

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica

## **Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

Tesi di laurea magistrale

### **Caratterizzazione meccanica di materiali metallici mediante tecniche di correlazione d'immagine**



**Relatore**

Prof. Paolo Matteis

**Candidato**

Pietro Fontana

Anno Accademico 2021 - 2022



## **Sommario**

L'oggetto di questo elaborato di tesi è la Correlazione digitale d'immagini (Digital Image Correlation, DIC), una tecnica ottica di misura non invasiva e senza contatto che consente di ricavare deformazioni e spostamenti. L'obiettivo che ci si pone nella prima parte della tesi è utilizzare tale tecnica per ricavare le curve sforzo-deformazione di provini sottoposti a prova di trazione, non solo fino al massimo della curva reale ottenuta con metodo ordinario, ma anche per la successiva zona di necking diffuso. In queste prove si sono analizzati i risultati su vari materiali: l'acciaio FeP05, l'acciaio DP800, l'ottone CuZn33 e l'alluminio 7075. Nella seconda parte, invece, sono state effettuate delle prove di tenacità a frattura su tre punti con lo scopo di calcolare il CTOD con una tecnica economica e relativamente semplice da utilizzare, quale è la DIC. In questo caso, si sono effettuate delle prove su campioni in acciaio 39NiCrMo3. Nel corso della tesi vengono anche descritte ulteriori tecniche innovative per il calcolo della curva sforzo-deformazione post necking con tecnica DIC 3D, misura del CTOD per difetti ellittici e calcolo dell'integrale J.

# Indice

1. INTRODUZIONE .....	11
2. TECNICA DI CORRELAZIONE IMMAGINI DIGITALI 2D .....	14
2.1 METODI OTTICI DI MISURA .....	14
2.2 LA CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI 2D.....	15
2.2.1 PREPARAZIONE E STRUMENTAZIONE .....	16
2.2.2 PREPARAZIONE DEL PROVINO .....	19
2.2.3 ANALISI DEI DATI.....	21
2.2.3.1 Le funzioni di forma.....	24
2.2.3.2 Criteri di correlazione.....	25
3. LA PROVA DI TRAZIONE .....	29
3.1 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE.....	30
3.2 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE REALE.....	33
3.3 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE POST-NECKING: METODO DI PAUL ET AL. CON CORRELAZIONE D'IMMAGINE DIGITALE .....	35
3.3.1 INTRODUZIONE E TECNICHE UTILIZZATE.....	35
3.3.2 METODO DI PAUL ET AL. ....	37
3.4 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE POST-NECKING: METODO DI CHEN E PAN CON CORRELAZIONE D'IMMAGINE DIGITALE .....	45
4. LA PROVA DI TENACITA' A FRATTURA .....	51
4.1 MISURA DEL CTOD: DIC-2D .....	51
4.2 MISURA DEL CTOD IN DIFETTI ELLITTICI: DIC-3D .....	54
4.3 CALCOLO DELL'INTEGRALE J .....	56
4.4 CALCOLO DELL'INTEGRALE J: DIC-2D .....	58
5. DESCRIZIONE APPARATO SPERIMENTALE .....	60
5.1 LA MACCHINA DI TRAZIONE.....	60
5.2 LA FOTOCAMERA.....	63
5.3 ILLUMINAZIONE .....	65

6. LA PROVA DI TRAZIONE: APPLICAZIONE SPERIMENTALE.....	67
6.1 MATERIALI.....	67
6.1.1 ACCIAIO <b>FeP05</b> .....	67
6.1.2 OTTONE <b>CuZn33</b> .....	68
6.1.3 ACCIAIO <b>DP800</b> .....	69
6.1.4 ALLUMINIO <b>7075</b> .....	69
6.2 DESCRIZIONE SPERIMENTALE.....	70
6.3 ELABORAZIONE DATI E CURVE SFORZO-DEFORMAZIONE .....	73
6.3.1 ACCIAIO <b>FeP05</b> .....	80
6.3.1.1 Prova 1 .....	80
6.3.1.2 Prova 2 .....	82
6.3.1.3 Prova 3 .....	83
6.3.2 ACCIAIO <b>DP800</b> .....	85
6.3.2.1 Prova 1 .....	85
6.3.2.2 Prova 2 .....	86
6.3.3 ALLUMINIO <b>7075</b> .....	87
6.3.3.1 Prova 1 .....	87
6.3.3.2 Prova 2 .....	88
6.3.4 OTTONE <b>CuZn33</b> .....	88
6.3.4.1 Prova 1 .....	89
6.3.4.2 Prova 2 .....	89
7. LA PROVA DI TENACITA' A FRATTURA: APPLICAZIONE SPERIMENTALE.....	91
7.1 MATERIALE.....	93
7.1.1 ANALISI CHIMICA.....	93
7.1.2 METALLOGRAFIA.....	94
7.2 PRECRICCATURA.....	97
7.3 ANALISI STEREOSCOPICA.....	98
7.4 CURVE FORZA-SPOSTAMENTO.....	99
7.5 NORMA ASTM E1820 .....	102
7.6 VERIFICA METODO DIC .....	104

7.7 CALCOLO DEL CTOD .....	105
7.8 FRATTOGRAFIA .....	109
8. CONCLUSIONI .....	111
Bibliografia.....	112

## Indice delle figure

Figura 1 Setup sperimentale del sistema DIC per prova di trazione .....	16
Figura 2 Telecamera con sorgente luminosa circolare .....	17
Figura 3 Fissaggio della telecamera alla macchina di trazione .....	18
Figura 4 Pattern stocastico su un provino per prova di trazione .....	20
Figura 5 a) Griglia virtuale rappresentante il ROI in giallo, in rosso i subset b) Vettori spostamento calcolati sull'immagine deformata [4] .....	22
Figura 6 Deformazione di un subset tra un'immagine di riferimento ed una successiva [5] .....	22
Figura 7 Provino per prova di trazione a sezione circolare .....	29
Figura 8 Provino per prova di trazione a sezione rettangolare .....	29
Figura 9 Curva sforzo-deformazione ingegneristica ottenuta da prova di trazione uniassiale [9].....	31
Figura 10 Deformazione locale della componente parallela alla direzione del carico per diversi livelli di deformazione complessiva in una prova di trazione per acciaio ferritico [10] .....	38
Figura 11 Deformazione locale della componente perpendicolare alla direzione del carico per diversi livelli di deformazione complessiva in una prova di trazione per acciaio ferritico [10] .....	39
Figura 12 Valori di $\epsilon_{yy}$ (a) e di $\epsilon_{xx}$ (b) per diversi valori di deformazione complessiva lungo la direzione longitudinale del provino [10] .....	40
Figura 13 Evoluzione della componente di deformazione locale $\epsilon_{yy}$ al variare del valore di deformazione complessiva del provino [10] .....	41
Figura 14 Deformazioni medie locali $\epsilon_{yy}$ e $\epsilon_{xx}$ al variare dei livelli di deformazione complessiva; (a) acciaio bifase (b) acciaio ferritico [10] .....	41
Figura 15 (a) Deformazione superficiale 3D (b) Geometria della sezione cilindrica [14] .....	46
Figura 16 Schema del setup sperimentale [14].....	48
Figura 17 Schema per individuare raggio $r$ e raggio di curvatura $R$ .....	49
Figura 18 Definizioni alternative di CTOD (a) Apertura parte anteriore della cricca (b) intersezione a $90^\circ$ [15].....	51
Figura 19 Spostamento verticale misurato con DIC [16].....	52
Figura 20 Ingrandimento sulla coppia di punti scelti per il calcolo del CTOD [16].....	53

Figura 21 Andamento del CTOD in funzione della distanza $L_y$ per diversi valori di $L_x$ . [16] .....	54
Figura 22 Schema con i parametri per il calcolo del CTOD .....	55
Figura 23 Spostamento tridimensionale ottenuto con la DIC-3D [17].....	56
Figura 24 Percorso scelto arbitrariamente intorno alla punta della cricca [15].....	57
Figura 25 Macchina di trazione usata nelle prove sperimentali .....	60
Figura 26 Schema di una macchina di trazione [19] .....	62
Figura 27 Telecamera DMK 33UX249 usata per la tecnica DIC .....	63
Figura 28 Definizione della regione di interesse (ROI) .....	74
Figura 29 Definizione della scala del provino.....	75
Figura 30 Deformazione lungo l'asse di carico $y$ del provino 1 .....	76
Figura 31 Deformazioni su asse $x$ perpendicolari all'asse di carico del provino 1.....	77
Figura 32 Coppia di punti per acquisire i valori di deformazione longitudinale sull'asse $y$ .....	77
Figura 33 Estensimetro virtuale utilizzato per la seconda prova di trazione.....	78
Figura 34 Curva reale metodo ordinario, provino 1, FeP05 .....	80
Figura 35 Curva reale metodo Paul et al., provino 1, Punto 1.....	81
Figura 36 Curva reale metodo Paul et al., provino 1, Punto 2.....	81
Figura 37 Sovrapposizione delle tre curve sforzo-deformazione, provino 1 .....	82
Figura 38 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 2.....	83
Figura 39 Sovrapposizione delle tre curve sforzo-deformazione, provino 3 .....	83
Figura 40 Sovrapposizione delle tre curve reali ordinarie per le tre prove di trazione ..	84
Figura 41 Sovrapposizione delle tre curve ottenute con il metodo Paul et al. ....	85
Figura 42 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 1 .....	86
Figura 43 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 2.....	86
Figura 44 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 1 .....	87
Figura 45 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino2.....	88
Figura 46 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino1 .....	89
Figura 47 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino2.....	90
Figura 48 Macchina per eseguire le prove di tenacità a frattura .....	92
Figura 49 Posizionamento estensimetro meccanico con placchette metalliche .....	92
Figura 50 (a) Troncatrice metallografica a sinistra (b) Macchinario per inglobare i campioni a destra .....	95

Figura 51 Immagini acquisite con microscopio ottico del provino 37, a sinistra ingrandimento 20, a destra ingrandimento 100 .....	96
Figura 52 Immagini acquisite con microscopio ottico del provino 44, a sinistra ingrandimento 20, a destra ingrandimento 100 .....	96
Figura 53 Schema di misurazione della cricca su un provino sottoposto a prova di tenacità a frattura .....	98
Figura 54 Curva sforzo deformazione provino 44 da prova di tenacità a frattura.....	100
Figura 55 Curva sforzo deformazione provino 37 da prova di tenacità a frattura.....	101
Figura 56 Curva sforzo deformazione provino 52 da prova di tenacità a frattura.....	101
Figura 57 Estensimetro virtuale.....	104
Figura 58 Provino 37 (a) Estensimetro virtuale 0,2mm (b) Estensimetro virtuale 0,3mm .....	105
Figura 59 Provino 37 (a) Estensimetro virtuale 0,2mm (b) Estensimetro virtuale 0,3mm .....	107
Figura 60 Immagini al microscopio elettronico, zona della precricca .....	109
Figura 61 Immagini al microscopio elettronico, zona rottura duttile .....	110

## **Indice delle tabelle**

Tabella 1 Precricatura provino 52.....	97
Tabella 2 Precricatura provino 37.....	97
Tabella 3 Precricatura provino 44.....	98
Tabella 4 Confronto CTOD norma ASTM E1820 con CTOD da estensimetri virtuali .....	106
Tabella 5 Confronto CTOD norma ASTM E1820 con CTOD da estensimetri virtuali .....	108

# 1. INTRODUZIONE

La Correlazione digitale d'immagini (Digital Image Correlation, DIC) è una tecnica ottica di misura non invasiva e senza contatto che consente di ricavare deformazioni e spostamenti. Questo metodo basa il proprio funzionamento sull'analisi e l'elaborazione di immagini successive acquisite durante la prova meccanica.

Il software, che viene utilizzato per studiare la sequenza di immagini digitali, GOM Correlate, stima le coordinate e gli spostamenti di tutti i punti sulla superficie di un pezzo in prova risolvendo un problema di ottimizzazione basato su un modello di trasporto.

La tecnica DIC si basa, infatti, sul confronto di due immagini successive di un componente prima e dopo essere stato deformato. Le deformazioni e gli spostamenti sono così calcolati considerando e correlando la variazione di posizione di blocchi di pixel tra l'immagine di riferimento precedente e l'immagine deformata successiva. Il processo di correlazione di immagini è basato sul contrasto tra le diverse tonalità di grigio presenti sul campione.

Affinché il software riesca a riconoscere in modo univoco ogni singolo blocco di pixel, è necessario che sulla superficie del provino venga applicato un pattern casuale con vernici di colore contrastante (come nero, grigio e bianco). Questo metodo di misura, essendo una tecnica senza contatto, è utilizzata anche per prove eseguite in ambienti aggressivi e corrosivi: in questi casi, ovvero quando non è possibile applicare la vernice, la superficie del provino viene preparata tramite abrasione, sabbiatura, con metodi chimici o elettrolitici.

In ambito meccanico questa tecnica è stata studiata e applicata a partire dagli anni '80 da ricercatori dell'Università della Carolina del Sud, nei decenni successivi è stata migliorata e ottimizzata. Negli ultimi anni è molto utilizzata sia in ambito ingegneristico che in ambito scientifico poiché consente di ottenere misurazioni accurate utilizzando strumenti non particolarmente complessi e con costi relativamente bassi.

Inoltre, trattandosi di una tecnica senza contatto, ha il grande vantaggio di essere indipendente dal tipo di materiale solido che si sta testando, pertanto, può essere

utilizzata in un'ampia varietà di applicazioni per studiare e analizzare la deformazione e gli spostamenti del materiale durante le prove a cui è sottoposto. Alcuni dei materiali che vengono più comunemente studiati con questa tecnica sono metalli e polimeri, ma anche campioni geologici, elettrodi di batterie e tessuti biologici.

Esistono varie tecniche di Correlazione d'immagine digitale e si distinguono in base alla zona del provino che viene analizzata, oltre che alla tipologia di strumentazione che viene utilizzata: la DIC-2D, la DIC-3D e la DIC-3D volumetrica.

La tecnica che viene studiata e utilizzata in questo elaborato di tesi è la DIC-2D (che verrà chiamata semplicemente DIC nel proseguire della tesi). Con questo metodo di misura è possibile ricavare informazioni inerenti le deformazioni e gli spostamenti dei punti presenti sulla superficie del provino solamente sul piano superficiale. Le prove, inoltre, vengono effettuate utilizzando una sola telecamera.

Nella DIC-3D (anche chiamata stereo-DIC), a differenza di quella 2D, vengono utilizzate almeno due telecamere e ciò consente di misurare le deformazioni e gli spostamenti anche al di fuori del piano superficiale del provino.

Infine, la DIC-3D volumetrica è una tecnica particolare che consente di ricavare gli spostamenti anche all'interno dell'oggetto studiato mediante l'utilizzo di sistemi tomografici a raggi x. Questo metodo consente inoltre di analizzare, ad esempio, problematiche di accoppiamento di due materiali differenti (come la saldatura di due filamenti o l'incollaggio di due superfici) e studiare la deformazione plastica dei corpi a causa dell'accoppiamento meccanico.

I metodi 3D rispetto a quelli 2D consentono di ottenere maggiori informazioni del corpo che si sta studiando, ma necessitano di maggiore strumentazione e, quindi, di maggiori costi, ingombri e complessità nella configurazione del sistema di acquisizione.

In questo elaborato di tesi si presenta inizialmente la tecnica DIC sia in termini di attrezzatura necessaria per la sua applicazione che da un punto di vista matematico. Successivamente si descrive la prova di trazione e l'utilizzo che si fa della correlazione digitale d'immagine in essa. Infatti, tale tecnica viene utilizzata per ricavare le curve sforzo-deformazione di provini sottoposti a prova di trazione, non solo fino al massimo della curva reale ordinaria, ma anche per la successiva zona di necking diffuso. In queste prove si sono analizzati i risultati su vari materiali: l'acciaio FeP05, l'acciaio

DP800, l'ottone CuZn33 e l'alluminio 7075. Si presenta poi un metodo innovativo per ottenere la stessa tipologia di curve, ma con la tecnica della DIC 3D.

Successivamente, si è cercato di calcolare il CTOD su provini sottoposti a prove di tenacità a frattura su tre punti usando la tecnica della correlazione digitale d'immagine. Su questi provini si sono effettuate anche ulteriori analisi come l'analisi stereoscopica e la frattografia. Inoltre, vengono descritte ulteriori tecniche innovative per la misura del CTOD per difetti ellittici e calcolo dell'integrale J.

## **2. TECNICA DI CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI 2D**

La misura della deformazione superficiale di materiali e strutture sottoposte a carichi (ad esempio carichi meccanici o termici) è uno degli obiettivi che si pone la meccanica dei solidi sperimentale.

### **2.1 METODI OTTICI DI MISURA**

Per affiancare e sostituire gli estensimetri meccanici, sono stati sviluppati vari metodi ottici di misura senza contatto a pieno campo come le tecniche interferometriche, il metodo a griglia e la correlazione d'immagine digitale.

Le tecniche interferometriche, sfruttando le interferenze tra più onde coerenti tra loro, permettono di eseguire misurazioni di lunghezze d'onda, distanze e spostamenti dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda utilizzata. Tra le tecniche interferometriche vi sono ad esempio l'interferometria olografica e l'interferometria elettronica a speckle pattern.

L'interferometria olografica si basa sull'interferenza e la diffrazione di due campi luminosi, di cui il primo è associato al componente indeformato, mentre il secondo al corpo a cui è stato applicato il carico. Si tratta di una tecnica di misura molto precisa, può essere eseguita solamente in laboratorio e deve essere tenuta sotto stretto controllo [1]. Questa tecnica misura la variazione di cammino ottico tra la condizione iniziale indeformata e la successiva condizione deformata ed è sensibile agli spostamenti fuori dal piano. Per quanto riguarda il setup sperimentale: si utilizza una sorgente laser il cui fascio viene suddiviso in modo tale che una parte di esso si ritrovi immutata su una lastra, mentre l'altra venga modificata dalla riflessione del corpo deformato.

Un altro esempio di tecnica interferometrica è l'interferometria elettronica a speckle pattern (ESPI) che consente di visualizzare gli spostamenti statici e dinamici di un componente. Il componente che viene analizzato deve avere una superficie otticamente

ruvida per fare in modo che, se illuminato da un raggio laser, consenta la formazione di un pattern di puntini. Infatti, un corpo ruvido illuminato con luce coerente, presenta una superficie con aspetto granuloso come effetto della diffusione della luce su di esso. Questa granulosità, anche denominata speckle, è dovuta ai fenomeni di interferenza della luce che si presentano quando viene illuminata una superficie rugosa. Se il corpo viene deformato, ad esempio durante una prova meccanica, l'aspetto granuloso risulta modificato. Studiando, quindi, due immagini successive, si riescono ad ottenere frange di interferenza associate al campo di spostamento del corpo stesso.

Oltre alle tecniche interferometriche esistono anche tecniche non interferometriche per misurare otticamente la deformazione superficiale di un oggetto. Tra queste vi sono ad esempio il metodo a griglia e la correlazione d'immagine digitale.

Il metodo a griglia consiste nel contrassegnare una superficie del campione con una griglia e, dopo aver scattato immagini durante il test, è necessario rielaborare le immagini per recuperare i campi di spostamento e deformazione. A differenza di quanto viene fatto per la DIC, la superficie del provino viene preparata con una marcatura regolare [2]. Attualmente il metodo a griglia viene solamente menzionato in documenti più recenti e sembra stia cadendo progressivamente in disuso. Il motivo principale è l'emergere e la diffusione della correlazione d'immagine digitale in ambito della meccanica sperimentale, favorita dalla diffusione di fotocamere digitali a prezzi accessibili e da potenti risorse computazionali.

## **2.2 LA CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI 2D**

La correlazione digitale d'immagine (DIC) è una tecnica ottica di misura senza contatto non interferometrica che si basa sull'elaborazione numerica di immagini digitali per ricavare spostamenti e deformazioni della superficie dell'oggetto su cui è applicata. In questo elaborato viene analizzata e applicata la DIC-2D che permette, tramite l'uso di una sola fotocamera, di studiare le deformazioni e gli spostamenti nel piano superficiale di un oggetto.

Il metodo DIC si compone principalmente di tre fasi. Inizialmente si ha la preparazione dei campioni che vengono sottoposti a sperimentazione meccanica. In una seconda fase, si ha la registrazione delle immagini del provino, che deve iniziare prima della

dell'inizio della prova meccanica e terminare dopo il termine della stessa. Nell'ultima parte del metodo si ha la rielaborazione delle immagini digitali che viene ottenuta tramite l'utilizzo di un apposito programma. Nello specifico in questa tesi, per rielaborare le immagini digitali e, quindi, per ricavare spostamenti e deformazioni, si utilizza il software GOM Correlate.

## 2.2.1 PREPARAZIONE E STRUMENTAZIONE

In questo lavoro di tesi sono state effettuate sia prove meccaniche di trazione che prove meccaniche di tenacità a frattura su tre punti. In questo paragrafo della tesi si descrive il setup sperimentale utilizzato per la prova di trazione in quanto quello utilizzato per la prova di tenacità a frattura è il medesimo di quello della prova di trazione con la sola differenza che, oltre al macchinario di prova, è stato utilizzato anche un estensimetro meccanico posizionato sul provino.

Si presentano ora i vari componenti del setup sperimentale utilizzato evidenziando le modalità di preparazione degli stessi come mostrato in Fig.1.

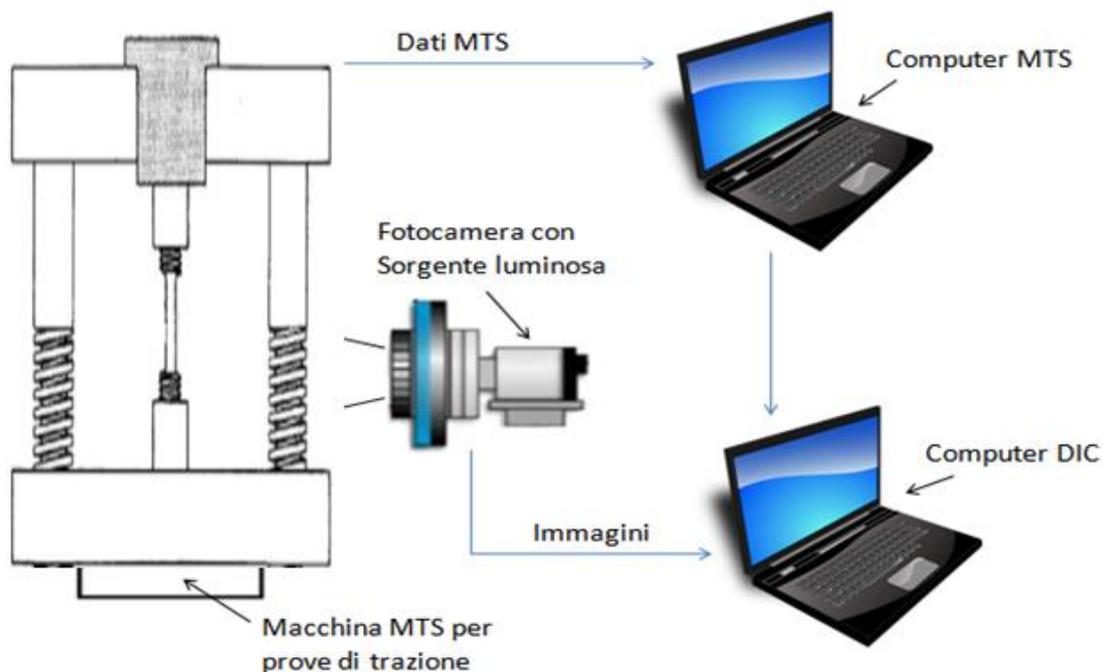


Figura 1 Setup sperimentale del sistema DIC per prova di trazione

Per poter effettuare la prova meccanica di trazione con l'acquisizione di immagini DIC sono stati utilizzati due computer. Il programma presente sul computer MTS consente di

comandare la macchina di trazione e di acquisire i dati di spostamento e forza della macchina di trazione durante la prova. Per lo svolgimento dell'elaborato di tesi sono state effettuate anche delle prove di tenacità a frattura su tre punti inserendo un estensimetro meccanico sul provino; pertanto, durante queste prove, il computer in questione viene anche utilizzato per ricevere i dati provenienti dall'estensimetro.

L'altro computer, denominato computer DIC, è collegato alla telecamera e consente, invece, di visualizzare e acquisire le immagini digitali durante le prove di trazione e tenacità a frattura su tre punti.

Durante le prove sperimentali, per poter acquisire le immagini, viene utilizzata una telecamera posizionata perpendicolare alla superficie del provino. Nello specifico si utilizza una telecamera DMK 33UX249. La superficie del provino sottoposto alla prova deve essere illuminata uniformemente per poter avere un buon contrasto di colori sull'immagine. A tale scopo, come mostrato in Fig.2, è stata utilizzata una sorgente luminosa circolare, montata intorno all'obiettivo della telecamera con apposite viti, che permette di avere una illuminazione il più possibile uniforme.



*Figura 2 Telecamera con sorgente luminosa circolare*

La telecamera è collegata ad un supporto meccanico tramite l'utilizzo di una vite che consente di poter movimentare correttamente la telecamera in posizione perpendicolare alla superficie del provino. Il supporto, a sua volta, è collegato tramite dei bulloni ad un braccio di alluminio che è fissato direttamente su una delle due colonne laterali della macchina di trazione come è possibile osservare in Fig.3.



*Figura 3 Fissaggio della telecamera alla macchina di trazione*

Il provino, prima di essere posizionato sulla macchina di trazione, deve essere correttamente preparato in quanto, per poter utilizzare la DIC, deve presentare una superficie con un pattern stocastico; questa fase viene ripresa e descritta in un paragrafo successivo. Il provino, dopo essere stato preparato, viene montato sulla macchina di trazione facendo particolare attenzione a posizionare la superficie del provino perpendicolare alla telecamera. E' necessario porre particolare attenzione in questa fase di posizionamento del provino in quanto, essendo le immagini acquisite la proiezione bidimensionale della superficie del campione, se la telecamera e la superficie del provino non fossero posizionate correttamente, si avrebbe una errata valutazione dello spostamento e delle deformazioni reali del campione [3].

Il provino viene bloccato tramite le teste di afferraggio della macchina di trazione. Queste, consentono di essere regolate intorno al proprio asse per poter orientare la superficie del provino fino alla posizione desiderata.

La macchina di trazione è composta da due teste di afferraggio che lavorano in modo differente. La testa di afferraggio superiore rimane ferma durante tutta la durata della prova in quanto viene vincolata alla struttura della macchina stessa. Al contrario, la testa di afferraggio inferiore, vincolata al pistone mobile della macchina, esegue il movimento verticale seguendo i parametri che gli sono stati imposti dall'utente tramite l'apposito programma di controllo della macchina stessa.

Dopo aver posizionato correttamente il provino, e prima di iniziare la prova meccanica, è necessario regolare alcuni parametri della telecamera. Utilizzando l'apposito programma presente sul computer DIC è possibile visualizzare in tempo reale gli effetti

delle variazioni dei singoli parametri. In particolare, si deve inizialmente identificare la regione d'interesse (ROI), in modo tale che la telecamera inquadri solamente la parte di superficie del provino che si desidera analizzare. Successivamente, si regolano manualmente la messa a fuoco, l'apertura focale e l'intensità luminosa della lampada per ottimizzare la qualità dell'immagine. E' inoltre necessario scegliere la frequenza di acquisizione dei dati della macchina di trazione e la frequenza di acquisizione delle immagini digitali.

Al termine delle prove si calcolano i valori di spostamento e deformazione che, nel caso della prova di tenacità a frattura su tre punti, sono anche confrontati con i valori provenienti dall'estensimetro meccanico posizionato sul provino al fine di valutare l'accuratezza del metodo DIC.

### **2.2.2 PREPARAZIONE DEL PROVINO**

Il calcolo degli spostamenti e delle deformazioni è strettamente legato, come verrà spiegato in seguito, alla ricerca della corrispondenza dei subset all'interno della successione delle immagini acquisite. E' pertanto fondamentale avere un pattern adeguato sulla superficie del provino. La tipologia di pattern utilizzata nella DIC è denominata "speckle pattern" che si può tradurre come pattern a puntini o a macchioline. Solitamente si presenta come puntini scuri collocati su sfondo bianco, ma si può anche utilizzare la tecnica inversa, ovvero pattern bianco su sfondo scuro, tipicamente nero.

La creazione del pattern può avvenire con diverse tecniche che dipendono anche dal tipo di ambiente in cui si deve operare. In generale si utilizzano bombolette spray, come nel caso di questo elaborato di tesi, o adesivi in vinile, pattern prestampati, spazzole e pennelli. Nel caso in cui, invece, si dovessero operare prove in ambienti aggressivi e corrosivi, ovvero quando non è possibile applicare la vernice, è necessario preparare la superficie del provino con altre tecniche come l'abrasione, la sabbiatura e con metodi chimici o elettrici. Infine, per i materiali umidi o appiccicosi, come le gomme a base di silicone, si utilizzano particelle di polvere per creare il pattern: nello specifico si possono utilizzare la polvere di grafite per le macchie scure e, per la base bianca, allumina, talco o ossido di magnesio.

Il primo passo per la preparazione del provino è la pulizia dello stesso. Questa fase è importante per poter garantire una corretta adesione della vernice alla superficie del provino ed è stata eseguita utilizzando un panno e dell'acetone. Successivamente è stato applicato lo strato di vernice bianca sulla zona del provino che è interessata dall'analisi DIC. Questa operazione è stata svolta sotto cappa chimica. Vi si è poi lasciato il provino per circa quindici minuti per far sì che la vernice aderisca correttamente al materiale sottostante.

L'ultima fase per la preparazione del provino consiste nell'utilizzare una bomboletta spray di vernice nera per la creazione del pattern sul substrato di vernice bianca come mostrato in Fig.4. Dopo aver applicato la vernice nera per la creazione del pattern è necessario verificare che non si siano create grosse gocce di vernice in quanto, in quelle zone, il software non riesce a riconoscere il subset e, quindi, ad applicare la correlazione di immagini. Nel caso in cui dovesse accadere, è necessario pulire nuovamente il provino con l'acetone e ripetere i passi precedentemente descritti.



*Figura 4 Pattern stocastico su un provino per prova di trazione*

La tecnica DIC richiede, inoltre, che il pattern applicato sul provino sia il più possibile casuale, ovvero con zone diverse le une dalle altre; sarebbe pertanto opportuno avere una verniciatura composta per il 50% da bianco e per il 50% da nero.

Un ulteriore aspetto da considerare è la grandezza dei puntini neri che formano il pattern: infatti, le loro dimensioni devono essere comprese tra i tre e i cinque pixels di diametro. In questo modo si riesce ad ottenere un pattern che non risulti né troppo chiaro né troppo scuro.

### 2.2.3 ANALISI DEI DATI

La prima fase della tecnica DIC riguarda l'acquisizione delle immagini digitali durante la prova di trazione. Come già riportato in precedenza è fondamentale, in questa fase, che la fotocamera sia esattamente perpendicolare alla superficie del provino e che la distanza tra i due rimanga costante durante tutta la prova. Eventuali movimenti relativi tra fotocamera e provino o un non corretto posizionamento reciproco porterebbero ad un errato calcolo delle deformazioni e degli spostamenti della superficie del provino.

Durante la prova vengono così acquisite una serie di immagini, con una frequenza scelta precedentemente, prima e dopo la deformazione del provino. La prima immagine raccolta, ovvero quella a deformazione nulla, viene detta immagine di riferimento, mentre le immagini acquisite successivamente vengono dette immagini deformate. Per poter ottenere l'immagine di riferimento è dunque necessario, durante l'attività sperimentale, fare iniziare in un primo momento l'acquisizione delle immagini digitali e, solo successivamente, la prova meccanica di trazione.

La seconda fase del metodo DIC riguarda invece la rielaborazione delle immagini precedentemente acquisite per ricavare deformazioni e spostamenti. L'analisi effettuata con tecnica DIC confronta sottoinsiemi del fotogramma di riferimento con sottoinsiemi delle immagini successive per calcolare il campo degli spostamenti.

