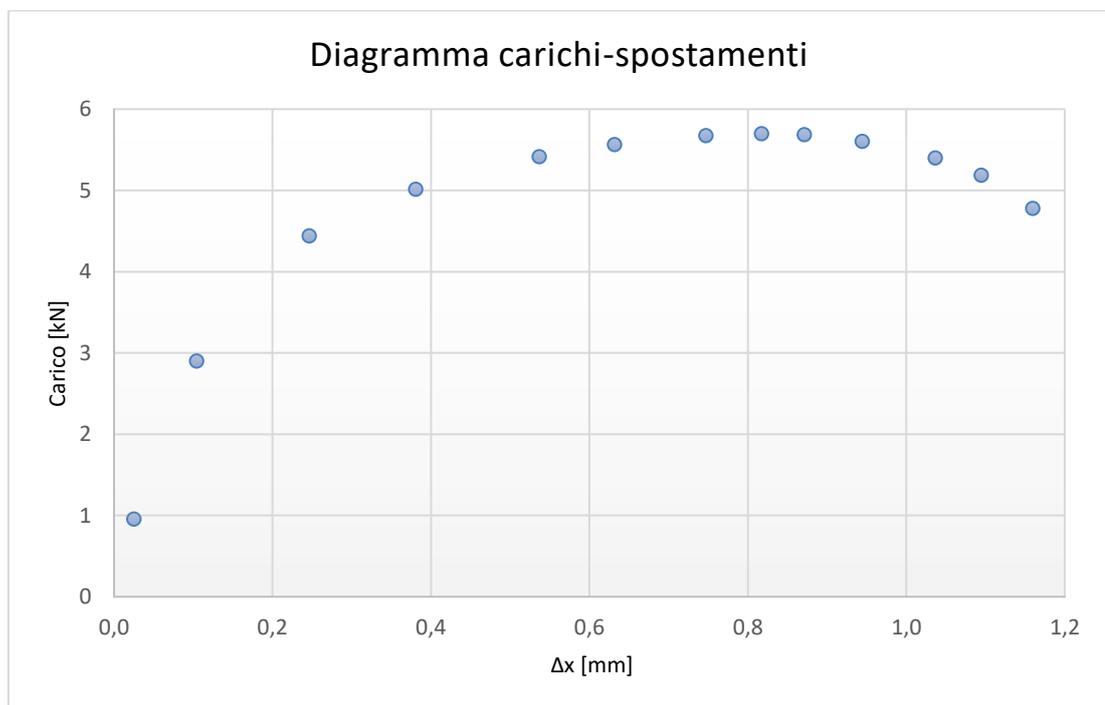
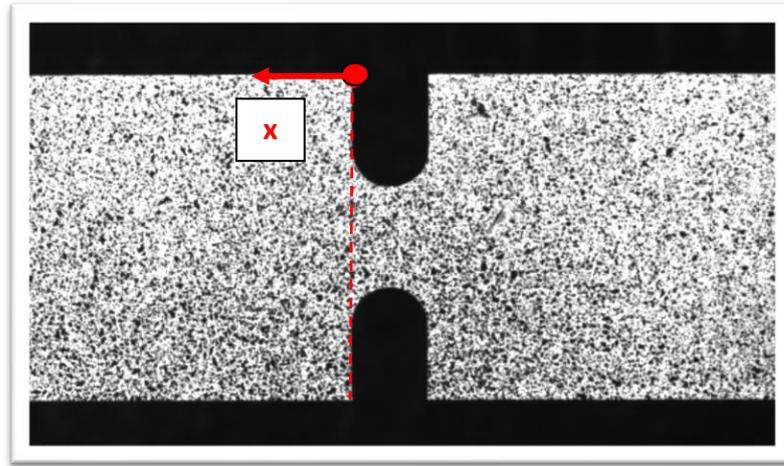


Grafico 10.11 – Andamento dei carichi applicati associati agli spostamenti del punto rosso.

Per ottenere le curve tensione - deformazione le superfici che si utilizzano per misurare il valore di deformazione media sono la gola e la sua sezione resistente minima. Tale scelta deriva dal fatto che la deformazione media sulla gola corrisponde a una media globale mentre il picco locale si presenta uniforme sull'intera sezione resistente (con piccole eccezioni sui bordi del provino), per cui la deformazione media sulla fascia centrale corrisponde al valore di picco locale.

Come si osserva in fig. 10.7 i rettangolini tratteggiati includono le superfici in cui viene calcolata la deformazione media. I contorni strabordati sullo sfondo del fotogramma non sono un errore, bensì dovuti a causa della forma curvilinea dell'intaglio; il calcolo della media non ne risente in quanto al di fuori della regione di interesse non sussiste alcuna correlazione tra i due fotogrammi.

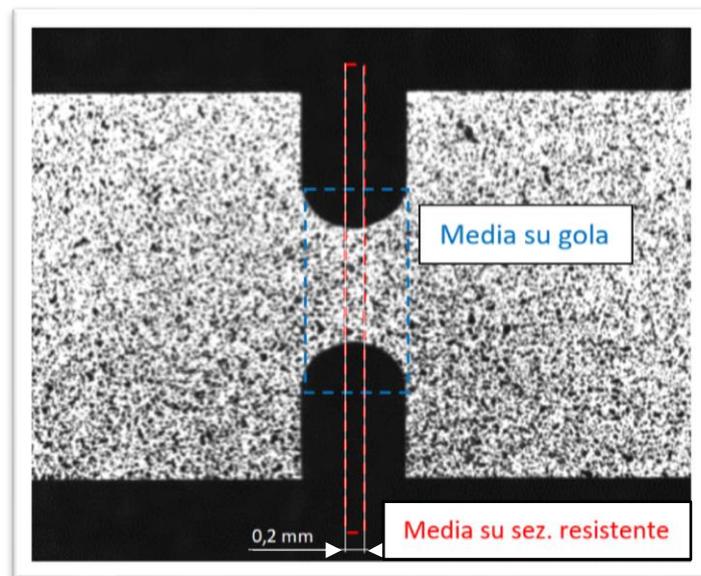


Fig. 10.7 – Superfici utilizzate per il calcolo della deformazione media.

Nei grafici 10.12 e 10.13 la tensione reale massima è maggiore rispetto alle tensioni reali ricavate nei provini lisci: ciò si può attribuire all'effetto di intaglio, il quale viene trascurato anche nei provini intagliati, tuttavia il suo effetto è sicuramente molto più importante.

