

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA CALABRIA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE**

**DOTTORATI DI RICERCA
in
INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE
e
TECNOLOGIE E PIANIFICAZIONE AMBIENTALE**

**RIUNIONE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI
29.11.2010**

VERBALE

Il giorno ventinove del mese di novembre dell'anno duemiladieci, alle ore 15:30, presso il Dipartimento di Strutture dell'Università degli Studi della Calabria si è riunito il Collegio dei Docenti del corso di Dottorato di Ricerca in "Ingegneria dei Materiali e delle Strutture" per discutere e deliberare sul seguente Ordine del Giorno:

1. Comunicazioni;
2. Seminari dottorandi ed adempimenti esame finale XXII e XXIII Ciclo;
3. Richiesta di differimento del termine di presentazione della tesi del dottorando Alessandro Manna;
4. Varie ed eventuali.

Risultano presenti i Proff. Giuseppe SPADEA (in sostituzione del Coordinatore), Alessandro CAMPOLONGO, Fabrizio GRECO, Giuseppe ARTESE, Gabrio CELANI, Sergio D'ELIA, Laura EBOLI, Franco FURGIUELE, Giuseppe GUIDO, Mauro FRANCINI, Laura GRECO, Carmine MALETTA, Gabriella MAZZULLA, Paolo NEVONE BLASI, Francesca SALVO.

Risultano assenti giustificati i Proff. Renato S. OLIVITO (Coordinatore), Domenico BRUNO, Demetrio FESTA, Fabrizio AGGARBATI, Prof. DE SANCTIS, Francesco BENCARDINO, Alessandro GUERRICCHIO, Jaques GUENOT, Vittorio ASTARITA, Giuseppe FORTUNATO, Venanzio Raffaele GRECO, Paolo LONETTI, Luciano OMBRES, Nicola TOTARO, Brunella CANONACO, Pierantonio DE LUCA, Roberta LUCENTE, Alessandro MARZANI, Federico PARISE, Maurizio PONTE, Rosolino VAIANA, Gianfranco CAPILUPPI, Frank SACCOMANNO, Cinzia CIRILLO, Goulias KONSTANDINOS, Maria Francesca VIAPIANA.

Presiede in sostituzione del Coordinatore Prof. Renato S. OLIVITO, assente giustificato, il Prof. Giuseppe SPADEA che, constatato il numero legale, dichiara aperta la riunione e propone l'Ing. Paolo NEVONE BLASI quale segretario verbalizzante. Il Collegio dei Docenti approva all'unanimità.

1. Comunicazioni:

Nulla da comunicare.

2.a) Seminari dottorandi XXII e XXIII Ciclo - Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture:

I dottorandi Marco Bova ed Angela Di Nardo, i cui tutor sono rispettivamente il Prof. Andrea Poggialini e l'Ing. Luigi Bruno per il primo ed il Prof. Giuseppe Spadea per la seconda, previa introduzione da parte degli stessi, relazionano sull'attività di ricerca svolta durante il Corso di Dottorato di Ricerca, descrivendo dettagliatamente le problematiche affrontate ed i risultati conseguiti.

Gli argomenti trattati sono :

- 1) Dottorando Marco Bova (XXIII ciclo): "Caratterizzazione elasto-plastica mediante prove di trazione e interferometria speckle";
- 2) Dottoranda Angela Di Nardo (XXII ciclo): "Efficacia dei materiali compositi fibrorinforzati nel rinforzo strutturale di colonne in cemento armato".

2.b) Seminari dottorandi XXII e XXIII Ciclo – Dottorato di ricerca in Tecnologie e Pianificazione Ambientale:

I dottorandi Salvatore De Marco, Manuela De Ruggiero, Gaetano Saullo e Aldo Trecroci, i cui tutor sono rispettivamente il Prof. Sergio D'Elia, l'Ing. Francesca Salvo, il Prof. Gabrio Celani ed il Prof. Giuseppe Artese, previa introduzione da parte degli stessi, relazionano sull'attività di ricerca svolta durante il Corso di Dottorato di Ricerca, descrivendo dettagliatamente le problematiche affrontate ed i risultati conseguiti.

Gli argomenti trattati sono :

- 1) Dottorando Salvatore De Marco (XXIII ciclo): "Un modello di offerta alternativo per il trasporto delle merci su ferro in Italia";
- 2) Dottoranda Manuela De Ruggiero (XXIII ciclo): "Automated Valuation Methods in un sistema informativo immobiliare pilota";
- 3) Dottorando Gaetano Saullo (XXIII ciclo): "Energia e Pianificazione. Consumi, usi compatibili e fonti rinnovabili per la città del XXI secolo";
- 4) Dottorando Aldo Trecroci (XXII ciclo): "Integrazione delle tecniche di posizionamento satellitare con strumentazioni inerziali. Studio di fattibilità e progettazione di un sistema integrato a basso costo".

In base all'art. 57 del regolamento in materia di dottorato, il Collegio redige per ciascun allievo la relazione sull'attività scientifico-formativa sviluppata durante il corso di dottorato, da allegare alla dissertazione finale. A tal fine, si invitano i componenti del Collegio ed i tutor dei candidati che prevalentemente hanno guidato l'attività di ricerca dei dottorandi a voler illustrare i contenuti delle relazioni predette. Il Collegio prende visione delle relazioni prodotte dai tutor, che presentano le diverse attività formative e scientifiche sviluppate dai candidati e vengono riportate in allegato secondo il seguente ordine:

Marco BOVA - Tutor: Prof. Andrea POGGIALINI (All.1);

Angela DI NARDO - Tutor: Prof. Giuseppe SPADEA (All.2);

Salvatore DE MARCO - Tutor: Prof. Sergio D'ELIA (All.3);

Manuela DE RUGGIERO - Tutor: Ing. Francesca SALVO (All.4);

Gaetano SAULLO - Tutor: Prof. Gabrio CELANI (All.5);

Aldo TRECROCI - Tutor: Prof. Giuseppe ARTESE (All.6).

Alla fine della presentazione delle attività di ricerca svolte dai Dottorandi, il Collegio dei docenti all'unanimità esprime un giudizio molto positivo sia per le tematiche affrontate, sia per i risultati conseguiti ed ammette gli stessi all'esame finale per il conseguimento del titolo di dottore di ricerca.

3. Richiesta di differimento del termine di presentazione della tesi del dottorando Alessandro Manna:

Il prof. Giuseppe Spadea fa presente al collegio che è pervenuta, da parte del dottorando Alessandro Manna, regolarmente iscritto al terzo anno per il XXIII ciclo del corso di dottorato di ricerca in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture, la richiesta di ottenere un anno di proroga per il completamento della tesi di dottorato, per esigenze di approfondimento.

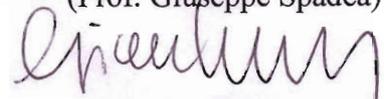
Il Collegio dei Docenti all'unanimità esprime parere favorevole.

4. Varie ed eventuali:

nulla da deliberare.

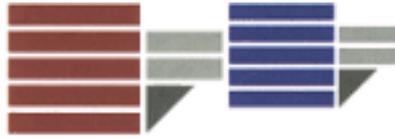
Alle ore 19:30, avendo esaurito l'Ordine del Giorno, e considerato che nessuno chiede la parola, il Presidente dichiara sciolta la riunione.

Per il Coordinatore del Corso di Dottorato
(Prof. Giuseppe Spadea)



Il segretario verbalizzante
(Ing. Paolo Nevone Blasi)





UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Strutture

Dottorato di Ricerca
in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture

XXIII ciclo

S.S.D. ING-IND/14 Costruzione di Macchine

Caratterizzazione elasto-plastica mediante prove di trazione e interferometria speckle

Supervisori

Prof. Ing. Andrea Poggialini

Ing. Luigi Bruno

Coordinatore

Prof. Ing. Renato Sante Olivito

Candidato

Ing. Marco Bova

Anno Accademico 2009-2010

Abstract

In the present work of thesis an experimental equipment for elasto-plastic characterization of engineering materials by tensile tests is presented. The stress state is imposed to the specimen by a testing machine fixed on the optical table and designed for optimizing the performance of a speckle interferometer. All three displacement components are measured by a portable speckle interferometer fed by three laser diodes of 50 *mW*, by which the deformations of small surfaces can be fully analyzed in details. The whole equipment is driven by control electronics designed and realized on purpose, by which it is possible to accurately modify the intensity of the illumination sources, the position of a PZT actuator necessary for applying phase-shifting procedure, and the overall displacement applied to the specimen. The experiments were carried out by a virtual instrument implemented in National Instrument LabVIEW environment, while the processing of the experimental data in Wolfram Mathematica environment. The thesis first reports some preliminary results obtained by a specimen subjected to 3D rigid body motions; the results showed a high accuracy and repeatability of the interferometer. Then, the whole experimental apparatus was employed for the elasto-plastic characterization of a high strength steel specimen. The σ - ϵ curve for the material was determined and the experimental data were approximated using Ramberg-Osgood and Hollomon's constitutive models.

Indice

INTRODUZIONE.....	1
--------------------------	----------

CAPITOLO 1

Tecniche di caratterizzazione e modelli elasto-plastici

1.1	Generalità	4
1.2	Prova di trazione.....	5
1.3	Il test di indentazione	11
1.4	Modelli di comportamento dei materiali.....	16
1.4.1	Materiale perfettamente elasto-plastico	16
1.4.2	Materiale rigido-plastico.....	16
1.4.3	Materiale con incrudimento plastico lineare.....	17
1.4.4	Materiale con incrudimento esponenziale	18
1.4.5	Il modello di Ramberg-Osgood	20
1.4.6	Ulteriori modelli.....	21
1.4.7	Influenza della temperatura e della velocità di deformazione.	21
1.4.8	Influenza della temperatura e del tempo: il fenomeno del creep.	25
1.5	Relazioni tensioni-deformazioni in campo plastico.....	27
1.5.1	Equazioni incrementali delle deformazioni	29
1.6	Bibliografia.....	34

CAPITOLO 2

Tecniche per la misura di grandi deformazioni

2.1	Generalità	36
-----	------------------	----

2.2	L'estensimetria	37
2.2.1	Estensimetri a resistenza	39
2.3	L'interferometria speckle	43
2.3.1	Interferometri per la misura di spostamenti	49
2.3.2	Determinazione della fase.....	50
2.3.3	Principali componenti di un interferometro speckle.....	53
2.3.4	Il fenomeno della decorrelazione.....	57
2.3.5	Applicazioni dell'interferometria speckle.....	59
2.4	Correlazione digitale delle immagini	62
2.4.1	Teoria di base della correlazione digitale	63
2.4.2	Distinzione tra approccio locale e approccio globale	65
2.4.3	Correlazione digitale delle immagini tridimensionale.....	68
2.5	Altre tecniche per la misura di grandi deformazioni.....	70
2.6	Bibliografia.....	73

CAPITOLO 3

Attrezzatura sperimentale

3.1	Generalità	78
3.2	Attrezzatura di carico	79
3.3	Sistema di misura degli spostamenti	86
3.3.1	Regolazione dell'illuminazione	89
3.3.2	Misura di campi di deformazione 3D	91
3.3.3	Sviluppi dell'interferometro.....	96
3.4	Il sistema di controllo.....	97
3.5	Procedura sperimentale per la caratterizzazione elasto-plastica	100
3.6	Bibliografia.....	103

CAPITOLO 4

Risultati sperimentali

4.1	Generalità	105
4.2	Misura di un moto rigido nello spazio	106
4.2.1	Sorgenti di errore.....	111
4.3	Prova di trazione su un provino forato, risultati preliminari	113
4.4	Caratterizzazione di un acciaio da elevata resistenza.....	117
4.5	Bibliografia	130

CONCLUSIONI.....	131
-------------------------	------------

Introduzione

Da sempre l'uomo si è trovato davanti alla scelta di quale fosse il materiale più opportuno da utilizzare per un dato utensile, componente di macchina o elemento strutturale. A testimoniare l'importanza dei materiali, si pensi che alcune tappe dell'evoluzione umana sono addirittura individuate dal nome del materiale che si era in grado di poter lavorare con le tecniche disponibili a quel tempo.

Tutt'oggi, le problematiche relative alla progettazione di un componente passano attraverso la scelta del materiale più adatto alle specifiche di progetto. E' pertanto evidente come sia necessaria la conoscenza delle proprietà dei materiali, sia dal punto di vista della rigidità che da quello della resistenza. Generalmente le caratteristiche di rigidità sono individuate dal modulo di Young, mentre quelle di resistenza dalla tensione di snervamento e dalla tensione di rottura. Inoltre, specialmente nel campo della progettazione dei processi di lavorazione per deformazione plastica, è utile la conoscenza di tutto l'andamento della curva tensione-deformazione del materiale da lavorare.

Il metodo attualmente più diffuso per la caratterizzazione dei materiali è senz'altro la prova statica di trazione. Tuttavia, negli ultimi anni, anche grazie al sempre maggiore sviluppo dei software agli elementi finiti, si sono fatti strada metodi di caratterizzazione basati sul "*reverse engineering*": partendo dal campo di spostamenti (misurati sperimentalmente) di un provino o una struttura, del quale si conoscono le condizioni al contorno dei carichi e dei vincoli, si ricavano le costanti caratteristiche

del materiale in questione facendo corrispondere il campo di spostamenti sperimentale con quello numerico. Un test che bene si presta ad essere utilizzato in questo tipo di approccio è la prova di indentazione, una prova di durezza che consiste nel valutare la resistenza del materiale alla penetrazione da parte di un utensile (normalmente a forma piramidale, conica o sferica).

Per la misura dei suddetti campi di spostamento è necessario utilizzare quindi una tecnica sperimentale a pieno campo, generalmente ottica, come ad esempio la correlazione digitale delle immagini (DIC) o l'interferometria speckle (anche nella variante dell'olografia digitale). In particolare, quest'ultima è una tecnica interferometrica ad elevata sensibilità che si basa sull'utilizzo di una sorgente di luce coerente, tipicamente un laser. Attualmente, l'interferometria speckle rappresenta una tecnica di indagine capace di fornire le deformazioni di provini ed oggetti reali sotto l'effetto di carichi statici e dinamici. Il principio operativo sul quale si fonda tale tecnica ha reso possibile lo sviluppo di diversi metodi basati sull'utilizzo del computer per il rilievo a pieno campo e senza contatto degli spostamenti nel piano, fuori dal piano e delle rispettive derivate (approssimate). Il principale svantaggio dell'interferometria speckle risiede nella cosiddetta *decorrelazione*, un fenomeno purtroppo intrinseco nella tecnica a causa del quale non è possibile misurare grandi deformazioni nel piano della superficie analizzata. Spostamenti troppo elevati, infatti, rischiano di generare un degrado dei campi speckle diffratti dalla superficie, introducendo grandi incertezze sulle misure effettuate.

In questo lavoro di tesi sarà presentato un apparato sperimentale per la caratterizzazione elasto-plastica di materiali ingegneristici attraverso prove di trazione. Lo stato di tensione è imposto ai provini attraverso una macchina di prova, fissata sul banco ottico, realizzata ad hoc per ottimizzare le prestazioni di un interferometro speckle portatile, utilizzato come strumento di misura degli spostamenti del provino. L'interferometro, operante attraverso tre diodi laser, è capace di misurare a pieno campo tutte e tre le componenti di spostamento nello spazio di superfici di estensione limitata.

Il presente lavoro si articola in quattro capitoli. Nel primo capitolo verranno presentate le principali tecniche sperimentali utilizzate per la caratterizzazione elasto-plastica ed i più diffusi modelli di incrudimento adoperati per approssimare il

comportamento del materiale sotto esame. Infine saranno analizzate le relazioni che legano le tensioni e le deformazioni di un materiale in campo plastico. Nel secondo capitolo verranno descritte alcune delle tecniche utilizzabili per la misura delle grandi deformazioni: l'estensimetria, l'interferometria speckle e la correlazione digitale delle immagini. Nel terzo capitolo sarà presentato l'intero apparato sperimentale utilizzato nei suoi vari componenti: l'attrezzatura di carico, l'interferometro speckle e l'elettronica di controllo. Inoltre verrà presentata la procedura sperimentale "incrementale" proposta per evitare il problema della decorrelazione durante la prova di trazione e lo strumento virtuale realizzato in LabVIEW per attuare automaticamente tale procedura via computer. Nel quarto ed ultimo capitolo saranno infine riportati i risultati sperimentali ottenuti: i primi risultati sono relativi ad un test in cui si è utilizzato l'interferometro per misurare un moto rigido nello spazio. Successivamente, saranno mostrati i risultati preliminari ottenuti su di un provino forato sottoposto a trazione, utilizzato per testare l'intero apparato sperimentale su un campo di deformazioni reale. Infine, si passerà ai risultati relativi alle prove di trazione eseguite al fine di determinare i parametri elasto-plastici di un acciaio ad elevata resistenza, analizzando nel dettaglio la procedura numerica per l'elaborazione dei dati sperimentali.

Capitolo 1

Tecniche di caratterizzazione e modelli elasto-plastici

1.1 Generalità

La scelta di un materiale per un componente di macchina o un elemento strutturale è una delle più importanti decisioni che il progettista deve prendere. Dopo aver scelto il processo di lavorazione per generare la geometria desiderata ed il materiale, esso può proporzionare l'elemento in modo da evitare una perdita di funzionalità o in modo che l'affidabilità del componente sia ad un livello accettabile. Al fine di effettuare una buona progettazione, ovviamente, le proprietà del materiale con cui il componente verrà realizzato devono essere note. Ad esempio, per conoscere le deformazioni subite in esercizio, dovrà essere nota la rigidità del materiale (ovvero, le sue proprietà elastiche), mentre per assicurarsi che il componente non ceda si dovranno confrontare le tensioni nella zona critica con la resistenza del materiale. Generalmente, la grandezza usata come riferimento e da non superare è la tensione di snervamento, ovvero quella tensione alla quale corrisponde una quantità prestabilita di deformazione permanente. Tale resistenza è una proprietà del materiale ricavata attraverso prove sperimentali, che verranno illustrate in seguito.

Oltre alla tensione di snervamento e quella di rottura, alla quale avviene il cedimento del provino, è interessante conoscere l'intero andamento della curva tensione – deformazione del materiale. Tali informazioni sono particolarmente utili ad esempio

nel campo delle lavorazioni per deformazione plastica [1.1-1.3], dove la conoscenza approfondita del comportamento elasto-plastico del materiale da lavorare è fondamentale per il corretto dimensionamento dei macchinari ed una ottimale progettazione del processo produttivo.

Nel presente capitolo verranno inizialmente analizzate le tecniche utilizzate per la caratterizzazione dei materiali [1.4-1.7] e successivamente saranno illustrati i modelli elasto-plastici generalmente impiegati per la descrizione del comportamento del materiale stesso.

1.2 Prova di trazione

Le leggi che governano il comportamento dei materiali sono generalmente ottenute facendo riferimento ad uno stato di sollecitazione unidirezionale eseguendo prove unificate di trazione o di compressione. La prova di trazione, in particolare, data la sua semplicità costituisce la tipologia di prova più diffusa, anche se permette di studiare il comportamento plastico di un materiale solo in un intervallo di deformazioni piuttosto limitato. Le forme che devono avere i provini possono essere diverse, e dipendono sia dalla forma dei materiali che si desidera testare ma anche dalla loro natura (ad esempio, per materiali fragili è preferibile utilizzare raggi di raccordo più ampi). La Figura 1.1 mostra un tipico provino cilindrico utilizzato in questa prova e le sue dimensioni caratteristiche: il diametro iniziale d_0 e lunghezza utile l_0 (lunghezza iniziale tra i riferimenti), utilizzati per valutare le deformazioni, vengono misurati prima di iniziare la prova.

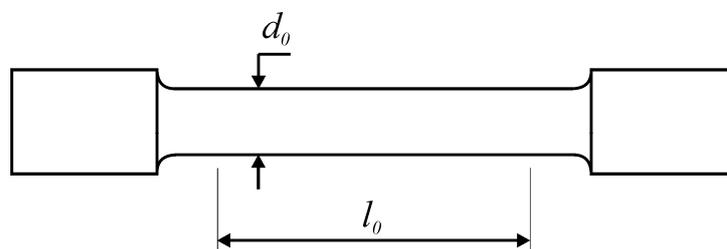


Figura 1.1: Un tipico provino per la prova di trazione.

Successivamente, il provino viene montato sulla macchina di prova e caricato in tensione, in condizioni quasi-statiche, in accordo con le norme ASTM E8 – 09 [1.8], mentre vengono registrati il carico P e le deformazioni. In particolare, per la misura

del carico si utilizza una cella di carico con cui è strumentata la macchina di prova, per le deformazioni si usa generalmente un estensimetro. Per quei materiali che mostrano una dipendenza dei risultati ottenuti dalla velocità di prova andranno rispettati opportuni limiti per la velocità stessa. Esistono vari tipi di afferraggi che consentono di trasferire il carico dalla macchina di prova al provino; per assicurare una tensione assiale di trazione all'interno della lunghezza utile, l'asse del provino deve coincidere con la linea centrale delle teste della macchina di prova. Un non perfetto allineamento produrrebbe delle tensioni dovute a momento flettente che non sono incluse nel calcolo della tensione, che avviene tramite la formula:

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \quad (1.1)$$

dove P è il carico impresso dalla macchina ed $A_0 = (1/4)\pi d_0^2$ è l'area iniziale della sezione trasversale del provino. Nella fase di montaggio del provino sulla macchina di prova, bisogna inoltre fare attenzione a non imprimere alcun precarico al provino stesso.

L'allungamento è dato da $l - l_0$, dove l è la lunghezza del tratto utile che corrisponde al carico P . La deformazione sarà:

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.2)$$

Riportando i dati ottenuti su un grafico, si ottengono i tipici diagrammi tensione deformazione, di cui in Figura 1.2 sono riportati due esempi, uno relativo ai materiali duttili, l'altro ottenuto per materiali fragili. Come si vede, i materiali duttili si deformano molto di più dei materiali fragili.

Analizzando il grafico, è possibile individuare una prima fase in cui il comportamento del materiale è elastico. Per i materiali metallici questo tratto è generalmente lineare, e la relazione tra tensione e deformazione è data dalla legge di Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.3)$$

dove la costante di proporzionalità E , ovvero la pendenza della curva è chiamata *modulo di Young* o *modulo di elasticità*: è un indice della rigidità del materiale e la

sua unità di misura è la stessa della tensione. Non tutti i materiali però presentano un comportamento elastico lineare: alcuni, come le gomme, hanno un legame elastico non-lineare, che si estende per deformazioni molto elevate (Figura 1.3 a)). Altri ancora, invece, mostrano un comportamento anelastico: per questi materiali, la curva di carico non segue esattamente la curva di scarico, e quindi viene dissipata energia (Figura 1.3 b)).

Il tratto di curva compreso tra i punti p ed e è una zona in cui il comportamento del materiale può ancora ritenersi elastico, ma si viene a perdere la linearità. Il punto e è detto *limite di elasticità*. Da questo punto in poi ulteriori aumenti di carico causeranno delle deformazioni permanenti sul provino ed il legame tensioni deformazioni è tipicamente non lineare.

Durante la prova, molti materiali presentano un punto in cui le deformazioni cominciano ad aumentare molto rapidamente in corrispondenza di variazioni di tensione molto più modeste (o al limite nulle): questo punto prende il nome di *limite di snervamento*. Tuttavia non tutti i materiali presentano un limite di snervamento evidente; pertanto si definisce convenzionalmente come *carico unitario di snervamento* S_y quella tensione alla quale corrisponde una deformazione permanente dello 0.2%.

Il *carico unitario di rottura* S_{ut} è invece la massima tensione che si raggiunge nel diagramma tensione-deformazione. Come mostrato in Figura 1.2 a), alcuni materiali hanno un andamento decrescente dopo che è stata raggiunta la tensione massima e si rompono nel punto f del diagramma. Altri, come alcune ghise o acciai ad alta resistenza, si rompono quando la curva è ancora crescente (Figura 1.2 b)).

Il comportamento decrescente che si verifica nei materiali duttili è dovuto al cosiddetto fenomeno della strizione. Occorre sottolineare che il carico richiesto alla macchina di prova per imprimere la deformazione voluta dipende dalla resistenza offerta dal materiale e dalla sezione resistente del provino. La prima cresce all'aumentare della deformazione, a causa dell'*incrudimento* del materiale; tale fenomeno può essere ricondotto, da un punto di vista micro-strutturale, alla progressiva distorsione dei grani cristallini oltre che all'aumento della densità delle dislocazioni ed alla loro interazione. La sezione resistente, invece, si fa progressivamente riducendo man mano che il provino si allunga dal momento che in

campo plastico deve essere rispettata l'invariabilità del volume. In una prima fase, l'aumento di resistenza del materiale dovuto all'incrudimento prevale sulla riduzione della sezione, pertanto il carico richiesto per applicare un'ulteriore deformazione cresce. Ad un certo punto, tuttavia, il flusso plastico si localizza in una specifica sezione del componente e l'area resistente diminuisce in maniera drastica; questo fenomeno prende il nome di *instabilità plastica* o *strizione*. Da questo punto, l'effetto della riduzione della sezione risulta prevalente e quindi si assiste ad una complessiva riduzione del carico necessario.

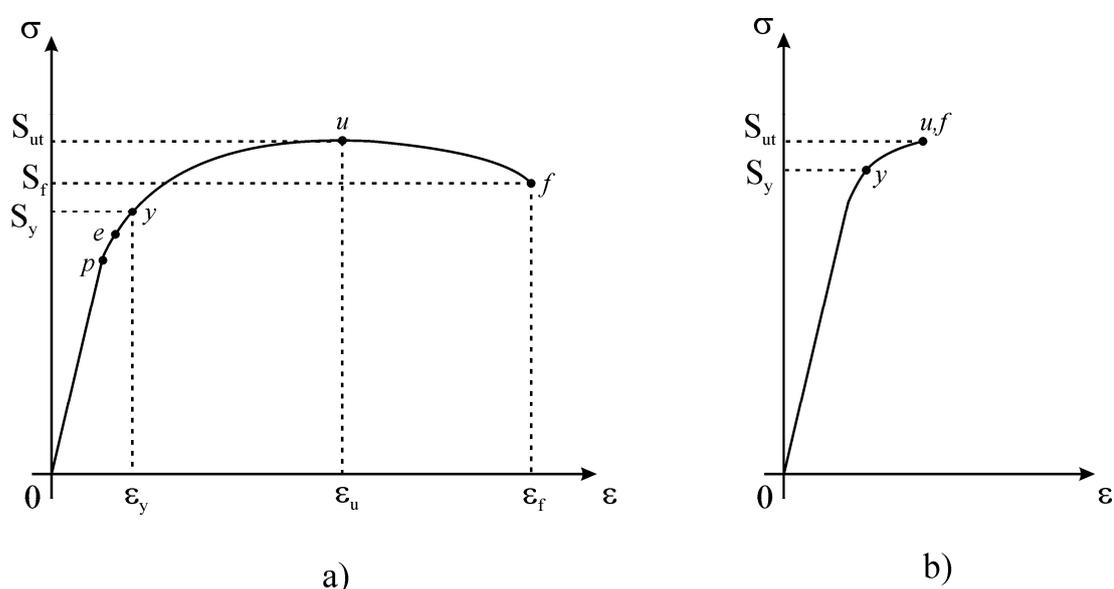


Figura 1.2: Diagramma tensione deformazione ottenuto dalla prova di trazione unificata: a) materiale duttile; b) materiale fragile.

I diagrammi mostrati in figura sono chiamati diagrammi tensione-deformazione *nominali*, perché i valori di tensione e deformazione calcolati nelle Eq. (1.1) e (1.2) non sono reali. Infatti la tensione calcolata con l'Eq.(1.1) si basa sull'area iniziale, mentre in realtà, come si è detto, l'area si riduce in campo plastico e di conseguenza la tensione *reale* è maggiore di quella *nominale* e sarà espressa da:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.4)$$

dove A rappresenta l'area attuale.

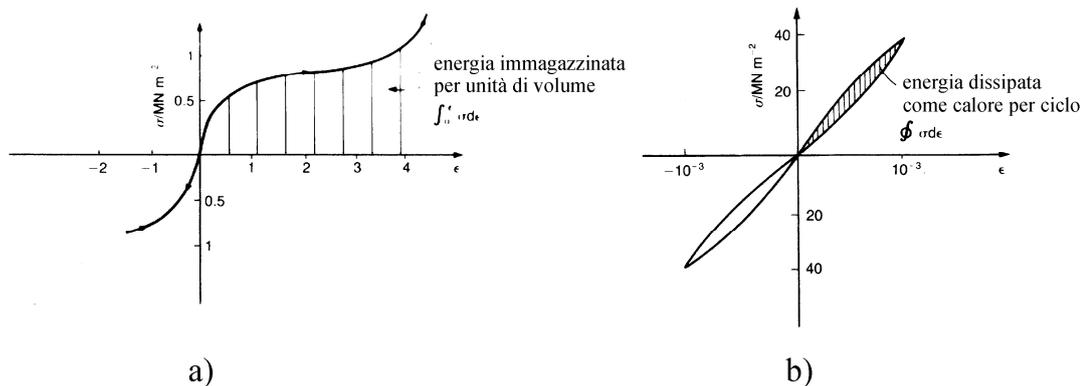


Figura 1.3: Curva tensione-deformazione per: a) un solido elastico non lineare; b) un solido anelastico.

Un discorso simile può essere fatto anche per la deformazione; la deformazione reale o logaritmica è ottenuta dall'integrale degli allungamenti infinitesimi diviso la lunghezza utile al carico P:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.5)$$

Il diagramma tensione reale-deformazione reale può essere ottenuto tramite un indagine sperimentale, correlando, istante per istante, le tensioni in gioco e la sezione del provino a quell'istante, oppure, si può procedere analiticamente partendo dalla curva tensioni nominali-deformazioni convenzionali, supponendo nulle le variazioni di volume in campo plastico, ovvero $Al = A_0 l_0$. Si può quindi scrivere:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} \quad (1.6)$$

ed essendo inoltre

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0}, \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}, \frac{P}{A_0} = \sigma_n \quad (1.7)$$

si ottiene infine:

$$\sigma = \sigma_n (1 + \varepsilon_n) \quad (1.8)$$

relazione che consente di calcolare la tensione reale una volta che siano note la tensione e la deformazione nominali.

L'impiego delle tensioni reali al posto di quelle convenzionali permette di ottenere diagrammi caratterizzati da un andamento sempre crescente della curva, i quali tengono conto esclusivamente del comportamento del materiale ed in particolare del fenomeno dell'incrudimento, mentre non sono influenzati dalle caratteristiche tecniche del provino e dal verificarsi della strizione.

Per quel che riguarda le deformazioni, l'impiego di quelle reali presenta, nelle applicazioni pratiche, alcuni rilevanti vantaggi. Il primo vantaggio è quello di poterle sommare: se si suppone di imprimere un certo livello di deformazione su un provino attraverso più fasi successive, la deformazione totale ovviamente dovrà essere pari alla somma delle deformazioni impresse in ciascuno degli stadi; questa condizione è verificata utilizzando le deformazioni reali grazie alle note proprietà dei logaritmi, mentre non è verificata utilizzando le deformazioni convenzionali.

Bisogna osservare che il calcolo della tensione reale con la relazione appena riportata è possibile per valori della deformazione inferiori a quelli per cui si manifesta la strizione. Infatti, da quel punto in poi, nella zona soggetta a deformazione si stabilisce un campo tridimensionale di tensione, e quindi il calcolo di σ richiede l'impiego di un coefficiente di correzione. Il più riconosciuto modello matematico che consente il calcolo di tale coefficiente è quello di Bridgman [1.9], che utilizza il raggio di curvatura del profilo della strizione in ogni istante della prova di trazione.

In alcuni casi, quando si ha a che fare con sezioni sottili, è più pratico adoperare provini con sezione trasversale rettangolare nelle prove di trazione. Tuttavia non ci sono metodi disponibili per la determinazione dell'intera curva tensioni reali-deformazioni reali e la correzione della tensione all'insorgere della tensione è più complicata rispetto al caso in cui si utilizzino provini cilindrici. Ci sono due problemi principali nello sviluppare il metodo. Il primo è come calcolare o misurare l'area reale, che non è solo funzione del carico, ma dipende anche dal rapporto tra le dimensioni della sezione e dall'incrudimento del materiale. Il secondo problema è come correggere la tensione reale dopo la strizione, dal momento che la tensione reale è la "tensione reale media di trazione" nel punto di localizzazione del flusso plastico, dove la distribuzione delle tensioni non è uniforme. Il problema è stato proficuamente

affrontato e risolto da diversi autori analiticamente e con l'ausilio di modelli numerici agli elementi finiti [1.10-1.12].

Fin qui si è parlato esclusivamente di prove di trazione. Il maggior limite di questa prova è che la rottura del provino avviene per allungamenti a volte anche piuttosto contenute, in particolare se si analizzano materiali fragili, e quindi è possibile studiare il comportamento del materiale in un intervallo di deformazioni alquanto limitato. Tale inconveniente può essere risolto effettuando prove di compressione, eseguita comprimendo tra piatti piani e paralleli provini assialsimmetrici o prismatici; in questo tipo di prova il comportamento del materiale può essere valutato in un campo di deformazione molto più ampio. Tuttavia la prova di compressione presenta un inconveniente: è infatti difficile creare condizioni di regime monoassiale, come invece avviene nella prova di trazione fino alla strizione. Infatti, l'attrito tra piatti e provino può generare delle tensioni tangenziali sulla superficie di contatto che determinano uno stato tensionale tridimensionale all'interno del provino. Alla luce di tali considerazioni risulta evidente che la prova di compressione può essere applicata in maniera valida solo se si riesce a ridurre sufficientemente l'attrito, con l'utilizzo di opportuni lubrificanti. In questo caso la prova di compressione fornisce risultati più completi rispetto alla prova di trazione, questo perché a compressione i materiali riescono a sopportare deformazioni maggiori prima di giungere a rottura. In alcuni casi, nelle facce del provino a contatto con i piatti sono realizzati dei solchi opportunamente progettati in maniera da intrappolare il lubrificante all'interno del solco e minimizzare l'attrito.

1.3 Il test di indentazione

Le proprietà elasto-plastiche dei materiali possono anche essere valutate attraverso i dati sperimentali provenienti da una prova di indentazione. Diversamente dalla prova di trazione la prova di indentazione è non-distruttiva e può essere applicata sia a provini che a componenti reali. La prova di durezza convenzionale è uno dei metodi più semplici ed antichi per la valutazione della qualità di un materiale e consiste nella valutazione della resistenza di un materiale alla penetrazione di un utensile appuntito. I metodi maggiormente utilizzati per la valutazione della durezza sono essenzialmente

due: le prove di *durezza Rockwell* [1.13] e quelle *Brinell* [1.14]. Le prime sono descritte attraverso il metodo di durezza E-18 normalizzato ASTM e consentono misure facili e veloci; hanno inoltre una buona riproducibilità e la macchina di prova è semplice da utilizzare: il valore della durezza si legge direttamente su un quadrante. I penetratori sono un rombo, una sfera con diametro 1/16” e una punta di diamante, ed il carico che deve essere applicato è rispettivamente di 60, 100 e 150 kg.

Un'altra prova comune è quella per la *durezza Brinell*, in cui il penetratore con cui si applica la forza è una sfera ed il valore di durezza equivale al carico applicato diviso l'area della calotta sferica dell'impronta di penetrazione.

Oltre che per il calcolo della durezza, gli esperimenti condotti già nei primi anni del 1900 [1.15-1.16] hanno mostrato la possibilità di correlare la risposta elasto-plastica di una prova di trazione con i risultati di una prova di indentazione sferica o piramidale.

I principali parametri di un test di indentazione sferica sono: la forza di indentazione P , la pressione media di contatto $p_{av} = P/\pi a^2$, il raggio di contatto a , la profondità di penetrazione permanente h ed il diametro della sfera D (Figura 1.4).

In questi lavori si è concluso che la relazione tra la pressione media e la profondità di penetrazione segue una legge esponenziale, e venne specificato il legame tra la curva pressione-raggio di contatto $p_{av} = p_{av}(a/D)$ e la curva σ - ε_p :

$$\varepsilon_p = 0.4a/D, \quad \sigma = 0.367p_{av}, \quad (1.9)$$

dove ε_p rappresenta le deformazioni plastiche. L'Eq. (1.9) è stata utilizzata in [1.17-1.18] per la determinazione della curva tensioni-deformazioni sulla base di un test di indentazione.

L'analisi numerica del problema dell'indentazione sferica è stata presentata in diversi articoli [1.19-1.20]. Per un materiale elastico non lineare che soddisfi la legge esponenziale $\sigma = H\varepsilon^n$, è stato dimostrato in [1.21] che la relazione tra la pressione ed il raggio di contatto assume la forma:

$$p_{av} = \frac{P}{\pi a^2} = \alpha \beta^n H (a/D)^n \quad (1.10)$$

dove α e β sono costanti universali del valore $\alpha = 2.8$, $\beta = 0.4$. Inoltre, il rapporto

dove ε , ε_e ed ε_p sono rispettivamente le deformazioni totali, elastiche e plastiche.

Una soluzione per il caso di materiale rigido plastico che segue la legge di incrudimento dell'Eq. (1.14) è stata trovata in [1.22]. Le Eq. (1.10) e (1.11), con $\alpha = 3.07$, $\beta = 0.32$, restano immutate mentre l'Eq. (1.12) si modifica come segue:

$$c^2 = 1.4e^{-0.97n}. \quad (1.15)$$

La distribuzione di pressione ottenuta nel caso del modello rigido plastico è differente da quella della soluzione elastica non lineare.

Per i materiali che seguono un modello elasto-plastico ci sono più parametri che entrano in gioco: la profondità di penetrazione nel caso carico h_t , la profondità di penetrazione dopo lo scarico h_p ; allo stesso modo si possono anche definire a_t ed a_p , raggi di contatto negli stati carico e scarico (Figura 1.4).

In alcuni articoli riguardanti l'identificazione dei parametri costitutivi del materiale, in genere viene utilizzata l'Eq. (1.10) ed i parametri H ed n sono specificati misurando le variazioni di P rispetto ad a , dove a viene misurato nella configurazione scarica. Questa assunzione corrisponde a trascurare le variazioni del raggio di contatto durante lo scarico. Graficando in scala doppio logaritmica l'Eq. (1.10) $(P/(\pi a^2) - (a/D))$ la cui pendenza non è altro che n . Tuttavia bisogna ricordare che a causa dello scarico il profilo di indentazione ha un diametro maggiore D_p rispetto al diametro della sfera D .

La correzione dell'Eq. (1.10) in maniera da tener conto della variazione della curvatura di indentazione durante lo scarico è fornita in [1.23]:

$$p_{av} = \frac{P}{\pi a^2} = \alpha \beta^n H (a / D_p)^n \quad (1.16)$$

dove

$$\frac{1}{D_p} = \frac{1}{D} - \frac{1}{D_e} \quad (1.17)$$

e D_e si calcola secondo come trovato da Hertz per lo scarico elastico

$$\frac{a}{D_e} = C_1 p_{av} = \frac{3\pi(1-\nu^2)}{8E} p_{av} \quad (1.18)$$

Nel derivare l'Eq. (1.16) si è trascurata la variazione di a .

In [1.24] si è proposta una differente correzione, rinunciando alla misura di a ed introducendo il raggio di contatto a' , specificato al livello della superficie indeformata. Per un penetratore sferico rigido si ha:

$$a^2 = Dd - d^2, \quad (a')^2 = Dh - h^2 \quad (1.19)$$

Trascurando i termini quadratici h^2 e d^2 ,

$$c^2 = \frac{a^2}{(a')^2} = \frac{D}{h}. \quad (1.20)$$

L'Eq (1.10) può quindi essere espressa nella forma

$$P = \pi\alpha\beta^n Hc^{n+2} (1/D)^2 (a')^{n+2}, \quad (1.21)$$

dove a' è specificato dall'Eq. (1.19), quindi

$$a' = \sqrt{Dh_b - h_b^2} \cong \sqrt{Dh_b} \quad (1.22)$$

e

$$h_b = h_p + \frac{h_e}{2}. \quad (1.23)$$

Qui h_p denota la penetrazione residua per $r = 0$, mentre h_e è la penetrazione elastica recuperabile per $r = 0$, così h_d rappresenta dello spostamento elastico non uniforme sulla superficie di contatto.

Al giorno d'oggi, tuttavia, risultati molto promettenti si stanno ottenendo sfruttando i moderni software agli elementi finiti [1.25]. Infatti, è possibile confrontare il campo di spostamenti ottenuti da una simulazione numerica della prova di indentazione con gli spostamenti attorno all'impronta del penetratore, misurati tipicamente attraverso

tecniche a pieno campo. In questo modo, utilizzando un algoritmo di ottimizzazione, si possono ricavare i parametri costitutivi del materiale in analisi.

1.4 Modelli di comportamento dei materiali

Come affermato in precedenza, spesso è indispensabile, nelle applicazioni ingegneristiche, conoscere la curva tensioni-deformazioni monotona caratteristica dei materiali.

Nei casi più semplici si considera un legame σ - ε lineare, ma spesso bisogna ricorrere ai modelli non lineari, che tengano conto delle deformazioni plastiche. Dal momento che una definizione analitica esatta della curva caratteristica risulterebbe troppo complessa, si ricorre a modelli semplificati, come quelli presentati di seguito [1.26].

1.4.1 Materiale perfettamente elasto-plastico

Questa è una rappresentazione molto semplice e quindi molto utilizzata. A seconda che si sia superato o no la tensione di snervamento, si distinguono due diversi comportamenti:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \sigma \leq S_y \\ \sigma = S_y & \sigma > S_y \end{cases} \quad (1.24)$$

In questo modello (Figura 1.5) si ipotizza che il materiale abbia un andamento lineare fino allo snervamento; superato tale livello di tensione, la curva prosegue in maniera orizzontale, pertanto si trascura l'incrudimento plastico e non si limita il flusso plastico. Il comportamento allo scarico è ipotizzato simmetrico.

1.4.2 Materiale rigido-plastico

Nel caso in cui le deformazioni elastiche siano trascurabili rispetto a quelle plastiche, il modello precedente può essere ulteriormente semplificato utilizzando il modello rigido-plastico, dove si ha:

$$\begin{cases} E \rightarrow \infty \\ \sigma = S_y \end{cases} \quad (1.25)$$

L'andamento del diagramma tensioni-deformazioni è mostrato in Figura 1.6.