L'analisi delle immagini inizia con la definizione della ROI, la regione di interesse, ovvero la zona dell'immagine di cui si vogliono ricavare le informazioni relative a spostamento e deformazione. Questa area di calcolo viene poi suddivisa, tramite una griglia virtuale, in tante sottoregioni come mostrato in Fig.5a. Nei punti di intersezione dei contorni delle singole sottoregioni si definisce poi il subset: gli spostamenti e le deformazioni che vengono calcolati con la tecnica DIC sono quelli relativi al centro del subset stesso (Fig.5b).

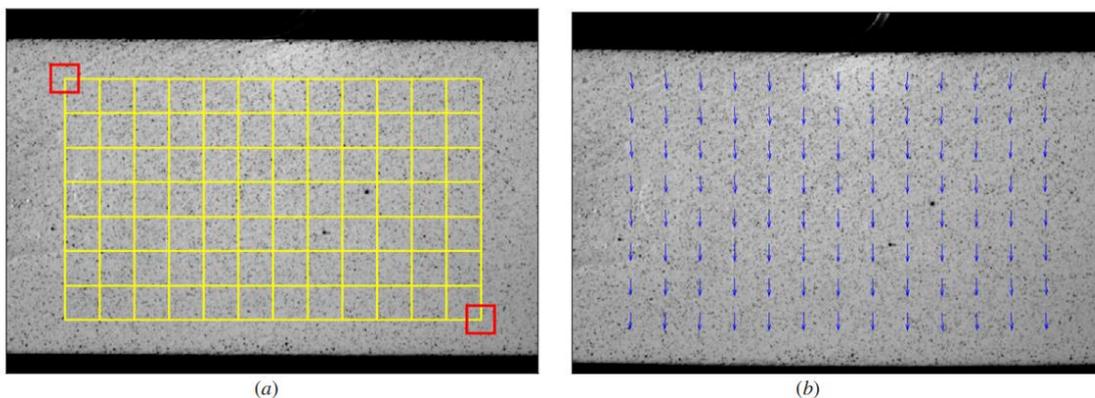


Figura 5 a) Griglia virtuale rappresentante il ROI in giallo, in rosso i subset b) Vettori spostamento calcolati sull'immagine deformata [4]

Il concetto base della DIC consiste nel ricavare deformazioni e spostamenti correlando la posizione di alcuni pixels tra una immagine di riferimento e l'immagine deformata. Se si utilizzasse come riferimento solamente il livello di grigio di un singolo pixel non sarebbe possibile garantire la sua unicità, poiché è probabile che vi siano altri punti sulla superficie del provino che possiedono lo stesso livello di colore. Inoltre, durante la deformazione del provino, è possibile che si abbiano delle variazioni sul livello di grigio del singolo pixel.

Pertanto, la tecnica DIC, non considera un solo pixel alla volta, ma suddivide l'immagine di riferimento in gruppi di pixels definiti "subset". Dopo aver trovato la corrispondenza di uno stesso subset in immagini successive, si calcola lo spostamento e la deformazione del centro dell'area stessa come mostrato in Fig.6.

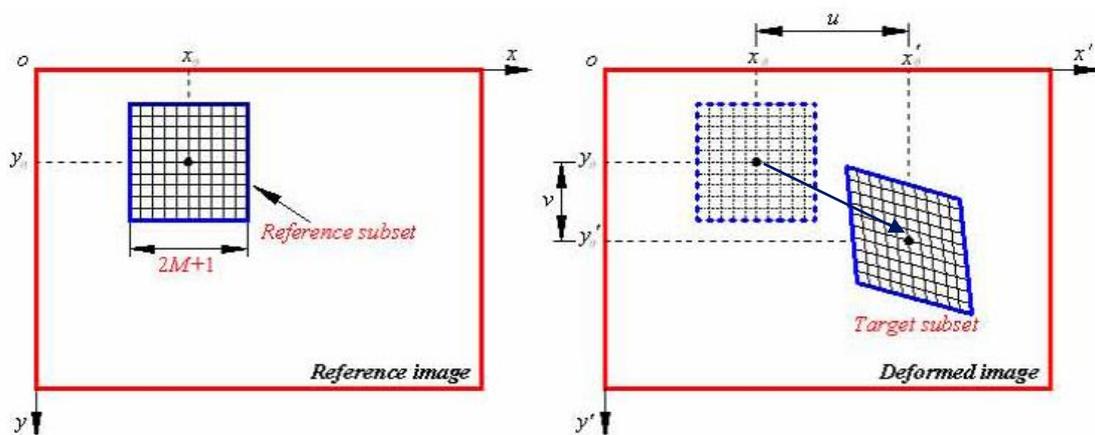


Figura 6 Deformazione di un subset tra un'immagine di riferimento ed una successiva [5]

Il subset è costituito da un numero definito di pixels  $(2M+1)*(2M+1)$  che è scelto manualmente o dal programma di calcolo utilizzato ed è centrato in un punto di coordinate  $(x_0, y_0)$ .

La dimensione del sottoinsieme è fondamentale per l'accuratezza della misurazione degli spostamenti. Infatti non dovrebbe essere né troppo grandi né troppo piccoli. Esso infatti deve avere una dimensione abbastanza grande tale da poter garantire la propria unicità. Dimensioni maggiori del subset consentono anche di diminuire l'influenza sulla misura di errori casuali dovuti ad esempio da rumori esterni. E' però necessario tenere in considerazione che maggiore è la dimensione dell'area considerata, maggiore è l'approssimazione che si ha sul calcolo delle varie grandezze. Possibili valori per la dimensione laterale dei subset possono variare ad esempio tra i 21 pixels e i 29 pixels.

Dopo aver definito la dimensione dei sottoinsiemi, è necessario utilizzare un criterio di correlazione per poter trovare la corrispondenza tra un subset nell'immagine di riferimento e, lo stesso, nell'immagine successiva. Si possono utilizzare vari criteri di correlazione: il criterio di Cross Correlation (CC) ricerca il massimo di una funzione di correlazione, il criterio di Sum Squared Difference (SSD) minimizza l'errore di una funzione di correlazione, il criterio di Sum of Absolute Difference (SAD) minimizza il valore assoluto della differenza delle due funzioni, mentre il criterio Parametric Sum of Squared Difference (PSSD) minimizza l'errore di una funzione di correlazione che, in aggiunta all'SSD, considera anche due ulteriori parametri [6]. Dopo aver così identificato la nuova posizione del subset, se ne trova la posizione del centro che, confrontata con la posizione dello stesso nell'immagine di riferimento, consente di conoscere il vettore spostamento.

E' necessario tenere in considerazione che durante la prova il materiale si deforma e, con esso, anche la sua superficie del provino. Pertanto, considerando un subset nell'immagine di riferimento, esso risulta deformato nelle immagini successive. Si deve quindi deformare virtualmente il subset di riferimento per poter avere la migliore corrispondenza possibile dello stesso, con il medesimo nelle immagini successive: questo procedimento di deformazione del subset avviene mediante le "funzioni di forma".

### 2.2.3.1 Le funzioni di forma

Le funzioni di forma, come detto, vengono introdotte poiché rendono possibili le operazioni di corrispondenza dei singoli sottointervalli nelle immagini successive, deformando i subset di riferimento. La correlazione tra il subset di riferimento e quello deformato può essere definita dalle seguenti funzioni di spostamento:

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

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

Le funzioni di forma  $\xi(x_i, y_i)$  e  $\eta(x_i, y_i)$  determinano quindi il cambiamento di coordinate dei pixels da quelle nell'immagine di riferimento  $(x_i, y_i)$  a quelle nell'immagine deformatata  $(x'_i, y'_i)$ .

Queste funzioni possono avere un diverso ordine in base all'utilizzo che se ne deve fare. Se si utilizzassero, ad esempio, funzioni di forma di ordine zero, si potrebbe ottenere solamente uno spostamento rigido dei subset di riferimento; questo potrebbe rappresentare il caso della traslazione di un corpo rigido, in cui la distanza tra i vari pixels all'interno di un determinato subset rimane invariata nel tempo.

Utilizzando, invece, funzioni del primo ordine è possibile considerare sia la traslazione che la rotazione del subset:

$$\xi(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y$$

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

Nelle due funzioni di forma i termini  $u$  e  $v$  sono gli spostamenti rispettivamente sull'asse  $x$  e sull'asse  $y$  del centro del subset;  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $v_x$  e  $v_y$  sono i gradienti dello spostamento del primo ordine, mentre  $\Delta x$  e  $\Delta y$  sono rispettivamente  $\Delta x = x_i - x_0$  e  $\Delta y = y_i - y_0$ .

Si possono utilizzare funzioni di forma di ordine anche molto elevato che consentono di avere un elevato grado di precisione nella correlazione tra i subset, ma comporta anche un notevole incremento di parametri e dunque un costo computazionale molto maggiore.

Per quanto riguarda il software GOM Correlate utilizzato per la rielaborazione delle immagini in questa tesi, non è possibile conoscere l'ordine delle funzioni di forma utilizzate per la deformazione del subset.

### 2.2.3.2 Criteri di correlazione

Come affermato in precedenza, per correlare il sottoinsieme di riferimento con la sua controparte deformata si utilizzano i criteri di correlazione. Esistono in generale vari criteri di correlazione, ma i più utilizzati sono [6]:

- Cross Correlation (CC);
- Sum of Absolute Difference (SAD);
- Sum of Squared Difference (SSD);
- Parametric Sum of Squared Difference (PSSD).

I quattro criteri sopra citati si differenziano tra loro per il metodo con cui effettuano la correlazione delle immagini. All'interno del singolo criterio vi sono diverse possibilità di applicazione dello stesso in base se si voglia correggere una eventuale variazione della scala luminosa oppure un offset dell'intensità luminosa del subset.

I tre criteri più semplici e veloci da utilizzare sono quelli che non riescono a tenere in considerazione né la variazione di scala luminosa né la l'offset di intensità luminosa; essi sono [6]:

$$C_{CC} = \sum f_i g_i$$

$$C_{SAD} = \sum |f_i - g_i|$$

$$C_{SSD} = \sum (f_i - g_i)^2$$

In queste equazioni i parametri  $f$  e  $g$  sono i livelli di grigio dei singoli pixel nell'immagine di riferimento ( $f$ ) e nell'immagine deformata ( $g$ ).

I quattro criteri definiti all'inizio di questo paragrafo hanno anche delle formulazioni che consentono di effettuare la correlazione delle immagini senza che vi sia alcuna influenza nei calcoli dovuta alla variazione di offset di intensità luminosa [6]:

$$C_{ZCC} = \sum (\bar{f}_i \bar{g}_i)$$

$$C_{ZSAD} = \sum |\bar{f}_i - \bar{g}_i|$$

$$C_{ZSSD} = \sum [\bar{f}_i - \bar{g}_i]^2$$

$$C_{PSSDb} = \sum (f_i + b - g_i)^2$$

Nelle formule sopra riportate i parametri  $\bar{f}_i$  e  $\bar{g}_i$  sono così definiti:

$$\bar{f}_i = f_i - \bar{f} \quad \text{dove} \quad \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$$

$$\bar{g}_i = g_i - \bar{g} \quad \text{dove} \quad \bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$$

In cui il parametro  $n$  è il numero di pixels presenti in un subset. I quattro criteri definiti all'inizio di questo paragrafo presentano anche delle formulazioni che consentono di effettuare la correlazione delle immagini senza che vi sia alcuna influenza nei calcoli dovuta alla variazione di scala luminosa [6]:

$$C_{NCC} = \frac{\sum f_i g_i}{\sqrt{\sum f_i^2 \sum g_i^2}}$$

$$C_{NSAD} = \sum \left| \frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right|$$

$$C_{NSSD} = \sum \left( \frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$$

$$C_{PSSDa} = \sum (af_i - g_i)^2$$

I quattro criteri definiti all'inizio di questo paragrafo presentano, infine, anche delle formulazioni più complete e complesse che consentono di effettuare la correlazione delle immagini senza che vi sia alcuna influenza nei calcoli dovuta alla variazione di

scala luminosa e alcuna influenza nei calcoli dovuta alla variazione di offset di intensità luminosa [6]:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}}$$

$$C_{ZNSAD} = \sum \left| \frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right|$$

$$C_{ZNSSD} = \sum \left( \frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2$$

$$C_{PSSDa} = \sum (af_i + b - g_i)^2$$

I due parametri  $a$  e  $b$  presenti nel criterio di correlazione PSSD non sono noti, ma è possibile ricavarli con apposite formule che in [6] vengono ricavate da un confronto tra il criterio PSSD<sub>ab</sub> e il criterio ZNCC:

$$a = \frac{\sum \bar{g}_i \bar{f}_i}{\sum \bar{f}_i^2}$$

$$b = \bar{g} - \frac{\sum \bar{g}_i \bar{f}_i}{\sum \bar{f}_i^2} \bar{f}$$

Nella pratica i software che effettuano la correlazione tra le immagini digitali, come GOM Correlate, utilizzano i criteri di correlazione più complessi per poter accettare variazioni nell'intensità dell'immagine deformata senza che si verifichino significativi errori nella misurazione dello spostamento. Sulla base di quanto detto criteri come il ZNCC, il ZNSSD e il PSSD<sub>ab</sub> a due parametri, sono quelli maggiormente raccomandati per essere utilizzati in quanto consentono di avere una insensibilità sia alle variazioni di scala luminosa, che alle variazioni di offset di intensità luminosa.

In questo elaborato di tesi non si riportano i passaggi matematici, ma in [6], si dimostra come i criteri ZNCC e ZNSSD sono equivalenti. Viene dimostrato, inoltre, nello stesso articolo, che il criterio PSSD<sub>ab</sub> non ha una relazione lineare con il criterio ZNCC.

L'insieme degli spostamenti viene quindi determinato ricercando per quale loro valore si abbia il massimo del coefficiente di correlazione  $C$ , nel caso di criteri come quelli CC, oppure per quale valore degli spostamenti si abbia una minimizzazione dello stesso coefficiente, come nel caso dei criteri SAD, SSD e PSSD. Oltre che per il calcolo degli spostamenti, la tecnica DIC, viene anche utilizzata per il calcolo delle deformazioni. Come noto, per ricavare la deformazione dagli spostamenti è sufficiente applicare l'operazione del differenziale. Così facendo, però, si accrescono gli errori già presenti nel calcolo degli spostamenti: si deve pertanto fare un'operazione di "smoothing", che viene effettuata prima del calcolo differenziale. Alcune possibili soluzioni per effettuare tale operazione sono la tecnica dei minimi quadrati puntuali (PLS) [7] e la tecnica dei minimi quadrati mobili (MLS) [8].

### 3. LA PROVA DI TRAZIONE

La prova di trazione uniassiale per materiali metallici viene eseguita per ottenere informazioni sulle proprietà meccaniche del materiale come il modulo di Young ( $E$ ), la resistenza allo snervamento a trazione, l'allungamento uniforme e la curva sforzo deformazione.

I provini utilizzati in tale prova vengono solitamente ricavati da sezioni strutturali nella direzione di laminazione, nella direzione trasversale o nella direzione normale. Per quanto riguarda le lamiere più spesse è diffuso l'utilizzo di provini a barra tonda liscia (Fig.7), mentre per le lamiere più sottili spesso si impiegano provini piatti a sezione rettangolare come mostra la Fig.8.

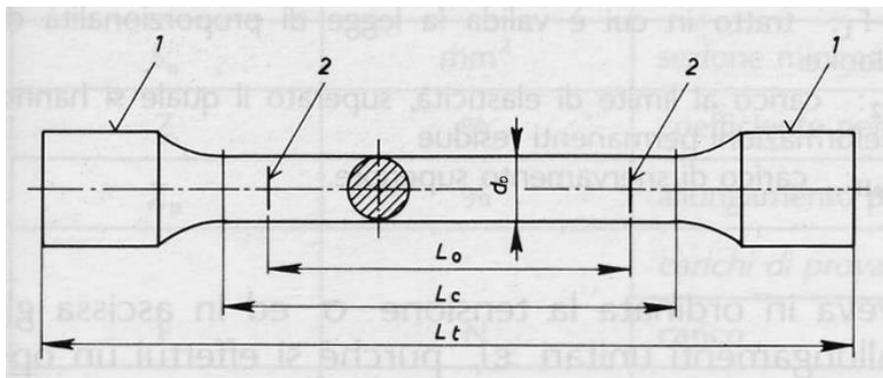


Figura 7 Provino per prova di trazione a sezione circolare

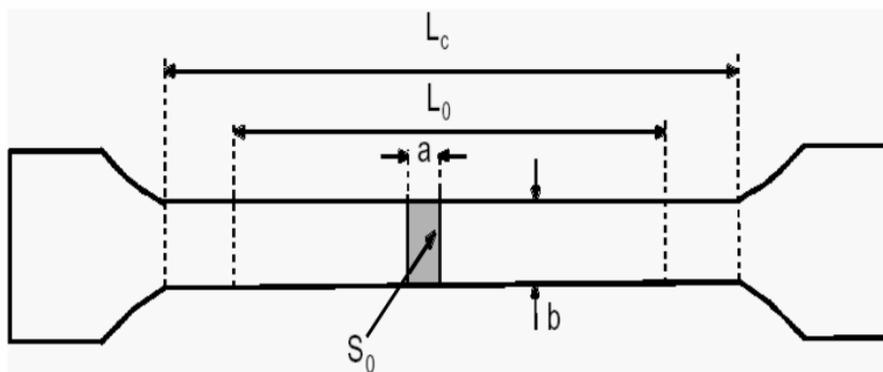


Figura 8 Provino per prova di trazione a sezione rettangolare

Per entrambe le tipologie di provino, prima di incominciare la prova di trazione è necessario misurare alcuni parametri geometrici iniziali: la lunghezza della zona definita come "parte centrale calibrata"  $L_c$ , la lunghezza iniziale  $L_0$  tra due riferimenti, più corta

della  $L_c$ , e la lunghezza totale del provino. Per quanto riguarda, inoltre, il provino a sezione circolare è bene misurare anche il diametro  $D_o$  della parte calibrata per poter ricavare la sezione iniziale  $S_o$ . Nel caso, invece, di provini a sezione rettangolare, per poter ricavare la sezione iniziale è necessario misurare il valore dello spessore  $a$  del provino e la l'altezza  $b$  dello stesso.

Le norme Uni prescrivono che utilizzando provini proporzionali la lunghezza di  $L_o$  venga scelta in base se si tratta di “provette corte” o “provette lunghe” in base alla seguente relazione:

$$L_o = K\sqrt{S_o} = K\sqrt{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Nel caso di provini proporzionali, se l'equazione viene soddisfatta con  $K = 5,65$  si parla di “provette corte” e il valore di  $L_o$  si definisce come  $L_o = 5D_o$ . Se, invece, la relazione sovrastante si risolve con  $K = 11,3$  si può parlare di “provette lunghe” e il calcolo di  $L_o$  si definisce come  $L_o = 10D_o$ .

La prova di trazione uniassiale viene eseguita su una macchina di prova universale che solitamente viene comandata in controllo di forza o di spostamento. Le grandezze fisiche che possono essere misurate direttamente durante la prova sono il carico assiale e lo spostamento longitudinale del provino.

### 3.1 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE

La curva sforzo-deformazione ingegneristica, anche nota come curva sforzo-deformazione nominale, si può ricavare direttamente dai dati provenienti dalla macchina della prova di trazione. La deformazione ingegneristica si ottiene dalla deformazione uniassiale relativa alla lunghezza di riferimento iniziale  $L_o$ :

$$\varepsilon_e = \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o}$$

In tale formula  $L$  rappresenta la lunghezza in un certo istante nella direzione di trazione, mentre  $L_o$  è la lunghezza di riferimento iniziale. L'altra informazione ricavabile dalla prova di trazione è la sollecitazione ingegneristica  $S$  [ $Mpa$ ], che è ottenuta facendo il

rapporto tra il carico istantaneo  $P$  [N] e la sezione trasversale iniziale  $A_o$  [mm<sup>2</sup>] del provino sottoposto a trazione:

$$S = \frac{P}{A_o}$$

Dopo aver calcolato la deformazione ingegneristica  $\epsilon_e$  e la sollecitazione ingegneristica  $S$  è possibile tracciare la curva ingegneristica sollecitazione-deformazione. La Fig.9 ne mostra un esempio del tutto generico.

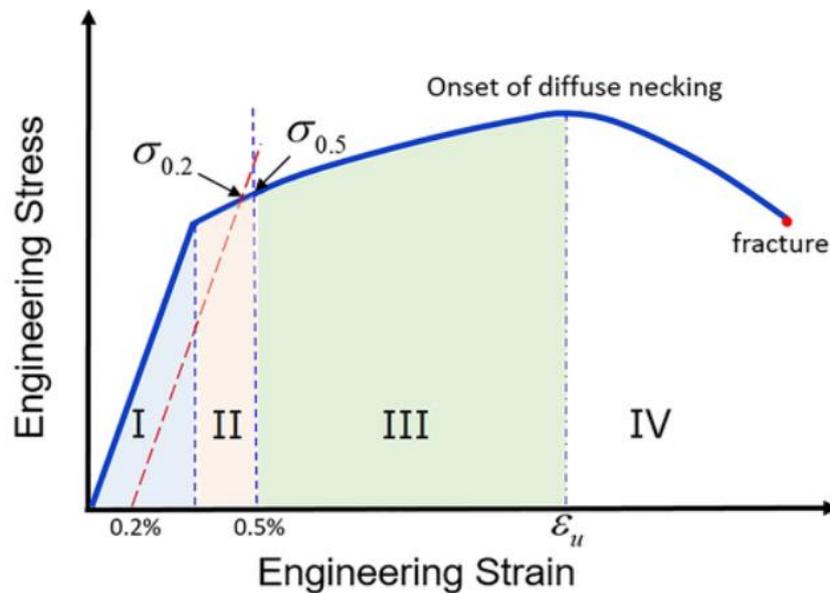


Figura 9 Curva sforzo-deformazione ingegneristica ottenuta da prova di trazione uniassiale [9]

Come è possibile osservare dalla figura sovrastante, la curva sforzo-deformazione ingegneristica può essere suddivisa in quattro regioni. Nel primo tratto della curva, infatti, esiste una relazione lineare tra la deformazione ingegneristica  $\epsilon_e$  e la sollecitazione ingegneristica  $S$ . In questa parte la deformazione è molto piccola e il campione si trova in campo elastico. La sollecitazione aumenta linearmente con l'aumento della deformazione nel regime elastico e termina quando il campione entra in campo plastico. Questo andamento lineare può essere correttamente rappresentato dalla legge di Hooke:

$$\sigma = E\epsilon$$

In cui la costante di proporzionalità  $E$  rappresenta il modulo elastico.

Il secondo tratto della curva è denominato cedimento e si ha quando il provino è appena entrato in campo plastico. E' possibile così ricavare il valore del carico di snervamento del materiale tramite il metodo di offset o il metodo extension-under-load (EUL) che è utilizzato per dei materiali a cedimento discontinuo. Come mostrato nella Fig.9, il primo metodo consiste nel tracciare una linea parallela al primo tratto, quello elastico, partendo da una deformazione percentuale dello 0,2%. L'intersezione di tale retta con la curva sforzo deformazione consente di ottenere il carico di snervamento  $\sigma_{0,2}$ . Per quanto riguarda, invece, il metodo EUL si definisce un certo valore di deformazione percentuale, come 0,5%, e si ricava direttamente salendo sulla verticale il valore del carico di snervamento  $\sigma_{0,5}$ . E' necessario comunque consultare le linee guida per quanto riguarda i materiali che presentano cedimento discontinuo.

La terza zona è quella relativa all'incrudimento o auto-incrudimento del materiale che provoca un aumento della resistenza e una crescita notevole dell'allungamento. Questa fase termina con il raggiungimento del carico massimo  $F_m$  che rappresenta la massima forza che il provino è in grado di sostenere durante la prova di trazione. E' possibile calcolare, in questo punto, il carico unitario di rottura  $R_m$  (anche detta resistenza a trazione o carico unitario massimo) con:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Oltre il punto in cui si ha il carico massimo di rottura si ha che la deformazione è localizzata in un tratto ristretto del provino: il cosiddetto "collo diffuso" o "necking diffuso". Solitamente, dopo l'inizio del necking diffuso, la deformazione continua fino alla formazione di un "collo localizzato" o "necking localizzato". Nelle fasi di necking non sono più significativi i dati provenienti dall'estensimetro in quanto non sussiste più l'ipotesi di deformazione uniforme del provino; questo aspetto verrà comunque ripreso in seguito.

Proseguendo poi la prova di trazione si giunge alla rottura del provino. Inizialmente si osserva l'insorgere di una cricca che propagando porta alla separazione delle due superfici del provino. Se la rottura non dovesse avvenire all'interno del tratto calibrato, la normativa non consente la validazione della prova.

### 3.2 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE REALE

Nella curva sforzo-deformazione ingegneristica, la deformazione ingegneristica e la sollecitazione ingegneristica sono riferite alla sezione iniziale  $A_0$  del provino. Non viene pertanto tenuta in considerazione la variazione della sezione trasversale del provino che si ha durante la prova.

Per poter ricavare la curva sforzo-deformazione reale occorre utilizzare alcune relazioni che consentano di passare dalle grandezze ingegneristiche a quelle reali. La tensione reale si calcola dal rapporto tra il carico applicato e la sezione istantanea  $A$  del provino. La deformazione istantanea, invece, si ottiene integrando la deformazione infinitesima  $d\varepsilon$  espressa come il rapporto tra l'allungamento infinitesimo  $dl$  e la lunghezza istantanea  $l$ :

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

E' così possibile ottenere l'espressione della deformazione reale  $\varepsilon$  integrando la formula precedente. Essa è pari al logaritmo naturale del rapporto tra la lunghezza istantanea  $l$  e la lunghezza iniziale del provino:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Si osserva ora che il volume del materiale durante la prova rimane costante, pertanto si può affermare che:

$$A_0 * l_0 = A * l$$

Inoltre, è possibile calcolare la lunghezza istantanea come la somma tra la lunghezza iniziale  $l_0$  più la variazione di allungamento  $\Delta l$ :

$$l = l_0 + \Delta l$$

Si può quindi ottenere il legame che c'è tra la tensione ingegneristica e quella reale:

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

In modo analogo è possibile ottenere la relazione per la deformazione reale:

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

Mentre il test di trazione uniassiale è una tecnica consolidata e ampiamente utilizzata per caratterizzare l'incrudimento plastico di una lamiera, i dati ottenuti da tale test, in termini di curva sforzo-deformazione, possono essere ritenuti validi e significativi solamente fino al carico massimo, o carico unitario massimo.

Per valutare le deformazioni del provino, infatti, spesso si utilizza un estensimetro meccanico a contatto che consente di misurare la deformazione media che si ha sul tratto utile (definito in precedenza) del provino. L'estensimetro meccanico è composto da due estremità che vengono posizionate sul provino durante la prova di trazione: lo spostamento dell'estremo mobile rispetto a quello fisso permette di conoscere l'allungamento medio del provino. La deformazione media fornita dall'estensimetro meccanico, però, può essere presa in considerazione ed essere considerata significativa solo fino a quando la deformazione del provino è uniforme, ovvero fino alla creazione della zona di necking.

Il necking è un fenomeno che si verifica in una zona del provino e consiste nella progressiva riduzione della sezione trasversale del campione. Esso è un'azione congiunta di meccanismi di indurimento e di indebolimento del materiale. Prima dell'insorgenza del necking l'allungamento del provino e il restringimento della sezione sono lineari e sono quindi conformi con la condizione di considerare il volume costante; dopo il carico massimo, invece, l'allungamento del campione avviene quasi unicamente nella regione del necking.

Inoltre, poiché la regione di necking si assottiglia, la sollecitazione ingegneristica, calcolata dividendo il carico per l'area della sezione trasversale iniziale  $A_o$ , non riesce a rappresentare correttamente la reale variazione di tensione nella regione del collo diffuso.

Successivamente all'inizio del collo diffuso, la deformazione è localizzata nella zona del necking e si sviluppa uno stato di tensione triassiale. A causa della deformazione non uniforme del provino, è particolarmente complesso ricavare la sezione trasversale del provino in tale zona. Questo vale in particolar modo per i provini a sezione rettangolare.

I problemi sopra elencati hanno portato a molti studi negli anni al fine di ricavare la curva sforzo-deformazione anche per la parte della curva in cui si verifica il fenomeno del necking.

### **3.3 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE POST-NECKING: METODO DI PAUL ET AL. CON CORRELAZIONE D'IMMAGINE DIGITALE**

Il comportamento sforzo-deformazione di una lamiera è comunemente valutato mediante test di trazione. Tuttavia, come già osservato in precedenza, la curva sforzo-deformazione è limitata al tratto in cui si ha allungamento uniforme del materiale del provino. Solitamente si ottiene la parte della curva legata al necking diffuso per estrapolazione.

In questo elaborato di tesi si descrive e, successivamente, si applica, una procedura che consente di ricavare la curva sforzo-deformazione reale dopo l'insorgere del necking utilizzando la tecnica di misurazione ottica già descritta in precedenza della correlazione digitale d'immagine (DIC) [10].

#### **3.3.1 INTRODUZIONE E TECNICHE UTILIZZATE**

Per ottimizzare le operazioni di formatura dei metalli, di simulazione di crash e di processi di deformazione sono ampiamente utilizzati metodi agli elementi finiti. Molte operazioni di formatura dei metalli, portano, infatti, a sollecitazioni che vanno oltre l'allungamento uniforme del materiale. E' quindi necessario conoscere la risposta dei materiali quando vengono sottoposti ad un'ampia gamma di sollecitazioni per poterne simulare correttamente le lavorazioni o la rottura. Vi è pertanto la necessità di conoscere la risposta del materiale quando viene sollecitato da uno sforzo che lo porta a deformazioni oltre il suo allungamento uniforme.

I metodi classici utilizzati per ottenere la curva sforzo-deformazione, come le prove di trazione tradizionali, come già spiegato nel capitolo precedente, non sono di per se sufficienti per ricavare la risposta del materiale dopo il collo. In questi casi, per ottenere le informazioni richieste, sono previste ad esempio prove idrauliche costose e

ingombranti. Più recentemente alcuni gruppi di ricerca hanno lavorato su metodi ibridi utilizzando una combinazione tra sperimentazione, analisi e simulazione agli elementi finiti, per ricavare la curva sforzo-deformazione post-necking. Questi metodi, però, possono risultare troppo complessi e poco immediati per essere utilizzati nelle comuni prove di trazione.

Il primo a proporre un metodo per determinare il comportamento di indurimento post-necking di una barra tonda è stato Bridgman. Il suo metodo consiste nel correggere la geometria del provino, ad esempio in termini di correzione locale della sezione resistente. Successivamente Zhang ha esteso questo metodo anche per i provini a sezione trasversale rettangolare [11]. Quest'ultimo metodo ha però una validità limitata a un rapporto massimo di otto tra le due grandezze di spessore e larghezza della sezione trasversale. Un ulteriore metodo è stato proposto da Koc e Stok: un metodo inverso basato sulle forze di trazione misurate sperimentalmente.

Kajberg e Lindkvist hanno proposto un metodo che combina i campi di spostamento misurati dalla Digital Speckle Photography (DSP) e dalla modellazione inversa, per ottenere la curva sforzo-deformazione di un provino quando sottoposto ad elevate deformazioni plastiche [12]. Altri studi sono stati effettuati da Grédiac e Pierron che sono riusciti a determinare il comportamento plastico del materiale nella fase si post-necking attraverso la correlazione digitale d'immagine e utilizzando campi virtuali basati su modelli inversa [13].

La determinazione della reale curva sforzo-deformazione, in generale, si può effettuare in tre diversi modi.

In primo luogo, è possibile correggere la geometria nella regione del collo mediante l'introduzione di alcuni fattori di correzione. Ad esempio Zhang [11] è riuscito ad ottenere il fattore di correzione che può essere utilizzato per provini a sezione trasversale rettangolare tramite degli studi agli elementi finiti. Bridgman riuscì, invece, ad ottenere i fattori di correzione da utilizzare per i provini di trazione con sezione trasversale circolare.

La seconda procedura che può essere utilizzata per determinare la curva sforzo-deformazione post-necking è il metodo inverso basato sull'aggiornamento del modello agli elementi finiti. In questo caso, il programma agli elementi finiti fornisce una

simulazione della curva sforzo-deformazione. Successivamente, tale curva, viene paragonata con quella sperimentale carico spostamento. Si riesce ad ottenere la curva sforzo-deformazione post-necking quando la differenza tra le curve carico-spostamento sperimentale e simulate rientra in un certo intervallo predefinito.