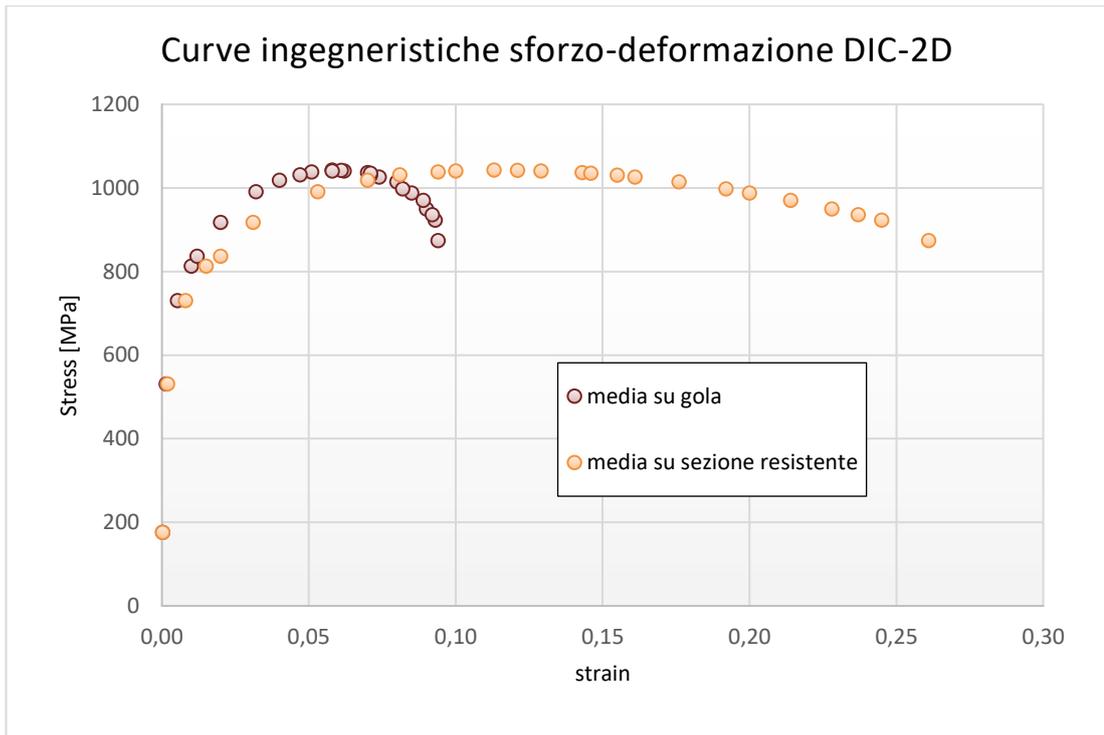


Grafico 10.12 – Diagramma tensione – deformazione ingegneristica per provini intagliati.

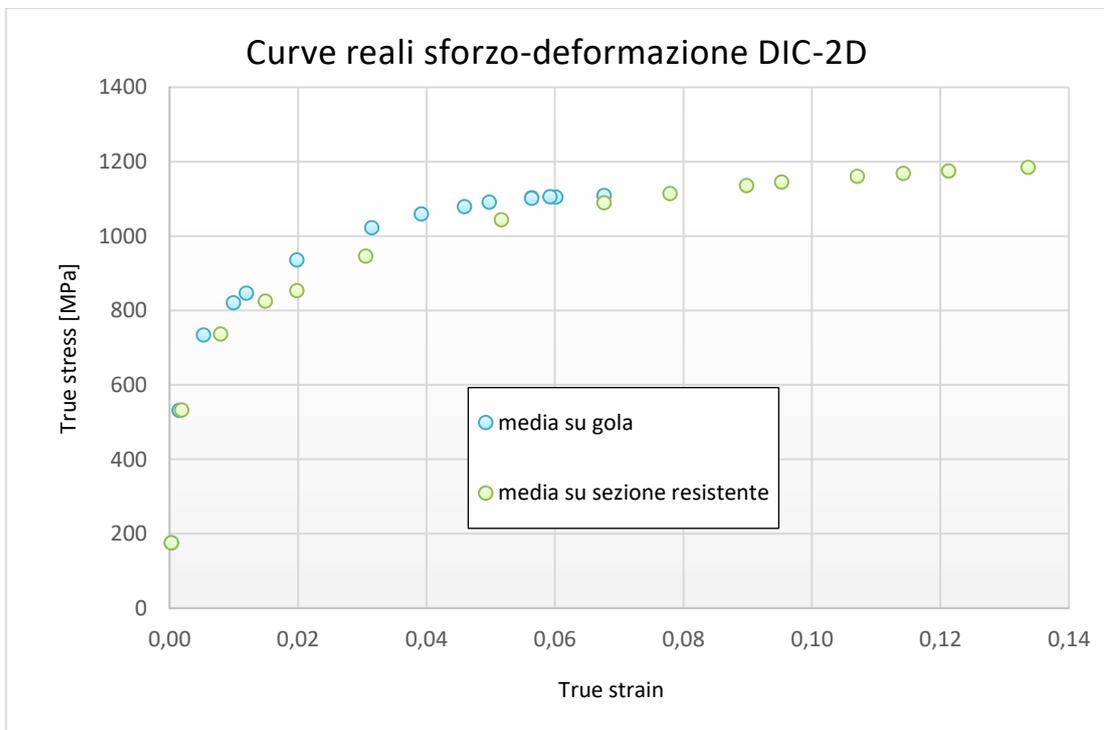


Grafico 10.13 – Diagramma tensione – deformazione reale per provini intagliati.

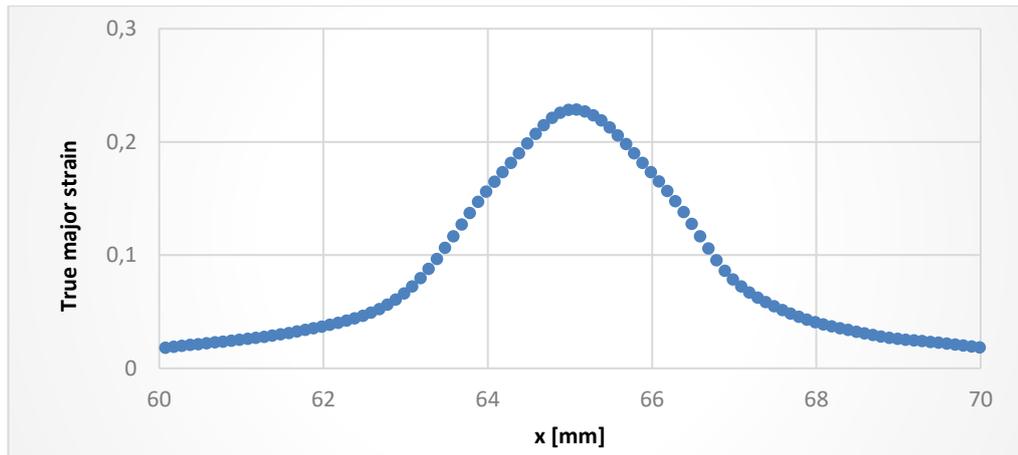


Grafico 10.14 – Distribuzione delle deformazioni reali longitudinali sulla lunghezza della gola in condizioni di rottura incipiente.