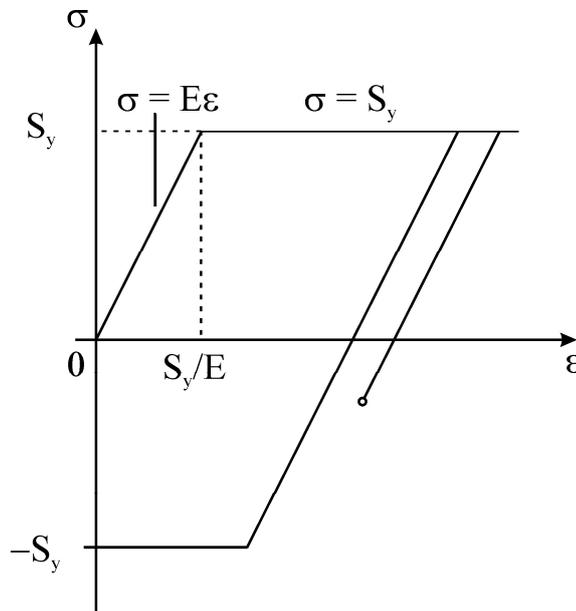


Figura 1.5: Modello perfettamente elasto-plastico.

1.4.3 Materiale con incrudimento plastico lineare

Questo modello (Figura 1.7) descrive l'incrudimento plastico attraverso una funzione lineare:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \sigma \leq S_y \\ \sigma = B + E_1\varepsilon & \sigma > S_y \end{cases} \quad (1.26)$$

B può essere determinato impostando l'equazione di continuità:

$$S_y = B + E_1 \frac{S_y}{E} \quad (1.27)$$

$$B = \left(1 - \frac{E_1}{E}\right) S_y$$

Il valore di E_1 , chiamato modulo di incrudimento, è in genere compreso tra 0 ed $E/10$. Ponendo $E_1 = 0$ si torna al caso del modello perfettamente elasto-plastico, mentre per $E \rightarrow \infty$ si ha il caso del modello rigido plastico.

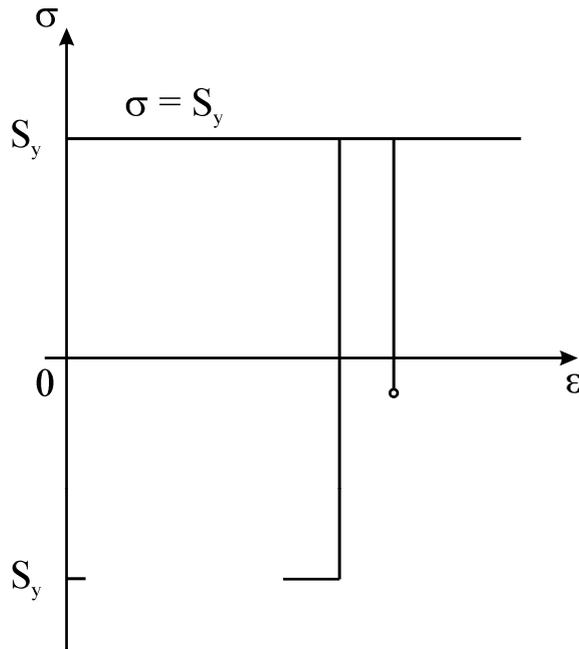


Figura 1.6: Modello rigido-plastico.

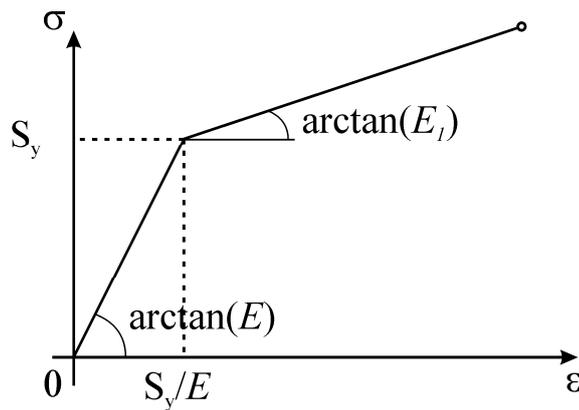


Figura 1.7: Modello con incrudimento plastico lineare.

1.4.4 Materiale con incrudimento esponenziale

Tale modello è descritto dalle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \sigma \leq S_y \\ \sigma = H\varepsilon^n & \sigma > S_y \end{cases} \quad (1.28)$$

dove n , detto *coefficiente d'incrudimento alla deformazione*, ed H , chiamato *coefficiente di resistenza*, sono costanti che descrivono il comportamento plastico del materiale. La Figura 1.8 mostra la schematizzazione in coordinate lineari (a) ed in

scala doppio logaritmica (b), distinguendo le componenti elastica e plastica della deformazione.

Le deformazioni plastiche sono rappresentate da una linea inclinata di n , mentre H è il valore assunto da σ in corrispondenza di $\varepsilon = 1$; le deformazioni elastiche sono invece rappresentate da una retta con inclinazione unitaria. L'ordinata del punto di intersezione delle due rette è $\sigma = S_y$. L'Eq. possono anche essere scritte come segue:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} & \sigma \leq S_y \\ \varepsilon = \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/n} & \sigma > S_y \end{cases} \quad (1.29)$$

Dall'equazione si vede come la tensione di snervamento dipenda dalle altre costanti, infatti:

$$S_y = E \left(\frac{H}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (1.30)$$

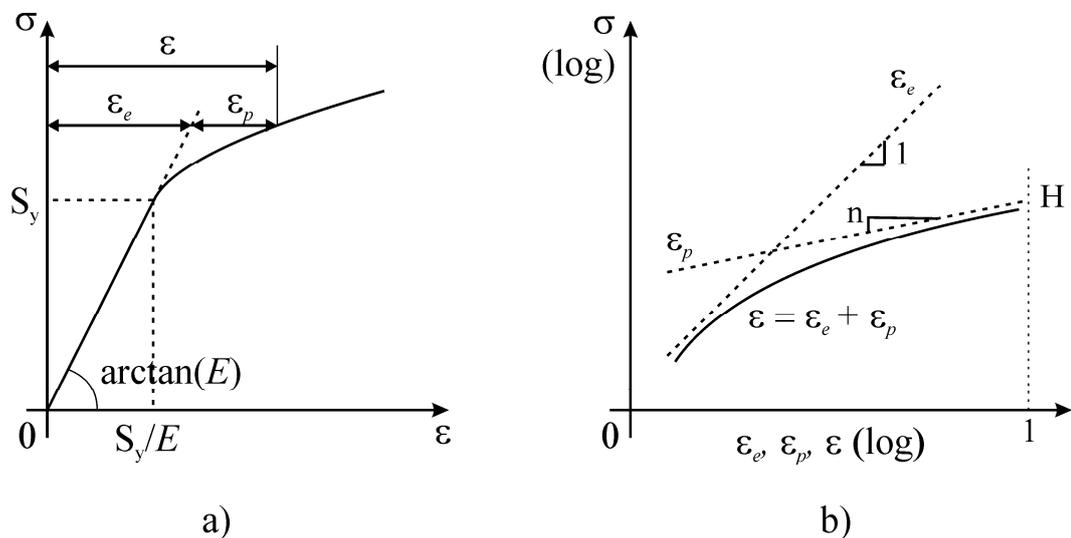


Figura 1.8: Modello con incrudimento esponenziale: a) rappresentazione in coordinate lineari; b) rappresentazione in coordinate doppio logaritmiche.

È interessante notare come il coefficiente di incrudimento n corrisponde alla deformazione plastica accumulata in corrispondenza del fenomeno della strizione: pertanto, più è alto il valore di tale coefficiente, maggiore è l'allungamento che è

possibile imprimere uniformemente sul provino prima che su di esso si manifesti la localizzazione della deformazione e si formi la sezione contratta.

In tabella sono riportati i valori caratteristici di H ed n per leghe metalliche di interesse industriale [1.3]:

Materiale	H [MPa]	n
Acciaio C15	610	0.18
Acciaio C45	960	0.13
Acciaio inossidabile X8CrNi1810	1300	0.30
Alluminio AA1100 (Al99%)	150	0.25
Alluminio AA6061-O (Mg1%, Si0.6%, Cu0.3%)	210	0.20
Alluminio AA6061-T6 (Mg1%, Si0.6%, Cu0.3%)	420	0.04

Tabella 1.1: Valori caratteristici di H ed n per alcune leghe di interesse industriale.

1.4.5 Il modello di Ramberg-Osgood

Questo modello [1.27] considera la deformazione totale come la somma della componente elastica e di quella plastica:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (1.31)$$

In particolare, la componente plastica sarà legata allo sforzo da una relazione esponenziale:

$$\sigma = H\varepsilon_p^n \quad (1.32)$$

Risulta pertanto:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/n} \quad (1.33)$$

Questo modello è particolarmente indicato per quei materiali che presentano una transizione elasto-plastica piuttosto dolce, mentre il modello con incrudimento esponenziale è capace di descrivere meglio comportamenti più bruschi. Il grafico di Figura 1.9 esemplifica la precedente affermazione.

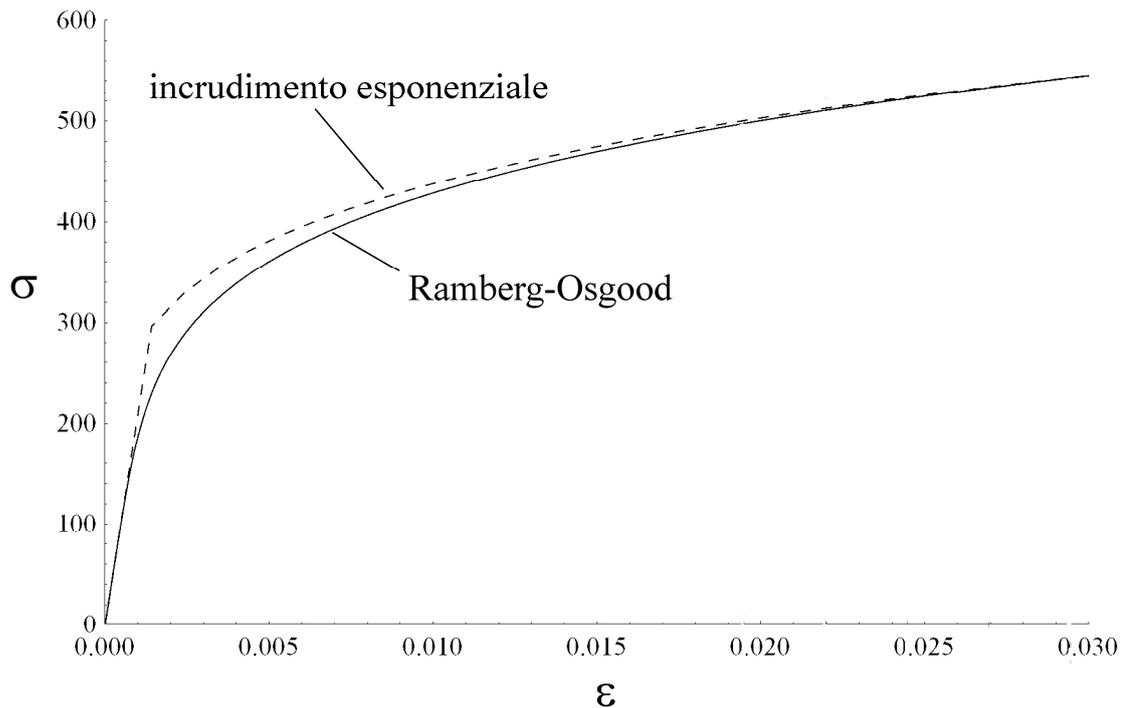


Figura 1.9: Confronto tra il modello di incrudimento esponenziale ed il modello di Ramberg-Osgood.

1.4.6 Ulteriori modelli

Oltre ai modelli di comportamento presentati in precedenza, nella pratica ingegneristica sono accettate anche le seguenti leggi:

$$\text{Legge di Swift: } \sigma = H(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (1.34)$$

$$\text{Legge di Ludwig: } \sigma = \sigma_y + H\varepsilon^n, \quad (1.35)$$

$$\text{Legge di Voce (1): } \sigma = \sigma_y + H(1 - \exp^{-k\varepsilon}), \quad (1.36)$$

$$\text{Legge di Voce (2): } \sigma = \sigma_y + H_1(1 - \exp^{-k_1\varepsilon}) + H_2(1 - \exp^{-k_2\varepsilon}). \quad (1.37)$$

Le costanti H , n , ε_0 , σ_y e k sono parametri da ottimizzare al fine di approssimare al meglio i dati sperimentali.

1.4.7 Influenza della temperatura e della velocità di deformazione.

Le leggi finora presentate permettono di descrivere il comportamento elasto-plastico dei materiali a freddo. In realtà, le prove di trazione condotte su provini metallici mostrano che al crescere della temperatura la tensione di snervamento e di rottura si riducono sostanzialmente, mentre aumenta invece l'allungamento percentuale a

rottura. In pratica il materiale mostra progressivamente un comportamento più duttile e tenace.

Al crescere della temperatura, oltretutto, assume grande importanza anche la velocità di deformazione, ovvero la velocità con la quale viene applicata la deformazione plastica sul provino. Tale parametro è invece trascurabile nel caso si indaghi il comportamento a freddo del provino. La velocità di deformazione può essere definita come segue:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d \left[\ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \right]}{dt} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{V}{l} \quad (1.38)$$

dove V è la velocità alla quale si muove la traversa mobile della macchina di prova a cui è fissato il provino sottoposto a trazione. In generale può essere affermato che, al crescere della velocità di deformazione, le proprietà meccaniche del materiale aumentano (in particolare le tensioni di snervamento e di rottura). Questa circostanza risulta evidente in Figura 1.10 dove sono riportati i risultati di una serie di prove di torsione [1.28] su provini di acciaio C25 alla temperatura di 1100°C ed al variare della velocità di deformazione nell'intervallo $(1 \cdot 10^{-3}, 2.5) \text{ sec}^{-1}$.

Per spiegare la dipendenza del comportamento plastico dei materiali metallici dalla temperatura, evidenziata dagli esperimenti, bisogna analizzare due fenomeni microstrutturali: il riassetto e la ricristallizzazione, entrambi dipendenti dalla temperatura. In particolare, la temperatura di ricristallizzazione è una proprietà caratteristica di ciascun materiale ed è approssimabile alla metà della temperatura di fusione.

Il fenomeno della ricristallizzazione, così come quello del riassetto, è legato alla mobilità degli atomi all'interno del reticolo cristallino. In particolare, nella prima fase del riassetto si assiste ad un riarrangiamento delle dislocazioni secondo configurazioni più regolari; questo comporta la crescita delle caratteristiche di duttilità del materiale e la riduzione di flusso plastico senza che la struttura granulare del materiale subisca visibili trasformazioni.

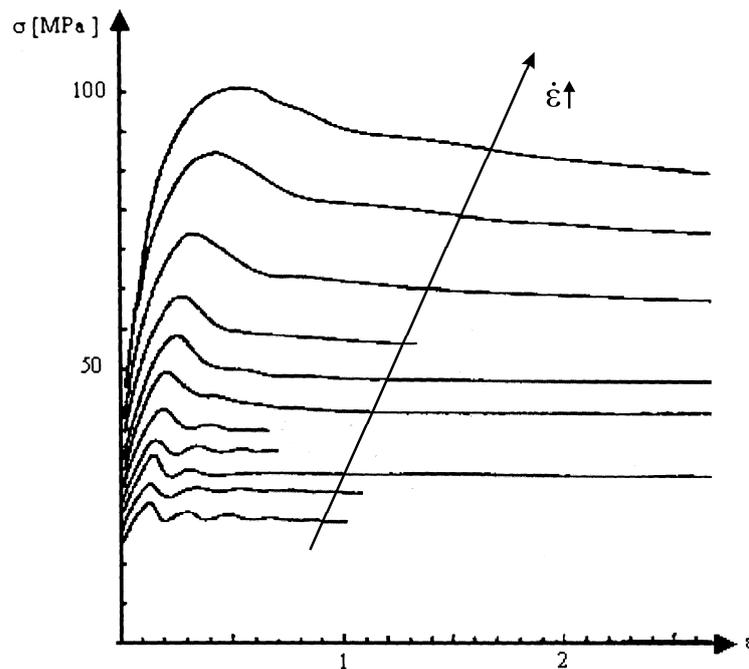


Figura 1.10: Prove di torsione su provini in acciaio C25 alla temperatura di 1100°C e velocità di deformazione variabile.

Diversamente, nella ricristallizzazione, gli atomi hanno acquisito una mobilità ed una capacità di diffusione tale da poter formare nuovi nuclei di cristallizzazione, relativamente esenti da dislocazioni, e quindi una struttura granulare completamente nuova. Di solito, ciò a cui si giunge è una struttura caratterizzata da grani orientati in maniera casuale nello spazio; il materiale, quindi assume caratteristiche isotrope, con una dimensione dei grani che è funzione della temperatura, del tempo in cui si permane a quella temperatura e dell'entità delle eventuali deformazioni plastiche applicate su quel materiale.

Da quello che si è appena detto, si capisce quanto la temperatura sia importante affinché si verifichino i fenomeni del riassetto e della ricristallizzazione, fenomeni che conducono ad un addolcimento delle caratteristiche del materiale, con la riduzione della tensione di snervamento e di rottura e l'incremento della duttilità del materiale, ovvero della capacità di subire tensioni permanenti prima che avvenga la frattura. In Figura 1.11 (tratta da [1.29]) è riportato, in maniera qualitativa, l'andamento delle caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura di prova e di conseguenza dell'attivazione dei fenomeni micro-strutturali prima descritti e della successiva crescita della dimensione media del grano cristallino.

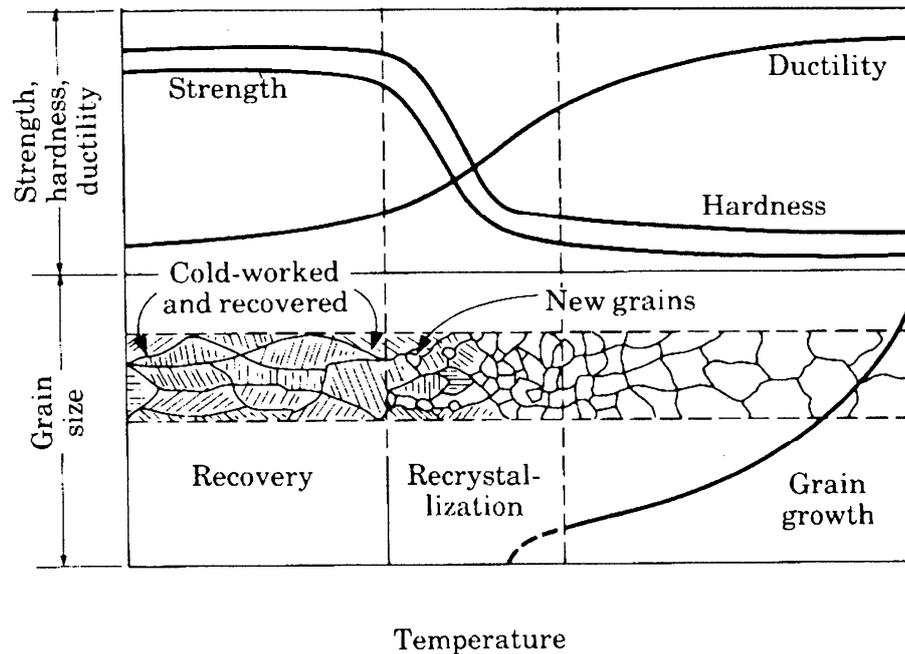


Figura 1.11: Riassetto, ricristallizzazione e crescita del grano.

I concetti finora espressi mostrano che l'attivazione dei fenomeni di riassetto e di ricristallizzazione dipende da precise condizioni energetiche. Tali condizioni possono essere raggiunte, oltre che in virtù della temperatura di prova, anche applicando deformazioni plastiche. In questo caso si parla di riassetto e ricristallizzazione dinamica.

L'attivazione dei fenomeni del riassetto e della ricristallizzazione dinamica consente di spiegare i risultati presentati in Figura 1.10: come si vede i diagrammi tensioni reali-deformazioni reali non presentano l'andamento sempre crescente delle prove condotte a temperatura ambiente, ma mostrano un evidente fenomeno di addolcimento al crescere della deformazione impressa al provino. E' evidente che l'effetto combinato della temperatura di prova e della deformazione plastic applicata determina l'attivazione dei fenomeni di riassetto e ricristallizzazione, ragione per cui la tensione di flusso plastico, dopo aver raggiunto un iniziale massimo, va man mano decrescendo al procedere della deformazione.

Alla luce delle considerazioni appena esposte appare evidente che la modellazione del comportamento plastico di un materiale metallico a caldo richiede modelli analitici più complessi del corrispondente caso a freddo.

1.4.8 Influenza della temperatura e del tempo: il fenomeno del creep.

Il fenomeno del creep [1.30, 1.31], che si manifesta con il crescere della temperatura, è una lenta ma continua deformazione col tempo: le deformazioni, anziché dipendere solo dalla tensione, dipendono adesso anche dal tempo. Generalmente ci si riferisce a questo comportamento come comportamento ad “elevata temperatura”. La temperatura, può definirsi elevata o no a seconda del punto di fusione del materiale considerato. Come regola generale si è trovato che il creep inizia quando:

$T > 0.3$ a $0.4T_M$ per i metalli

$T > 0.4$ a $0.4T_M$ per i ceramici,

dove T_M è la temperatura di fusione in kelvin.

Il creep si manifesta anche nei polimeri, i più comuni dei quali non sono cristallini e non hanno un punto di fusione ben definito. Per essi, la temperatura importante è la temperatura di transizione vetrosa, T_G , alla quale si solidificano i legami di Van der Waals. Sopra tale temperatura i polimeri se caricati si deformano rapidamente a creep. Dal momento che T_G è prossima alla temperatura ambiente per molti polimeri, il creep diventa un problema.

Per valutare il comportamento a creep di un materiale si eseguono test con un attento controllo di temperatura. Generalmente il provino è caricato in tensione o compressione con una forza costante dentro una camera climatica mantenuta a temperatura costante T . La Figura 1.12 mostra una tipica curva di creep ottenuta da un test di questo tipo. La deformazione elastica iniziale ed il creep primario avvengono velocemente, e possono essere trattate come normali deformazioni elastiche. Successivamente, però, inizia il creep secondario ed il materiale entra in una fase stabile: la deformazione aumenta stabilmente col tempo.

Riportando su un grafico il logaritmo della velocità di deformazione della zona stabile rispetto al logaritmo della tensione, a temperatura T costante, come mostrato in Figura 1.13 si può stabilire che:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = B\sigma^n \quad (1.39)$$

dove n è l'esponente del creep, e solitamente varia tra 3 ed 8. Questo tipo di creep è detto creep esponenziale (Per bassi valori di tensione entrano in gioco altri meccanismi, per cui $n \approx 1$).

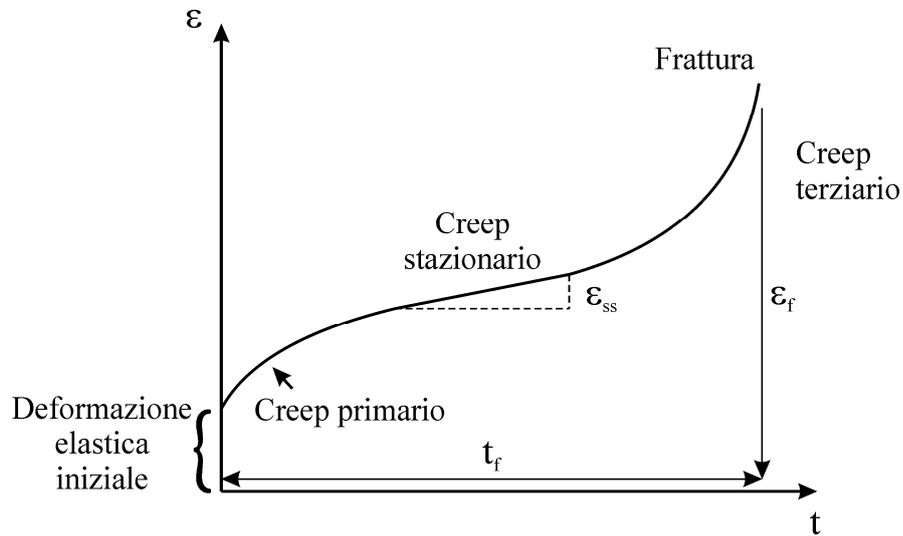


Figura 1.12: Curva di creep.

Se si riporta su un grafico il logaritmo naturale di $\dot{\epsilon}_{ss}$, rispetto al reciproco della temperatura assoluta ($1/T$) a tensione costante, come mostrato in Figura 1.14, si trova che:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = C \exp^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1.40)$$

Qui, R è la Costante Universale dei Gas e Q è detta Energia di Attivazione per il Creep. Si noti che la velocità di creep aumenta esponenzialmente con la temperatura; un aumento della temperatura di 20°C può raddoppiare la velocità di creep.

Combinando le due precedenti equazioni si ottiene infine:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma^n \exp^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1.41)$$

dove A è la costante di creep. I valori delle tre costanti A , n e Q caratterizzano il creep di un materiale e possono essere trovate sperimentalmente. La conoscenza di tali costanti permette di calcolare la velocità di deformazione a qualsiasi temperatura o tensione, utilizzando l'ultima equazione.

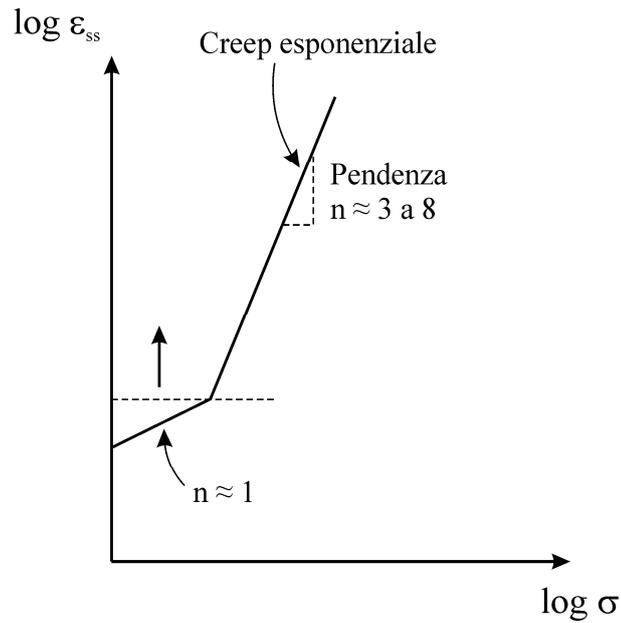


Figura 1.13: *Variazione della velocità di creep con la tensione.*

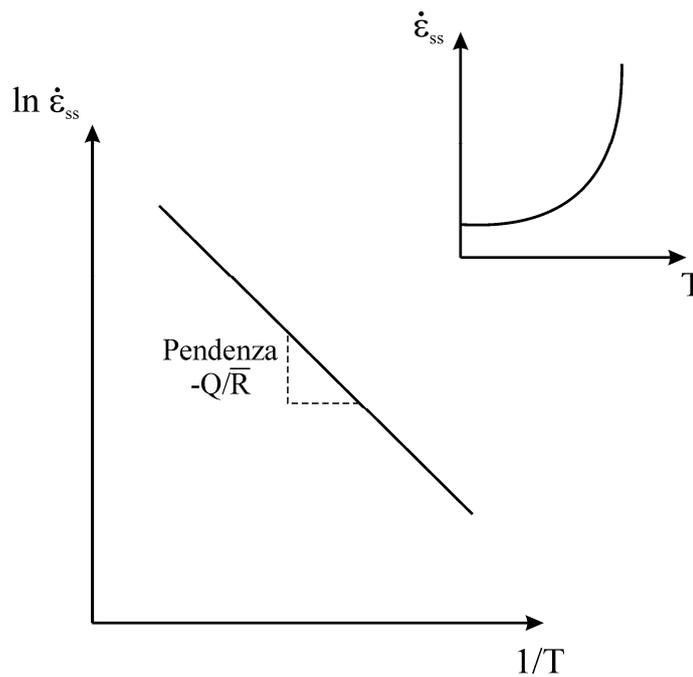


Figura 1.14: *Variazione della velocità di creep con la temperatura.*

1.5 Relazioni tensioni-deformazioni in campo plastico

Le considerazioni prima esposte in merito ai diagrammi ottenibili eseguendo una prova di trazione permettono di evidenziare due aspetti che differenziano in modo preciso il comportamento elastico da quello plastico dei materiali: il primo è che le deformazioni plastiche sono permanenti, per cui non scompaiono al cessare

dell'applicazione del carico che le ha generate (al contrario di quelle elastiche). Il secondo aspetto riguarda il fatto che mentre in campo elastico si ha una corrispondenza biunivoca tra tensioni e deformazioni, ciò non è più vero in campo elastico, dove, per valutare lo stato di deformazione è necessario analizzare l'intera storia di carico che ha portato alla tensione finale.

Come si è detto, in campo elastico gli sforzi e le deformazioni sono legati dalla legge di Hooke:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\tag{1.42}$$

Gli scorrimenti e le sollecitazioni sono definiti, invece, con il modulo di elasticità tangenziale G :

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}.\tag{1.43}$$

Dal momento che i materiali isotropi sono definiti soltanto da due costanti elastiche indipendenti, il modulo di Young E e G sono legate dalla relazione:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}\tag{1.44}$$

Come si diceva, in campo plastico il legame smette di essere lineare ed inoltre le deformazioni non sono definite univocamente dagli sforzi. La Figura 1.15 a) mostra i luoghi dei punti di snervamento ottenuti da prove sperimentali condotte su tubi di piccolo spessore sottoposti a carico assiale e torsione [1.32]. Le due curve si riferiscono a due valori di snervamento diversi: quello iniziale S_y e uno successivo S'_y , come mostrato in Figura 1.15 b).

Se si sottopone il provino a sola trazione in maniera da superare il valore di snervamento iniziale, seguendo il percorso O-A-C, si ottengono le seguenti deformazioni plastiche:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^p &= \varepsilon_p \\ \varepsilon_y^p &= \varepsilon_z^p = -\frac{1}{2}\varepsilon_p \\ \varepsilon_{xy}^p &= \varepsilon_{yz}^p = \varepsilon_{zx}^p = 0\end{aligned}\tag{1.45}$$

Ora se si scarica fino a B e si applica una torsione fino ad arrivare a D, in tale percorso CBD non si verificheranno ulteriori deformazioni plastiche, poiché siamo rimasti all'interno del luogo dei punti di snervamento E-D-C.

A questo punto, su un nuovo provino si segue un diverso percorso di carico: si applica prima la sola deformazione tangenziale fino ad E, ottenendo le seguenti deformazioni plastiche:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xy}^p &= \gamma^p \\ \varepsilon_x^p &= \varepsilon_y^p = \varepsilon_z^p = \varepsilon_{yz}^p = \varepsilon_{zx}^p = 0\end{aligned}\tag{1.46}$$

Se da questo punto ci si sposta fino a D con qualunque percorso, purché sia interno al luogo dei punti di snervamento E-D-C, il valore delle deformazioni plastiche non cambierà. E' evidente, quindi, come a seconda della storia di carico seguita, le deformazioni plastiche finali assumono valori diversi.

Per questo è necessario seguire un approccio basato sulla definizione incrementale delle deformazioni plastiche, da cui ricavare quelle totali per integrazione.

1.5.1 Equazioni incrementali delle deformazioni

Per primo, Saint-Venant nel 1870 propose che gli assi principali degli incrementi di deformazione totale coincidessero con quelli delle tensioni principali. Levy e von Mises invece fornirono un legame tra gli incrementi di deformazione e le componenti deviatoriche degli sforzi:

$$\frac{d\varepsilon_x}{S_x} = \frac{d\varepsilon_y}{S_y} = \frac{d\varepsilon_z}{S_z} = \frac{d\varepsilon_{xy}}{\tau_{xy}} = \frac{d\varepsilon_{yz}}{\tau_{yz}} = \frac{d\varepsilon_{zx}}{\tau_{zx}} = d\lambda \quad (1.47)$$

$$d\varepsilon_{ij} = S_{ij}d\lambda$$

dove S_{ij} è il tensore dello sforzo deviatore e $d\lambda$ è una costante non negativa che può variare durante la storia del carico. Tali equazioni sono dette di Levy-Mises e sono utilizzabili nei casi in cui si ha un grande flusso plastico, dal momento che esse trascurano la componente elastica della deformazione totale.

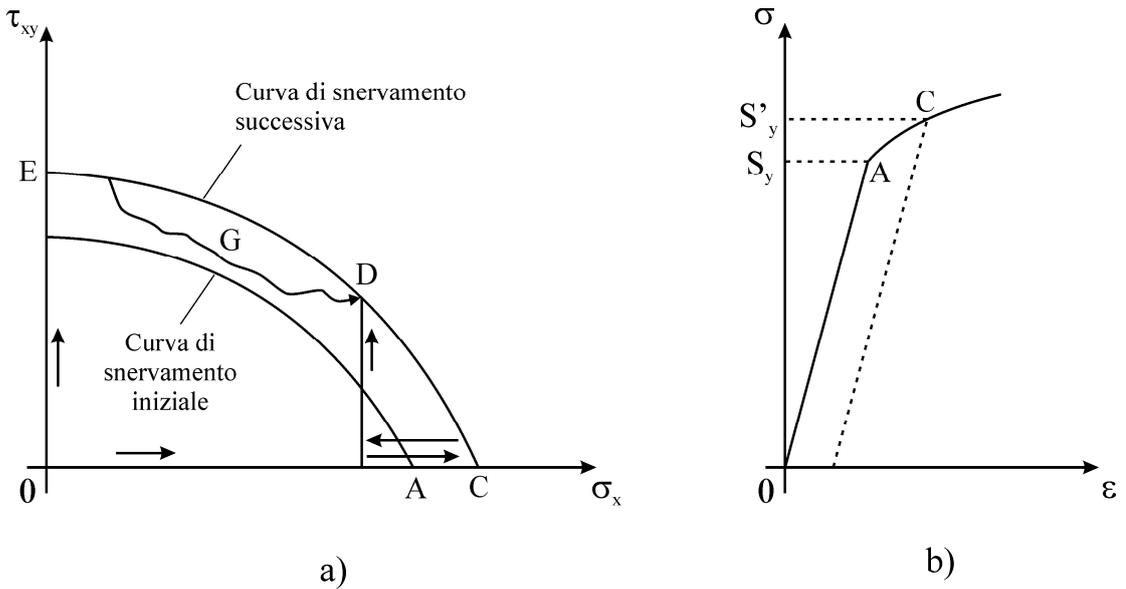


Figura 1.15: Prove su tubi di piccola spessore sottoposti a trazione e torsione: a) risultati sperimentali; b) curva caratteristica del materiale e definizione dei valori di snervamento.

La distinzione tra componente elastica e componente plastica è invece presente nelle equazioni di Prandtl-Reuss:

$$\frac{d\varepsilon_x^p}{S_x} = \frac{d\varepsilon_y^p}{S_y} = \frac{d\varepsilon_z^p}{S_z} = \frac{d\varepsilon_{xy}^p}{\tau_{xy}} = \frac{d\varepsilon_{yz}^p}{\tau_{yz}} = \frac{d\varepsilon_{zx}^p}{\tau_{zx}} = d\lambda \quad (1.48)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = S_{ij}d\lambda$$

Tali equazioni implicano che gli incrementi di deformazione plastica dipendano dal valore attuale del deviatore di sforzo e non dall'incremento di sforzo necessario per raggiungere la deformazione finale.

Facendo riferimento alle direzioni principali, le Eq. (1.48) diventano:

$$\frac{d\varepsilon_1^p}{S_1} = \frac{d\varepsilon_2^p}{S_2} = \frac{d\varepsilon_3^p}{S_3} = d\lambda \quad (1.49)$$

o anche

$$\frac{d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_2^p}{S_1 - S_2} = \frac{d\varepsilon_2^p - d\varepsilon_3^p}{S_2 - S_3} = \frac{d\varepsilon_3^p - d\varepsilon_1^p}{S_3 - S_1} = d\lambda \quad (1.50)$$

Facendo riferimento a queste ultime equazioni, i tre numeratori rappresentano i diametri dei cerchi di Mohr degli incrementi delle deformazioni plastiche ed i denominatori i diametri dei cerchi di Mohr degli sforzi, come si vede in Figura 1.16. Si deduce inoltre che il rapporto tra gli scorrimenti incrementali plastici massimi e gli sforzi tangenziali massimi è costante in ogni istante.

Le Eq. (1.48) si possono anche riscrivere:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x^p &= \frac{2}{3} d\lambda [\sigma_x - 0.5(\sigma_y + \sigma_z)] \\ d\varepsilon_y^p &= \frac{2}{3} d\lambda [\sigma_y - 0.5(\sigma_x + \sigma_z)] \\ d\varepsilon_z^p &= \frac{2}{3} d\lambda [\sigma_z - 0.5(\sigma_y + \sigma_x)] \end{aligned} \quad (1.51a)$$

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{xy}^p &= d\lambda \tau_{xy} \\ d\varepsilon_{xz}^p &= d\lambda \tau_{xz} \\ d\varepsilon_{zy}^p &= d\lambda \tau_{zy} \end{aligned} \quad (1.51b)$$

Si noti che dalle Equazioni (1.48) e (1.49) si deduce soltanto che le direzioni principali degli incrementi delle deformazioni plastiche e quelle degli sforzi coincidono. Tuttavia, è necessario determinare $d\lambda$ per calcolarne il valore; per far questo si deve utilizzare un criterio di snervamento.

Dalle (1.48) si può scrivere:

$$\begin{aligned}
& (d\varepsilon_x^p - d\varepsilon_y^p)^2 + (d\varepsilon_y^p - d\varepsilon_z^p)^2 + (d\varepsilon_z^p - d\varepsilon_x^p)^2 + 6(d\varepsilon_{xy}^{p^2} + d\varepsilon_{yz}^{p^2} + d\varepsilon_{zx}^{p^2}) = \\
& = d\lambda^2 \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right]
\end{aligned} \tag{1.52}$$

e richiamando le espressioni della tensione e dell'incremento di deformazione plastica equivalente alla von Mises:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \tag{1.53}$$

$$\begin{aligned}
d\varepsilon^p &= \\
&= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_x^p - d\varepsilon_y^p)^2 + (d\varepsilon_y^p - d\varepsilon_z^p)^2 + (d\varepsilon_z^p - d\varepsilon_x^p)^2 + 6(d\varepsilon_{xy}^{p^2} + d\varepsilon_{yz}^{p^2} + d\varepsilon_{zx}^{p^2})}
\end{aligned} \tag{1.54}$$

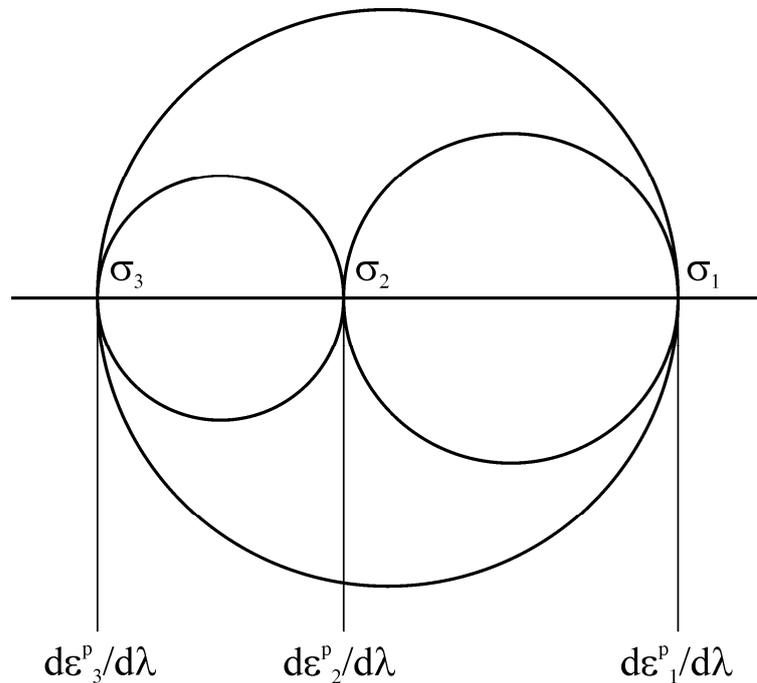


Figura 1.16: Cerchi di Mohr per gli sforzi e gli incrementi di deformazione plastica.

La costante allora diventa:

$$d\lambda = \frac{d\varepsilon^p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{\sqrt{2}\sigma_e} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \quad (1.55)$$

E le equazioni (1.51) possono essere riscritte in forma generica:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} S_{ij} \quad (1.56)$$

Infine le deformazioni totali, considerando la componente elastica e quella plastica, diventano:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [d\sigma_x - \nu(d\sigma_y + d\sigma_z)] + \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} [\sigma_x - 0.5(\sigma_y + \sigma_z)] \\ d\varepsilon_y &= \frac{1}{E} [d\sigma_y - \nu(d\sigma_x + d\sigma_z)] + \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} [\sigma_y - 0.5(\sigma_x + \sigma_z)] \\ d\varepsilon_z &= \frac{1}{E} [d\sigma_z - \nu(d\sigma_y + d\sigma_x)] + \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} [\sigma_z - 0.5(\sigma_y + \sigma_x)] \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{xy} &= \frac{d\tau_{xy}}{2G} + \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \tau_{xy} \\ d\varepsilon_{xz} &= \frac{d\tau_{xz}}{2G} + \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \tau_{xz} \\ d\varepsilon_{zy} &= \frac{d\tau_{zy}}{2G} + \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \tau_{zy} \end{aligned} \quad (1.58)$$

dove si vede che il valore delle componenti dell'incremento di deformazione elastica dipende dall'incremento degli sforzi, mentre quello delle componenti delle deformazioni plastiche dipende dallo sforzo attuale e dal rapporto $d\varepsilon^p/\sigma_e$.