Nella terza procedura che può essere utilizzata per ricavare la curva sforzo-deformazione post-necking, anzi che le leggi fenomenologiche di indurimento, si utilizza un modello lineare a tratti. Questa procedura consente di ottenere una realistica curva sforzo-deformazione poiché le leggi di indurimento comunemente utilizzate per grandi deformazioni, non riescono a descrivere correttamente la risposta sforzo-deformazione in alcuni materiali. In questi casi, i ricercatori hanno utilizzato la correlazione digitale d'immagine per ricavare la geometria della sezione nel collo, per convalidare le procedure e per misurare il fattore di correzione.

Nonostante la tecnica inversa basata sugli elementi finiti sia utilizzata con successo per identificare i parametri di un modello predefinito, si tratta comunque di una tecnica di complessa applicazione e che richiede un certo livello di competenza. Infatti, l'accuratezza dipende dal modello che si sceglie per il materiale, dalla modellazione della geometria della sezione del provino, dal tipo di analisi ad elementi finiti utilizzata e, quindi, dalla discretizzazione del dominio e dalle condizioni al contorno. Inoltre, i tempi computazionali di calcolo di questi metodi agli elementi finiti, possono essere anche molto elevati. Si tratta dunque di un compito abbastanza complesso riuscire a definire un modello agli elementi finiti che sia in grado di definire correttamente l'instabilità plastica.

In questo elaborato di tesi si è provato a ricavare la curva sforzo-deformazione post-necking seguendo un approccio differente [10].

### **3.3.2 METODO DI PAUL ET AL.**

Nell'articolo scientifico [10] in cui viene presentato questo metodo, si utilizzano provini in acciaio ferritico commerciale laminato a freddo e provini bifase contenenti ferrite e martensite. In questo elaborato di tesi, tale metodo è stato applicato a provini in: acciaio FeP05, acciaio DP800, ottone CuZn33 e alluminio 7075.

Tutti i test sono stati condotti fino alla rottura del provino. Il software utilizzato per rielaborare le immagini nell'articolo è LaVision, mentre per questa tesi si è utilizzato GOM Correlate.

Nel prosieguo di questo elaborato di tesi si indicherà con  $\epsilon_{yy}$  la deformazione nella direzione del carico applicato al provino (Fig.10), mentre con  $\epsilon_{xx}$  la deformazione nella direzione perpendicolare alla direzione del carico (Fig.11).

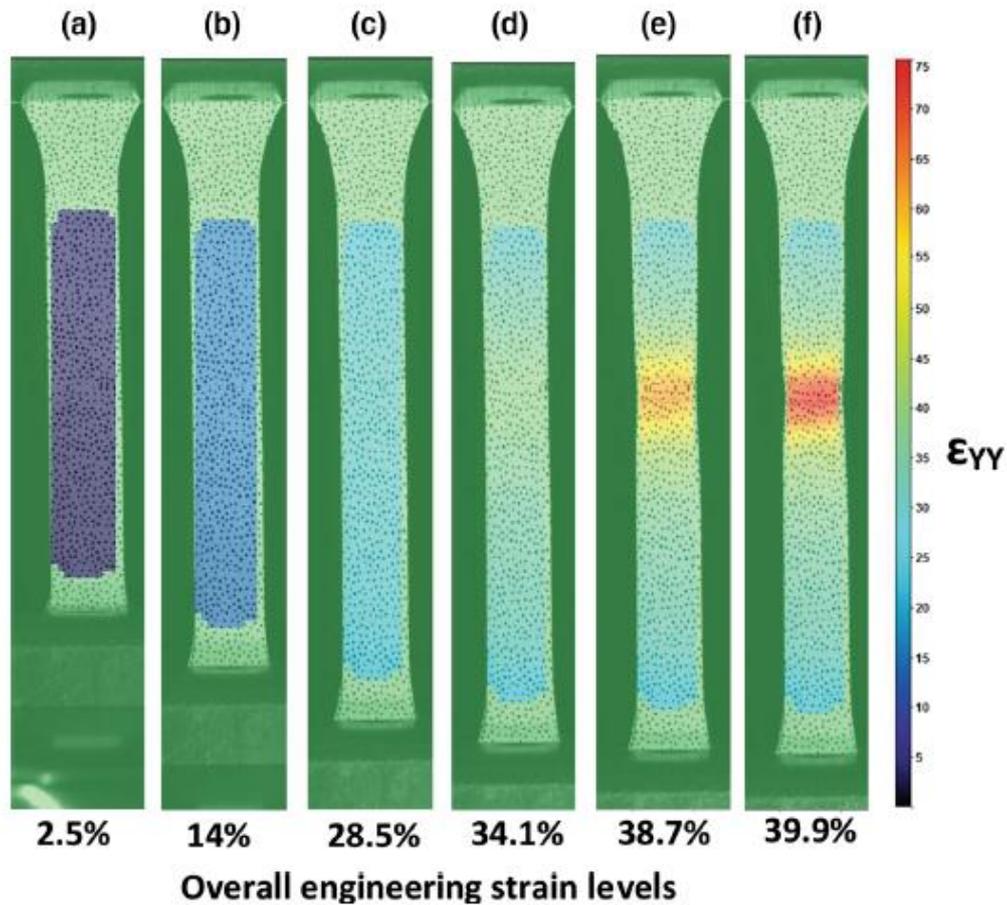
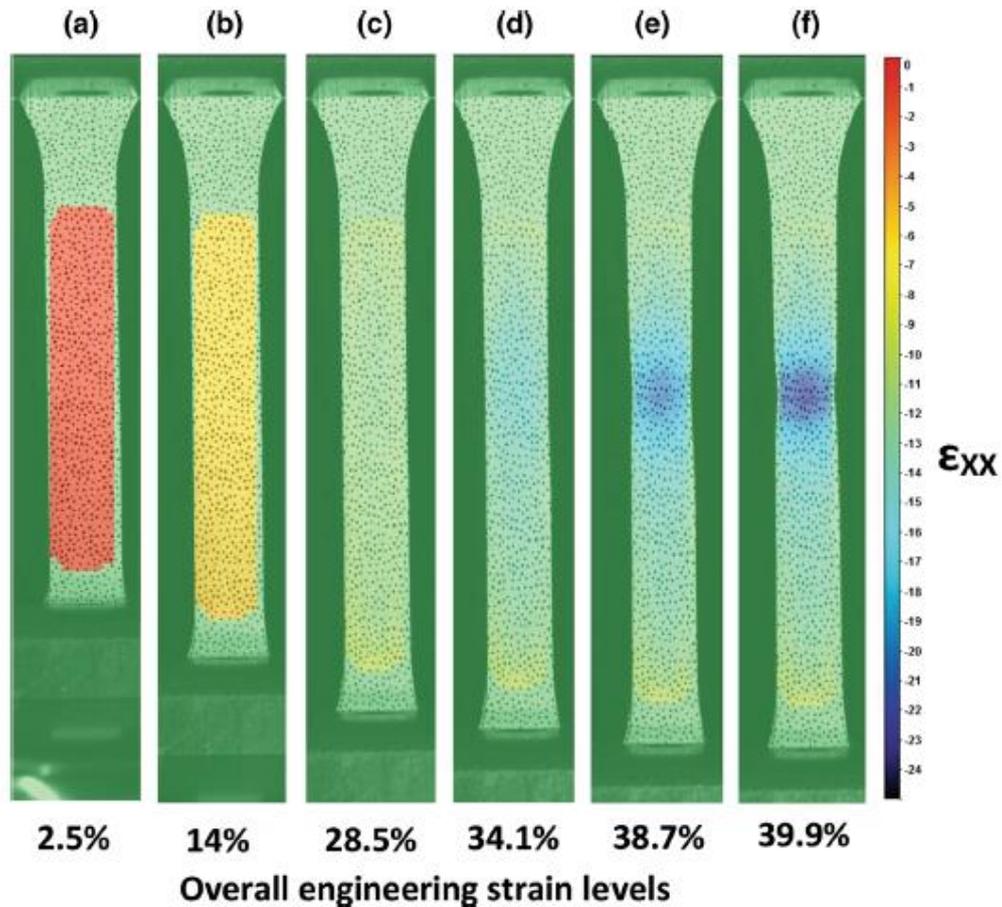


Figura 10 Deformazione locale della componente parallela alla direzione del carico per diversi livelli di deformazione complessiva in una prova di trazione per acciaio ferritico [10]



*Figura 11 Deformazione locale della componente perpendicolare alla direzione del carico per diversi livelli di deformazione complessiva in una prova di trazione per acciaio ferritico [10]*

Per poter studiare l'evoluzione delle componenti della deformazione locale per diversi livelli di deformazione complessiva, si seleziona una linea longitudinale al centro del provino. La Fig.12a e la Fig.12b mostrano rispettivamente l'evoluzione della deformazione locale  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  lungo la linea verticale appena definita al variare di vari livelli di deformazione complessiva. E' possibile osservare nei due grafici che sia per il caso di  $\epsilon_{yy}$ , che per quello di  $\epsilon_{xx}$ , fino a che si ha un allungamento del materiale uniforme si presenta una deformazione plastica omogenea su tutta la lunghezza del campione.

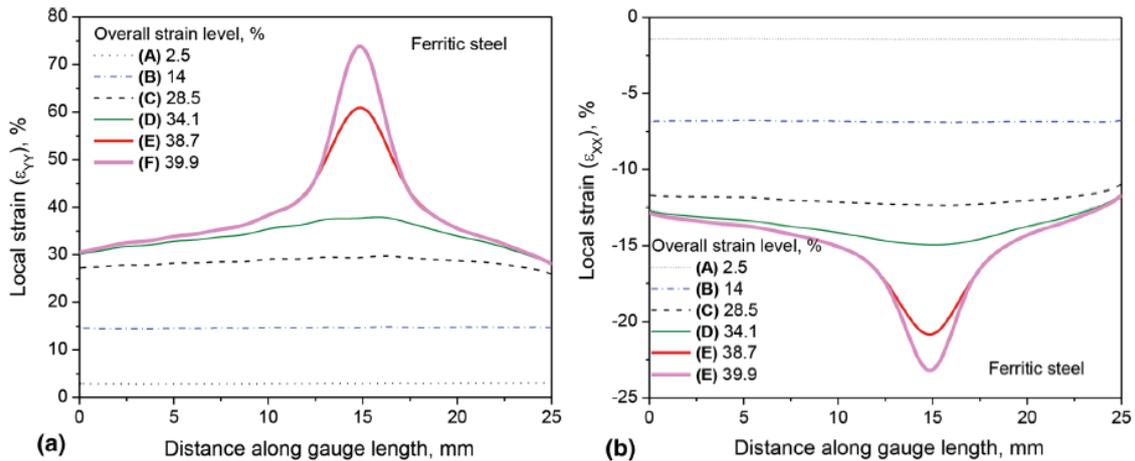


Figura 12 Valori di  $\epsilon_{yy}$  (a) e di  $\epsilon_{xx}$  (b) per diversi valori di deformazione complessiva lungo la direzione longitudinale del provino [10]

Al termine dell'allungamento uniforme del provino si osserva che la deformazione si concentra in una zona localizzata di deformazione plastica che è denominata necking o collo. Il necking si può classificare in diffuso e locale: solitamente quello diffuso precede quello locale. Fino a che ci si trova nella zona di collo diffuso si ha che la concentrazione di deformazione è comparabile tra le due direzioni longitudinale e trasversale del provino. Nel necking locale, invece, la concentrazione di deformazione nella direzione trasversale è molto maggiore rispetto a quella nella direzione longitudinale del provino.

Per comprendere meglio questo concetto sull'evoluzione delle componenti  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  di deformazione a diversi livelli di deformazione complessiva a trazione del provino, nell'articolo [10], si considerano due linee trasversali nel provino, una nella regione del collo e una fuori dalla stessa. La Fig.13 mostra l'evoluzione della deformazione locale  $\epsilon_{yy}$  nella zona del collo al variare dei diversi valori di deformazione generale.

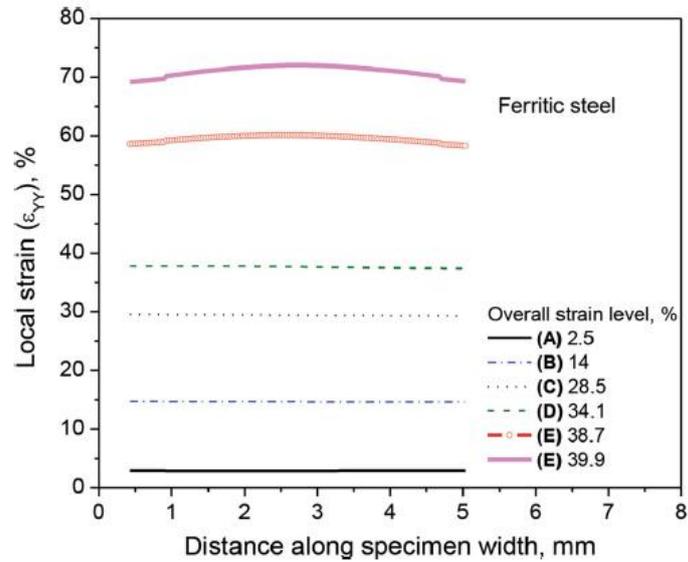


Figura 13 Evoluzione della componente di deformazione locale  $\epsilon_{yy}$  al variare del valore di deformazione complessiva del provino [10]

Nella figura sovrastante è possibile osservare che la deformazione subisce solo piccole variazioni sulla larghezza del campione. Si utilizzano quindi i risultati della DIC per calcolare le componenti di deformazione media locale  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  nella zona del collo e in una zona fuori da esso al variare dei livelli di deformazione complessiva del provino come mostrato in Fig.14.

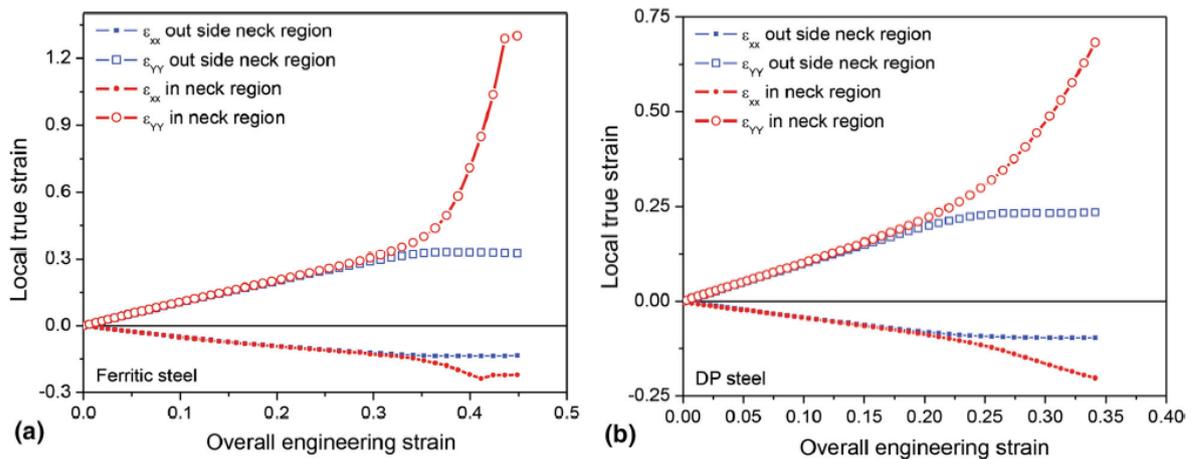


Figura 14 Deformazioni medie locali  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  al variare dei livelli di deformazione complessiva; (a) acciaio bifase (b) acciaio ferritico [10]

Come è possibile osservare, le componenti della deformazione locale media  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  nella zona esterna al collo rimangono quasi costanti anche dopo la fase di allungamento uniforme. Al contrario, le componenti di deformazione media locale all'interno della

zona del collo aumentano con l'aumentare della deformazione complessiva dopo la fase di allungamento uniforme.

In Fig.14a è possibile, inoltre, osservare che nella zona del necking la deformazione  $\varepsilon_{yy}$  aumenta con l'aumentare dello sforzo, mentre la deformazione lungo la direzione  $\varepsilon_{xx}$  rimane costante quasi fino alla frattura. Quanto appena osservato indica che l'allungamento assiale avviene a scapito della riduzione di spessore e larghezza della sezione del provino nella zona di necking che comporta che ci sia uno stato di deformazione piana. Solitamente ciò si verifica durante il necking localizzato. Al contrario, per quanto riguarda l'acciaio bifase, in Fig.14b, non è possibile distinguere la zona del necking locale.

Sulla base delle osservazioni fatte fin'ora si propone ora una procedura per ricavare la curva sforzo-deformazione reale del provino in cui si utilizzano i dati delle deformazioni dello stesso ricavati tramite correlazione digitale d'immagine.

L'ipotesi di base su cui si basa questa tecnica è che il volume nella regione del collo rimanga costante: ovvero, che la formazione di microvuoti durante il collo diffuso, non influisca in modo significativo sulla variazione di volume in tale zona. Per quanto riguarda, invece, il caso di necking localizzato, è possibile che il volume occupato dai microvuoti sia particolarmente elevato, pertanto, l'ipotesi di volume costante non è più valida.

Questa procedura si può quindi applicare solamente nella zona di necking diffuso e non è più valida per il necking localizzato in quanto viene meno l'ipotesi di volume costante nella zona di necking.

Si definiscono ora alcune grandezze che verranno poi utilizzate per ricavare la curva sforzo-deformazione.

Il rapporto delle velocità di deformazione (strain rate ratio)  $\beta$  è il rapporto tra la velocità di deformazione minore  $d\varepsilon_{xx}$  e la velocità di deformazione maggiore  $d\varepsilon_{yy}$  e, pertanto, può essere definito come:

$$\beta = \frac{d\varepsilon_{xx}}{d\varepsilon_{yy}} \quad (Eq\ 1)$$

Il rapporto delle sollecitazioni (stress ratio)  $\alpha$  è il rapporto tra la sollecitazione minore  $d\sigma_{xx}$  e la sollecitazione maggiore  $d\sigma_{yy}$  e, pertanto, può essere definito come:

$$\alpha = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} \quad (Eq 2)$$

Il coefficiente di anisotropia normale (normal anisotropy coefficient)  $r$  si definisce come il rapporto tra l'incremento di deformazione in larghezza  $d\varepsilon_{xx}$  e l'incremento di deformazione in spessore  $d\varepsilon_{zz}$ :

$$r = \frac{d\varepsilon_{xx}}{d\varepsilon_{zz}} \quad (Eq 3)$$

Se si utilizzasse la tecnica della correlazione digitale d'immagine 3D sarebbe possibile misurare direttamente  $d\varepsilon_{zz}$ . Poiché in questo elaborato di tesi si utilizza la tecnica DIC 2D è necessario calcolare  $d\varepsilon_{zz}$  sfruttando l'ipotesi di conservazione del volume:

$$d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy} + d\varepsilon_{zz} = 0 \quad (Eq 4)$$

In cui  $d\varepsilon_{xx}$ ,  $d\varepsilon_{yy}$ ,  $d\varepsilon_{zz}$  sono l'incremento della deformazione reale nella direzione trasversale, longitudinale e spessore del provino. Dall'equazione 4 si può ricavare il valore di  $d\varepsilon_{zz}$ :

$$d\varepsilon_{zz} = -(d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy}) \quad (Eq 5)$$

Sostituendo quanto appena ottenuto, nell'equazione 3 si ottiene un'altra formulazione del coefficiente normale di anisotropia:

$$r = \frac{d\varepsilon_{xx}}{-(d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy})} \quad (Eq 6)$$

La sollecitazione equivalente  $\sigma_{eq}$  può essere calcolata in funzione delle sollecitazioni principali  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  e del coefficiente di anisotropia normale  $r$  secondo il criterio di anisotropia normale quadratica di Hill:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_{xx} \sigma_{yy}} \quad (Eq 7)$$

Allo stesso modo si può definire la velocità di deformazione equivalente:

$$d\varepsilon_{eq} = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{d\varepsilon_{xx}^2 + d\varepsilon_{yy}^2 + \beta^2 + \frac{2r}{1+r} d\varepsilon_{xx} d\varepsilon_{yy}} \quad (Eq 8)$$

La relazione che consente di legare la sollecitazione equivalente  $\sigma_{eq}$  e la sollecitazione longitudinale  $\sigma_{yy}$  può essere anche scritta come:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{yy} \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2r}{1+r} \alpha} \quad (Eq 9)$$

La sollecitazione  $\sigma_{yy}$  lungo la direzione del carico, si può calcolare con:

$$\sigma_{yy} = S_{yy} e^{\varepsilon_{yy}} \quad (Eq 10)$$

Sostituendo poi l'equazione 1 nell'equazione 8 è possibile ricavare una nuova relazione per calcolare la velocità di deformazione equivalente  $d\varepsilon_{eq}$  dalla velocità di deformazione  $d\varepsilon_{yy}$ :

$$d\varepsilon_{eq} = d\varepsilon_{yy} \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{1 + \beta^2 + \frac{2r}{1+r} \beta} \quad (Eq 11)$$

La relazione tra il rapporto di velocità di deformazione  $\beta$  e il rapporto di sollecitazione  $\alpha$  è dato da:

$$\beta = \frac{(1+r)\alpha - r}{1+r - r\alpha} \quad (Eq 12)$$

Esplicitando quindi il fattore di sollecitazione  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{(1+r)\beta + r}{1+r + r\beta} \quad (Eq 13)$$

Dopo aver ricavato le formule necessarie per trovare la curva sforzo-deformazione anche nel tratto post necking, si elencano ora i passaggi che occorre effettuare in ordine sequenziale:

1. Utilizzando la tecnica della correlazione digitale d'immagine si ricavano i valori della deformazione lungo la direzione di carico  $\varepsilon_{yy}$  e lungo la direzione trasversale  $\varepsilon_{xx}$  nella zona del collo.
2. Utilizzando l'equazione 6 è possibile determinare il valore del coefficiente di anisotropia normale  $r$ .

3. Successivamente, applicando l'equazione 1 si riesce ad ottenere il rapporto di velocità di deformazione  $\beta$ .
4. Dall'equazione 13 si ricava poi il rapporto delle sollecitazioni  $\alpha$ .
5. Si determina con l'equazione 10 la vera sollecitazione lungo la direzione di carico nella zona del collo.
6. La sollecitazione equivalente  $\sigma_{eq}$  si ricava dall'equazione 9.
7. Infine, con l'equazione 11, si ricava la velocità di deformazione equivalente  $d\varepsilon_{eq}$ .

Utilizzando la procedura appena descritta si ricavano i dati utili per la costruzione della curva sforzo-deformazione fino a dopo il necking. Tale curva può essere comparata, nella sua parte precedente il necking, con la curva sforzo-deformazione ottenuta dalla prova di trazione standard. Questo concetto verrà ripreso e approfondito successivamente, quando si presenteranno i risultati sperimentali ottenuti dall'applicazione di questo metodo.

Considerando quanto riportato nell'articolo [10] è possibile comunque affermare che i risultati che si ottengono con questa tecnica sono comparabili con quelli ottenute con altri metodi anche agli elementi finiti. Inoltre, si ribadisce che questo metodo è applicabile nel caso di provini a sezione rettangolare solamente fino alla zona di necking diffuso; cioè non vale per il necking localizzato.

Si presenta ora solo da un punto di vista teorico un metodo innovativo che consente di misurare le curve sforzo-deformazione reali nella regione di necking di campioni con sezione circolare. In questo studio si utilizza la tecnica della correlazione digitale d'immagine con due telecamere e due specchi [14].

### **3.4 CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE POST-NECKING: METODO DI CHEN E PAN CON CORRELAZIONE D'IMMAGINE DIGITALE**

La tecnica con due telecamere e due specchi consente di determinare con buona precisione l'area della sezione trasversale e il raggio di curvatura nella regione del collo tramite l'utilizzo di uno schema geometrico a forma di toroide. Come per la prova a

trazione di provini a sezione rettangolare, durante la deformazione omogenea è possibile ricavare la curva sforzo-deformazione reale da quella ingegneristica. Successivamente, con l'insorgenza del collo, non è più possibile ricavare la curva reale in questo modo.

Per poter misurare accuratamente la superficie frontale, laterale e posteriore del provino sono stati proposti nel tempo vari esperimenti utilizzando quattro telecamere. Questi metodi, però, oltre ai costi elevati e alla complessità dei calcoli dovuta all'utilizzo di molte telecamere, non consentono di misurare correttamente le superfici cilindriche in quanto possiedono una vista limitata. Per ottenere superfici cilindriche complete sarebbero necessarie più di sei telecamere.

Questa tecnica necessita, invece, solamente di due telecamere e di due specchi.

La deformazione non è distribuita in modo esattamente uniforme nella regione del collo del campione, pertanto, volendo fare un'analisi più precisa della DIC-2D, si considerano gli spostamenti rispetto alle tre coordinate cartesiane. Il generico punto della superficie  $P(X, Y, Z)$  si sposta seguendo la deformazione del campione in una posizione  $P'(X, Y, Z)$  con uno spostamento identificato dai vettori  $(u, v, w)$  come viene mostrato nella Fig.15a.

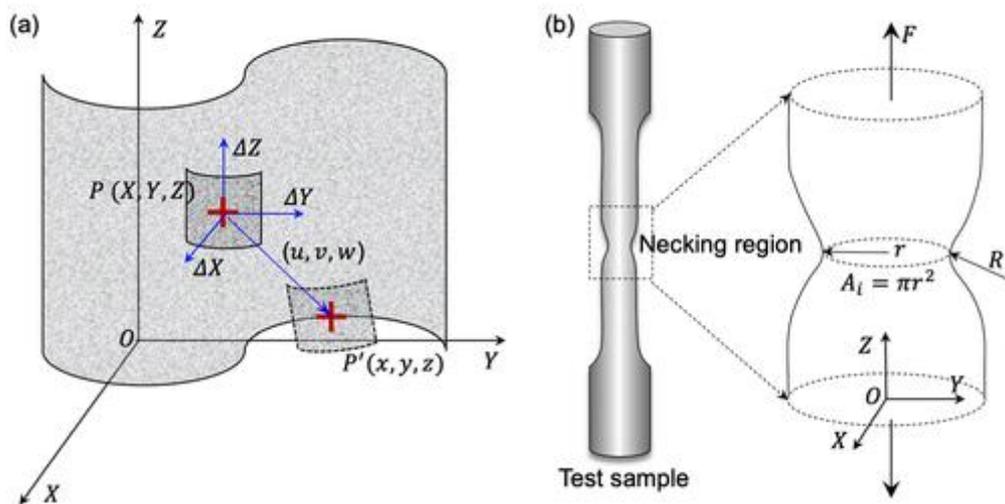


Figura 15 (a) Deformazione superficiale 3D (b) Geometria della sezione cilindrica [14]

La deformazione ingegneristica lungo la direzione di allungamento si può esprimere come:

$$\varepsilon_e = \frac{\partial w}{\partial X}$$

Si definisce così la deformazione reale definita in base alla lunghezza istantanea:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e)$$

Come fatto per il caso di provini a sezione rettangolare, si definisce la sollecitazione ingegneristica:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0}$$

La sollecitazione reale è, invece, riferita alla sezione istantanea del provino:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i}$$

A causa dell'introduzione di uno stato di tensione triassiale nella regione del collo, è spesso necessario correggere la curva sforzo-deformazione dopo l'insorgenza del necking. Per quanto riguarda il caso di campioni cilindrici, si utilizza un'equazione teorica, quella di Bridgman:

$$\sigma_{tbc} = \frac{\sigma_t}{\left(1 + \frac{2R}{r}\right) \ln\left(1 + \frac{r}{2R}\right)}$$

Nella formula precedente  $r$  è il raggio della sezione trasversale nella zona del collo, mentre  $R$  è il raggio di curvatura esterno in corrispondenza della regione di strozzatura come mostrato in Fig.15b. La correzione applicata da Bridgman è ritenuta di difficile determinazione in quanto non risulta semplice calcolare con precisione il valore del raggio di curvatura esterno  $R$ .

Per calcolare tale parametro correttamente, questo metodo innovativo [14], propone di utilizzare due telecamere e due specchi come mostrato in Fig.16.

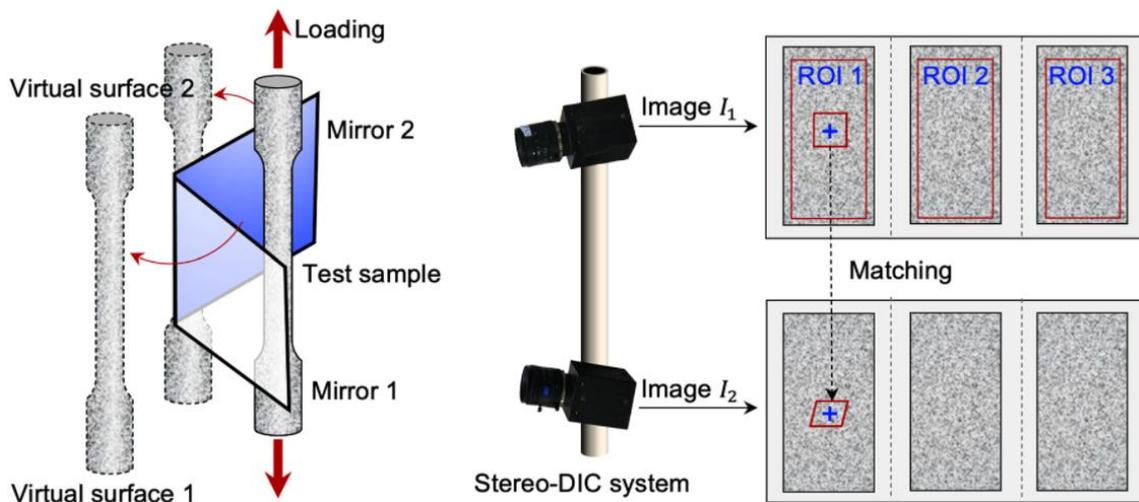


Figura 16 Schema del setup sperimentale [14]

Le due telecamere sono posizionate davanti al provino mentre gli specchi sono collocati dietro lo stesso. Se si regolano correttamente le telecamere si riescono a registrare contemporaneamente la superficie anteriore e le due superfici riflesse nei due specchi chiamate superfici virtuali. Per poter coprire completamente il profilo del provino è necessario posizionare gli specchi con un angolo di circa  $120^\circ$ . Inoltre, per garantire una maggior nitidezza delle immagini, si è ottenuto sperimentalmente che conviene utilizzare tempi di esposizione lunghi, piccole aperture e sorgenti luminose ad alta potenza. Questi accorgimenti sono necessari in quanto le superfici virtuali e la superficie reale si trovano a diverse profondità.

Nelle immagini catturate dalle due telecamere sono così presenti tre superfici come mostrato nella parte destra di Fig.16: la superficie frontale reale e le due superfici posteriori virtuali. Le superfici virtuali sono simmetriche alle superfici reali del provino rispetto agli specchi, pertanto, costruire il profilo panoramico, devono essere trasformate nelle rispettive posizioni reali.

Si considera quindi un punto  $P_w$  che non può essere osservato direttamente dalle telecamere e si indica  $P_r$  il suo riflesso catturato attraverso lo specchio. La relazione tra  $P_w$  e  $P_r$  è di tipo lineare e può essere espressa come:

$$P_w = 2(-n^T P_r + d)n + P_r$$

Nella formula precedente,  $n$  rappresenta il vettore normale unitario dello specchio, mentre  $d$  è la distanza dello specchio dall'origine del sistema DIC. Si possono così ricostruire le posizioni di tutti i punti virtuali nelle rispettive posizioni reali.

Nell'articolo [14] si possono inoltre trovare alcune accortezze per calibrare efficacemente la posa degli specchi.

Una volta ottenuta la forma panoramica del campione a tuttotondo nella zona del necking è possibile ricavare il raggio  $r$  della sezione trasversale e il raggio di curvatura  $R$  necessari per risolvere la già citata equazione di Bridgman.