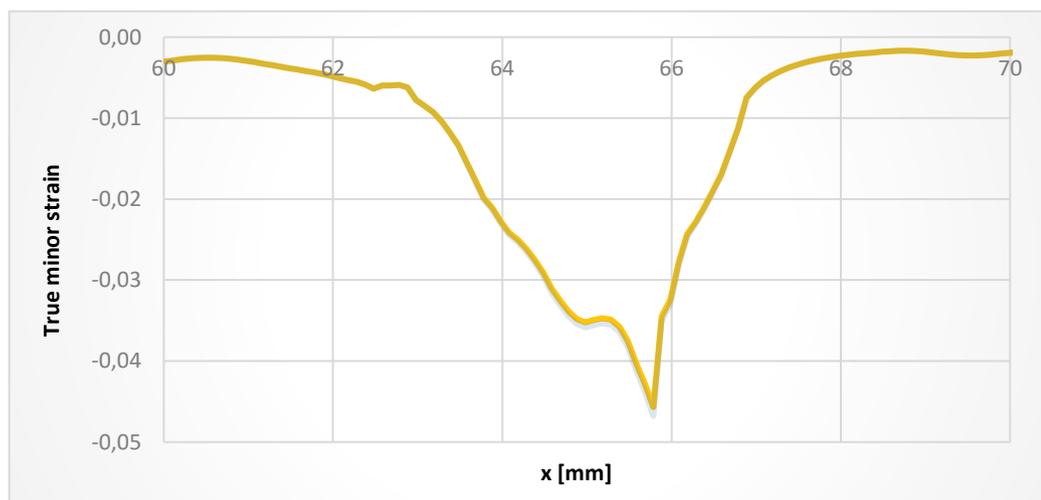


Grafico 10.15 – Distribuzione delle deformazioni reali trasversali sulla lunghezza della gola in condizioni di rottura incipiente.

Sebbene la deformazione trasversale presenti un picco a metà dell'intaglio, numericamente la riduzione della sezione resistente in direzione y risulta trascurabile rispetto alle deformazioni assiali ottenute in condizioni di rottura incipiente del provino.

10.3 DP800 - Provini forati

La procedura DIC-2D nel caso dei provini forati è stata eseguita utilizzando una regione di interesse dimezzata rispetto l'asse orizzontale del foro (fig. 10.8), avendo prima verificato che il campo delle deformazioni x e y risulti circa simmetrico longitudinalmente rispetto al foro.

La simmetria del campo di deformazione è solamente ideale. Nella realtà alcuni fattori imprevisti come il disassamento del provino negli afferraggi o le imperfezioni presenti nella microstruttura del materiale causano una asimmetria nella distribuzione sulla superficie del provino. La correlazione digitale aiuta a valutare lo scarto tra le deformazioni misurate nelle due porzioni simmetriche che compongono il provino forato, il quale, essendo praticamente irrilevante, mostra la validità di una ROI simmetrica rispetto all'asse x .



Fig. 10.8 – ROI utilizzata per la DIC-2D in un provino forato.

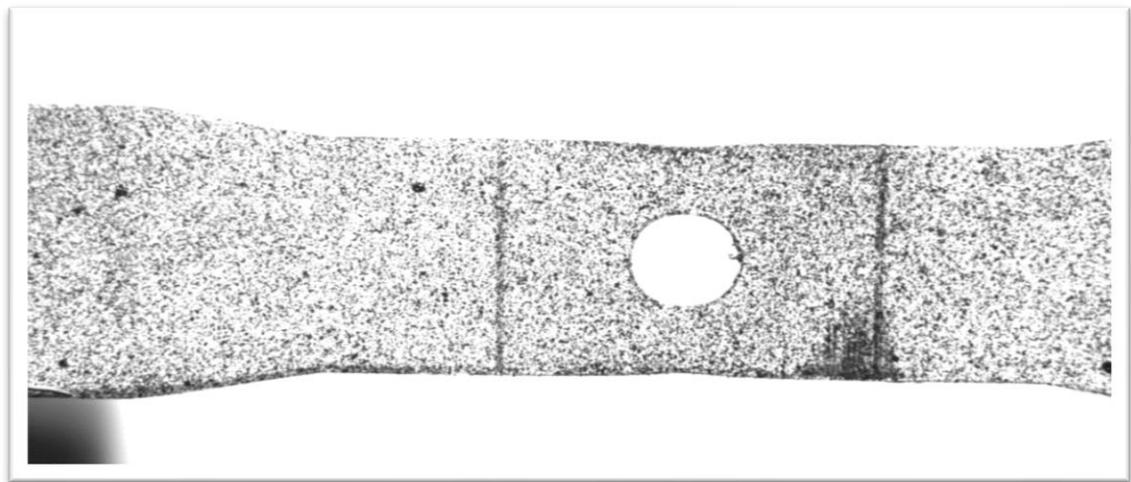
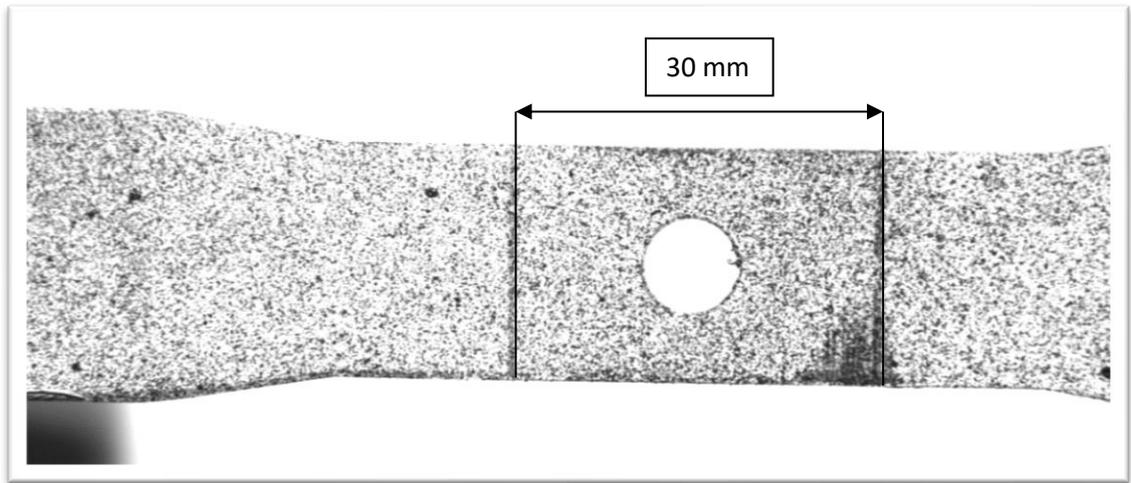


Fig. 10.9 – Fotogrammi del provino forato a riposo e in condizioni di rottura incipiente.