1.6 Bibliografia

- [1.1] K.Lange, *Handbook of Metal Forming*, Mc Graw-Hill Inc., 1985.
- [1.2] M. Santocchi, F. Giusti, *Tecnologia Meccanica*, Casa Editrice Ambrosiana, 2000.
- [1.3] F. Micari, *Elementi di plasticità e lavorazioni per deformazione plastica*, Centro Editoriale e Libraio Università della Calabria, 2002.
- [1.4] W. Johnson, P.B. Mellor, *Engineering Plasticity*, Van Nostrand, 1973.
- [1.5] B. Dodd Y. Bay, *Ductile Fracture and Ductility*, Academic Press, 1987.
- [1.6] C.M. Sellars, W.J. McG. Tegart, *Hot Workability*, Review 158, International Metallurgical Reviews, 1972.
- [1.7] J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, Mc Graw-Hill, 1963.
- [1.8] ASTM E8-09, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Annual book of ASTM standard, 2009.
- [1.9] P.W. Bridgman, *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, Mc Graw-Hill, 1952.
- [1.10] J. Aronofsky, *Evaluation of the stress distribution in the symmetrical neck of flat tensile bars*, Journal of Applied Mechanics 18, 75-84, 1951.
- [1.11] G. Le Roy, J.D. Embury, G. Edwards, M.F. Ashby, *A model of ductile fracture based on the nucleation and growth of voids*, Acta Metall. 29, 1509-1522, 1981.
- [1.12] Z.L. Zhang, M. Hauge, J. Ødegård C. Thaulow, *Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section*, International Journal of Solids and Structures 36, 3497-3516, 1999.
- [1.13] ASTM E18-08b, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, Annual book of ASTM standard, 2008.
- [1.14] ASTM E10-10, *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, Annual book of ASTM standard, 2010.
- [1.15] E. Meyer, *Untersuchungen über Härteprüfung und Härte*, Z. Ver. Deutsche. Ing. 52, 645-654, 1908.
- [1.16] D. Tabor, *The Hardness of Metals*, Claredon Press, 1951.

- [1.17] W.H. Robinson, S.D. Truman, *Journal Materials Science* 12, 1961–1965, 1977.
- [1.18] A.G. Tangena, G.A.M. Hurkx, *ASME Journal of Engineering Materials and Technolgies* 108, 230–232, 1986.
- [1.19] E.R. Kral, K. Komvopoulos, D.B. Bogy, *ASME Journal of Applied Mechanics* 60, 829–841, 1993.
- [1.20] N. Huber, Ch. Tsakmakis, *ASME Journal of Engineering Materials and Technolgies* 120, 143–148, 1998.
- [1.21] R. Hill, B. Storakers, A.B. Zdunek, *Proc. R. Soc. Lond.* 423 (1989) 301–330.
- [1.22] S. Biwa, B. Storakers, *J. Mech. Phys. Solids* 43 (1995) 1303–1333.
- [1.23] T.A. Adler, O.N. Dogan, *Wear* 203–204 (1997) 257–266.
- [1.24] J.S. Field, M.V. Swain, *Journal of Materials Research* 10, 101–112, 1995.
- [1.25] L. Bruno, G. Sciumè, *Deformation field induced by spherical indentation: numerical analysis and experimental measurement by speckle interferometry*, *Optics and Lasers in Engineering* 24 289-301, 2004.
- [1.26] L. Vergani, *Meccanica dei materiali* , Mc Graw-Hill, 2006.
- [1.27] W. Ramberg, W.R. Osgood, *Description of Stress-Strain curves by Three Parameters* , NACA Technical Note n. 902, 1943.
- [1.28] I. Finnie, W.R. Heller, *Creep of Engineering Materials* , Mc Graw-Hill, 1959.
- [1.29] C. Rossard, *Creep of Engineering Materials* , *Métaux-Corros.-Ind.* 35, 102-115, 1960.
- [1.30] S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [1.31] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, *Engineering Materials* , Butterworth-Heinemann, 1980.
- [1.32] G.I. Taylor, H. Quinney, *Phil. Trans. Roy. Soc., A* 230, 232-262 (1931).

Capitolo 2

Tecniche per la misura di grandi deformazioni

2.1 Generalità

La misura di grandi deformazioni è un problema molto sentito soprattutto nell'ambito della caratterizzazione elasto-plastica dei materiali. Come si è visto nel Capitolo 1, le tecniche di caratterizzazione si basano generalmente sulla misura del carico applicato al provino e delle deformazioni che tale carico genera sul provino stesso. In particolare, in prove come il test di trazione, può essere sufficiente misurare la deformazione media del provino all'interno della lunghezza di riferimento; in questo caso i trasduttori largamente più utilizzati sono gli estensometri, in cui la misura di spostamento avviene tramite l'impiego di estensimetri, generalmente a resistenza elettrica. Questi strumenti hanno elevata accuratezza e ripetibilità, essendo inoltre abbastanza economici e facili da utilizzare.

Nel caso si intendano utilizzare altre tecniche di caratterizzazione, come ad esempio la prova di indentazione, è necessario che lo strumento di misura degli spostamenti utilizzato sia in grado di fornire informazioni a pieno campo, così da poter utilizzare gli spostamenti reali subiti dalla superficie del provino in un codice agli elementi finiti. Partendo da tali dati, infatti, è possibile implementare un algoritmo di ottimizzazione che consenta di determinare i parametri elasto-plastici del modello impostato per il materiale. In tal caso, le tecniche che meglio si prestano a questo tipo

di misure sono le tecniche ottiche a pieno campo, come l'interferometria speckle e la correlazione digitale delle immagini (DIC). La prima è una tecnica ottica a pieno campo ad elevata sensibilità (dell'ordine della lunghezza d'onda della luce) e si basa sull'utilizzo di una sorgente di luce coerente, come il laser. Essa si presta molto bene a misurare piccoli spostamenti, ma tuttavia, utilizzando opportuni accorgimenti e procedure, l'interferometria speckle consente di misurare anche grandi deformazioni, con la sensibilità che la contraddistingue.

La tecnica della correlazione digitale delle immagini, invece, si basa sull'andare a cercare gli stessi punti di un campo speckle generato artificialmente sulla superficie del provino, acquisito in due diverse configurazioni, mediante operazioni matematiche effettuate sul campo speckle digitalizzato. Il principale vantaggio di tale tecnica consiste nella semplicità dell'attrezzatura sperimentale, che prevede l'utilizzo di semplici telecamere per l'acquisizione delle immagini, mentre non è necessario disporre di una strumentazione ottica costosa. Lo svantaggio di questa tecnica consiste nel fatto che prevede operazioni piuttosto complesse sulle immagini e comunque la risoluzione del sistema è limitata dalla dimensione del pixel della telecamera utilizzata, che tipicamente ha una dimensione non inferiore a 5 μm .

Sia l'interferometria speckle che la correlazione digitale delle immagini consentono di misurare tutte e tre le componenti di spostamento della superficie analizzata. Nel seguito del presente capitolo verranno discusse più nel dettaglio le tre tecniche sopra presentate.

2.2 L'estensimetria

Gli strumenti più diffusi per la misura "puntuale" delle deformazioni di provini, ma anche di componenti reali sono gli estensimetri [2.1, 2.2], trasduttori capaci di convertire il segnale di deformazione in un segnale analogico di tipologia differente a seconda del tipo di estensimetro utilizzato. Mediante gli estensimetri si misura la deformazione media nell'intorno di un punto P in una direzione assegnata. Tra le più diffuse tipologie di estensimetri si possono ricordare quelli meccanici, ottici e soprattutto quelli elettrici a resistenza.

Gli estensimetri meccanici sono stati i primi ad essere sviluppati in ambito industriale, ma non avendo un accettabile rapporto tra livello di accuratezza e costi di

realizzazione non sono molto diffusi. Un altro limite è costituito dal fatto che gli elementi meccanici presentano inevitabilmente inerzie ed attriti che non consentono applicazioni in ambito dinamico. In un estensimetro meccanico sono presenti in genere due elementi: due coltelli, disposti su di un'apposita incasellatura ad una distanza prefissata (che costituisce la base di misura dell'estensimetro) ed un trasduttore di misura, che trasforma lo spostamento tra i coltelli in un segnale amplificato. Tra questa tipologia di estensimetri il più accurato è quello a leve multiple (o di Huggenberger, Figura 2.1), che attraverso appunto un sistema di leve consente un'amplificazione dello spostamento del coltello mobile fra 300 e 2000.



Figura 2.1: Estensimetro meccanico a leve multiple.

Gli estensimetri ottici sono analoghi agli estensimetri meccanici a leva, solo che essi utilizzano leve ottiche anziché meccaniche. In questi estensimetri è presente uno specchio solidale al coltello mobile che per effetto della deformazione ruota attorno ad una cerniera. Lo specchio riflette un raggio luminoso che per la legge della riflessione ruota di un angolo doppio. Sebbene la sensibilità di questo sistema può essere molto alta, il suo utilizzo pone seri problemi pratici, specie per le dimensioni

del sistema ottico che lo costituisce. Un sistema ottico più diffuso, invece, è l'estensimetro ottico laser: si tratta in pratica un misuratore di lunghezze che si basa sul principio dell'interferometria ottica mediante laser. Questi sistemi sono in grado di fare misurazioni di deformazioni con risoluzione del centesimo di micron. Sebbene questi sistemi permettono di fare misure con una precisione non comparabile con nessun altro sistema, problemi di costo, dimensioni e limitazioni legate alla possibilità di realizzare in pratica l'adeguato circuito ottico, limitano le applicazioni a rari casi, in particolare alla ricerca scientifica.

Gli estensimetri attualmente più diffusi sono quelli a resistenza elettrica, i quali si basano sul fenomeno fisico scoperto da Lord Kelvin attorno al 1850: la resistenza elettrica di un materiale conduttore varia con la deformazione impressa al conduttore stesso. Entro certi limiti la relazione tra variazione di resistenza e deformazione impressa è lineare.

2.2.1 Estensimetri a resistenza

Un estensimetro a resistenza (ER) è costituito da una griglia estensimetrica incollata ad un supporto che viene applicato alla struttura mediante un adesivo. La struttura trasferisce la deformazione, tramite l'adesivo ed il supporto, alla griglia estensimetrica che mediante due conduttori terminali viene inserita nel circuito di misura della resistenza. Dalla misura della variazione di resistenza subita dalla griglia si risale quindi alla deformazione. Pertanto, i componenti principali di un estensimetro installato sono: la griglia estensimetrica, il supporto e l'adesivo.

Gli ER si dividono in due grandi categorie in base al tipo di griglia:

- estensimetri a filo;
- estensimetri a lamina.

Negli estensimetri a filo la griglia è costituita da un filo di diametro compreso tra 15 e 25 μm . La griglia può essere continua con raccordi semicircolari o a tratti con raccordi retti di filo più grosso. La base di misura minima di un estensimetro a filo è di circa 3 mm.

Negli estensimetri a lamina, invece, la griglia è costituita da una lamina, di spessore compreso tra 3 e 5 μm , che viene sagomata mediante procedimento di fotoincisione o di

tranciatura. Rispetto a quelli a filo, gli estensimetri a lamina presentano diversi vantaggi:

- rapporto più elevato tra la superficie laterale e la superficie trasversale della griglia, per cui le tensioni tangenziali che trasmettono le deformazioni della struttura alla griglia sono molto piccole e la dispersione del calore è migliore;
- la sensibilità trasversale è più bassa poiché i raccordi trasversali hanno resistenza trascurabile;
- possibilità di ottenere basi di misura molto piccole;
- possibilità di sagomare la griglia in maniera più opportuna.

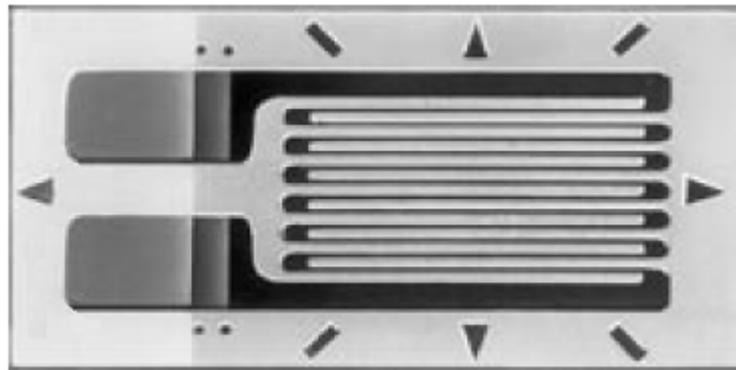


Figura 2.2: Estensimetro a resistenza.

La sensibilità alla deformazione S della lega estensimetrica che costituisce la griglia è:

$$S = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Cioè, la sensibilità alla deformazione è il rapporto tra la variazione relativa di resistenza elettrica di un filo di lega estensimetrica e la deformazione assiale ε applicata al filo stesso. La variazione di resistenza è dovuta alla variazione delle dimensioni del filo e della resistività del filo stesso. Infatti, la resistenza elettrica R di un conduttore di lunghezza l , sezione S e resistività ρ è:

$$R = \rho l / S \quad (2.2)$$

dalla quale, dopo un'operazione di differenziazione si ottiene

$$S = \frac{dR/R}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Dalla (2.3) si vede come la sensibilità alla deformazione S è la somma di due contributi: l'effetto geometrico, dovuto alla variazione delle dimensioni del filo e l'effetto piezoresistivo, dovuto alla variazione della resistività con la deformazione.

Si noti che la sensibilità alla deformazione dell'estensimetro, in generale, non coincide con quella del filo principalmente a causa dei raccordi trasversali che sono sensibili alla deformazione trasversale.

Si consideri un estensimetro installato su un provino la cui superficie è soggetta ad un campo biassiale di deformazione definito da ε_l ($= \varepsilon$, deformazione longitudinale parallela all'asse longitudinale della griglia) ed ε_t (deformazione trasversale, ortogonale all'asse longitudinale della griglia). I produttori di estensimetri generalmente forniscono il fattore di taratura K , riferito ad uno stato monoassiale di tensione:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad \text{per } \varepsilon_t = -\nu\varepsilon \quad (2.4)$$

Il fattore di taratura K viene utilizzato per risalire alla deformazione incognita ε dalla misura della variazione relativa di resistenza. Nel caso di campi di deformazione bidimensionali diversi da quelli relativi alla condizione di taratura l'uso della (2.4) introduce un errore che nella maggior parte dei casi pratici risulta trascurabile.

La variazione di resistenza subita dall'estensimetro viene misurata mediante il ponte di Wheatstone, il cui schema è mostrato in Figura 2.3, dove E è la tensione di alimentazione del ponte mentre la tensione G ai capi della diagonale CD risulta:

$$G = E \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.4)$$

Quando le resistenze R_1 , R_2 , R_3 ed R_4 hanno lo stesso valore il ponte si dice bilanciato, pertanto la tensione di sbilanciamento G è nulla. Inserendo nel ponte, al posto di una o più delle quattro resistenze fisse, uno o più estensimetri, dalla tensione di sbilanciamento sarà possibile ricavare la variazione di resistenza degli estensimetri e quindi il valore della deformazione subita dal provino.

Un'applicazione degli estensimetri si trova negli estensometri, utilizzati nel campo delle prove di trazione per la caratterizzazione dei materiali.

In Figura 2.4 è mostrato il disegno di un estensimetro disponibile sul mercato [2.3] in diversi modelli. L'estensimetro è fermamente collegato al provino attraverso dei coltelli che identificano la lunghezza di base (tipicamente 1 in), rispetto alla quale viene misurata la deformazione del provino.

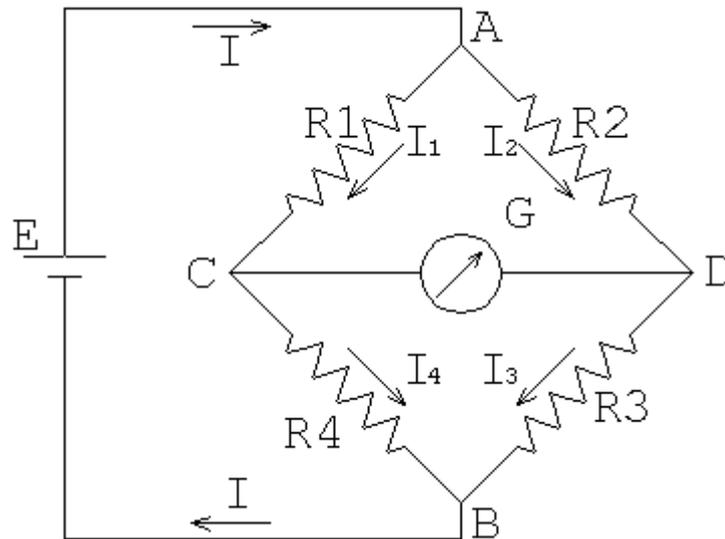


Figura 2.3: Schema del ponte di Wheatstone per la misura della variazione della resistenza di un estensimetro.

Il criterio di progetto per estensometri di questo tipo è che la forza esercitata dall'estensimetro sul provino sia piccola rispetto al carico di prova e che le deformazioni degli estensimetri siano grandi (tipicamente $1500 \mu\epsilon$) in corrispondenza della deformazione massima del provino.

Tali estensometri, grazie alla loro struttura, possono essere impiegati anche per prove di fatica in cui la frequenza di variazione dei carichi è elevata.

Estensimetri ed estensometri sono gli strumenti di misura delle deformazioni più utilizzati nell'ambito della caratterizzazione dei materiali mediante prove di trazione, essendo strumenti molto accurati, ripetibili, semplici da utilizzare e dal costo non elevato. Al giorno d'oggi, il loro utilizzo si sta allargando dai provini ai componenti reali, anche grazie allo sviluppo di estensimetri con tecnologia wireless. Il loro principale svantaggio, tuttavia, è quello di non fornire informazioni effettivamente puntuali ed a pieno campo.

2.3 L'interferometria speckle

Le tecniche interferometriche cominciarono a diffondersi a partire dal 1960, grazie allo sviluppo di sorgenti di luce altamente coerente: i laser. Tali tecniche presentano tra i loro principali vantaggi l'elevata sensibilità e la capacità di effettuare misure a pieno campo.

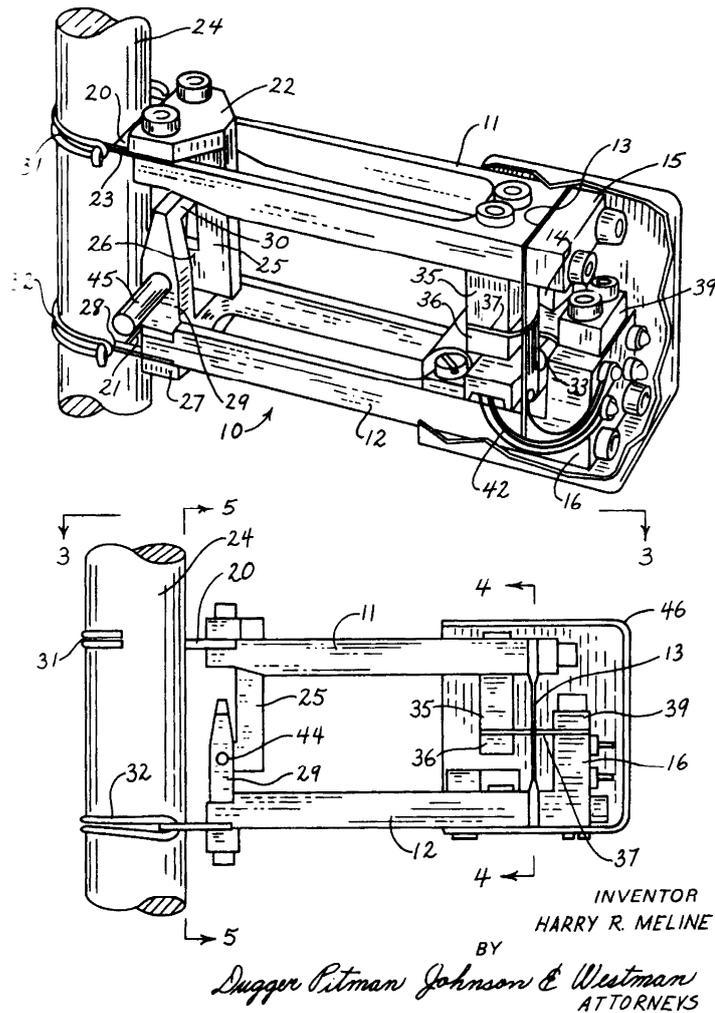


Figura 2.4: Disegno di un estensometro commerciale.

La prima tecnica interferometrica a nascere è l'interferometria olografica [2.4], sviluppatasi grazie all'idea iniziale di Gabor [2.5] e più tardi all'importante contributo di Leith ed Upatnieks [2.6]. L'interferometria olografica si basa sulla registrazione dell'intero fronte d'onda luminoso proveniente da un oggetto, in fase ed ampiezza. Per molto tempo la registrazione del fronte d'onda è avvenuta mediante gli ologrammi, ovvero lastre fotografiche ad elevata risoluzione. Attualmente, si utilizza

come elemento sensibile il chip di una telecamera, e la ricostruzione dell'ologramma avviene per via numerica, sfruttando i principi della diffrazione; ciò permette di superare tutte le difficoltà e le perdite di tempo connesse allo sviluppo delle lastre fotografiche, anche se la dimensione e la risoluzione dei chip limita la dimensione degli oggetti osservabili e l'accuratezza della ricostruzione. In questo caso la tecnica prende il nome di "olografia digitale", ed il suo utilizzo è sempre più diffuso [2.7-2.8].

Tuttavia, una delle tecniche interferometriche attualmente più utilizzate è l'interferometria speckle [2.9], diffusasi dopo l'olografia verso la fine degli anni '60. Il termine *speckle* (in inglese macchia), rende bene l'idea del fenomeno: infatti, quando si illumina una superficie otticamente rugosa attraverso una sorgente di luce coerente, in ciascun punto del semispazio davanti all'oggetto si verificherà l'interferenza tra i molteplici contributi ondulatori provenienti dalla superficie (Figura 2.5).

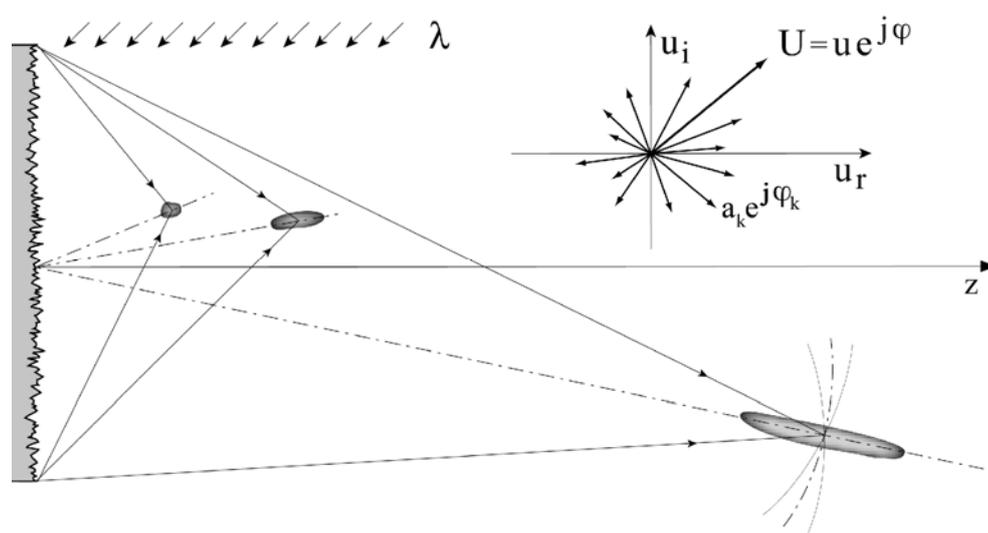


Figura 2.5: Meccanismo di formazione di un campo speckle nello spazio.

Infatti, sulla base del principio di Huygens-Fresnel, tutti i punti della superficie illuminata si comporteranno come sorgenti di luce puntiformi. Se la superficie dell'oggetto possiede determinate caratteristiche, le proprietà statistiche del fenomeno di interferenza, e quindi dello speckle, possono essere predette. Le ipotesi sulla superficie illuminata sono le seguenti:

- Rugosità media maggiore della lunghezza d'onda della luce usata.

- Assenza di lavorazioni che arrechino sistematicità alla struttura della superficie.

Si assumano, inoltre, le seguenti ipotesi sul campo di luce diffuso dall'oggetto:

- La superficie non depolarizzi la luce incidente su di essa.
- La fase di ogni onda risultante dall'interazione tra il raggio incidente e la superficie sia una variabile aleatoria con distribuzione di probabilità piatta nell'intervallo $[-\pi, \pi[$.

L'assenza di sistematicità nella struttura della superficie fa sì che non ci sia alcuna relazione, né di fase, né di ampiezza, tra le zone elementari diffondenti. Solitamente, nel caso di superfici componenti meccanici realizzati mediante lavorazioni che non generano alcuna distribuzione regolare, tali ipotesi sono rispettate; ad esempio, le superfici metalliche sabbiare o rifinite mediante carta abrasiva presentano un andamento delle asperità del tutto casuale e conservano lo stato di polarizzazione della luce incidente. In ogni caso, l'uso di una vernice metallica può risolvere il problema per i materiali che assorbono la luce, mentre l'uso di un polarizzatore nel set-up ottico risolve il problema per le superfici che non mantengono lo stato di polarizzazione. Sotto tali ipotesi lo speckle è detto totalmente sviluppato. La Figura 2.6 mostra la struttura di un campo speckle.

La formazione di queste strutture fu osservata per la prima volta dai ricercatori operanti nel campo dell'olografia e fu inizialmente considerata solo come un disturbo da eliminare. Solo successivamente si intuì la possibilità di utilizzare lo speckle come portante di informazione ed impiegarlo quindi come strumento di misura. In [2.10] è stata ricavata teoricamente la distribuzione statistica dell'intensità luminosa, dell'ampiezza e della fase del campo elettromagnetico. Attraverso una operazione di autocorrelazione sull'intero campo di intensità luminosa si può ricavare una dimensione tipica del campo speckle, ovvero l'estensione media delle macchie δ . Tale funzione, infatti, fornisce la probabilità congiunta che due punti distinti su un piano possiedano intensità luminose paragonabili; una tale funzione dipende dalla loro mutua distanza e non da posizioni assolute assunte nello spazio. L'ampiezza della funzione di autocorrelazione, ovvero il valore dell'ascissa per cui essa assume il primo minimo, rappresenta l'estensione più piccola esistente tra due punti indipendenti in termini di intensità luminosa, ossia proprio la grandezza degli speckle.

La Figura 2.7 mostra due funzioni di autocorrelazione ottenute su piani paralleli ad una superficie circolare di diametro D , a due diverse distanze da essa.

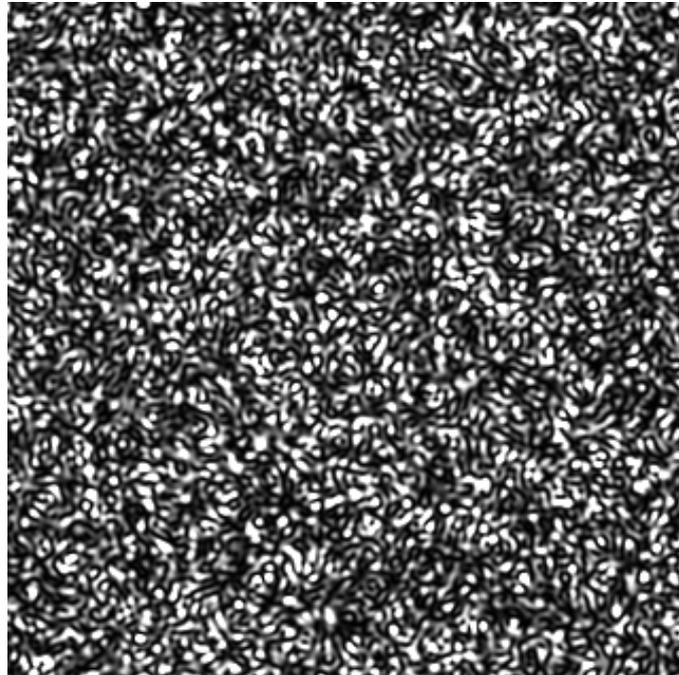


Figura 2.6: Campo speckle diffratto da una superficie.

La dimensione media dello speckle può essere quindi espressa come segue:

$$\delta = 1.22 \frac{\lambda z}{D} \quad (2.5)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della sorgente luminosa, mentre z e D sono definite in funzione di come è osservato il campo speckle. Se si osserva direttamente lo speckle viene detto oggettivo e z rappresenta la distanza fra il punto di osservazione e la superficie, mentre D è il diametro dell'area illuminata, che quindi si suppone circolare ed uniformemente illuminata. Quando si osserva invece attraverso un obiettivo (come può essere considerato anche il nostro occhio), invece, si parla di speckle soggettivo; in questo caso z rappresenta la distanza fra il piano di focalizzazione ed il piano principale posteriore della lente (o del sistema di lenti), mentre D è il diametro della lente più piccola dell'obiettivo.

Oltre alla dimensione trasversale esiste anche una dimensione longitudinale che normalmente è stimata con la seguente relazione [2.11]:

$$\delta = 8\lambda \left(\frac{z}{D} \right)^2 \quad (2.6)$$

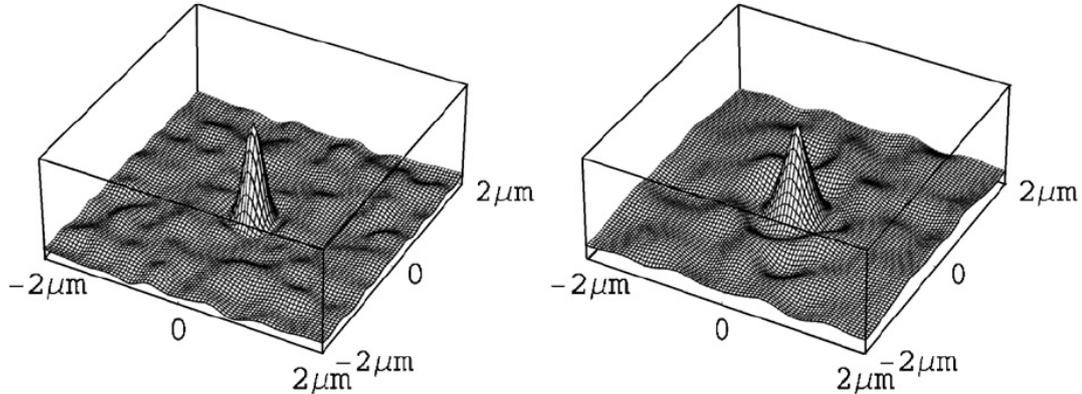


Figura 2.7: Funzione di autocorrelazione dell'intensità luminosa a $z/D=0.2$ e $z/D=0.4$.

Per cui un campo speckle ha una distribuzione casuale nello spazio che può essere visualizzata in Figura 2.8, in cui le superfici tridimensionali rappresentano superfici ad uguale intensità luminosa.

In figura è riportato il campo speckle oggettivo simulato che si forma davanti ad una superficie circolare: in Figura 2.8a) il campo speckle è rilevato a 2.5 mm da una superficie circolare di 12.5 mm di diametro e la porzione riportata è un cubo di $4 \mu\text{m}$ di lato; in b), invece, il piano di rilevazione è a 35 mm dalla medesima apertura ed il campo speckle riportato è all'interno di un parallelepipedo $4 \times 4 \times 12 \mu\text{m}$. Come si può notare, gli speckle vicino alla superficie sono piuttosto sferici e la struttura si modifica rapidamente, mentre man mano che ci si allontana essi tendono ad allungarsi ed ingrandirsi e la struttura rimane essenzialmente la stessa. Quest'ultima è la condizione necessaria per condurre delle misure.

In particolare, per effettuare misure con accuratezza interferometrica, sfruttando il fenomeno dello speckle, c'è bisogno che si verifichi l'interferenza tra il campo speckle generato dalla superficie che si vuole esaminare ed un campo di luce, coerente con il primo, generalmente detto di riferimento.

Il principio base di funzionamento è quello solito dell'interferometria: date due sorgenti tra loro coerenti, se una delle due subisce uno spostamento, l'interferenza in un generico punto dello spazio determina una variazione ciclica dell'intensità luminosa la cui periodicità dipende dalla lunghezza d'onda della luce utilizzata.

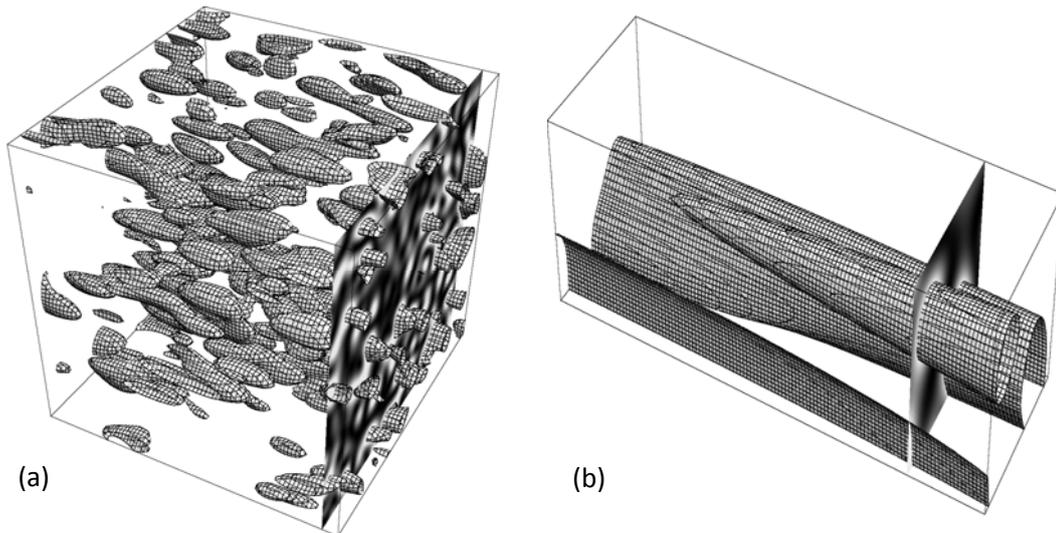


Figura 2.8: *Struttura tridimensionale dello speckle: a) a piccola distanza dalla superficie; b) a grande distanza dalla superficie.*

Se quindi si sommano due onde stazionarie con la stessa frequenza, l'intensità luminosa risultante dipende solo dalla relazione di fase esistente tra le due onde. Una generica onda stazionaria può essere scritta, utilizzando la notazione complessa, come segue:

$$E = Ae^{i\phi} \quad (2.7)$$

dove A rappresenta l'ampiezza e ϕ la fase. Sommando due onde e calcolando l'intensità luminosa risultante si ottiene:

$$I = \|A_1e^{i\phi_1} + A_2e^{i\phi_2}\|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.8)$$

L'andamento della relazione (2.8) è riportato in Figura 2.9, nella quale è possibile vedere la variazione di intensità in funzione della differenza di fase. Ne deriva, quindi, che dalla variazione ciclica dell'intensità luminosa è possibile risalire alla differenza di fase tra le due sorgenti, che normalmente è legata ad alcune grandezze che rappresentano l'oggetto di misura. Per poter realizzare suddetta interferenza è necessario realizzare degli appositi dispositivi comunemente denominati interferometri. Come nell'interferometria olografica, gli interferometri speckle hanno il vantaggio che le superfici sotto studio non devono essere osservate lungo la direzione normale; questo perché, essendo le superfici diffondenti, ogni punto rimanda la luce in tutte le direzioni. Ciò comporta il grande vantaggio di poter

misurare non solo le componenti di spostamento fuori dal piano, come nell'interferometria classica, o le sole componenti nel piano, come nell'interferometria moiré, ma dà la possibilità di realizzare interferometri sensibili ad una qualsiasi componente di spostamento. Oltre a questo, il fatto di utilizzare superfici diffondenti, non richiede la planarità delle superfici stesse.

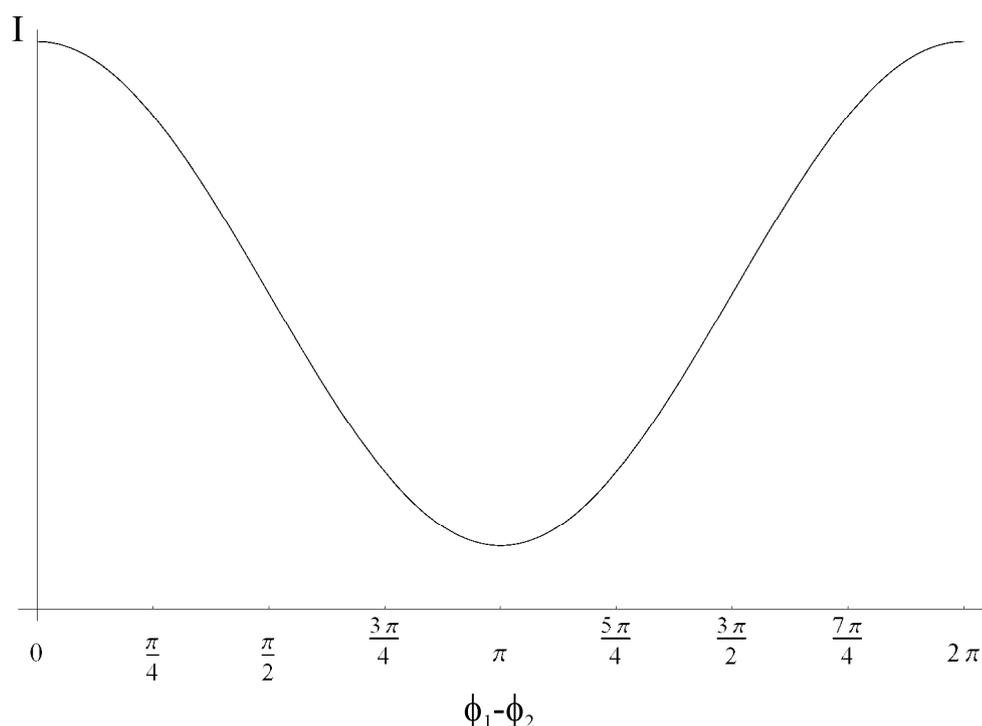


Figura 2.9: Intensità dovuta all'interferenza di due sorgenti in funzione della differenza di fase.

2.3.1 Interferometri per la misura di spostamenti

Durante gli anni, diverse sono le tipologie di interferometri che sono stati proposti da ricercatori operanti nel campo dell'interferometria speckle. Un modo di classificare gli interferometri, proposto in [2.12], fa riferimento alla componente di spostamento alla quale il dispositivo è sensibile ed alla modalità di illuminazione e di osservazione.

Una prima distinzione possibile è quella tra interferometri assoluti ed interferometri differenziale: i primi sono sensibili alla componente assoluta di spostamento, per cui le frange dipendono solo dal valore dello spostamento del generico punto in esame;

nei secondi, invece, le frange si devono interpretare come curve di livello di una particolare componente di spostamento relativo tra due punti della stessa superficie.

Un'altra caratteristica di un interferometro è il numero di fasci utilizzati per l'illuminazione dell'oggetto; in tal caso si parla di interferometri a singola o a doppia illuminazione. Allo stesso modo, si parla di interferometri a singola o a doppia osservazione se sul cip della telecamera sono focalizzate una o due immagini dell'oggetto. In base alle seguenti caratteristiche è, dunque, possibile classificare i diversi tipi di interferometri; per ognuno di essi, inoltre, possono essere ricavate delle relazioni che legano il campo di spostamenti della superficie dell'oggetto con la variazione di fase subita dal campo speckle.

2.3.2 Determinazione della fase

Come più volte rimarcato, la misura degli spostamenti deriva dalla determinazione della fase attraverso l'osservazione dell'intensità luminosa.

Dall'interferenza dei due campi oggetto e riferimento nasce una variazione sinusoidale dell'intensità luminosa, caratterizzato da un valore medio ed uno alternato. In particolare, nell'interferometria speckle, questo fenomeno si verifica in ogni pixel della telecamera in maniera differente, per cui ogni punto avrà un proprio valore medio ed uno alternato dell'intensità luminosa, solitamente denominati *intensità media* e *modulazione*. La Figura 2.10 permette di visualizzare ciò che accade in ciascun pixel.

Quello che la telecamera rileva è la componente reale dell'intensità luminosa, ovvero la somma tra l'intensità media i_m e la proiezione sull'asse delle ascisse della modulazione i_a , il cui contributo dipende dal valore della fase ϕ . Comunemente, per i motivi che si vedranno in seguito, maggiore è la modulazione, migliore sarà il funzionamento dell'interferometro.

Un primo metodo per la determinazione della fase consiste nel valutare il valore assoluto della differenza delle intensità luminose; in questo modo è possibile ricavare dei sistemi di frange, dette *frange di correlazione*, come quelli visualizzati in Figura 2.11.

Il limite di questo metodo, tuttavia, è quello che le frange ottenute consentono di ricavare la fase soltanto lungo i centri di frangia, mentre dicono poco o nulla sulla fase nella restante parte dell'oggetto.

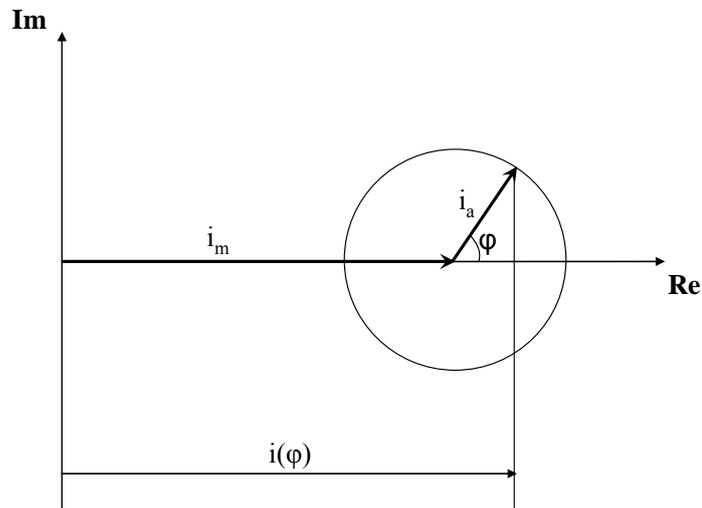


Figura 2.10: Componenti media e alternata dell'intensità luminosa.

Per questo motivo, attualmente l'estrazione della fase è effettuata attraverso tecniche denominate di phase-shifting (PS), che si basano sulla separazione delle informazioni di fase: se la separazione è spaziale, si parla di phase-shifting spaziale [2.13], mentre se la separazione avviene nel tempo si parla di phase-shifting temporale [2.14].

