

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
MECCANICA**

DIN

TESI DI LAUREA

in

Analisi Sperimentale delle Tensioni M

**RIDUZIONE DEL RUMORE NELLE
MISURE DI DEFORMAZIONE TRAMITE
CORRELAZIONE DIGITALE DI
IMMAGINI**

CANDIDATO

Jacopo Baldoni

RELATORE

Chiar.mo Prof. Ing. Luca Cristofolini

CORRELATORI

Prof. Fabiana Zama

Prof. Ing. Giangiacomo Minak

Ing. Giacomo Lionello

Anno Accademico 2012/13

Sessione I

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Storia del metodo DIC	5
1.1.1	I primi approcci	5
1.1.2	L'evoluzione della correlazione di immagine digitale	6
1.2	Il funzionamento	7
1.2.1	L'acquisizione delle immagini e i sensori CCD . . .	8
1.2.2	Le facet	11
1.2.3	Le basi matematiche del DIC 2D	13
1.2.4	La stereovisione e la tecnologia DIC 3D	17
1.3	Le cause di errore nella correlazione di immagine digitale . .	19
1.3.1	Rumore nelle immagini digitali	20
1.3.2	Errori sistematici introdotti dall'interpolazione . . .	23
1.3.3	Altre fonti di errore	25
2	Materiali e metodi	27
2.1	Aramis	27
2.1.1	Il software di elaborazione	28
2.1.2	Prestazioni	28
2.1.3	Calibrazione di Aramis	29
2.1.3.1	Funzionalità Aramis	31
2.2	Sistemi sperimentali per per la validazione	31
2.2.1	Provino cilindrico	32
2.2.2	Trave a sbalzo	32
2.2.3	Provino PTFE	34
2.3	Preparazione della superficie	35

2.4	Tecniche di filtraggio	35
2.4.1	Filtri nel dominio spaziale	36
2.4.2	Trasformata di Fourier e filtri nel dominio di frequenza 38	
2.4.2.1	Filtri nel dominio di frequenza utilizzati.	44
2.5	Sommario attività trattate	46

3 Riduzione del rumore di misura tramite filtraggio delle immagini in ingresso 49

3.1	Valutazione del rumore di misura causato dall' algoritmo	50
3.1.1	Materiali e metodi	50
3.1.2	Risultati	51
3.1.3	Conclusioni	52
3.2	Filtraggio delle immagini nel dominio spaziale	53
3.2.1	Materiali e metodi	53
3.2.2	Risultati	54
3.2.3	Conclusioni	54
3.3	Filtraggio delle immagini nel dominio delle frequenze spaziali 55	
3.3.1	Materiali e metodi	55
3.3.2	Risultati	57
3.3.3	Conclusioni	59

4 Filtraggio in frequenza risultati in uscita 61

4.1	Tipo di sollecitazione e spettro di Fourier	62
4.1.1	Materiali e metodi	62
4.1.2	Risultati	64
4.2	Parametri del software e spettro di Fourier	69
4.2.1	Materiali e metodi	70
4.2.2	Risultati	71
4.2.3	Conclusioni	72
4.3	Intensità delle sollecitazioni e spettro di Fourier	72

4.3.1	Materiali e metodi	73
4.3.2	Risultati	75
4.3.3	Conclusioni	81
4.4	Filtraggio passa-basso dei risultati di deformazione	82
4.4.1	Messa a punto del filtro gaussiano passa-basso su di un provino metallico	82
4.4.1.1	Materiali e metodi	83
4.4.1.2	Risultati	90
4.4.1.3	Conclusioni	96
4.4.2	Applicazione del filtro passa-basso a misure di defor- mazione su tessuto biologico	96
4.4.2.1	Materiali e metodi	96
4.4.2.2	Risultati	108
4.4.2.3	Conclusioni	132
4.5	Elaborazione di un filtro Notch per ridurre l'aliasing nei ri- sultati di deformazione	133
4.5.1	Esplorazione del fenomeno di aliasing	134
4.5.1.1	Materiali e metodi	134
4.5.1.2	Risultati	136
4.5.1.3	Conclusioni	140
4.5.2	Messa a punto di un filtro di Notch gaussiano per ridurre il fenomeno di aliasing	141
4.5.2.1	Materiali e metodi	141
4.5.2.2	Risultati	143
4.5.2.3	Conclusioni	146
5	Riduzione del rumore di misura tramite filtraggio temporale	147
5.1	Filtraggio nel dominio temporale delle immagini in ingresso	148
5.1.1	Materiali e metodi	148
5.1.2	Risultati	150
5.1.3	Conclusioni	158