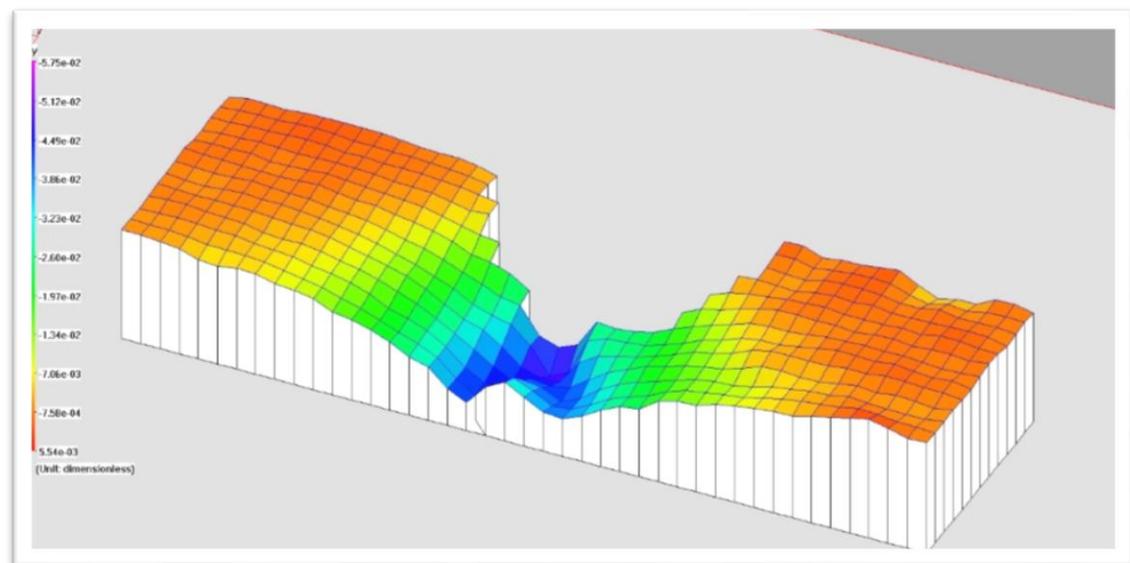
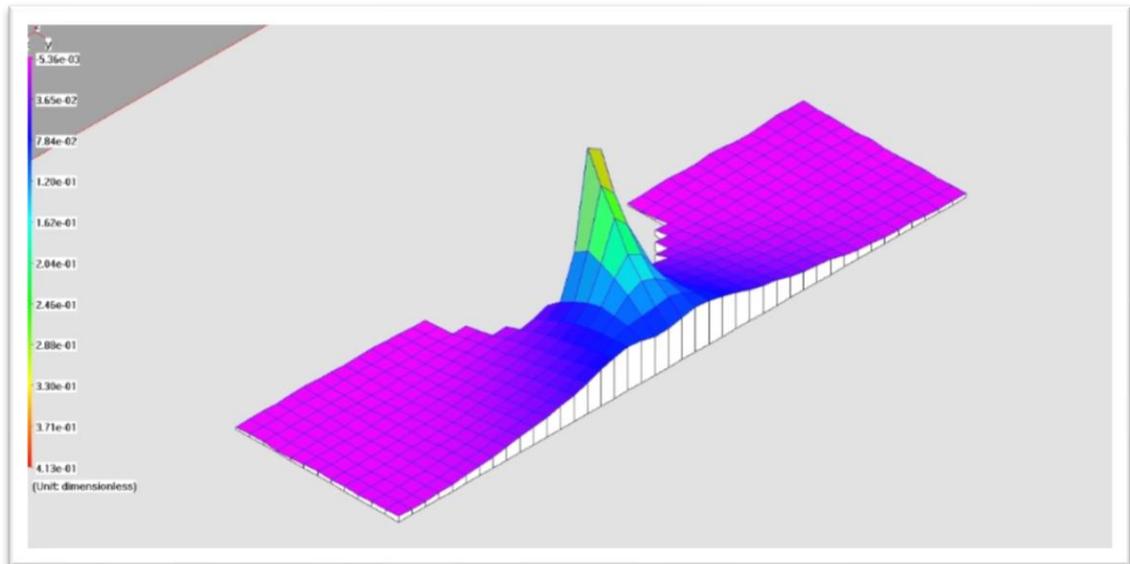


Fig. 10.10 – Rappresentazione tridimensionale della distribuzione degli strain x e y.

Sul provino sono state realizzate due tacche di riferimento a una distanza di 30 mm per valutare l'allungamento.

Osservando in fig. 10.10 la distribuzione tridimensionale delle deformazioni a rottura nel tratto misurato si deduce che la deformazione assiale tende a formare un picco in prossimità del foro sul suo asse verticale, mentre la riduzione della sezione è a malapena percettibile: considerando una larghezza del provino di 12 mm (diametro del foro escluso) il restringimento in condizioni di rottura incipiente è pari a circa 0,64 mm.

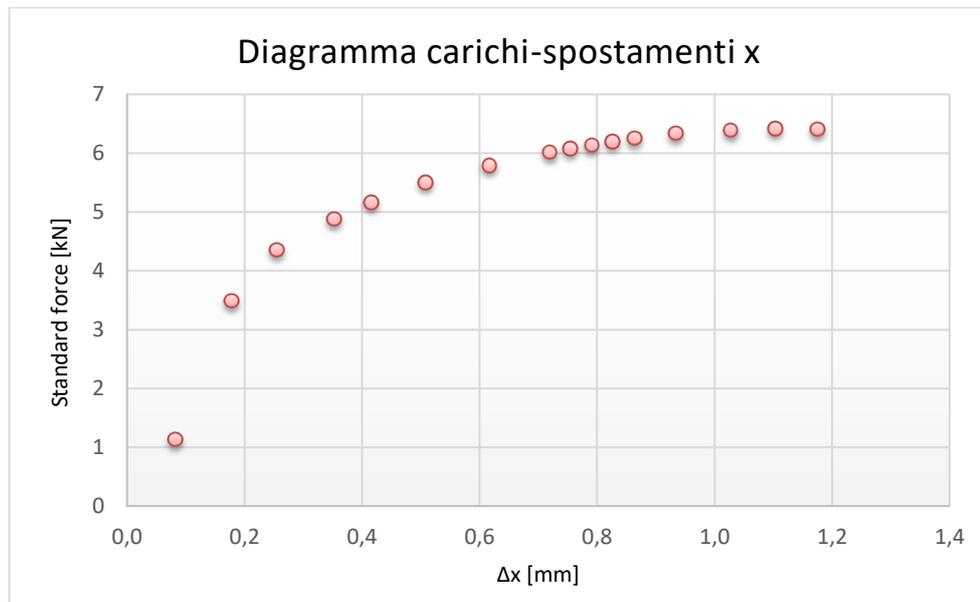
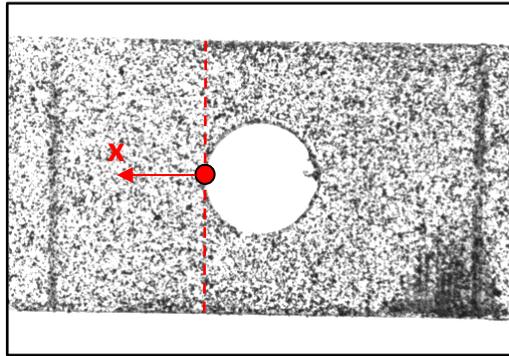


Grafico 10.16 – Correlazione tra carichi e spostamento assiale del punto rosso.