Per il calcolo del raggio della sezione trasversale  $r$  si procede considerando una regione di punti di altezza  $h$  come mostrato in Fig.17.

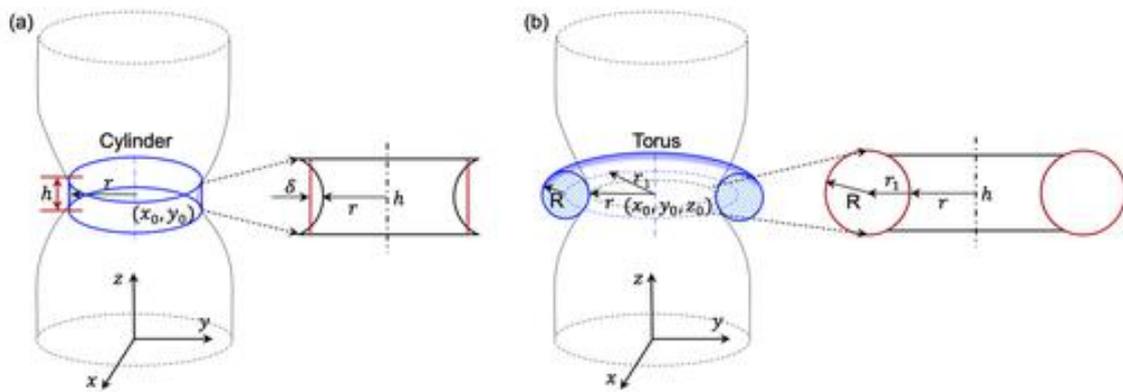


Figura 17 Schema per individuare raggio  $r$  e raggio di curvatura  $R$

Il raggio nella sezione trasversale si può quindi calcolare utilizzando una superficie cilindrica come mostrato in Fig.17a con la seguente equazione:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

In cui  $x_0$  e  $y_0$  indicano le coordinate della proiezione dell'asse del cilindro sul piano  $xy$  considerato.

Per poter misurare il valore del raggio di curvatura  $R$  si adatta la regione di necking, come mostrato in Fig.17b utilizzando la formula della costruzione geometrica del toroide:

$$\left(\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - r_1\right)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$$

In cui  $r_1$  è la distanza dal centro del cilindro al centro del toroide, mentre  $x_0, y_0, z_0$  sono le coordinate del punto centrale del toroide.

E' necessario precisare che il metodo utilizzato per calcolare il raggio della sezione trasversale  $r$  ha una buona precisione se ci si trova in condizioni di deformazione uniforme. Non è però del tutto corretto assumere la stessa superficie come cilindrica dopo l'insorgenza del necking: infatti, come mostrato nell'ingrandimento della Fig.17a vi è un errore  $\delta$ . Si è quindi trovato che, nella zona del necking, è conveniente trovare il raggio della sezione trasversale  $r$  come differenza tra  $r_1$  e  $R$ :

$$r = r_1 - R$$

Da un punto di vista grafico lo si può osservare nella Fig.17b.

Questo metodo permette quindi di calcolare i parametri dell'equazione di Bridgman che consente di correggere la curva sforzo-deformazione per i campioni cilindrici nella zona del post-necking. Questo metodo, inoltre, non è limitato solamente ai campioni di forma cilindrica. Infatti, offrendo una visione panoramica del provino, consente la valutazione delle deformazioni e, quindi, del comportamento post-necking, di provini che possono avere sezioni anche non omogenee, come nel caso di saldature.

## 4. LA PROVA DI TENACITA' A FRATTURA

In questo elaborato di tesi, oltre alle prove di trazione, sono state effettuate anche alcune prove di tenacità a frattura su tre punti per verificare se sia possibile ricavare il valore del CTOD (Crack Tip Open Displacement) utilizzando la tecnica della correlazione digitale d'immagine 2D.

### 4.1 MISURA DEL CTOD: DIC-2D

La meccanica della frattura lineare elastica è valida solamente fino a quando la deformazione non lineare è confinata a una piccola regione che circonda la punta della cricca. In molti materiali, però, non è possibile descrivere efficacemente il comportamento della frattura con la meccanica della frattura lineare elastica e si deve utilizzare un altro modello, la meccanica della frattura elasto-plastica. I due principali parametri elasto-plastici che descrivono le condizioni all'apice della cricca sono il CTOD e l'integrale J.

Esistono varie definizioni del Crack Tip Opening Displacement. Tra le più utilizzate vi sono l'apertura nella parte anteriore della cricca e lo spostamento dell'intersezione di un angolo di 90 gradi con i fianchi della fessura, come mostrato in Fig.18.

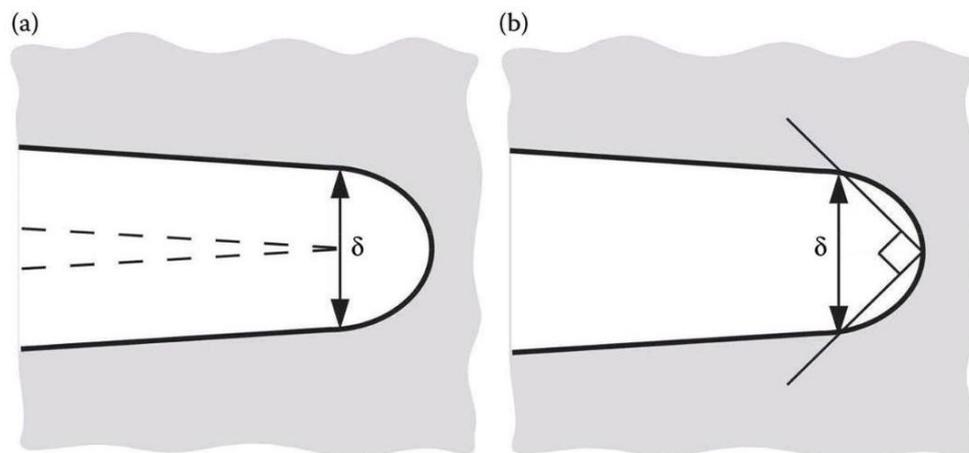


Figura 18 Definizioni alternative di CTOD (a) Apertura parte anteriore della cricca (b) intersezione a 90° [15]

E' possibile osservare che le due definizioni di CTOD ( $\delta$ ) sono equivalenti se la cricca termina con geometria semicircolare. In generale, la maggior parte delle prove in laboratorio utilizzate per misurare il CTOD sono state effettuate con provini di tenacità a frattura caricati su tre punti.

Tra le varie tecniche utilizzate per misurare il CTOD ne sono state sviluppate alcune basate sulla correlazione digitale d'immagine. In questo elaborato di tesi se ne presenta e applica una che utilizza la DIC-2D. Successivamente si descriverà brevemente anche una tecnica basata sulla DIC-3D, ovvero che utilizza più telecamere.

Nel metodo che viene ora proposto [16] si considera la prima definizione data del CTOD, Fig.18a, che consente di misurarlo dagli spostamenti relativi tra i due fianchi della cricca. Per ottenere il suo valore si possono quindi considerare gli spostamenti verticali ottenuti sperimentalmente. La Fig.19 mostra un esempio di mappatura dello spostamento verticale.

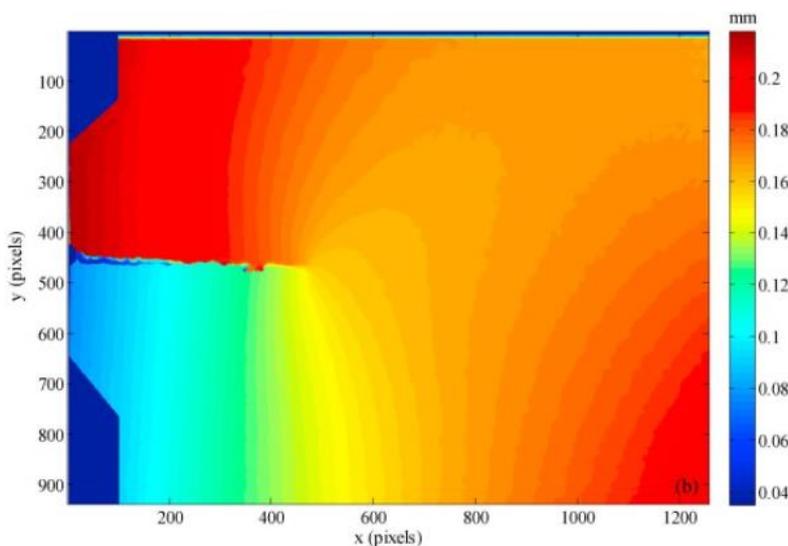


Figura 19 Spostamento verticale misurato con DIC [16]

L'accuratezza del metodo utilizzato per ottenere il CTOD dalle misurazioni è influenzata dalla corretta individualizzazione della posizione dell'apice della cricca. Per poterla identificare è necessario individuare le sue coordinate cartesiane  $x$  e  $y$ . Esse si possono trovare tracciando una serie di profili di spostamento verticale perpendicolari al piano di avanzamento della cricca. Il punto in cui convergono tutti i profili identifica la posizione della punta della cricca.

Dopo aver definito la posizione grafica dell'apice della cricca è possibile calcolare il CTOD. Per poterlo ottenere, si definiscono una coppia di punti dietro l'apice della cricca e si analizzano i loro spostamenti relativi a un ciclo di carico e scarico. Nell'articolo [16] si riporta anche un'analisi per comprendere l'influenza che ha la distanza dietro alla punta della cricca alla quale vengono scelti i due punti. La loro posizione viene indicata in termini di distanza dalla punta della cricca:  $L_x$  nella direzione di propagazione della cricca e  $L_y$  nella direzione perpendicolare alla stessa. E' possibile osservarlo nell'ingrandimento presente nella Fig.20 sottostante.

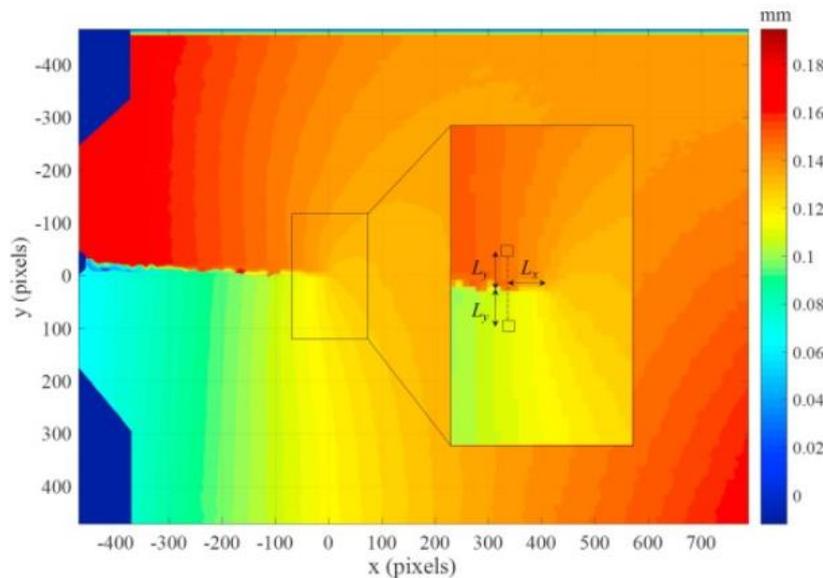


Figura 20 Ingrandimento sulla coppia di punti scelti per il calcolo del CTOD [16]

Per poter valutare correttamente la posizione della coppia di punti sono stati analizzati i valori di CTOD ottenuti in funzione di  $L_x$  per diversi valori di  $L_y$  e viceversa. La prima osservazione che è possibile fare è che, come prevedibile, i valori del CTOD aumentano con l'aumentare della distanza dietro alla punta della cricca. La Fig.21 riporta l'andamento del CTOD in funzione della distanza  $L_y$  per diversi valori di  $L_x$ .

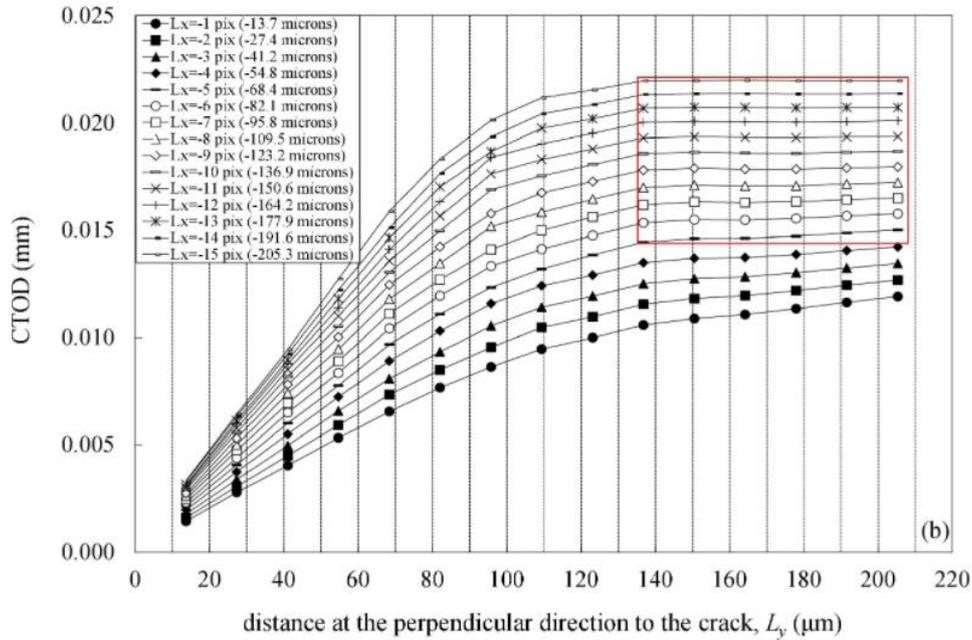


Figura 21 Andamento del CTOD in funzione della distanza  $L_y$  per diversi valori di  $L_x$ . [16]

Come mostrato nella figura, il valore del CTOD raggiunge un limite superiore oltre certe distanze dalla punta della cricca. La regione in cui si osserva questo plateau può essere utilizzata per calcolare il CTOD in quanto è il risultato del movimento del corpo rigido e indica il confine della regione che subisce la deformazione della punta della cricca. In Fig.21 tale regione è riquadrata e mostra che i valori di CTOD da considerare sono compresi tra 5-15 pixels (68,4-205,3  $\mu\text{m}$ ) per quanto riguarda  $L_x$  e tra 10-15 pixels (136,8-205,3  $\mu\text{m}$ ) per  $L_y$ . Si può quindi considerare calcolato correttamente un CTOD se si utilizzano come posizioni della coppia di punti  $L_x = 5 \text{ pixels}$  (68,4  $\mu\text{m}$ ), come posizione orizzontale, e  $L_y = 10 \text{ pixels}$  (136,8  $\mu\text{m}$ ), come posizione verticale, dietro l'apice della fessura. Il CTOD si calcola quindi dallo spostamento verticale relativo tra la coppia di punti individuata.

## 4.2 MISURA DEL CTOD IN DIFETTI ELLITTICI: DIC-3D

Si descrive ora brevemente un metodo innovativo che consente di misurare il CTOD per un difetto di forma ellittica mediante la tecnica della correlazione digitale d'immagine 3D. Nell'esperimento [17] vengono utilizzate due telecamere stereoscopiche 3D per ottenere la deformazione tridimensionale della superficie e una terza telecamera 2D per



dipendente. Questa analisi viene fatta su una serie di punti che si trovano su una retta distante  $x$  dal centro della fessura. Si ripete questo calcolo per diverse linee parallele a valori di  $x$  differenti per poter ottenere lo spostamento dell'apertura della cricca lungo le varie posizioni sul fronte della stessa come mostra la Fig.23.

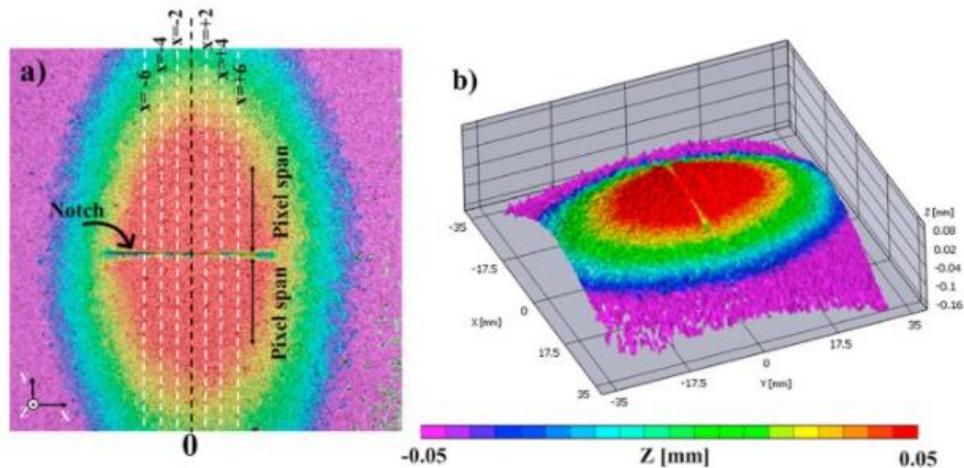


Figura 23 Spostamento tridimensionale ottenuto con la DIC-3D [17]

Il CTOD è ottenuto quindi con un'analisi di regressione della linea passante per il centro della fessura, mentre le altre linee determinano l'apertura della cricca in altre punti del fronte. Infine, l'analisi di regressione che consente di calcolare l'angolo di rotazione  $\theta_2$  utilizza il metodo dei minimi quadrati. Si tratta di un metodo di regressione lineare che definisce una retta in modo tale che la somma tra le distanze al quadrato tra ciascun punto e il suo corrispondente sulla retta sia minima.

### 4.3 CALCOLO DELL'INTEGRALE J

I due principali parametri elasto-plastici che descrivono le condizioni all'apice della cricca sono il CTOD e l'integrale J. Dopo aver esaminato il CTOD, si definisce ora cosa è l'integrale J e come è possibile calcolarlo tramite i dati ricavati con la correlazione digitale d'immagine.

Rice ha applicato la deformazione plastica all'analisi di una cricca in un materiale non lineare e ha mostrato che il tasso di rilascio dell'energia nella zona non lineare della curva sforzo deformazione potrebbe essere scritto come un integrale di linea

indipendente dal percorso. Inoltre, ha anche mostrato come il fattore  $J$  caratterizza in modo univoco le sollecitazioni e le deformazioni all'apice della cricca.

Si può quindi affermare che l'integrale  $J$  possa essere visto sia come parametro di energia che come parametro di intensità di sollecitazione e rappresenta un modo per calcolare la velocità di rilascio dell'energia di deformazione in un materiale. Tale integrale è indipendente dal percorso considerato e il valore di tale integrale, chiamato  $J$ , equivale alla velocità di rilascio di energia in un corpo con una cricca.

Si considera un contorno arbitrario ( $\Gamma$ ) percorso in senso antiorario attorno alla punta della cricca, come mostrato in Fig.24.

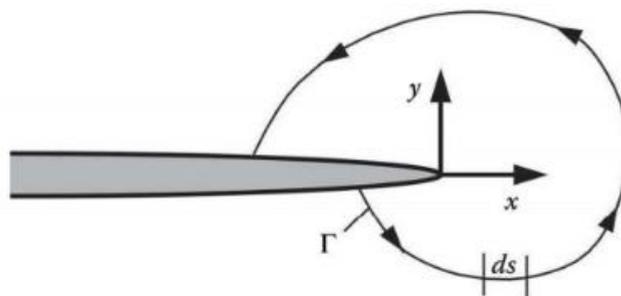


Figura 24 Percorso scelto arbitrariamente intorno alla punta della cricca [15]

L'integrale  $J$  si può esprimere con la seguente formula:

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right)$$

Nella formula precedente  $w$  indica la densità di energia,  $T_i$  sono le componenti del vettore di trazione,  $u_i$  sono le componenti del vettore spostamento e  $ds$  rappresenta l'incremento di lunghezza lungo il contorno. La densità di energia è definita come:

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

In cui  $\sigma_{ij}$  sono le componenti del tensore degli sforzi, mentre  $\varepsilon_{ij}$  sono le componenti del tensore delle deformazioni. La trazione  $T$  è un vettore di sollecitazione in un certo punto del contorno e definisce lo sforzo che agisce sul contorno considerato. Le componenti del vettore di trazione si determinano:

$$T_i = \sigma_{ij}n_j$$

In cui  $n_j$  sono le componenti del vettore unitario che è perpendicolare al contorno arbitrario  $\Gamma$  scelto.

Rice ha dimostrato che il valore dell'integrale  $J$  è indipendente dal percorso di integrazione considerato intorno all'apice della cricca.

Il calcolo dell'integrale  $J$  si può effettuare mediante delle prove in laboratorio. Se il materiale si trova in campo elastico, il calcolo dell'integrale  $J$  è abbastanza semplice in quanto si può ricavare dal carico e dalla dimensione della fessura, supponendo si avere una soluzione  $K$  apposita per la geometria considerata. E' invece più complesso calcolare l'integrale  $J$  se il materiale ha un comportamento non elastico in quanto l'integrale non è più proporzionale al carico applicato. Non si ha quindi una relazione di semplice utilizzo tra la lunghezza della fessura, l'integrale e il carico.

Una possibilità è applicare l'equazione per l'integrale di linea presentata in precedenza misurando le deformazioni posizionando una serie di estensimetri in un contorno arbitrario intorno all'apice della fessura come fatto da Read. Egli ha selezionato un contorno tale da semplificare il calcolo dell'integrale il più possibile, essendo la scelta dello stesso arbitraria. La stessa equazione può essere utilizzata nel metodo agli elementi finiti.

Questo metodo risulta però poco pratico poiché la strumentazione utilizzata per la misura sperimentale delle grandezze per l'equazione dell'integrale  $J$  è molto ingombrante e il calcolo dell'integrale non risulta particolarmente semplice. In [15] vengono proposti alcuni metodi alternativi presenti in letteratura.

In questo elaborato di tesi si propone un metodo per il calcolo dell'integrale  $J$  utilizzando la tecnica della correlazione digitale d'immagine 2D.

#### **4.4 CALCOLO DELL'INTEGRALE J: DIC-2D**

Si presenta ora brevemente un metodo [18] per il calcolo dell'integrale  $J$  utilizzando i dati di spostamento che si riescono ad ottenere con la correlazione digitale d'immagine. Si definisce una griglia di punti quadrata con passo costante  $p$  intorno all'apice della

fessura orientata parallelamente al sistema di coordinate cartesiane utilizzato. Con la DIC si ricavano così i campi di spostamento e deformazione per ciascun punto selezionato.

Si suppone di suddividere il percorso del rettangolo,  $G$ , in quattro percorsi di sottointegrazione chiamati  $G1$  e  $G2$ , per i tratti verticali, e  $G3$  e  $G4$  per i tratti orizzontali. Il percorso di integrazione, percorso in senso antiorario, deve partire e terminare dietro la punta della fessura ed essere al di fuori della zona plastica. La formula base dell'integrale  $J$ , come già descritto in precedenza, è:

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right)$$

Tale formula può essere adattata in forma di integrazione numerica e, considerando che per piccoli angoli  $\tan(\gamma_{12}) \simeq \cos(\gamma_{12}) \simeq \gamma_{12}$ :

$$J = \sum_{G1, G3} (w \Delta p_y - \sigma_1 \sin(\gamma_{12}) \varepsilon_1 \Delta p_y \gamma_{12} - \sigma_2 \Delta p_y \gamma_{12}^2) + \sum_{G2, G4} (w \Delta p_x \sin(\gamma_{12}) - \sigma_1 \sin(\gamma_{12}) \varepsilon_1 \Delta p_x \gamma_{12} - \sigma_2 \Delta p_x \gamma_{12}^2)$$

In cui  $\Delta p_x$  e  $\Delta p_y$  rappresentano il passo effettivo nella griglia. Nell'esperimento presentato nell'articolo [18] utilizza una griglia con il passo di 150 pixels e si calcola spostamento e deformazione al centro di ciascuna cella definita da quattro punti.

## 5. DESCRIZIONE APPARATO SPERIMENTALE

Nei capitoli precedenti si è già discusso sulle modalità di preparazione dei provini per poterli utilizzare nella correlazione digitale d'immagine. Si aggiungono ora alcune informazioni specifiche sulla strumentazione utilizzata, ovvero la macchina di trazione, la telecamera e la lampada per l'illuminazione.

### 5.1 LA MACCHINA DI TRAZIONE

I macchinari di trazione sono costituiti da vari componenti come un dispositivo per l'applicazione del carico, degli organi per il fissaggio del campione in prova e alcuni strumenti per misurare la forza applicata. La macchina di trazione utilizzata per questo elaborato di tesi è rappresentata nell'immagine seguente, Fig.25:



*Figura 25 Macchina di trazione usata nelle prove sperimentali*

La macchina di trazione utilizzata riesce ad applicare un carico massimo di 250 KN. Trattandosi di una macchina di tipo universale consente di poter eseguire non solo prove di trazione, ma anche prove di compressione, tenacità a frattura e altri tipi di prove. Essa è composta da vari componenti. I principali sono:

- Il basamento;
- I due sostegni laterali;
- La traversa, nella zona superiore;
- Una centralina idraulica;
- Un attuatore per l'afferraggio inferiore;
- Un attuatore per l'afferraggio superiore;
- Una cella di carico per rilevare le forze.

Le macchine di trazione possono essere a comando meccanico o comando idraulico. La macchina in questione è di tipo idraulico, in cui l'energia per produrre il movimento delle teste di afferraggio viene trasmessa tramite dell'olio in pressione. Tale olio è pressurizzato con una pompa azionata da un motore elettrico. La Fig.26 mostra uno schema di una generica macchina di trazione:

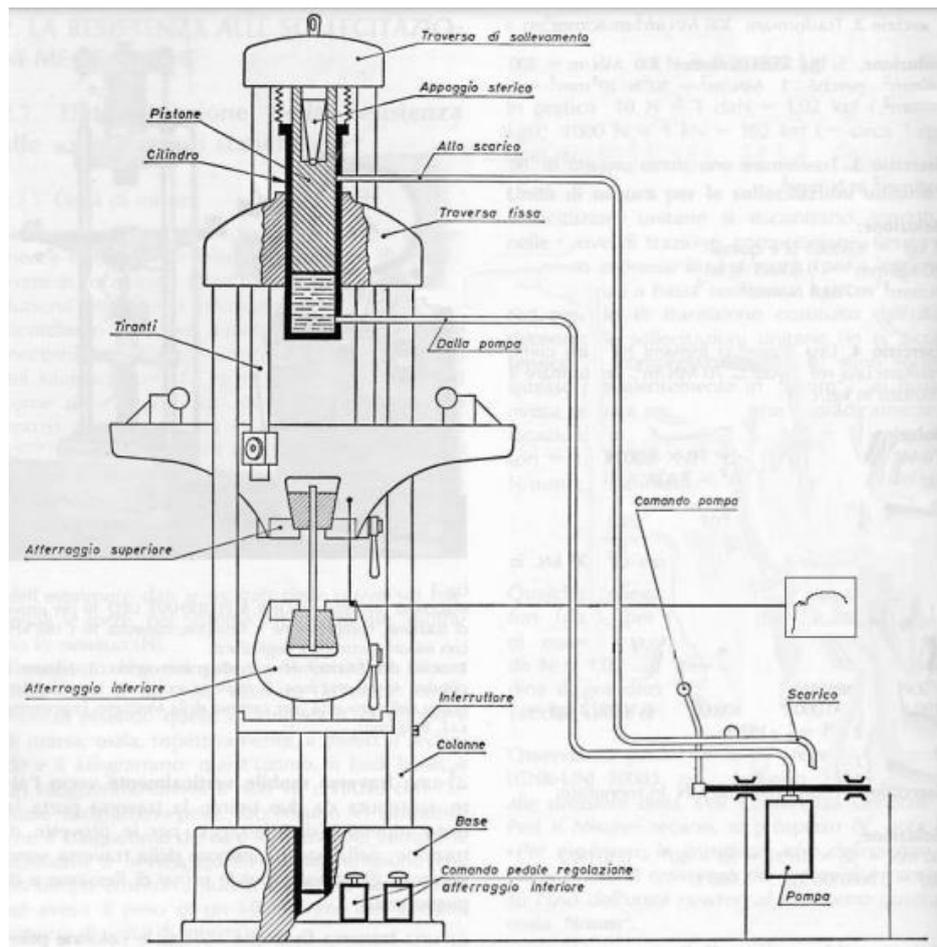


Figura 26 Schema di una macchina di trazione [19]

Il provino viene bloccato alle teste di afferraggio superiore e inferiore della macchina di trazione. Come già affermato in precedenza, la testa di afferraggio superiore rimane statica durante la prova ed è vincolata alla struttura della macchina stessa. La testa inferiore, invece, essendo vincolata al pistone mobile della macchina di trazione, esegue il movimento verticale che consente la trazione o compressione del provino.

L'afferraggio del provino avviene mediante l'utilizzo di due leve. Una leva comanda l'afferraggio superiore, mentre l'altra quello inferiore. Le leve se portate da un lato aprono, dall'altro chiudono, mentre in posizione centrale tengono il provino fermo nella posizione desiderata. È importante evidenziare che prima di avviare la prova è bene applicare un carico minimo sul provino in modo tale che si possa assestare correttamente e per evitare urti all'inizio della prova stessa. Per movimentare la macchina è possibile scegliere se utilizzare un controllo in forza o in spostamento. In entrambi i casi, la pompa invia l'olio in pressione dal serbatoio al cilindro imponendo al pistone il movimento.

Nella pratica, prima si ferma il provino su uno dei due lati, successivamente si sistema la telecamera e, dopo aver fissato anche l'altra estremità del provino, si controlla nuovamente che la telecamera sia correttamente settata.

## 5.2 LA FOTOCAMERA

Durante le prove sperimentali, per poter acquisire le immagini, viene utilizzata una telecamera posizionata perpendicolare alla superficie del provino. Nello specifico si utilizza una telecamera DMK 33UX249 rappresentata in Fig.27 presa dal catalogo della telecamera stessa.



*Figura 27 Telecamera DMK 33UX249 usata per la tecnica DIC*

Il primo fattore che deve essere regolato è il campo visivo della telecamera e la sua distanza dal provino. Se la zona del campione che si vuole considerare è grande, è necessario aumentare la distanza tra la telecamera e l'oggetto. Nel nostro caso è stato fatto ruotando inizialmente il braccio su cui è montata la telecamera e poi, per far tornare la superficie del provino parallela a quella della telecamera, si è ruotato leggermente il campione agendo sulle teste di afferraggio. Queste, per essere ruotate, necessitano di essere svitate utilizzando una apposita chiave.

E' necessario tenere in considerazione che aumentando la distanza tra telecamera e provino, si ha una diminuzione della risoluzione. Nel caso delle prove a trazione si è mantenuta una distanza tale da avere una buona certezza che la rottura avvenisse nell'inquadratura della telecamera, mentre, per le prove di tenacità a frattura, si è potuta avvicinare di più la telecamera al provino, in quanto la zona di nostro interesse è solamente quella nell'intorno dell'apice della cricca e la sua propagazione.

Le principali caratteristiche della telecamera utilizzata provenienti dal suo catalogo vengono di seguito elencate:

- Risoluzione: 1920x1200;
- Frame rate, frequenza di cattura dei fotogrammi: 48 *fps*;
- Pixel size, dimensione dei pixels: 5,86  $\mu\text{m}$ ;
- Tipologia di sensori: Sony IMX249LLJ-C;
- Dimensioni: alta 29 *mm*, larga 29 *mm*, lunga 43 *mm*;
- Massa: 65 *g*;
- Valori estremi di temperatura: da  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ;
- Valori estremi di umidità: da 20% a 80%.

La telecamera utilizzata deve essere ad alta velocità, ovvero deve avere frame rate elevati; almeno doppi rispetto alla frequenza da misurare per il teorema di campionamento di Nyquist-Shannon. Una volta, aumentando il frame rate della telecamera, si poteva avere una diminuzione della risoluzione e dell'accuratezza della misurazione, a fronte di prezzi molto elevati. Solo lo sviluppo di telecamere con semiconduttore a ossido di metallo hanno consentito di avere frequenze di acquisizione tra i 10 – 1000 *fps* senza compromettere la risoluzione.