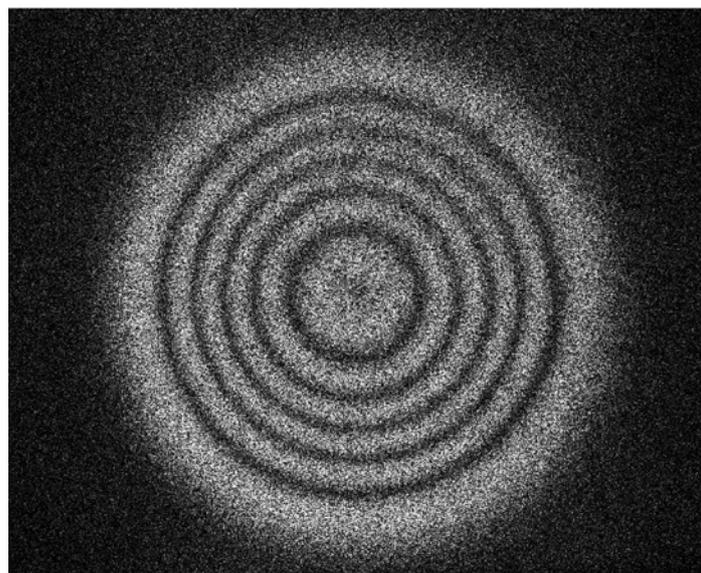


Figura 2.11: Frange di correlazione.

2.3.2.1 Il phase-shifting temporale

Con questa tecnica, le tre informazioni mischiate nell'intensità luminosa (intensità media, modulazione e fase) vengono determinate effettuando almeno tre misure indipendenti. Per far questo, vengono introdotte delle variazioni di fase note, in maniera da ottenere un sistema di equazioni invertibile, nelle tre incognite i_m , i_a e ϕ . In particolare, effettuando un numero di misurazioni maggiore di tre, si ottiene un sistema sovrabbondante, la cui soluzione può essere ricavata attraverso un metodo di minimizzazione degli scarti, che permette di attenuare l'effetto degli errori di misura. Introducendo una variazione di fase pari ad α_i , l'intensità rilevata sarà:

$$i_i = i_m + i_a \cos(\phi + \alpha_i) = i_m + i_a \cos \phi \cos \alpha_i - i_a \sin \phi \sin \alpha_i \quad (1.14)$$

Se quindi si effettuano N misure è possibile scrivere la seguente relazione matriciale:

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 1 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \alpha_N & -\sin \alpha_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_m \\ i_{a\text{Re}} \\ i_{a\text{Im}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

con

$$\begin{aligned} i_{a\text{Re}} &= i_a \cos \phi \\ i_{a\text{Im}} &= i_a \sin \phi \end{aligned} \quad (2.10)$$

Detta \mathbf{M} la matrice dei coefficienti, che è nota, essendo esclusivamente funzione degli sfasamenti introdotti, ed \mathbf{I} il vettore dei termini noti, ottenuto dalle intensità rilevate, il vettore delle incognite, formato dall'intensità media, dalla parte reale e complessa della modulazione può essere ricavato applicando la relazione derivante dal metodo dei minimi quadrati:

$$\begin{Bmatrix} i_m \\ i_{a\text{Re}} \\ i_{a\text{Im}} \end{Bmatrix} = (\underline{\underline{\mathbf{M}^T \mathbf{M}}})^{-1} \underline{\underline{\mathbf{M}^T \mathbf{I}}} \quad (2.11)$$

La fase e la modulazione saranno quindi calcolate come:

$$i_a = \sqrt{i_{aRe}^2 + i_{aIm}^2}$$

$$\phi = \arctg \frac{i_{aIm}}{i_{aRe}} \quad (2.12)$$

e si ottiene un valore appartenente all'intervallo $[-\pi, \pi)$

Gli sfasamenti noti possono essere introdotti accorciando o allungando il cammino ottico di uno dei due fasci interferenti. Solitamente, ciò viene fatto andando a muovere uno specchio con degli attuatori piezoelettrici, dispositivi capaci di controllare, con elevata stabilità e ripetibilità, spostamenti dell'ordine della lunghezza d'onda della luce utilizzata.

In tal modo si ottengono una serie di frange denominate *mappe di fase*, ciò per differenziarle dalle frange di correlazione ottenute per sottrazione diretta di due immagini. A questo punto è necessaria un'altra operazione; questo perché, mediante l'algoritmo di phase-shifting si ottiene un andamento discontinuo della fase (a dente di sega), con salti di 2π , essendo il codominio dell'arcotangente l'intervallo $[-\pi, \pi)$. Per questo motivo è necessario un procedimento di rimontaggio della fase, in presenza di suddette discontinuità. Tale operazione prende il nome inglese di *unwrapping* (Figura 2.12).

Oltre a questo, allo scopo di attenuare od eliminare le inevitabili oscillazioni locali dell'andamento degli spostamenti, principalmente dovute al rumore elettronico e ad una parziale decorrelazione, è necessario effettuare delle operazioni di *filtraggio* o di *fitting*, le quali consentono, rispettivamente, di filtrare o eliminare tali fluttuazioni.

2.3.3 Principali componenti di un interferometro speckle

In un interferometro speckle i principali componenti sono: l'attrezzatura ottica, la sorgente di illuminazione ed il sistema di acquisizione delle immagini.

L'attrezzatura ottica necessaria per condurre esperienze interferometriche speckle consiste di specchi, semi-specchi, lenti, polarizzatori, lamine di ritardo, sistemi di fissaggio e di allineamento. Usualmente, inoltre, tutta l'attrezzatura è fissata su un banco antisismico che permette di isolare il set-up sperimentale da eventuali vibrazioni, che possono rappresentare un disturbo inaccettabile per tecniche a così elevata sensibilità. Per quanto riguarda la scelta dei componenti ottici, ovviamente, è bene disporre di oggetti di buona qualità; tuttavia bisogna tener presente che con la

qualità crescono molto facilmente anche i costi e non è difficile quindi trovarsi con un set-up ottico eccessivamente costoso.

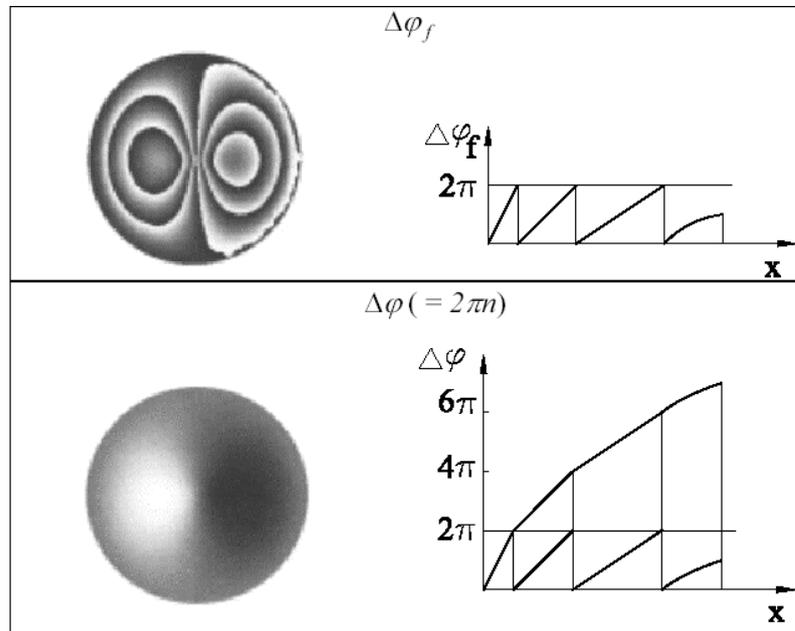


Figura 2.12: Procedura di unwrapping di una mappa di fase.

Per quanto riguarda l'illuminazione, è importante che la sorgente presenti un'adeguata coerenza spaziale e temporale. La coerenza spaziale serve ad ottenere un campo speckle sufficientemente contrastato, anche se questo generalmente non rappresenta un reale problema. Più importante, invece, è la coerenza temporale, poiché può capitare di avere differenze di cammino ottico notevoli o superfici piuttosto estese. Questo problema è particolarmente sentito nel caso dei diodi laser (Figura 2.13), i quali hanno una lunghezza di coerenza di pochi centimetri. D'altro canto, i diodi laser sono dispositivi molto compatti ed economici, se confrontati con i laser tradizionali. Rappresentano quindi una scelta appropriata nel caso si vogliano analizzare piccole superfici e l'interferometro risulta bilanciato (cammini ottici di fascio oggetto e fascio di riferimento uguali).

Il sistema di acquisizione delle immagini è costituito generalmente da una telecamera digitale, che da in uscita un'immagine già digitalizzata che può essere visualizzata da un monitor di PC o elaborata dal calcolatore.

Le telecamere digitali utilizzano la tecnologia FireWire, di proprietà della Apple Computer, ma conosciuta anche con il nome commerciale di i.Link datogli dalla

Sony. Il suo sviluppo è terminato nel 1995 e l'IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), istituto che, ad oggi, ha definito più di 900 standard, lo ha denominato 1394. Il FireWire è un'interfaccia grafica per un bus seriale che supporta la modalità di trasferimento isocrona, permettendo così di acquisire da apparecchi digitali. La Figura 2.14 mostra un connettore (a) ed una porta (b) FireWire a 6 pin.



Figura 2.13: *Tipico aspetto di un diodo laser.*

Nelle telecamere digitali il segnale analogico viene convertito in digitale da un convertitore A/D interno, che solitamente è a 8 o 10 bit, per cui l'immagine è convertita in una matrice di numeri compresa, rispettivamente, tra 0 e 255 o tra 0 e 1023. Tale operazione di conversione introduce il cosiddetto errore di quantizzazione che tuttavia, già per un convertitore a 8 bit, risulta avere un'influenza piuttosto trascurabile sulle misure.

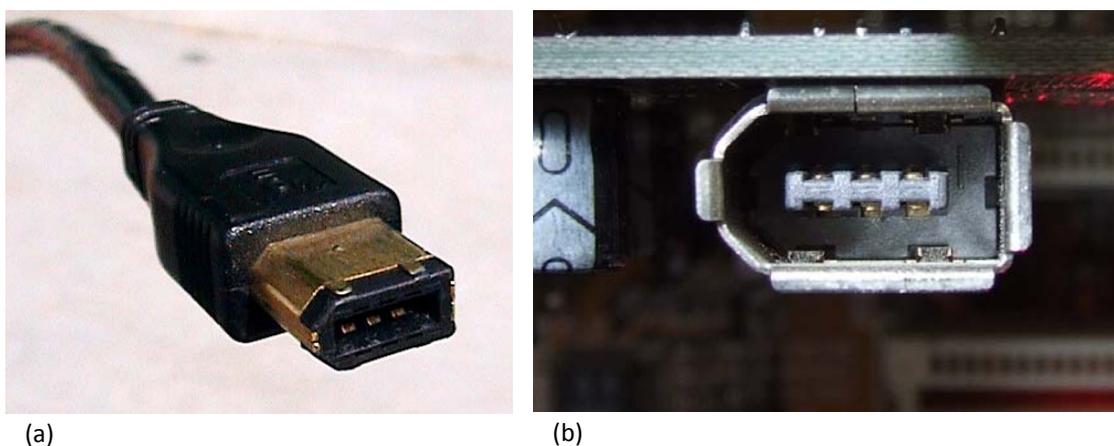


Figura 2.14: *Connettore (a) e porta (b) a 6 pin.*

Un altro parametro di fondamentale importanza è la dimensione del chip in quanto, in base ad esso ed alla dimensione dell'oggetto da studiare, si sceglie l'ingrandimento con cui lavorare. Tali dimensioni sono unificate per le telecamere standard, come riportato in Figura 2.15, e si indicano convenzionalmente con una frazione di 1 pollice, mentre le dimensioni reali sono in millimetri con il rapporto fra altezza e larghezza pari a $\frac{3}{4}$.

I pixel hanno forma quadrata o rettangolare e dalle loro dimensioni, rispetto a quelle degli speckle, dipende la distribuzione statistica dell'intensità media e quella della modulazione dell'illuminazione. In particolare, se le dimensioni del pixel crescono rispetto a quelle degli speckle, la modulazione tende a valori sempre più bassi e ciò aumenta l'incertezza sulla misura della fase. Dall'altra parte, se lo speckle diventa grande quanto il pixel, la modulazione è inficiata da quegli speckle la cui luminosità non varia anche in presenza di uno spostamento della superficie da cui è generato. Il rapporto tra le dimensioni lineari dei pixel (media geometrica delle dimensioni orizzontali e verticali) e degli speckle è denominato fattore di integrazione spaziale; usualmente si lavora con fattori di integrazione superiori a due. Tuttavia, a tal riguardo c'è da dire che la ricerca delle ottimali condizioni di lavoro è estremamente complessa. Infatti, il fattore di integrazione è solo una delle variabili su cui si può agire, assieme al rapporto delle intensità medie dei fasci interferenti ed all'intensità del fascio di illuminazione in rapporto al massimo e minimo valore di intensità luminosa che può essere convertito dal sistema di acquisizione. Per questo, anche se alcuni ricercatori hanno cercato di fornire delle linee guida per affrontare il problema [2.15], non esiste un approccio oggettivo e consolidato capace di fornire la soluzione ottimale.

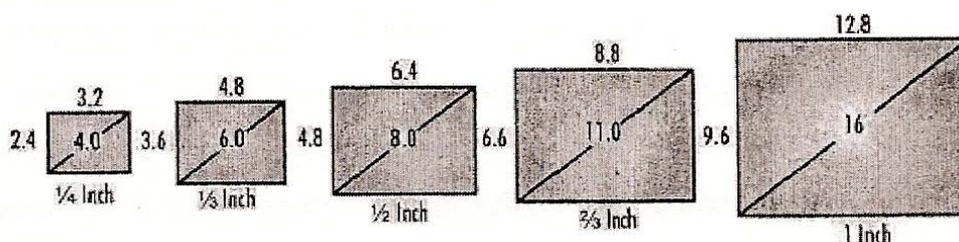


Figura 2.15: Dimensioni unificate dei CCD.

Nel caso delle telecamere digitali, il costo di acquisto si alza al diminuire delle dimensioni dei pixel ed al crescere del numero dei pixel stessi (ovvero, a parità di

dimensione del pixel, al crescere del chip). Altri fattori che influenzano il costo sono, ad esempio, il numero dei bit utilizzati per convertire l'immagine e la possibilità o meno di ottenere immagini a colori.

2.3.4 Il fenomeno della decorrelazione

Per decorrelazione di un campo speckle si intende ogni variazione della sua struttura statistica che porti ad un progressivo deterioramento dell'informazione in esso immagazzinata introducendo errori nelle misure [2.13].

L'interferometria speckle si basa sull'assunzione che in ogni pixel della telecamera cada sempre la stessa porzione del campo speckle; in tal modo, è possibile confrontare la variazione ciclica dell'intensità luminosa, dovuta allo spostamento di un punto dell'oggetto, con l'intensità luminosa relativa al corpo indeformato. Come già detto, eseguendo la sottrazione delle due intensità luminose si ottengono le frange di correlazione. La decorrelazione si verifica quando, in seguito allo spostamento del corpo, una generica porzione del campo speckle si sposta, venendo intercettato da un altro pixel della telecamera. In questo caso, non è più possibile confrontare il campo speckle relativo alla condizione deformata con la condizione di riferimento.

Esistono diversi tipi di correlazione, in relazione alle diverse modalità secondo cui una superficie, deformandosi, causa variazioni dell'intensità acquisita dal singolo pixel di una telecamera.

Si possono distinguere i seguenti tipi di decorrelazione:

- Decorrelazione sul piano immagine;
- Decorrelazione sul piano dell'apertura.

La prima avviene quando l'oggetto subisce uno spostamento rigido in un piano perpendicolare all'asse ottico della telecamera. A causa del doppio processo di diffrazione che avviene, prima tra oggetto e obiettivo e dopo tra obiettivo e telecamera, lo speckle soggettivo formato può essere pensato come vincolato all'area che lo ha generato. Un movimento della superficie che sia perpendicolare all'asse della lente provoca, quindi, uno spostamento analogo di ogni speckle corrispondente. Per questo motivo, a seconda della deformazione dell'oggetto, l'intensità acquisita dal sensore della telecamera è relativa a punti della superficie di volta in volta differenti.

La decorrelazione sul piano dell'apertura si verifica, quando la superficie subisce una rotazione rigida, come mostrato in Figura 2.16.

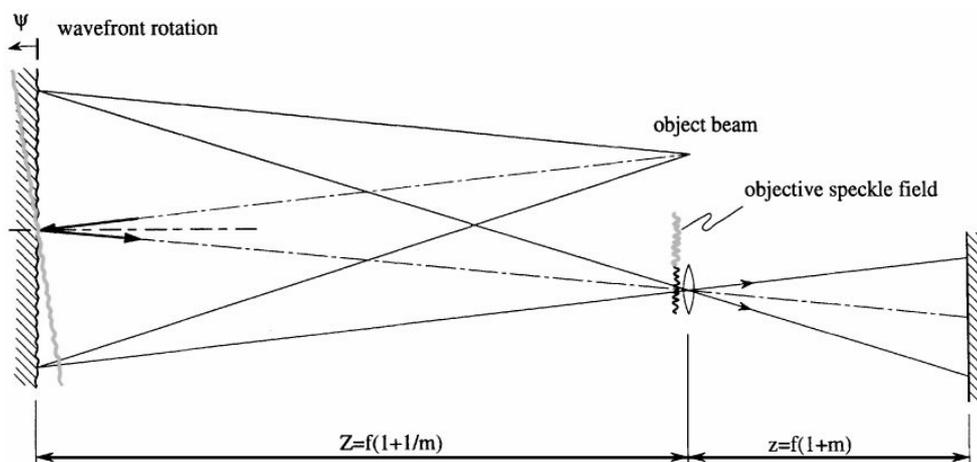


Figura 2.16: Modello geometrico della decorrelazione.

A causa di una rotazione rigida della superficie, il campo speckle oggettivo trasla di fronte all'obiettivo, cambiando la struttura del campo speckle in maniera proporzionale a tale rotazione. Si noti che basta una rotazione tale da far traslare il campo speckle oggettivo di una quantità pari al diametro della lente, perché la decorrelazione dello speckle acquisito dal CCD sia totale.

Nella maggior parte dei casi è impossibile compensare gli effetti della correlazione; in particolare, non si può recuperare la decorrelazione dovuta ad una ossidazione o plasticizzazione superficiale, né quella dovuta alla deformazione. Invece, almeno in teoria, è possibile compensare gli effetti dovuti ai moti rigidi, anche se i sistemi necessari a tale scopo sono difficilmente realizzabili.

Il fenomeno della correlazione, tuttavia, può essere sfruttato per effettuare delle misure qualitative. Le tecniche basate sulla decorrelazione consistono nell'andare ad identificare le zone della superficie del provino che hanno subito uno spostamento tale da modificare la struttura locale del campo speckle. Tali aree si possono identificare confrontando il campo speckle in una condizione di riferimento con quello relativo alla situazione perturbata. Infatti, calcolando il valore assoluto della differenza dei campi speckle nelle due situazioni sopra citate, ci si può rendere conto che le zone indeformate si presentano scure, dal momento che la fase dei due campi che si sottraggono, in queste aree, è la stessa; le zone, invece, che hanno subito una

deformazione presenteranno una luminosità più elevata. In tal modo è possibile rilevare la presenza di difetti come distacchi di vernice o intonaco su dipinti o opere architettoniche. Oppure scollamenti su laminati compositi, come mostra la Figura 2.17b) [2.16]. Il vantaggio principale di tali tecniche consiste nella semplicità dell'apparato sperimentale necessario per realizzarle. Tuttavia, esse non sono adatte a fornire misure quantitative, ma solo qualitative della forma e delle dimensioni dei difetti, che tuttavia sono chiaramente visibili grazie al suddetto fenomeno.

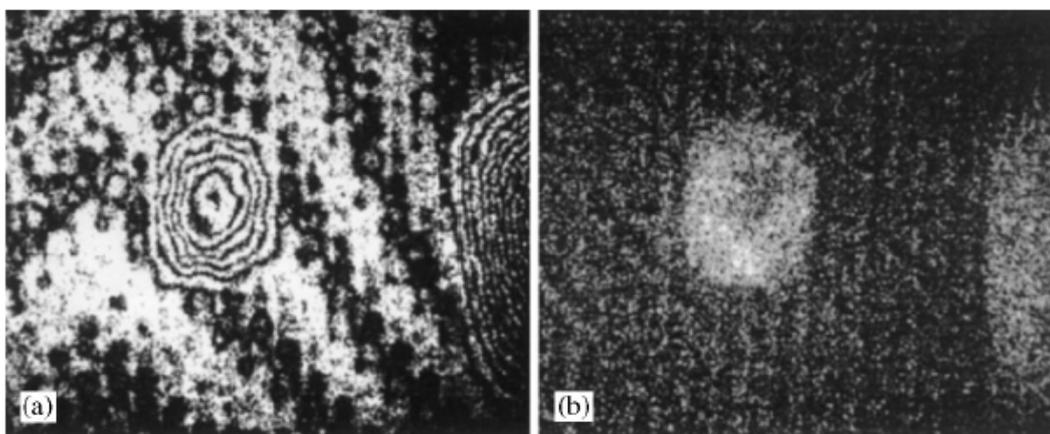


Figura 2.17: Identificazione di uno scollamento tramite: a) interferometria speckle; b) decorrelazione speckle.

2.3.5 Applicazioni dell'interferometria speckle

Nell'ambito dei controlli non distruttivi, oltre a tecniche affermate come, ad esempio, la radiografia a raggi X e gli ultrasuoni, le tecniche di interferometria speckle sono certamente le più interessanti, tra i metodi ottici a non contatto. L'interferometria speckle ha la stessa sensibilità di altri metodi interferometrici, come l'interferometria moiré o l'olografia, anche se le frange a cui dà luogo sono di qualità minore rispetto a quelle delle tecniche sopra citate. Tuttavia, non vengono utilizzate né griglie, necessarie nell'interferometria moiré, né di processi fotografici, adoperati nell'interferometria olografica classica. Inoltre, rispetto a quest'ultima, l'interferometria speckle consente di utilizzare dispositivi sensibili solo ad alcune componenti di spostamento e di acquisire in maniera facile le immagini al fine di implementare algoritmi per l'estrazione di mappe di fase.

Grazie a queste caratteristiche positive, l'interferometria speckle ha dato luogo a diversi sistemi commerciali e a numerose applicazioni.

Per esempio, può essere eseguita un'analisi accurata dei danni che possono influenzare la vita a fatica di laminati compositi rinforzati. Difetti come scollamenti, che potrebbero essersi generati durante il processo di produzione, sono facilmente riscontrabili (Figura 2.17a)), così come qualsiasi altro difetto interno che può essere prodotto durante il servizio, sotto l'azione di carichi ciclici, o da qualsiasi altra causa – come stress termici o impatti.

Un'altra interessante applicazione è la diagnostica su manufatti artistici tra cui affreschi, dipinti e mosaici.

La Figura 2.18a) [2.17] mostra il dipinto “Madonna del Prato”. Nell'interferogramma di Figura 2.18b) è evidenziato un sistema irregolare di frange, che può significare la presenza di un difetto in quella zona; in Figura 2.18c), invece, le frange concentriche mostrano un distacco.

Oltre a quanto detto, l'interferometria speckle è anche utilizzata per la determinazione della forma di un oggetto e nella misura della rugosità (Figura 2.19) [2.18]. Questa applicazione è basata sulla relazione esistente tra la variazione di fase, introdotta da una variazione della direzione di illuminazione, e la forma dell'oggetto in esame.

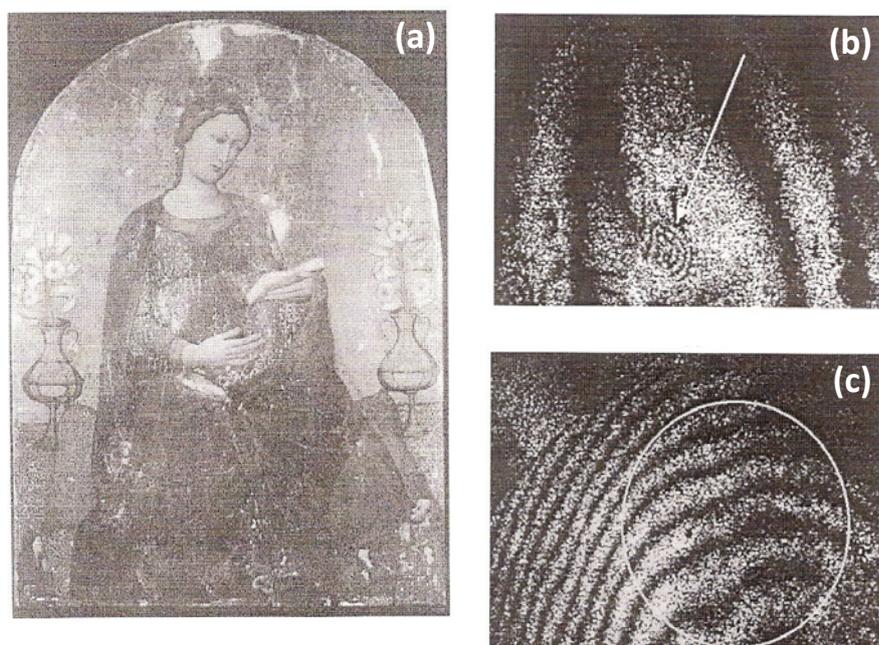


Figura 2.18: Dipinto “Madonna del prato” (a sinistra) e relativi interferogrammi (a destra).

Un'altra possibile applicazione dell'interferometria speckle riguarda lo studio dei fenomeni di vibrazione; come nel caso dell'olografia, è possibile ottenere dei sistemi

di frange in media temporale che consentono di identificare le frequenze proprie dell'oggetto vibrante.

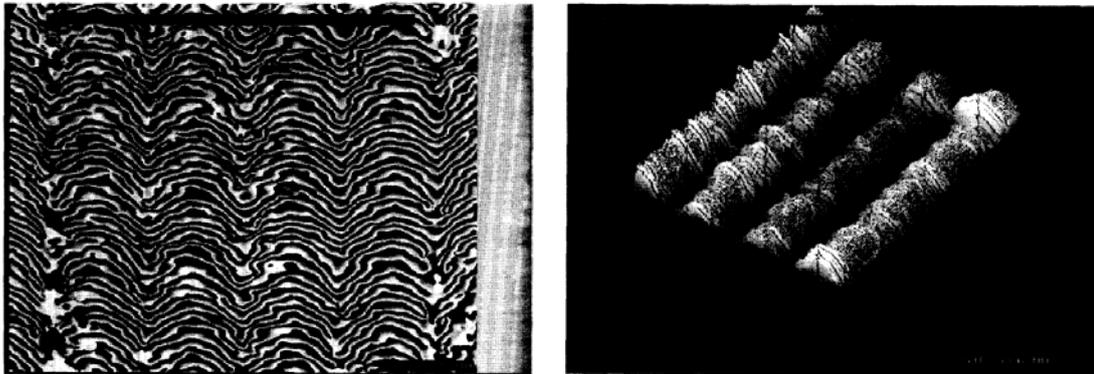


Figura 2.19: Sistema di frange speckle 2D (a), e 3D dopo l'unwrapping (b) di una superficie fresata.

A tal proposito, la Figura 2.20 mostra i primi quattro modi di vibrare di una piastra piezoceramica non vincolata ai bordi. Le zone più chiare sono quelle in cui lo spostamento è nullo, ovvero rappresentano i nodi della struttura.

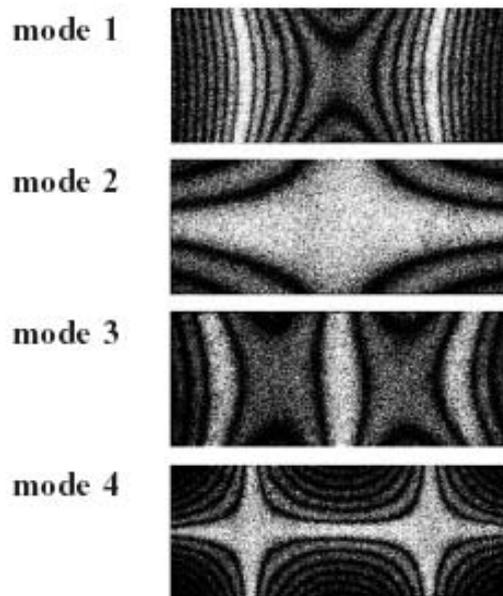


Figura 2.20: Primi 4 modi di vibrare di una piastra non vincolata ai bordi.

Inoltre, grazie alle suddette capacità delle tecniche interferometriche speckle, sono state sviluppate diverse applicazioni nell'ambito della caratterizzazione dei materiali; esempi di queste applicazioni sono la caratterizzazione elastica di materiali isotropi ed anisotropi [2.19-2.22] o la misura delle tensioni residue [2.23-2.25]. Tuttavia, attualmente non sono presenti molte applicazioni nell'ambito delle grandi

deformazioni [2.26, 2.27], come la caratterizzazione elasto-plastica di materiali o la misura dei campi di deformazione altamente localizzati che nascono attorno a difetti o intagli [2.28, 2.29]. Questo limite è essenzialmente dovuto al già citato fenomeno della decorrelazione, che si manifesta in maniera importante quando devono essere misurate grandi deformazioni, generando il degrado del campo speckle diffratto dalla superficie.

Per superare questo problema, nel seguente lavoro di tesi è stato proposto un metodo per la misura incrementale degli spostamenti, il quale verrà discusso nel Capitolo 3.

2.4 Correlazione digitale delle immagini

La Correlazione Digitale delle Immagini (DIC) è una tecnica matematica che consiste nel confrontare le immagini di una scena acquisite nel tempo al fine di stabilire il movimento degli oggetti in essa contenuti. Il così detto flusso ottico, cioè la variazione nel tempo dell'intensità luminosa, fornisce importanti informazioni rispetto sia al moto che alla struttura degli oggetti ed è utile in diversi settori come la visione artificiale, la navigazione autonoma e la compressione di immagini. Se si garantiscono alcune condizioni, per esempio la stabilità nello spazio e nel tempo della sorgente d'illuminazione e del sistema di acquisizione, è lecito attribuire le variazioni d'intensità luminosa agli spostamenti degli oggetti presenti nella scena. In tal senso la DIC è stata utilizzata nella meccanica sperimentale, in robotica e in fluidodinamica. A partire dall'inizio degli anni '80, sono stati messi a punto degli algoritmi capaci di stimare gli spostamenti subiti da un provino con una precisione migliore di un ventesimo di pixel. Il primo passo per l'applicazione della DIC consiste nel creare una distribuzione casuale, ben contrastata e distribuita di piccole macchie sulla superficie da misurare, che prendono il nome di speckle. A questo scopo si può impiegare una vernice spray bianca opaca, talvolta dopo aver utilizzato una vernice nera per migliorare il contrasto. La DIC ha il grosso vantaggio, rispetto ad altre tecniche, di poter essere utilizzata anche su superfici microscopiche, sfruttando la tessitura naturale dell'oggetto da esaminare. Altri fattori particolarmente positivi nell'impiego della correlazione digitale delle immagini vengono individuati nella possibilità di determinare a tutto campo la grandezza d'interesse, nell' assenza di contatto, nella relativa semplicità del sistema di acquisizione (PC e telecamera),

nell'ampia scelta della base di misura (da alcuni centimetri a pochi micrometri con l'uso di microscopi ottici o elettronici a scansione), e nella capacità di misurare sia nel campo delle piccole che delle grandi deformazioni, sino a rottura. Grazie agli ultimi sviluppi è possibile misurare campi di deformazione 3D e, in accoppiata con la TAC (Tomografia Assiale Computerizzata), alcuni ricercatori hanno ricostruito il campo di deformazioni tridimensionale all'interno di un volume opaco. A fronte dei vantaggi sopraelencati, pare chiaro come queste tecniche, anche grazie alla rapida crescita in qualità e prestazioni delle telecamere e dei dispositivi di calcolo, abbiano avuto negli ultimi anni un rapido sviluppo che le ha portate ad affermarsi per la loro versatilità di applicazione, semplicità d'uso e per la capacità di restituire il dato voluto con immediatezza, senza richiedere una lunga fase di post-analisi delle registrazioni effettuate, anche se non ancora per la sensibilità e l'accuratezza assoluta dei risultati.

2.4.1 Teoria di base della correlazione digitale

La tecnica della correlazione digitale delle immagini è stata proposta negli anni '80 [2.30, 2.31] come un approccio automatizzato per il calcolo delle deformazioni e degli spostamenti di una superficie nel piano della superficie stessa. La tecnica si basa sulla massimizzazione di un coefficiente di correlazione che si determina esaminando l'intensità luminosa di sottomatrici di pixel su due o più immagini corrispondenti ed estraendo la funzione di mappatura delle deformazioni che lega le immagini.

Si supponga che i vettori A e B nel computer contengano le distribuzioni bidimensionali d'intensità derivanti dalle configurazioni indeformata e deformata dell'oggetto. Affinché questi vettori possano essere utilizzati è necessario che si assuma l'esistenza di una relazione matematica tra la deformazione dell'oggetto e la deformazione o cambiamento dei valori d'intensità registrati. In particolare è stato assunto che piccoli sottoinsiemi del pattern delle intensità registrato nel vettore B siano collegati a sotto-insiemi delle stesse dimensioni nel vettore A attraverso mapping lineare omogeneo. Il processo di deformazione ipotizzato è mostrato graficamente in Figura 2.21.

Da un punto di vista matematico, definita $A(x)$ la forma digitale del campo scalare d'intensità registrato quando l'oggetto è deformato, per ogni piccolo sottoinsieme si può scrivere:

$$x'_i = x_i + u_i + \frac{\partial u_i(x)}{\partial x_j} dx_j \quad i, j = 1, 2 \quad (2.13)$$

dove x' è la posizione deformata di un punto arbitrario del sottoinsieme, u è il vettore spostamento e $\frac{\partial u_i(x)}{\partial x_j}$ sono le componenti del gradiente delle deformazioni. Per

ottenere lo spostamento e i termini del gradiente delle deformazioni per un sottoinsieme locale, è richiesta la minimizzazione del quadrato della differenza tra il sottoinsieme scelto, espresso nel vettore A , e tutti i sottoinsiemi della stessa dimensione del vettore B . Si definisca, quindi, una funzione di correlazione C per mezzo della seguente equazione:

$$C\left(u_i, \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = \iint [A(x) - B(x')]^2 dx \quad i, j = 1, 2 \quad (2.14)$$

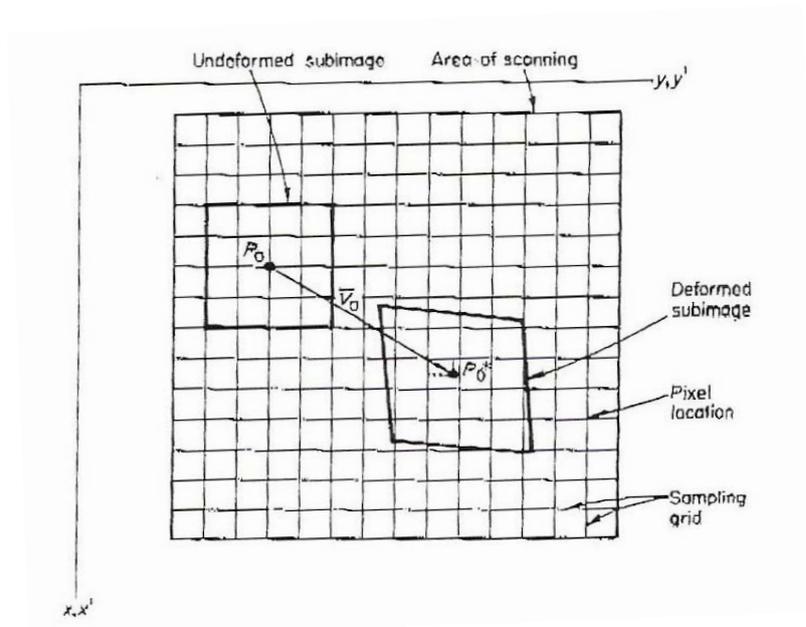


Figura 2.21: Deformazione di una sottoimmagine.

L'obiettivo da raggiungere sta nella minimizzazione della funzione C rispetto ai sei parametri $(u_i \text{ e } \frac{\partial u_i(x)}{\partial x_j})$ che definiscono il campo di deformazione. Per meglio

comprendere, da un punto di vista fisico, tale procedimento si faccia riferimento alla Figura 2.21 (a). L'analista sceglie un sistema di riferimento lagrangiano attaccato all'oggetto indeformato. Si sceglie, inoltre, un sottoinsieme di piccole dimensioni centrato in P_0 , del quale è richiesta la deformazione in seguito all'applicazione dei carichi. Tale sottoinsieme è spostato e distorto in maniera omogenea, come mostrato in figura.

Il vettore $A(x)$, relativo al sottoinsieme in questione, viene dunque confrontato con i valori d'intensità registrati all'interno del vettore deformato $B(x')$; le deformazioni che minimizzano la funzione di correlazione (come definita sopra) corrispondono al mapping locale della superficie dell'oggetto.

L'utilizzo di tale procedimento presuppone l'esistenza, all'interno del corpo, di una regione per la quale il campo di deformazione possa essere considerato omogeneo. Questa assunzione risulta solitamente accettabile quando i sottoinsiemi scelti sono sufficientemente piccoli; in tal caso il metodo si può dire valido sia per le piccole che per le grandi deformazioni.

A fronte della discussione fin qui affrontata è necessario precisare che la procedura di determinazione del minimo in una funzione di molte variabili è attualmente argomento di ricerca nella matematica applicata.

Tale problema è stato affrontato da diversi autori seguendo diversi approcci. I metodi più utilizzati per la ricerca del minimo globale della funzione sono: l'approccio iterativo di Newton-Raphson [2.31, 2.32, 2.33], la doppia trasformata di Fourier [2.34], il metodo del gradiente [2.35], e metodi basati sulle reti neurali [2.36] e gli algoritmi genetici [2.37].

2.4.2 Distinzione tra approccio locale e approccio globale

Nella letteratura scientifica si distinguono essenzialmente due approcci, quello locale e quello globale, che differiscono nelle modalità di discretizzazione del dominio da correlare.

Acquisite in forma digitale due immagini del provino, una prima e l'altra dopo l'applicazione del carico, gli algoritmi che seguono l'approccio locale procedono alla divisione della prima (detta immagine di riferimento) in blocchi rettangolari di pixels. Essi agiscono sui blocchi, indipendentemente gli uni dagli altri, fornendo una stima del campo di spostamento, ma senza garantirne la continuità e richiedono l'applicazione, a posteriori, di un filtro per il fitting dei dati.

Nell'approccio globale, invece, si ricerca contemporaneamente l'intero campo di spostamenti che, applicato all'immagine indeformata, la renda perfettamente sovrapponibile alla deformata. Il campo di spostamento è approssimato in maniera analoga a quanto avviene nel metodo degli elementi finiti. La griglia degli elementi, inizialmente definita sull'immagine indeformata, segue l'evoluzione del campo nelle immagini deformate attraverso gli spostamenti dei nodi che, legando tra loro gli elementi, garantiscono la congruenza e la continuità del campo di spostamento.

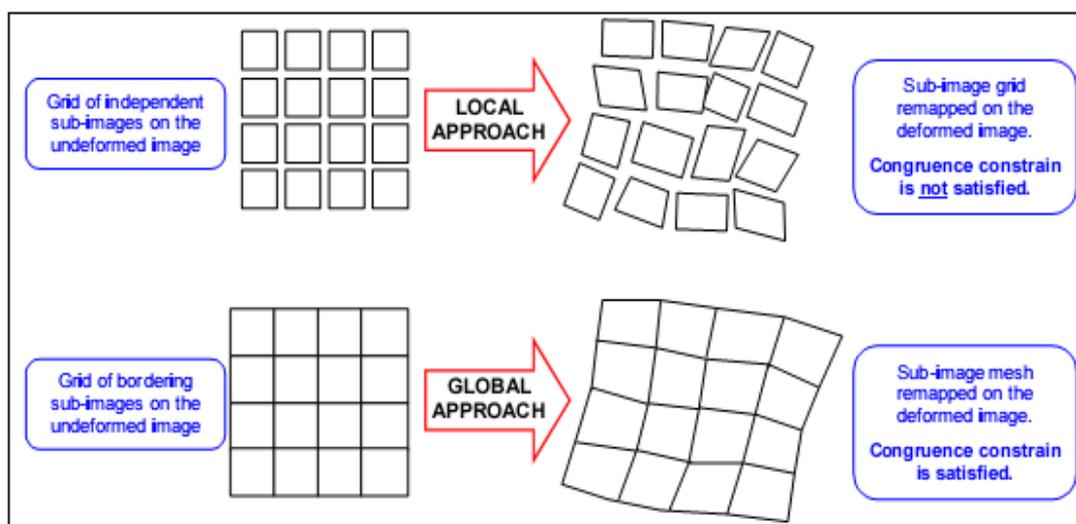


Figura 2.22: Confronto tra approccio locale e globale nella correlazione delle immagini.

Che si usi l'approccio locale o quello globale, ci si può facilmente convincere di come determinare il campo di spostamenti in numero intero di pixel non sia un'impresa particolarmente ardua; la vera sfida dei ricercatori sta nel cercare algoritmi via via più efficienti che conducano a risultati con una risoluzione sub-pixel, meglio ancora se forniti in tempo reale. Per ottenere una buona precisione è comunque opportuno che gli spostamenti tra due immagini successive siano molto piccoli. È dunque necessario acquisire e analizzare parecchie immagini anche per misurare piccoli spostamenti.

Nell'approccio locale, la superficie del provino, sulla quale è presente la marcatura speckle, viene osservata sia prima che dopo la deformazione per mezzo di una telecamera; due immagini digitali vengono dunque registrate, ognuna delle quali è rappresentata da un vettore di scalari corrispondenti al livello di grigio di ciascun pixel. Come già accennato, con l'approccio locale si sceglie di dividere l'immagine indeformata in una serie di sottoimmagini (chiamate Zone of Interest, in sigla ZOI) di dimensioni $l \times l$ pixels imposte dall'operatore, che definisce inoltre la distanza δ tra i centri di due ZOI consecutive. Lo scopo della tecnica è quello di determinare il campo di spostamenti di ciascuna ZOI in modo da costruire sull'immagine deformata una griglia di sottoimmagini corrispondenti a quelle dell'indeformata ma che seguano il campo di deformazione realmente imposto al provino (Figura 2.23).