Il grafico 10.16 correla ogni spostamento assiale in direzione x ottenuto nel punto rosso tangente al foro in figura al corrispettivo valore di carico. Le considerazioni da effettuare sono analoghe a quelle già fatte per il provino intagliato: imponendo un carico assiale maggiore da parte della traversa mobile lo stato di sollecitazione critico è posto in corrispondenza dell'asse trasversale del foro, mentre il punto considerato alla sinistra del foro subisce uno spostamento che aumenta di pari passo col carico assiale.

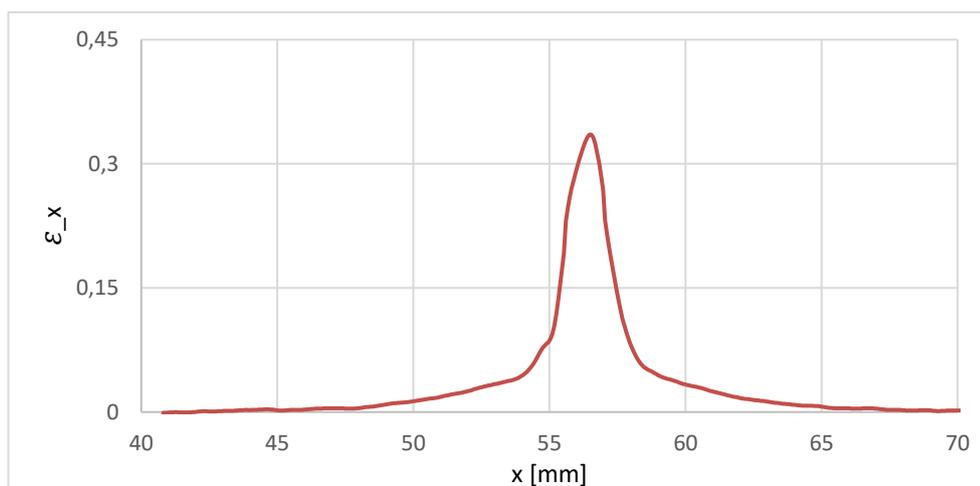
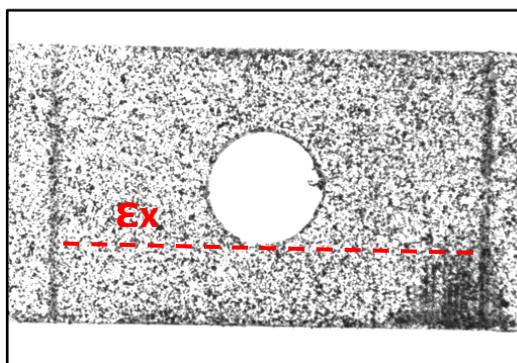


Grafico 10.17 – Distribuzione delle deformazioni assiali reali sulla linea tangente al bordo del foro e parallela all’asse x, in corrispondenza del punto di massima sollecitazione.

Il path plot considerato per il grafico 10.17 è parallelo all’asse longitudinale e tangente al foro, in maniera tale da identificare lo stato massimo di sollecitazione in una fascia molto ristretta, la quale ingloba l’asse verticale del foro. L’istante temporale considerato per la realizzazione della curva coincide con la rottura incipiente del provino.

Il carico massimo acquisito dalla cella di carico è pari a 6,4 kN. La rottura del provino avviene con la formazione di due cricche nette in corrispondenza dello stato di sollecitazione massima sul bordo del foro.

Le curve tensione – deformazione del provino forato rappresentate nei grafici 10.18 e 10.19 sono state calcolate a partire dalla deformazione media sull’asse verticale del foro. È stata calcolata anche la deformazione media tra tacche, tuttavia la sua curva non viene mostrata nei grafici in quanto il suo valore risulta praticamente trascurabile.

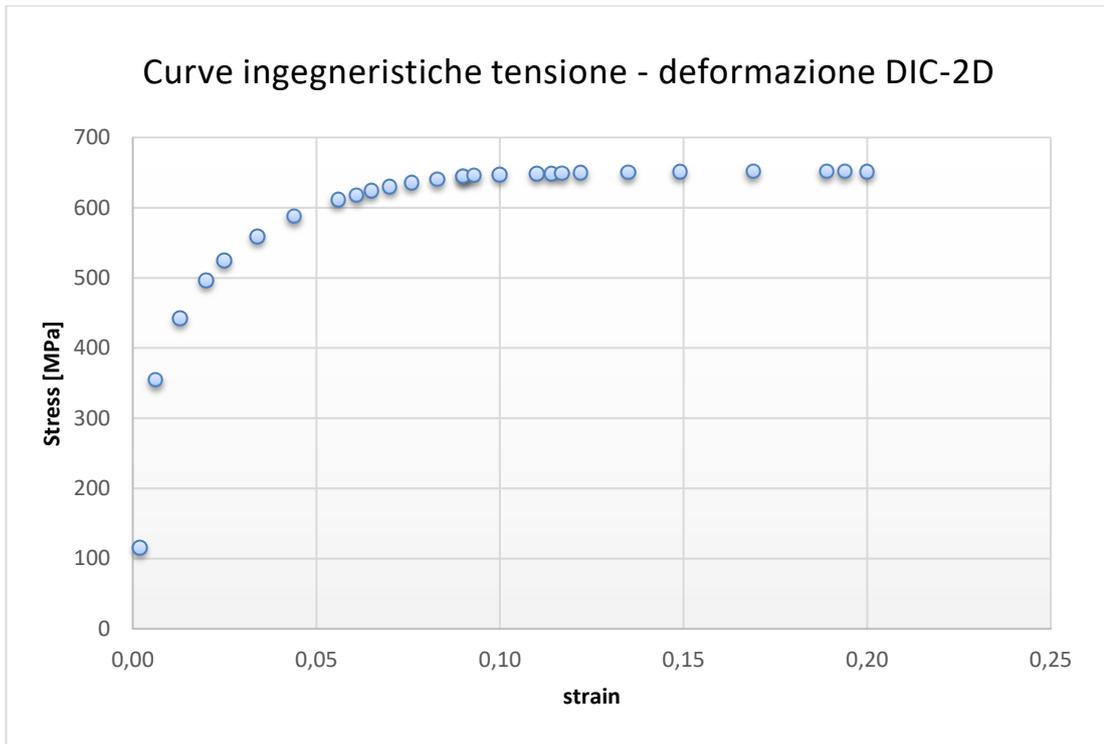


Grafico 10.18 – Diagramma tensione – deformazione ingegneristica per provini forati (deformazione media sulla fascia di strizione).

