Università Politecnica delle Marche



Facoltà di Ingegneria

Corso Di Laurea in Ingegneria Meccanica

Caratterizzazione di leghe di acciaio tramite prove di trazione mediante Digital Image Correlation

Characterization of steel alloys through tensile tests using Digital Image Correlation

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Correlatore:

Prof. Gianluca Chiappini

Tesi di Laurea di:

Matteo Valentini

A.A. 2025/2026

Ringraziamenti

Indice

Ringraziamenti.....i

Lista delle Figure.....vi

Lista delle Tabelle.....viii

Capitolo 1 Introduzione.....1

Capitolo 2 Fondamenti teorici.....3

2.1 La prova di trazione uniassiale.....3

2.1.1 Curva Sforzo-Deformazione ingegneristica.....3

2.1.2 Curva Sforzo-Deformazione vera (True Stress – True Strain).....6

2.1.3 Strizione.....7

Capitolo 3 La Digital Image Correlation.....8

3.1 Misura della deformazione: dai metodi a contatto ai metodi ottici.....8

3.2 Definizione e principio della DIC.....9

3.3 Elementi costitutivi della 2D-DIC.....10

3.3.1 Immagine di riferimento, regione di interesse e griglia di calcolo.....10

3.3.2 Il subset e l'unicità della corrispondenza.....10

3.3.3 Il requisito di planarità nella 2D-DIC.....12

3.4 Lo speckle pattern.....13

3.4.1 Caratteristiche di un pattern ottimale.....13

3.4.2 Realizzazione.....14

3.5 La corrispondenza dei subset.....15

3.5.1 Funzioni di forma.....15

3.5.2 Criteri di correlazione.....16

3.5.3 Interpolazione sub-pixel.....17

3.5.4 Soluzione del problema di ottimizzazione.....19

3.5.5 Dimensione del subset e dello step....19
3.6 Dagli spostamenti alle deformazioni....20
3.6.1 Derivazione numerica e smoothing....20
3.6.2 Misure di deformazione....21
3.7 La DIC stereoscopica (3D-DIC)....22
3.7.1 Principio....22
3.7.2 Modello della telecamera e calibrazione....23
3.7.3 Stereo matching e ricostruzione....24
3.7.4 Angolo stereo....24
3.8 Acquisizione delle immagini....25
3.8.1 Telecamere e obiettivi....25
3.8.2 Illuminazione....26
3.9 Fonti di errore e incertezza di misura....27
3.10 Applicazione alla prova di trazione....28
3.10.1 Estensimetro virtuale....28
3.10.2 Deformazione locale nella strizione....28
Capitolo 4 Setup sperimentale e Materiali....31
4.1 Setup della prova di trazione....31
4.1.1 Macchina di prova e impostazioni di carico....32
4.1.2 Geometria del provino....33
4.2 Setup del sistema ottico....34
4.3 I materiali in esame....35
Capitolo 5 Metodologia di analisi dei dati....36
5.1 Struttura dei dati....36
5.2 Sincronizzazione temporale....37
5.3 Estensimetro virtuale....37
5.4 Identificazione della sezione critica e deformazione locale....38

5.5 Calcolo delle deformazioni ingegneristiche e vere.....39

5.6 Calcolo delle tensioni ingegneristiche e vere.....40

5.6.1 Estrazione automatica del modulo elastico (E) e dello snervamento….41

Capitolo 6 Risultati finali e conclusioni.....42

Bibliografia.....54

Sommario

Il presente lavoro di tesi illustra la caratterizzazione meccanica a trazione di cinque acciai: il 301LN-ASP, il 301LN1-4H, l'A588, l'A606 e l'S355J2W+N, di particolare interesse per le applicazioni industriali nel settore ferroviario, in collaborazione con Hitachi. L'obiettivo principale dello studio è superare i limiti tipici dell'estensimetria classica analizzando il comportamento dei materiali fino a rottura tramite la tecnica ottica non a contatto della Digital Image Correlation (DIC).

I dati sperimentali grezzi, provenienti sia dalla macchina di prova universale (Forza-Tempo) sia dal sistema DIC (coordinate spaziali e deformazioni di campo), sono stati elaborati attraverso un codice MATLAB. L'algoritmo implementato ha permesso la sincronizzazione temporale dei segnali, la creazione di un estensimetro virtuale e l'estrazione automatica delle principali proprietà meccaniche (modulo di Young, tensione di snervamento e tensione di rottura). L'analisi ha consentito inoltre di ricavare e confrontare le curve sforzo-deformazione ingegneristiche e vere, mettendo in luce le potenzialità della DIC nel misurare la deformazione locale all'interno della zona di strizione (necking), dove l'assunzione di deformazione omogenea decade. I risultati ottenuti forniscono una mappatura accurata del comportamento elasto-plastico degli acciai esaminati.

Lista delle Figure

Figura 2.1 – Provino sottoposto a carico assiale....3
Figura 2.2 – Diagramma sforzo-deformazione....4
Figura 2.3 – Determinazione della tensione di snervamento convenzionale $R_{p0,2}$ (schema qualitativo)....5
Figura 2.4 – Curva tensione-deformazione con dettaglio nella strizione....7
Figura 2.5 – Differenza tra curva ingegneristica e curva vera....8
Figura 3.1 – Sequenza operativa di una misura DIC....10
Figura 3.2 – (a) Immagine di riferimento con ROI, griglia dei punti di calcolo e subset di 21×21 px. (b) Immagine deformata (allungamento verticale dell'8% e traslazione rigida): il subset ritrovato è deformato e il suo centro definisce il vettore spostamento. Pattern sintetico generato numericamente....11
Figura 3.3 – Problema dell'apertura. In alto: subset di 21×21 px (riquadro rosso) su pattern periodico (a) e su speckle casuale (b). In basso: coefficiente ZNCC in funzione della traslazione di prova; le croci indicano i punti con $C_{ZNCC}>0{,}95$. Mappe calcolate numericamente....12
Figura 3.4 – Deformazione apparente indotta nella 2D-DIC da un moto fuori piano Δz, secondo l'eq. (3.1), per tre distanze di lavoro Z....13
Figura 3.5 – Pattern sintetici con diametro medio delle macchie crescente; il riquadro indica un subset di 21×21 px. In (a) le macchie sono sottocampionate; in (c) il subset contiene troppo poche macchie per essere univoco....14
Figura 3.6 – Speckle pattern....15
Figura 3.7 – Deformazione virtuale di un subset (griglia grigia tratteggiata) secondo funzioni di forma di ordine 0, 1 e 2; la freccia indica lo spostamento del centro....16
Figura 3.8 – Errore sistematico medio sullo spostamento in funzione della parte sub-pixel dello spostamento imposto (pattern sintetico con macchie di 3 px, 25 subset di 21×21 px, criterio ZNSSD, funzione di forma di ordine 0)....18
Figura 3.9 – Relazione tra subset, step, finestra di deformazione e Virtual Strain Gauge, secondo l'eq. (3.15)....21
Figura 3.10 – Schema (vista dall'alto) di un sistema stereo-DIC: centri ottici O_L,O_R, piani immagine, proiezioni p_L,p_R del punto P e angolo stereo α. La triangolazione ricostruisce anche lo spostamento fuori piano Δz....23
Figura 3.11 – Sorgenti luminose LED....27

Figura 3.12 – Andamento qualitativo della deformazione longitudinale lungo l'asse del provino a diversi istanti: dopo l'innesco della strizione il valore locale (linea continua) si discosta dalla media sull'estensimetro virtuale di base *L*0 (linea tratteggiata). A sinistra mappa di *εyy* nell'ultimo fotogramma, con i riferimenti dell'estensimetro (bianco) e la sezione di strizione (tratteggio). Campo sintetico.....29
Figura 4.1 – Setup sperimentale.....31
Figura 4.2 – Computer che gestisce la macchina di trazione.....32
Figura 4.3 – Posizionamento provino.....33
Figura 4.4 – Dimensioni e geometria del provino.....34
Figura 5.1 – Curva tensione-deformazione macchina, provino A588_T1.....36
Figura 5.2 – Confronto tra deformazione iniziale e finale del provino A588_T1.....38
Figura 5.3 – Confronto deformazioni del provino A588_T1.....39
Figura 5.4 – Confronto curve tensione-deformazione del provino A588_T1.....40
Figura 5.5 – Intersezione geometrica curve tensione-deformazione con retta parallela al tratto elastico traslata dello 0,6% del provino A588_T1.....41
Figura 6.1 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio A58842
Figura 6.2 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio A588…..42
Figura 6.3 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio A60644
Figura 6.4 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio A606…..44
Figura 6.5 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio 301LN-ASP.....46
Figura 6.6 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio 301LN-ASP 46
Figura 6.7 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio 301LN1-4H.....48
Figura 6.8 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio 301LN1-4H 48
Figura 6.9 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio S355J2W+N.....50
Figura 6.10 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio S355J2W+N.....50

Lista delle Tabelle

Tabella 3.1 – Invarianza dei criteri di correlazione alle variazioni di intensità luminosa [8, 19].....17
Tabella 3.2 – Principali fonti di errore nella DIC e relative contromisure.....28
Tabella 6.1 – Risultati acciaio A588.....43
Tabella 6.2 – Risultati acciaio A606.....45
Tabella 6.3 – Risultati acciaio 301LN-ASP.....47
Tabella 6.4 – Risultati acciaio 301LN1-4H.....49
Tabella 6.5 – Risultati acciaio S355J2W+N.....51

Capitolo 1
Introduzione

La corretta caratterizzazione meccanica dei materiali metallici è un requisito fondamentale nell'ingegneria meccanica, specialmente per la progettazione di componenti strutturali soggetti a carichi severi [1, 2]. La prova di trazione uniassiale rappresenta il test standard per ricavare parametri cruciali come il modulo elastico, lo snervamento e il carico di rottura [1, 3, 4]. Tuttavia, i metodi di misurazione tradizionali, come gli estensimetri a clip, presentano limitazioni intrinseche: misurano una deformazione media su un tratto utile predefinito e spesso, devono essere rimossi prima della rottura del provino per evitare danneggiamenti allo strumento, perdendo così informazioni preziose sulla fase di strizione (necking) [1, 3, 4].

Per superare queste criticità, negli ultimi anni si è affermata la Digital Image Correlation (DIC), una tecnica ottica avanzata che permette di misurare il campo di spostamenti e deformazioni sull'intera superficie del provino in modo continuo e non a contatto [2, 4, 5, 6].

Questo lavoro di tesi, svolto nell'ambito di un tirocinio presso l'università, si pone l'obiettivo di analizzare il comportamento meccanico a trazione di cinque acciai: il 301LN-ASP, il 301LN1-4H, l'A588, l'A606 e l'S355J2W+N.

Il cuore metodologico dell'elaborato risiede nell'elaborazione dei dati sperimentali. A tale scopo, è stato utilizzato un ambiente di calcolo numerico (MATLAB) per sviluppare una procedura automatizzata in grado di:

1. Sincronizzare i dati di carico acquisiti dalla macchina di prova con i dati cinematici catturati dal sistema DIC.
2. Calcolare la deformazione globale tramite un "estensimetro virtuale" e, parallelamente, isolare la deformazione locale massima nella zona di strizione.
3. Ricavare le curve sforzo-deformazione ingegneristiche e vere (True Stress – True Strain), calcolando parametri come il modulo di Young e la tensione di snervamento convenzionale [1, 2, 3, 4].

L'elaborato è strutturato in sei capitoli. Il **Capitolo 1** presenta l'obiettivo della tesi e accenna alle procedure utilizzate. Il **Capitolo 2** introduce i concetti teorici della prova di trazione. Il **Capitolo 3** descrive i principi di funzionamento della tecnica DIC. Il **Capitolo 4** descrive le specifiche dei materiali testati e il setup sperimentale utilizzato. Il **Capitolo 5**

entra nel dettaglio dell'algoritmo di analisi dati, illustrando i passaggi matematici e informatici che trasformano le matrici di pixel in curve meccaniche. Infine, il **Capitolo 6** presenta e discute i risultati ottenuti, confrontando le prestazioni degli acciai e validando l'efficacia della metodologia ottica rispetto agli approcci convenzionali.

Capitolo 2

Fondamenti teorici

2.1 La prova di trazione uniassiale

La prova di trazione è la più importante e utilizzata tra le prove meccaniche distruttive, consente di ricavare i parametri che caratterizzano il comportamento elastico e plastico dei materiali.

Nella prova di trazione si sottopone il provino a un carico gradualmente crescente fino a provocarne la rottura.

La prova viene eseguita misurando in ogni istante la forza applicata lungo l'asse del provino e lo spostamento della traversa nella direzione di applicazione della forza [1, 4]. Il provino deformandosi, andrà a variare la sua sezione e lunghezza iniziale, come mostrato in Figura 2.1; misurando tali variazioni è possibile definire una serie di parametri.

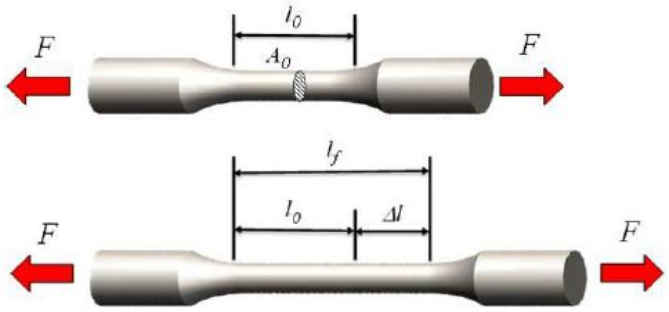


Figura 2.1 – Provino sottoposto a carico assiale

2.1.1 Curva Sforzo-Deformazione ingegneristica

La tensione ingegneristica σ viene definita come [1]:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}\left[\frac{N}{m^2}\right] \rightarrow [Pa] \tag{2.1}$$

dove F è la forza e A_0 la sezione iniziale del provino.

La deformazione ingegneristica ε viene definita come [1]:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2.2}$$

dove l_f è la lunghezza finale del tratto utile e l_0 è la lunghezza iniziale del tratto utile.

Tali parametri sono individuabili in un diagramma, detto “diagramma sforzo-deformazione”, che assume la forma rappresentata in Figura 2.2.

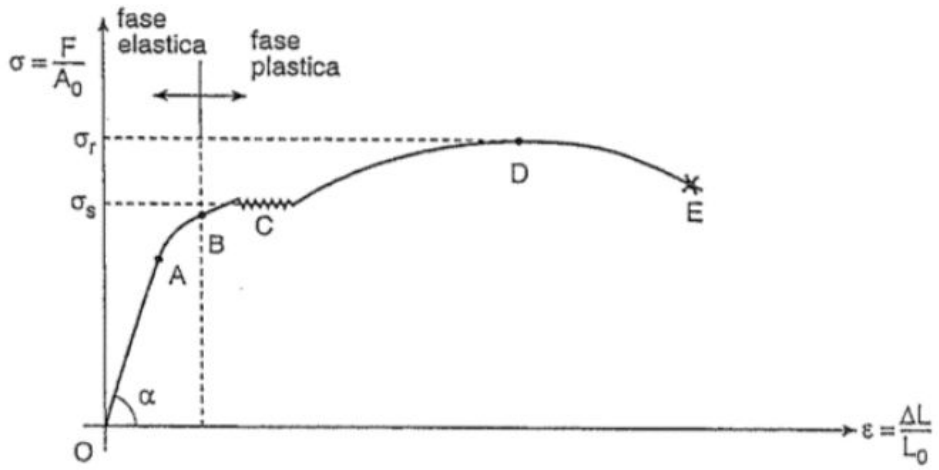


Figura 2.2 – Diagramma sforzo-deformazione

All’interno del diagramma che ha in ordinata la tensione e in ascissa la deformazione, si possono individuare:

- Tratto **OA**: elasticità lineare. Descritto dalla:
    - Legge di Hooke $\sigma=E\varepsilon$

        E = modulo di elasticità normale o modulo di Young
        - È la tangente dell’angolo α
        - Ha le proprietà di una tensione
        - È una caratteristica del materiale
- **A**: limite di proporzionalità. Fine della fase elastico-lineare
- Tratto **AB**: elasticità non lineare. $\sigma=\sigma(\varepsilon)$ ma non lineare
- **B**: limite di elasticità. Proprietà fondamentale **OAB**:
    - Fase ELASTICA → scaricando si percorre (in verso contrario) la stessa curva ottenuta in fase di carico e togliendo completamente il carico il materiale torna allo stato iniziale
    - Fase ANELASTICA o PLASTICA (oltre C) → allo scarico il materiale percorre una retta parallela al percorso iniziale, manifestando deformazioni residue irreversibili ε_{res}($1\div5\times10^{-5}$% → *fine fase elastica*)

- **C**: snervamento. Inizio della fase plastica. Riorganizzazione a livello cristallino del materiale: zona di forte instabilità, la legge di Hooke non è più sufficiente a descrivere il comportamento del materiale
- **D**: limite di resistenza. Corrisponde alla tensione nominale massima sopportata σ_R che caratterizza il materiale.
- **E**: limite di rottura. Corrisponde alla deformazione massima sopportata dal materiale. In **DE** si ha la strizione del provino, con la deformazione localizzata attorno a una sezione e una riduzione di area effettiva.