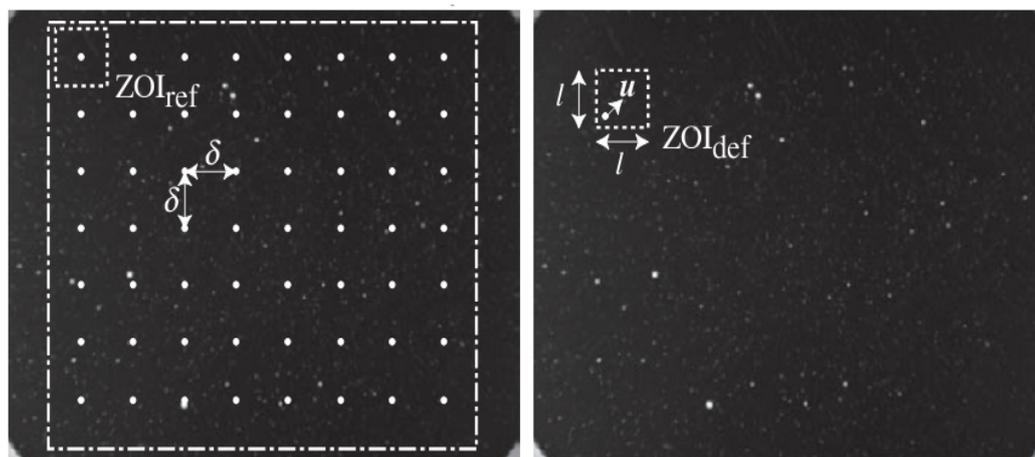


Figura 2.23: Creazione della griglia di sottoelementi per l'approccio locale.

Con l'approccio globale, invece, si procede alla valutazione a tutto campo della grandezza d'interesse, analizzando l'intero dominio da correlare contemporaneamente. Una volta acquisita l'immagine di riferimento, all'operatore è generalmente chiesto di scegliere la tipologia di elementi da utilizzare nel creare la griglia da applicare all'immagine indeformata; in tal senso a causa della natura dell'immagine, suddivisa in pixels, è opportuno utilizzare elementi di forma quadrata o rettangolare (Figura 2.24).

Ultimamente tale approccio sta riscuotendo particolare interesse tra i ricercatori per la possibilità di ottenere in maniera diretta il calcolo dell'intero campo di spostamenti, senza bisogno di applicare successivamente un algoritmo per il fitting dei dati.

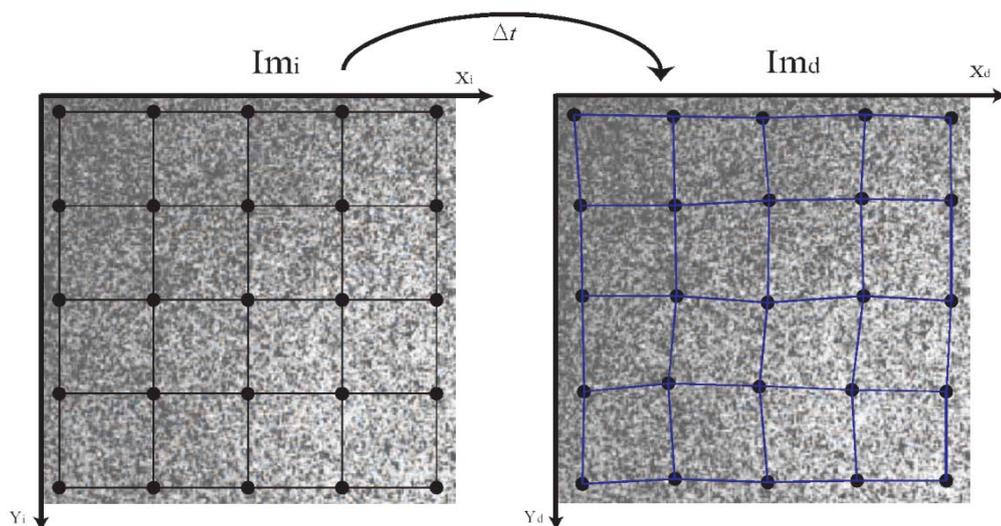


Figura 2.24: *Approccio globale: rappresentazione schematica della griglia di elementi nella condizione indeformata (a sinistra) e deformata (a destra).*

2.4.3 Correlazione digitale delle immagini tridimensionale

Inizialmente la DIC era una tecnica capace solo di misurare gli spostamenti e le deformazioni nel piano di una superficie. Successivamente, l'utilizzo della stereovisione in congiunzione con la correlazione digitale ha permesso di trasformare tale tecnica in un metodo per la misura di campi di deformazione tridimensionali, oltre che per la ricostruzione della forma di oggetti 3D.

La stereovisione binoculare è una tecnica per la ricostruzione di una scena 3D da due diversi punti di vista; a tal proposito si faccia riferimento alla Figura 2.25, dove $P(X, Y, Z)$ è il punto analizzato, $p_1(u_1, v_1)$ e $p_2(u_2, v_2)$ sono le sue proiezioni stereo nelle immagini, C_1 e C_2 sono i centri ottici delle due telecamere.

Da due immagini è possibile calcolare le coordinate 3D di un punto nello spazio attraverso una triangolazione, assumendo che:

1. La posizione relativa delle due telecamere e la loro orientazione siano note (Figura 2.26). Questo problema si risolve effettuando una procedura di calibrazione off-line della telecamera.
2. I due punti immagine p_1 e p_2 sono identificati come corrispondenti allo stesso punto fisico P .

Utilizzando la tecnica della stereovisione la variazione di forma di un oggetto può essere misurata analizzando una sequenza di coppie di immagini stereo.

In particolare, da una coppia di immagini stereo prese al tempo t_0 , la forma 3D dell'oggetto al tempo t_0 può essere calcolata. Da una coppia di immagini stereo prese al tempo t_1 , si può ottenere la forma dell'oggetto in quest'istante successivo. Inoltre, eseguendo il matching delle due immagini prese dalla telecamera di sinistra (e da quella di destra) ai tempi t_0 e t_1 , può essere calcolato lo spostamento 3D di ciascun punto dell'immagine (Figura 2.27).

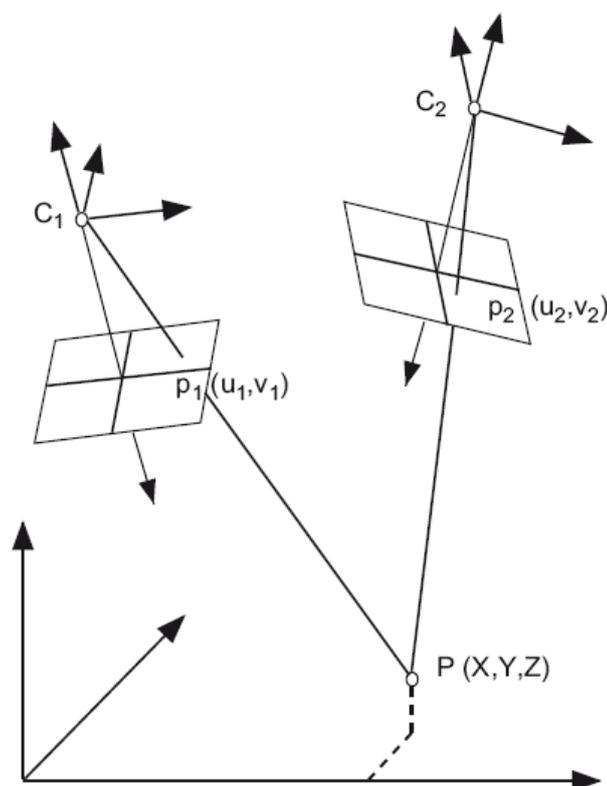


Figura 2.25: *Stereovisione binoculare.*

Il problema del matching temporale è simile al classico problema della misura di un campo di spostamento 2D e viene pertanto affrontato eseguendo il tracking dei pixel attraverso la correlazione digitale di una sequenza di immagini stereo.

La DIC 3D attualmente trova applicazione prevalentemente nella scienza dei materiali, nell'ingegneria meccanica [2.38], nella biomeccanica [2.39], nella formazione dei polimeri [2.40], nelle prove di impatto ad elevata velocità [2.41, 2.42] e in molti altri campi.

A titolo di esempio, in Figura 2.28 sono mostrate le deformazioni principali, misurate tramite la DIC 3D, di un provino con intaglio soggetto a trazione [2.43].

2.5 Altre tecniche per la misura di grandi deformazioni

Altre tecniche utilizzate per la misura di grandi deformazioni sono la fotoelasticità ed il moiré.

La fotoelasticità [2.44], diffusasi nei primi decenni del '900, è un metodo ottico che si basa su un fenomeno noto come *birifrangenza accidentale meccanica*, cioè sulla dipendenza degli indici di rifrazione di alcuni materiali trasparenti non cristallini (resine epossidiche, policarbonato, etc.) dallo stato tensionale. Tramite la fotoelasticità, dunque, è possibile rilevare a pieno campo lo stato tensionale di un corpo trasparente soggetto ad uno stato piano di tensione. Tale tecnica è stata utilizzata in passato per la risoluzione di alcuni problemi quali la determinazione dei coefficienti di concentrazione delle tensioni. Tuttavia, al giorno d'oggi, essa non è molto applicata, principalmente a causa delle limitazioni derivanti dai tipi di corpi che possono essere ispezionati, che devono essere piani e di materiale trasparente; per cui è necessaria la realizzazione di modelli e successivamente il trasferimento dei risultati dal modello al prototipo. Oltre a questo, la procedura di identificazione delle tensioni può risultare laboriosa, anche se un passo in avanti si è fatto con l'avvento della fotoelasticità digitale.



Figura 2.26: Posizione delle due telecamere per la stereo visione.

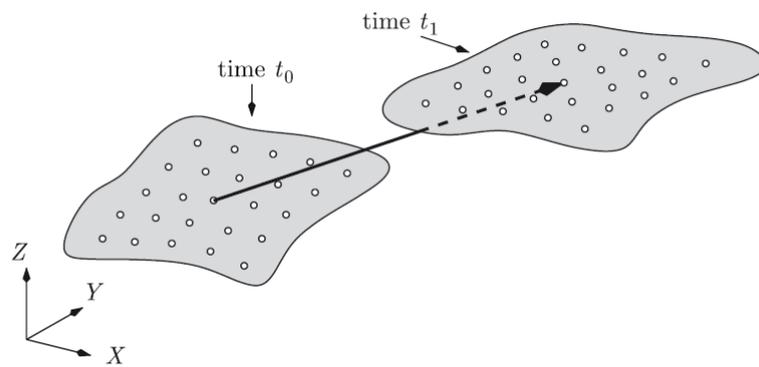


Figura 2.27: Calcolo del campo di spostamento 3D.

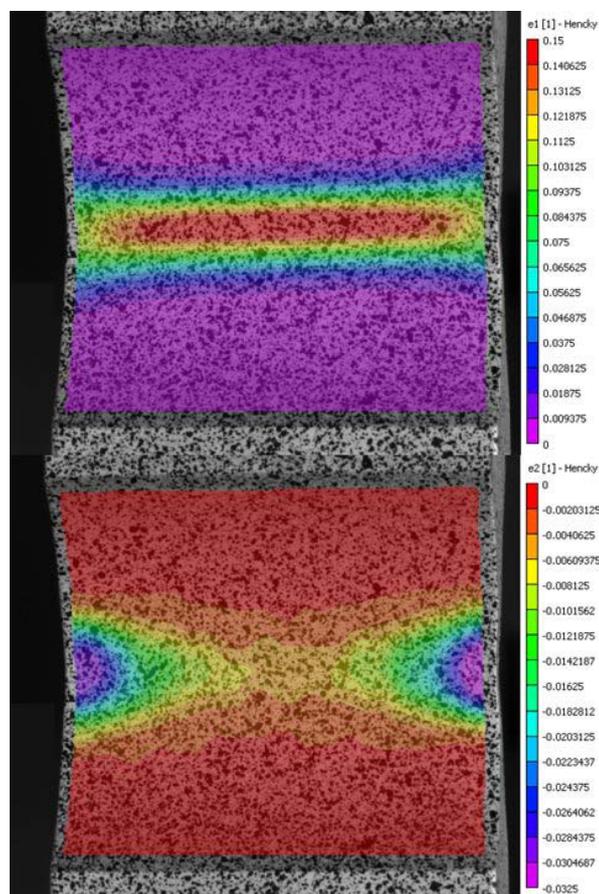


Figura 2.28: Deformazioni principali di un provino con intaglio soggetto a trazione, misurate attraverso la DIC 3D.

Più tardi, intorno agli anni '60, si diffusero le tecniche moiré [2.45], basate sull'interferenza meccanica di due griglie, una di riferimento fissa e l'altra attaccata al corpo da esaminare. Il moiré, nella sua configurazione base, mostra un sistema di

frange, derivante dalla suddetta interferenza meccanica tra le griglie, che possono essere interpretate come curve di livello di una singola componente di spostamento nel piano. Attraverso delle varianti, quali il moiré ombra o il moiré alla Ligtnerberg, è possibile misurare la forma di oggetti, gli spostamenti fuori dal piano e le rotazioni delle normali ad una superficie [2.46]. Il principale limite delle tecniche moiré risiede nella bassa sensibilità della tecnica, dovuta ai limiti costruttivi delle griglie per i quali non è possibile ridurre il passo oltre una certa misura; pertanto le tecniche moiré si possono utilizzare per le misure di grandi spostamenti [2.47], rilievi di forme [2.48] o per la realizzazione di sistemi di allineamento.

Negli ultimi anni si sta sviluppando il cosiddetto moiré digitale [2.49], che si basa su l'utilizzo di operazioni logiche per la generazione delle frange ed utilizza la tecnica del phase-shifting per la quantificazione dei pattern.

2.6 Bibliografia

- [2.1] E.O. Doebelin, *Measurement systems: Application and Design*, International Edition, McGraw-Hill Company.
- [2.2] A. Bray, V. Vicentini, *Meccanica sperimentale: misure ed analisi delle sollecitazioni*, Levrotto&Bella, Torino.
- [2.3] MTS Systems Corporation, *Extensometer and Clip Gage Catalog*, 1400 Technology drive, Eden Prairie.
- [2.4] C. Vest, *Holographic interferometry*, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [2.5] D. Gabor, *A new microscopic principle*, Nature 161 (4098), 777-778, 1948.
- [2.6] E.N. Leith, J. Upatnieks, *Reconstructed wavefront and communication theory*, Journal of Optical Society of America 52 (10), 1123-1130, 1962.
- [2.7] I. Yamaguchi, J. Kato, S. Otha, J. Mizuno, *Image formation in phase shifting digital holography and applications to microscopy*, Applied Optics 40 (34), 6177-6186, 2001.
- [2.8] J. Desse, P. Picart, P. Tankam, *Digital three-color holographic interferometry devoted to fluid mechanics*, Proceedings of the IV Speckle Conference, Florianopolis (Brazil), 2010.
- [2.9] A.E. Ennos, *A look back at the early developments of speckle metrology*, Optics and Lasers in Engineering 26 (2-3), 87-92, 1997.
- [2.10] W.J. Goodman, *Statistical properties of laser speckle patterns* in Laser Speckle and Related Phenomena, JC Dainty Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [2.11] L. Leushacke, M. Kirchner, *Three-dimensional correlation coefficient of speckle intensity for rectangular and circular apertures*, Journal of Optical Society of America A 7 (5), 827-832, 1990.
- [2.12] L. Bruno, A. Poggialini, *Phase retrieval in speckle interferometry: a one-step approach*, Pro. Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications, Lausanne, 461-472, 2000.
- [2.13] M. Lehmann, *Decorrelation-induced phase errors in phase-shifting speckle interferometry*, Applied Optics 36 (16), 3657-3667, 1997.

- [2.14] C. Joenathan, P. Haible, H.J. Tiziani, *Speckle interferometry with temporal phase evaluation: influence of decorrelation, speckle size, and non linearity of camera*, Applied Optics 38 (7), 1169-1178, 1999.
- [2.15] M. Lehmann, *Optimization of wavefield intensities in phase shifting speckle interferometry*, Optics Communications 118, 199-206, 1995.
- [2.16] L. Bruno, L. Pagnotta, A. Poggialini, *Laser speckle decorrelation in NTD*, Optics and Lasers in Engineering 34 (1), 55-56, 2000.
- [2.17] D. Albrecht, D. Franchi, A.C. Lucia, P.M. Zanetta, A. Aldovrandi, *Diagnostic of the conservation state of antique Italian paintings on panel carried out at the Laboratorio di restauro dell'Opificio delle Pietre Dure in Florence, Italy with ESPI-based portable instrumentation*, Journal of Cultural Heritage 1, 331-335, 2000.
- [2.18] M. Hertwig, *Application of improved speckle contouring technique to surface roughness measurements*, Optics and Lasers in Engineering 26, 115-130, 1997.
- [2.19] L. Bruno, A. Poggialini, *Elastic characterization of anisotropic materials by speckle interferometry*, Experimental Mechanics 45 (3), 205-212, 2005.
- [2.20] K. Genovese, L. Lamberti, C. Pappalettere, *A new hybrid technique for in-plane characterization of orthotropic materials*, Experimental Mechanics 44 (6), 584-592, 2004.
- [2.21] M. Farias, R. Rodriguez-Vera, J.A. Rayas, *Young's modulus determination of a circular plate by ESPI*, Proc. of SPIE-The International Society of Optical Engineering 7499, 749912, 2009.
- [2.22] M.M.S. Gualini, S. Iqbal, W. Sixt, W.A. Khan, K. Zulfqar, *Broader corneal characterization with pulseESPI applied to elasticity measurements*, European Journal of Ophthalmology 20 (2), 306-309, 2010.
- [2.23] F. Furgiuele, L. Pagnotta, A. Poggialini, *Measuring residual stresses by hole-drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration*, ASME Journal of Engineering Materials and Technology 113, 41-50, 1991.
- [2.24] J. Ribeiro, J. Monteiro, M. Vaz, H. Lopes, P. Piloto, *Measurement of residual stresses by optical techniques*, Strain 45 (2), 123-130, 2009.

- [2.25] G.S. Schajer, M. Steinzig, *Full-field calculation of hole drilling residual stresses from electronic speckle pattern interferometry data*, *Experimental Mechanics* 45 (6), 526-532, 2005.
- [2.26] L. Bruno, G. Sciumè, *Deformation field induced by spherical indentation: Numerical analysis and experimental measurement by speckle interferometry*, *Optics and Lasers in Engineering* 42 (3), 289-301, 2004.
- [2.27] C.L. Zhou, F. Li, Y.S. Wang, *Large displacement measurement using ESPI*, *Journal of Optoelectronics Laser* 16 (12), 1472-1475, 2005.
- [2.28] F.V. Diaz, G.H. Kaufmann, A.F. Armas, O. Moller, *Measurement of the near-tip displacement field in a fatigue damaged steel plate by digital speckle pattern interferometry*, *Optics and Lasers in Engineering* 37 (6), 621-629, 2002.
- [2.29] S. Yoneyama, T. Ogawa, Y. Kobayashi, *Evaluating mixed-mode stress intensity factors from full-field displacement fields obtained by optical methods*, *Engineering Fracture Mechanics* 74 (9), 1399-1412, 2007.
- [2.30] W.H. Peters, W.F. Ranson, *Digital imaging techniques in experimental stress analysis*, *Optical Engineering* 21 (3), 427-431, 1982.
- [2.31] H.A. Bruck, S.R. McNeill, M.A. Sutton, W.H. Peters, *Digital image correlation using Newton-Rapson method of partial-differential correlation*, *Experimental Mechanics* 29, 261-267, 1989.
- [2.32] C.Q. Davis, D.S. Freeman, *Statistics of subpixel registration algorithm based on spatiotemporal gradients or block matching*, *Optical Engineering* 37, 1290-1298, 1998.
- [2.33] H. Lu, P. Cary, *Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient*, *Experimental Mechanics* 40, 393-400, 2000.
- [2.34] D.J. Chen, F.P. Chiang, Y.S. Tan, H.S. Don, *Digital speckle-displacement measurement using a complex displacement method*, *Applied Optics* 32, 1839-1849, 1993.
- [2.35] P. Zhou, K.E. Goodson, *Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)*, *Optical Engineering* 40, 1613-1620, 2001.

- [2.36] M.C. Pitter, C.W. See, M.G. Somekh, *Subpixel microscopic deformation analysis using correlation and artificial neural networks*, Optics Express 8, 322-327, 2001.
- [2.37] H. Jin, H.A. Bruck, *Pointwise digital image correlation using genetic algorithms*, Experimental Technologies 29, 36-39, 2005.
- [2.38] L. Robert, F. Nazaret, T. Cutard, J.J. Orteu, *Use of 3D digital image correlation to characterize the mechanical behavior of a fiber reinforced refractory castable*, Experimental Mechanics 47, 761-773, 2007.
- [2.39] M.A. Sutton, X. Ke, S.M. Lessner, M. Goldbach, *Strain fields measurements on mouse carotid arteries using microscopic three-dimensional digital image correlation*, Journal of Biomedical Part A 84, 178-190, 2008.
- [2.40] P. Compston, M. Styles, S. Kalyanasundaram, *Low energy impact damage modes in aluminum foam and polymer foam sandwich structures*, Journal of Sandwich Structures and Materials 8, 365-379, 2006.
- [2.41] F. Barthelat, Z. Wu, B.C. Prorok, H.D. Espinosa, *Dynamic torsion testing of nanocrystalline coatings using correlation using high-speed photography and digital image correlation*, Experimental Mechanics 43, 331-340, 2003.
- [2.42] V. Tiwari, M. Sutton, S. McNeill, *Assessment of high speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: methodology development and validation*, Experimental Mechanics 47, 561-579, 2007.
- [2.43] M. Sutton, J.J. Orteu, H.W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, New York, 2009.
- [2.44] M.M. Frocht, *Photoelasticity*, Jhon Wiley & Sons, New York, 1948.
- [2.45] J. Guild, *The interference systems of crossed diffraction gratings: theory of moiré fringes*, Claredon Press, Oxford, 1956.
- [2.46] F.K. Ligtenberg, *The moiré method: a new experimental method for the determination of moments on small slab models*, Proceedings of SESA, Vol. 22, 83-89, 1955.
- [2.47] K.S. Yen, M.M. Ratnam, H.M. Akil, *Measurement of flexural modulus of polymeric foam with improved accuracy using moiré method*, Polymer Testing, 358-368, 2010.

- [2.48] G. Mauvoisin, F. Bremand, A. Lagarde, *3-dimensional shape reconstruction by phase-shifting shadow moiré*, Applied Optics 33 (11), 2163-2169, 1994 .
- [2.49] A. Asundi, K.H. Yung, *Phase-shifting and logical moiré* , Journal of Optical Society of America A 18 (10), 1591-1600, 1991 .

Capitolo 3

Attrezzatura sperimentale

3.1 Generalità

Nel presente capitolo sarà presentata un'attrezzatura sperimentale completa per lo svolgimento di prove interferometriche su provini caricati con uno stato di tensione monoassiale. I principali componenti di tale apparato, tutti progettati e realizzati ad hoc, sono:

- Attrezzatura di carico,
- Sistema di misura degli spostamenti (interferometri comprensivo di sistema di illuminazione ed acquisizione);
- Sistema di controllo (elettronica di controllo interfacciata col calcolatore).

Generalmente, quando si desidera effettuare misurazioni attraverso una tecnica interferometrica, come nel caso in esame, bisogna affrontare due ordini di problemi; il primo riguarda sicuramente l'accuratezza dell'interferometro, l'altro è relativo all'attrezzatura di carico. Quest'ultima, infatti, bene si deve prestare a lavorare con l'interferometro, senza introdurre disturbi che nel caso di utilizzo di tecniche ad elevata sensibilità potrebbero pregiudicare la qualità delle misure effettuate. Per ottenere buone misure da un interferometro bisogna far attenzione ad una serie di

aspetti. In primo luogo si dovrà disporre di componenti adeguati, capaci di generare in maniera ottimale le condizioni di interferenza. Anche le sorgenti di illuminazione assumono un'importanza fondamentale, così come il sistema di acquisizione delle immagini, inteso come insieme di obiettivo e telecamera. Infine, per di ricostruire a pieno campo la fase all'interno delle immagini acquisite, bisognerà disporre di un buon sistema per effettuare il phase-shifting. L'attrezzatura di carico, al fine di far lavorare l'interferometro in condizioni vantaggiose, dovrà invece garantire il contenimento delle vibrazioni e la minimizzazione dei moti rigidi del provino. Per questo motivo si è ritenuto non opportuno l'utilizzo di una macchina di prova standard, costituita da una traversa fissa ed una mobile ed attuata attraverso pistoni idraulici, dal momento che entrambi i suddetti requisiti non erano soddisfatti. Si è per questo progettata un'attrezzatura portatile che permettesse di caricare il provino da entrambi i lati (riduzione moti rigidi) attraverso due attuatori lineari a corrente continua, i quali hanno consentito di contenere le vibrazioni ad un livello molto basso. Attraverso l'elettronica di controllo realizzata appositamente, infine, è possibile controllare i vari componenti dell'apparato sperimentale, quali i laser, gli attuatori elettro-meccanici e l'attuatore piezoelettrico, attraverso un qualsiasi calcolatore interfacciato con l'elettronica di controllo attraverso un adattatore che converte la porta USB del PC nella porta seriale dell'elettronica di controllo. Nei seguenti paragrafi verranno analizzati più in profondità i tre principali componenti dell'apparato sperimentale e verrà discussa la logica alla base della progettazione degli stessi.

3.2 Attrezzatura di carico

Per l'esecuzione di prove di trazione al fine di ricavare i parametri elasto-plastici di materiali ingegneristici è stata realizzata un'attrezzatura di carico ad hoc [3.1, 3.2]. La motivazione che ha portato a tale necessità è l'inadeguatezza delle macchine di prova standard a lavorare bene con un interferometro speckle, come quello utilizzato per la misura degli spostamenti delle superfici analizzate. Come affermato in precedenza, infatti, nelle attrezzature di carico classiche il provino è collegato ad una parte fissa ed una traversa mobile che, traslando, imprime il carico di trazione/compressione (o

lo spostamento) desiderato al provino. Quest'ultimo, quindi, subirà nel migliore dei casi una traslazione rigida lungo la direzione di applicazione del carico pari alla metà dello spostamento impresso alla traversa. Tale evenienza è particolarmente sconveniente dal momento che traslazioni rigide nel piano della superficie dell'oggetto analizzato generano una decorrelazione uniforme di tutto il campo speckle diffratto dalla superficie (Capitolo 2) producendo quindi del rumore che potrebbe portare anche alla completa perdita delle informazioni ricercate. Inoltre, nelle macchine di prova standard, un altro problema è quello delle vibrazioni derivanti dall'utilizzo di attuatori idraulici, vibrazioni che rappresentano sempre un disturbo da evitare quando si opera con tecniche ad elevata sensibilità come l'interferometria speckle. L'attrezzatura progettata e realizzata durante questo lavoro di tesi consente di superare i suddetti problemi. Essa è stata pensata per lavorare sul banco ottico ed è costituita da due bracci mobili azionati separatamente per mezzo di due attuatori lineari HIWIN modello LAS3-1 [3.3] (Figura 3.1).



Figura 3.1: Attuatore lineare HIWIN modello LAS3-1.

Tali attuatori permettono di applicare una forza massima sia in trazione che in compressione di 1200 N, garantendo però la forza di mantenimento, anche se non alimentati, fino a 800 N. La velocità di avanzamento dell'attuatore è compresa tra 8 e 12 mm/s, a seconda del carico applicato, mentre la corsa massima è pari a 150 mm. L'attuatore è costituito da un motore elettrico con l'albero accoppiato tramite vite senza fine; la rotazione dell'albero del motore (in un verso o in quello opposto) avviene quando quest'ultimo è alimentato ad una tensione di ± 24 V. E' inoltre possibile variare la tensione di alimentazione al fine di modificare la velocità di

avanzamento: ciò naturalmente comporta una variazione della corrente richiesta dal motore e della forza che l'attuatore riesce a sviluppare, in maniera proporzionale alla variazione di tensione. La possibilità di variare la tensione di alimentazione si è resa necessaria per il motivo riportato di seguito. Si tenga presente che l'avanzamento dei motori a corrente continua dipende dal valore della tensione di alimentazione (che come detto determina la velocità del pistone) e dal tempo per il quale questa è applicata. Non potendo ridurre al di sotto di un certo livello il tempo di alimentazione (50 ms), al fine di evitare che per carichi bassi lo spostamento minimo degli attuatori non fosse già troppo grande da generare la decorrelazione del campo speckle, si è reso necessario poter agire anche sul valore della tensione.

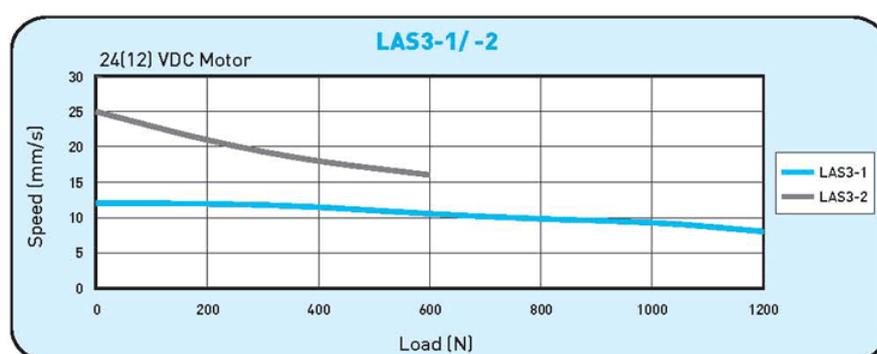


Figura 3.2: Velocità di avanzamento dell'attuatore elettro-meccanico in funzione del carico resistente.

Le due estremità dei motori sono fissate da un lato su due colonne ad elevato smorzamento interno mentre dall'altra su una leva che trasferisce il carico al provino. Tale leva, incernierata su di una forcella fissata al telaio, consente di amplificare il carico e deamplificare lo spostamento di un fattore pari circa a 12.3; la forma e le dimensioni sono state scelte, sulla base di simulazioni numeriche agli elementi finiti, eseguite in ambiente Patran [3.4], in modo da sostenere i carichi in gioco e minimizzare il peso. La Figura 3.3 mostra il modello solido utilizzato nelle simulazioni, nel quale sono stati utilizzati prevalentemente elementi Brick ad 8 nodi; per il materiale si è impostato un comportamento elastico e lineare. Si noti che per le leve di carico si è eseguita una progettazione essenzialmente a tensione, non essendo, nel caso in esame, importante che tali elementi presentassero una rigidità particolare. La Figura 3.4 mostra i vincoli impostati nelle simulazioni; si noti come siano stati utilizzati i cosiddetti MPC (Multiple Point Constraint) che consentono di

simulare il comportamento di una cerniera. Il carico, invece, è stato applicato sotto forma di forza concentrata (800 N) in corrispondenza del punto dove il motore è fissato (Figura 3.3).

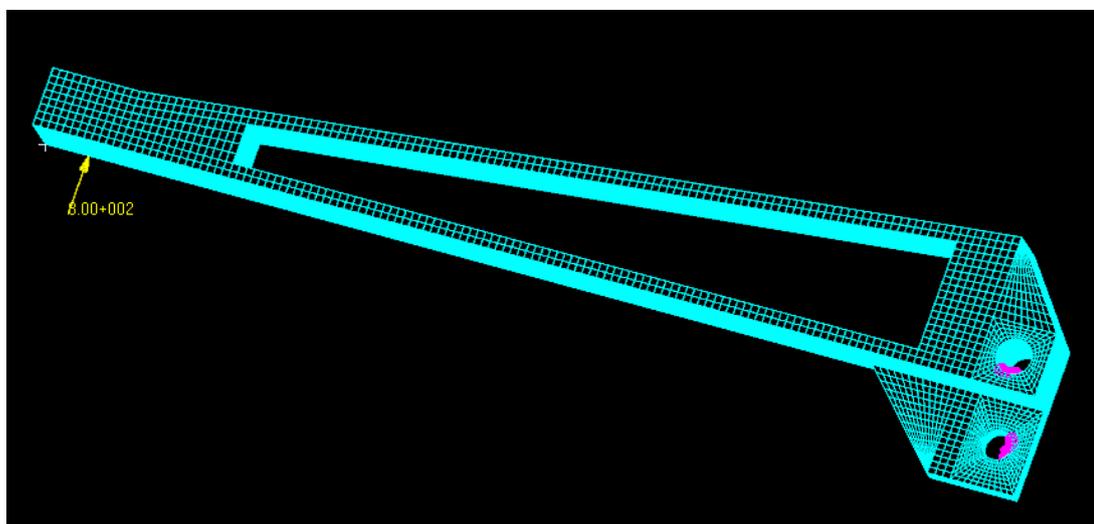


Figura 3.3: Modello agli elementi finiti della leva di carico.

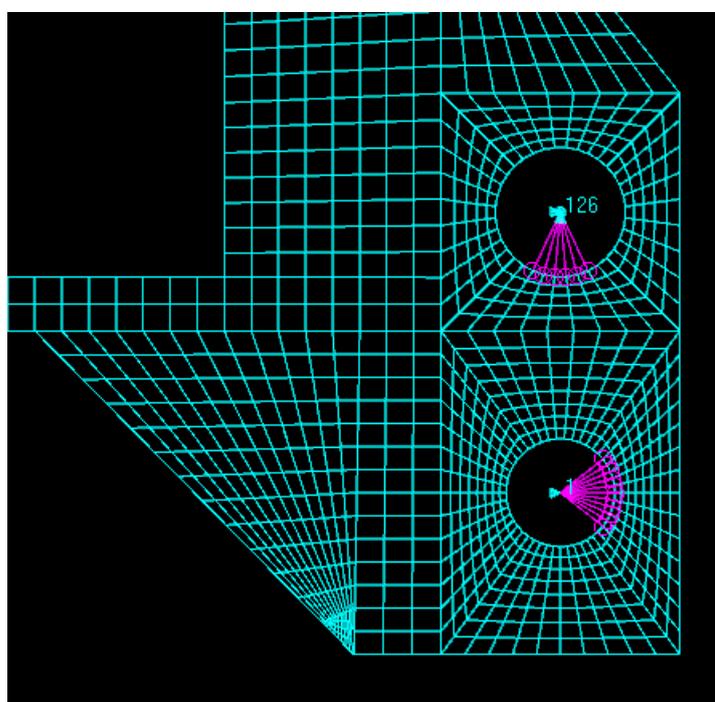


Figura 3.4: Sistema di vincoli impostato per le simulazioni numeriche.

Se si visualizzano le tensioni di von Mises sulla leva di carico (Figura 3.5) si può notare come ovunque la tensione sia minore di 330 MPa , eccetto che nelle zone di applicazione del carico e dei vincoli, in cui si verificano delle concentrazioni degli sforzi. Tuttavia questo non è da considerarsi un problema in quanto si può affermare che, nelle suddette aree, il modello non rispecchia esattamente le condizioni reali di vincolo e carico. Una simulazione più rigorosa, infatti, pervaderebbe lo studio dei fenomeni di contatto, situazione che sicuramente avrebbe portato il valore delle tensioni in quei punti ad un livello molto più basso e veritiero.

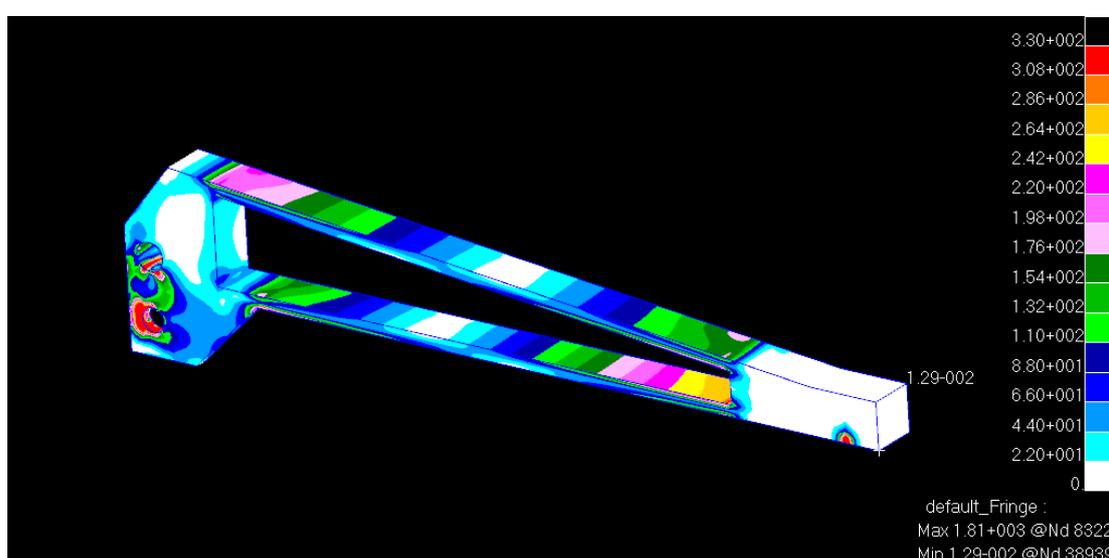


Figura 3.5: Tensioni secondo von Mises agenti nella leva di carico.

Il provino, che assume una posizione verticale, è fissato alle leve mediante opportuni snodi sferici e forcelle al fine di evitare sollecitazioni spurie di flessione e torsione. In Figura 3.6 è mostrata l'attrezzatura di carico completa, con i vari componenti discussi finora messi in evidenza. In particolare, da un lato il provino verrà collegato con un nodo sferico ed una forcella [3.5], fissati tra di loro con una cella di carico miniaturizzata dell'HBM modello U9B [3.6] (fondoscala 10 kN , sensibilità 1 mV/V), mostrata in Figura 3.7. Dall'altro lato il provino viene fissato alla seconda leva mediante due forcelle con gli assi del perno di fissaggio formanti un angolo di 90° ; fra le suddette forcelle è stata inserita un'altra cella di carico uguale alla precedente. Questa soluzione, mostrata in Figura 3.8, consente di ottenere due bracci di carico della medesima dimensione e approssimativamente della stessa rigidezza; di conseguenza, imponendo ad essi gli stessi spostamenti tramite gli attuatori lineari il

piano medio del provino lungo la direzione di applicazione del carico non subisce spostamenti apprezzabili, a patto ovviamente che anche il provino risulti simmetrico. Tale circostanza è particolarmente vantaggiosa se gli spostamenti vengono misurati, come nel caso del presente lavoro, mediante interferometria speckle, dal momento che per questo tipo di tecniche i moti rigidi sono particolarmente dannosi per la qualità delle misure.

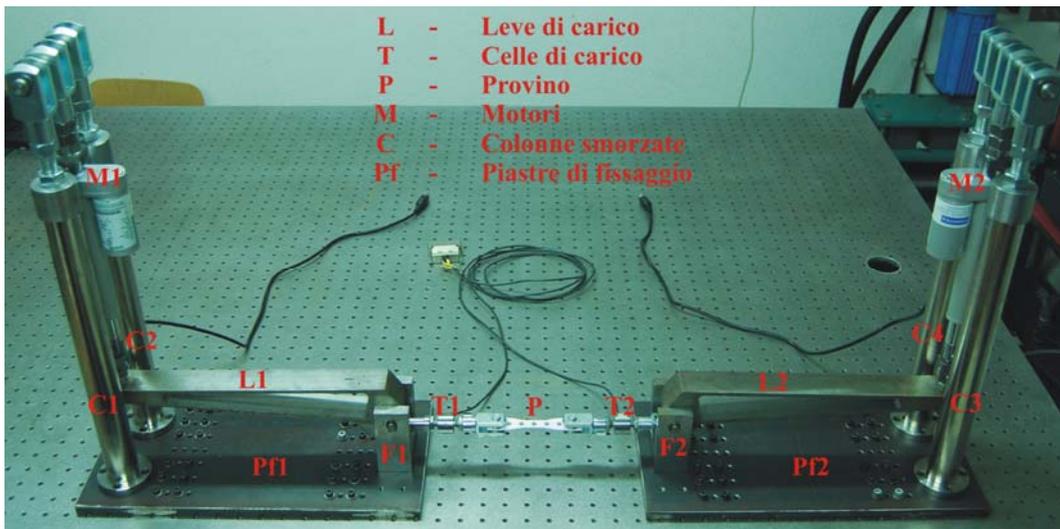


Figura 3.6: *Attrezzatura di carico.*



Figura 3.7: *Cella di carico miniaturizzata.*

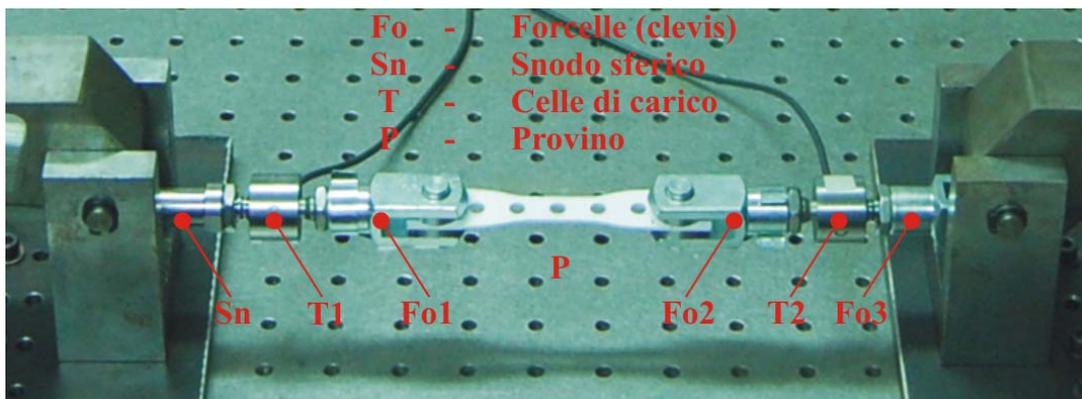


Figura 3.8: Sistema di fissaggio del provino.

Si noti, inoltre, che il sistema adottato, costituito da due piastroni indipendenti sui quali sono state montate le due parti speculari dell'attrezzatura, non vincola il provino ad assumere dimensioni prestabilite, dal momento che le piastre possono essere allontanate o avvicinate a piacimento, con spostamenti minimi di $\frac{1}{2}$ " (essendo questo il passo dei fori ricavati sui piastroni stessi, mentre il passo dei fori del banco ottico è pari ad 1"). Infine, si vuole mettere in evidenza come, nella progettazione dell'attrezzatura di carico si è fatta particolare attenzione al contenimento dei costi; in particolare gli attuatori elettro-meccanici sono dispositivi piuttosto economici che non possiedono alcun controllo in retroazione. Per questo motivo, allo stato attuale non è possibile eseguire, con il sistema di carico presentato, prove in controllo di spostamento. Le caratteristiche tecniche del sistema di carico sono riepilogate in Tabella 3.1.