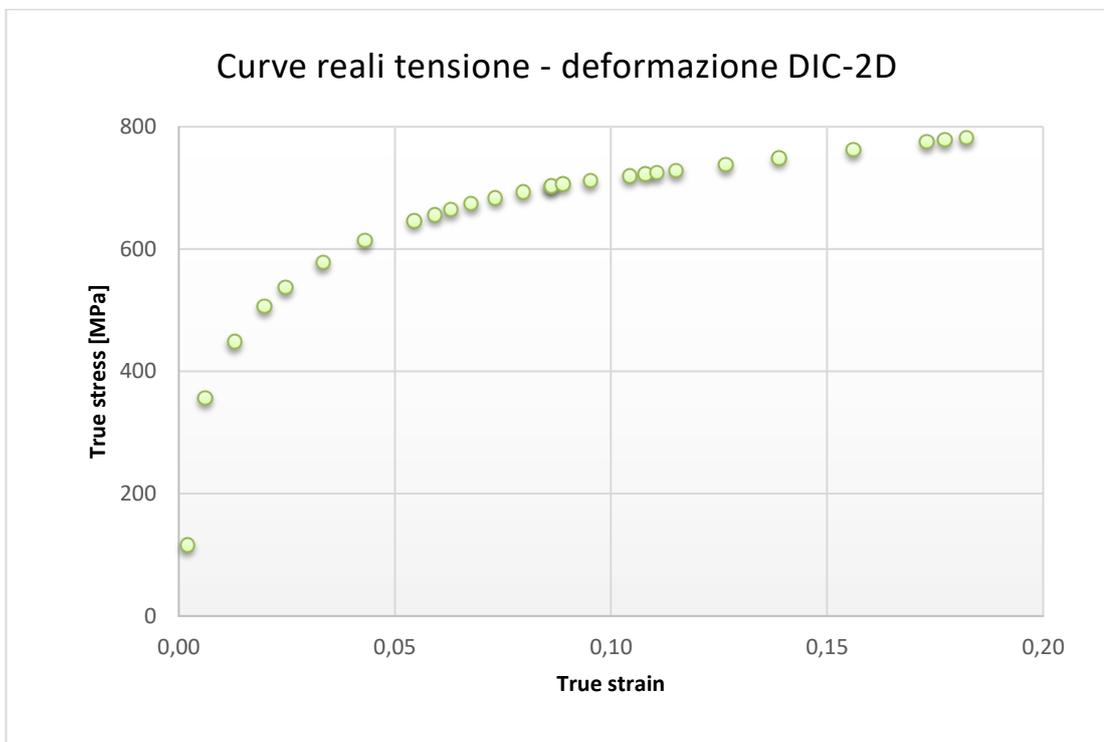


Grafico 10.19 – Diagramma tensione reale – deformazione reale per provini forati (deformazione media sulla fascia di strizione).

10.4 AA7075 – Provini lisci

I provini realizzati per le prove sperimentali in lega 7075 hanno degli spessori più elevati rispetto a quelli in acciaio ($\cong 1,80$ mm), per cui riescono a raggiungere dei carichi più elevati (fino a 14 kN).

Dalla curva tensione – deformazione si osserva che la resistenza del materiale è inferiore all'acciaio DP800 come anche la duttilità, tuttavia la AA7075 rimane una scelta valida nei componenti dell'auto che non necessitano di determinate proprietà meccaniche, per consentire un alleggerimento della scocca.

La rottura del provino avviene senza la formazione delle bande di Lüders, con superfici di rottura lisce. Il fenomeno della strizione non si verifica visibilmente.

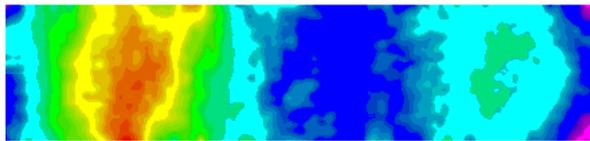


Fig. 10.11 – Mappa 2D delle deformazioni sulla ROI nell'ultimo fotogramma.

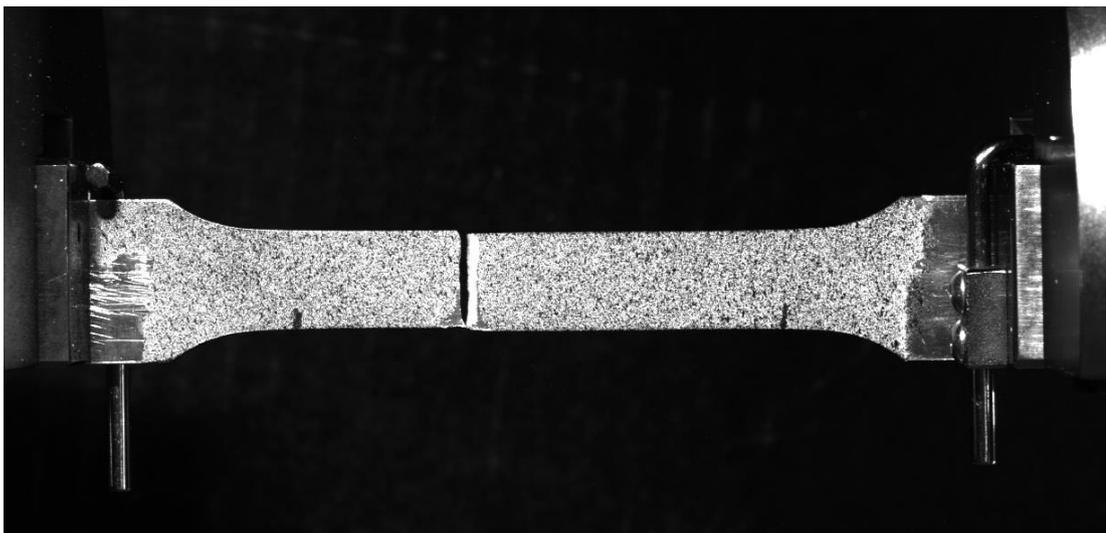


Fig. 10.12 – Condizione di rottura in un provino liscio in AA7075.