Il diagramma di Figura 2.2 è tipico di un acciaio dolce, in cui lo snervamento è ben distinto, la curva raggiunge un picco, la tensione scende poi oscilla attorno a un valore pressoché costante (plateau) prima che riprenda l'incrudimento. In questo caso la normativa UNI EN ISO 6892-1 [7] non richiede alcuna costruzione convenzionale, ma individua direttamente sulla curva due valori, la tensione di snervamento superiore R_m *max*, corrispondente al picco e la tensione di snervamento inferiore R_m *min*, cioè il valore minimo raggiunto durante lo snervamento plastico. Altri materiali, come in genere gli acciai inossidabili austenitici (ad esempio il 301LN-ASP studiato in questo lavoro), non presentano uno snervamento marcato: la curva passa gradualmente dal tratto elastico a quello plastico e il punto C non è individuabile. In questo caso si definisce una tensione di snervamento convenzionale $R_{p0,2}$, data dall'intersezione tra la curva e la retta parallela al tratto elastico traslata di una deformazione pari allo 0,2%, come mostrato in Figura 2.3. Nel Capitolo 5 viene descritto come i due approcci sono stati applicati ai materiali in esame.

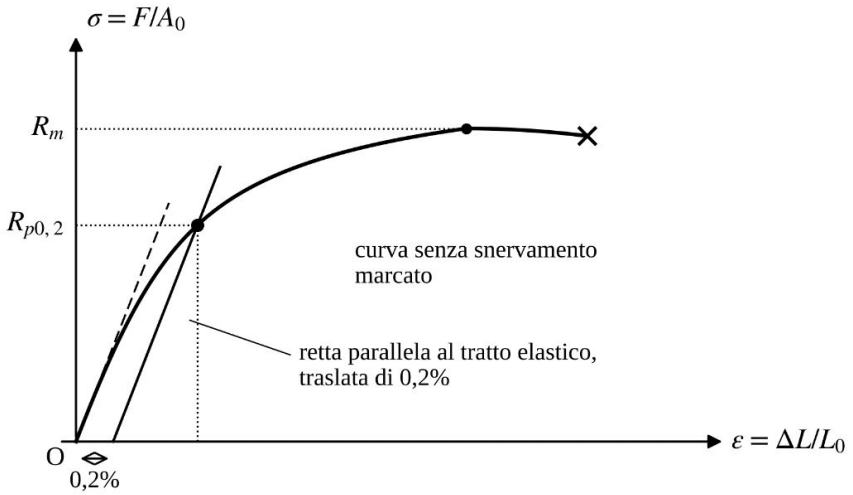


Figura 2.3 – Determinazione della tensione di snervamento convenzionale $R_{p0,2}$ (schema qualitativo)

Le relazioni (2.1) e (2.2) sono valide finché la deformazione è piccola, ossia in campo elastico [1].

2.1.2 Curva Sforzo-Deformazione vera (True Stress – True Strain)

La deformazione si accumula mentre la lunghezza varia e si può definire un incremento di deformazione *dε* in corrispondenza dell'allungamento *dl* [1].

La deformazione ε_t così definita è detta "logaritmica" o anche "deformazione vera" (true strain) [1]:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \rightarrow \varepsilon_t = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_0} \tag{2.3}$$

dove l_f è la lunghezza finale del tratto utile e l_0 è la lunghezza iniziale del tratto utile.

Durante la prova si manifestano notevoli variazioni dell'area resistente, per tenerne conto si definisce la tensione vera σ_t (true stress) [1]:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{2.4}$$

dove F è la forza ed A è l'area istantanea.

Da deformazione ingegneristica a deformazione vera [1]:

ingegneristica
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{l_f}{l_0} - 1 \rightarrow \frac{l_f}{l_0} = 1 + \varepsilon \tag{2.5}$$

logaritmica (vera)
$$\varepsilon_t = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln(1+\varepsilon) \rightarrow \varepsilon = e^{\varepsilon_t} - 1 \tag{2.6}$$

Da tensione ingegneristica a tensione vera [1]:

Volume costante [1]: $A_0 l_0 = A l_f$

ingegneristica
$$\sigma = \frac{F}{A_0}\frac{l_f}{l_0} = \frac{A_0}{A} \rightarrow \frac{A_0}{A} = 1 + \varepsilon \tag{2.7}$$

vera
$$\sigma_t = \frac{F}{A}\sigma_t = \frac{F}{A_0}\frac{A_0}{A} \rightarrow \sigma\frac{A_0}{A} = \sigma(1+\varepsilon) = \sigma e^{\varepsilon_t} \tag{2.8}$$

2.1.3 Strizione

Tipicamente, un materiale durante la prova di trazione raggiunge il carico massimo prima della rottura; a tale carico corrisponde una condizione di instabilità (collasso plastico), dopodiché si verifica una strizione localizzata nel provino, da notare nella Figura 2.4 (A) [1].

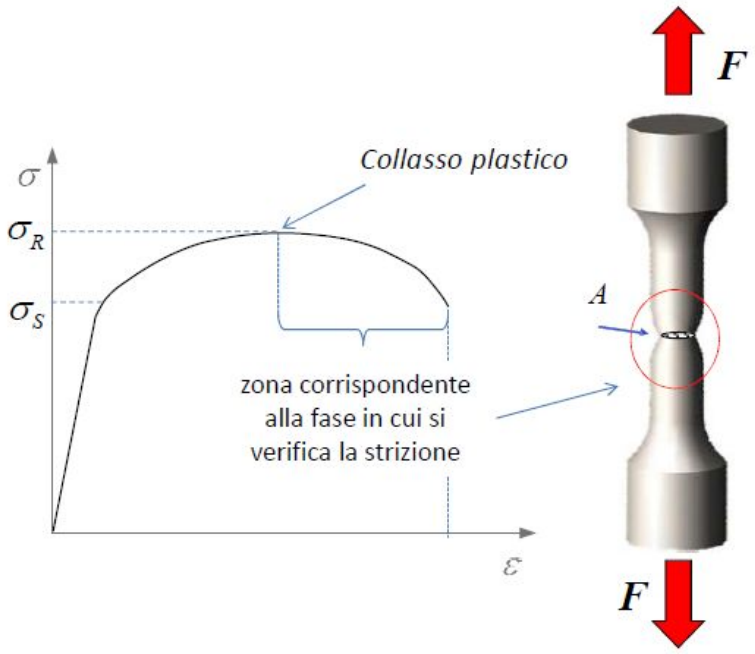


Figura 2.4 – Curva tensione-deformazione con dettaglio nella strizione

Per poter determinare la condizione di collasso plastico bisogna rappresentare la curva del materiale in termini di tensione e deformazione vera.

Notiamo nella Figura 2.5 che il tratto elastico è lo stesso per entrambe le curve.

La curva vera, a differenza di quella ingegneristica, cresce sempre in quanto si riferisce all'area attuale «*A*»; l'aumento si registra anche dopo la condizione di collasso plastico in quanto l'area del provino diminuisce più velocemente di quanto aumenta la forza [1, 3].

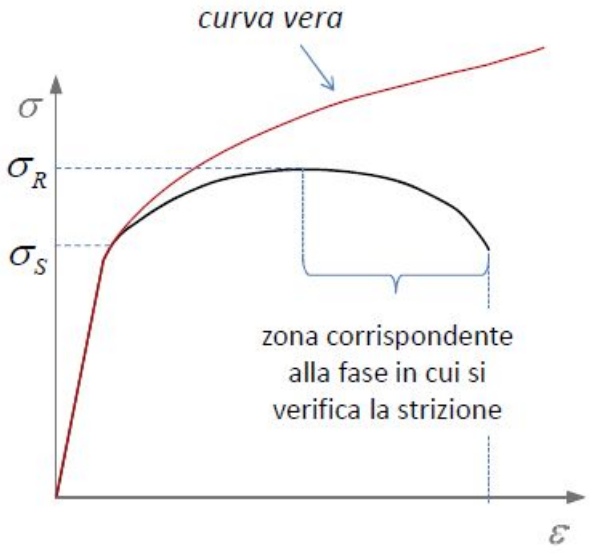


Figura 2.5 – Differenza tra curva ingegneristica e curva vera

Capitolo 3

La Digital Image Correlation

Nel Capitolo 2 abbiamo visto che per caratterizzare il materiale servono la forza e la deformazione del tratto utile del provino e che dopo il carico massimo la deformazione si localizza nella strizione. In questo capitolo viene descritta la tecnica utilizzata per misurarla, la Digital Image Correlation (DIC). Verranno definiti il principio di funzionamento, gli elementi che la compongono (pattern, subset, funzioni di forma, criteri di correlazione), il calcolo delle deformazioni, la DIC stereoscopica, l'acquisizione delle immagini, le fonti di errore ed infine, l'applicazione alla prova di trazione.

3.1 Misura della deformazione: dai metodi a contatto ai metodi ottici

L'estensimetro a contatto, a clip o a coltello, è uno strumento che misura la variazione di distanza tra due punti del provino, posti a una distanza iniziale nota L_0. Fornisce quindi una deformazione media sul tratto L_0 [1, 4]. Non si può usare al suo posto lo spostamento della traversa, perché comprende anche l'allungamento delle parti di provino vincolate e i giochi di tutto il sistema formato da afferraggi, cella di carico e struttura della macchina [1].

L'estensimetro a contatto presenta tre limiti per lo scopo di questo lavoro:

- fornisce un solo valore, mediato su L_0, e non descrive la localizzazione della deformazione nella strizione;

- deve spesso essere rimosso prima della rottura per non danneggiarlo, perdendo l'ultima parte della prova;
- il contatto con il provino può causare scorrimenti o disturbi locali, soprattutto su provini sottili.

I metodi ottici a campo pieno sono tecniche senza contatto che misurano spostamenti e deformazioni su un'intera area della superficie e non in un solo punto. Si dividono in due famiglie [4]:

- metodi interferometrici, come l'interferometria olografica e l'ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry): usano la luce coerente di un laser e sono molto sensibili, ma richiedono un laboratorio isolato dalle vibrazioni e non sono adatti alle grandi deformazioni;
- metodi non interferometrici: usano la luce bianca e comprendono il metodo a griglia, in cui sul provino viene applicato un reticolo regolare, e la correlazione di immagini digitali, in cui viene applicato un pattern casuale. Grazie alle fotocamere digitali ad alta risoluzione la DIC è oggi una delle tecniche ottiche più diffuse nella meccanica sperimentale.

3.2 Definizione e principio della DIC

La Digital Image Correlation è una tecnica ottica di misura senza contatto, non interferometrica. Ricava il campo di spostamenti, e da questo il campo di deformazioni, della superficie del provino confrontando immagini digitali acquisite prima e durante la deformazione [6, 8].

Il metodo è stato proposto all'inizio degli anni Ottanta da un gruppo di ricercatori della University of South Carolina [9, 10]. Nel 1989 è stato introdotto il metodo iterativo di Newton–Raphson [11], ancora oggi alla base degli algoritmi, e nel 1993 la tecnica è stata estesa alla misura tridimensionale con due telecamere [12]. In letteratura compare anche con altri nomi, come "digital speckle correlation method" (DSCM) o "texture correlation" [5].

La tecnica si presenta in due forme:

- 2D-DIC: una sola telecamera, con asse ottico perpendicolare alla superficie piana del provino, che misura le due componenti di spostamento nel piano;
- 3D-DIC (o stereo-DIC): due telecamere che inquadrano la stessa area da angolazioni diverse. Combinando la DIC con la stereovisione si misurano la forma

della superficie e tutte e tre le componenti dello spostamento, anche su superfici non piane (§3.7). Nel nostro caso è stata utilizzata la 3D-DIC.

Il procedimento si articola in tre fasi, mostrate in Figura 3.1: la preparazione del provino, la cui superficie deve avere un pattern casuale; l'acquisizione di una sequenza di immagini durante la prova, che deve iniziare prima dell'applicazione del carico; l'elaborazione numerica, in cui un software, nel nostro caso MatchID [13], confronta ogni immagine con quella di riferimento.

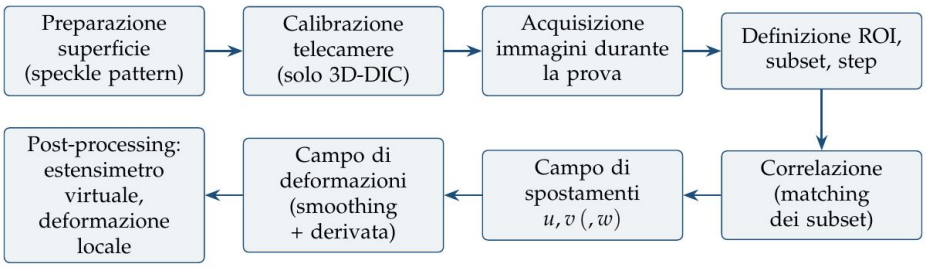


Figura 3.1 – Sequenza operativa di una misura DIC.

3.3 Elementi costitutivi della 2D-DIC

Prima di arrivare alla 3D-DIC conviene descrivere gli elementi della 2D-DIC, sui quali si basa anche la versione stereoscopica.

3.3.1 Immagine di riferimento, regione di interesse e griglia di calcolo

L'immagine di riferimento è il fotogramma che ritrae il provino nella configurazione rispetto alla quale si misurano gli spostamenti, di solito quella non deformata. Le immagini successive sono dette immagini deformate. Per avere un riferimento non deformato l'acquisizione deve partire un istante prima dell'avvio della prova.

La regione di interesse (ROI, Region Of Interest) è la parte dell'immagine di riferimento in cui si vuole calcolare il campo di spostamenti. La ROI viene divisa con una griglia virtuale di punti di calcolo (Figura 3.2a). La distanza in pixel tra due punti vicini è detta step. Il risultato della DIC non è quindi un campo continuo, ma un insieme di valori di spostamento nei nodi della griglia.

3.3.2 Il subset e l'unicità della corrispondenza

Il principio della DIC consiste nel ritrovare, in ciascuna immagine deformata, la posizione occupata dallo stesso punto materiale dell'immagine di riferimento. Un singolo pixel non basta: il suo livello di grigio si ripete molte volte nell'immagine, quindi la corrispondenza non è unica e in più cambia da un fotogramma all'altro a causa del rumore del sensore.

Il subset è una piccola area quadrata di $(2M+1)\times(2M+1)$ pixel centrata nel punto di calcolo (x_0,y_0). La distribuzione dei livelli di grigio al suo interno funziona da "firma" che, se abbastanza variegata, è unica all'interno della ROI. Una volta ritrovato il subset corrispondente nell'immagine deformata (target subset), il confronto tra la posizione del suo centro e quella del centro del subset di riferimento dà il vettore spostamento $\mathbf{u}=(u,v)$ del punto di calcolo, come vediamo nella Figura 3.2b [5, 8].

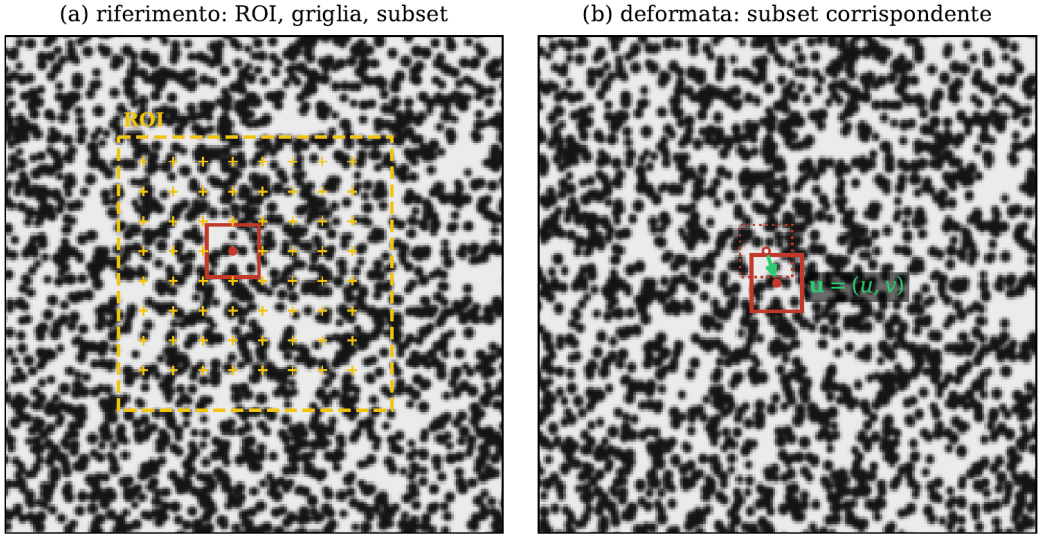


Figura 3.2 – (a) Immagine di riferimento con ROI, griglia dei punti di calcolo e subset di 21×21 px. (b) Immagine deformata (allungamento verticale dell'8% e traslazione rigida): il subset ritrovato è deformato e il suo centro definisce il vettore spostamento. Pattern sintetico generato numericamente.

Il problema dell'apertura è l'indeterminazione della corrispondenza che si ha quando nella ROI sono presenti subset simili tra loro. La funzione di correlazione ha allora più massimi equivalenti e non si capisce quale sia la posizione corretta [5]. Si evita usando un pattern non periodico. Nella Figura 3.3 si confronta la mappa del coefficiente di correlazione ZNCC (§3.5.2) di un subset su un pattern a reticolo regolare, che ha un massimo per ogni periodo del reticolo, con quella dello stesso subset su uno speckle casuale, che ha un solo picco netto.