Capacità di carico	10 kN
Spostamento massimo	25 mm
Attuatore	elettromeccanico
Cella di carico	estensimetrica
Orientamento provino	orizzontale
Bracci mobili	entrambi

Tabella 3.1: Caratteristiche tecniche dall'attrezzatura di carico.

3.3 Sistema di misura degli spostamenti

Per la misura degli spostamenti del provino si è utilizzato un interferometro speckle portatile ed a basso costo progettato e realizzato presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria [3.7, 3.8]. L'interferometro è un dispositivo leggero e compatto basato su un layout alla Michelson; una foto dell'intero assemblato è mostrata in Figura 3.9.

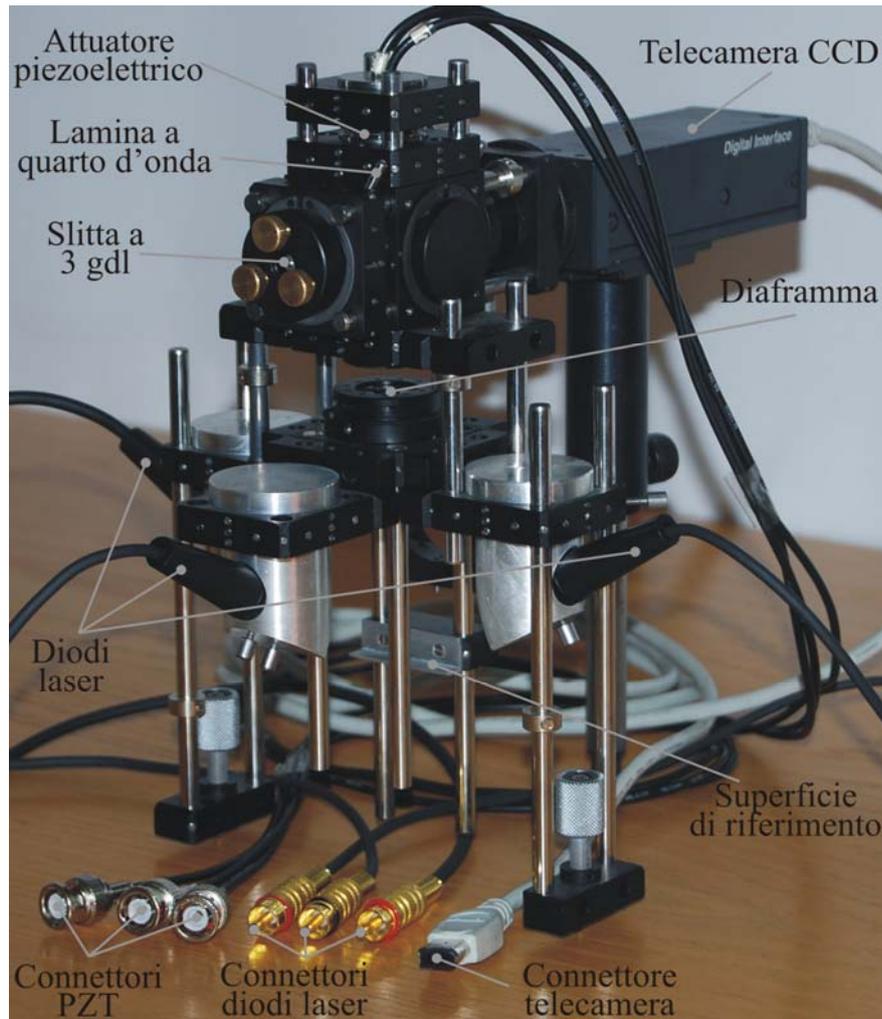


Figura 3.9: Interferometro speckle completo.

Per illuminare l'oggetto sono impiegati 3 diodi laser Hitachi, modello HL6512MG, che emettono una potenza di 50 mW alla lunghezza d'onda di 660 nm [3.9].

L'attuatore piezoelettrico per l'applicazione delle procedure del phase-shifting è un dispositivo non commerciale completamente progettato, realizzato e calibrato presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria [3.10]. Esso è costituito

da tre blocchi ceramici PZT della Physik Instrumente [3.11], modello PL033.30, montati all'interno di un involucro elastico in acciaio inossidabile. La soluzione elettro-meccanica adottata per realizzare l'attuatore consente di ottenere una corsa rettilinea di circa $1.7 \mu\text{m}$.

L'oggetto è focalizzato sull'elemento sensibile della telecamera attraverso due obbiettivi commerciali della LINOS Photonics [3.12]. In particolare, le lenti sono due achromat (doppietti acromatici) che, oltre a minimizzare le aberrazioni cromatiche, motivo per il quale sono progettati, consentono anche la riduzione di quelle sferiche, garantendo perciò una buona qualità delle immagini acquisite. Le due lenti sono montate in maniera contrapposta, una all'ingresso ed una all'uscita dell'interferometro di Michelson, in maniera tale che i fuochi della prima e della seconda lente cadano, rispettivamente, sulla superficie osservata e sul CCD di una telecamera FireWire della Sony, modello XCD-X710 [3.13]. Tale disposizione fa sì che i vari componenti ottici utilizzati nell'interferometro (divisore di fascio a cubo, lamine di ritardo, polarizzatori) funzionino in maniera ottimale e non vengano introdotte aberrazioni nel fronte d'onda luminoso proveniente dall'oggetto. In questo modo l'ingrandimento al quale lavora l'interferometro, pari al rapporto tra le lunghezze focali dei due achromat, può essere variato in maniera discontinua semplicemente sostituendo il doppietto in ingresso al Michelson con un'altra lente di diversa focale, senza modificare la distanza tra il CCD della telecamera ed il rispettivo achromat.

La Figura 3.10 mostra la sezione dell'interferometro di Michelson ricavata dal modello 3D utilizzato nella progettazione del dispositivo. I due fasci sono ottenuti attraverso un divisore di fascio (beam-splitter) a cubo non polarizzante inserito tra i due doppietti acromatici e quindi operante su raggi paralleli. Il fascio oggetto è inviato al CCD da uno specchio piano movimentato dall'attuatore piezoelettrico mentre il fascio di riferimento giunge alla telecamera dopo essere stato riflesso da un altro specchio piano montato su una piattaforma a 3 gradi di libertà (riconoscibile dalle tre viti di aggiustamento) che, ruotando, permette di inquadrare la superficie di riferimento.

Le intensità luminose del fascio oggetto e del fascio di riferimento (e quindi il loro rapporto) possono essere variate attraverso due lamine rotanti: una lamina a quarto

d'onda, posizionata nel braccio che fornisce il fascio di riferimento ed un polarizzatore lineare posizionato tra il beam-splitter e l'achromat posto davanti alla telecamera. Un ulteriore polarizzatore è posizionato all'ingresso del Michelson, davanti alla prima lente; l'utilizzo di questo polarizzatore non è strettamente necessario se il laser è polarizzato e se la superficie analizzata non depolarizza la luce, tuttavia queste due condizioni non sono necessariamente rispettate contemporaneamente.

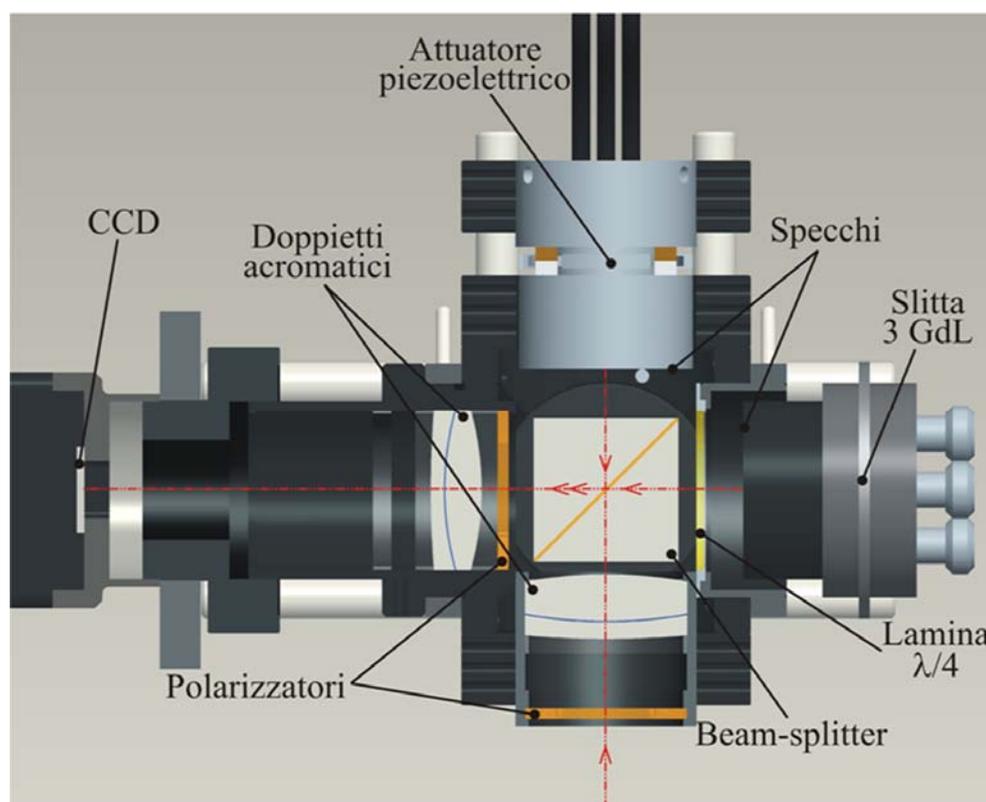


Figura3.10: Modello 3D dell'interferometro di Michelson.

I diodi laser ed un diaframma (per il controllo delle dimensioni dello speckle) sono montati su un modulo che può scorrere su quattro barrette; in questo modo è possibile illuminare l'area investigata a differenti distanze dal primo achromat, senza modificare l'angolo della direzione di illuminazione.

Tutte queste parti dell'interferometro sono state assemblate usando per lo più componenti standard della Linos GmbH [3.12]: elementi meccanici modulari in alluminio anodizzato che consentono di realizzare setup ottici rigidi e di elevata

precisione. L'intero dispositivo è contenuto in un volume di circa 200 x 300 x 300 mm² ed il suo peso è circa 2 kg.

Attraverso il layout ottico sopra descritto, il fascio di riferimento, come già accennato, è ottenuto imponendo un leggero disallineamento allo specchio montato sulla piattaforma a tre g.d.l. In questo modo l'interferenza avviene tra i fasci luminosi diffratti da due superfici vicine poste non lontane dall'asse di osservazione. Perciò l'interferometro può effettivamente lavorare come uno shearometro se l'interferenza avviene tra punti della stessa superficie; altrimenti, se si pone una superficie di riferimento accanto alla superficie da analizzare, l'interferometro sarà sensibile alle componenti "assolute" di spostamento.

Le principali caratteristiche tecniche dell'interferometro sono riassunte nella tabella in basso.

Sorgenti luminose	3 diodi laser, 50 mW, 660 nm
Componenti di spostamento	3 oblique
Dispositivo di acquisizione	Telecamera FireWire CCD B&W
Misura della fase	PS temporale con attuatore PZT

Tabella 3.2: Caratteristiche tecniche dell'interferometro.

3.3.1 Regolazione dell'illuminazione

Allo scopo di ottimizzare la modulazione dei campi di luce interferenti sono state impiegate nell'interferometro due lamine polarizzatrici ed una lamina a quarto d'onda. In particolare, in Figura 3.11 viene illustrato come le lamine permettano di uguagliare i due raggi interferenti. Il fascio oggetto – Figura 3.11a – attraversa solamente i due polarizzatori, per cui l'ampiezza del fascio oggetto all'uscita u_{oo} può essere espressa come segue:

$$u_{oo} = u_{oi} \cos\beta, \quad (3.1)$$

dove u_{oi} è il fascio oggetto uscente dal primo polarizzatore, mentre β è l'angolo tra i due assi di polarizzazione (P_i e P_o).

Dall'altra parte, il fascio di riferimento – Figura 3.11b – attraversa i due polarizzatori e la lamina a quarto d'onda. Quando una lamina a quarto d'onda è attraversata da un fascio di luce polarizzata, essa si comporta in effetti come una lamina a mezz'onda, ruotando l'asse di polarizzazione in maniera simmetrica rispetto all'asse veloce della lamina stessa. Quindi, l'ampiezza del fascio di riferimento uscente può essere valutata come di seguito:

$$u_{ro} = u_{ri} \cos(\beta - 2\alpha), \quad (3.2)$$

dove u_{ri} è il fascio di riferimento uscente dal primo polarizzatore, u_{ri}' è il fascio di riferimento uscente dalla lamina a quarto d'onda e α è l'angolo tra l'asse del polarizzatore in ingresso (P_i) e l'asse veloce della lamina di ritardo (F). Se l'Eq. (3.1) è posta uguale all'Eq. (3.2), la soluzione dell'equazione fornisce le coppie di valori (α , β) che soddisfano le condizioni ottimali di interferenza [3.14]. La Figura 3.12 fornisce una famiglia di curve per la valutazione delle suddette coppie di valori; tali curve sono parametrizzate in funzione del rapporto dei fasci oggetto e riferimento in ingresso, ottenuto elevando al quadrato le corrispondenti ampiezze $(u_{oi}/u_{ri})^2$. Il grafico mostra che per ciascun rapporto tra le intensità, esistono due coppie di valori che soddisfano la condizione di uguaglianza dei due fasci interferenti.

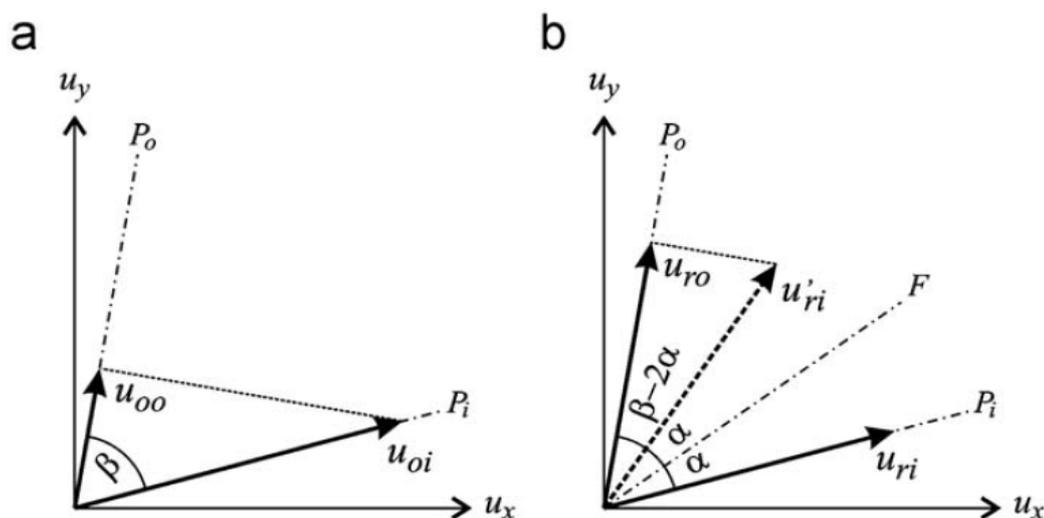


Figura 3.11: Ampiezza dei fasci luminosi: (a) fascio oggetto; (b) fascio di riferimento.

La regolazione delle intensità luminose di fascio oggetto e fascio di riferimento è necessaria dal momento che la condizione di uguaglianza non è necessariamente soddisfatta. Infatti la superficie di riferimento è fissa sull'interferometro e non è detto

che le sue proprietà ottiche (diffusione e diffrazione del campo incidente) siano le stesse di quelle della superficie investigata. Inoltre, ciascun diodo laser illumina sia la superficie oggetto che la superficie di riferimento e di conseguenza è difficile ottenere un'illuminazione uniforme.

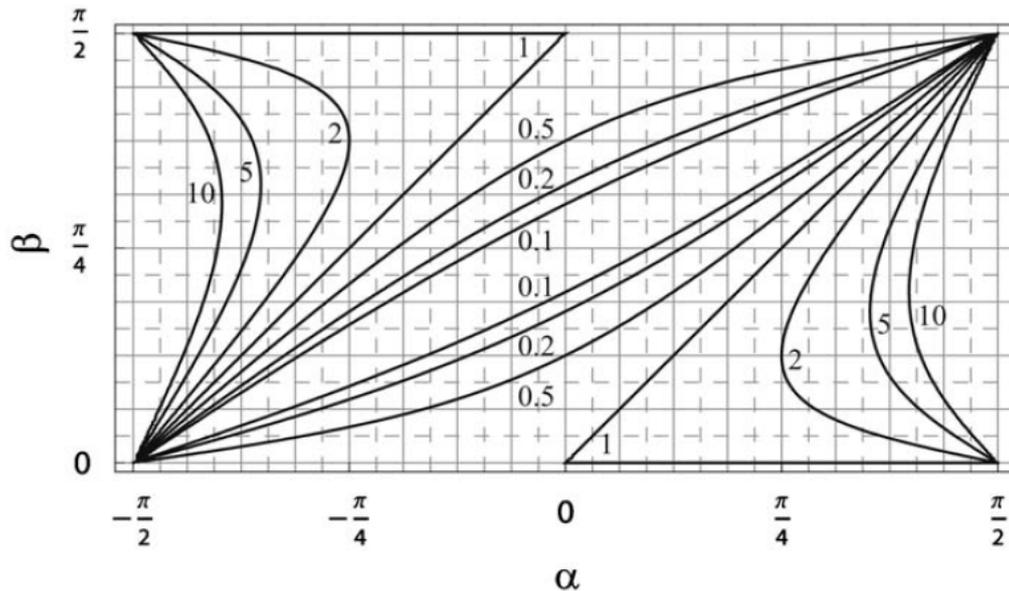


Figura 3.12: Valori di α e β che consentono di ottenere l'uguaglianza tra le intensità dei fasci oggetto e riferimento per differenti rapporti tra le intensità in ingresso $(u_o/u_r)^2$.

3.3.2 Misura di campi di deformazione 3D

La misura di campi di deformazione 3D richiede la misura, in ciascun punto, di tre componenti di spostamento. Le tecniche interferometriche speckle consentono la misura di una singola componente di spostamento per mezzo di un interferometro "assoluto" che lavora con una singola direzione di illuminazione ed osservazione; lo stesso effetto è possibile ottenerlo per mezzo di una shearometro che lavora con una superficie di riferimento fissa. Per cui, attraverso tre direzioni di illuminazione non coincidenti è possibile ricostruire il campo di spostamenti in tutte le sue componenti. Se in un generico punto le direzioni di illuminazione ed osservazione sono note ed identificate dai vettori unitari \mathbf{k}_i e \mathbf{k}_o , rispettivamente, il vettore di sensibilità \mathbf{K} può essere valutato dalla nota formula dell'interferometria olografica [3.15]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_i. \quad (3.3)$$

La variazione di fase dovuta ϕ ad un generico spostamento tridimensionale $\mathbf{d}=\{u,v,w\}$ può essere valutato dalla seguente equazione:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{K} \cdot \mathbf{d} = \frac{2\pi}{\lambda} (K_x u + K_y v + K_z w), \quad (3.4)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della sorgente luminosa utilizzata nell'esperimento. Quindi, se sono disponibili tre vettori di sensibilità linearmente indipendenti, come mostrato in Figura 3.13, la quale rappresenta schematicamente le condizioni operative dell'interferometro in esame, il vettore \mathbf{d} può essere ottenuto su tutta l'area analizzata. Se si misurano le tre fasi $\{\phi_1, \phi_2, \phi_3\}$ in ciascun punto della superficie, il campo di spostamento 3D può essere ricavato dall'espressione seguente, scritta in forma matriciale:

$$\begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} K_{1x} & K_{1y} & K_{1z} \\ K_{2x} & K_{2y} & K_{2z} \\ K_{3x} & K_{3y} & K_{3z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}. \quad (3.5)$$

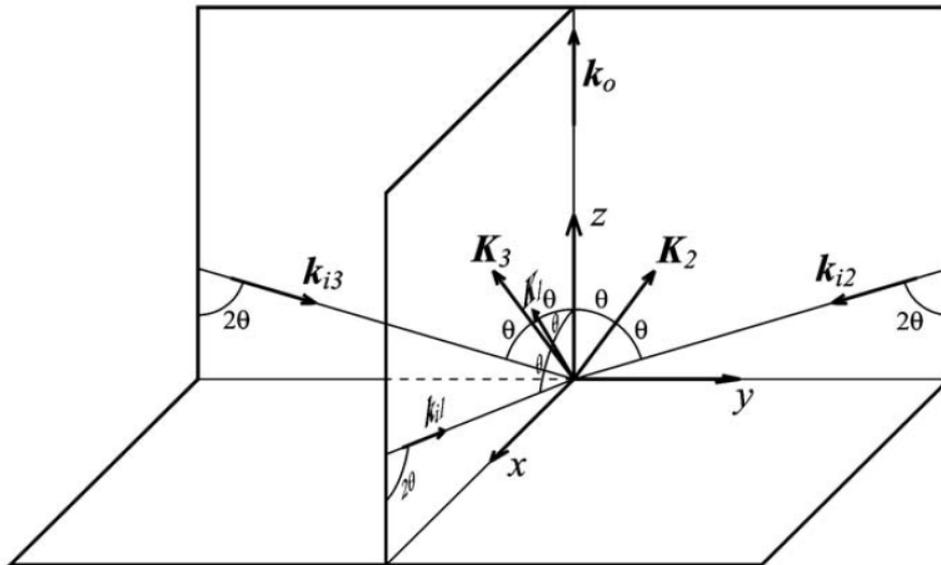


Figura 3.13: Geometria delle direzioni di illuminazione ed osservazione adottate per la misura delle tre componenti di spostamento.

L'unica condizione perché il sistema lineare dell'Eq. (3.5) possa essere risolto è che il determinante della matrice sia diverso da zero, ovvero le tre direzioni di illuminazione devono essere linearmente indipendenti. Nel caso dell'interferometro in esame la direzione di osservazione è ortogonale alla superficie analizzata, mentre

l'angolo θ indicato in Figura 3.13 è scelto pari a 30° per tutte e tre le direzioni di illuminazione per cui i vettori di sensibilità giacciono nei piani xz e yz .

Applicando le equazioni (3.3) e (3.5) nelle suddette condizioni di funzionamento, si ottiene la seguente espressione per le componenti di spostamento:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{2\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}. \quad (3.6)$$

Nelle equazioni (3.5) e (3.6) si è assunta la stessa lunghezza d'onda per tutte e tre le componenti di spostamento. Si noti che questa approssimazione è generalmente accettabile quando si utilizzano diodi laser, nonostante la lunghezza d'onda di questo tipo di sorgenti luminose sia sensibile ad alcuni parametri operativi, quali la tensione di alimentazione e la temperatura dall'ambiente.

Se l'illuminazione non è ottenuta attraverso un fascio collimato, la sua divergenza deve essere tenuta in considerazione dal momento che le componenti dei vettori di sensibilità diventano funzione delle coordinate spaziali. In questo caso le matrici dell'Eq. (5) e dell'Eq. (6) devono essere valutate in ciascun punto tenendo conto della effettiva geometria del setup, ovvero la posizione della sorgente di illuminazione rispetto all'orientazione ed alla posizione dell'area investigata. Questo effetto può essere trascurato se la massima dimensione dell'area osservata è molto più piccola rispetto alla distanza tra la sorgente luminosa e l'area stessa.

3.3.2.1 Correzione della sensibilità

Se la geometria del setup non consente di trascurare le variazioni del vettore di sensibilità all'interno dell'area osservata, questo effetto può essere valutato attraverso semplici espressioni matematiche. In particolare, con riferimento alla geometria riportata in Figura 3.14, se un fronte d'onda sferico è situato nel piano xy ad una distanza orizzontale L dall'origine del sistema di riferimento, e la propagazione della luce avviene lungo una direzione che forma all'origine del sistema di riferimento un angolo di 60° rispetto alla direzione verticale (come accade nel caso del presente

interferometro), il vettore di sensibilità, dopo alcune manipolazioni matematiche dell'Eq. (3.3), assume la seguente espressione:

$$\mathbf{K} = \left\{ \frac{L-x}{A}, -\frac{y}{A}, \frac{L}{A\sqrt{3}} + 1 \right\} \text{ con } A = \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + L^2/3}, \quad (3.7)$$

dove il coefficiente A rappresenta la distanza tra la posizione della sorgente sferica e l'origine del sistema di riferimento. In questa espressione la direzione di osservazione è assunta costante, ma anche questa assunzione può essere facilmente rimossa. Se si tiene conto di questi effetti, come menzionato sopra, la matrice dell'Eq. (3.6) deve essere valutata punto per punto, altrimenti gli elementi della matrice possono essere calcolati tramite l'Eq. (3.7), valutata nell'origine del sistema di coordinate. In queste ultime condizioni operative le componenti del vettore di sensibilità assumono i seguenti valori:

$$\begin{aligned} K_{1x} = K_{2y} = -K_{3y} &= 0.866 \\ K_{1y} = K_{2x} = K_{3x} &= 0 \\ K_{1z} = K_{2z} = K_{3z} &= 3/2 = 1.5 \end{aligned} \quad (3.8)$$

che possono essere assunti come valori di riferimento per valutare la loro variazione all'interno dell'area osservata. Vale la pena menzionare che il massimo valore assoluto che una componente del vettore di sensibilità può assumere è 2.

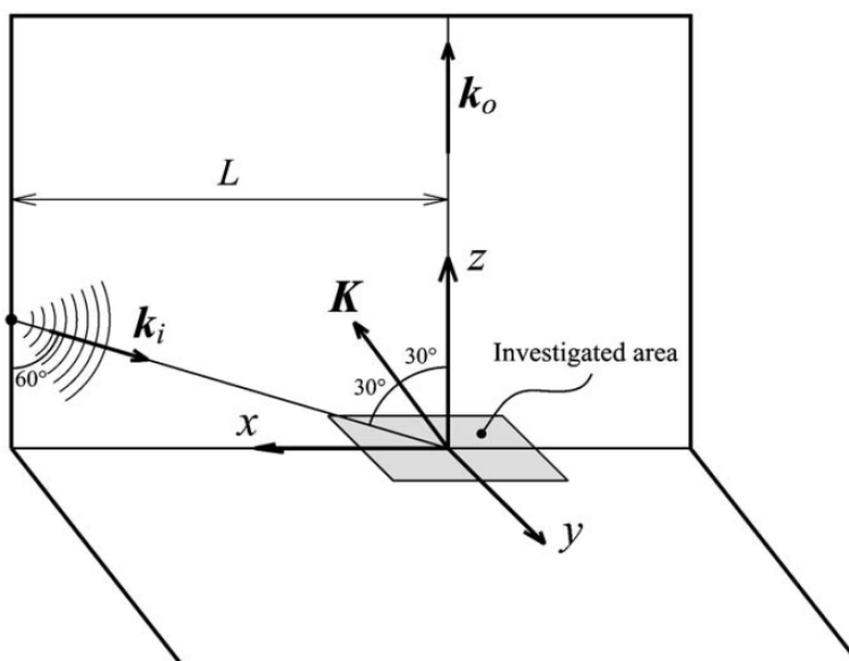


Figura 3.14: Geometria per la valutazione delle componenti dei vettori di sensibilità.

La Figura 3.15 riporta le curve di livello nel piano xy che rappresentano il luogo dei punti dove l'errore dei vettori di sensibilità è costante. Grazie alla simmetria delle condizioni di illuminazione, attraverso tre grafici è possibile valutare l'errore di tutte e nove le componenti dei vettori di sensibilità, invertendo o cambiando di segno in maniera opportuna le coordinate x ed y .

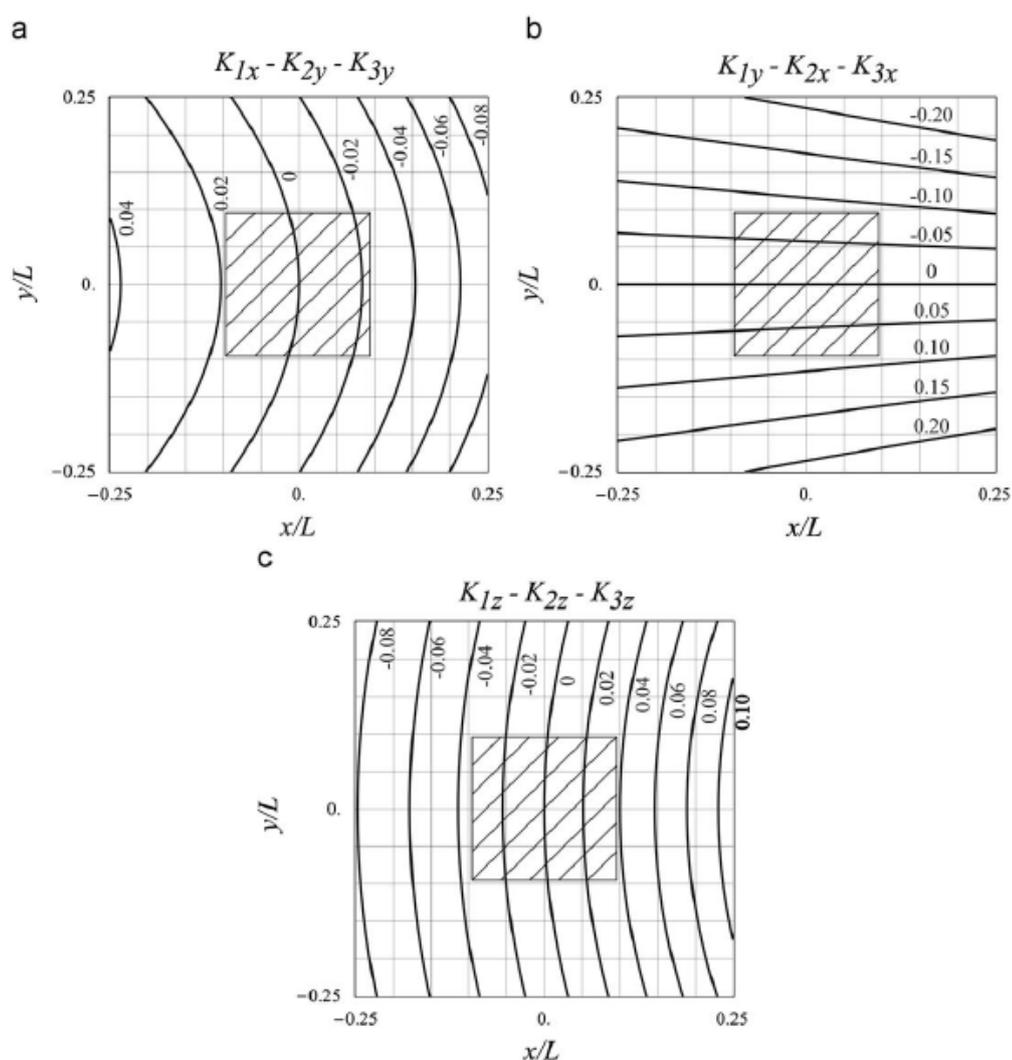


Figura 3.15: Variazione delle componenti dei vettori di sensibilità rispetto alle coordinate adimensionali x/L e y/L : (a) componenti di sensibilità nel piano diverse da zero (K_{1x} , K_{2y} , K_{3y}); (b) componenti di sensibilità nel piano pari a zero (K_{1y} , K_{2x} , K_{3x}); (c) componenti di sensibilità fuori dal piano (K_{1z} , K_{2z} , K_{3z}).

In figura, le coordinate x e y sono valutate come frazioni della lunghezza L . Nel caso che la lente posta davanti alla superficie osservata sia un achromat di focale 100 mm, L è circa pari a 55 mm e l'area osservata è circa $8 \times 6 \text{ mm}^2$; quindi i rapporti x/L e y/L spaziano in un intervallo massimo di circa 0.15. In figura è messa in evidenza un'area

corrispondente ad un intervallo massimo per i rapporti x/L e y/L di 0.2; all'interno di quest'area, che sovrastima le effettive condizioni operative dell'interferometro, le massime variazioni osservate non eccedono 0.02 per le componenti K_{1x} , K_{2y} , K_{3y} , 0.1 per le componenti K_{1y} , K_{2x} , K_{3x} , e 0.04 per le componenti K_{1z} , K_{2z} , K_{3z} . L'errore risultante sulle misure di spostamento non possono essere valutati a priori poiché esso dipende dall'entità e dai rapporti tra le singole componenti di spostamento.

L'effetto della variazione dei vettori di sensibilità è stato visibile anche in alcuni test preliminari effettuati sull'interferometro nei quali lo strumento è stato impiegato per la misura di un moto rigido nello spazio; tale esperimento verrà illustrato nel capitolo seguente. Per eliminare definitivamente questa sorgente di incertezza, si è deciso di aggiungere all'interno del layout ottico dell'interferometro tre lenti convergenti, all'uscita di ciascuno dei tre diodi laser e montate in dei supporti realizzati appositamente. La Figura 3.16 mostra il modello 3D del modulo di illuminazione dell'interferometro dove sono visibili i suddetti supporti.

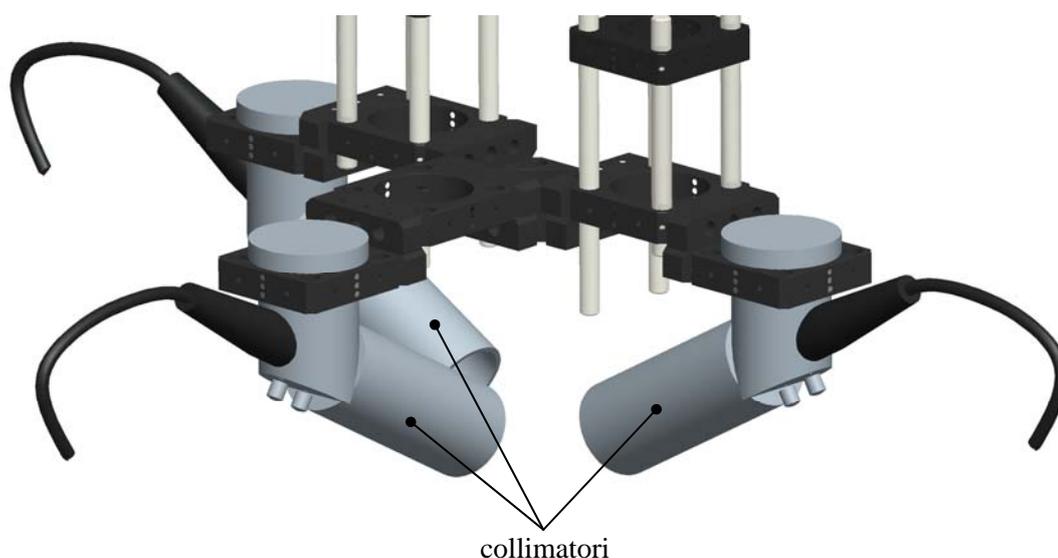


Figura 3.16: Modello 3D del modulo di illuminazione completo di tubi collimatori.

3.3.3 Sviluppi dell'interferometro

Un possibile sviluppo dell'interferometro è la sua trasformazione in un dispositivo RGB. Infatti, allo stato attuale, i tre diodi laser utilizzati come sorgenti luminose hanno la stessa lunghezza d'onda (660 nm) ed il sistema di acquisizione delle immagini è una telecamera monocromatica. Questo comporta che i tre laser non

possono funzionare contemporaneamente e quindi, per la determinazione delle tre componenti di spostamento, le acquisizioni vanno fatte in tre step successivi, agendo sull'elettronica di controllo. Questo svantaggio può essere superato agendo in due direzioni diverse: da un lato bisogna utilizzare tre illuminazioni con tre diverse lunghezze d'onda, una rossa una verde ed una blu. Dall'altro si deve riuscire, con un'unica acquisizione, a separare le informazioni in funzione della lunghezza d'onda. Per far questo si possono seguire diversi approcci, mostrati in Figura 3.17. Una prima opportunità consiste nell'utilizzare sensori a colori basati su una batteria di fotodiodi (Figura 3.17 a)). In questo tipo di sensore, la selettività spettrale è legata alla profondità di penetrazione dei fotoni nel silicio. La profondità media dei fotoni nel campo del blu a 425 nm è circa $0.2\ \mu\text{m}$, quella dei fotoni nel verde a 532 nm è circa $2\ \mu\text{m}$, e quella dei fotoni nel rosso a 630 nm è circa $3\ \mu\text{m}$. Perciò, costruendo giunzioni con profondità diverse è possibile ottenere la desiderata selettività dei colori, anche se non perfetta. Tuttavia, la risoluzione di questo tipo di soluzione è massima, dal momento che il numero effettivo di pixel per ciascuna lunghezza d'onda corrisponde a quello dell'intero sensore [3.16]. Una seconda possibilità si basa sull'uso di filtri spaziali cromatici, organizzati secondo il mosaico di Bayer [3.17] (Figura 3.17 b)). Lo svantaggio di questo tipo di sensore è che la metà dei pixel acquisiscono il verde e solo un quarto il rosso ed il blu, ciò portando ad una perdita di risoluzione. Il terzo metodo utilizza telecamere con 3 CCD e 3 filtri cromatici (Figura 3.17 c)). Tale soluzione garantisce un'elevata risoluzione ed un'elevata selettività spettrale.

3.4 Il sistema di controllo

L'elettronica di controllo, mostrata in Figura 3.18, è assemblata in un modulo da 19" e fornisce 9 porte d'uscita. In particolare, le prime 4 porte (DAC#1-DAC#4, connettori BNC) fornisce la tensione di alimentazione ai tre blocchi ceramici dell'attuatore piezoelettrico; tale tensione può essere variata all'interno dell'intervallo $[0-100]\text{ V}$ con la risoluzione garantita da un convertitore D/A a 16 bit. Le seconde 4 porte (DAC#5-DAC#8, connettori RCA) forniscono la tensione di alimentazione ai tre diodi laser; in questo caso è utilizzato un convertitore D/A che fornisce una tensione variabile nell'intervallo $[0-3]\text{ V}$. Sotto ciascuna di queste quattro porte è possibile inserire un resistore in modo da controllare la corrente che attraversa i diodi

laser. Infine, è presente un'ultima porta (MOTORI, connettore DIN) per il controllo degli attuatori elettrici.

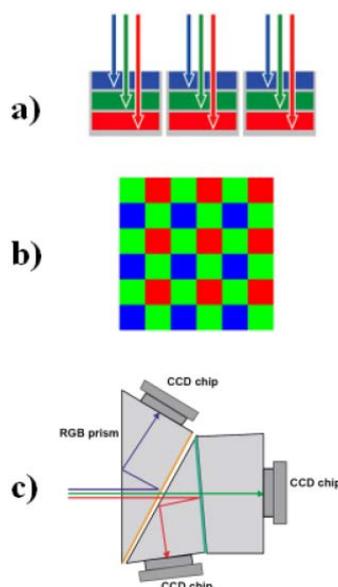


Figura 3.17: *Differenti strategie per la registrazioni di immagini a colori: batteria di fotodiodi a), filtro di Bayer b), telecamera a 3 CCD c).*

Nel pannello posteriore dell'elettronica di controllo, non mostrato in figura, è presente una porta seriale (RS-232) che consente di inviare i comandi necessari per impostare le tensioni desiderate alle varie porte via software, attraverso un computer fisso o portatile. Il cavo che connette il PC al sistema di controllo, visibile in figura sopra il dispositivo, adatta la porta USB del computer alla porta seriale dell'elettronica. I comandi a tale porta possono essere inviati attraverso classiche routine per operazioni di input/output nei programmi generalmente utilizzati per il controllo di strumentazione esterna, come ad esempio National Instruments LabVIEW [3.18, 3.19] o MatWorks Matlab-Simulink [3.20, 3.21]. La Tabella 3.3 riassume le principali caratteristiche tecniche dell'elettronica di controllo.

L'intero apparato sperimentale, allo stato attuale, si presenta come in Figura 3.19. Oltre al sistema di carico, all'interferometro ed all'unità centrale del sistema di controllo (UC), sono visibili tre unità:

- GT: generatore di tensione che riceve i comandi dall'unità centrale e fornisce la tensione di 24 V e la corrente necessaria per muovere i motori.

- VT: sistema che connette i motori all'alimentatore e consente di variare la tensione mediante opportuni potenziometri al fine di modificare la velocità di avanzamento in fase di carico (o scarico).
- CE: centralina estensi metrica dell'HBM alla quale sono connessi i due trasduttori di forza e permette di effettuare la misura del carico.



Figura 3.18: *Pannello anteriore dell'elettronica di controllo interfacciata al computer e l'adattatore USB/RS-232.*



Figura 3.19: *L'apparato sperimentale complessivo.*

Illuminazione	3 DAC 12 bit, [0, 3] V
Alimentazione PZT	3 DAC 16 bit, [0, 100] V
Alimentazione motori	[1.5, 24] V per [0.05, 2] s
Interfaccia	RS-232 / USB

Tabella 3.3: *Caratteristiche tecniche dell'unità centrale del sistema di controllo.*

Si noti infine come l'interferometro sia stato collegato ad una piastra montata su due colonne smorzanti (alla cui base si trova un supporto magnetico, per un appropriato fissaggio sul banco ottico) e posizionato proprio sopra il provino da analizzare. Ciò è reso possibile dall'effettiva portabilità del dispositivo, garantita da dimensioni e pesi contenuti.

3.5 Procedura sperimentale per la caratterizzazione elasto-plastica

Durante una prova di trazione eseguita per caratterizzazione elasto-plastica di materiali, vengono impressi grandi spostamenti sul provino. Sfortunatamente, gli interferometri speckle, se da un lato hanno una sensibilità molto elevata, dall'altro possiedono una dinamica di misura piuttosto ridotta; ciò è dovuto principalmente alla decorrelazione. Questo vuol dire che più sono grandi gli spostamenti da misurare, più sarà elevato il rumore presente nei dati sperimentali. Nel presente lavoro di tesi viene proposto un metodo basato sulla misura incrementale degli spostamenti, che consiste nel registrare una serie di condizioni di spostamento intermedie tra la condizione di riferimento e quella finale. In particolare, ogni livello di carico deve provocare degli spostamenti né troppo grandi, così da ridurre la decorrelazione del campo speckle, né troppo piccoli, in modo da ridurre anche il disturbo del rumore elettronico.