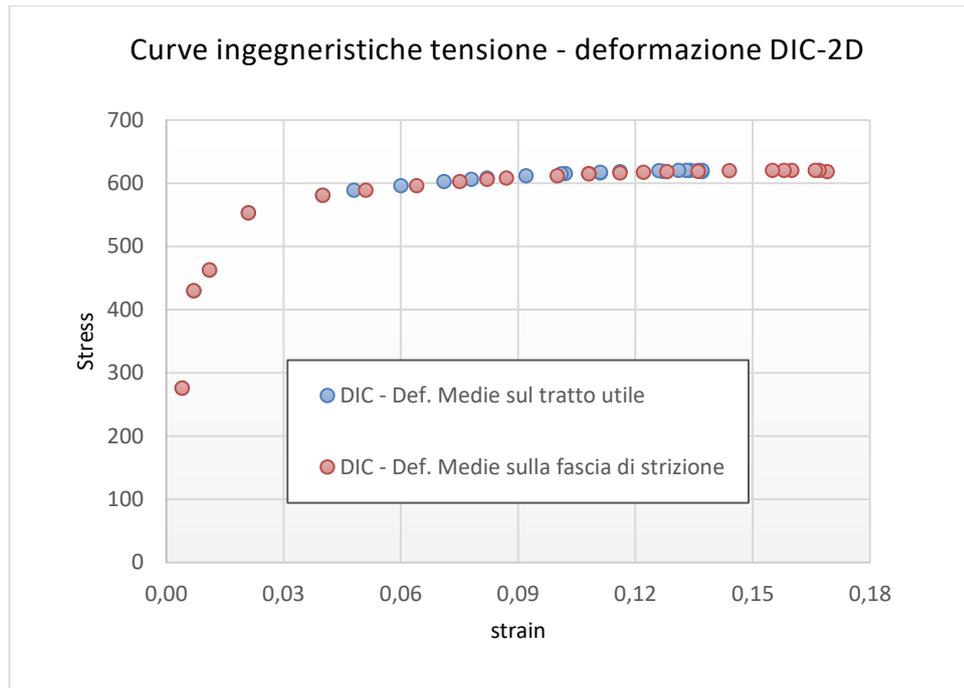


Grafico 10.20 – Diagramma tensione – deformazione ingegneristica ottenuto per un provino liscio in AA7075.

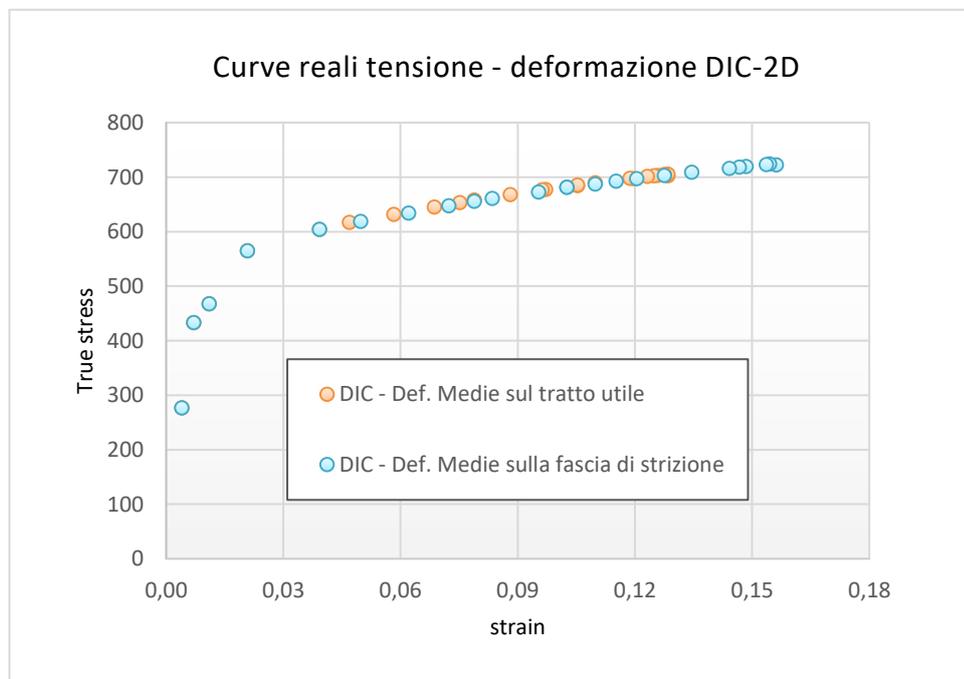


Grafico 10.21 – Diagramma tensione – deformazione reale ottenuto per un provino liscio in AA7075.

In condizioni di rottura incipiente l'andamento delle deformazioni lungo il tratto utile risulta più uniforme senza una localizzazione netta (fig. 10.11): la regione calibrata è mediamente sollecitata, mentre in corrispondenza della traversa mobile la deformazione decresce.

La procedura della DIC-2D consente di ottenere vantaggi più netti nel caso di deformazioni fortemente localizzate; nel caso di distribuzioni uniformi conta unicamente l'allungamento e la deformazione media sul tratto calibrato, per cui la versatilità del video-estensimetro è la stessa che si può ottenere con un estensimetro meccanico.

Nel caso di un provino liscio in AA7075 il picco di deformazione è presente (a circa 20 mm sul tratto calibrato), tuttavia appare molto meno accentuato rispetto all'acciaio DP800.

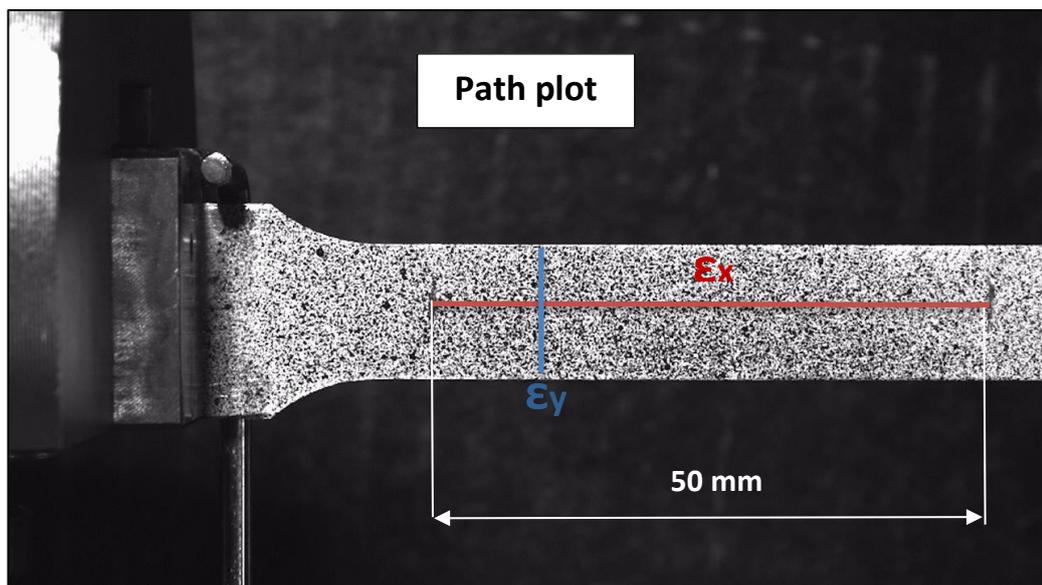


Fig. 10.13 – Path plot considerati per gli andamenti delle deformazioni reali (longitudinali e trasversali).