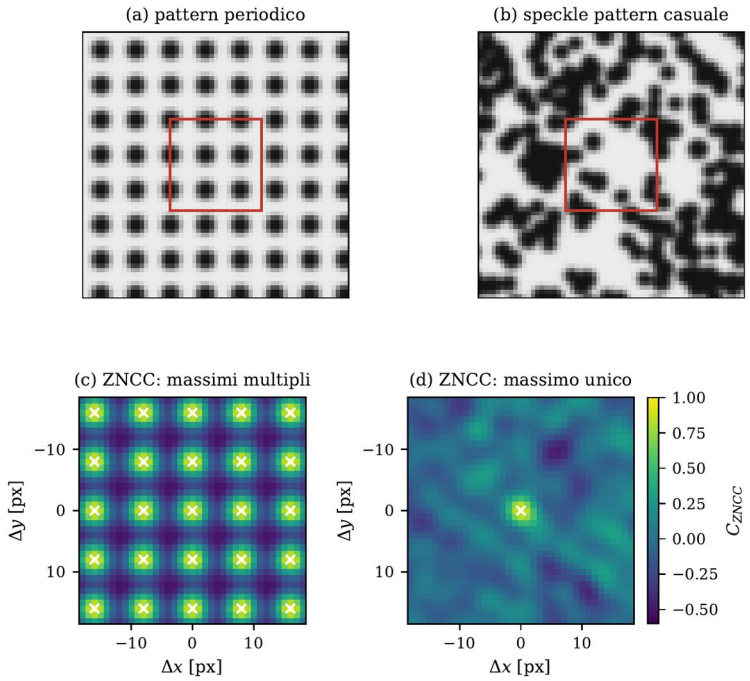


Figura 3.3 – Problema dell'apertura. In alto: subset di 21×21 px (riquadro rosso) su pattern periodico (a) e su speckle casuale (b). In basso: coefficiente ZNCC in funzione della traslazione di prova; le croci indicano i punti con C_{ZNCC}>0,95. Mappe calcolate numericamente.

3.3.3 Il requisito di planarità nella 2D-DIC

La 2D-DIC misura la proiezione sul piano del sensore dello spostamento della superficie. Perché coincida con lo spostamento reale servono tre condizioni: la superficie deve essere piana, il sensore deve essere parallelo alla superficie e la superficie non deve spostarsi lungo l'asse ottico durante la prova [5, 14].

La deformazione apparente è la deformazione fittizia generata da un moto fuori piano. Nel modello a foro stenopeico (§3.7.2) un segmento di lunghezza L, posto a distanza Z dal centro ottico, ha un'immagine di lunghezza $l=fL/Z$, con f lunghezza focale. Se il provino si avvicina alla telecamera di Δz l'immagine si ingrandisce in modo uniforme e il software interpreta l'ingrandimento come una deformazione:

$$\varepsilon_{app} \simeq \frac{\Delta z}{Z} \tag{3.1}$$

Con Z=1000 mm un moto fuori piano di soli 0,5 mm genera circa 500 με (Figura 3.4), una parte non trascurabile della deformazione allo snervamento di un acciaio strutturale (circa 1700 με per un S355) [5]. In una prova di trazione movimenti di questo tipo sono frequenti, per l'assestamento degli afferraggi, per le curvature iniziali del provino e per la contrazione dello spessore, che allontana la superficie dalla telecamera. Con una sola

telecamera l’errore non si può separare dalla deformazione reale. Si può ridurre aumentando Z oppure usando obiettivi telecentrici e si elimina misurando anche lo spostamento fuori piano con la 3D-DIC.

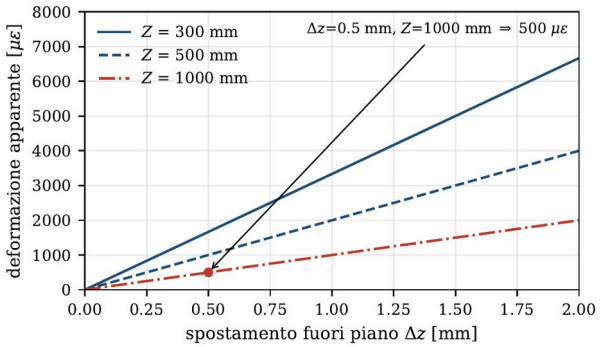


Figura 3.4 – Deformazione apparente indotta nella 2D-DIC da un moto fuori piano Δz, secondo l’eq. (3.1), per tre distanze di lavoro Z.

3.4 Lo speckle pattern

Lo speckle pattern (“pattern a puntini”) è una distribuzione casuale di macchie scure su fondo chiaro o viceversa, applicata sulla superficie del provino. Dà a ogni subset una distribuzione di livelli di grigio unica e si deforma insieme al materiale, trasferendo la deformazione all’immagine [4, 5]. Poiché tutta la misura consiste nel ritrovare i subset nelle immagini successive, la qualità del pattern condiziona direttamente l’accuratezza.

3.4.1 Caratteristiche di un pattern ottimale

Non esiste una formula che definisca il pattern ottimo, ma in letteratura sono stati individuati i parametri principali [5, 15, 16, 17]:

- dimensione delle macchie: diametro medio sull’immagine di 3–5 px. Macchie più piccole di circa 3 px non vengono campionate bene dal sensore e producono aliasing, con aumento dell’errore sistematico. Macchie molto grandi richiedono subset più grandi e riducono la risoluzione spaziale (Figura 3.5);
- fattore di riempimento (coverage factor): frazione di pixel scuri sul totale. Valori tra il 40% e il 70%, idealmente vicini al 50%, danno il massimo contenuto informativo;
- casualità: il pattern non deve avere periodicità (problema dell’apertura) né direzioni preferenziali;
- contrasto: massima differenza tra i livelli di grigio delle macchie e del fondo, senza saturare il sensore.

Il contenuto informativo di un subset si misura con indicatori come la subset entropy o la somma dei quadrati dei gradienti di intensità (SSSIG, Sum of Square of Subset Intensity Gradients) [16]:

$$SSSIG_x = \sum_{i=-M}^{M} \sum_{j=-M}^{M} \left[\frac{\partial f(x_i, y_j)}{\partial x} \right]^2, \qquad \sigma_u \simeq \frac{\sqrt{2}\,\sigma_n}{\sqrt{SSSIG_x}}, \tag{3.2}$$

dove σ_n è la deviazione standard del rumore delle immagini e σ_u quella dello spostamento misurato. La relazione dice che l'errore casuale diminuisce quando il subset contiene più gradienti di intensità, cioè quando il pattern è più contrastato e ricco di bordi o quando il subset è più grande. A livello globale si usa in modo analogo il gradiente medio di intensità dell'immagine (MIG) [18].

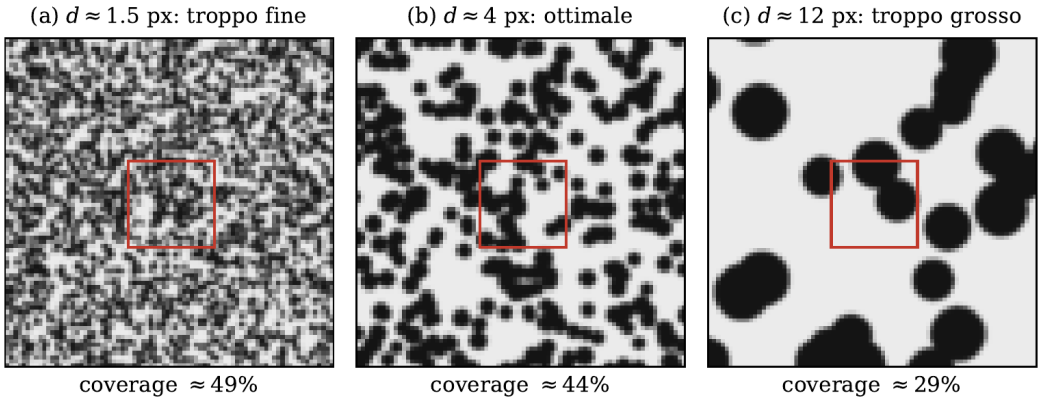


Figura 3.5 – Pattern sintetici con diametro medio delle macchie crescente; il riquadro indica un subset di 21×21 px. In (a) le macchie sono sottocampionate; in (c) il subset contiene troppo poche macchie per essere univoco.

3.4.2 Realizzazione

Il metallo nudo in genere non va bene: la sua texture naturale è poco contrastata e la superficie riflette la luce verso le telecamere. Il pattern viene quindi realizzato artificialmente. Le tecniche principali sono la verniciatura a spruzzo con bombolette o aerografo, le maschere microforate [5], il trasferimento di toner e i timbri. Per superfici umide o ambienti aggressivi si usano polveri (grafite su fondo di talco o allumina) o trattamenti superficiali come sabbiatura e attacco chimico [4].

Per la verniciatura a spruzzo, utilizzata in questo lavoro (Figura 3.6), i passaggi sono:

1. pulizia e sgrassaggio della superficie, ad esempio con acetone, per garantire l'adesione della vernice;

2. applicazione di un fondo bianco opaco, sottile e uniforme, con passate rapide. Uno strato spesso non segue bene la deformazione del provino e tende a fessurarsi o a staccarsi alle grandi deformazioni;
3. nebulizzazione di vernice nera opaca da una distanza tale che la vernice non colpisca direttamente la superficie, ma ci ricada dopo essere stata nebulizzata in aria. Si ottengono così macchie piccole e separate, evitando gocce e agglomerati dove il software non riesce a correlare;
4. verifica sull'immagine acquisita della dimensione delle macchie in pixel e dell'assenza di zone sature o uniformi.

La vernice deve essere opaca per non creare riflessi speculari e va applicata solo sul tratto utile, per non alterare il serraggio negli afferraggi [3].



Figura 3.6 – Speckle pattern

3.5 La corrispondenza dei subset

3.5.1 Funzioni di forma

Durante la prova il materiale si deforma e con esso il pattern. Il subset di riferimento, quadrato, nell'immagine deformata appare traslato, ruotato e distorto. Per ritrovarlo bisogna quindi deformarlo virtualmente.

Una funzione di forma è la legge che trasforma le coordinate (x_i,y_j) di ogni pixel del subset di riferimento nelle coordinate (x'_i,y'_j) del punto corrispondente nell'immagine deformata:

$$x'_i = x_i + \xi\left(x_i, y_j\right), \qquad y'_j = y_j + \eta\left(x_i, y_j\right), \tag{3.3}$$

con $\Delta x = x_i - x_0$ e $\Delta y = y_j - y_0$ distanze dal centro del subset [4, 8]. Le funzioni di forma più usate sono polinomi di ordine crescente (Figura 3.7):

$$\text{ordine 0 – traslazione rigida:} \quad \xi = u, \qquad \eta = v, \tag{3.4}$$

$$\text{ordine 1 – affine:} \quad \xi = u + u_x\Delta x + u_y\Delta y, \qquad \eta = v + v_x\Delta x + v_y\Delta y, \tag{3.5}$$

$$\text{ordine 2:} \quad \xi = u + u_x\Delta x + u_y\Delta y + \frac{1}{2}u_{xx}\Delta x^2 + \frac{1}{2}u_{yy}\Delta y^2 + u_{xy}\Delta x\Delta y, \tag{3.6}$$

e analogamente per η. Con u,v si indicano gli spostamenti del centro del subset e con $u_x=\partial u/\partial x$, u_y, v_x, v_y i gradienti di spostamento. La funzione di ordine 0 descrive solo una traslazione e non basta quando il materiale si deforma. Quella di ordine 1, con il vettore delle incognite $\mathbf{p}=(u,u_x,u_y,v,v_x,v_y)^T$ di 6 parametri, descrive traslazione, rotazione, allungamenti e scorrimenti uniformi. Quella di ordine 2, con 12 parametri, riproduce anche spostamenti con andamento quadratico. Un ordine più alto migliora la corrispondenza quando i gradienti di deformazione sono forti, ma aumenta le incognite, il tempo di calcolo e la sensibilità al rumore [5, 15]. Se il subset è abbastanza piccolo rispetto a come varia il campo, le funzioni di ordine 1 o 2 sono sufficienti.

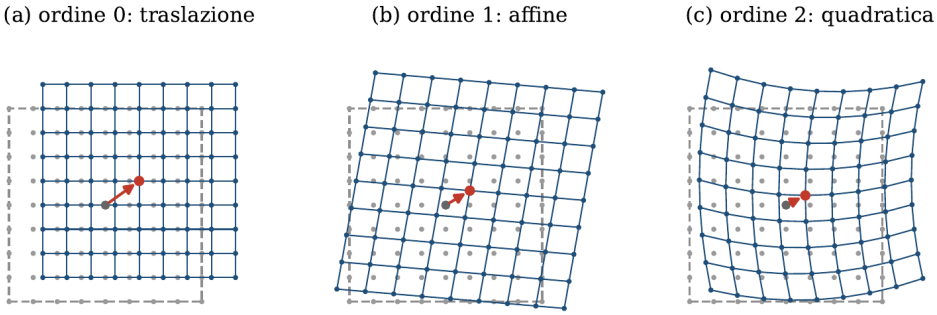


Figura 3.7 – Deformazione virtuale di un subset (griglia grigia tratteggiata) secondo funzioni di forma di ordine 0, 1 e 2; la freccia indica lo spostamento del centro.

3.5.2 Criteri di correlazione

Un criterio di correlazione è la funzione $C(\mathbf{p})$ che misura quanto sono simili il subset di riferimento, di livelli di grigio $f(x_i,y_j)$ e il subset deformato, di livelli di grigio $g(x'_i,y'_j)$ calcolati con la funzione di forma di parametri $\mathbf{p}$. La corrispondenza si ottiene con i parametri che massimizzano C nei criteri di tipo cross-correlation (CC), o che la minimizzano nei criteri di tipo sum of squared differences (SSD) [8, 19].

La scelta del criterio dipende da quanto deve essere robusto alle variazioni di illuminazione. Tra il subset di riferimento e quello deformato l'intensità può cambiare per un fattore di scala ($g\simeq af$, ad esempio il subset deformato è più luminoso del 10%) o per un offset ($g\simeq f+b$). Le cause sono l'illuminazione non uniforme, la variazione di orientazione della superficie rispetto alle sorgenti e alle telecamere e la variazione di riflettività della vernice deformata. Indicando con f_m,g_m i valori medi nel subset e con

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i,j} \left[f\left(x_i, y_j\right) - f_m \right]^2}, \qquad \Delta g = \sqrt{\sum_{i,j} \left[g\left(x'_i, y'_j\right) - g_m \right]^2}, \tag{3.7}$$

i principali criteri sono:

$$C_{SSD} = \sum_{i,j} \left[f\left(x_i, y_j\right) - g\left(x'_i, y'_j\right) \right]^2, \tag{3.8}$$

$$C_{NSSD} = \sum_{i,j} \left[\frac{f\left(x_i, y_j\right)}{\sqrt{\sum f^2}} - \frac{g\left(x'_i, y'_j\right)}{\sqrt{\sum g^2}} \right]^2, \tag{3.9}$$

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i,j} \left[\frac{f\left(x_i, y_j\right) - f_m}{\Delta f} - \frac{g\left(x'_i, y'_j\right) - g_m}{\Delta g} \right]^2, \tag{3.10}$$

$$C_{ZNCC} = \sum_{i,j} \frac{\left[f\left(x_i, y_j\right) - f_m \right] \left[g\left(x'_i, y'_j\right) - g_m \right]}{\Delta f \, \Delta g}. \tag{3.11}$$

Sviluppando il quadrato nella (3.10) si ottiene

$$C_{ZNSSD} = 2\left(1 - C_{ZNCC}\right), \tag{3.12}$$

cioè i due criteri sono equivalenti: minimizzare uno equivale a massimizzare l'altro [8, 19]. Esiste infine la formulazione parametrica $C_{PSSDab}=\sum(af_i+b-g_i)^2$, in cui scala a e offset b sono incognite aggiuntive [4, 19]. La Tabella 3.1 riassume l'invarianza dei criteri alle variazioni di intensità.

Criterio	Scala ($g=af$)	Offset ($g=f+b$)	Note
CC, SSD, SAD	no	no	rapidi, poco robusti
NCC, NSSD	sì	no	
ZCC, ZSSD, $PSSD_b$	no	sì	
ZNCC, ZNSSD, $PSSD_{ab}$	sì	sì	raccomandati

Tabella 3.1 – Invarianza dei criteri di correlazione alle variazioni di intensità luminosa [8, 19]

Il criterio ZNSSD, o l'equivalente ZNCC, non è sensibile né alla scala né all'offset ed è il più robusto. È il criterio raccomandato dalle linee guida [15] ed è il più diffuso nei software commerciali [5, 8].

3.5.3 Interpolazione sub-pixel

Le coordinate (x'_i,y'_j) date dalla (3.3) in generale non sono intere, mentre l'immagine deformata è nota solo al centro dei pixel. L'interpolazione sub-pixel è la ricostruzione dei livelli di grigio dell'immagine deformata in posizioni frazionarie. Serve per calcolare il

criterio di correlazione in modo continuo rispetto a **p** e quindi per ottenere spostamenti con risoluzione inferiore al pixel. Le funzioni di interpolazione più usate sono polinomiali (bilineari, bicubiche) e B-spline. Si raccomanda almeno l'ordine cubico, e le B-spline bicubiche sono preferibili ai polinomi bicubici [5, 15, 20].

L'interpolazione introduce un errore sistematico (bias) che dipende dalla parte frazionaria dello spostamento: è nullo per spostamenti interi e di mezzo pixel e ha andamento circa sinusoidale tra questi valori [20]. L'andamento non dipende dal tipo di interpolante, che ne cambia solo l'ampiezza. La Figura 3.8 riporta l'errore calcolato su un pattern sintetico traslato di quantità sub-pixel note: l'interpolazione bilineare dà l'errore maggiore, la B-spline cubica lo riduce e con il pre-filtraggio gaussiano delle immagini si riduce ancora.