La lente utilizzata per gli esperimenti di questo elaborato di tesi che è stata montata nella parte anteriore della telecamera è una Tamron M112FM25 e le sue principali caratteristiche, di seguito riportate, sono state prese dal suo catalogo:

- Lunghezza focale: 25 *mm*;
- Apertura del diaframma: da  $F/1,8$  a  $F/16$ ;
- Diametro esterno: 29 *mm*;
- Peso: 54 *g*;
- Valori estremi di temperatura: da  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .

La telecamera consente di regolare altri due parametri molto importanti: la messa a fuoco e l'apertura del diaframma. La regolazione degli stessi avviene agendo su due piccole viti che sono presenti sulla telecamera.

La regolazione della messa a fuoco avviene osservando la nitidezza e la qualità dell'immagine su uno schermo che mostra in tempo reale quanto acquisito dalla telecamera ruotando intanto l'apposita vite.

L'apertura del diaframma, invece, regola la quantità di luce che passa attraverso l'obiettivo, entra nella telecamera e colpisce il sensore all'interno della stessa. In generale più ampia è l'apertura, più stretta è la profondità di campo e viceversa. In pratica, se è piccola, ciò che si trova sul piano del fuoco viene a fuoco, mentre ciò che è sullo sfondo è sfocato. In questo caso, si ha una minore illuminazione, ma con una maggiore risoluzione della parte di immagine che si trova sul piano messo a fuoco. Al contrario, con un'ampia apertura del diaframma, la risoluzione risulta minore, ma si riesce a mettere a fuoco l'intera zona inquadrata dalla telecamera.

Nel caso della correlazione digitale d'immagine applicata a prove meccaniche, essendo interessati solamente al provino e non a ciò che si trova nello sfondo, si cerca di mantenere l'apertura del diaframma il più stretta possibile, ma comunque tale da consentire di avere una corretta illuminazione.

### **5.3 ILLUMINAZIONE**

La superficie del provino sottoposto alla prova deve essere illuminata uniformemente per poter avere un buon contrasto di colori sull'immagine. A tale scopo è stata utilizzata una sorgente luminosa circolare, montata intorno all'obiettivo della telecamera con apposite viti, che permette di avere una illuminazione il più possibile uniforme. Il modello di lampada utilizzato è DFR4-15-100-W-24V e le sue principali caratteristiche sono state ottenute dal catalogo:

- Materiale esterno alluminio;
- Valori estremi di temperatura: da  $-0^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ;
- Valori estremi di umidità: da 20% a 85%;
- Diametro esterno: 105,2 *mm*;
- Diametro interno: 35 *mm*;
- Spessore: 17,5 *mm*;
- Colore della luce: bianca.

L'utilizzo di una lampada per l'illuminazione artificiale del provino è dovuto alla necessità di avere una scala di grigi abbastanza ampia da poter individuare in modo univoco ogni singolo pixel dell'immagine. Per fare ciò è opportuno che la luce emanata dalla lampada sia il più possibile uniforme, diffusa e intensa.

Durante le prove sperimentali è fondamentale regolare correttamente l'intensità luminosa della lampada con l'apposito regolatore presente sulla stessa. Questa operazione viene effettuata osservando la qualità dell'immagine acquisita dalla telecamera sul monitor del computer. Inoltre, per non interferire sull'illuminazione del provino, si è cercato di non avvicinarsi allo stesso durante lo svolgimento della prova per evitare di creare zone d'ombra o urtare inavvertitamente la telecamera.

Un altro aspetto su cui si è posta attenzione è quello termico. Infatti, una eccessiva e prolungata esposizione del provino all'illuminazione artificiale può portare a minime dilatazioni dello stesso e quindi a errori nella misura delle deformazioni. Inoltre, si possono avere effetti anche sul riscaldamento del sensore interno alla telecamera che può portare a modificare l'immagine acquisita sul sensore stesso. Per evitare ciò si è tenuta spenta la telecamera per un po' di tempo dopo ciascuna prova per consentire alla stessa di raffreddarsi correttamente e, comunque, non si è tenuta accesa per periodi di tempo eccessivi.

## 6. LA PROVA DI TRAZIONE: APPLICAZIONE SPERIMENTALE

Per questo elaborato di tesi sono state effettuate alcune prove di trazione con lo scopo di verificare sperimentalmente se sia possibile ricavare le curve sforzo-deformazione del materiale anche nella zona del necking diffuso utilizzando la correlazione digitale d'immagine con il metodo di Paul et al.. Nel precedente capitolo 3.3.2 è stato affrontato il problema da un punto di vista teorico; ora si descrive come è stato applicato e quali risultati si sono ottenuti. Si descrivono quindi quali materiali sono stati analizzati, i passaggi sperimentali effettuati e le curve che si sono ricavate.

### 6.1 MATERIALI

Per quanto riguarda le prove di trazione sono state ricavate delle curve sforzo-deformazione per alcuni materiali: acciaio *FeP05*, acciaio *DP800*, alluminio 7075 e ottone CuZn33.

#### 6.1.1 ACCAIO *FeP05*

Le informazioni che si riportano relative al provino in acciaio *FeP05* sono state ricavate da un precedente elaborato di tesi [20].

L'acciaio in questione proviene dall'industria automobilistica ed è costituito da un basso tenore di carbonio calmato in alluminio; si tratta di un acciaio non legato che viene utilizzato per prodotti piani, laminati a freddo, destinati a imbutitura o piegamento a freddo, e viene prodotto in forma di laminati o larghi nastri.

Inoltre, come spesso accade nei laminati in acciaio, si può galvanizzare il materiale con un sottile strato di *Zn* di circa  $7 - 10 \mu m$  di spessore per rendere l'acciaio più resistente alla corrosione.

I provini che si sono utilizzati sono stati ricavati da delle lamiere e hanno una sezione di  $20 \times 1 \text{ mm}$ .

E' bene precisare che *FeP05* è il nome attribuito dalla normativa aziendale, mentre il corrispettivo nella sigla internazionale è *DC05*. Si riportano ora le caratteristiche meccaniche del materiale secondo la normativa UNI EN 10130:

- $R_e = 180 \text{ Mpa}$ ;
- $R_m = 270/330 \text{ Mpa}$ .

La normativa fornisce anche la composizione chimica percentuale:

- $C\% = 0,06$ ;
- $P\% = 0,025$ ;
- $S\% = 0,025$ ;
- $Mn\% = 0,35$ .

Per quanto riguarda i tre provini in *FeP05* sono state effettuate le prove di trazione in laboratorio. Si è scelto, invece, di rielaborare i risultati e le immagini di prove precedentemente effettuate per verificare l'applicabilità del metodo Paul et al. anche su altri materiali. Nello specifico, si sono utilizzate le immagini ricavate in precedenti prove di trazione. Anche in questi casi i provini erano stati preparati con pattern stocastico per la correlazione digitale d'immagine. I materiali in questione sono l'ottone CuZn33, l'acciaio *DP800* e l'alluminio 7075.

### **6.1.2 OTTONE *CuZn33***

Tra gli esperimenti di cui si sono rielaborate le immagini vi sono due prove di trazione eseguite su provini in ottone CuZn33. In particolare la percentuale degli elementi di cui è composto è *Cu* 67% e *Zn* 33%. Sono presenti anche alcune tracce di elementi non interstiziali in quantità comunque minori dello 0,02%. Inoltre si sa che i campioni sono stati sottoposti a ricottura.

### 6.1.3 ACCIAIO DP800

L'acciaio DP800 rientra nella categoria degli acciai Dual Phase che presentano elevati carichi e allungamenti a rottura. Come per gli altri acciai Dual Phase, anche il DP800 è costituito da due fasi di percentuali considerevoli. La matrice ferritica gli consente di avere una buona duttilità. In essa sono presenti alcune seconde fasi martensitiche che gli conferiscono maggiore resistenza.

Le caratteristiche dei provini in questione sono presentate in [21]. Il processo di produzione che ha consentito di ottenere le lamiere da cui si sono ricavati i provini utilizzati nella prova a trazione è composto dalle alcune fasi. In primo luogo vi è stata la colata continua dell'acciaio. Successivamente si è effettuata una laminazione a caldo seguita da laminazione a freddo. Si sono poi effettuate una austenitizzazione parziale e, infine, una tempra intercritica.

I provini sono stati ricavati dalle lamiere in direzione longitudinale e le loro proprietà meccaniche sono:

- $R_e = 420/550 \text{ Mpa}$ ;
- $R_m = 780 \text{ Mpa}$ .

### 6.1.4 ALLUMINIO 7075

La lega di alluminio 7075 rientra tra le leghe a deformazione plastica. Il materiale è composto da una matrice di alluminio con altri elementi in soluzione solida e seconde fasi. In particolare, vi sono le seconde fasi primarie (circa  $10 \mu\text{m}$ ) derivanti dalla solidificazione che possono essere solubili o insolubili. Le seconde fasi solubili sono ad esempio  $Al_2Cu$ . Un esempio di fase insolubile è invece  $Al_2Fe$  che è però una fase indesiderata.

Le leghe di alluminio per deformazione plastica si distinguono tra loro per gli elementi leganti che contengono e che ne determinano le proprietà meccaniche. La lega in questione, 7075, rientra nelle leghe settemila ovvero in quelle con elevate percentuali di zinco, magnesio e rame. Nello specifico, in [21] è stata effettuata anche un'analisi chimica sui provini utilizzati nella prova di trazione e si sono ottenuti i seguenti valori per la composizione percentuale della lega:

- $Zn\% = 6,1$ ;

- $Mg\% = 2,7;$
- $Cu\% = 1,6;$
- $Cr\% = 0,21;$
- $Fe\% = 0,18;$
- $Si\% = 0,1;$
- $Mn\% = 0,04;$
- $Ti\% = 0,02.$

Dall'analisi chimica sono state inoltre trovate tracce di Stagno, Piombo e Nickel, ma in quantità minori dello 0,01%. Il restante della composizione della lega è costituito da alluminio.

La lega utilizzata è stata sottoposta a trattamento T6 che consiste in una precedente solubilizzazione, seguita dalla tempra e infine un invecchiamento artificiale. I principali effetti del trattamento sono un aumento della resistenza meccanica e una diminuzione dell'allungamento.

Le proprietà meccaniche del materiale, anch'esse riportate in [21] sono:

- $R_e = 450/560 \text{ Mpa};$
- $R_e = 460/580 \text{ Mpa}.$

## **6.2 DESCRIZIONE SPERIMENTALE**

Prima di esporre i risultati ottenuti dalle prove di trazione, si descrivono brevemente i passaggi sperimentali effettuati in laboratorio per ottenere le immagini rielaborate poi con un apposito software.

Il primo passaggio è la preparazione del provino. Questa fase, già descritta in un precedente capitolo, ha l'obiettivo di creare un pattern stocastico sulla superficie dello stesso. Infatti, il calcolo degli spostamenti e delle deformazioni è strettamente legato alla ricerca della corrispondenza dei subset all'interno della successione delle immagini acquisite. E' pertanto fondamentale avere un pattern adeguato sulla superficie del provino. In laboratorio, dopo aver indossato guanti, camice e occhiali protettivi ci si è posizionati sotto la cappa chimica ove si sono svolte le operazioni di pulitura e preparazione del provino.

Per quanto riguarda la pulizia del provino è stata effettuata passando più volte un panno con dell'acetone su tutte le superfici dello stesso. Questa fase è importante per poter garantire una corretta adesione della vernice alla superficie del provino. Successivamente, sempre sotto la cappa chimica, è stato applicato lo strato di vernice bianca sulle due superfici del provino che è interessata dall'analisi DIC.

Nonostante la telecamera durante la prova meccanica riesca a inquadrare una sola delle due superfici principali del provino, si è scelto di prepararlo su entrambi i lati. Ovvero, si è creato il pattern stocastico su entrambe le superfici del campione. Questa operazione è stata svolta per poter avere la possibilità di scegliere il pattern con la migliore qualità: infatti, nella stesura della vernice è possibile che si creino macchioline indesiderate o zone in cui il colore non risulta uniforme.

L'identificazione dei provini utilizzati per questa tesi, avviene tramite un numero che è riportato sulle due facce principali dello stesso. Quindi, poiché le superfici del provino vengono ricoperte con la vernice per creare il pattern stocastico, è necessario riportare il numero del provino con un pennarello indelebile su un lato non verniciato per poterlo individuare successivamente.

Terminata la procedura per la preparazione del provino è possibile descrivere la preparazione del banco di lavoro e le prove sperimentali.

Per poter effettuare la prova meccanica di trazione con l'acquisizione di immagini DIC sono stati utilizzati due computer. Il primo, consente di comandare la macchina di trazione e di acquisire i dati di spostamento e forza della macchina di trazione durante la prova. Inoltre, per lo svolgimento dell'elaborato di tesi sono state effettuate anche delle prove di tenacità a frattura su tre punti inserendo un estensimetro meccanico sul provino; pertanto, durante queste prove, il computer in questione viene anche utilizzato per ricevere i dati provenienti dall'estensimetro.

L'altro computer è collegato, invece, alla telecamera e consente di visualizzare e acquisire le immagini digitali durante le prove meccaniche.

La fase successiva consiste nel collegare correttamente la telecamera con un apposito cavo al computer per consentire la trasmissione delle immagini. La lampada circolare montata su di essa, invece, non necessita di un collegamento con il computer in quanto

la sua regolazione viene fatta manualmente osservando le immagini prodotte dalla telecamera.

Una volta collegata la telecamera al computer è possibile avviare il software IC Capture che consente di visualizzare e acquisire le immagini provenienti dalla fotocamera.

La macchina di trazione viene avviata utilizzando l'apposito software di controllo presente sull'altro computer. Inizialmente, con gli opportuni comandi, si accendono le pompe che consentono di pressurizzare l'olio e, successivamente è possibile controllare i movimenti e le azioni dei componenti della macchina di trazione. Si inserisce poi il provino nella presa superiore e, ruotando la leva che la controlla, si ha il bloccaggio del campione. La stessa operazione si effettua per la parte inferiore del provino.

Regolando poi la posizione della telecamera si fa in modo che essa inquadrì correttamente la regione d'interesse e che la superficie del provino sia parallela al sensore della fotocamera. Per poter svolgere tale operazione è possibile allentare le viti che bloccano la telecamera e variarne la posizione ruotando i bracci che la sostengono. Per avere una corretta regolazione della collocazione della telecamera è conveniente, durante questa operazione, osservare anche l'immagine della telecamera proiettata sullo schermo e verificare la sua effettiva centratura.

L'operazione successiva da compiere è la regolazione della qualità dell'immagine agendo sull'apertura e sulla messa a fuoco della telecamera e sull'intensità luminosa della lampada. Durante questa fase, mentre si variano i parametri della telecamera, potrebbe risultare utile aumentare l'ingrandimento dell'immagine proiettata sullo schermo per verificare che si abbia una corretta messa a fuoco.

L'ultimo procedimento da compiere prima di avviare la prova meccanica è verificare il corretto funzionamento del software IC Capture che consente il salvataggio delle immagini. Si inserisce quindi la frequenza di acquisizione desiderata (ad esempio 1 Hz) e, dopo aver azzerato l'indice di conteggio delle immagini, si avvia la cattura di alcune di esse. Se la loro memorizzazione nella cartella del computer designata è avvenuta correttamente si può interrompere la loro acquisizione.

Prima di iniziare la prova di trazione e quindi l'acquisizione delle immagini è importante ricordarsi di resettare a zero l'indice di conteggio delle immagini sul software IC Capture. Il motivo di quest'ultimo passaggio è che GOM Correlate, ovvero

il software utilizzato per ricavare le deformazioni e gli spostamenti dalle immagini, vuole in input le fotografie numerate in ordine crescente per poter riconoscere con quale l'ordine sono state effettuate.

E' possibile ora far iniziare la prova di trazione e l'acquisizione delle immagini. In realtà quest'ultima viene fatta iniziare qualche secondo prima della prova di trazione per poter essere sicuri di riprendere ogni istante del test e, soprattutto, per acquisire almeno un fotogramma non deformato di riferimento. Infatti, il concetto base della DIC consiste nel ricavare deformazioni e spostamenti correlando la posizione di alcuni pixels tra l'immagine di riferimento e l'immagine successiva deformata.

Al termine delle prove meccaniche si salvano quindi sia le informazioni provenienti dalla macchina di trazione in termini di dati carico-deformazione che le immagini da rielaborare con correlazione digitale d'immagine.

Si descrive ora l'elaborazione dei dati e delle immagini acquisite mediante l'uso del software GOM Correlate e il software di calcolo Microsoft Excel.

### **6.3 ELABORAZIONE DATI E CURVE SFORZO-DEFORMAZIONE**

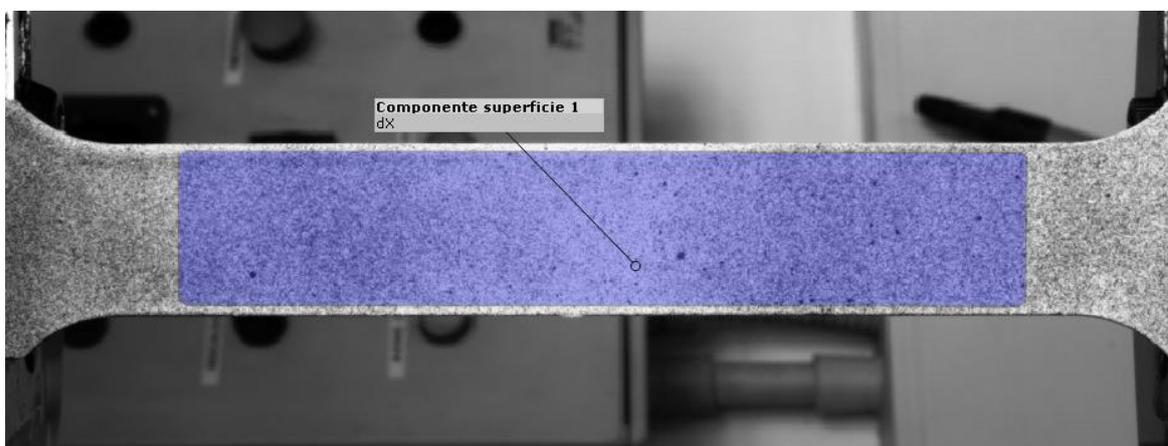
Il software utilizzato in questa fase, come detto, è GOM Correlate. Si tratta di un programma gratuito scaricabile sul sito GOM ed è utilizzabile solo con apposita licenza di durata annuale. Si descrive ora come si sono ricavati deformazione e spostamenti tramite il software.

Il primo passaggio da svolgere è l'importazione su GOM Correlate delle immagini delle deformazioni. Per poterlo fare è sufficiente aprire un "Nuovo progetto", andare su "File", "Importa", "File", selezionare tutte le immagini desiderate e infine cliccare su "Immagini delle deformazioni". Si sono così caricate sul programma tutte le immagini acquisite di una determinata prova.

E' ora possibile definire la cosiddetta regione di interesse (ROI, Region Of Interest) ovvero la parte di provino che si desidera analizzare. La scelta di studiare una parte dell'immagine è dovuta al fatto che si vuole evitare che il software applichi l'algoritmo

di correlazione anche a zone esterne al provino che potrebbero comportare eventuali errori nel calcolo.

La definizione della superficie di interesse avviene sulla prima immagine, quella di riferimento non deformata, e automaticamente il software la riporta su tutte le immagini successive. Per creare l'area di interesse su GOM Correlate si deve selezionare "Componente superficie" e successivamente definire il contorno della stessa con clic successivi del puntatore del mouse. Si ha, inoltre, la possibilità in fase di creazione della superficie di scegliere la dimensione del subset che, per le prove in questione, è stato scelto 19x19 pixels, valore impostato di default da GOM Correlate. La Fig.28 mostra un esempio di regione creata su un provino sottoposto a prova di trazione.



*Figura 28 Definizione della regione di interesse (ROI)*

Come è possibile osservare dall'immagine è conveniente lasciare un piccolo bordo intorno alla superficie selezionata e non arrivare fino al bordo esterno del provino. Questo viene fatto per evitare che il software abbia dei problemi ad identificare correttamente i pixels alle estremità e li confonda con i pixels dello sfondo retrostante il provino.

Per tutte le prove a trazione è stata selezionata una regione di interesse molto simile. Nelle prove di tenacità a frattura, invece, poiché la geometria del provino è differente, si è scelta una superficie diversa. Quest'ultima viene poi descritta in un capitolo successivo.

Nella definizione della regione è importante verificare che zona del necking diffuso e la successiva rottura del provino avvengano all'interno della superficie selezionata: in caso contrario è necessario eliminare l'area creata e definirne una nuova.

Prima di richiedere al software la misurazione di spostamenti e deformazioni è opportuna definire la scala del provino. Anche questo passaggio viene eseguito tramite apposito comando, selezionando la superficie in questione, “Modifica parametri di creazione” e infine “Definisci scala”. La definizione avviene selezionando un segmento e definendone la lunghezza così che il software possa tarare tutte le successive misure su tale valore. Se ne mostra un esempio in Fig.29.

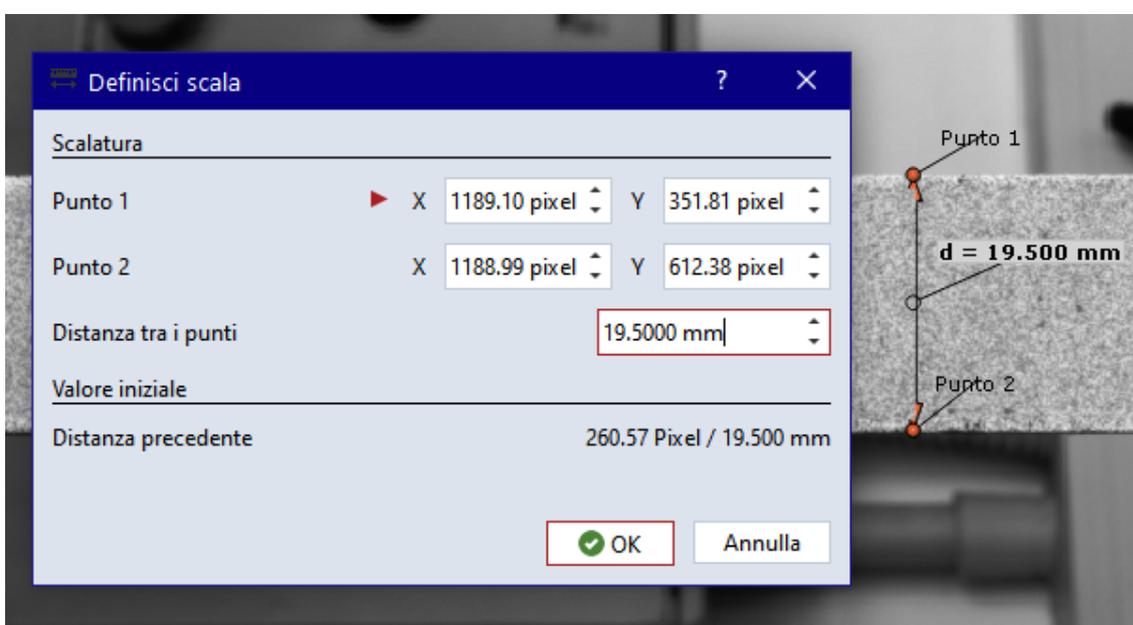
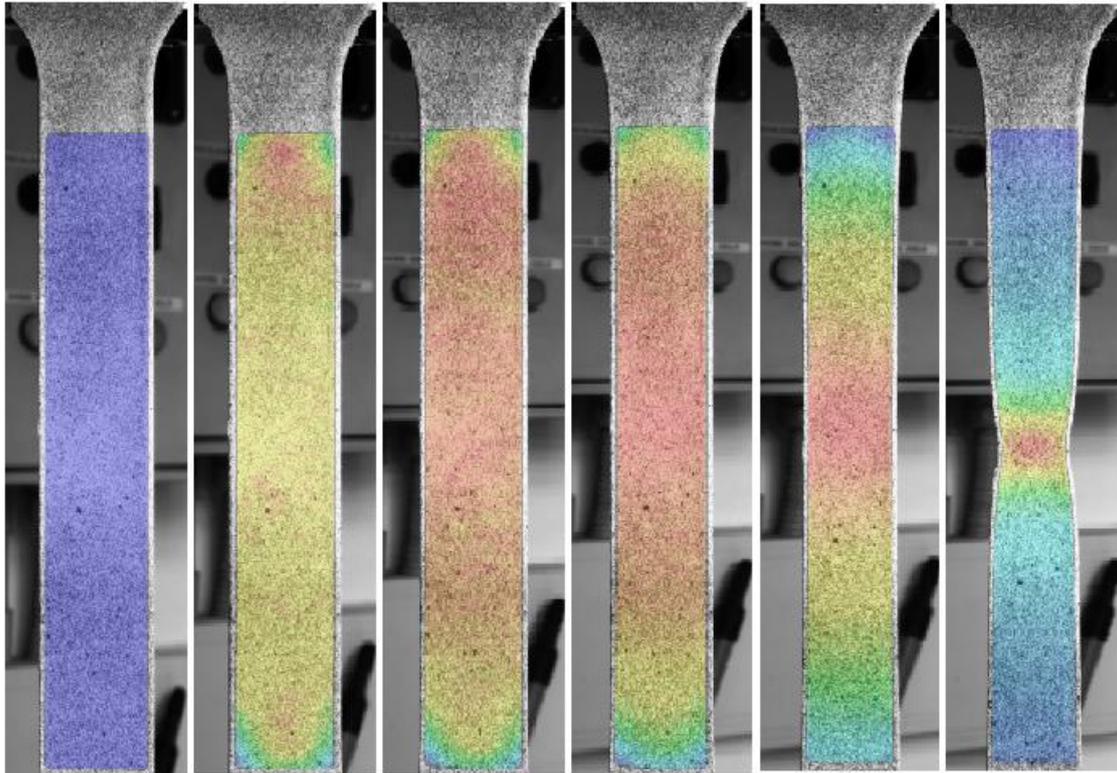


Figura 29 Definizione della scala del provino

Il software GOM Correlate consente inoltre di modificare il sistema di riferimento cartesiano di riferimento. E' importante tenere in considerazione che le deformazioni e gli spostamenti che vengono poi ricavati dalla correlazione delle immagini sono riferiti a tale sistema di riferimento.

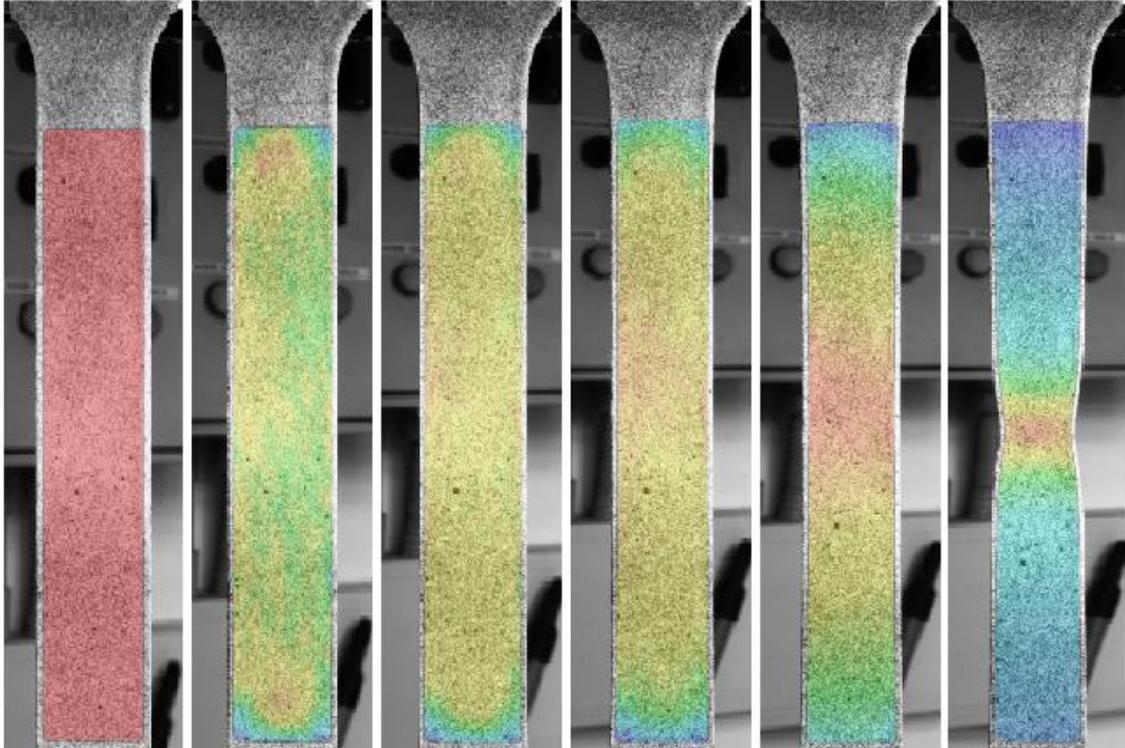
Dopo aver definito correttamente la regione di interesse, la calibrazione della scala e il sistema di riferimento cartesiano, è possibile richiedere al programma di calcolare le deformazioni e gli spostamenti. Teoricamente, prima di effettuare tale calcolo, si dovrebbero definire i criteri per misurare tali valori, ma purtroppo GOM Correlate non solo non consente di scegliere l'algoritmo di correlazione, ma non da neanche la possibilità di conoscere quale criterio utilizzi.

Si riportano ora come esempio alcune immagini relative a deformazioni e spostamenti ricavate per il primo provino sottoposto a prova di trazione. Ovviamente il software ricava le informazioni richieste per ciascuna immagine, ma qua se ne riportano solo sei al fine di far comprendere come avviene la visualizzazione e l'acquisizione dei dati. La Fig.30 mostra l'andamento della deformazione della superficie del provino lungo la direzione longitudinale, ovvero quella di applicazione del carico (asse  $y$ ).



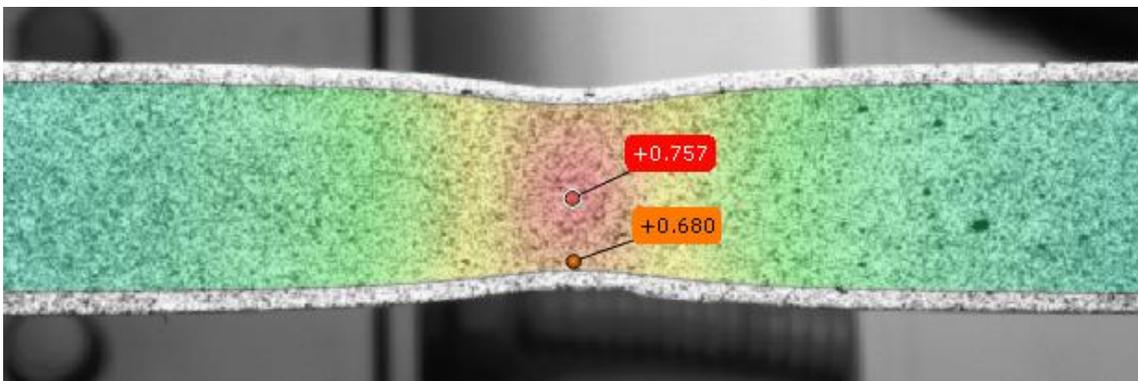
*Figura 30 Deformazione lungo l'asse di carico  $y$  del provino 1*

Si può osservare la deformazione della superficie sia da un punto di vista dei colori che dalla dimensione del provino. GOM Correlate mostra le varie immagini con a fianco una legenda che riporta i valori di deformazione riferiti ai colori. L'immagine presente in Fig.31 mostra, invece l'andamento delle deformazioni sull'asse trasversale rispetto alla direzione del carico (asse  $x$ ).



*Figura 31 Deformazioni su asse x perpendicolari all'asse di carico del provino 1*

Anche in questo caso è possibile osservare la deformazione del provino. Per poter ottenere i dati relativi a spostamenti e deformazioni è necessario selezionare sulla superficie dei punti di interesse. In tali punti il programma mostra il valore della grandezza desiderata e consente di salvarne i dati sotto forma di diagramma o tabella. Non vi è un limite sul numero di punti che si possono selezionare e, mentre si selezionano, il programma suggerisce anche la qualità dell'immagine in quel luogo così da poterne scegliere uno limitrofo in caso di scarsa qualità. L'immagine seguente riporta un esempio di due punti selezionati manualmente (Fig.32).