Nella prima fase dell'esperimento deve essere regolata la potenza dei diodi laser in modo da ottimizzare l'illuminazione; in particolare, agendo anche sulle lamine presenti nell'interferometro, si rendono confrontabili le intensità di fascio oggetto e fascio di riferimento. Successivamente, vengono applicati al provino crescenti livelli di carico spostando entrambi gli attuatori elettrici della stessa quantità, in modo da minimizzare i moti rigidi. Per ciascun livello di carico, il provino è illuminato dai tre

laser (uno alla volta, poiché i laser hanno la stessa lunghezza d'onda e quindi non possono lavorare simultaneamente) e per ciascuna direzione di illuminazione vengono introdotte una serie di variazioni di fase attraverso l'attuatore piezoelettrico; si registra un'immagine per ogni variazione di fase. Le immagini così acquisite dovranno successivamente essere processate, come verrà illustrato nel seguente capitolo, in modo da ottenere le informazioni desiderate.

Le varie fasi della procedura vengono controllate attraverso uno strumento virtuale realizzato in ambiente LabVIEW, il cui pannello di controllo è mostrato in Figura 3.20.

Il software LabVIEW è basato sulla programmazione grafica (grafical programming). Tale tipo di programmazione è basato su un approccio completamente differente da quello su cui si basano i codici classici, come il Turbo Pascal o il C++; esso, infatti, non richiede l'utilizzo di una sintassi particolarmente rigida, ma permette di realizzare degli strumenti, detti appunto virtuali, comunemente indicati attraverso la sigla VI (Virtual Instrument). Il funzionamento di essi è basato sul flusso dei dati che si scambiano le diverse subVI, presenti nelle librerie o implementate appositamente.

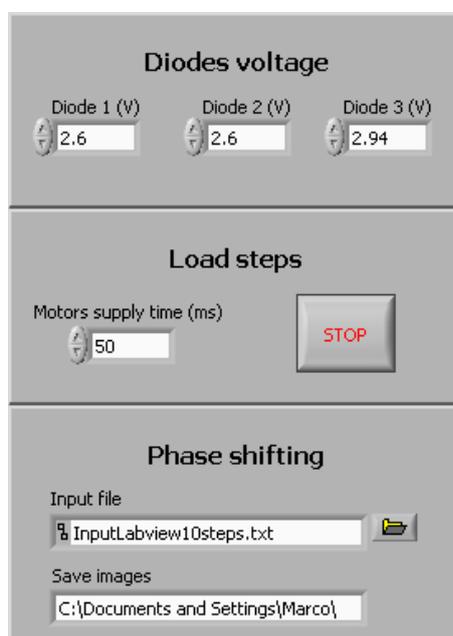


Figura 3.20: Pannello frontale dello strumento virtuale realizzato in LabVIEW per il controllo degli esperimenti.

Pertanto, l'implementazione di tali strumenti non si presenta come un listato più o meno lungo e strutturato, ma semplicemente come una serie di icone connesse mediante cavi, attraverso i quali, come già detto, lo strumento scambia i dati fra le sue

varie parti. Inoltre, ogni VI presenta una parte di interfaccia con l'utente (che può essere resa molto simile ad uno strumento reale), la quale facilita la gestione dell'input e dell'output. In ogni caso, l'aspetto più interessante del LabVIEW è certamente la facilità con cui tale ambiente permette di comunicare con l'esterno, ovvero la possibilità di gestire con estrema facilità e rapidità il flusso dei dati tra il calcolatore e l'ambiente esterno, sia sfruttando le porte standard di comunicazione presenti sulle schede madri dei PC, come la seriale, la parallela o l'USB, sia sfruttando le schede ausiliarie che possono essere inserite sui BUS della scheda madre.

Il pannello di controllo dello strumento virtuale utilizzato nel presente lavoro è diviso in tre sezioni: il primo blocco dall'alto permette di regolare la tensione di alimentazione dei diodi laser. Nel blocco in mezzo è possibile scegliere il tempo di alimentazione dei motori elettrici; in questa sezione è anche presente un pulsante *STOP* che consente di interrompere la prova quando lo si desidera, ad esempio alla rottura del provino. Infine, il blocco in basso serve a controllare la procedura di phase-shifting. In particolare, nel campo denominato "*Input file*" deve essere inserito il file contenente i valori di tensione da inviare all'attuatore piezoelettrico; invece, nel campo denominato "*Save images*" va indicato il percorso per le immagini salvate ad ogni step del phase-shifting.

3.6 Bibliografia

- [3.1] M. Bova, L. Bruno, A. Poggialini, *Misura di grandi deformazioni mediante interferometria speckle*, Proceeding of XXXVIII AIAS Conference, 2009.
- [3.2] M. Bova, L. Bruno, A. Poggialini, *Measurement of elasto-plastic deformations by speckle interferometry*, Proceeding of IV Speckle Conference, 2010.
- [3.3] www.hiwin.com.
- [3.4] www.mssoftware.com/Products/CAE-Tools/Patran.
- [3.5] www.chiavette.it.
- [3.6] www.hbm.com.
- [3.7] M. Bova, L. Bruno, L. Pagnotta, A. Poggialini, *Measuring full displacement fields on scattering surfaces by a portable low-cost interferometer*, WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics 4 (2), 53-63, 2009.
- [3.8] M. Bova, L. Bruno, A. Poggialini, *Low-cost speckle interferometry for measuring 3D deformation fields: Hardware and software*, Optics and Lasers in Engineering 48 (1), 96-106, 2010.
- [3.9] www.thorlabs.com.
- [3.10] L. Bruno, A. Poggialini, G. Felice, *Design and calibration of a piezoelectric actuator for interferometric applications*, Optics and Lasers in Engineering 45 (12), 1148-1156, 2007.
- [3.11] www.physikinstrumente.com.
- [3.12] www.linos.com.
- [3.13] www.sony.com.
- [3.14] M. Lehmann, *Optimization of wavefield intensities in phase-shifting speckle interferometry*, Optics Communications 118, 199-206, 1995.
- [3.15] R. Jones, C Wykes, *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge 1989.
- [3.16] J.M. Desse, P. Picart, P. Tankam, *Digital three-color holographic interferometry for flow analysis*, Optics Express 16, 5471-5480, 2008.
- [3.17] I. Yamaguchi, T. Matsumura, J. Kato, *Phase shifting color digital holography*, Optics Letters 27, 1108-1110, 2002.
- [3.18] LabVIEW Tutorial for Windows, National Instruments, 1994.

[3.19] www.ni.com/labview.

[3.20] MATLAB Reference Guide, The MATH WORKS Inc., 1992.

[3.21] www.mathworks.com.

Capitolo 4

Risultati sperimentali

4.1 Generalità

Nel presente capitolo verranno presentati i risultati sperimentali ottenuti utilizzando l'attrezzatura e la procedura sperimentale discussa nel Capitolo 3. In particolare, all'inizio saranno presentati dei risultati preliminari derivanti da prove sperimentali eseguite per valutare l'accuratezza e la ripetibilità dell'interferometro. In questo caso il dispositivo è stato utilizzato per la misura di un moto rigido nello spazio; il provino è costituito da una lamina di alluminio alla quale sono state imposte due rotazioni attraverso un attuatore piezoelettrico a 3 g.d.l., senza pertanto utilizzare l'attrezzatura di carico presentata in precedenza. I risultati saranno mostrati sotto la forma di mappe di fase e curve di livello degli spostamenti della superficie analizzata. Particolare attenzione verrà posta nella valutazione delle incertezze dalle quali le misure sono affette.

Successivamente, sarà presentata una prova di trazione su un provino forato, in acciaio C40, eseguita allo scopo di verificare le prestazioni dell'interferometro su un reale campo di deformazioni. Allo stesso modo, anche le capacità dell'intero apparato sperimentale proposto nel Capitolo 3 e la validità della procedura sperimentale proposta sono state valutate.

Infine, si passerà ai risultati relativi alle prove di trazione eseguite al fine di determinare i parametri elasto-plastici di un acciaio ad elevata resistenza. La procedura numerica per l'elaborazione dei dati sperimentali, costituita da una serie di operazioni quali l'unwrapping, il fitting e l'eliminazione dei miti rigidi impressi dall'attrezzatura sul provino sarà analizzata nel dettaglio. L'intero *post-processing* dei dati sperimentali è stato eseguito in ambiente Mathematica [4.1]. Come risultato finale verranno presentate due curve tensione-deformazione ottenute da due test di trazione consecutivi sullo stesso provino; i dati sperimentali, infine, verranno approssimati utilizzando due modelli: quello di Ramberg-Osgood e la legge di incrudimento esponenziale, dai quali sono stati estratti il modulo di Young (parametro elastico) e altri due parametri che descrivono il comportamento plastico del materiale il esame.

4.2 Misura di un moto rigido nello spazio

La capacità dell'interferometro di misurare campi di spostamento tridimensionali è stata testata imponendo un moto rigido 3D ad un provino mosso da un attuatore PZT a tre gradi di libertà a ciclo chiuso della Physik Instrumente. Con riferimento alla Figura 4.1, imponendo due rotazioni (α_x e α_y attorno agli assi y ed z rispettivamente), le tre componenti di spostamento possono essere valutate attraverso la seguente relazione:

$$\mathbf{d} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\alpha_z y \\ \alpha_z x \\ \alpha_y x \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

Una prima prova è stata eseguita incrementando a passi successivi l'entità del moto rigido, prendendo come valori iniziali delle rotazioni $\alpha_x = 0.125 \text{ mrad}$ e $\alpha_y = 0.145 \text{ mrad}$; i valori successivi sono pari a 2, 3 e 4 volte quelli iniziali.

Gli assi di rivoluzione del provino sono stati scelti coincidenti con gli assi di riferimento, sebbene non è stato possibile identificarli molto accuratamente, siccome il provino è stato posizionato manualmente e l'area osservata è particolarmente piccola ($5.4 \times 5.4 \text{ mm}^2$). Ad ogni modo, al fine di poter confrontare tra di loro dati

acquisiti in differenti condizioni operative, si è assunto, nella procedura di unwrapping, che lo zero per tutte le componenti di spostamento fosse nell'origine del sistema di riferimento.

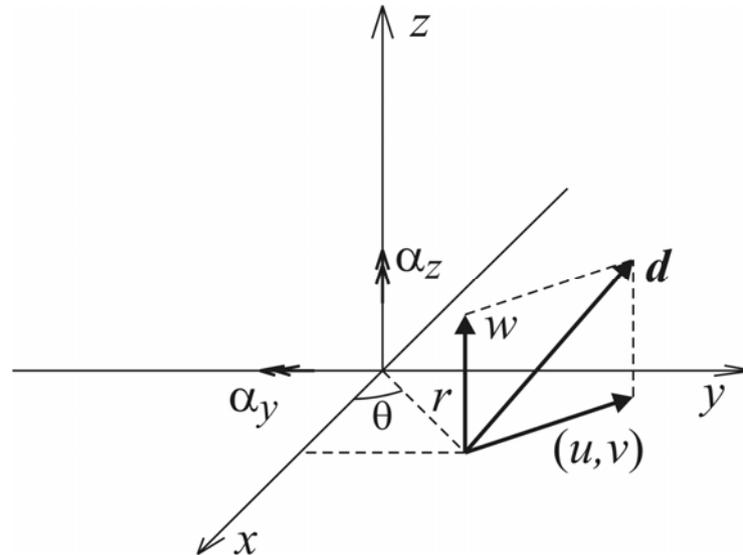


Figura 4.1: Moto rigido 3D imposto al provino attraverso l'attuatore PZT.

Un esempio di quattro set completi di dati sperimentali è riportato in Figura 4.2. Ogni riga rappresenta le mappe di fase delle tre componenti di spostamento provocate dal moto rigido dovuto alle rotazioni date dall'etichetta posizionata a sinistra della riga. Le mappe sono state ottenute applicando una procedura di phase-shifting a 5 step equispaziati.

I dati sperimentali sono stati approssimati attraverso la procedura di fitting proposta in [4.2]. Dopo l'unwrapping, le variazioni di fase di ciascuna mappa (una matrice di 500×500 elementi) sono state approssimate analiticamente attraverso 25 (5×5) funzioni paraboliche secondo la formulazione delle B-spline [4.3]. Effettivamente, a causa del particolare campo di spostamenti misurati dall'interferometro (un moto rigido implica una variazione di fase lineare), un fitting attraverso funzioni lineari sarebbe stato più accurato e veloce. Infatti, un fitting lineare richiede la valutazione di 3 parametri per ciascuna mappa di fase anziché 25 ed un modello lineare approssimerebbe esattamente l'effettivo campo di spostamento. L'approccio seguito ambiva a valutare le prestazioni della procedura di fitting, la cui applicazione è necessaria quando si misura un generico campo di deformazioni attraverso una

tecnica sperimentale, ed il modello analitico che meglio approssima il problema non è noto a priori.

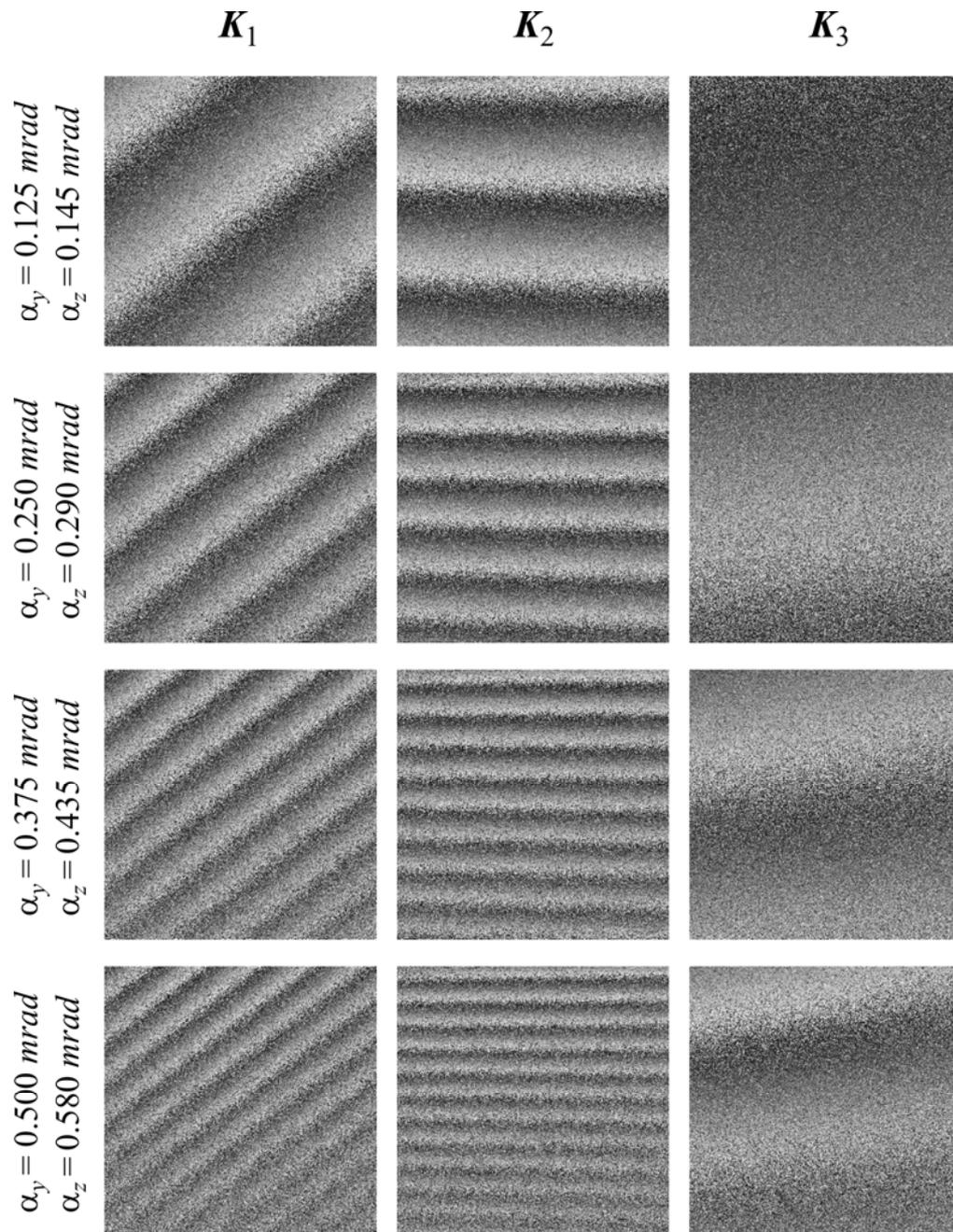


Figura 4.2: Set completo di dati sperimentali per quattro livelli diversi di moto rigido.

Le componenti di spostamento ricavare attraverso l'intera procedura (acquisizione delle immagini, phase-shifting, unwrapping e fitting) sono riportate in Figura 4.3. Per ciascun campo di deformazione, le tre componenti di spostamento sono state utilizzate per valutare il modulo della componente nel piano (la prima colonna di grafici) e fuori dal piano (la seconda colonna dei grafici).

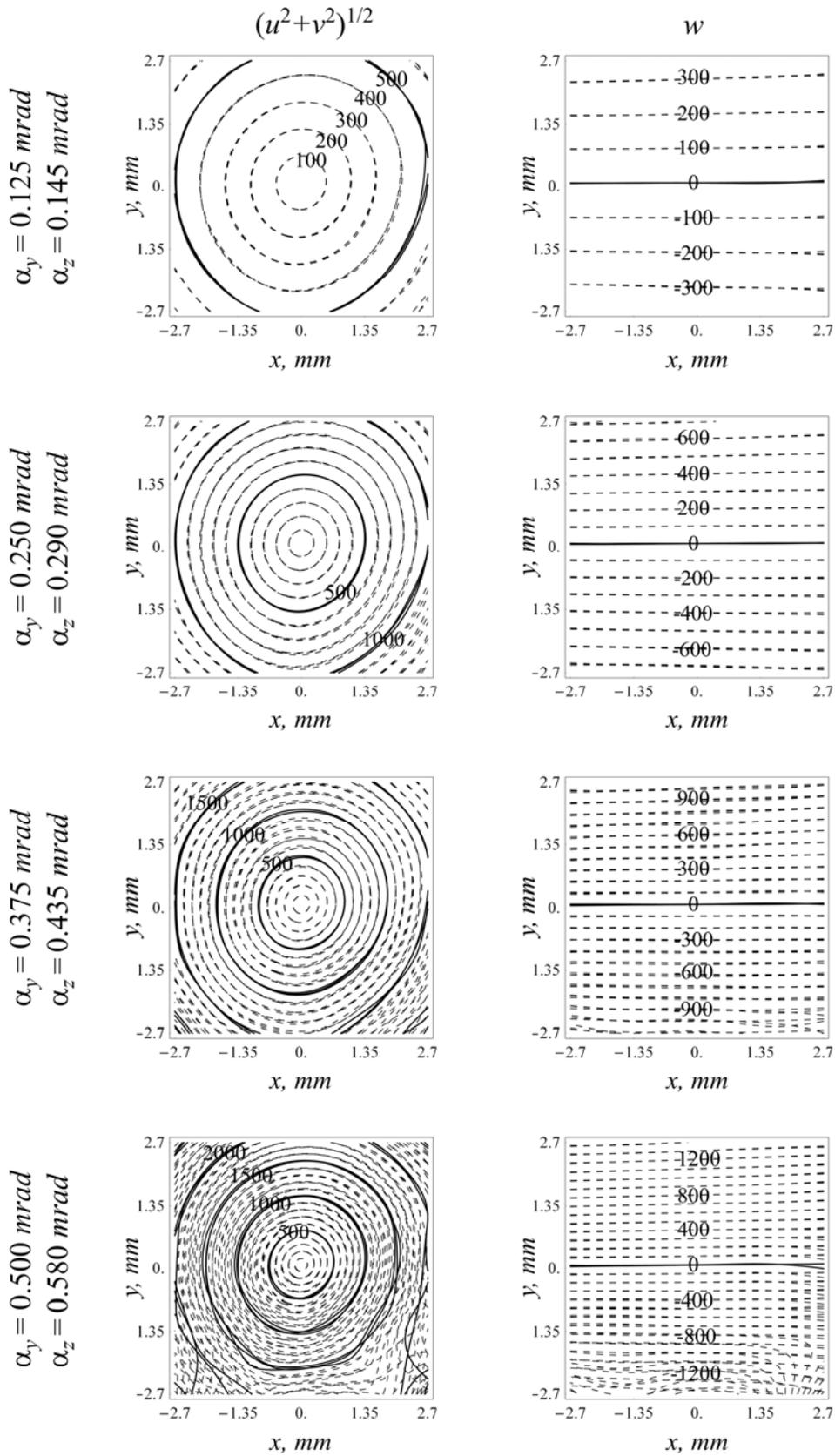


Figura 4.3: Curve di livello per quattro differenti livelli di spostamento, dopo l'operazione di fitting.

Le curve di livello sono riportate ogni 100 nm: in particolare, per le componenti nel piano le curve continue si riferiscono a variazioni di 500 nm, mentre per le componenti fuori dal piano la linea continua rappresenta lo spostamento nullo (cioè l'asse di rivoluzione della rotazione α_y). Lo spostamento nullo nel piano, invece, si verifica in un solo punto, al centro delle frange circolari, e non è riportato in figura.

Per ciascun campo di spostamento sono riportati tre diverse prove, in modo da valutare la ripetibilità dell'intera procedura di misura. Fino al terzo livello di spostamento si può osservare un elevato livello di ripetibilità, mentre al quarto livello la procedura non è riuscita a fornire risultati accettabili; infatti, osservando i grafici nella quarta riga di Figura 4.3 si può notare che le curve nella parte in basso dell'area investigata non sono regolari. In effetti, il fallimento della procedura di misura non è un fenomeno discontinuo che si manifesta quando lo spostamento supera un determinato valore, bensì è un progressivo degrado dei dati sperimentali dovuto alla decorrelazione dei campi speckle. Anche osservando le mappe di fase di Figura 4.2 si può notare, nella terza e quarta riga, una perdita di contrasto delle mappe nella zona inferiore dell'area investigata.

Nel caso dei campi di spostamento imposti nelle prove sperimentali, l'asimmetria delle curve di livello, particolarmente evidente per le componenti nel piano, è dovuta alla non perfetta simmetria del campo di spostamenti rispetto al sistema di riferimento fissato sul provino dal sistema ottico. Infatti, se l'asse di rotazione di α_z non è perfettamente coincidente con l'asse z , il massimo spostamento nel piano non si verifica in maniera simmetrica ai quattro angoli dell'immagine e l'area caratterizzata da un elevato errore comincia ad apparire nella zona della superficie osservata più lontana dall'effettivo asse di rivoluzione.

Infine, va notato che la decorrelazione può essere parzialmente recuperata sfruttando i tre gradi di libertà dell'attuatore PZT: infatti, una rotazione dello specchio montato sull'attuatore genera una traslazione dell'immagine sul CCD della telecamera, ciò permettendo il recupero della decorrelazione sul piano immagine, che rappresenta la maggiore fonte di errore nel caso in esame. In maniera alternativa, la decorrelazione può essere recuperata montando l'interferometro su una piastra strumentata con dei micrometri, che permettano una traslazione del dispositivo di misura in un piano orizzontale, anche in questo caso traslando l'immagine sul sensore della telecamera.

4.2.1 Sorgenti di errore

Come enfatizzato in precedenza, la decorrelazione dei campi speckle produce un graduale degrado delle informazioni di fase. Questo effetto indesiderato (ma inevitabile) è intrinseco nelle tecniche interferometriche speckle e non può essere eliminato completamente, ma al massimo contenuto.

Come già detto nel Capitolo 2, si può affermare grossolanamente che gli spostamenti nel piano implicano una decorrelazione nel piano immagine, mentre gli spostamenti fuori dal piano indotti da rotazioni generano una decorrelazione nel piano dell'apertura; i due tipi di spostamento possono essere quindi analizzati separatamente. Nel caso particolare del layout analizzato finora, è stato osservato che la decorrelazione nel piano immagine è molto più problematica rispetto a quella nel piano dell'apertura; oltre al fatto che esso normalmente implica un minore intervallo di misura, un moto rigido uniforme nel piano introduce una decorrelazione diffusa, senza fornire alcuna informazione utile.

Attraverso il provino utilizzato negli esperimenti precedentemente discussi, si è sovrapposto, agli spostamenti misurati e riportati nelle Figura 4.2 e Figura 4.3, un moto rigido uniforme nel piano. Le nuove componenti di spostamento misurate in queste nuove condizioni sono riportate in Figura 4.4. In particolare, i grafici nelle prime due colonne sono relativi ad un moto rigido uniforme nel piano, in direzione orizzontale, pari a $2 \mu\text{m}$ (20% delle dimensioni del pixel), mentre nei grafici nelle ultime due colonne l'entità del disturbo è pari a $4 \mu\text{m}$ (40% delle dimensioni del pixel). Come mostra la figura, un crescente livello di disturbo implica una riduzione del massimo spostamento misurabile attraverso la tecnica. Quindi, si può affermare che la procedura di misura funziona bene se non sono presenti disturbi e fino ad uno spostamento nel piano circa pari a $2 \mu\text{m}$ (ultima riga di Figura 4.3). In presenza di un disturbo pari a $2 \mu\text{m}$ il massimo spostamento misurabile è circa $1.7 \mu\text{m}$ (ultima riga di Figura 4.4), mentre per un disturbo di $4 \mu\text{m}$ la procedura funziona per spostamenti nel piano che non eccedano i $0.5 \mu\text{m}$.

Un'altra fonte di incertezza è la variazione del vettore di sensibilità all'interno dell'area investigata. Infatti, per il particolare campo di spostamento imposto al provino le curve di livello dovrebbero essere circonferenze concentriche (per il modulo degli spostamenti nel piano) e delle rette (per la componente fuori dal piano).

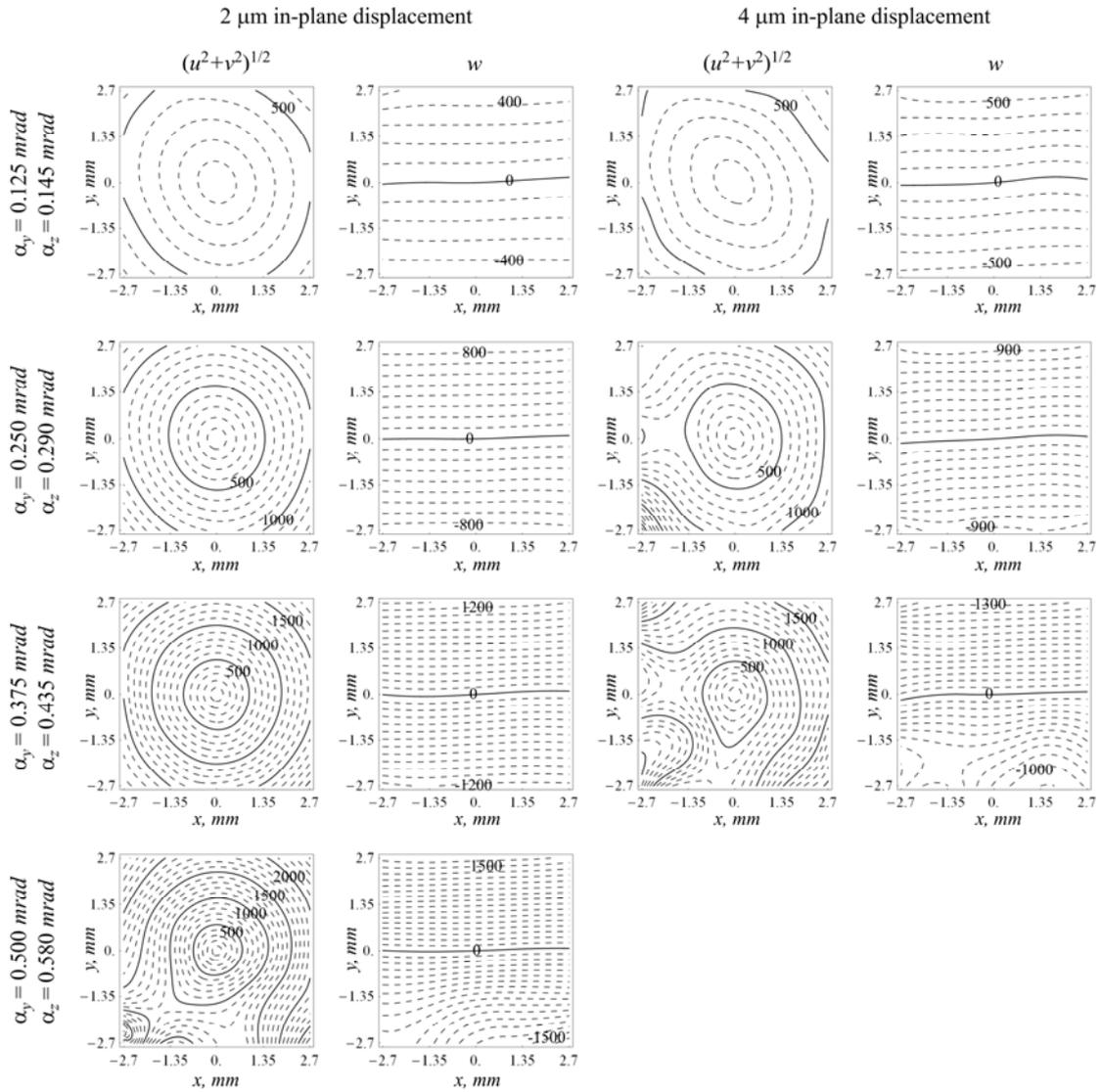


Figura 4.4: Curve di livello (dopo la procedura di fitting) relative a quattro livelli di spostamento con $2\ \mu\text{m}$ e $4\ \mu\text{m}$ di spostamento nel piano.

Un'altra fonte di incertezza è la variazione del vettore di sensibilità all'interno dell'area investigata. Infatti, per il particolare campo di spostamento imposto al provino le curve di livello dovrebbero essere circonferenze concentriche (per il modulo degli spostamenti nel piano) e delle rette (per la componente fuori dal piano). Quando le misure sono eseguite considerando i vettori di sensibilità costanti su tutta l'area investigata, le suddette circonferenze e rette si distorcono. Ad esempio, la Figura 4.5 riporta le curve di livello ottenute trascurando questo effetto (linea tratto e punto) e tenendone conto (linea continua); i grafici sono stati ottenuti simulando numericamente i campi di spostamento. Nella prima riga di Figura 4.5 gli spostamenti

sono stati ottenuti fissando lo zero di ciascuna componente nell'origine degli assi, mentre i grafici della seconda riga sono ottenuti spostando lo zero di 1 mm in direzione verticale e di 4 mm in direzione orizzontale. Si può notare che l'entità della distorsione dipende dall'entità dello spostamento, se sono note le posizioni esatte dello zero di ciascuna componente. Come già affermato nel Capitolo 3, alla variazione dei vettori di sensibilità si è fatto fronte collimando il fascio luminoso che raggiunge la superficie (come mostrato in [Figura 3.14](#)), in modo che i vettori di illuminazione fossero paralleli in ciascun punto dell'area analizzata.

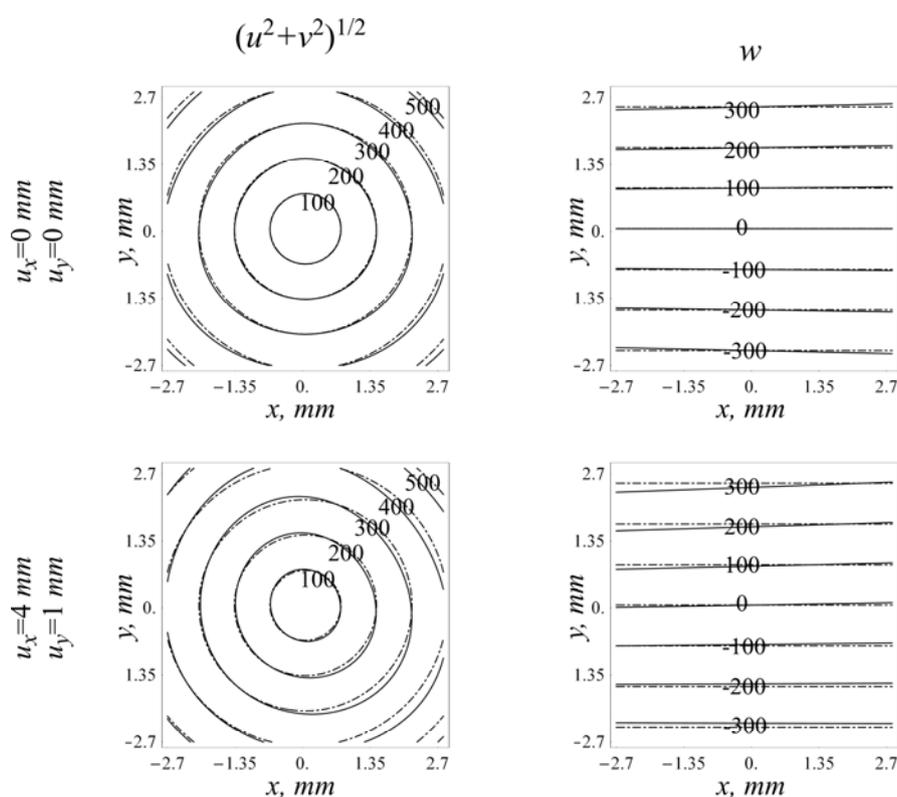


Figura 4.5: Curve di livello ottenute da dati numerici considerando i vettori di sensibilità costanti (linee tratto e punto) e variabili (linee continue).

4.3 Prova di trazione su un provino forato, risultati preliminari

Per verificare l'accuratezza dell'interferometro su un campo reale di deformazioni è stata condotta una prova di trazione, utilizzando l'intero apparato sperimentale

discusso nel Capitolo 3, su un provino in acciaio C40 di sezione $12 \times 2 \text{ mm}^2$ con una serie di fori centrali del diametro di 6 mm ed un interasse di 15 mm (Figura 4.6) [3.1].

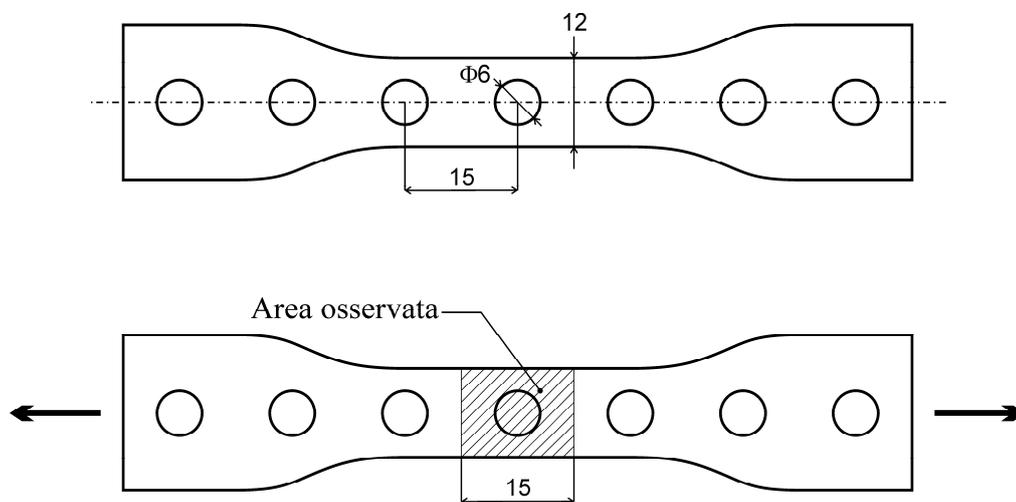


Figura 4.6: *Provino in acciaio C40 con fori centrali soggetto a trazione; dimensioni in millimetri.*

La prova è stata effettuata applicando al provino sette livelli di carico crescenti e memorizzando, per ogni componente di spostamento e per ogni livello di carico, un'immagine per ognuno dei 10 step di fase. E' stata quindi valutata la fase dei campi speckle in ognuna delle suddette configurazioni, successivamente indicata con d_{ij} , essendo i (1, 2, 3) l'indice che identifica la componente di spostamento e j (1, 2, ..., 7) l'indice per il livello di carico. Sottraendo le fasi, pixel per pixel, relative alla medesima componente di spostamento si ottengono le mappe di fase riportate in Figura 4.7. Tale figura è suddivisa verticalmente in tre blocchi, ogniuna per una singola componente di spostamento identificata dal vettore di sensibilità riportato nell'angolo in basso a sinistra di ogni blocco.

Osservando le mappe di fase è possibile identificare gli incrementi di carico ottimali da confrontare al fine di poter ricostruire l'evoluzione dei campi di spostamento in funzione del carico. Infatti se gli spostamenti sono troppo piccoli, ovvero se il numero di frange è basso (~ 1), è lecito aspettarsi un rumore piuttosto elevato, vista l'entità considerevole del rumore tipico delle tecniche interferometriche speckle. D'altra parte spostamenti troppo grandi determinano un numero di frange eccessivo, non risolvibile dal sistema di acquisizione, sebbene, nella maggior parte dei casi, ancor prima che ciò avvenga si verifica una decorrelazione dei campi speckle tale da innalzare il rumore

sulle misure ad un livello tale da cancellare completamente l'informazione sugli spostamenti.

Ad esempio, prendendo in esame la prima componente di spostamento, si può osservare come non sia possibile determinare la differenza di spostamento tra l'ultimo ed il primo livello di carico, essendo la mappa di fase relativa all'incrocio ($d_{17}-d_{11}$) talmente degradata da risultare difficilmente ricostruibile anche con un algoritmo di unwrapping particolarmente robusto. Volendo ricostruire tale differenza di spostamento è sufficiente suddividere in più passi tale misura, considerando ad esempio le tre mappe di fase ($d_{13}-d_{11}$), ($d_{15}-d_{13}$) e ($d_{17}-d_{15}$).

È comunque bene ricordare che l'esperimento è stato condotto unicamente per verificare su un reale campo di deformazioni le prestazioni dell'interferometro, senza porre particolare cura sia nella realizzazione del provino che nell'applicazione degli step di carico. Si notino infatti gli incrementi non uniformi dello stato deformativo del provino, oltre all'evidente asimmetria delle mappe di fase imputabile alla geometria del provino stesso.

Infine, una volta ricostruita l'evoluzione delle componenti di spostamento, è possibile effettuare sulle mappe di fase (dopo l'operazione di unwrapping) un'operazione di fitting al fine di poter meglio usufruire delle informazioni a pieno campo, in funzione del tipo di problematica affrontata. Prima o dopo il fitting è spesso necessario eliminare i moti rigidi, i quali facilmente possono mascherare le informazioni ricercate. Tuttavia, se l'operazione di fitting fornisce risultati affidabili, è possibile eliminare tali effetti calcolando le componenti di deformazioni mediante un'operazione di derivazione, la quale elimina completamente gli effetti dei moti rigidi. È bene comunque tener presente che se l'operazione di fitting non riesce a descrivere accuratamente i campi di spostamento, l'operazione di derivazione potrebbe amplificare oltremodo gli errori di misura.

Nel paragrafo seguente verranno analizzate più nel dettaglio le varie fasi necessarie per determinare, a partire dalle mappe di fase le effettive componenti di spostamento e quindi di deformazione di un provino.

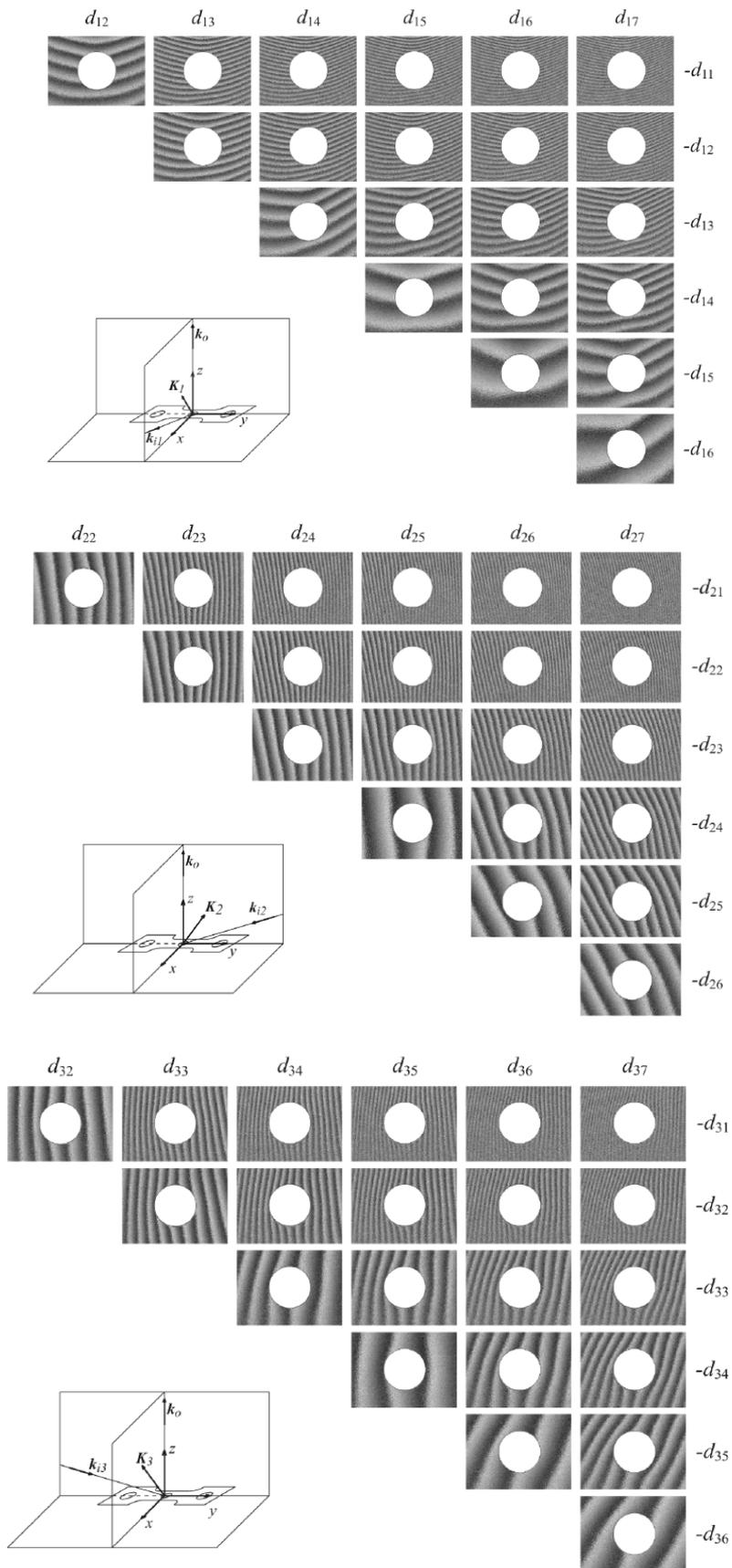


Figura 4.7: Dati sperimentali per tre componenti di spostamento a differenti livelli di carico.