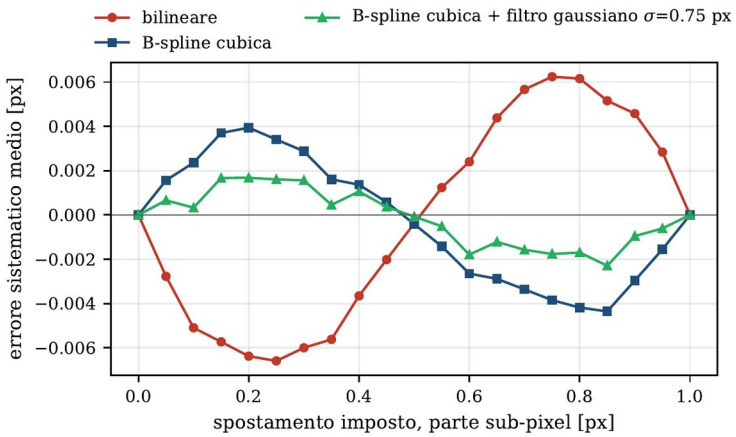


Figura 3.8 – Errore sistematico medio sullo spostamento in funzione della parte sub-pixel dello spostamento imposto (pattern sintetico con macchie di 3 px, 25 subset di 21×21 px, criterio ZNSSD, funzione di forma di ordine 0).

Il pre-filtraggio gaussiano è la convoluzione delle immagini con un nucleo gaussiano di deviazione standard σ prima della correlazione. Funziona perché un pattern con transizioni nette tra macchie e fondo contiene frequenze spaziali più alte di quelle che l'interpolante riesce a riprodurre, e questo causa aliasing. Un filtro passa-basso moderato elimina queste componenti e conserva l'informazione utile al matching. Gli studi indicano un valore ottimo $\sigma \simeq 0{,}75$–1 px: con valori maggiori l'immagine perde contrasto e l'incertezza torna a crescere [5, 21]. Per lo stesso motivo non conviene sfocare l'obiettivo di proposito, perché il filtraggio digitale si controlla meglio.

3.5.4 Soluzione del problema di ottimizzazione

La ricerca della corrispondenza è un problema di ottimizzazione non lineare: bisogna trovare il vettore **p** che minimizza $C_{ZNSSD}(\mathbf{p})$. Si procede in due passi [8, 22]:

1. stima iniziale a livello di pixel intero, con una ricerca diretta del massimo di correlazione in un intorno, oppure assegnando a un punto la soluzione già trovata nel punto adiacente, a partire da un punto di partenza (seed point) scelto dall'utente;
2. affinamento sub-pixel iterativo, con il metodo di Newton–Raphson [11],

$$\mathbf{p}^{(k+1)} = \mathbf{p}^{(k)} - \left[\nabla\nabla C\left(\mathbf{p}^{(k)}\right)\right]^{-1} \nabla C\left(\mathbf{p}^{(k)}\right), \tag{3.13}$$

- oppure con la variante Inverse Compositional Gauss–Newton (IC-GN), oggi la più diffusa, che rende la matrice hessiana costante, quindi da calcolare una sola volta per ogni subset [22]. Le iterazioni si fermano quando la correzione di **p** scende sotto una soglia.

Il valore del criterio a convergenza indica la qualità del matching: i punti con residuo superiore a una soglia vengono scartati.

La strategia di riferimento stabilisce con quale immagine viene confrontato ciascun fotogramma. Nella strategia spaziale il confronto è sempre con l'immagine iniziale: gli errori non si accumulano, ma con grandi deformazioni il subset può diventare troppo diverso da quello di riferimento (decorrelazione). Nella strategia incrementale ogni immagine è confrontata con la precedente, oppure il riferimento viene aggiornato quando la correlazione peggiora: si riescono a seguire deformazioni molto grandi, come quelle della strizione, ma gli errori si accumulano [3, 6].

3.5.5 Dimensione del subset e dello step

La dimensione del subset è il parametro che influisce di più sull'accuratezza ed è un compromesso tra due esigenze opposte [5, 16]:

- un subset grande contiene più informazione (SSSIG maggiore, eq. (3.2)): garantisce l'unicità della corrispondenza e riduce l'errore casuale dovuto al rumore e alla quantizzazione;
- un subset piccolo è approssimato meglio dalle funzioni di forma di ordine 1 o 2: riduce l'errore sistematico e aumenta la risoluzione spaziale, cioè la capacità di cogliere i gradienti locali di deformazione come quelli della strizione.

La soluzione migliore minimizza insieme i due contributi. Come indicazioni pratiche, il subset deve contenere almeno tre macchie di 3–5 px per lato [15], e con un pattern ottimale si usano di solito subset di 21–29 px di lato [5]. Lo step si sceglie pari a circa 1/3–1/2 della dimensione del subset [15]. Step più piccoli aumentano il numero di punti e il tempo di calcolo, ma i dati di punti vicini, ottenuti da subset in gran parte sovrapposti, non sono statisticamente indipendenti.

3.6 Dagli spostamenti alle deformazioni

3.6.1 Derivazione numerica e smoothing

La correlazione fornisce spostamenti con accuratezza sub-pixel e le deformazioni si ottengono per derivazione numerica. La derivazione amplifica il rumore: un errore δu sugli spostamenti di due punti distanti uno step s produce un errore sulla deformazione dell'ordine di $\delta u/s$. Con δu=0,02 px e s=5 px si ha $\delta\varepsilon \simeq 4\times10^{-3}$=4000 με, un valore inaccettabile per misurare il tratto elastico [5]. Prima di derivare bisogna quindi filtrare (smoothing) il campo di spostamenti.

Il metodo dei minimi quadrati puntuali (PLS, Pointwise Least Squares) è il più usato per lo smoothing e la derivazione [23]. Attorno a ogni punto si considera una finestra di deformazione (strain window) di (2m+1)×(2m+1) punti della griglia, abbastanza piccola da poter approssimare gli spostamenti con un piano:

$$u(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y, \qquad v(x,y) = b_0 + b_1 x + b_2 y. \tag{3.14}$$

I sei coefficienti si calcolano con i minimi quadrati sugli spostamenti della finestra e danno direttamente i gradienti nel punto centrale: $\partial u/\partial x = a_1$, $\partial u/\partial y = a_2$, $\partial v/\partial x = b_1$, $\partial v/\partial y = b_2$. Anche qui serve un compromesso: una finestra piccola filtra poco il rumore, una finestra grande appiattisce i gradienti reali di deformazione. I software permettono anche polinomi di ordine superiore e diverse definizioni del tensore di deformazione.

Il Virtual Strain Gauge (VSG) è la lunghezza in pixel, della regione di immagine che contribuisce al valore di deformazione in un punto. Rappresenta la risoluzione spaziale della misura di deformazione, cioè l'equivalente della base di misura di un estensimetro. Per il metodo PLS vale [15]:

$$L_{VSG} = (L_{window} - 1)\ s + L_{subset} \tag{3.15}$$

dove L_{window} è il numero di punti per lato della finestra, s lo step e L_{subset} il lato del subset. Ad esempio, con subset di 21 px, step di 5 px e finestra di 9×9 punti si ottiene L_{VSG}=61 px (Figura 3.9). Moltiplicato per il fattore di scala (mm/px) dell'immagine, il VSG indica la

dimensione minima delle zone di localizzazione che la misura riesce a risolvere: un VSG più grande della zona di strizione ne sottostima il picco di deformazione.

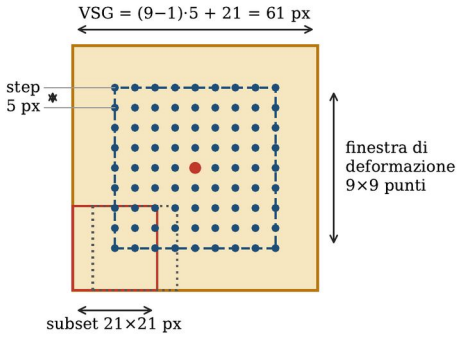


Figura 3.9 – Relazione tra subset, step, finestra di deformazione e Virtual Strain Gauge, secondo l'eq. (3.15).

3.6.2 Misure di deformazione

Noti i gradienti di spostamento, si costruisce il gradiente di deformazione **F**=**I**+∇**u** che nel piano vale

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial X} & \frac{\partial u}{\partial Y} \\ \frac{\partial v}{\partial X} & 1 + \frac{\partial v}{\partial Y} \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

In una prova fino a rottura si raggiungono deformazioni di decine di punti percentuali, quindi servono misure di deformazione valide anche per grandi deformazioni [6]:

$$\text{tensore di Green–Lagrange:} \quad \mathbf{E} = \frac{1}{2}\left(\mathbf{F}^T\mathbf{F} - \mathbf{I}\right) \tag{3.17}$$

$$\text{tensore logaritmico di Hencky:} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = ln\mathbf{U} = \frac{1}{2}\ln\left(\mathbf{F}^T\mathbf{F}\right) \tag{3.18}$$

dove **U** è il tensore destro di allungamento della decomposizione polare **F**=**RU**. Per un allungamento uniassiale di rapporto $\lambda = l/l_0$ le tre misure valgono rispettivamente

$$\varepsilon_{ing} = \lambda - 1 \qquad E = \frac{1}{2}\left(\lambda^2 - 1\right) \qquad \varepsilon_t = ln\lambda \tag{3.19}$$

e coincidono per piccole deformazioni. La deformazione logaritmica è la deformazione vera definita nel Capitolo 2 (2.3) ed è quella utilizzata in questo lavoro. Inoltre è additiva per incrementi successivi e, a volume costante, soddisfa $\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3=0$.

La deformazione equivalente di von Mises è lo scalare che riassume lo stato di deformazione locale ed è utile per individuare la zona di massima deformazione. Con

l'ipotesi di volume costante (ε_{zz}=-ε_{xx}-ε_{yy}), a partire dalle componenti nel piano misurate dalla DIC si scrive:

$$\varepsilon_{VM} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xy}^2} \tag{3.20}$$

con ε_{xy} componente tensoriale di scorrimento, pari a metà dello scorrimento angolare γ_{xy}.

3.7 La DIC stereoscopica (3D-DIC)

3.7.1 Principio

La 3D-DIC combina la correlazione di immagini con la stereovisione binoculare; due telecamere con gli assi ottici convergenti, inquadrano nello stesso momento la stessa area da due punti di vista diversi [2, 6, 12]. Un punto materiale *P* si proietta nel punto p_L sul piano immagine della telecamera sinistra e nel punto p_R su quello della destra (Figura 3.10). Note le posizioni p_L e p_R e la geometria del sistema, le coordinate spaziali di *P* si ricostruiscono per triangolazione, come intersezione dei due raggi ottici O_Lp_L e O_Rp_R. Ripetendo la ricostruzione per ogni fotogramma si ottengono la forma della superficie e le tre componenti dello spostamento (*u*,*v*,*w*).

Rispetto alla 2D-DIC, la 3D-DIC:

- misura il moto fuori piano e quindi lo separa, eliminando la deformazione apparente dell'eq. (3.1);
- si può usare anche su superfici curve;
- non richiede un allineamento perfetto tra sensore e provino.

Richiede però due telecamere sincronizzate e una calibrazione, la cui accuratezza condiziona tutta la misura. Per questi motivi è la configurazione utilizzata in questo lavoro.

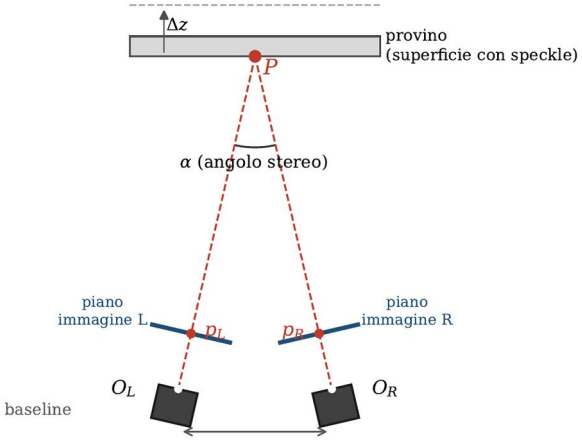


Figura 3.10 – Schema (vista dall'alto) di un sistema stereo-DIC: centri ottici O_L,O_R, piani immagine, proiezioni p_L,p_R del punto P e angolo stereo α. La triangolazione ricostruisce anche lo spostamento fuori piano Δz.

3.7.2 Modello della telecamera e calibrazione

Il modello a foro stenopeico (pinhole camera model) descrive la proiezione di un punto $P=(x_w,y_w,z_w)$, espresso in millimetri in un sistema di riferimento globale, nel punto (u,v) del piano immagine, espresso in pixel [2, 24]:

$$s\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix} = \mathbf{A}\,[\mathbf{R}\quad \mathbf{t}]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}, \qquad \mathbf{A}=\begin{bmatrix}\alpha & \gamma & u_0\\0 & \beta & v_0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}, \tag{3.21}$$

dove s è un fattore di scala. La matrice **A** contiene i parametri intrinseci della telecamera: le lunghezze focali in pixel lungo i due assi (α,β), il coefficiente di asimmetria degli assi (γ) e le coordinate del punto principale (u_0,v_0). La rotazione **R** e la traslazione **t**, di tre parametri ciascuna, sono i parametri estrinseci, cioè la posizione e l'orientazione della telecamera nel sistema globale. Gli obiettivi reali introducono distorsione, quindi al modello lineare si aggiunge una correzione, di solito radiale con i primi due termini:

$$\begin{bmatrix}\tilde{u}\\\tilde{v}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}u\\v\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}(u-u_0)\,(k_1r^2+k_2r^4)\\(v-v_0)\,(k_1r^2+k_2r^4)\end{bmatrix}, \tag{3.22}$$

dove $(\tilde{u},\tilde{v})$ sono le coordinate realmente osservate, k_1,k_2 i coefficienti di distorsione radiale e r la distanza dal punto principale. Modelli con più termini di solito non migliorano l'accuratezza e rendono instabile la stima [2].

La calibrazione è la procedura che stima i parametri intrinseci di ciascuna telecamera, i coefficienti di distorsione e la posizione relativa delle due telecamere, cioè rotazione e traslazione dell'una rispetto all'altra. Con le due telecamere si acquisiscono insieme alcune decine di immagini di un target di calibrazione, una lastra piana e rigida con un motivo noto (scacchiera o matrice di punti), spostata e ruotata in posizioni e inclinazioni diverse nel volume di misura. Il software individua i punti del target in ogni immagine e stima i parametri minimizzando la differenza tra le posizioni osservate e quelle riproiettate dal modello [3, 5, 24]. Questa differenza (errore di riproiezione, in pixel) indica la qualità della calibrazione.

Dal significato dei parametri derivano due regole pratiche [5, 15]. La calibrazione va eseguita dopo aver fissato posizione, messa a fuoco e diaframma degli obiettivi e il target va ripreso alla stessa distanza del provino. Dopo la calibrazione telecamere e obiettivi non devono più essere toccati, perché qualsiasi movimento cambia i parametri estrinseci o intrinseci e rende non valida la ricostruzione.

3.7.3 Stereo matching e ricostruzione

Lo stereo matching è la ricerca nell'immagine della telecamera destra, del punto corrispondente a ogni punto di calcolo definito nell'immagine della telecamera sinistra [2, 6]. È il passaggio più delicato della stereovisione, perché le due viste hanno prospettive diverse e si risolve con lo stesso algoritmo a subset della 2D-DIC, usando una funzione di forma che tiene conto della distorsione prospettica. La ricerca è limitata dalla geometria epipolare noti: i parametri di calibrazione, il punto corrispondente a uno della vista sinistra si trova su una retta nota della vista destra.

L'analisi di una prova comprende quindi tre passaggi: il matching stereo tra le due immagini di riferimento, che ricostruisce la forma iniziale (x_{w0},y_{w0},z_{w0}) di ogni punto; il matching temporale di ciascuna telecamera tra immagine di riferimento e immagini deformate; la triangolazione a ogni istante, che dà le coordinate (x_{w1},y_{w1},z_{w1}). Il vettore spostamento è la differenza tra le due configurazioni e le deformazioni si calcolano sulla superficie ricostruita con i metodi del §3.6.

3.7.4 Angolo stereo

L'angolo stereo α è l'angolo tra gli assi ottici delle due telecamere (Figura 3.10). Un angolo maggiore rende la triangolazione meno sensibile agli errori di matching e migliora l'accuratezza lungo la profondità. Un angolo troppo grande rende la superficie molto inclinata rispetto ai sensori, deforma il pattern per effetto della prospettiva e rende

difficile mantenere a fuoco tutta l'area. L'angolo ottimale dipende dalla lunghezza focale: con obiettivi corti (8–12 mm) se ne consigliano almeno 35°, mentre con obiettivi lunghi (≥ 35 mm), che hanno una profondità di campo ridotta, si scende a 10–15° [25]. L'angolo di 10–15° utilizzato in questo lavoro, con obiettivi da 50 mm, rientra in questa indicazione.

3.8 Acquisizione delle immagini

3.8.1 Telecamere e obiettivi

Le telecamere usate per la DIC sono telecamere industriali con requisiti precisi [4, 5]:

- sensore monocromatico: le telecamere a colori hanno un filtro a mosaico (filtro di Bayer) in cui ogni pixel registra un solo colore e l'immagine completa si ricostruisce per interpolazione (demosaicizzazione). Questo introduce sfocatura dei bordi, aliasing e perdita di informazione utile al matching [5];
- otturatore globale (global shutter), tutti i pixel sono esposti nello stesso istante, mentre con l'otturatore a scorrimento (rolling shutter) le righe sono esposte una dopo l'altra e l'immagine di un oggetto in movimento si distorce;
- profondità di bit di almeno 8 bit, con salvataggio senza perdita (TIFF, BMP); la compressione JPEG altera i livelli di grigio;
- risoluzione adeguata: una volta fissato il campo inquadrato, determina il fattore di scala (mm/px) e quindi la dimensione delle macchie in pixel e la risoluzione spaziale.