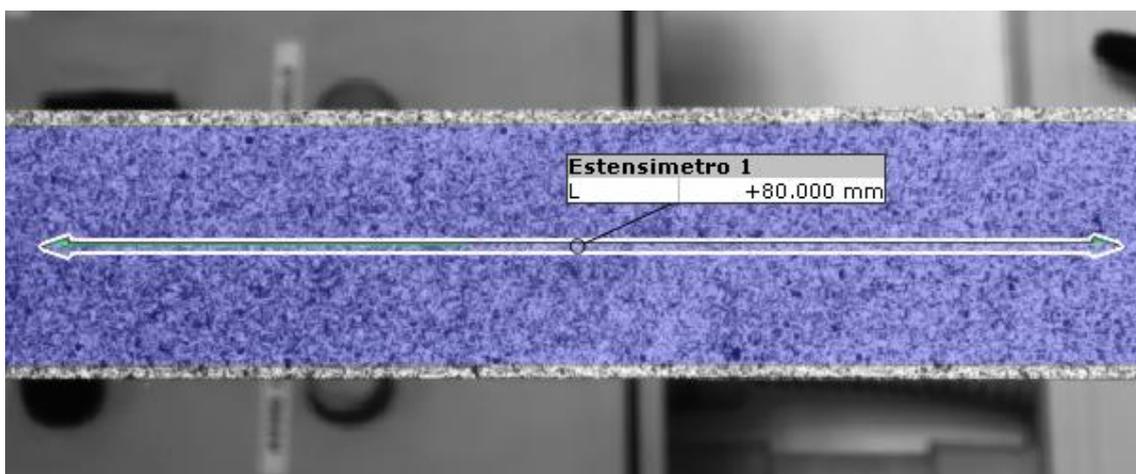


*Figura 32 Coppia di punti per acquisire i valori di deformazione longitudinale sull'asse y*

La possibilità di scegliere più punti di indagine è stata utilizzata per poter valutare la differenza di deformazione tra punti più esterni e quelli più interni. Inoltre, la scelta dei punti da considerare è stata effettuata prendendo in considerazione le ultime immagini prima della rottura del provino. Il motivo principale è che in tali fotogrammi è possibile individuare con certezza dove avviene la rottura e si riesce a definire in quali aree la correlazione digitale d'immagine funziona più correttamente. Infatti, quando si giunge alla zona del necking localizzato, ovvero in prossimità della rottura, questa tecnica non riesce più a identificare correttamente i subset.

Un ulteriore strumento disponibile su GOM Correlate che si è utilizzato è l'estensimetro virtuale. Il software consente infatti di creare un segmento e di valutarne l'allungamento nelle immagini. L'accuratezza dell'estensimetro virtuale viene valutata in questo elaborato di tesi con i provini di tenacità a frattura in cui è stato utilizzato anche un estensimetro meccanico e viene discussa nel capitolo ad essa dedicato.

Nelle prove a trazione l'estensimetro virtuale è stato utilizzato per calcolare gli spostamenti della curva sforzo-deformazione fino al valore di massimo. Per poter inserire un estensimetro su GOM Correlate è necessario selezionare i seguenti comandi: "Costruisci", "Distanza" e successivamente "Estensimetro". La Fig.33 mostra un esempio di estensimetro. In particolare si tratta di quello utilizzato per il secondo provino sottoposto a prova di trazione.



*Figura 33 Estensimetro virtuale utilizzato per la seconda prova di trazione*

L'estensimetro virtuale utilizzato per le prove a trazione ha una lunghezza di 80 mm, come tradizione dell'industria automobilistica, ed è stato centrato rispetto alla lunghezza del provino; non rispetto alla zona di rottura.

Utilizzando gli strumenti appena descritti si sono salvate le informazioni relative agli spostamenti e alle deformazioni non solo per i tre provini in acciaio *FeP05* sottoposti a prova di trazione per questa tesi, ma anche per quelli di cui si possedeva già la sequenza di immagini di prove precedenti da rielaborare. Ci si riferisce in particolare ai provini in acciaio *DP800*, alluminio *7075* e ottone *CuZn33*.

Dopo aver spiegato il funzionamento del software GOM Correlate e come sono stati acquisiti i dati, si presentano ora i risultati che si sono ottenuti applicando il metodo Paul et al. per la determinazione della curva sforzo-deformazione per la zona di necking diffuso. Tali risultati vengono paragonati con le curve reali ottenute con il metodo ordinario.

Le curve reali vengono ricavate utilizzando l'estensimetro virtuale presente su GOM Correlate. Si è scelto di imporre una lunghezza iniziale dello stesso di *80 mm* per tutte le prove ed è stato centrato rispetto al provino. Il calcolo dello sforzo e della deformazione reali sono stati eseguiti su Excel utilizzando le formule descritte nel capitolo 3.2.

I calcoli relativi alle curve post necking seguono il procedimento descritto nel capitolo 3.3.2, ovvero quello denominato Paul et al. I dati sulle deformazioni utilizzati per la costruzione delle curve sono relativi ad un punto centrato trasversalmente che si trova nella zona del necking diffuso come definito dal metodo in questione. Questo punto viene definito "Punto 1" nel prosieguo dell'elaborato. Per ulteriori analisi si è scelto talvolta di considerare un secondo punto più esterno sempre appartenente alla regione di necking; questo punto si sceglie di chiamarlo "Punto 2".

L'ultima precisazione che occorre fare prima di passare all'analisi dei grafici è relativa al calcolo di alcuni parametri utili per la determinazione della curva post necking. Nelle formule del coefficiente di anisotropia normale ( $r$ ), del rapporto di velocità di deformazione ( $\beta$ ) e della velocità di deformazione equivalente ( $\epsilon_{eq}$ ) sono presenti dei differenziali. Si è provato, inizialmente, a calcolarli per ogni istante di tempo considerato nel differenziale il valore precedente e quello successivo, ma le misure risultavano troppo sensibili ai rumori esterni.

L'operazione differenziale viene quindi effettuata, come spesso accade, tra due misure poste a una certa distanza dal valore considerato per poter ottenere delle quantità meno sensibili ai piccoli errori casuali che si possono verificare nelle attività sperimentali.

Nello specifico per il calcolo dei differenziali si è considerato il quarto valore precedente e il quarto valore successivo.

### 6.3.1 ACCIAIO *FeP05*

Come già affermato in precedenza con questo materiale sono state effettuate tre prove sperimentali. Si presentano ora i grafici ottenuti nei tre casi in termini di curva reale secondo il metodo ordinario, curva reale ricavata con il metodo Paul et al. e la sovrapposizione delle due curve.

#### 6.3.1.1 Prova 1

Il provino presenta uno spessore di  $1,05\text{ mm}$  e una larghezza di  $19,95\text{ mm}$ . La curva reale secondo il metodo ordinario ottenuta è rappresentata in Fig.34.

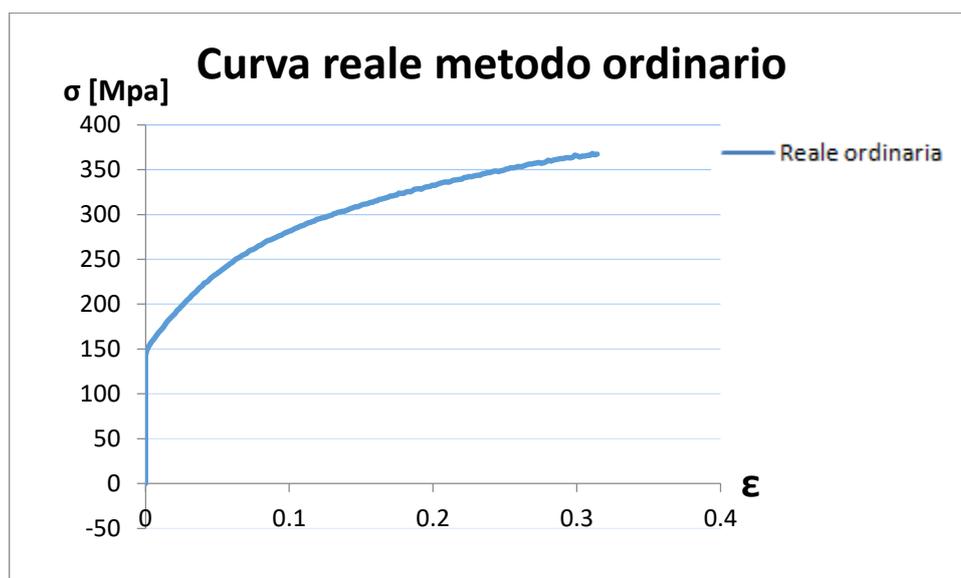


Figura 34 Curva reale metodo ordinario, provino 1, FeP05

Si può osservare come i valori tensione di snervamento e tensione di rottura siano in linea con quelli definiti in precedenza per lo stesso acciaio. Si riporta ora la curva sforzo-deformazione post necking ottenuta con il metodo Paul et al. (Fig.35 e Fig.36). Per questa prova si è scelto di considerare due punti nella regione di necking, uno interno (Fig.35) e uno più esterno (Fig.36), per poter valutare se vi siano significative differenze nella scelta dei punti.

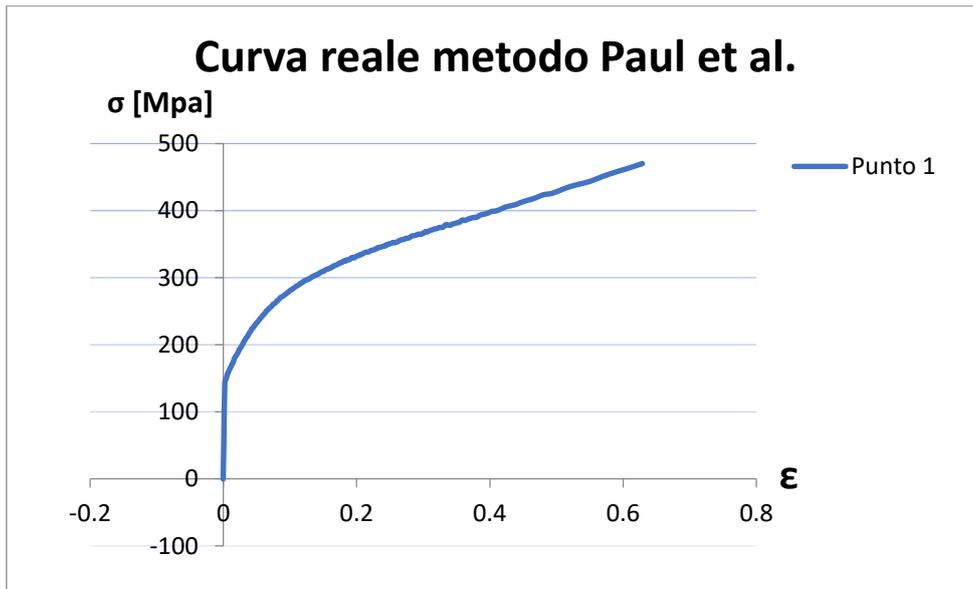


Figura 35 Curva reale metodo Paul et al., provino 1, Punto 1

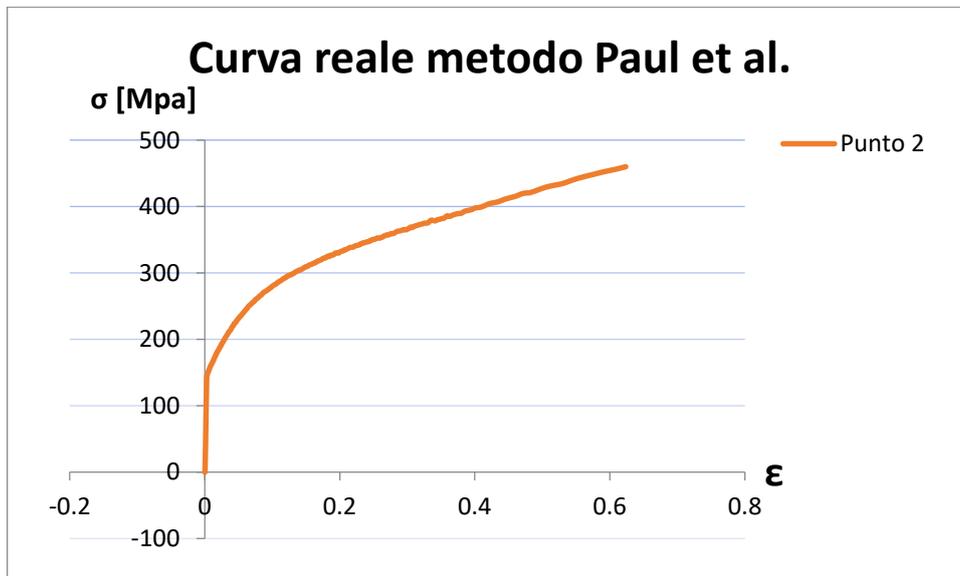


Figura 36 Curva reale metodo Paul et al., provino 1, Punto 2

Per poter valutare se vi siano significative differenze tra le tre curve si è scelto di sovrapporre (Fig.37).

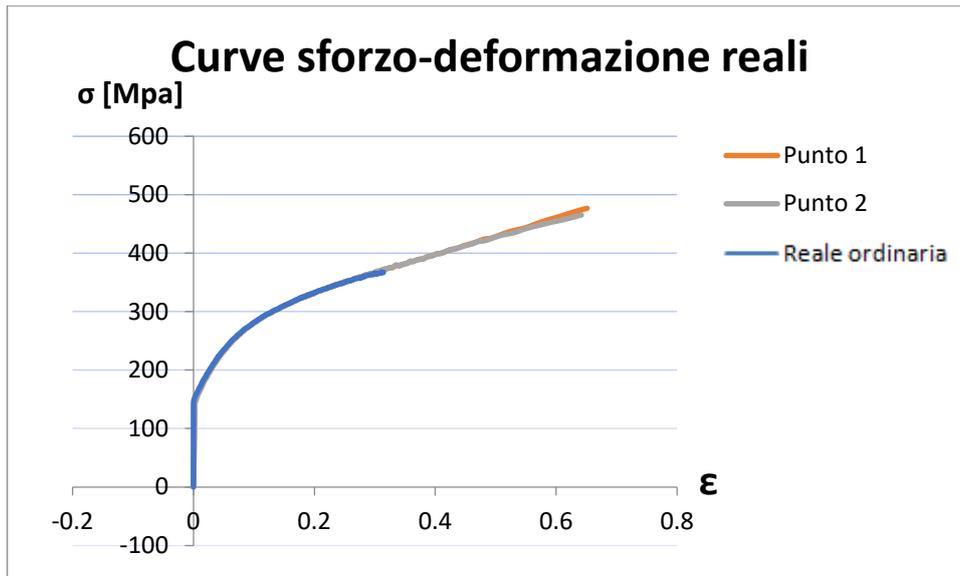


Figura 37 Sovrapposizione delle tre curve sforzo-deformazione, provino 1

Nell'immagine precedente si può osservare che le tre curve sono quasi sovrapposte fino al massimo della curva reale. Inoltre, le due curve che sono state ottenute considerando due diversi punti nella zona del necking non sembrano avere differenze rilevanti. E' interessante notare come si sia passati da un allungamento di circa 0,3% della curva reale ordinaria a circa lo 0,65% delle curve post-necking.

### 6.3.1.2 Prova 2

Per questa prova si è scelto di analizzare un solo punto, quello centrale come raccomandato dal metodo Paul et al. La Fig. 38 rappresenta la sovrapposizione delle curve sforzo-deformazione ottenute.

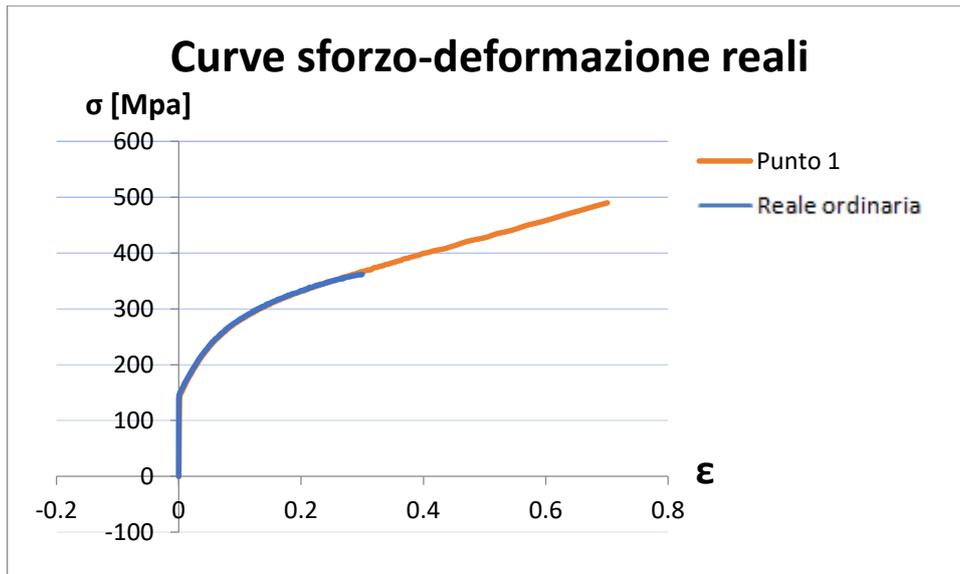


Figura 38 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 2

Anche in questo la curva ottenuta con il metodo di Pule t al. non solo prolunga la curva reale ordinaria, ma la ricopre totalmente. Le deformazioni percentuali passano da circa lo 0,3% della curva reale ordinaria a quasi 0,7% per quella post necking. Inoltre, i valori ottenuti sono prossimi a quelli della prova 1; si tratta infatti dello stesso materiale.

### 6.3.1.3 Prova 3

Per la terza e ultima prova con l'acciaio *FeP05* si è scelto di considerare due punti come nel caso della prima prova: uno più interno, Punto 1, e uno più esterno, Punto 2. L'immagine seguente mostra i risultati ottenuti (Fig.39).

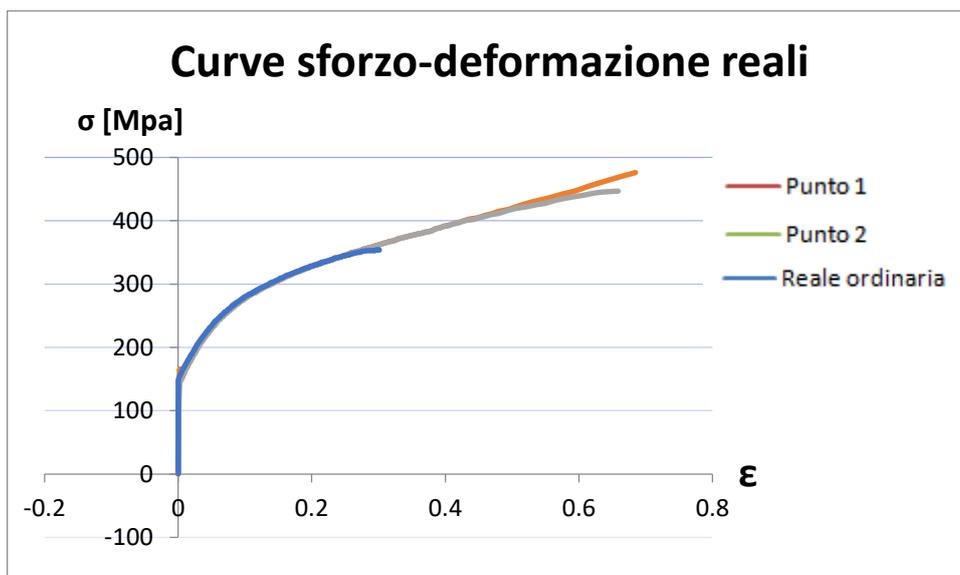


Figura 39 Sovrapposizione delle tre curve sforzo-deformazione, provino 3

Dal grafico si può osservare che la curva sforzo-deformazione reale ordinaria raggiunge allungamenti percentuali di circa lo 0,3%, mentre le altre due che comprendono anche la zona del necking diffuso arrivano a quasi il 0,7%. Si inserisce ora un grafico che sovrappone le tre curve reali ordinarie trovate per i tre provini in l'acciaio FeP05 per osservare se vi siano discrepanze significative tra i risultati ottenuti nonostante si tratti dello stesso materiale (Fig.40).

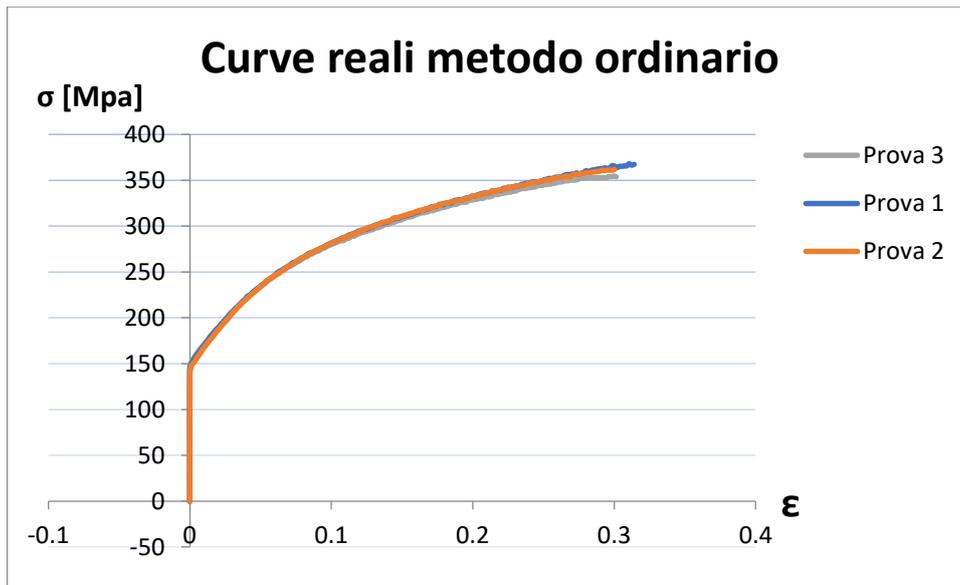


Figura 40 Sovrapposizione delle tre curve reali ordinarie per le tre prove di trazione

Le tre curve reali ottenute con il metodo ordinario presentano praticamente lo stesso andamento e la stessa deformazione percentuale massima, oltre ai valori di tensione di snervamento e tensione massima registrabile nella zona di necking diffuso. Nel grafico sottostante, Fig.41, si svolge lo stesso confronto, ma tra le curve ottenute con il metodo Paul et al..

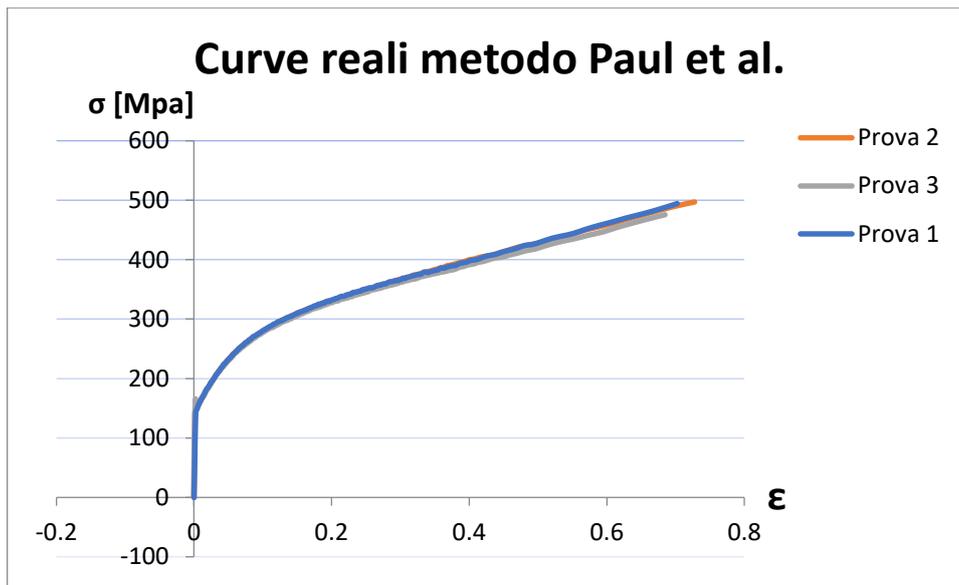


Figura 41 Sovrapposizione delle tre curve ottenute con il metodo Paul et al.

Si può affermare che anche in questo caso le tre curve non presentano significative differenze sia in termini di andamento generale che in termini di tensioni di snervamento e di tensione massima ottenuta nella zona di necking diffuso.

Nei prossimi capitoli si presentano i risultati ottenuti con i tre materiali di cui si sono rielaborate le immagini ottenute in prove sperimentali precedenti.

## 6.3.2 ACCIAIO DP800

Per questo tipo di acciaio sono state rielaborate le immagini di due prove di trazione e se ne sono ricavate le curve sforzo-deformazione reali con il metodo ordinario e reali post necking.

### 6.3.2.1 Prova 1

Il provino utilizzato per questa prova ha uno spessore di  $0,8\text{ mm}$ , mentre ha una larghezza di  $12,3\text{ mm}$ . La Fig.42 riporta le due curve che si sono ottenute.

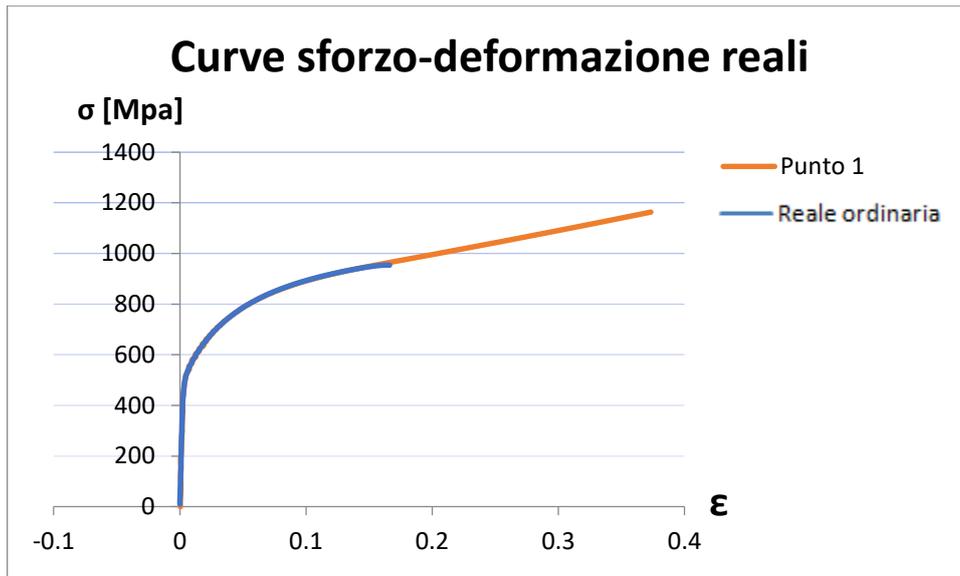


Figura 42 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 1

Come nel caso delle curve ottenute per l'acciaio *FeP05* si sono ricavati i valori delle tensioni per deformazioni percentuali superiori a quelle ottenibili dalla sola curva reale secondo il metodo ordinario.

### 6.3.2.2 Prova 2

Nella seconda prova con l'acciaio *DP800* si è utilizzato un provino di spessore 0,8 mm e una larghezza di 13 mm. Le curve che si sono ricavate sono nella figura sottostante, Fig.43.

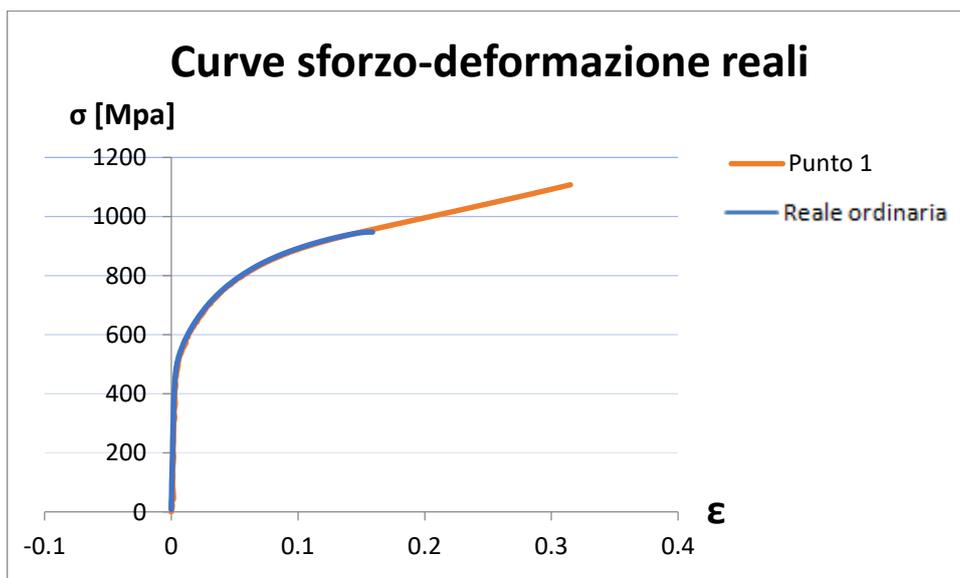


Figura 43 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 2

L'andamento che si osserva per il secondo provino conferma quanto evidenziato precedentemente, in particolare si ha la conferma che il metodo Paul et al. non solo fornisce il tratto di curva relativo al necking diffuso, ma ricalca anche quello della curva reale secondo il metodo ordinario.

### 6.3.3 ALLUMINIO 7075

Anche per l'alluminio 7075 si sono rielaborate le immagini di due prove precedenti per poter applicare il metodo di Paul et al. a un numero maggiore di prove sperimentali.

#### 6.3.3.1 Prova 1

Le dimensioni del provino utilizzato in questa prova sono: 1,85 mm di spessore e 13,05 mm di larghezza. In Fig.44 sono rappresentate le due curve sforzo-deformazione ottenute.

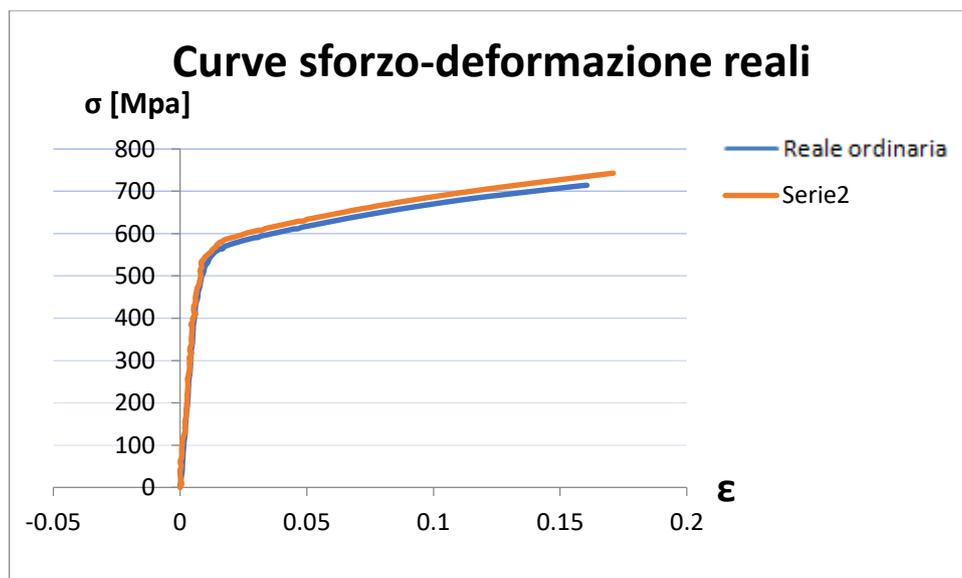


Figura 44 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino 1

Al contrario di quanto osservato per le altre prove presentate precedentemente, in questo caso la curva arancione ottenuta con il metodo di Paul et al. non fornisce un significativo allungamento aggiuntivo rispetto a quello della curva reale secondo il metodo ordinario. La possibile spiegazione è che il provino non presenta una significativa zona di necking diffuso come si è osservato anche dalle immagini delle prove di trazione.