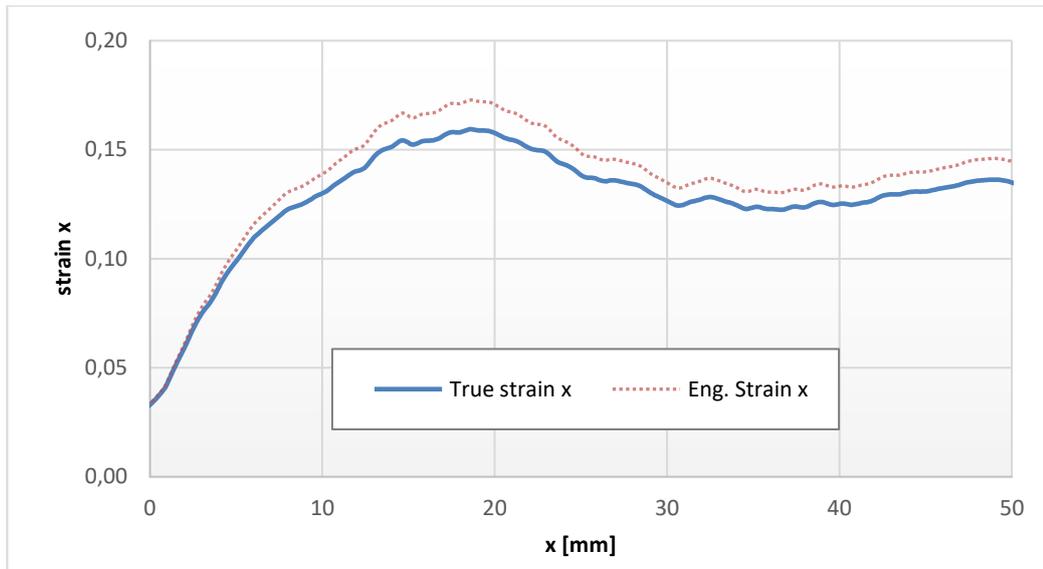


Grafico 10.21 – Distribuzione delle deformazioni assiali reali lungo il tratto utile in condizione di rottura incipiente.

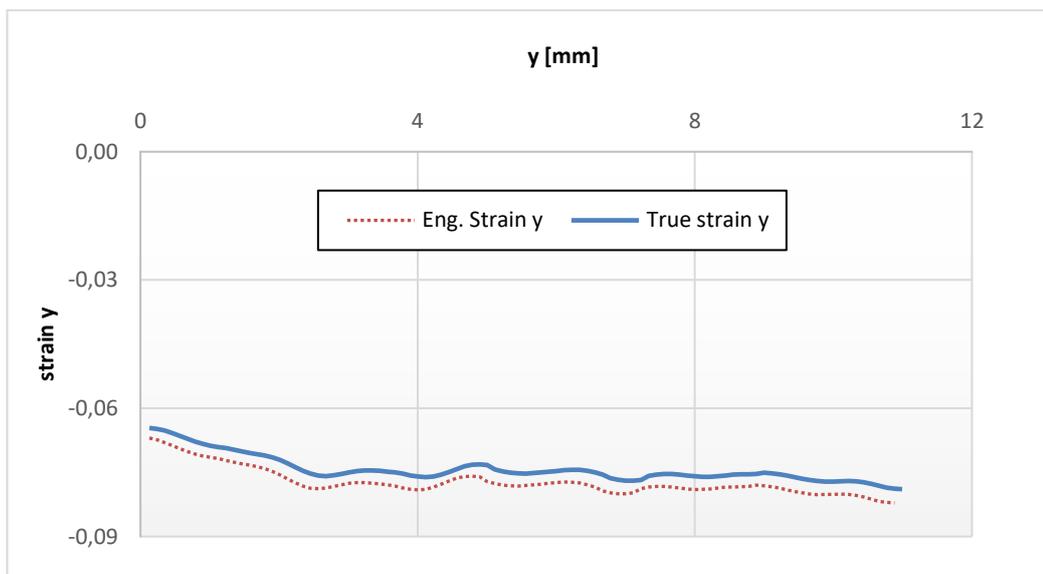


Grafico 10.22 – Distribuzione delle deformazioni trasversali nella sezione più sollecitata in condizione di rottura incipiente.

11. Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca condotta presso il Centro Ricerche Fiat si è basata sulla realizzazione e sul collaudo di un sistema di misura DIC-2D.

Le prove effettuate in laboratorio hanno dimostrato che questo sistema produce misure accurate delle deformazioni. Tale sistema è stato utilizzato per il calcolo delle tensioni e delle deformazioni assiali medie nella sezione di strizione, cosa che ha permesso di ottenere una curva vera più estesa di quella ottenibile con un estensimetro (per fare ciò però si sono trascurati gli effetti di intaglio e, in generale, le componenti in direzione non assiale).

Riguardo a eventuali sviluppi futuri questo sistema potrà essere utilizzato anche per calibrare i modelli di comportamento elastoplastico delle lamiere mediante confronti con simulazioni FEM. Inoltre l'adozione di un software DIC avente un numero maggiore di funzionalità velocizzerebbe l'intera procedura di misurazione.

Un problema frequente del sistema impiegato è dovuto all'utilizzo di una telecamera unica, in maniera tale da limitare la misurazione delle deformazioni solamente nel piano del campione. Per l'assottigliamento istantaneo del provino, nonostante l'esistenza di un metodo indiretto, bisogna necessariamente aggiornare il sistema a una configurazione stereoscopica (DIC-3D).

12. Bibliografia

- [1] Yang L., Smith L., Gothekar A.: “Measurement of Strain Distribution Using Digital Image Correlation”, Auto/Steel Partnership, 2010, 15-17
- [2] Mirone G.: “A new model for the elastoplastic characterization and the stress strain determination on the necking section of a tensile specimen”, International Journal of Solid and Structures, 2004, 3545-3564
- [3] Bridgman P.W.: “Studies in large plastic flow and fracture”, Mc-GrawHill, NY, 1952, 9-37
- [4] WorldAutoSteel: <https://www.worldautosteel.org/>
- [5] Pöcksteiner L.: “7xxx-high strength aluminum”, AluReport, 03/2012
- [6] Cooreman S., Lecompte D.: “Identification of Mechanical Material Behavior Through Inverse Modeling and DIC”, Society for Experimental Mechanics, 2007
- [7] Grédiac M., Pierron F.: “Applying the Virtual Fields Method to the identification of elasto-plastic constitutive parameters”, International Journal of Plasticity 22, 2006, 602-627
- [8] Norma “UNI EN ISO 6892-1”, Ente italiano di normazione, 2009
- [9] Gonzales M., Alves M.: “An inverse methodology for tuning material parameters in numerical modeling of mechanical structures”, International Symposium on Solid Mechanics, 2013