Il sistema utilizzato in questo lavoro, descritto nel Capitolo 4, usa due telecamere FLIR Blackfly S BFS-U3-88S6M-C. Hanno un sensore CMOS Sony IMX267 da 1" monocromatico a otturatore globale, con 4096×2160 pixel (8,9 Mpx) da 3,45 µm, convertitore A/D a 12 bit e fino a 32 fotogrammi al secondo [26]. Gli obiettivi sono Fujinon CF50ZA-1S, a focale fissa di 50 mm e diaframma da F2,4 a F16 [27].

L'apertura del diaframma si esprime con il numero focale $N=f/D$, rapporto tra lunghezza focale e diametro della pupilla. Regola la quantità di luce che arriva al sensore e la profondità di campo, cioè l'intervallo di distanze in cui l'oggetto appare a fuoco. Chiudendo il diaframma (N maggiore) la profondità di campo aumenta, e questo è utile nella 3D-DIC perché il provino è visto obliquamente e si sposta durante la prova. Però la luce diminuisce e aumenta la sfocatura per diffrazione, il cui disco di Airy ha diametro $d_A \simeq 2{,}44\,\lambda N$. Con $\lambda \simeq 0{,}55$ µm e $N=8$ si ha $d_A \simeq 11$ µm, pari a circa 3 pixel da 3,45 µm, e con

N=16 il valore raddoppia. Si sceglie quindi il diaframma più chiuso possibile, compatibilmente con un'illuminazione sufficiente e una sfocatura contenuta. La messa a fuoco si fa con il diaframma aperto, quando la profondità di campo è minima e la sensibilità massima, e poi lo si richiude al valore di lavoro.

Il tempo di esposizione deve essere tale che lo spostamento dell'immagine durante l'esposizione sia una piccola frazione di pixel, per evitare il mosso. Ad esempio, con velocità della traversa di 0,5 mm/s, tempo di esposizione di 10 ms e fattore di scala ipotetico di 0,05 mm/px, lo spostamento massimo durante uno scatto è di 5 µm, cioè 0,1 px.

La frequenza di acquisizione indica il numero di fotogrammi al secondo e quindi la risoluzione temporale delle curve. In una prova quasi statica non serve un valore elevato: con 5 Hz e 0,5 mm/s la traversa avanza di 0,1 mm tra due fotogrammi. Forza e immagini sono registrate da sistemi diversi, quindi i due segnali vanno sincronizzati, con un segnale di trigger comune oppure, in post-processing, allineando le basi dei tempi (Capitolo 5).

3.8.2 Illuminazione

L'illuminazione serve a rendere il pattern ben contrastato, sfruttando tutta la gamma dinamica del sensore senza saturare i pixel e deve essere il più possibile uniforme e costante nel tempo [4, 5]. I criteri ZNSSD e ZNCC compensano le variazioni lineari di intensità, ma un'illuminazione non uniforme aumenta comunque il rumore. Conviene usare lampade a LED (Figura 3.11) che rispetto a quelle a incandescenza, non hanno sfarfallio, scaldano poco il provino (evitando dilatazioni termiche non volute) e non creano moti convettivi dell'aria che distorcono l'immagine [5]. Le sorgenti si orientano in modo da evitare riflessi speculari nelle telecamere. Durante la prova bisogna evitare di proiettare ombre sul provino e di urtare il sistema.

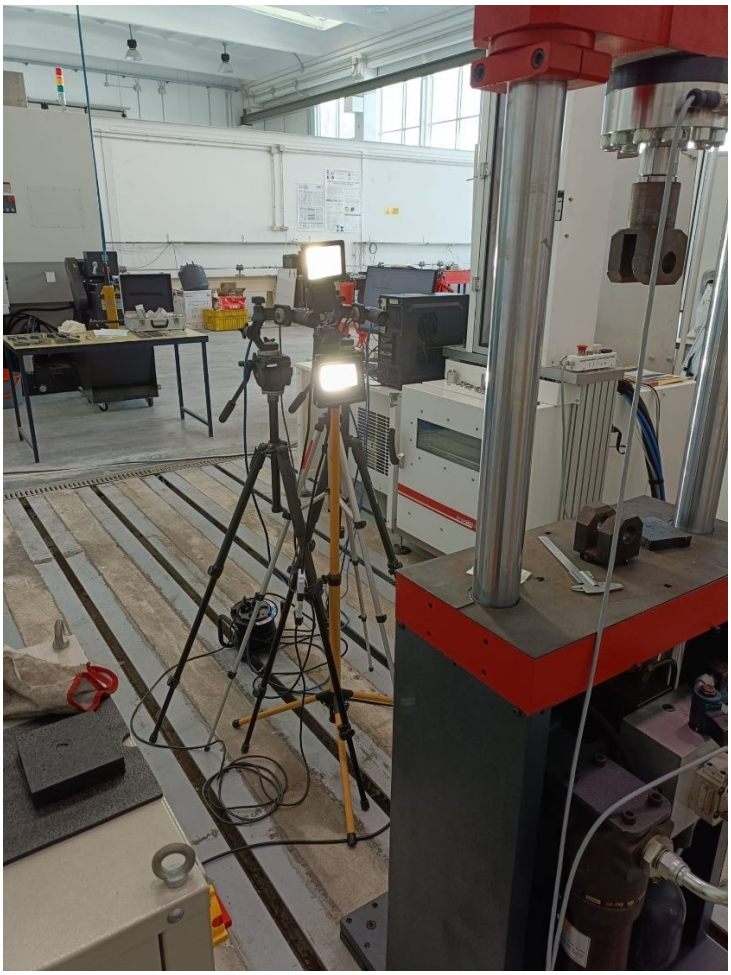


Figura 3.11 – Sorgenti luminose LED

3.9 Fonti di errore e incertezza di misura

L'errore di misura della DIC si divide in due parti [15]: un errore casuale (varianza), dovuto soprattutto al rumore delle immagini e un errore sistematico (bias), dovuto a modello, interpolazione, distorsione e geometria. Nella Tabella 3.2 sono riassunte le sorgenti principali.

Fonte	Effetto	Contromisura
Rumore del sensore, quantizzazione	errore casuale, amplificato dalla derivazione	buon contrasto, subset e VSG adeguati, smoothing
Interpolazione sub-pixel	bias periodico (Figura 3.8)	B-spline cubiche, pre-filtraggio gaussiano
Funzione di forma inadeguata	bias in presenza di gradienti	subset piccoli, ordine 2
Moto fuori piano (2D)	deformazione apparente $\Delta z/Z$	3D-DIC, obiettivi telecentrici
Distorsione degli obiettivi, calibrazione	bias su forma e spostamenti	calibrazione accurata, sistema non toccato dopo di essa
Variazioni di illuminazione, riflessi	perdita di correlazione	ZNSSD, LED diffusi, vernice opaca
Decorrelazione a grandi	punti mancanti nella strizione	riferimento incrementale, subset

Fonte	Effetto	Contromisura
deformazioni		adeguati
Fessurazione o distacco della vernice	dati errati vicino alla frattura	strato sottile e aderente
Vibrazioni, effetti termici	spostamenti spuri	supporti rigidi, sorgenti LED

Tabella 3.2 – Principali fonti di errore nella DIC e relative contromisure

Il noise floor (livello di rumore di fondo) è la deviazione standard degli spostamenti e delle deformazioni misurati su immagini acquisite a provino scarico e fermo. Rappresenta la risoluzione effettiva della misura con i parametri scelti. Si valuta acquisendo una breve serie di immagini statiche prima della prova ed elaborandole con gli stessi parametri dell'analisi [15].

3.10 Applicazione alla prova di trazione

3.10.1 Estensimetro virtuale

L'estensimetro virtuale è la riproduzione numerica, in post-processing, di un estensimetro a contatto. Nell'immagine di riferimento si scelgono due punti alla distanza iniziale L_0 e si segue la loro distanza $L(t)$ in ogni fotogramma. Con la 3D-DIC, L è la distanza euclidea tra le coordinate spaziali ricostruite, che non risente dei moti fuori piano. La deformazione ingegneristica e quella vera globali sono:

$$\varepsilon_{ing}(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_0}, \qquad \varepsilon_t(t) = ln\frac{L(t)}{L_0}. \tag{3.23}$$

Rispetto all'estensimetro fisico, quello virtuale non è a contatto con il provino, può restare attivo fino alla rottura, permette di scegliere L_0 e la posizione dopo la prova e di definirne più di uno sulla stessa acquisizione [3, 4]. Nel nostro caso viene implementato in MATLAB, come descritto nel Capitolo 5.

3.10.2 Deformazione locale nella strizione

Fino al carico massimo la deformazione è quasi uniforme lungo il tratto utile e la media sull'estensimetro coincide con il valore locale. Oltre questo punto la deformazione si localizza (Capitolo 2), la media su L_0 cresce lentamente, mentre il valore nella sezione di strizione cresce rapidamente, come vediamo nella Figura 3.12. Il campo misurato dalla DIC permette di individuare la sezione critica, ad esempio come punto di massimo della deformazione equivalente (3.20) nell'ultimo fotogramma prima della rottura, e di ricavarne la storia della deformazione vera locale $\varepsilon_{t,loc}$ [4].

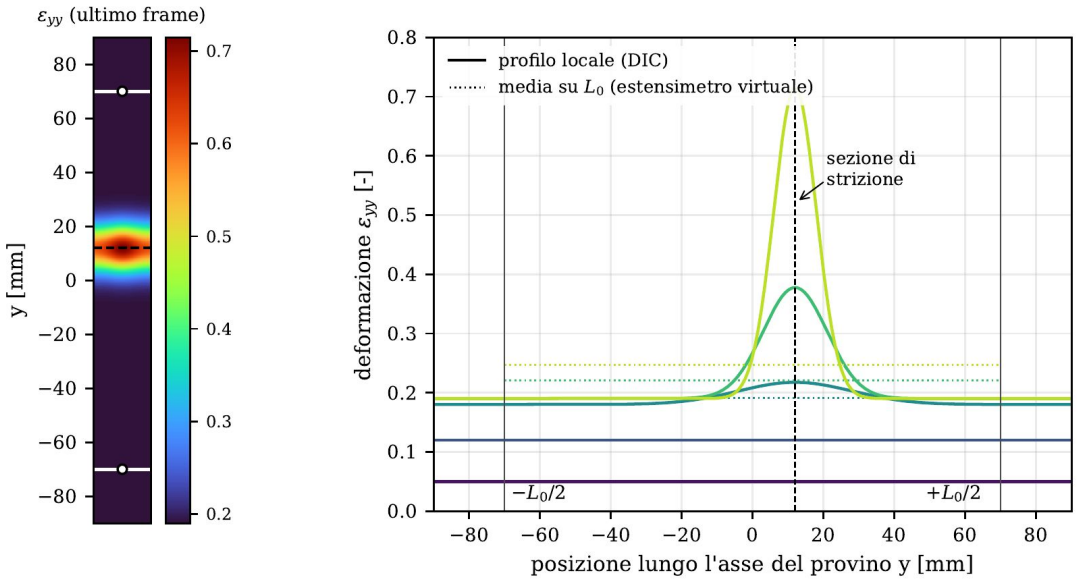


Figura 3.12 – Andamento qualitativo della deformazione longitudinale lungo l'asse del provino a diversi istanti: dopo l'innesco della strizione il valore locale (linea continua) si discosta dalla media sull'estensimetro virtuale di base L_0 (linea tratteggiata). A sinistra mappa di ε_{yy} nell'ultimo fotogramma, con i riferimenti dell'estensimetro (bianco) e la sezione di strizione (tratteggio). Campo sintetico.

Con l'ipotesi di volume costante ($\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}+\varepsilon_{zz}=0$) e di deformazione uniforme nella sezione, l'area istantanea vale $A=A_0\,e^{-\varepsilon_t}$, con ε_t deformazione vera longitudinale. La tensione vera si ricava quindi dalla forza misurata dalla macchina:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0}\,e^{\varepsilon_t}, \tag{3.24}$$

in accordo con le eq. (2.6) e (2.8). Usando la deformazione locale $\varepsilon_{t,loc}$ si ottiene la curva tensione–deformazione vera locale, che continua anche dopo il carico massimo, dove la curva ingegneristica decresce.

Il risultato va interpretato tenendo conto di due limiti [4, 28]. Il primo è che la deformazione locale è comunque una media sul VSG (§3.6), quindi un VSG grande rispetto alla strizione ne sottostima il picco. Il secondo è che dopo l'innesco della strizione lo stato di tensione nella sezione non è più monoassiale, quindi F/A è una tensione media che sovrastima la tensione di flusso equivalente. Per ottenere la vera legge di incrudimento a grandi deformazioni si usano correzioni geometriche (Bridgman per provini cilindrici [29], Zhang et al. per sezioni rettangolari [28]) oppure metodi inversi basati sul campo misurato dalla DIC e su modelli agli elementi finiti.

In sintesi, la DIC dà ciò che l'estensimetro non può dare: la deformazione globale senza contatto fino alla rottura ed in più, la deformazione locale nella zona di strizione. Le scelte descritte in questo capitolo (pattern, subset, step, finestra di deformazione, criterio

di correlazione, calibrazione) sono i parametri da riportare per ogni misura DIC [15]. Il Capitolo 4 descrive il setup sperimentale e le scelte adottate, il Capitolo 5 l'elaborazione dei dati.

Capitolo 4

Setup sperimentale e Materiali

Nel seguente capitolo verranno definiti tutti i parametri riguardanti il setup della prova di trazione (Figura 4.1), come la geometria dei provini, il tipo di macchina utilizzata e le impostazioni di carico; sarà inoltre definito il setup del sistema ottico, ovvero telecamere, illuminazione, calibrazione e preparazione dei provini; infine saranno trattati i materiali in esame.



Figura 4.1 – Setup sperimentale

4.1 Setup della prova di trazione

La prova meccanica di trazione richiede l'impiego di due computer: il primo comanda la macchina di trazione e registra spostamento e forza durante la prova; il secondo è collegato alle telecamere e permette di visualizzare e acquisire le immagini digitali tramite il software MatchID.

4.1.1 Macchina di prova e impostazioni di carico

La macchina utilizzata per effettuare le prove in esame è una Italsigma idraulica (Figura 4.1) condotta in controllo di spostamento:

- Il provino viene portato a rottura imponendo uno spostamento che cresce gradualmente tramite un apposito computer (Figura 4.2).

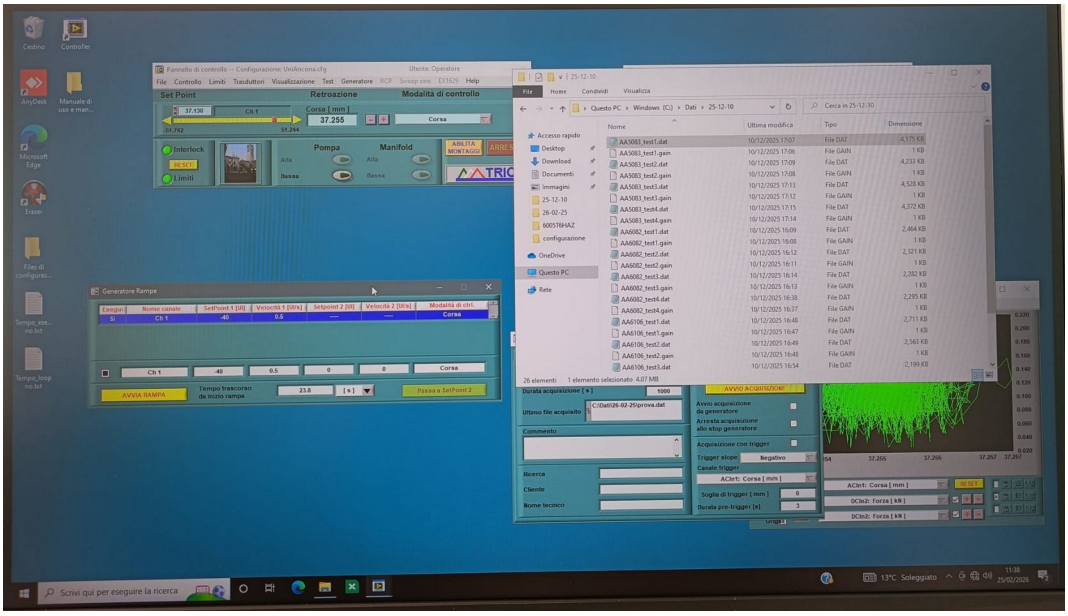


Figura 4.2 – Computer che gestisce la macchina di trazione

La macchina di trazione ha due teste di afferraggio (Figura 4.3): la testa superiore resta ferma durante la prova, perché collegata alla macchina tramite due calettatori conici, mentre la testa inferiore, solidale al pistone mobile, si muove in direzione verticale secondo i parametri impostati nel programma di controllo [4], che nel nostro caso prevedono una velocità di spostamento pari a 0,5 [mm/s].



Figura 4.3 – Posizionamento provino

4.1.2 Geometria del provino

Il provino utilizzato per la prova di trazione ha la geometria mostrata in Figura 4.4; tale geometria ha lo scopo di concentrare la deformazione del materiale esclusivamente nel tratto centrale del provino [3, 4].

Prima del montaggio sulla macchina il campione va preparato (§3.4.2), successivamente viene fissato alla macchina con un sistema di ancoraggio che ne consente la rotazione attorno al proprio asse, come si vede in Figura 4.3.