### 6.3.3.2 Prova 2

Quanto affermato per la prova precedente viene confermato anche dalla seconda prova effettuata sullo stesso materiale. In questo caso le dimensioni del provino sono  $1,81\text{ mm}$  di spessore e  $12,97\text{ mm}$  di larghezza. Il grafico successivo mostra le curve ricavate per questa prova (Fig.45).

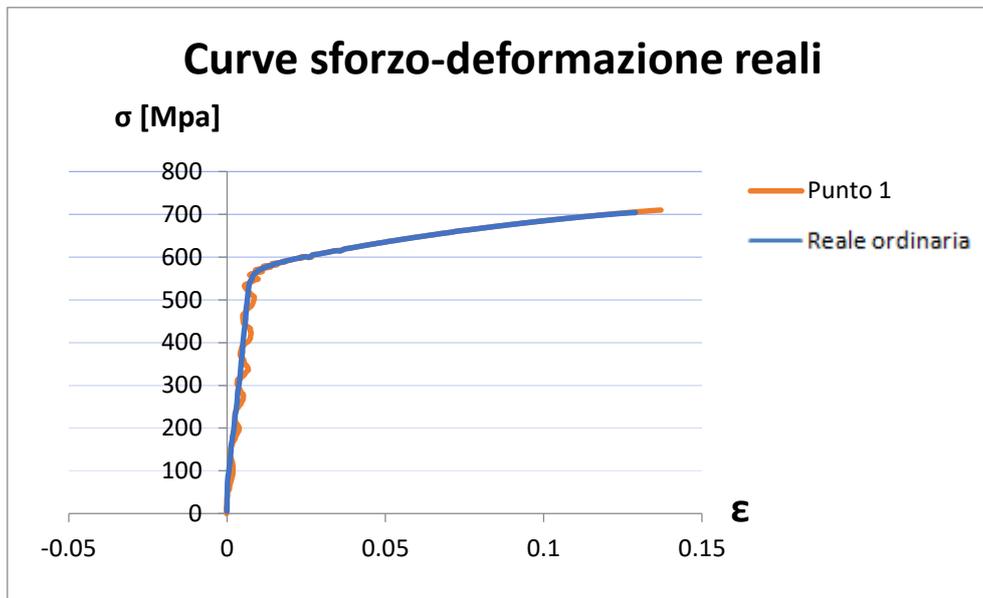


Figura 45 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino2

Come per la prima prova la curva arancione ottenuta con il metodo di Paul et al. non fornisce un significativo allungamento aggiuntivo rispetto a quello della curva reale ordinaria. Inoltre, si evidenzia una leggera ondulazione della stessa curva, forse dovuta alla presenza di rumori esterni.

### 6.3.4 OTTONE *CuZn33*

Per quanto riguarda le due prove in ottone *CuZn33* si hanno a disposizione delle immagini acquisite a frequenza di  $5\text{ Hz}$ , mentre i dati della macchina di trazione sono a frequenza  $1\text{ Hz}$ . Prima di procedere alla rielaborazione dei dati e delle immagini si è quindi dovuto sincronizzare le immagini con i dati provenienti dalla macchina di trazione. Come riferimento si è scelto di prendere il punto di massima forza, ovvero l'istante in cui inizia a vedersi la cricca nelle immagini. Inoltre, per poter avere lo stesso numero di dati si è tenuta in considerazione una sola immagine ogni cinque (frequenza  $5\text{ Hz}$  da portare a  $1\text{ Hz}$ ).

### 6.3.4.1 Prova 1

Il provino presenta uno spessore di 1,20 mm e una larghezza di 20,01 mm. Le curve reale ordinaria e post necking ottenute sono rappresentate in Fig.46.

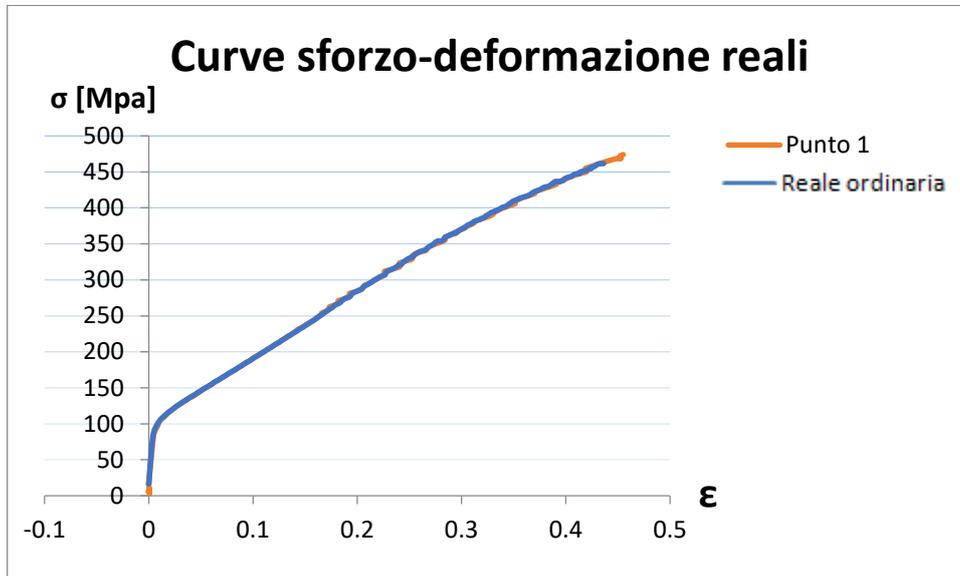
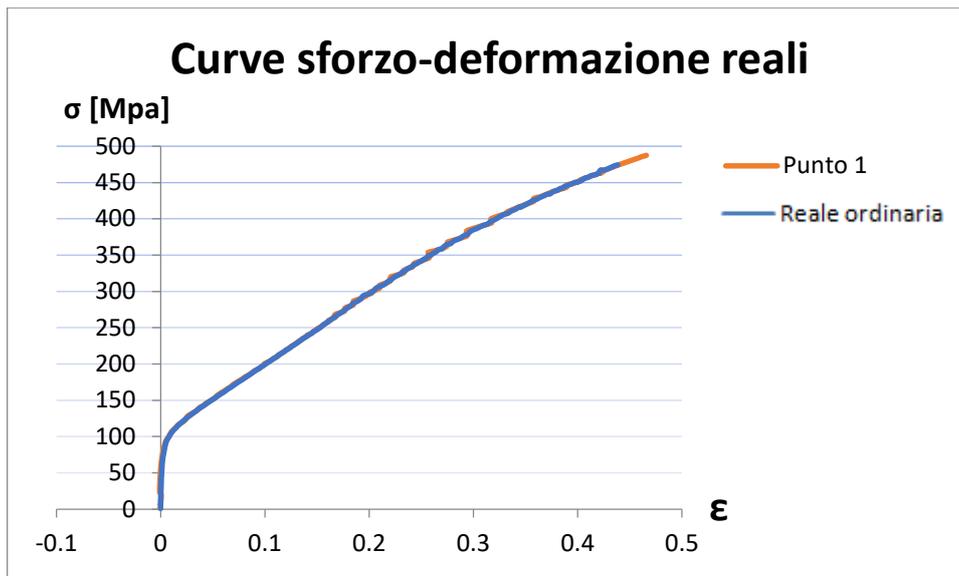


Figura 46 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino1

Come per le prove in alluminio 7075 la curva arancione ottenuta con il metodo di Paul et al. non fornisce un significativo allungamento aggiuntivo rispetto a quello della curva reale ordinaria. Anche in questo caso è dovuto al fatto che non è quasi presente la zona di necking diffuso.

### 6.3.4.2 Prova 2

L'ultima prova a trazione per cui si ricavano le curve sforzo-deformazione è la seconda su provino in ottone CuZn33. In questo caso le dimensioni del campione sono: spessore 1 mm e larghezza 20 mm. Il grafico successivo mostra le curve che sono state ricavate dai dati di questa prova (Fig.47).



*Figura 47 Sovrapposizione delle due curve sforzo-deformazione, provino2*

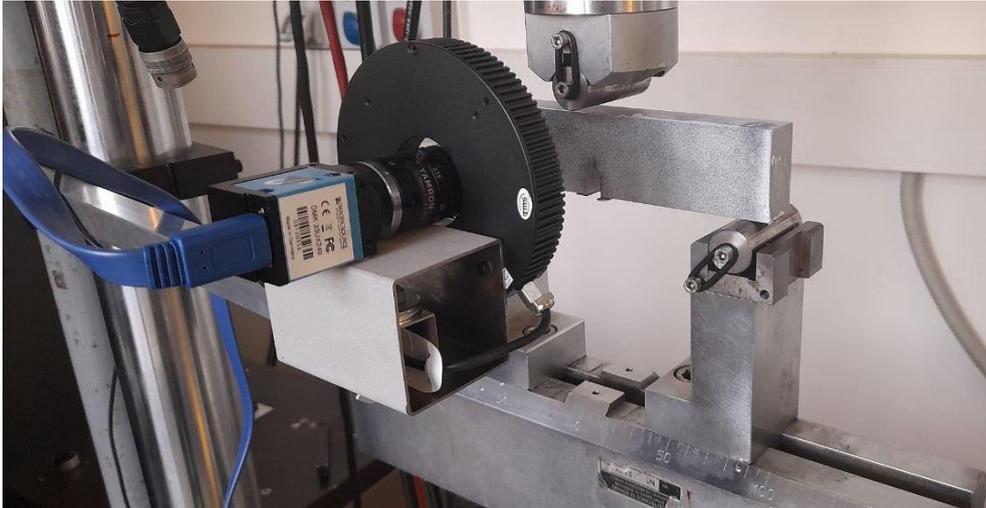
Le curve ottenute presentano le medesime caratteristiche di quelle della Prova 1. Infatti, anche in questo caso la curva arancione e la curva blu arrivano all'incirca allo stesso valore di deformazione percentuale poiché il materiale non presenta quasi una zona di necking diffuso.

## **7. LA PROVA DI TENACITA' A FRATTURA: APPLICAZIONE SPERIMENTALE**

Per questo elaborato di tesi si sono effettuate, oltre alle prove di trazione, alcune prove di tenacità a frattura su tre punti con lo scopo di verificare sperimentalmente l'accuratezza della correlazione digitale d'immagine e la possibilità di calcolare il CTOD. Nel precedente capitolo 4.1 è stato affrontato il problema da un punto di vista teorico; ora si descrive come è stato applicato e quali risultati si sono ottenuti. Si descrivono quindi quali materiali sono stati analizzati, i passaggi sperimentali effettuati e i risultati ottenuti.

Poiché le uniche informazioni sui provini sottoposti a prova di tenacità a frattura sono riferite a una pubblicazione del 1989, si è scelto di effettuare alcune ulteriori analisi sui materiali al termine delle prove. Si è pertanto effettuata un'analisi chimica per conoscerne la corretta composizione. Un'analisi metallografica con il microscopio ottico per confermare che il materiale sia stato bonificato. E, infine, si è eseguita la frattografia, per comprendere se la rottura sia avvenuta per nucleazione di micro vuoti, come tipicamente avviene nei materiali duttili.

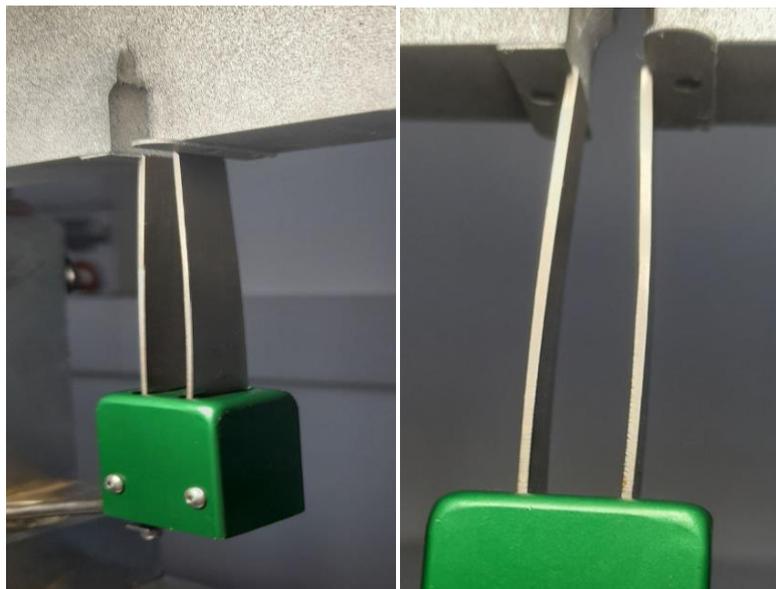
Le prove di tenacità a frattura sono state effettuate con la medesima macchina utilizzata per quelle a trazione, ma si è montata l'apposita strumentazione che consente di effettuare le prove di tenacità a frattura su tre punti come mostrato in Fig.48.



*Figura 48 Macchina per eseguire le prove di tenacità a frattura*

In figura è possibile osservare oltre alla macchina per le prove di tenacità a frattura anche uno dei provini utilizzati per la sperimentazione. La procedura di settaggio e preparazione dell'esperimento è la medesima già descritta per le prove a trazione.

Per quanto riguarda la preparazione della superficie del provino non vi sono differenze con quella del campione per prove di trazione. In questo caso, si sono però aggiunte due placchette metalliche nella parte esterna dell'intaglio con la funzione di fare da appiglio per l'estensimetro meccanico. L'immagine seguente, Fig.49, viene inserita per chiarire come è stato inserito l'estensimetro.



*Figura 49 Posizionamento estensimetro meccanico con placchette metalliche*

Le due placchette metalliche sono state incollate con l'Attak e durante l'inserimento dell'estensimetro si è fatta particolare attenzione a non creare urti che possano causarne il distacco.

## 7.1 MATERIALE

I provini sottoposti a prove di tenacità a frattura su tre punti sono in acciaio 39NiCrMo3 che è tra gli acciai da bonifica più utilizzati in Italia. La bonifica di un materiale avviene principalmente in tre fasi: austenitizzazione, tempra e rinvenimento. L'austenitizzazione consiste nel portare il materiale a una temperatura circa 50°C superiore ad  $A_3$ . La tempra, invece, è un rapido raffreddamento ottenuto immergendo il materiale in acqua, olio o gas a pressione elevata. Infine, si effettua il rinvenimento, ovvero il riscaldamento del materiale fino ad una temperatura inferiore ad  $A_1$  (all'incirca ad una temperatura compresa tra i 450°C e i 650°C), mantenimento a quella temperatura per qualche ora e raffreddamento lento controllato.

Le caratteristiche meccaniche del materiale sono state prese da un articolo pubblicato da Roberti, La Vecchia e Firrao [22]. I provini sono stati ricavati in direzione longitudinale rispetto alla lavorazione del materiale da cui si sono ottenuti. In questo caso il rinvenimento è stato effettuato alla temperatura di 600°C.

Le proprietà meccaniche del materiale riportate in [22] sono:

- $R_m = 1049 \text{ Mpa}$ ;
- $R_{p02} = 922 \text{ Mpa}$ .

Le durezza, invece, sono state ricavate da misure precedenti:

- Durezza campione 37: 333 HV;
- Durezza campione 44: 344 HV;
- Durezza campione 52: 338 HV.

### 7.1.1 ANALISI CHIMICA

L'analisi chimica che si è effettuata su uno dei campioni utilizzati nelle prove di tenacità a frattura, il provino 37, ha fornito i seguenti valori per la composizione chimica dell'acciaio 39NiCrMo3:

- |                |               |
|----------------|---------------|
| – C% = 0,451;  | Si% = 0,245;  |
| – Mn% = 0,671; | P% = 0,012;   |
| – S% = 0,007;  | Cr% = 0,843;  |
| – Mo% = 0,161; | Ni% = 0,788;  |
| – Al% = 0,013; | Cu% = 0,221;  |
| – Co% = 0,021; | Nb% = 0,005;  |
| – As% = 0,032; | B% = 0,001;   |
| – Bi% = 0,004; | Ti% = 0,004;  |
| – V% = 0,003;  | W% = 0,018;   |
| – Pb% = 0,003; | Ca% = 0,002;  |
| – Zn% = 0,011; | Zr% = 0,002;  |
| – N% = 0,012;  | Fe% = 96,470. |

I risultati che si sono ottenuti dall'analisi chimica del campione 37 sono coerenti con quelli riportati nell'articolo [22].

### 7.1.2 METALLOGRAFIA

Per poter osservare una parte di un provino al microscopio ottico è stato necessario effettuare alcune operazioni per predisporre il campione ad essere esaminato. La preparazione metallografica dei due campioni 37 e 44 si è svolta in quattro fasi:

- Prelievo del campione;
- Inglobatura;
- Pulitura/lappatura;
- Attacco metallografico.

Per il prelievo del campione si è utilizzata una troncatrice metallografica che consente di tagliare i metalli. Tale macchinario (Fig.50a), durante il suo funzionamento, raffredda il provino con spruzzi di acqua mescolata con olio per evitare il riscaldamento o la deformazione plastica del campione che comporterebbero una alterazione della microstruttura della superficie che si vuole osservare.



Figura 50 (a) Troncatrice metallografica a sinistra (b) Macchinario per inglobare i campioni a destra

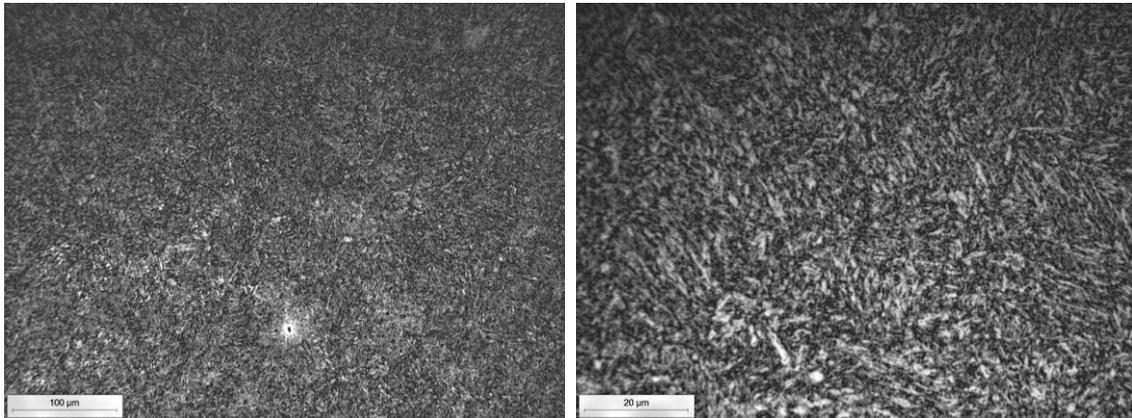
La seconda fase consiste nell'inglobatura a caldo del campione di metallo in resina. Questa operazione viene effettuata utilizzando il macchinario rappresentato in Fig.50b e ha lo scopo di dare al campione una forma regolare, facile da maneggiare.

Il terzo passaggio da svolgere, dopo aver inglobato il campione, è la lappatura. Lo scopo di questa fase è ottenere una superficie liscia in cui non siano visibili le righe creatasi durante il taglio. Si vuole inoltre eliminare il sottile strato alterato e deformato plasticamente dal taglio. Per fare ciò si utilizzano carte di abrasivo con forma circolare con dimensione decrescente delle dimensioni dei grani. In particolare si sono passate in ordine le seguenti carte: 60, 120, 240, 400, 600, 1200, 2500. L'ultimo passaggio si è fatto a  $3\ \mu\text{m}$  passando su un apposito panno del lubrificante e una pasta contenente piccoli frammenti di diamante.

L'ultima azione svolta prima di osservare il campione al microscopio ottico è l'attacco metallografico. Si immerge il pezzo in una soluzione acida che provoca una parziale corrosione della superficie. In particolare, l'attacco metallografico ha maggiore effetto nelle zone con più elevata energia come i bordi di grano o le bande di slittamento che si consumano più velocemente. Inoltre si ha un effetto differente dell'attacco metallografico tra grani esposti con diversi orientamenti cristallografici. Infine, alcune fasi possono consumarsi più velocemente di altre.

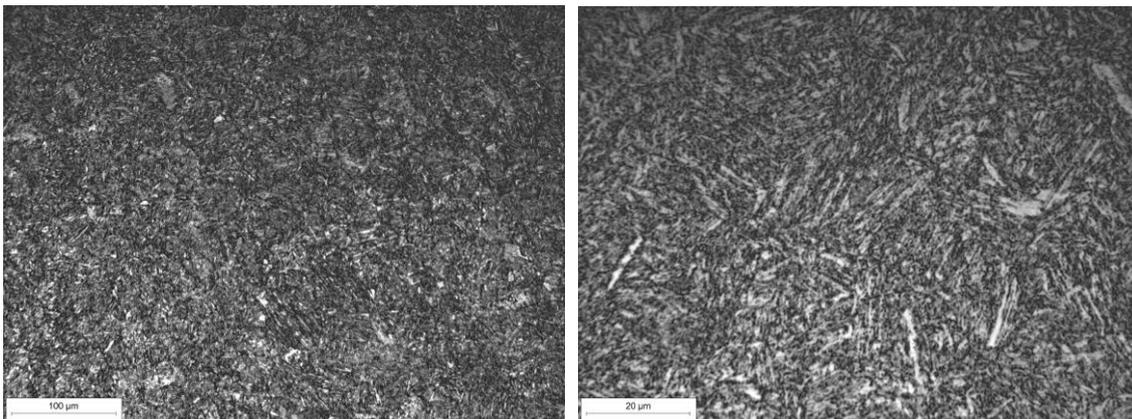
L'attacco metallografico è stato fatto utilizzando il Nital: una soluzione preparata con 200 ml di acetone e con il 3,5 % di acido nitrico.

Dopo aver effettuato la preparazione di due campioni, il 37 e il 44, si è passati ad osservarli al microscopio ottico. Per entrambi si sono acquisite una immagine con ingrandimento 20 e una con ingrandimento 100. La Fig.51 mostra quanto ottenuto per il provino 37.



*Figura 51 Immagini acquisite con microscopio ottico del provino 37, a sinistra ingrandimento 20, a destra ingrandimento 100*

Immagini simili si sono ottenute con l'osservazione del provino 44 (Fig.52).



*Figura 52 Immagini acquisite con microscopio ottico del provino 44, a sinistra ingrandimento 20, a destra ingrandimento 100*

Osservando le immagini è possibile confermare che si tratta di un acciaio bonificato. Si distinguono infatti le strutture aciculari di ferrite e carburi che si sono creati dal rinvenimento della martensite: questa struttura è infatti definita martensite rinvenuta. Il rinvenimento della martensite viene effettuato per incrementare molto la tenacità del materiale a scapito di una diminuzione della durezza dello stesso.

## 7.2 PRECRICCATURA

I provini prima di essere sottoposti a prova di tenacità a frattura su tre punti sono stati precricati. La precricazione si è svolta per i provini 52 e 37, poiché il 44 era già stato preparato in precedenza.

Da un punto di vista sperimentale si sono applicati serie di cicli a frequenza e carico definiti fino a che la cricca calcolata non fosse maggiore di un millimetro. La macchina utilizzata per i cicli è la medesima delle prove di tenacità a frattura. In particolare si è scelto in quasi tutti i casi di applicare una forza di 11 *KN* applicata con una frequenza di 25 *HZ*. La cedevolezza, utilizzata per il calcolo della lunghezza della cricca, è stata calcolata con un apposito programma di calcolo per interpolazione lineare degli scarichi. La tabella sottostante mostra l'aumentare della lunghezza della cricca per il provino 52 al susseguirsi dei cicli di carico e scarico (Tab.1).

fr. Hz	$\Delta P/2$ kN	Pmed kN	Pmin kN	Pmax kN	N parz. [cicli]	Durata min	N tot. [cicli]	Ced mm/kN	U -	a mm
1	4,95	-6,05	1,1	11	10	0,1667	10	0,0094	0,1411	20,3
25	4,95	-6,05	1,1	11	5005	3,3367	5015	0,0090	0,1436	20,0
25	4,95	-6,05	1,1	11	10005	6,67	15020	0,0094	0,1412	20,3
25	4,95	-6,05	1,1	11	10005	6,67	25025	0,0093	0,1417	20,2
25	5,40	-6,60	1,2	12	10005	6,67	35030	0,0112	0,1308	21,5

Tabella 1Prcricatura provino 52

La precricazione effettuata sul provino 52 ha permesso di passare da una lunghezza iniziale di 20,3 *mm* a 21,5 *mm*. Essendo la variazione almeno di 1 *mm* si è considerata accettabile e non si è continuato con nuovi cicli di carico e scarico. La Tab.2 mostra i medesimi calcoli effettuati per il provino 37.

fr. Hz	$\Delta P/2$ kN	Pmed kN	Pmin kN	Pmax kN	N parz. [cicli]	Durata min	N tot. [cicli]	Ced mm/kN	U -	a mm
1	4,95	-6,05	1,1	11	10	0,17	10	0,0088	0,145	19,9
25	4,95	-6,05	1,1	11	10005	6,67	10015	0,0089	0,144	19,9
25	4,95	-6,05	1,1	11	10005	6,67	20020	0,0094	0,141	20,3
25	4,95	-6,05	1,1	11	10005	6,67	30025	0,0106	0,134	21,2

Tabella 2Prcricatura provino 37

La precricatura eseguita sul provino 37 ha permesso di passare da una lunghezza iniziale di 20,3 mm a 21,5 mm. Essendo la variazione almeno di 1 mm si è considerata accettabile e non si è continuato con nuovi cicli di carico e scarico. Infine, si presentano i risultati per il provino 44 (Tab.3).

fr. Hz	$\Delta P/2$ kN	Pmed kN	Pmin kN	Pmax kN	N parz. [cicli]	Durata min	N tot. [cicli]	Ced. mm/kN	U -	a mm
1	4,95	-6,05	1,1	11	50	0,83333	50	0,0099	0,135	21,0
40	4,95	-6,05	1,1	11	10005	4,16875	10055	0,0097	0,136	20,9
40	4,95	-6,05	1,1	11	10005	4,16875	20060	0,0112	0,128	21,8
21	4,95	-6,05	1,1	11	5035	3,99603	25095	0,0112	0,128	21,9

Tabella 3 Precricatura provino 44

Anche in questo caso si ha una variazione di circa 1 mm.

### 7.3 ANALISI STEREOSCOPICA

Per verificare la correttezza del calcolo della lunghezza finale della cricca si è deciso di misurarla sperimentalmente al termine della prova di tenacità a frattura. Lo strumento utilizzato è un microscopio ottico, lo stereoscopio. Per ognuno dei tre provini si è scelto di misurare nove diverse lunghezze. Quelle significative risultano quelle prese al centro del provino. Per meglio comprendere quali misure si sono acquisite si inserisce la Fig.53.

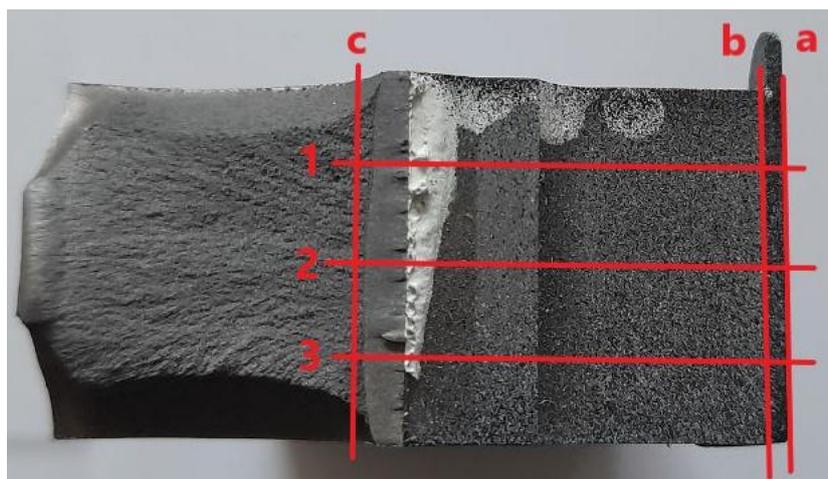


Figura 53 Schema di misurazione della cricca su un provino sottoposto a prova di tenacità a frattura

Le due linee verticali sulla destra (“a” e “b”) si trovano a cavallo della lametta incollata per poter inserire l’estensimetro. La misurazione effettuata in corrispondenza della fine

della precricatura è rappresentata dalla linea “c”. Per ciascuna delle tre linee verticali si sono prese tre misure: “1”, ”2” e “3”. La linea 2 si trova al centro del provino, ovvero a una distanza di 1 *cm* dai lati. Le linee 1 e 3 distano da quella centrale 0,5 *cm*.

E' necessario specificare che con lo stereoscopio non è possibile misurare direttamente una lunghezza, ma si possono solamente prendere delle misure puntuali. La differenza aritmetica tra due misure puntuali fornisce la distanza voluta.

Dalle misure che si sono ottenute si è ottenuto che la precricatura nelle zone esterne ha una lunghezza minore, come si può osservare anche dalla Fig.53. Pertanto, per il calcolo della lunghezza della cricca si è scelto di considerare solamente le misure effettuate al centro del provino, sulla linea 2.

Per quanto riguarda il provino 52, si è calcolata nel capitolo precedente una lunghezza finale della cricca di 21,52 *mm* ; la distanza misurata è 21,71 *mm*.

Nel caso, invece, del provino 37, si è calcolata nel capitolo precedente una lunghezza finale della cricca di 21,16 *mm* ; la distanza misurata è 21,23 *mm*.

Infine, per il provino 44, si è calcolata nel capitolo precedente una lunghezza finale della cricca di 21,86 *mm* ; la distanza misurata è 22,02 *mm*.

Poiché i valori calcolati in precedenza presentano una discrepanza minore del 5% rispetto a quelli ottenuti con il microscopio ottico, si possono ritenere accettabili.

## **7.4 CURVE FORZA-SPOSTAMENTO**

Le curve forza-spostamento sono ottenute dai dati di forza e allungamento proveniente dalla macchina di trazione. Per poter effettuare le prove è necessario impostare alcuni parametri che consentono di definire i cicli di carico e scarico che si devono eseguire. Per le prove di tenacità a frattura su tre punti si sono scelti i parametri di seguito descritti.

Il primo ciclo di carico si è effettuato fino ad un valore di 8500N di forza. I cicli successivi, invece, seguono i seguenti criteri. La fine della fase di carico viene determinata dal primo dei due parametri che si verifica: aumento della forza di 5000N dalla fine dello scarico precedente o uno spostamento di 0,15mm. Per quanto riguarda, invece, la fine della fase di scarico, si raggiunge quando la forza diminuisce di 2500N.

E' stata inoltre impostata una velocità di movimentazione del pistone mobile di 0,025mm/s. Infine, la frequenza di campionamento che si scelta è di 10Hz, multiplo della frequenza di acquisizione delle immagini che è 1Hz.

La curva spostamento deformazione così ottenuta per il provino 44 è rappresentata in Fig.54.