4.4 Caratterizzazione di un acciaio da elevata resistenza

Al fine di determinare le caratteristiche elasto-plastiche di un acciaio ad elevata resistenza (39NiCrMo3) sono state eseguite delle prove di trazione su un provino ad osso di cane con una sezione di $6 \times 1 \text{ mm}^2$ ed una lunghezza utile di 20 mm .

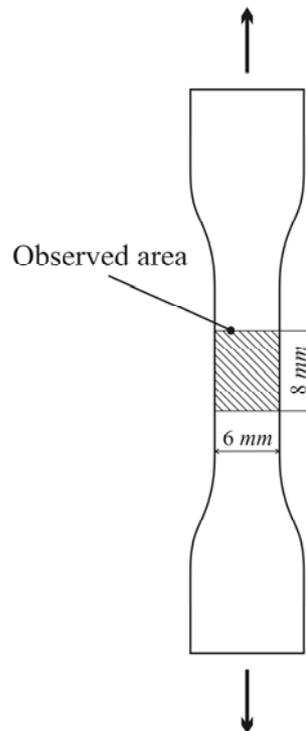


Figura 4.8: Forma del provino analizzato con evidenziata l'area osservata.

Nelle prove in esame, l'interferometro viene fatto lavorare con un rapporto di ingrandimento di circa 0.25; ricordando che le dimensioni del CCD della telecamera sono $3.6 \times 4.8 \text{ mm}^2$, ne deriva che può essere analizzata un'area massima di $19 \times 14.3 \text{ mm}^2$. Inoltre, a ciascun pixel del sensore corrisponde una zona del provino di $18.6 \times 18.6 \mu\text{m}^2$.

La procedura sperimentale seguita per testare il provino è quella discussa nel dettaglio nel paragrafo 3.5. Alla fine della prova, se si effettuano N step di carico, saranno disponibili $3 \times 10 \times N$ immagini del provino (3 direzioni di illuminazione, 10 step di fase). La procedura numerica che permette, partendo dai dati sperimentali, di ottenere le deformazioni del provino ed infine la curva caratteristica del materiale in esame è discussa di seguito. L'intera procedura è stata sviluppata con l'ausilio del software Mathematica.

Per prima cosa, per ciascuno step di carico e per ciascuna componente di spostamento, vengono calcolate le fasi dei campi speckle. Sottraendo le fasi così ottenute per i diversi livelli di carico si ottengono le differenze di fase di cui la Figura 4.9 riporta un esempio. Tali mappe di fase, relative ad un generico incremento di spostamento in campo elastico, si riferiscono ai tre vettori di sensibilità K_1 , K_2 e K_3 . L'asse di carico è rappresentato dall'asse y ; si noti che le sottoimmagini sono state scelte in modo che fossero centrate rispetto al piano medio del provino nella direzione del carico, mentre in direzione x è stata selezionata tutta la larghezza del provino. Le dimensioni in figura sono riportate in millimetri.

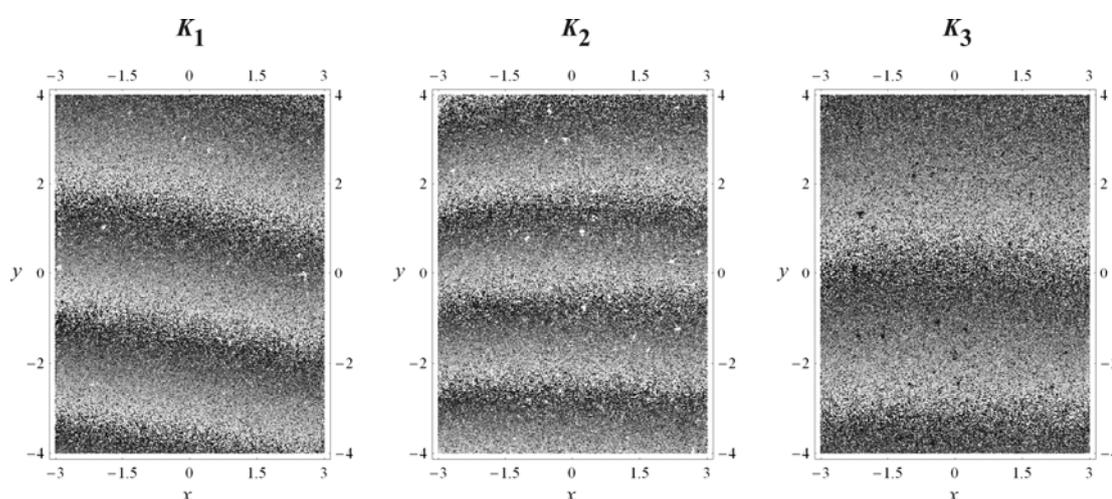


Figura 4.9: Mappe di fase relative ai 3 vettori di sensibilità K_1 , K_2 e K_3 e riferite ad un generico incremento di spostamento in campo elastico. Dimensioni in millimetri.

È interessante notare come, quando si entra nel campo plastico le mappe di fase subiscano un leggero deterioramento, presentandosi più tremolanti; questo può essere ricondotto alle variazioni che la texture superficiale del provino subisce quando vengono indotte deformazioni plastiche e che può scaturire in una leggera decorrelazione del campo speckle e quindi in un degrado delle mappe di fase. La Figura 4.10 riporta un esempio di questo fenomeno.

Come si può notare, le mappe di fase riportate in figura possiedono le tipiche discontinuità (andamento tipico a dente di sega) derivanti dall'operazione di arcotangente con cui le mappe sono state ricavate.

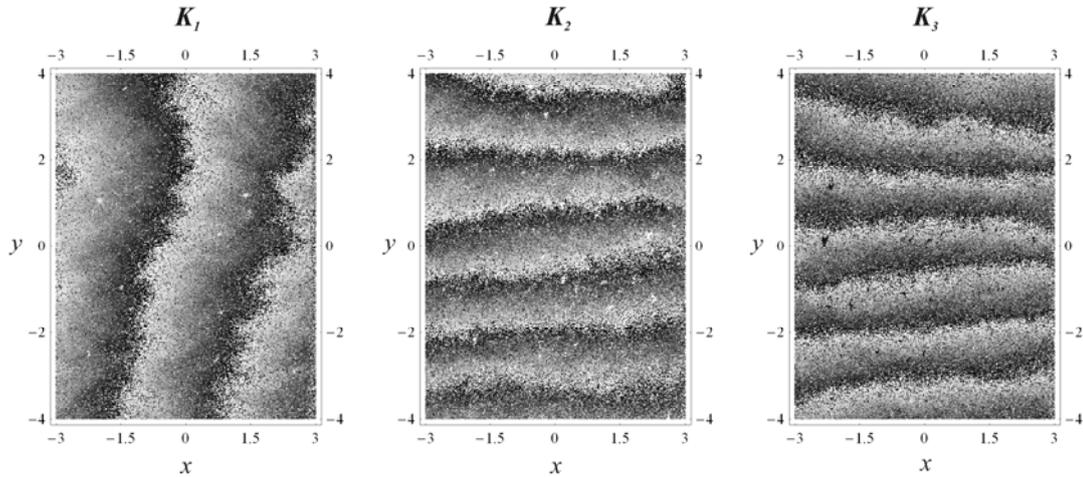


Figura 4.10: Mappe di fase relative ai 3 vettori di sensibilità K_1 , K_2 e K_3 e riferite ad un generico incremento di spostamento in campo plastico. Dimensioni in millimetri.

A partire da tali dati, una serie di ulteriori operazioni andranno effettuate di essi fino ad ottenere la curva tensione deformazione del materiale analizzato. I passi principali da eseguire sono riportati di seguito:

- Unwrapping;
- Calcolo delle componenti di spostamento (u , v , w);
- Fitting;
- Eliminazione moti rigidi;
- Determinazione parametri elasto-plastici.

Come algoritmo di *unwrapping* per la ricostruzione della fase (eliminando i suddetti salti) su tutta l'area analizzata si è utilizzato quello proposto in [4.4]. Dopo l'*unwrapping*, le mappe mostrate in precedenza assumono l'aspetto di Figura 4.11.

A questo punto, al fine di calcolare gli incrementi di spostamento subiti dal provino per ogni dato livello di carico (ancora contenenti i moti rigidi) va applicata alle mappe di fase l'Eq. 3.6, per chiarezza riportata anche di seguito.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{2\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}. \quad (3.6)$$

Le componenti di spostamento (u , v , w) così ottenute, oltre a contenere i moti rigidi impressi inevitabilmente dall'attrezzatura di carico al provino, posseggono anche una

notevole quantità di rumore, tipico delle tecniche interferometriche. A titolo di esempio la Figura 4.12 riporta in un grafico tridimensionale l'andamento delle spostamento fuori dal piano w per un generico livello di carico. Dalla figura si può notare, oltre all'elevato livello di rumore anche l'evidente rotazione del provino attorno all'asse x (moto rigido che andrà eliminato successivamente).

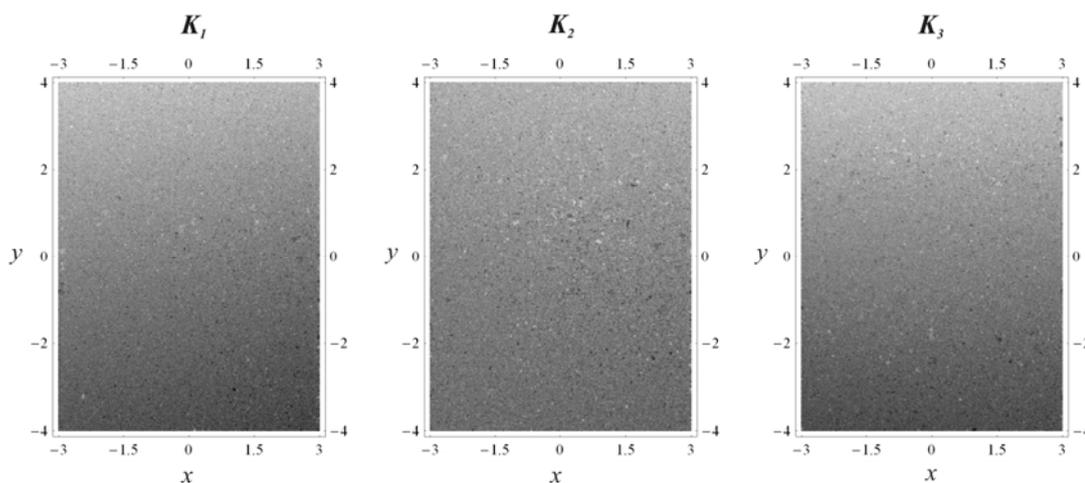


Figura 4.11: Mappe di fase dopo l'operazione di unwrapping riferite ai 3 vettori di sensibilità K_1 , K_2 e K_3 e riferite ad un generico livello di carico. Dimensioni in millimetri.

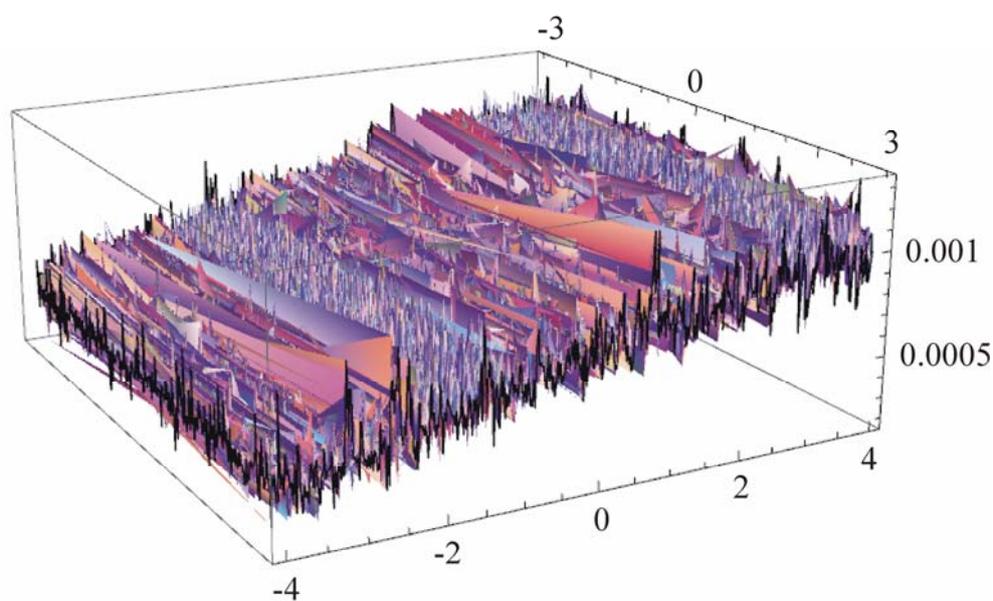


Figura 4.12: Spostamenti fuori dal piano riferiti ad un generico livello di carico. Dimensioni in millimetri.

Come già detto, per eliminare il rumore dai dati sperimentali, gli spostamenti sono stati approssimati utilizzando una procedura di fitting basata sul metodo delle B-spline. Secondo tale formulazione, il generico punto $P(x,y)$ di una superficie può essere rappresentato dalla seguente equazione:

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{i,j} N_{i,h}(x) N_{j,k}(y), \quad (4.1)$$

dove $N_{i,h}(x)$ e $N_{j,k}(y)$ sono le funzioni di base monodimensionali, $W_{i,j}$ sono pesi da valutare attraverso una procedura di ottimizzazione, $(n+1)$ ed $(m+1)$ sono il numero di punti di controllo in direzione x e y , h e k sono gli ordini delle funzioni polinomiali in direzione x e y . Le funzioni di base possono essere definite in maniera ricorsiva dalle seguenti equazioni:

$$N_{i,1}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{per } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}, \quad (4.2)$$

$$N_{i,k}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+k-1} - \xi_i} N_{i,k-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+k} - \xi}{\xi_{i+k} - \xi_{i+1}} N_{i+1,k-1}(\xi)$$

dove ξ_i è l' i -esimo elemento del vettore dei nodi, il cui numero di elementi è $(n+k)$. Con questo approccio si ottiene una funzione polinomiale definita a tratti di grado $(k-1)$, con continuità C^{k-1} e si espande per $(k+1)$ punti di controllo. Operando sul vettore dei nodi è possibile ottenere una B-spline non periodica e non uniforme. La formulazione non periodica si basa sulla ripetizione dei nodi esterni del vettore dei nodi; ripetendo tali nodi k volte si ottiene una curva che passa per i nodi iniziale e finale. Nella formulazione non uniforme i nodi non sono equispaziati ed i nodi interni possono essere ripetuti.

L'ottimizzazione del modello è ottenuta valutando i pesi $W_{i,j}$. Il vantaggio di questo approccio consiste nella riduzione del numero di parametri da ottimizzare e nella possibilità di mantenere basso il grado delle funzioni approssimanti, evitando così fluttuazioni indesiderate.

Il primo passo della procedura di fitting è la calibrazione delle coordinate spaziali dei dati in ingresso: gli indici della matrice di input vengono trasformati nelle coordinate spaziali dell'oggetto in esame.

Il secondo passo è quello di valutare analiticamente le funzioni di base nel dominio specifico, che nel caso in esame è un dominio rettangolare (8 x 6 mm² ovvero 430x320 pixel).

Nel terzo step viene costruito il modello da ottimizzare come un sistema sovra determinato di equazioni lineari, per mezzo dell'Eq. (4.1). In questo modo viene costruita una matrice **M** con un numero molto elevato di righe (tante quanti sono i dati sperimentali) ed un numero di colonne ridotto (quanto i parametri da ottimizzare). Gli elementi della matrice sono i valori assunti dalle funzioni di base in corrispondenza delle coordinate dei punti sperimentali. Il vettore noto **V** è composto dai dati sperimentali disposti in colonna. Quindi, assumendo per il problema la forma seguente:

$$\begin{bmatrix} N_{1,h}(x_1)N_{1,k}(y_1) & \cdots & N_{n,h}(x_1)N_{m,k}(y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{1,h}(x_l)N_{1,k}(y_l) & \cdots & N_{n,h}(x_l)N_{m,k}(y_l) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{1,h}(x_p)N_{1,k}(y_p) & \cdots & N_{n,h}(x_p)N_{m,k}(y_p) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_{1,1} \\ \vdots \\ W_{n,m} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_l \\ \vdots \\ v_p \end{Bmatrix} \Rightarrow \mathbf{MW} = \mathbf{V} \quad (4.3)$$

dove ogni equazione del sistema è relativa all'*l*-esimo punto e *p* è il numero totale di dati sperimentali. Secondo questo approccio il vettore incognito **W** si calcola come la matrice pseudo inversa di **M**, denominata **M***, moltiplicata per il vettore noto **V**. Un altro vantaggio di questa formulazione è che, se è disponibile più di un set di dati sperimentali, la matrice **M** va calcolata ed invertita solo una volta, mentre il vettore incognito per ciascun set di dati può essere valutato semplicemente moltiplicando **M*** per **V**.

Nel caso in esame, per approssimare il campo di spostamenti del provino sono stati utilizzati 5x3 punti di controllo (*n* = 4, *m* = 2) e funzioni di base del 3° ordine (*h* = *k* = 3). Il numero di dati sperimentali su cui è stato eseguito il fitting è 430 x 320 = 137600.

In Figura 4.13 sono riportate le tre componenti del campo di spostamento ottenute dopo la procedura di fitting, sotto forma di curve di livello. Come è possibile notare,

la presenza dei moti rigidi rende impossibile l'identificazione delle componenti di spostamento direttamente connesse alle deformazioni del provino.

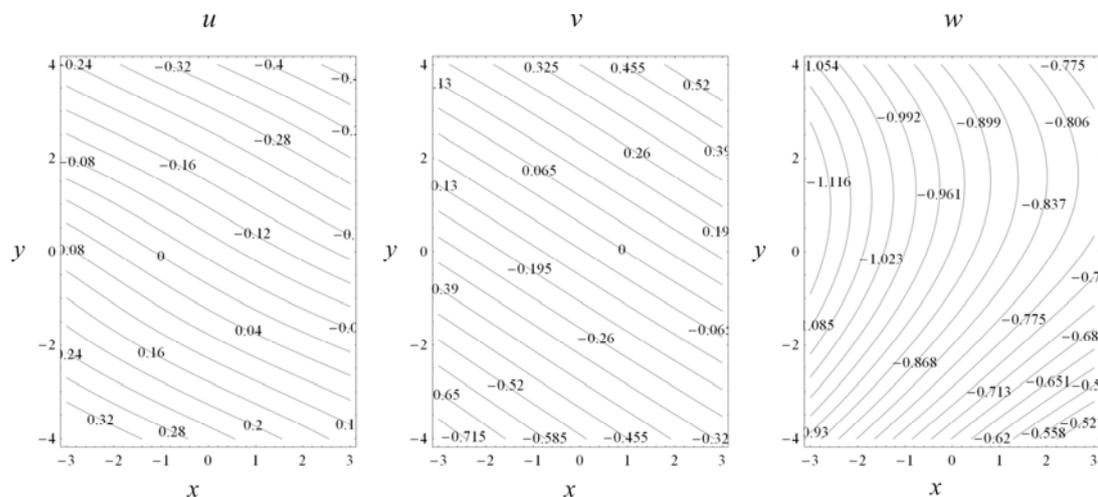


Figura 4.13: Curve di livello delle tre componenti di spostamento contenenti i moti rigidi. Le dimensioni sono in millimetri, gli spostamenti in micrometri.

I moti rigidi sul provino sono stati eliminati per via analitica come illustrato di seguito. La Figura 4.14, rappresenta un generico provino sul quale è stato fissato un sistema di riferimento in maniera che il piano $z = 0$ coincida con la superficie superiore, e facendo sì che questa risulti simmetrica rispetto agli assi x e y .

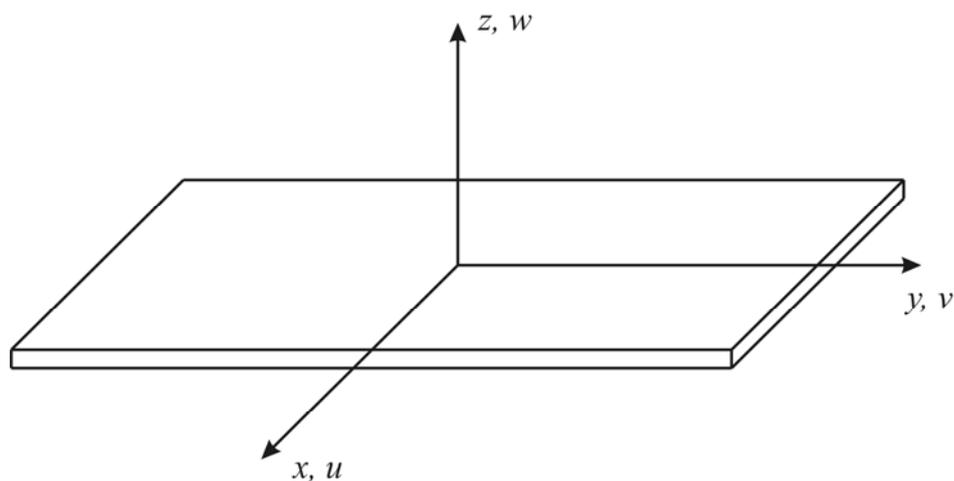


Figura 4.14: Geometria di riferimento per l'eliminazione dei moti rigidi sul provino.

Distinguendo le componenti di spostamento dovute a moto rigido dalle componenti di deformazione, gli spostamenti della superficie superiore del provino ($z = 0$), possono essere espressi come di seguito:

$$\begin{aligned} u_T(x, y) &= u(x, y) + u_0 - \omega_z y \\ v_T(x, y) &= v(x, y) + v_0 + \omega_z x \\ w_T(x, y) &= w(x, y) + w_0 + \omega_x y - \omega_y x \end{aligned} \quad (4.4)$$

dove $\{u_T(x, y), v_T(x, y), w_T(x, y)\}$ sono le componenti totali di spostamento (misurate dall'interferometro), $\{u(x, y), v(x, y), w(x, y)\}$ sono le componenti di deformazione, $\{u_0, v_0, w_0\}$ sono le tre traslazioni rigide e $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$ sono le tre rotazioni rigide del provino.

Con riferimento al sistema di equazioni (4.4), le tre traslazioni rigide e le tre rotazioni rigide possono essere calcolate sfruttando le condizioni di simmetria possedute dalle componenti dei deformazione della superficie analizzata. Ad esempio, u_0 può essere ottenuto integrando la prima delle (4.4) rispetto ad y , per $x = 0$:

$$\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) dy = \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u(0, y) dy + \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_0 dy - \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} \omega_z y dy. \quad (4.5)$$

Notando che $\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u(0, y) dy = 0$, perché gli spostamenti u sono costantemente nulli per

$x = 0$, che $\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} \omega_z y dy = 0$, dato che $\omega_z y$ è una funzione dispari integrata rispetto ad

estremi simmetrici, e la non dipendenza di u_0 dalla variabile y , si ottiene:

$$\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) dy = u_0(2\bar{Y}) \quad \Rightarrow \quad u_0 = \frac{\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) dy}{2\bar{Y}}. \quad (4.6)$$

Se invece si moltiplica primo e secondo membro della stessa equazione e poi la si integra ancora rispetto ad y , per $x = 0$, si ottiene:

$$\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) y dy = \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u(0, y) y dy + \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_0 y dy - \int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} \omega_z y^2 dy. \quad (4.7)$$

In questo caso si noti che ancora $\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u(0, y) y dy = 0$, per lo stesso motivo di sopra, che

$$\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_0 y dy = 0, \text{ essendo } u_0 y \text{ è una funzione dispari integrata rispetto ad estremi}$$

simmetrici, e la non dipendenza di ω_z dalla variabile y , si ottiene:

$$\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) y dy = -\frac{1}{3} \omega_z (2\bar{Y}^3) \quad \Rightarrow \quad \omega_z = -3 \frac{\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} u_T(0, y) y dy}{2\bar{Y}^3}. \quad (4.8)$$

Seguendo un approccio similare a quello illustrato sopra per il calcolo di u_0 e ω_z , le altre componenti di moto rigido possono essere calcolate con le espressioni riportate di seguito:

$$v_0 = \frac{\int_{-\bar{X}}^{\bar{X}} v_T(x, 0) dx}{2\bar{X}}, \quad w_0 = \frac{\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} \int_{-\bar{X}}^{\bar{X}} w_T(x, y) dx dy}{(2\bar{X})(2\bar{Y})} \quad (4.9)$$

$$\omega_x = 3 \frac{\int_{-\bar{Y}}^{\bar{Y}} w_T(0, y) y dy}{2\bar{Y}^3}, \quad \omega_y = -3 \frac{\int_{-\bar{X}}^{\bar{X}} w_T(x, 0) x dx}{2\bar{X}^3}$$

Note le varie rotazioni e traslazioni rigide subite dal provino, le componenti di deformazione dello stesso si calcolano semplicemente dalle (4.4):

$$\begin{aligned} u(x, y) &= u_T(x, y) - u_0 + \omega_z y \\ v(x, y) &= v_T(x, y) - v_0 - \omega_z x \\ w(x, y) &= w_T(x, y) - w_0 - \omega_x y + \omega_y x \end{aligned} \quad (4.10)$$

Un esempio delle tre componenti di spostamento ottenute dopo l'eliminazione dei moti rigidi è riportato in Figura 4.15, sotto forma di curve di livello: u e v rappresentano gli spostamenti nel piano, mentre w quelli fuori dal piano. Come sopra, l'asse di carico è l'asse y .

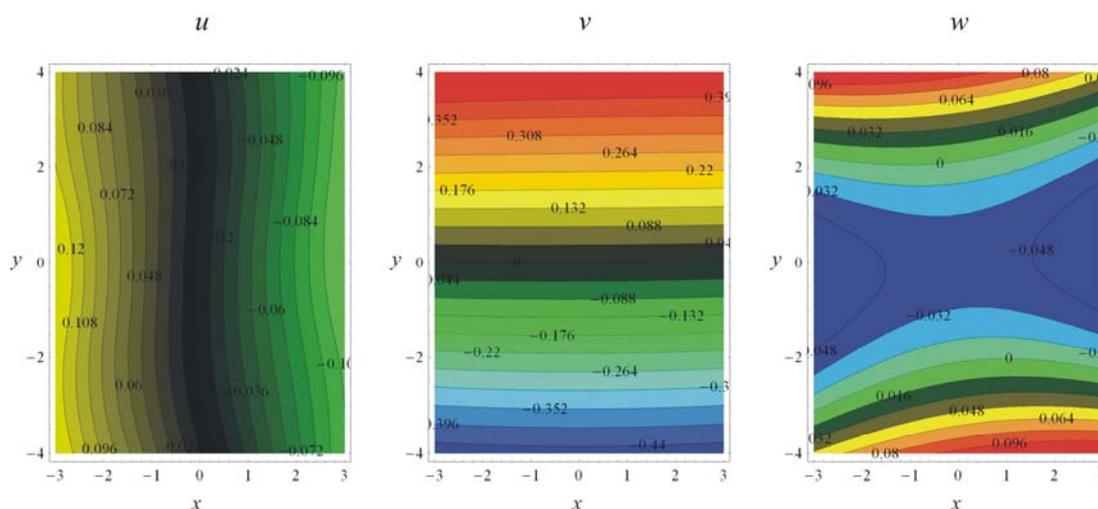


Figura 4.15: Curve di livello delle tre componenti di spostamento dopo la compensazione dei moti rigidi. Le dimensioni sono in millimetri, gli spostamenti in micrometri.

Come è ovvio, gli spostamenti nel piano v lungo l'asse del carico implicano la nascita di spostamenti nel piano in direzione ortogonale, a causa dell'effetto Poisson. Inoltre, la figura mostra come siano presenti anche degli spostamenti fuori dal piano; la forma di tali spostamenti rivela chiaramente la presenza di un momento flettente agente attorno all'asse x . In più, vista la non perfetta simmetria delle curve di livello relative a w , si può affermare che anche una leggera aliquota di momento torcente è presente. In altri casi, le curve di livello di v erano rette non parallele, mentre quelle relative agli spostamenti u mostravano una curvatura, rivelando anche la presenza di un momento flettente agente attorno all'asse z .

È possibile notare come, rispetto agli strumenti di misura generalmente utilizzati nelle prove di trazione (LVDT, estensometri), consente di misurare spostamenti 3D a pieno campo; in questo modo è garantito un controllo molto migliore dell'esperimento ed eventuali componenti spurie di carico possono essere individuate ed eliminate numericamente o sperimentalmente.

Deve essere notato che per ciascun livello di carico gli spostamenti determinati si riferiscono allo step precedente; per ottenere gli spostamenti totali bisogna

semplicemente sommare tutti gli incrementi di spostamento calcolati fino a quello step.

Partendo dagli spostamenti totali v è possibile calcolare le deformazioni nella direzione y ; d'altra parte, le tensioni nella stessa direzione possono essere ottenute dalle forze misurate dalle celle di carico. In questo modo è possibile ottenere la curva σ - ϵ per il materiale in esame. In Figura 4.16 sono riportate le curve ottenute da due test consecutivi sullo stesso provino. Nella prima prova, il provino è stato caricato al di sopra della tensione di snervamento, così da indurre in esso delle deformazioni plastiche e successivamente scaricato: gli spostamenti sul provino sono stati misurati sia in fase di carico che in fase di scarico. Nella seconda prova sono state nuovamente indotte deformazioni plastiche; in questo caso è stata analizzata solo la fase di carico. Dai due esperimenti è così possibile determinare un'unica curva, che raggiunge una deformazione di circa il 3.8 percento.

È inoltre interessante notare come, nella seconda prova, a causa del fenomeno dell'incrudimento che provoca un aumento della capacità del materiale di subire deformazioni elastiche, la tensione di snervamento risulti più elevata rispetto al primo test.

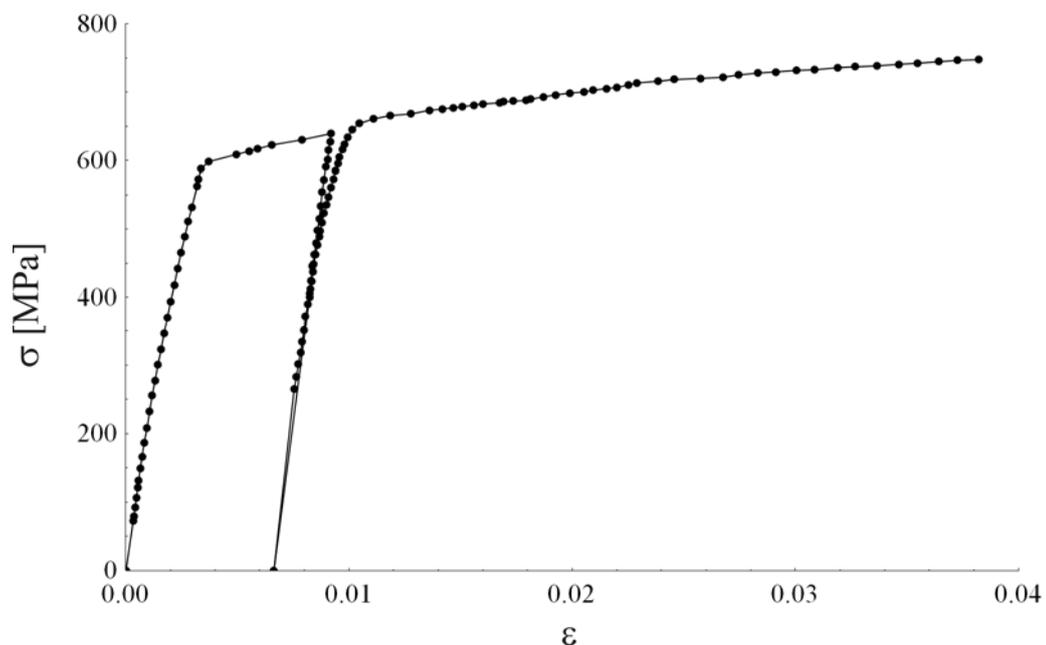


Figura 4.16: Curva σ - ϵ ottenuta da prove di trazione su un provino in acciaio.

Infine, è stato eseguito un fitting dei dati sperimentali riportati in Figura 4.17 così da determinare i parametri elasto plastici del materiale. In particolare, i dati sperimentali sono stati approssimati utilizzando il modello elasto-plastico di Ramberg-Osgood riportato di seguito:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{1/n}, \quad (4.11)$$

dove E rappresenta il modulo di Young mentre n ed H sono costanti che descrivono il comportamento plastico del materiale.

Dalla procedura di fitting, basata sul metodo dei minimi quadrati, sono stati determinati i seguenti valori dei parametri elasto-plastici del materiale analizzato:

$$\begin{aligned} E &= 209.1 \text{ GPa} \\ H &= 1042 \text{ MPa} . \\ n &= 0.0897 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Successivamente si è voluto provare ad approssimare i dati sperimentali anche con l'equazione di Hollomon, che rappresenta una relazione esponenziale tra la tensione e le deformazioni plastiche:

$$\sigma = K \varepsilon_{pl}^m, \quad (4.13)$$

dove ancora K ed m sono costanti che descrivono il comportamento plastico del materiale. Dopo il fitting dei dati sperimentali sono stati ottenuti i seguenti valori per le due costanti:

$$\begin{aligned} K &= 1154.4 \text{ MPa} \\ m &= 0.1221. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Il valore del modulo di Young E è invece rimasto invariato. In Figura sono riportate, oltre ai dati sperimentali, le due curve di Hollomon (linea tratto-punto) e di Ramberg-Osgood (linea tratteggiata). Si può notare come la prima approssimi meglio i punti ottenuti sperimentalmente nella zona dello snervamento, mentre la seconda presenta una transizione elasto-plastica molto più dolce.

Come si è visto finora, l'intero apparato sperimentale ha mostrato una buona capacità di misurare le deformazioni elasto-plastiche di un provino soggetto a trazione.

Tuttavia si sono presentati dei problemi quando si è cercato di imprimere al provino carichi più elevati, allo scopo di studiare il fenomeno della strizione: tali difficoltà sono essenzialmente dovute alla bassa rigidità dei bracci dell'attrezzatura di carico. Questo problema può essere superato in futuro svolgendo prove in controllo di spostamento; per far questo è necessario o aumentare la rigidità dell'attrezzatura o lavorare in modalità a ciclo chiuso.

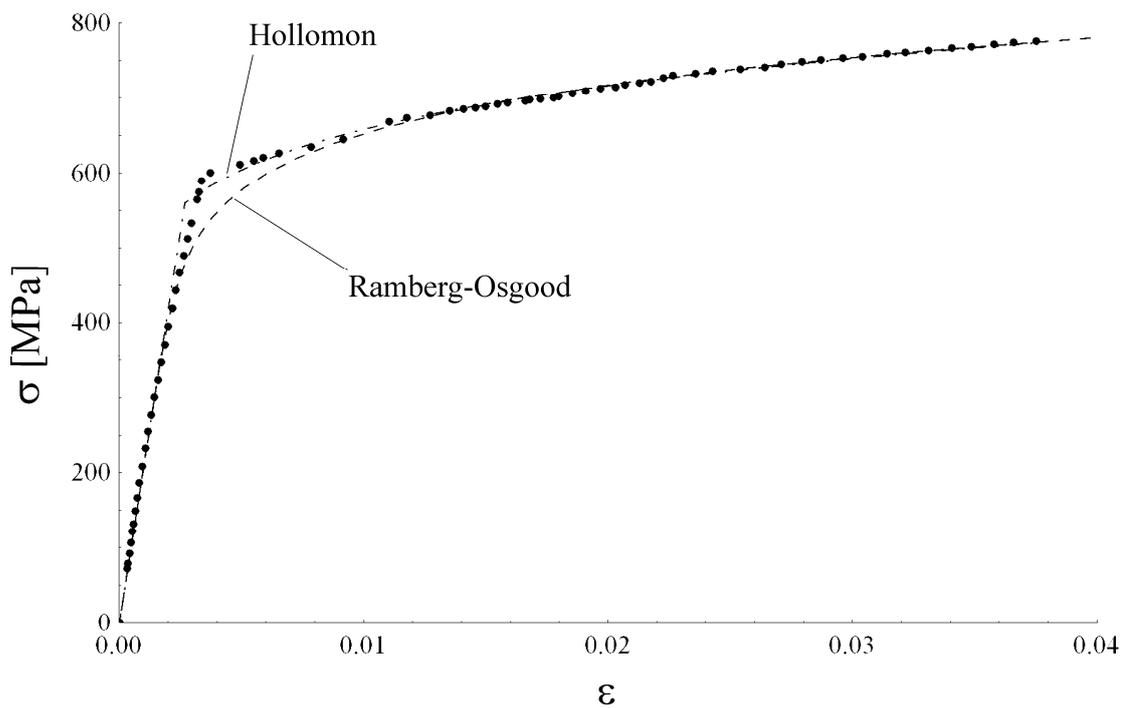


Figura 4.17: *Approssimazione dei dati sperimentali secondo il modello di Ramberg-Osgood (linea tratteggiata) e di Hollomon (linea tratto-punto).*

4.5 Bibliografia

- [4.1] J.W. Gray, *Mastering Mathematica: Programming Methods and Applications*, AP Professional, 1994.
- [4.2] L. Bruno, *A global approach for fitting 2D interferometric data*, Optics Express 15 (8), 4835-4847, 2007.
- [4.3] V.B. Anand, *Computer graphics and geometric modeling for engineers*, John Wiley & Sons, 1993.
- [4.4] A. Baldi, F. Bertolino, F. Ginesu, *On the performance of some unwrapping algorithms*, Optics and Lasers in Engineering 37 (4), 313-330, 2002.

Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un apparato sperimentale completo per l'esecuzione di prove di trazione monoassiali su materiali ingegneristici. I componenti principali di tale apparato sono:

- l'attrezzatura di carico;
- il sistema di misura degli spostamenti;
- l'elettronica di controllo.

L'attrezzatura di carico è stata realizzata appositamente per lavorare assieme al sistema di misura degli spostamenti ed ottimizzarne le prestazioni. L'attrezzatura è composta da due bracci indipendenti che caricano il provino da entrambi i lati e sono mossi da due motori a corrente continua commerciali; la soluzione cinematica adottata consente di minimizzare i moti rigidi sul provino e quindi di ridurre il disturbo della decorrelazione.

Il sistema di misura degli spostamenti è un interferometro speckle portatile operante attraverso tre diodi laser a basso costo e capace di misurare campi di spostamento 3D su aree di dimensioni limitate. L'interferometro è stato realizzato cercando di mantenere bassi i costi, pertanto è composto essenzialmente da componentistica ottica e meccanica standard. Inoltre esso è dotato di un attuatore piezoelettrico che consente

l'applicazione delle classiche procedure a variazione di fase utilizzate per il calcolo degli spostamenti a pieno campo delle superfici analizzate.

L'elettronica di controllo, realizzata anch'essa ad hoc, è interfacciata con il PC e consente di controllare l'intero apparato sperimentale: i diodi, i motori e l'attuatore piezoelettrico.

I primi test effettuati sono stati mirati a verificare l'accuratezza e la ripetibilità dell'interferometro: in particolare, il dispositivo è stato utilizzato per misurare un moto rigido nello spazio. I risultati ottenuti, presentati come curve di livello degli spostamenti nel piano e fuori dal piano, hanno mostrato una buona ripetibilità, confermando tuttavia il problema della decorrelazione, che compare all'aumentare dello spostamento imposto al provino. Inoltre è stata notata una non trascurabile variabilità del vettore di sensibilità all'interno dell'area inquadrata, alla quale si è successivamente rimediato collimando il fascio laser che illumina la superficie analizzata.

In seguito, le prestazioni dell'intero apparato sperimentale (attrezzatura di carico, interferometro ed elettronica di controllo) sono state valutate su un reale campo di deformazioni, eseguendo una prova di trazione su di un provino forato, in acciaio C40. I risultati (qualitativi) ottenuti, mostrati sotto forma di mappe di fase, hanno permesso anche di validare la procedura incrementale proposta per far fronte al problema della decorrelazione. In base a tale procedura, il passaggio dallo stato indeformato del provino allo stato di deformazione finale, deve avvenire attraverso una serie di livelli di carico intermedi, in modo da generare spostamenti né troppo grandi né troppo piccoli, così da evitare i disturbi della decorrelazione e del rumore elettronico, rispettivamente.

Infine, sono stati presentati i risultati relativi alle prove di trazione eseguite al fine di determinare i parametri elasto-plastici di un acciaio ad elevata resistenza. In particolare, sono state presentate prima le curve tensione-deformazione ottenute da due prove di trazione consecutive sul medesimo provino; successivamente i dati sperimentali sono stati approssimati utilizzando i modelli di Ramberg-Osgood e la legge di incrudimento esponenziale. In tal modo sono stati ricavati i parametri elasto-plastici del materiale. L'intera procedura numerica necessaria per l'elaborazione dei dati sperimentali è stata eseguita in ambiente Mathematica. Durante la prova, tuttavia,

si sono presentati dei problemi quando si è cercato di studiare il fenomeno della strizione: tali difficoltà sono essenzialmente dovute alla bassa rigidità dei bracci dell'attrezzatura di carico. Questo problema può essere superato in futuro svolgendo prove in controllo di spostamento; per far questo è necessario aumentare la rigidità dell'attrezzatura ed eventualmente lavorare in modalità a ciclo chiuso.

Le applicazioni future dall'apparato sperimentale riguarderanno l'analisi di campi di spostamento tri-dimensionali con valori elevati della componente fuori dal piano, come nel caso di provini contenenti intagli o difetti, o nel caso di giunti incollati.

Soltanto l'interferometro speckle, invece, verrà impiegato per la misura dei campi di deformazione che si generano in una prova di indentazione, sempre allo scopo di caratterizzare il comportamento elasto-plastico di materiali ingegneristici.