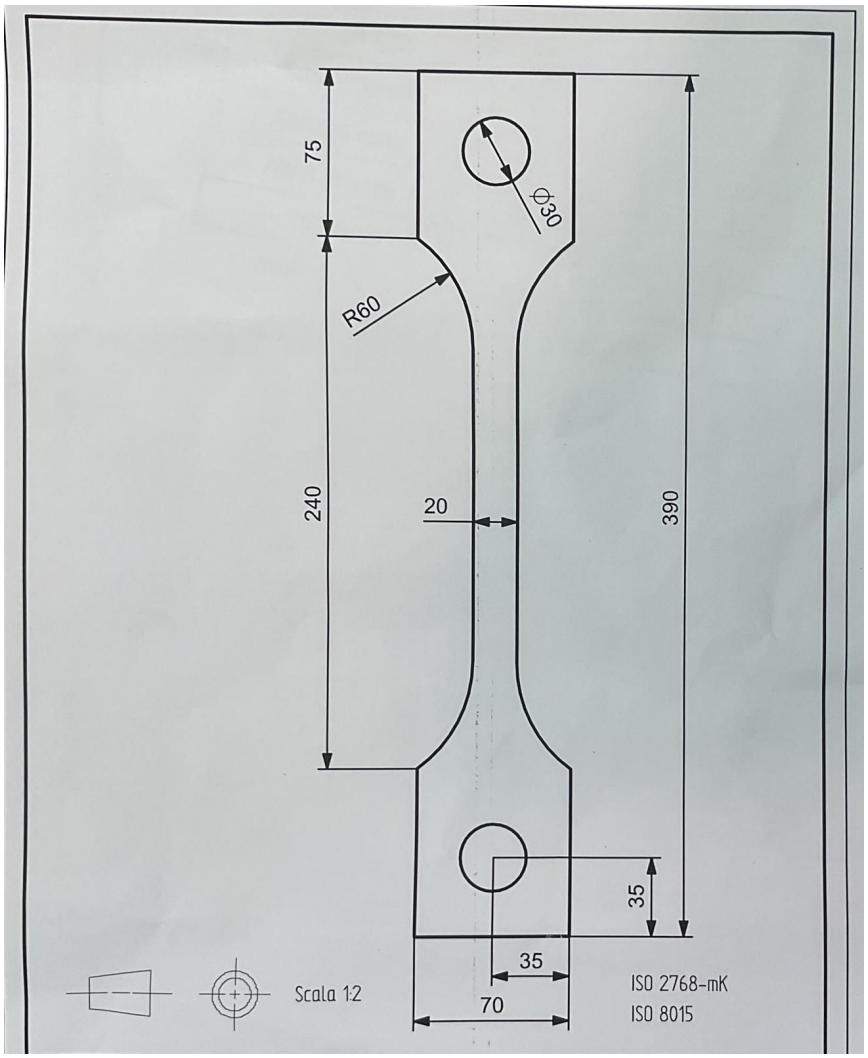


Figura 4.4 – Dimensioni e geometria del provino

4.2 Setup del sistema ottico

Il sistema ottico utilizzato è una 3D-DIC (§3.7) basata su due telecamere FLIR Blackfly S BFS-U3-88S6M-C monocromatiche a otturatore globale, con obiettivi Fujinon CF50ZA-1S a focale fissa di 50 mm, le cui caratteristiche sono descritte nel §3.8.1. Le due telecamere inquadrano la stessa area del provino da punti di vista diversi, con un angolo stereo di 10–15° (§3.7.4), e sono collegate al secondo computer, che acquisisce le immagini con il software MatchID [13] alla frequenza di 5 Hz.

L'illuminazione è realizzata con sorgenti a LED (Figura 3.11), per i motivi illustrati nel §3.8.2. La superficie del tratto utile di ciascun provino è preparata con uno speckle

pattern ottenuto per verniciatura a spruzzo, con fondo bianco opaco e macchie nere (§3.4.2, Figura 3.6).

Prima delle prove il sistema stereoscopico viene calibrato secondo la procedura descritta nel §3.7.2, dopo aver fissato posizione, messa a fuoco e diaframma degli obiettivi.

4.3 I materiali in esame

In questo elaborato di tesi si sono studiati:

- Acciaio A606. Spessore 3 mm, n° 4 provini
- Acciaio A588. Spessore 6,5 mm, n° 4 provini
- Acciaio S355J2W+N. Spessore 2 mm, n° 3 provini
- Acciaio 301LN1-4H. Spessore 3,2 mm, n° 3 provini
- Acciaio 301LN-ASP. Spessore 3,3 mm, n° 3 provini

Capitolo 5
Metodologia di analisi dei dati

L’estrazione dei parametri meccanici a partire dai dati sperimentali ha richiesto l’utilizzo di un algoritmo dedicato in ambiente MATLAB. L’obiettivo del codice è processare simultaneamente le grandezze acquisite dalla macchina di prova e dal sistema di visione DIC, sincronizzandole e trasformandole in curve caratteristiche sforzo-deformazione.

In questo capitolo vengono illustrati i passaggi logici e matematici implementati per la caratterizzazione dell’acciaio A588_T1; i passaggi sono analoghi per tutti gli altri.

5.1 Struttura dei dati

L’analisi si basa sulla fusione di due set di dati indipendenti. Il primo dataset, proveniente dalla macchina di prova, contiene i vettori temporali, lo spostamento della testa mobile e la forza applicata.

In questa sezione viene inserito manualmente lo spessore del provino e nella Figura 5.1 si visualizza la curva tensione-deformazione della macchina.

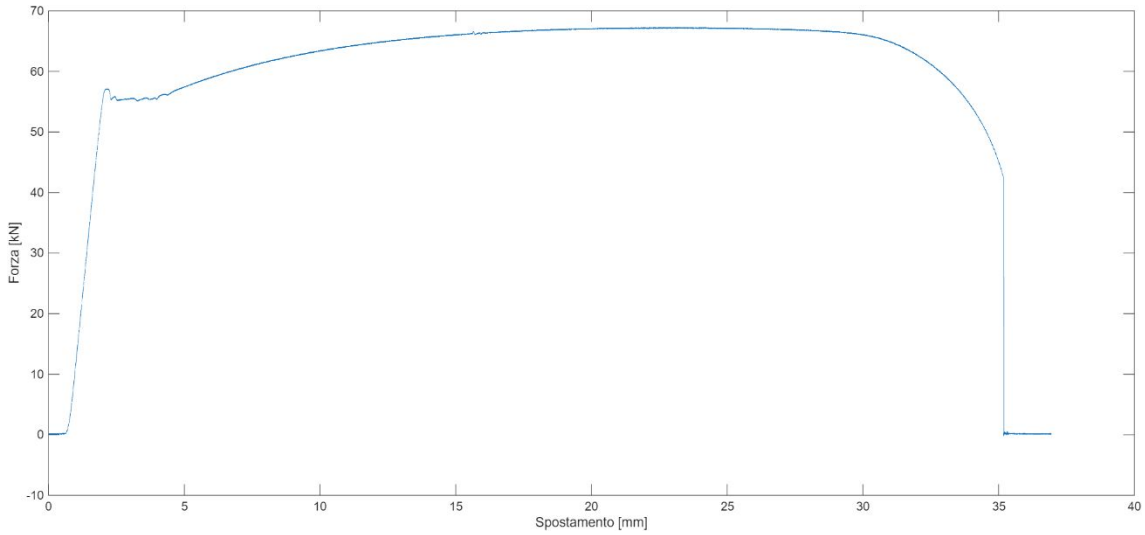


Figura 5.1 – Curva tensione-deformazione macchina, provino A588_T1

Il secondo dataset è costituito dai risultati dell'elaborazione ottica condotta dal software MatchID [3, 13]; questo file contiene le matrici delle seguenti grandezze:

- coordinate spaziali X, Y, Z
- coordinate in pixel X_{PIC}, Y_{PIC}
- tensori di deformazione EXX, EXY, EYY
- deformazione equivalente di von Mises EVM

5.2 Sincronizzazione temporale

Questa parte di codice va a confrontare il vettore temporale reale, sapendo che le telecamere scattano a una frequenza di 5 Hz, e il vettore temporale della macchina, importato dal file Image.csv.

Viene poi sovrascritto al tempo reale quello della macchina, tenendo conto di un Δt iniziale determinato manualmente [3, 4], ovvero la differenza temporale tra l'inizio della prova e l'inizio dell'acquisizione delle immagini. Subito dopo il vettore temporale viene tagliato fino al frame di rottura, in modo tale da avere i due vettori perfettamente allineati.

Tali vettori vengono utilizzati più avanti nel codice per calcolare le tensioni.

5.3 Estensimetro virtuale

In questa sezione di codice viene preso il primo fotogramma (campione non deformato) e creati due riferimenti, a destra e sinistra (± 70 mm) rispetto alla mezzeria del provino; viene poi calcolata la lunghezza iniziale del tratto utile L_0 pari a 140 mm come la distanza euclidea spaziale tra i due riferimenti.

A ogni fotogramma successivo, le coordinate spaziali variano a causa della deformazione, il codice ricalcola la distanza tra i due riferimenti iniziali, così da poter calcolare la deformazione ingegneristica [1, 4].

Nella Figura 5.2 confrontiamo il provino non deformato e quello deformato, con i riferimenti citati prima; tramite una funzione specifica vediamo, mediante una scala di colori, il punto di rottura.

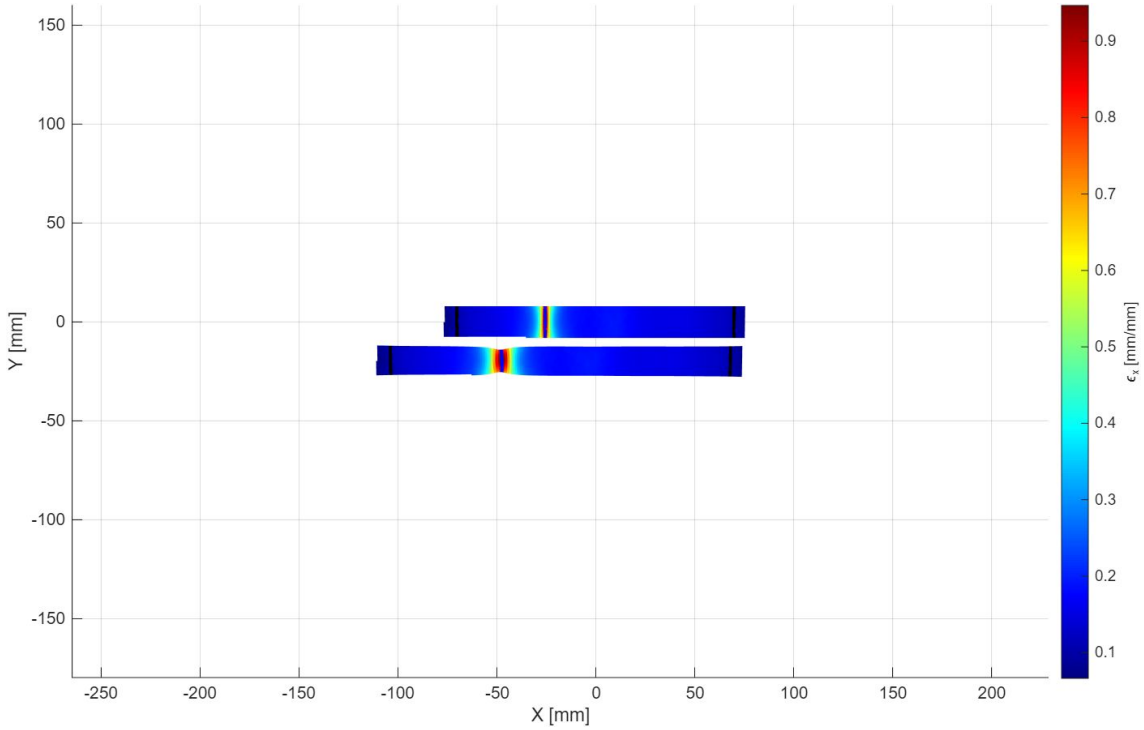


Figura 5.2 – Confronto tra deformazione iniziale e finale del provino A588_T1

5.4 Identificazione della sezione critica e deformazione locale

Il vantaggio della DIC risiede nella possibilità di svincolarsi dall'ipotesi di deformazione omogenea, permettendo di studiare la strizione locale [2, 3, 4]; ciò viene fatto studiando la colonna di pixel dell'ultimo fotogramma prima della rottura in cui si concentra il danno, calcolando dove la deformazione di von Mises (EVM) raggiunge il massimo. Successivamente il codice estrae la deformazione longitudinale vera locale, calcolata come valore medio dei punti appartenenti a tale colonna [2].

5.5 Calcolo delle deformazioni ingegneristiche e vere

In questa sezione il codice calcola, come vediamo in Figura 5.3:

- deformazione vera fornita da MatchID “media” [2, 3]
- deformazione vera ottenuta analiticamente “vera” [1, 4]
- deformazione ingegneristica ottenuta analiticamente “ing” [1, 4]
- deformazione longitudinale della sezione di rottura “max sezione”
- deformazione massima del singolo punto “max2 punto”
- deformazione di von Mises del punto di rottura “eqv”

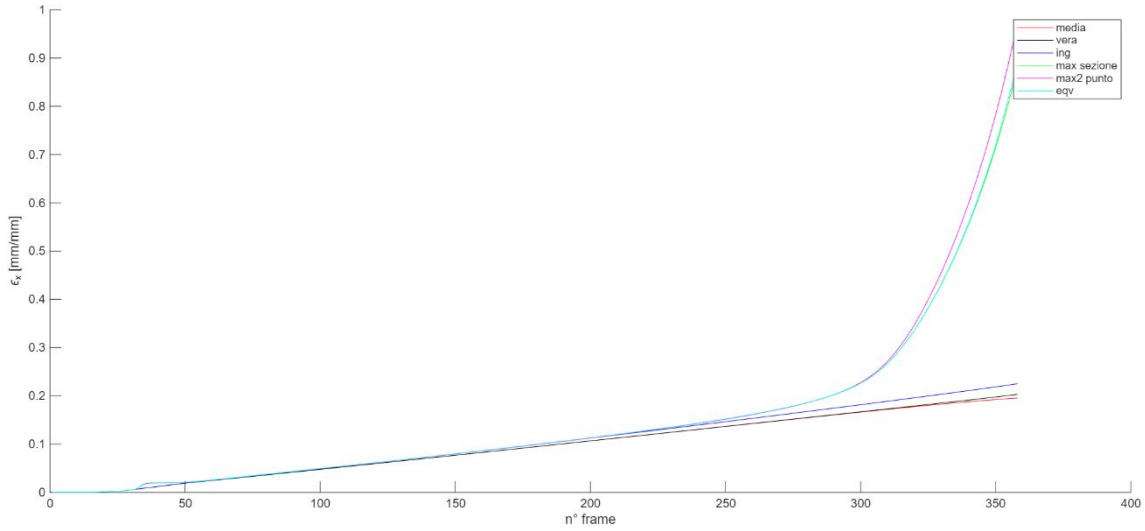


Figura 5.3 – Confronto deformazioni del provino A588_T1

Si nota che all’inizio della prova tutte le curve salgono circa con la stessa pendenza. Quando si innesca la strizione, le curve globali (media, vera, ing) continuano a salire lentamente, mentre le curve locali si impennano verso l’alto; ciò accade perché il provino smette di allungarsi in modo omogeneo [2, 4].

5.6 Calcolo delle tensioni ingegneristiche e vere

Questo blocco inizialmente trasforma la tensione ingegneristica in tensione vera, basandosi sulla costanza del volume [1, 3, 4], applica l'esponenziale alla deformazione vera estratta in precedenza dalla DIC e la moltiplica per la tensione ingegneristica [1, 2] (vedi le formule (2.6) e (2.8)).

Con lo stesso procedimento si va ad estrarre la tensione vera e la tensione vera locale nel punto di strizione, andando a visualizzare i diversi andamenti nella Figura 5.4 [2, 4].

Si nota come la curva ingegneristica (blu) raggiunge la tensione massima e poi scende; in realtà il materiale continua a incrudire, ma la forza della macchina viene divisa per l'area iniziale A_0, ignorando così la strizione [1, 3, 4].

La curva vera globale (rossa) corregge parzialmente l'errore dell'area ma fa una media su tutto il tratto utile del provino [2, 4].

La curva vera locale (verde) è il traguardo ottenuto dall'utilizzo della DIC, calcolata nel punto esatto di strizione; a differenza di quella blu, questa continua a salire, mostrando l'incrudimento del materiale [2, 4].

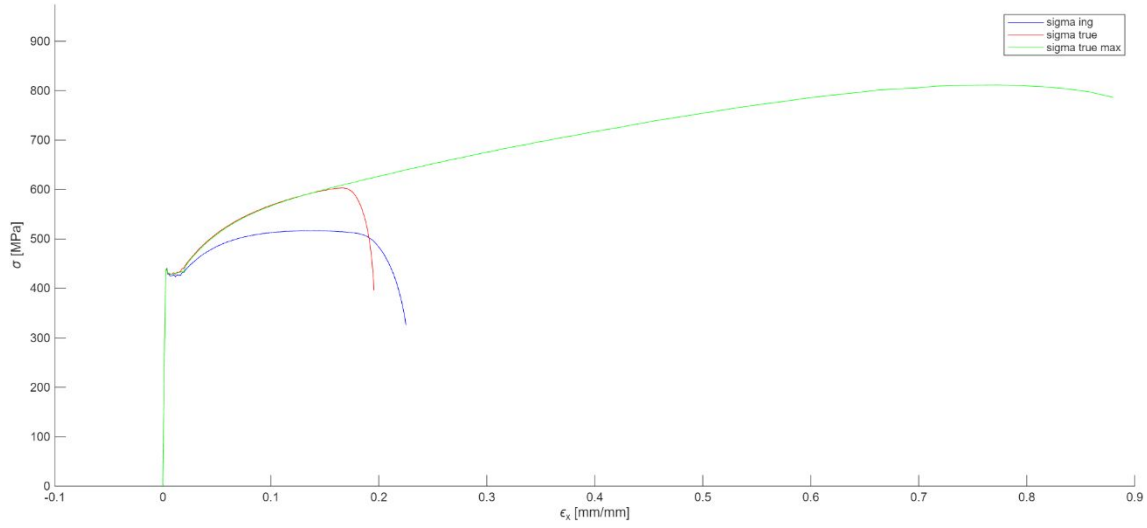


Figura 5.4 – Confronto curve tensione-deformazione del provino A588_T1

5.6.1 Estrazione automatica del modulo elastico (E) e dello snervamento

Il modulo elastico E se venisse calcolato fin dal primo istante della prova, risulterebbe non corretto a causa dei movimenti di assestamento della macchina e del sistema di afferraggio [1, 2, 3, 5]; viene quindi utilizzata la funzione polyfit limitata a valori di sigma compresi tra 10 e 50 [MPa] e di deformazione minore dello 0,2%; così facendo si ottiene una retta il cui coefficiente angolare è esattamente E [1, 3, 5].