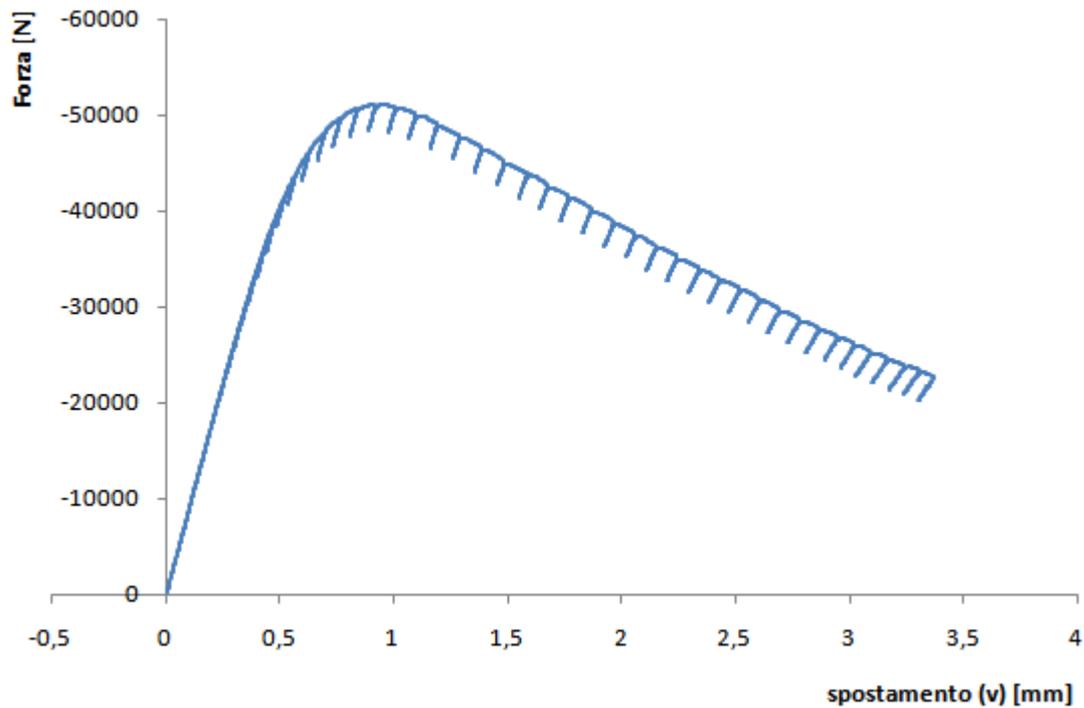


Figura 54 Curva sforzo deformazione provino 44 da prova di tenacità a frattura

Dall'immagine precedente si può osservare che il parametro che termina le fasi di carico nella prima parte della curva è quello sulla forza, infatti il materiale è più rigido. Invece, nella parte finale è il limite imposto sullo spostamento che impone la fine della fase di carico. Si riporta ora (Fig.55) la curva riferita al provino 37.

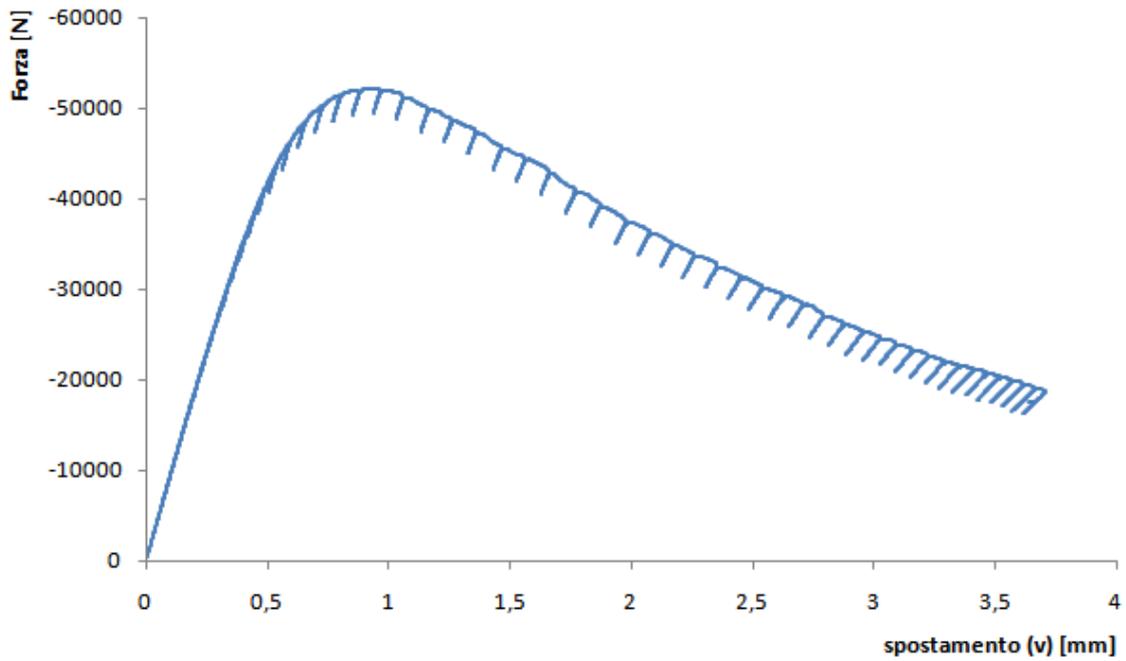


Figura 55 Curva sforzo deformazione provino 37 da prova di tenacità a frattura

Anche in questo caso, come in quello precedente, si può osservare che all'inizio della curva si ha come vincolo più stringente nella fase di carico l'aumento di forza, mentre nella parte finale l'incremento di allungamento. Infine, si riporta anche la curva sforzo deformazione del provino 52 (Fig.56).

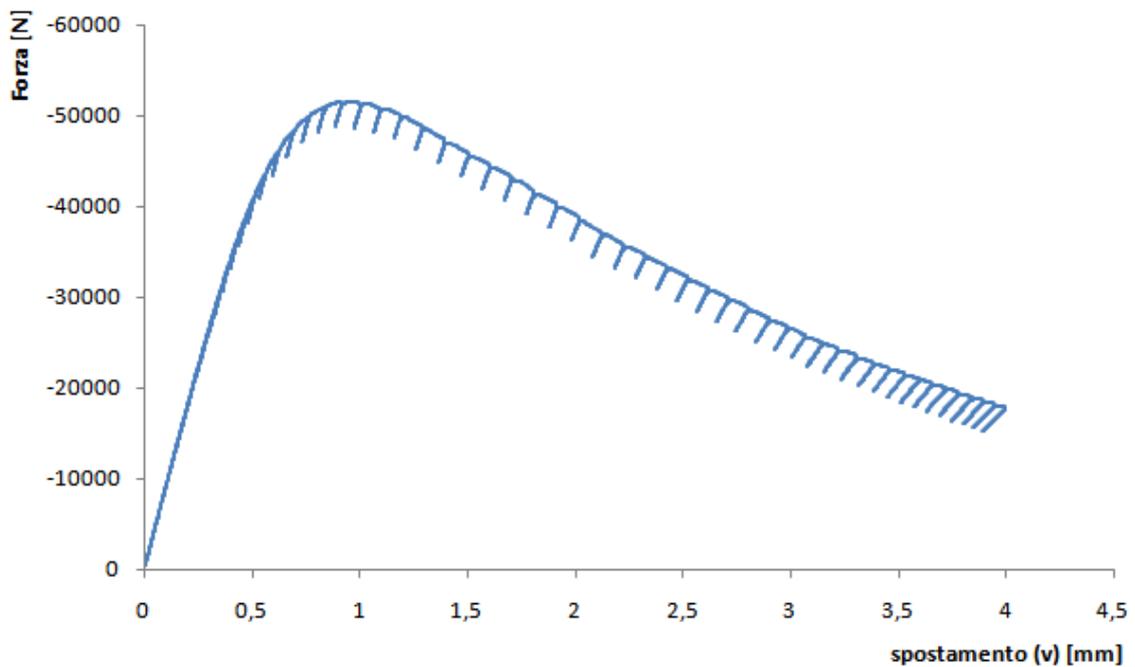


Figura 56 Curva sforzo deformazione provino 52 da prova di tenacità a frattura

In questa prova, come negli altri casi sopra evidenziati, all'inizio della curva prevale il vincolo della forza, mentre nella seconda parte quello in spostamento.

## 7.5 NORMA ASTM E1820

I calcoli effettuati per trovare il valore del CTOD si è fatto seguendo la norma ASTM E1820. Di seguito viene brevemente descritta la parte della normativa di nostro interesse.

Il provino va caricato sotto la traversa della macchina e si devono impostare parametri tali che la durata per eseguire un intero ciclo carico scarico non sia superiore a 10 minuti.

Si procede con il test utilizzando sequenze di carico scarico. Le sequenze di carico scarico devono essere distanziate con un intervallo di spostamento non superiore a 0,01bo. Sono necessari almeno otto punti dati ( $\Delta a$ , J) prima che il campione raggiunga la forza massima. Inoltre, l'intervallo massimo raccomandato di carico scarico per la misurazione dell'estensione della cricca non deve superare né il 50 % di  $P_m$ , né il 50 % della forza attuale, a seconda di quale sia la minore. Si possono ottenere risultati soddisfacenti con scarichi del 10-20% di  $P_m$ .

Per quanto riguarda il calcolo della cricca per i provini utilizzati nelle prove sperimentali di questa tesi si utilizza la seguente formula:

$$\frac{a_i}{W} = [0,999748 - 3,9504u + 2,9821u^2 - 3,21408u^3 + 51,51564u^4 - 113,031u^5]$$

In cui:

$$u = \frac{1}{\left[ \frac{B_e W E C_i}{\frac{S}{4}} \right]^{0.5} + 1}$$

$C_i = \left( \frac{\Delta v_m}{\Delta P} \right)$  in una sequenza carico scarico.

$v_m$  = spostamento della bocca della fessura.

$B_e = B - \frac{(B-B_N)^2}{B}$  se non vi sono intagli laterali  $B_e = B$  = spessore.

Per il calcolo di J, invece, è necessario prima calcolare K:

$$K_{(i)} = \left[ \frac{P_i S}{(BB_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f \left( \frac{a_i}{W} \right)$$

Con

$$f \left( \frac{a_i}{W} \right) = \frac{3 \left( \frac{a_i}{W} \right)^{1/2} \left[ 1,99 - \left( \frac{a_i}{W} \right) \left( 1 - \frac{a_i}{W} \right) \left( 2,15 - 3,93 \left( \frac{a_i}{W} \right) + 2,7 \left( \frac{a_i}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left( 1 + 2 \frac{a_i}{W} \right) \left( 1 - \frac{a_i}{W} \right)^{3/2}}$$

E' così possibile calcolare l'integrale J come:

$$J_{(i)} = \frac{(K_{(i)})^2 (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)}$$

Per il calcolo di quest'ultimo parametro si è seguita la normativa nel paragrafo A1.4.2.2.

Dopo aver calcolato J è possibile ricavare il valore del CTOD seguendo il paragrafo A1.4.5.2 della stessa normativa, la ASTM E1820.

$$\delta_i = \frac{J_i}{m_i \sigma_r}$$

In cui  $\sigma_i$  rappresenta il CTOD,  $J_i$  si è appena calcolato e il parametro  $m_i$  si ricava da:

$$m = A_0 - A_1 * \left( \frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right) + A_2 * \left( \frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right)^2 - A_3 * \left( \frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \right)^3$$

In cui i coefficienti  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  sono calcolati con:

$$A_0 = 3,18 - 0,22 * \left( \frac{a_i}{W} \right),$$

$$A_1 = 4,32 - 2,23 * \left( \frac{a_i}{W} \right),$$

$$A_2 = 4,44 - 2,29 * \left( \frac{a_i}{W} \right),$$

$$A_3 = 2,05 - 1,06 * \left( \frac{a_i}{W} \right).$$

Infine, è necessario che  $\frac{\sigma_{YS}}{\sigma_{TS}} \geq 0,5$ .

## 7.6 VERIFICA METODO DIC

Prima di effettuare le prove meccaniche di tenacità a frattura su tre punti si è scelto di fare su un provino alcuni cicli in campo elastico per poter verificare il corretto funzionamento del sistema ottico di misura. Nello specifico si è applicato un estensimetro meccanico all'estremità della fessura e si è paragonato il valore ottenuto per l'apertura con quello ottenuto con il metodo della correlazione digitale d'immagine.

Per poter rimanere in campo elastico si è applicato un ciclo di carico da  $-11000 N$  a  $-1,1 N$ . Dall'estensimetro meccanico si è ricavata una variazione di apertura della fessura di  $0,09 mm$ . Per quanto riguarda il calcolo con il metodo DIC si è inserito un estensimetro virtuale come mostra la Fig.57.

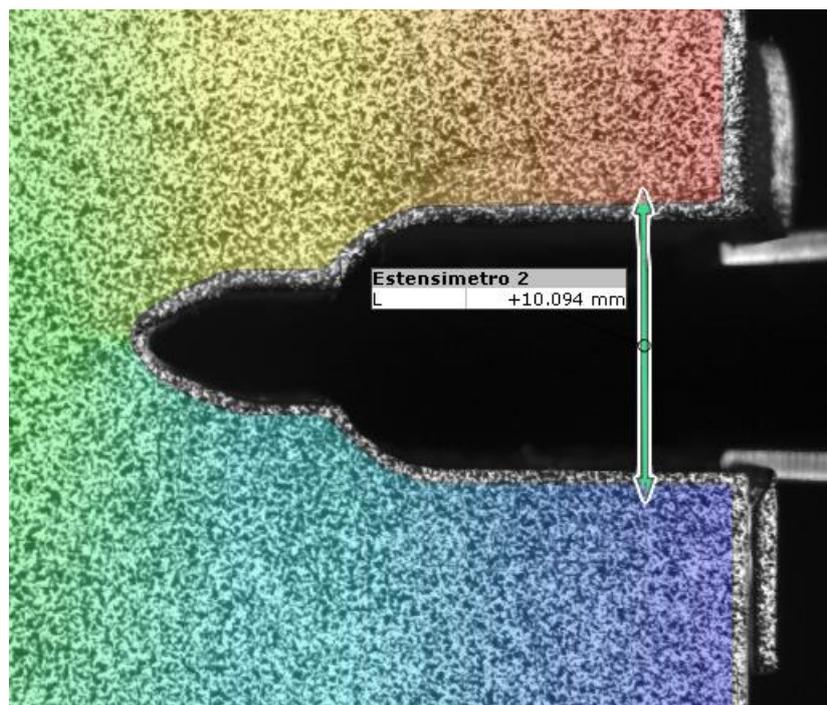


Figura 57 Estensimetro virtuale

L'estensimetro sopra mostrato è stato impostato con una lunghezza iniziale di  $10 mm$ , pertanto ha consentito di misurare una apertura di  $0,094 mm$  che è in linea con quanto ottenuto precedentemente. Il caso appena presentato riguarda solamente una delle varie prove effettuate che non vengono riportate in quanto confermano il corretto funzionamento della tecnica utilizzata.

## 7.7 CALCOLO DEL CTOD

Uno degli obiettivi di questa tesi è verificare se sia possibile ricavare il CTOD utilizzando la correlazione digitale d'immagine. Come già spiegato in precedenza si è paragonato quanto ottenuto con la tecnica ottica con quello che si è calcolato seguendo la norma ASTM E1820. Il metodo seguito per il calcolo del CTOD [16] con la DIC è stato precedentemente descritto nel capitolo 4.1, pertanto si riportano qua solamente le principali accortezze sperimentali e i risultati ottenuti.

La lunghezza degli estensimetri virtuali che si sono utilizzati per le prove di tenacità a frattura sono uno lungo  $0,2\text{ mm}$  (circa 8 pixels) e l'altro  $0,3\text{ mm}$  (circa 12 pixels). I calcoli per ricavare i valori di CTOD dalla normativa sono stati fatti su Excel. Le immagini seguenti, Fig.58a e Fig.58b, mostrano l'andamento della lunghezza misurata dai due estensimetri virtuali nel caso del provino 37.

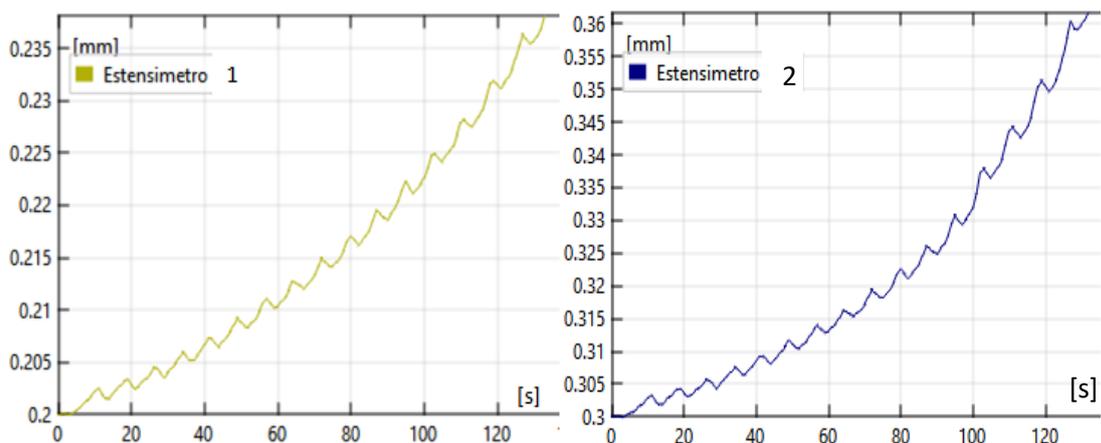


Figura 58 Provino 37 (a) Estensimetro virtuale  $0,2\text{mm}$  (b) Estensimetro virtuale  $0,3\text{mm}$

Nelle immagini è possibile osservare le fasi di carico scarico effettuate durante la prova di tenacità a frattura. Il CTOD è stato misurato come differenza tra ciascun massimo e il valore iniziale della lunghezza dell'estensimetro. La tabella seguente (Tab.4) mostra i valori di CTOD ottenuti dalla norma ASTM E1820 paragonati a quelli ottenuti con i due estensimetri virtuali.

CTOD [mm] ASTM E1820	CTOD [mm] Estensimetro 1: 0,2 mm	CTOD [mm] Estensimetro 2: 0,3 mm
0,000	0	0
0,001	0,002	0,003
0,002	0,003	0,004
0,004	0,004	0,006
0,005	0,006	0,008
0,007	0,007	0,009
0,010	0,009	0,012
0,012	0,011	0,014
0,015	0,013	0,016
0,019	0,015	0,019
0,023	0,017	0,022
0,027	0,019	0,026
0,032	-	0,031
0,037	-	0,038
0,044	-	0,044
0,052	-	0,051
0,060	-	0,060

*Tabella 4 Confronto CTOD norma ASTM E1820 con CTOD da estensimetri virtuali*

Come si può osservare nella Tab.4 l'estensimetro 1 consente di calcolare più correttamente il valore di CTOD per i primi cicli, mentre l'estensimetro 2 consente di ottenere valori migliori per i cicli successivi.

Si riportano anche i risultati ottenuti per il provino 52 come conferma di quanto ottenuto nel caso precedente del provino 37. Le immagini seguenti, Fig.59a e Fig.59b, mostrano l'andamento della lunghezza misurata dai due estensimetri virtuali nel caso del provino 52.

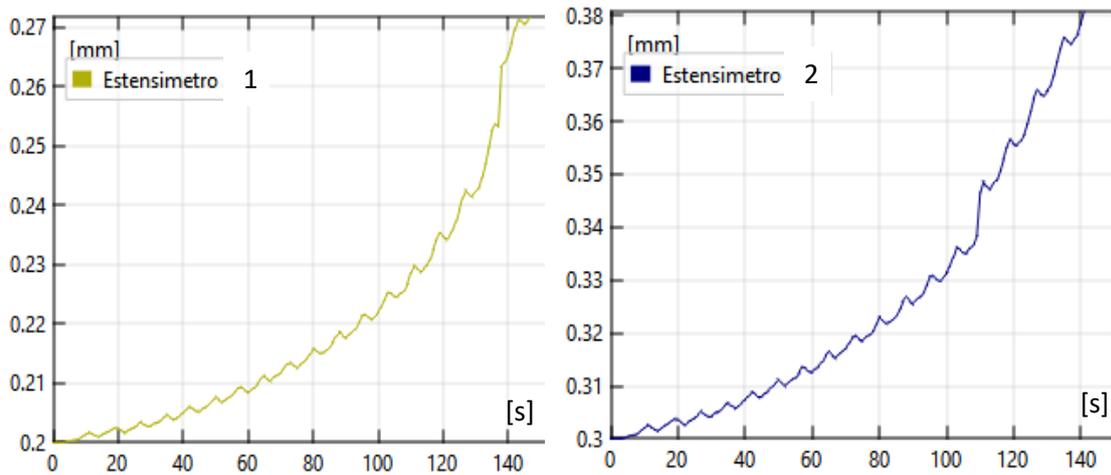


Figura 59 Provino 37 (a) Estensimetro virtuale 0,2mm (b) Estensimetro virtuale 0,3mm

Anche in questo caso le immagini mostrano l'andamento della lunghezza degli estensimetri virtuali che riflettono le fasi di carico scarico effettuate durante la prova di tenacità a frattura. Il CTOD è stato misurato come differenza tra ciascun massimo e il valore iniziale della lunghezza dell'estensimetro. La tabella seguente (Tab.5) mostra i valori di CTOD ottenuti dalla norma ASTM E1820 paragonati a quelli ottenuti con i due estensimetri virtuali.

CTOD [mm] ASTM E1820	CTOD [mm] Estensimetro 1: 0,2 mm	CTOD [mm] Estensimetro 2: 0,3 mm
0,000	0	0
0,001	0,002	0,003
0,003	0,003	0,004
0,004	0,004	0,005
0,006	0,005	0,007
0,008	-	0,009
0,010	-	0,011
0,013	-	0,014
0,016	-	0,016
0,019	-	0,019
0,023	-	0,023
0,028	-	0,027
0,033	-	0,031
0,039	-	0,036
0,046	-	0,049
0,054	-	0,057
0,065	-	0,066
0,078	-	0,076

*Tabella 5 Confronto CTOD norma ASTM E1820 con CTOD da estensimetri virtuali*

In Tabella 5 si osserva che, come nel caso del provino 37, l'estensimetro 1 consente di calcolare più correttamente il valore di CTOD per i primi cicli, mentre l'estensimetro 2 consente di ottenere valori migliori per i cicli successivi.

## 7.8 FRATTOGRAFIA

L'analisi della superficie di frattura si è fatta utilizzando un microscopio elettronico. La scelta di questo strumento al posto del microscopio ottico è dovuta al fatto che le superfici di frattura, essendo rugose e irregolari, non possono subire preparazione metallografica che porterebbe alla perdita di molte informazioni. Inoltre, la microscopia ottica ha una profondità di campo troppo bassa.

Il microscopio elettronico utilizzato per questo studio ha una risoluzione massima di  $1\text{ nm}$ . Per poter osservare un materiale al microscopio elettronico è necessario che sia conduttivo, come i metalli, per poter avere una corretta interazione con il fascio di elettroni. La lunghezza d'onda del fascio dello strumento utilizzato è  $\lambda = 10^{-6}\text{ }\mu\text{m}$ . Se il materiale non fosse conduttivo sarebbe necessario rendere conduttiva almeno la sua superficie, ricoprendola ad esempio con un sottile strato di grafite. Il campione durante l'osservazione è portato in vuoto ed è incollato su un supporto con un nastro biadesivo a base di grafite.

La regolazione della profondità di osservazione avviene variando il voltaggio. Con bassi voltaggi si visualizza la superficie del materiale, mentre ad alti voltaggi si riesce ad osservare più internamente. Inoltre, l'analisi con il microscopio elettronico permette di raccogliere alcuni segnali che danno informazioni sulla composizione chimica del materiale.

Una prima osservazione si è effettuata nella zona di precraccatura come mostra la Fig.60.

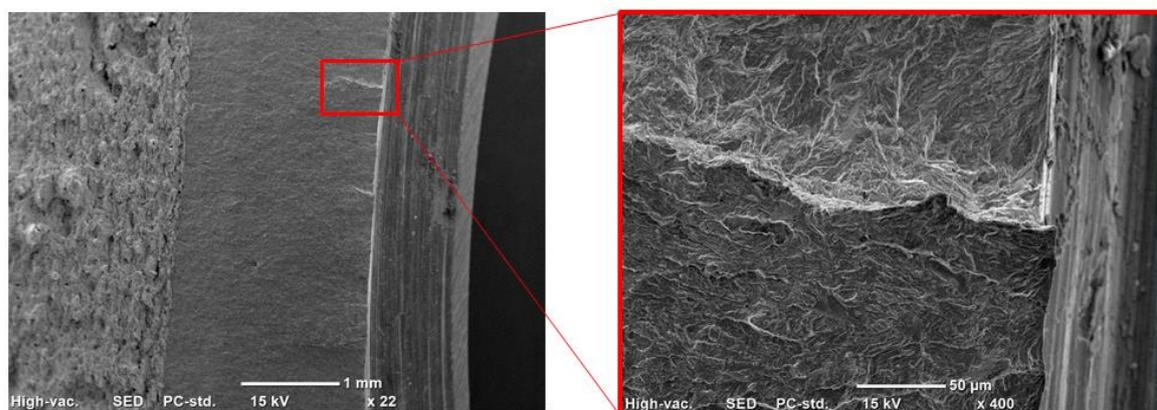
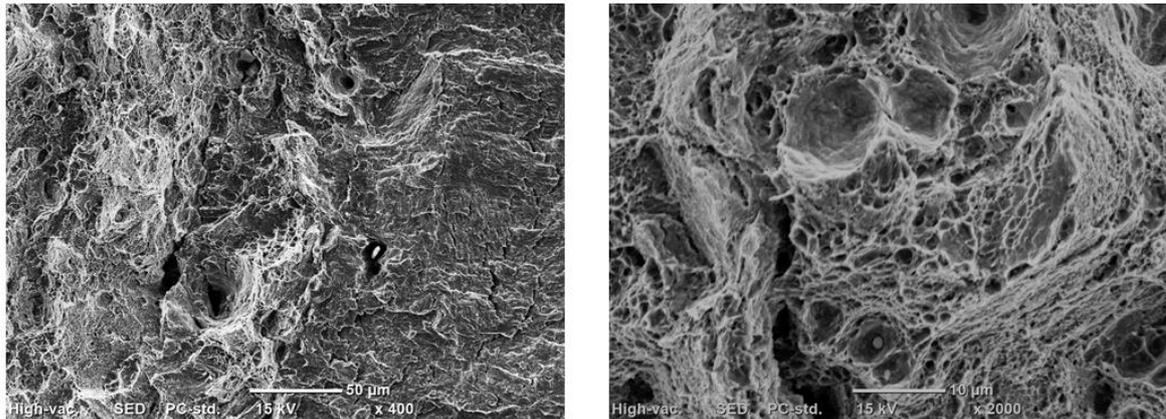


Figura 60 Immagini al microscopio elettronico, zona della precricca

L'ingrandimento mostra la nucleazione di alcune cricche. Infatti, quando la fatica è a carichi elevati, di solito non nuclea in un solo punto, ma nuclea in più punti. Le diverse cricche poi si uniscono in una unica.

Si è inoltre osservata la zona della rottura finale per confermare che si trattasse di rottura duttile (Fig.61).



*Figura 61 Immagini al microscopio elettronico, zona rottura duttile*

Nell'immagine a sinistra è possibile osservare al centro la zona di confine tra la fatica che presenta una superficie più liscia (a destra) e rottura con una superficie più rugosa (sinistra). L'immagine a destra, invece, è un ingrandimento di quella a sinistra e consente di poter affermare che la rottura è duttile. Si osserva, infatti, la nucleazione di micro vuoti: questi si formano davanti all'apice della cricca e man mano che si uniscono ad esso ne favoriscono la propagazione della cricca.

## 8. CONCLUSIONI

Questo elaborato di tesi comprende sia alcune applicazioni sperimentali della correlazione d'immagine digitale, che una ricerca e descrizione di sue particolari tecniche innovative. Per quanto riguarda la sperimentazione, il primo obiettivo che ci si era posti era di determinare le curve sforzo-deformazione di provini sottoposti a prova di trazione, oltre il massimo della curva reale ottenuta con metodo ordinario, in particolare per la successiva zona di necking diffuso. Utilizzando la correlazione digitale d'immagine si è riusciti a ricavare le curve desiderate per tutti i provini e materiali analizzati. Nello specifico i provini considerati erano dei seguenti materiali: l'acciaio FeP05, l'acciaio DP800, l'ottone CuZn33 e l'alluminio 7075. Si sono effettuate anche tre prove di tenacità a frattura su tre punti con lo scopo principale di verificare se fosse possibile ricavare il CTOD dai valori di spostamento e deformazione ricavati con la correlazione digitale d'immagine. Il risultato è che si sono ottenuti valori paragonabili a quelli calcolati seguendo la norma ASTM E1820. Su questi provini si è anche effettuata una analisi stereoscopica e la frattografia. I provini utilizzati nelle prove di tenacità a frattura erano in acciaio 39NiCrMo3. In questa tesi si sono anche presentate da un punto di vista teorico alcune tecniche innovative con DIC, tratte dalla recente letteratura scientifica. Per quanto riguarda le prove a trazione si è proposto un metodo per il calcolo della curva sforzo deformazione post necking per provini cilindrici con l'ausilio di due telecamere e due specchi. Per quanto riguarda, invece, le prove di tenacità a frattura, si sono descritti due metodi: uno che consente di calcolare il CTOD per difetti ellittici utilizzando la DIC 3D, mentre l'altro permette di calcolare l'integrale J.

## Bibliografia

- [1] Riccardo Nobile, “Introduzione all’analisi delle sollecitazioni”, lezioni di Progettazione assistita e meccanica sperimentale, Università del Salento.
- [2] M. Grédiac, F. Sur, B. Blaysat, “The Grid Method for In-plane Displacement and Measurement: A Review and Analysis”, *Strain*, Volume 52, Issue 3, 2016, Pages 205-243.
- [3] 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*, Volume 46, Issue 10, 2008, Pages 746-757.
- [4] Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie, Anand Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science and Tecnology*, Volume 20, Number 6, 2009.
- [5] Bing Pan, Huimin Xie, Zhaoyang Wang, Kemao Qian, Zhiyong Wang, "Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns," *Optic Express*, Volume 16, 2008, Pages 7037-7048.
- [6] Bing Pan, “Recent Progress in Digital Image Correlation”, *Experimental Mechanics*, Volume 51, 2010, Pages 1223-1235.
- [7] Bing Pan, Anand Asundi, Huimin Xie, Jianxin Gao, “Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements”, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 47, Issues 7–8, 2009, Pages 865-874.
- [8] P. Lancaster, K. Salkauskas, “Surfaces Generated by Moving Least Squares Methods”, *Mathematics of Computation*, Volume 37, Number 155, 1981.
- [9] Shengwen Tu, Xiaobo Ren, Jianying He, Zhiliang Zhang, “Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2019.
- [10] Surajit Kumar Paul, Satish Roy, S. Sivaprasad, H.N. Bar, S. Tarafder, “Identification of Post-necking Tensile Stress–Strain Behavior of Steel Sheet: An Experimental Investigation Using Digital Image Correlation

- Technique”, *Journal of Materials Engineering and Perform*, Volume 27, 2018, Pages 5736–5743.
- [11] Z.L. Zhang, M. Hauge, J. Odegard, C. Thaulow, “Determining True Stress–Strain Curve from Tensile Specimens with Rectangular Cross section”, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 36, 1999, Pages 3497–3516.
- [12] J. Kajberg, G. Lindkvist, “Characterisation of Materials Subjected to Large Strains by Inverse Modeling Based on In-Plane Displacement Fields”, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 41, Issue 13, 2004, Pages 3439–3459.
- [13] M. Grediac, F. Pierron, “Applying the Virtual Fields Method to the Identification of Elasto-Plastic Constitutive Parameters”, *International Journal of Plasticity*, Volume 22, Issue 4, 2006, Pages 602–627.
- [14] Bin Chen, Bing Pan, “Measuring true stress-strain curves of cylindrical bar samples with mirror-assisted multi-view digital image correlation”, 2021.
- [15] Anderson T.L., “Fracture mechanics: Fundamentals and Applications”, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [16] J.M. Vasco-Olmo, F.A. Díaz, F.V. Antunes, M.N. James, “Characterisation of fatigue crack growth using digital image correlation measurements of plastic CTOD”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 101, 2019, Pages 332-341.
- [17] Kaveh Samadian, Stijn Hertelé, Wim De Waele, “Measurement of CTOD along a surface crack by means of digital image correlation”, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 205, 2019, Pages 470-485.
- [18] Vavrik Daniel, Jandejsek Ivan, “Experimental measurement of the J integral and energy dissipated in the fracture process zone”, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 129, 2014, Pages 14-25.
- [19] Di Cara Nicola, “Prove di trazione statica”, *Tecnologie meccaniche di processo e prodotto*, Prove e controlli.

- [20] Danila Parato, Tesi “Fatica e termografia di acciai per impiego automobilistico”, Politecnico di Torino, 2009.
- [21] Luca Di Tullio, Tesi “Rilevamento con metodologia DIC-2D delle proprietà meccaniche di materiali metallici”, Politecnico di Torino.
- [22] R. Roberti, G.M. La Vecchia, D. Firrao, “Tenacità alla frattura di un acciaio legato per bonifica rinvenuto a temperature comprese tra 550 e 650°C”, La metallurgia italiana, Volume 81, n.5, 1989.