Per la tensione di snervamento il codice restituisce due valori. Il primo è la tensione di scostamento dalla proporzionalità $R_{p\,0,6}$ e si ottiene con il comando polyxpoly, che trova l'intersezione tra la curva tensione-deformazione ingegneristica e la retta di pendenza E, traslata verso destra dello 0,6% (Figura 5.5). Il secondo è il massimo valore di tensione raggiunto tra il primo fotogramma e quello immediatamente precedente l'intersezione.

I due valori hanno significato diverso a seconda del materiale. Nei materiali con snervamento marcato il massimo coincide con il picco della curva e viene assunto come tensione di snervamento superiore R_m *max*, la costruzione convenzionale non è necessaria, perché lo snervamento è identificabile direttamente dalla curva.

Nei materiali a curva graduale (301LN-ASP, 301LN1-4H) la tensione di snervamento è stata determinata come $R_{p\,0,2}$, traslando la retta di pendenza E dello 0,2% come previsto dalla normativa.

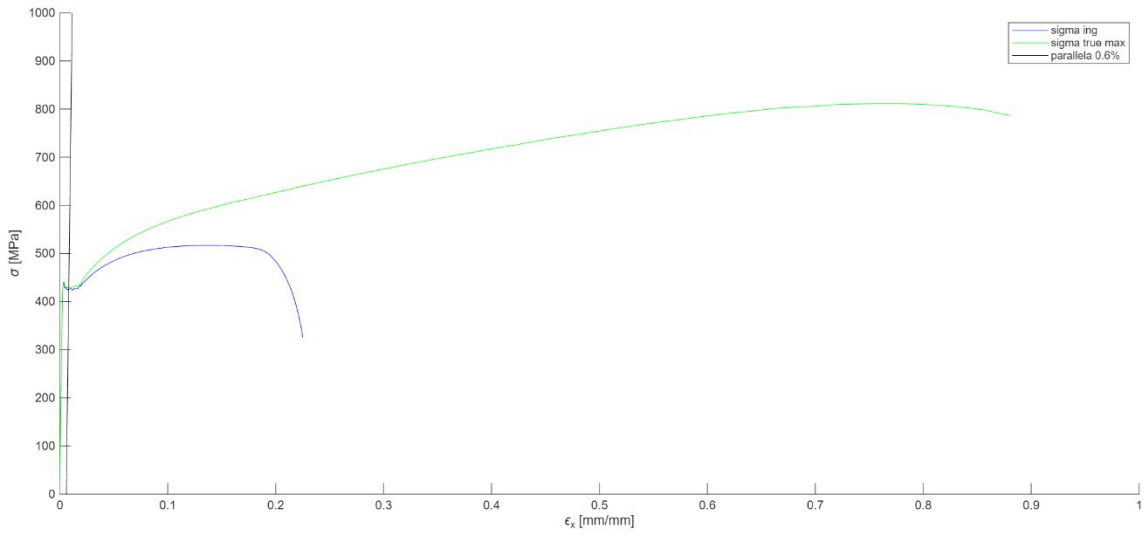


Figura 5.5 – Intersezione geometrica curve tensione-deformazione con retta parallela al tratto elastico traslata dello 0,6% del provino A588_T1

Capitolo 6

Risultati finali e conclusioni

- Si riportano in seguito i grafici e i dati relativi ai test effettuati sui provini dell'acciaio A588 (Figure 6.1 e 6.2, Tabella 6.1).

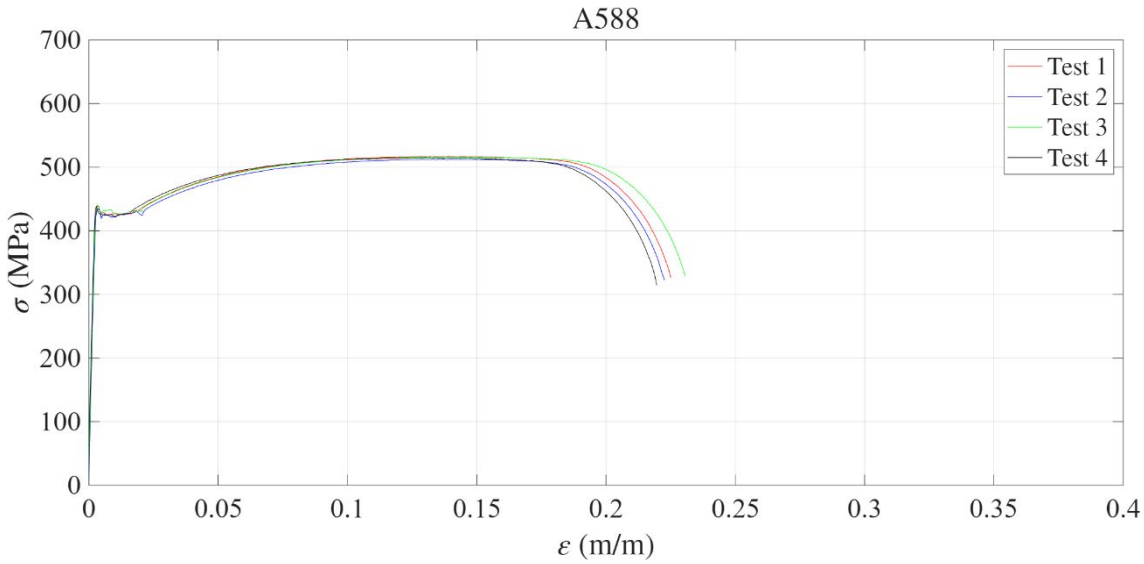


Figura 6.1 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio A588

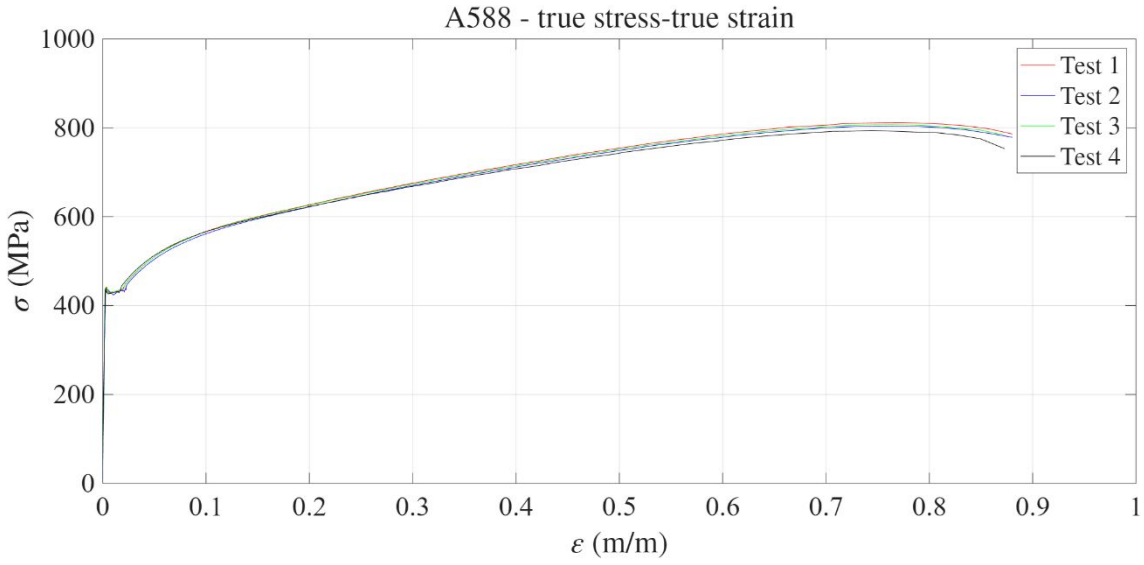


Figura 6.2 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio A588

A588				
	E	$R_m\ max$	$R_m\ min$	σ_R
test1	182991	439.11	425.84	516.98
test2	184475	435.15	422.24	512.77
test3	184085	440.30	433.24	516.20
test4	156563	438.71	425.51	514.87
media	177028	438.32	426.71	515.21

Tabella 6.1 – Risultati acciaio A588

- Si riportano in seguito i grafici e i dati relativi ai test effettuati sui provini dell'acciaio A606 (Figure 6.3 e 6.4, Tabella 6.2).

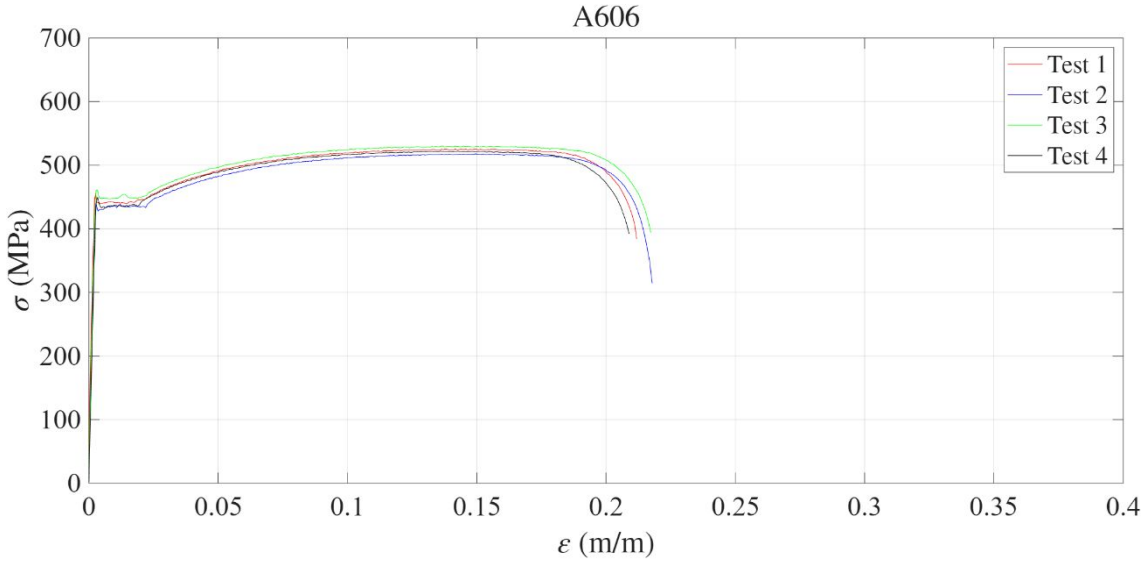


Figura 6.3 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio A606

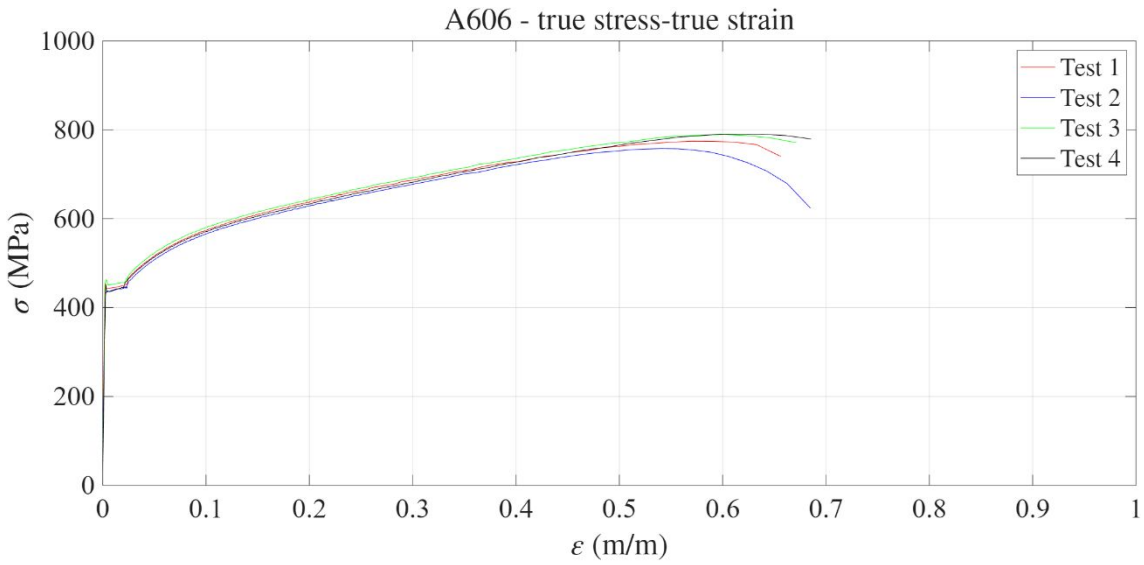


Figura 6.4 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio A606

A606				
	E	$R_m\ max$	$R_m\ min$	σ_R
test1	216872	455.35	442.39	525.54
test2	209658	439.72	433.75	517.83
test3	189665	460.93	447.00	530.15
test4	323466	449.56	434.82	522.13
media	234915	451.39	439.49	523.91

Tabella 6.2 – Risultati acciaio A606

- Si riportano in seguito i grafici e i dati relativi ai test effettuati sui provini dell'acciaio 301LN-ASP (Figure 6.5 e 6.6, Tabella 6.3).

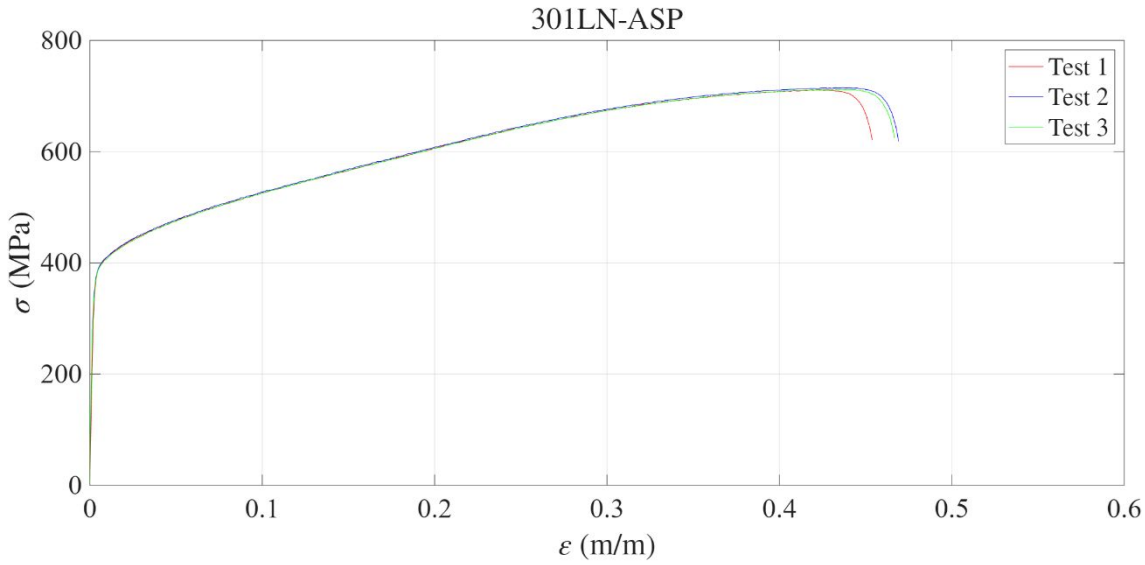


Figura 6.5 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio 301LN-ASP

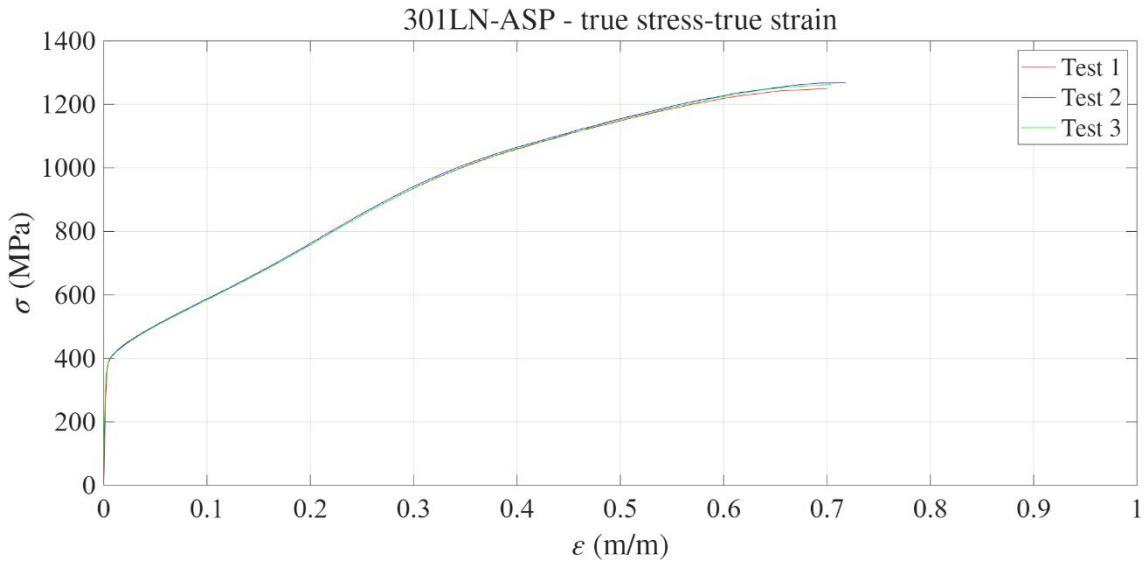


Figura 6.6 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio 301LN-ASP

301LN-ASP			
	E	$R_{p0,2}$	σ_R
test1	165650	381.59	711.33
test2	179015	381.58	714.91
test3	179534	379.67	712.68
media	174733	380.95	712.97

Tabella 6.3 – Risultati acciaio 301LN-ASP

- Si riportano in seguito i grafici e i dati relativi ai test effettuati sui provini dell'acciaio 301LN1-4H (Figure 6.7 e 6.8, Tabella 6.4).

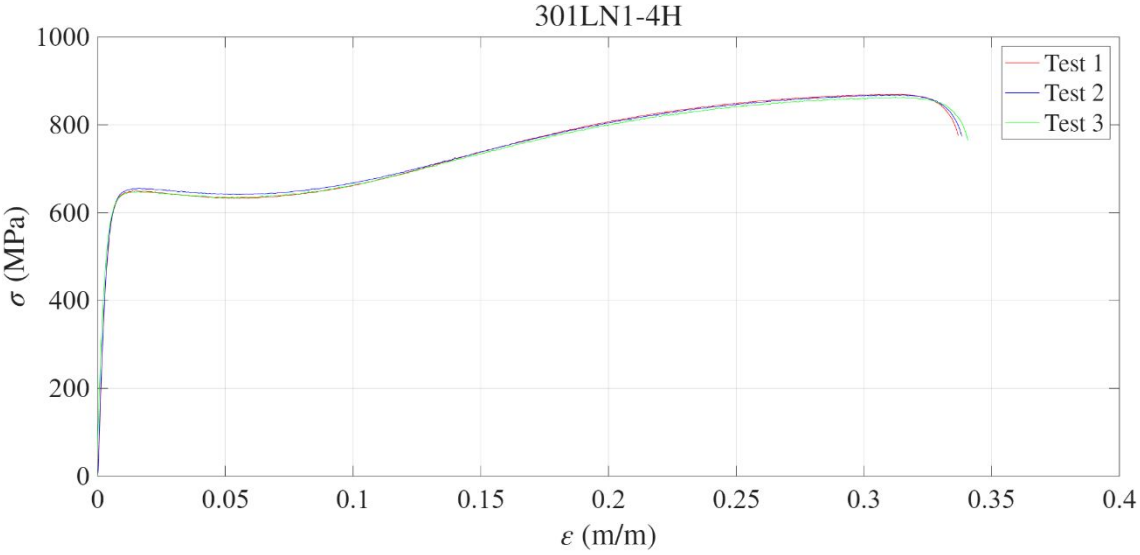


Figura 6.7 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio 301LN1-4H

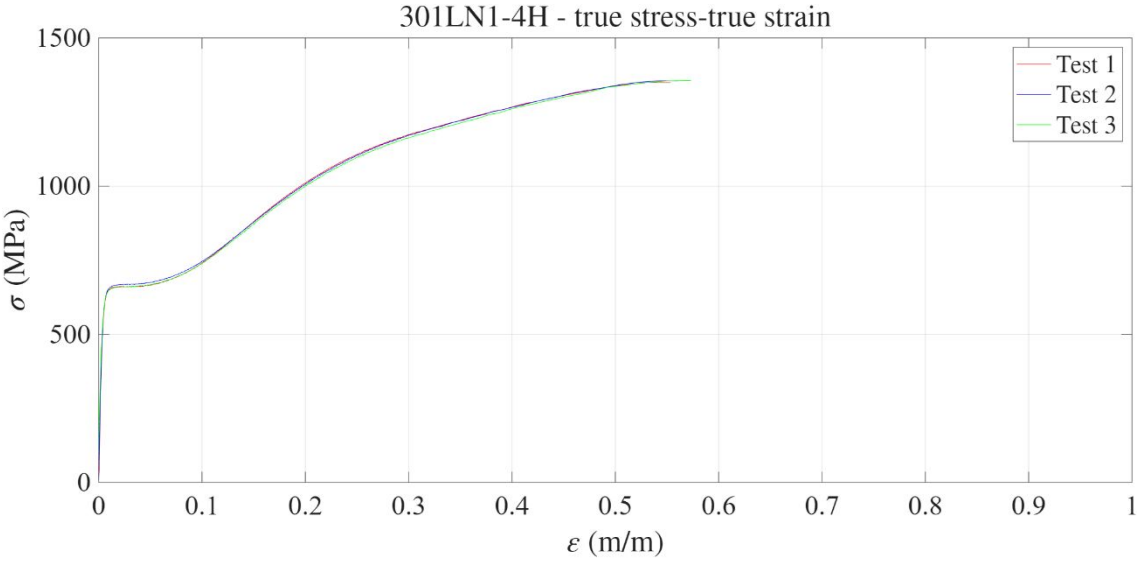


Figura 6.8 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio 301LN1-4H

301LN1-4H			
	E	$R_{p0,2}$	σ_R
test1	173699	578.13	869.56
test2	176644	579.97	867.96
test3	195608	576.47	862.75
media	181984	578.19	866.76

Tabella 6.4 – Risultati acciaio 301LN1-4H

- Si riportano in seguito i grafici e i dati relativi ai test effettuati sui provini dell'acciaio S355J2W+N (Figure 6.9 e 6.10, Tabella 6.5).

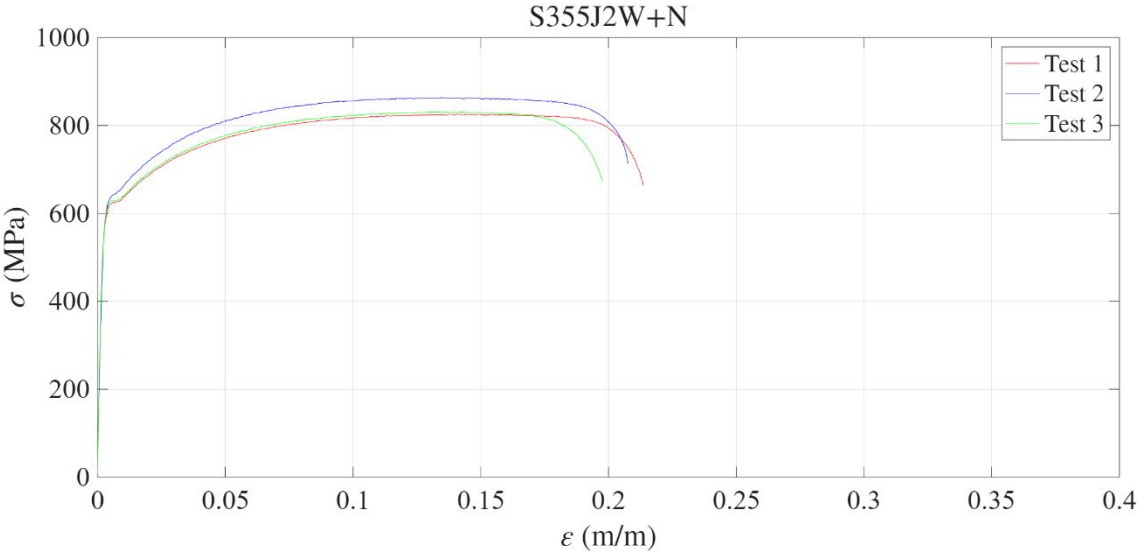


Figura 6.9 – Confronto curve tensione-deformazione ingegneristiche dell'acciaio S355J2W+N

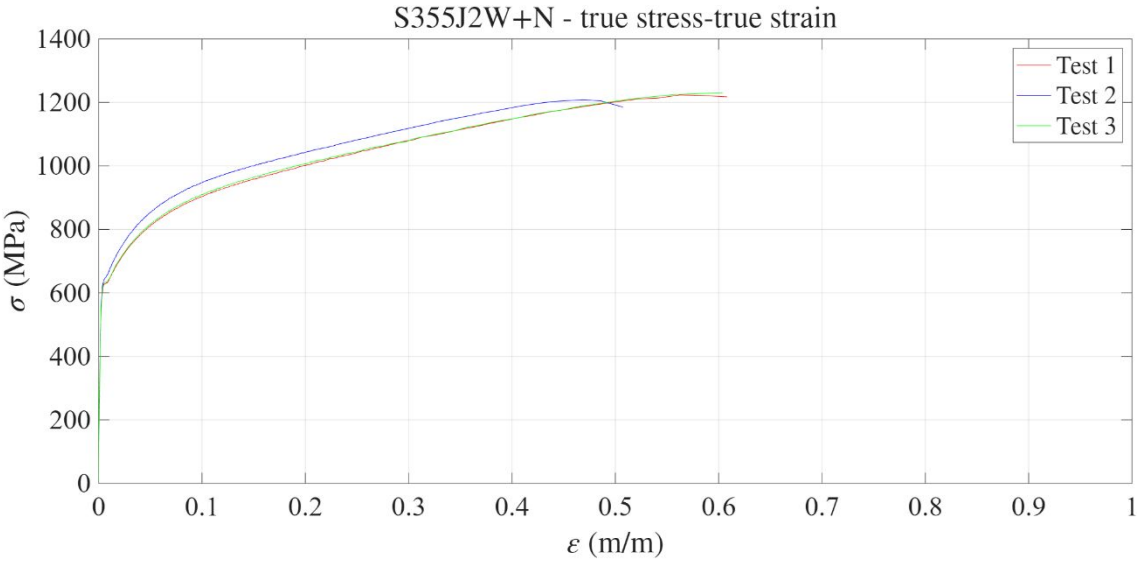


Figura 6.10 – Confronto curve tensione-deformazione vere locali dell'acciaio S355J2W+N

S355J2W+N				
	E	$R_m\ max$	$R_m\ min$	σ_R
test1	315699	626.67	626.56	825.87
test2	239530	652.16	649.88	863.61
test3	304075	630.65	629.98	831.24
media	286435	636.49	635.47	840.24

Tabella 6.5 – Risultati acciaio S355J2W+N

Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la caratterizzazione meccanica a trazione di cinque acciai (A588, A606, 301LN-ASP, 301LN1-4H e S355J2W+N) mediante Digital Image Correlation, in alternativa alla misura convenzionale con estensimetro a contatto. Il campo di spostamenti, ricavato con il software MatchID dalle immagini acquisite durante la prova, è stato elaborato con l'algoritmo descritto nel Capitolo 5 per ottenere per ciascun provino, la curva tensione-deformazione ingegneristica, mediante estensimetro virtuale e la curva tensione-deformazione vera locale, riferita alla zona di strizione. Il confronto tra i provini dello stesso acciaio evidenzia un'elevata ripetibilità: le curve ingegneristiche risultano sostanzialmente sovrapposte lungo tutto il tratto a deformazione uniforme e si differenziano soltanto nella fase di strizione, dove la dispersione dei valori di rottura è fisiologicamente maggiore. La dispersione della resistenza a trazione σ_R (differenza tra massimo e minimo rispetto al valore medio) è infatti pari a circa 0,5–0,8% per A588, 301LN-ASP e 301LN1-4H, 2,3% per A606 e 4,5% per S355J2W+N.

Dal confronto tra i materiali emergono due famiglie di comportamento. Gli acciai strutturali A588 e A606 presentano snervamento marcato, con picco superiore a circa 440–450 MPa seguito da un plateau, un successivo incrudimento e una resistenza a trazione media di 515 e 524 MPa, raggiunta per deformazioni ingegneristiche di circa 0,13–0,15; la rottura avviene per deformazioni ingegneristiche di circa 0,21–0,23. L'acciaio S355J2W+N mostra lo stesso andamento qualitativo, con livelli di tensione più elevati (σ_R medio pari a 840 MPa). Gli acciai inossidabili austenitici 301LN hanno invece un comportamento diverso. Il 301LN-ASP non presenta snervamento marcato: la tensione di snervamento convenzionale $R_{p0,2}$ riportata in tabella è di circa 381 MPa, l'incrudimento è continuo e la resistenza a trazione (713 MPa) viene raggiunta per una deformazione di circa 0,43, con una deformazione a rottura di 0,45–0,47, doppia rispetto a quella degli acciai A588 e A606. Il 301LN1-4H, ha una tensione di snervamento più alta (circa 578 MPa), un breve tratto a tensione decrescente subito dopo lo snervamento e una successiva ripresa dell'incrudimento fino a σ_R = 867 MPa, con deformazione a rottura di circa 0,34.

Le curve vere locali consentono di estendere la caratterizzazione oltre il carico massimo, dove l'estensimetro virtuale, mediando su una base di misura finita, non descrive più la deformazione concentrata nella strizione. La deformazione vera locale a rottura risulta pari a circa 0,87–0,88 per l'A588, 0,66–0,69 per l'A606, 0,70–0,72 per il

301LN-ASP, 0,57 per il 301LN1-4H e 0,51–0,61 per l’S355J2W+N, a fronte di deformazioni ingegneristiche non superiori a 0,47. Le corrispondenti tensioni vere massime sono comprese tra circa 800 MPa (A588) e 1350 MPa (301LN1-4H), pari a 1,45–1,8 volte la resistenza a trazione ingegneristica.

Nel complesso, la procedura sviluppata permette di ottenere con una sola acquisizione sia la curva ingegneristica sia la curva vera locale fino a rottura, e può essere applicata ad altri materiali metallici con la sola modifica dei parametri di prova.

Bibliografia

[1] Slide del corso “Comportamento del materiale”, materiale didattico, 2019.

[2] G. Mazzocchetti, *Utilizzo della DIC (Digital Image Correlation) per la caratterizzazione di provini IN625 ottenuti mediante processo di additive manufacturing*, Tesi di Laurea Magistrale, Università Politecnica delle Marche, A.A. 2018/2019.

[3] P. Basili, *Analisi test sperimentali di provini fatti con additive manufacturing tramite analisi di immagine*, Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche, A.A. 2020/2021.

[4] P. Fontana, *Caratterizzazione meccanica di materiali metallici mediante tecniche di correlazione d’immagine*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, A.A. 2021/2022.

[5] G. Musotto, *Digital Image Correlation: applicazione di tecniche convenzionali e sviluppo di soluzioni innovative per la stima e l’incremento dell’accuratezza*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2011/2012.

[6] M.A. Sutton, J.-J. Orteu, H.W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer, New York, 2009.

[7] UNI EN ISO 6892-1:2020, *Materiali metallici – Prova di trazione – Parte 1: Metodo di prova a temperatura ambiente*.

[8] B. Pan, K. Qian, H. Xie, A. Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science and Technology*, 20 (2009) 062001.

[9] W.H. Peters, W.F. Ranson, “Digital imaging techniques in experimental stress analysis”, *Optical Engineering*, 21 (1982) 427–431.

[10] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital correlation method”, *Image and Vision Computing*, 1 (1983) 133–139.

[11] H.A. Bruck, S.R. McNeill, M.A. Sutton, W.H. Peters, “Digital image correlation using Newton–Raphson method of partial differential correction”, *Experimental Mechanics*, 29 (1989) 261–267.

[12] P.F. Luo, Y.J. Chao, M.A. Sutton, W.H. Peters, “Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision”, *Experimental Mechanics*, 33 (1993) 123–132.

[13] MatchID nv, *MatchID – software per la Digital Image Correlation*, Gent (Belgio), https://www.matchid.eu.

[14] M.A. Sutton, J.H. Yan, V. Tiwari, H.W. Schreier, J.-J. Orteu, “The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements”, *Optics and Lasers in Engineering*, 46 (2008) 746–757.

[15] International Digital Image Correlation Society, E.M.C. Jones, M.A. Iadicola (eds.), *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*, 2018, doi:10.32720/idics/gpg.ed1/print.format.

[16] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, Z. Wang, “Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns”, *Optics Express*, 16 (2008) 7037–7048.

[17] D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, A.M. Habraken, “Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, 44 (2006) 1132–1145.

[18] B. Pan, Z. Lu, H. Xie, “Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, 48 (2010) 469–477.

[19] W. Tong, “An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications”, *Strain*, 41 (2005) 167–175.

[20] H.W. Schreier, J.R. Braasch, M.A. Sutton, “Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation”, *Optical Engineering*, 39 (2000) 2915–2921.

[21] B. Pan, “Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering”, *Optics and Lasers in Engineering*, 51 (2013) 1161–1167.
[22] B. Pan, K. Li, W. Tong, “Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations”, *Experimental Mechanics*, 53 (2013) 1277–1289.
[23] B. Pan, A. Asundi, H. Xie, J. Gao, “Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements”, *Optics and Lasers in Engineering*, 47 (2009) 865–874.
[24] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22 (2000) 1330–1334.
[25] Correlated Solutions Inc., “Lens selection and stereo angle”, Knowledge Base, https://correlated.kayako.com/article/78-lens-selection-and-stereo-angle.
[26] Teledyne FLIR, *Blackfly S USB3 – BFS-U3-88S6M-C*, scheda tecnica.
[27] Fujifilm, *FUJINON CF-ZA-1S series – CF50ZA-1S*, scheda tecnica.
[28] Z.L. Zhang, M. Hauge, J. Ødegård, C. Thaulow, “Determining material true stress–strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section”, *International Journal of Solids and Structures*, 36 (1999) 3497–3516.
[29] P.W. Bridgman, *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, McGraw-Hill, New York, 1952.