5.2	Filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione calcolate dal sistema DIC	159
5.2.1	Materiali e metodi	159
5.2.2	Risultati	159
5.2.3	Conclusioni	165
6	Conclusioni	167

Capitolo 1

Introduzione

Con il termine “correlazione di immagine digitale” o “digital image correlation” (DIC) si intende una tipologia di metodi di misura senza contatto che si basa sull’acquisizione di immagini di un oggetto, la loro successiva memorizzazione in formato digitale e l’esecuzione di una analisi per ricavare informazioni su forma, movimento e deformazione dell’oggetto stesso .[1]

Requisito fondamentale per la misurazione è la preparazione della superficie dell’oggetto in misura che deve presentare un pattern stocastico ad alto contrasto ottenibile tracciandovi linee, griglie o punti. In questo modo è possibile ottenere una scomposizione dell’immagine in sottodomini diversi fra di loro. In fase di analisi vengono confrontate le varie immagini dell’oggetto con una immagine di riferimento. Sarà possibile così determinare univocamente come ciascuno dei sottodomini si sia modificato risalendo a deformazioni e movimenti subiti dall’oggetto in misura.

1.1 Storia del metodo DIC

1.1.1 I primi approcci

I metodi di misura basati sulle immagini prendono origine dalla fotogrammetria nata subito dopo l’invenzione della macchina fotografica. L’idea di utilizzare prospettiva ed immagini per compiere misurazioni viene riportata anche in alcuni scritti di fine ’400 di Leonardo da Vinci. Nei tre secoli suc-

cessivi vennero poste le basi matematiche relative alla prospettiva, che poi trovarono la loro piena applicazione non appena, grazie a Daguerre, furono disponibili le prime fotografie. Il primo obiettivo che ci si pose con la fotogrammetria fu quello di trovare la forma tridimensionale di oggetti tramite il raffronto di immagini fotografiche scattate da diverse angolazioni. In questa ottica assume grande rilevanza il lavoro del Dr. Hellmut Schmid che fu non solo in grado di ricavare le equazioni e la loro soluzione tramite il metodo dei minimi quadrati, ma studiò anche la propagazione degli errori in tali tipi di calcoli.

1.1.2 L'evoluzione della correlazione di immagine digitale

Negli anni '50 Gilbert Hobrough iniziò il lavoro per giungere alla moderna DIC e nel 1961 costruì il primo dispositivo in grado di correlare fotografie ad alta risoluzione per estrarre informazioni posizionali di oggetti. La digitalizzazione delle immagini fra gli anni '60 e '70 costituì una ulteriore svolta che semplificò l'utilizzo delle stesse e rese possibile lo sviluppo di algoritmi complessi per il processo di correlazione. La post-processazione delle immagini veniva così enormemente semplificata e si poté iniziare l'automatizzazione del processo.

Inizialmente l'attenzione venne rivolta verso le tecniche DIC 2D, ottenute con l'uso di una sola telecamera che non permettevano misurazioni al di fuori del piano. L'attenzione fu incentrata sull'aumento della precisione del metodo. Notevole l'apporto di Sutton il cui particolare l'obiettivo era il raggiungimento della precisione sub-pixel. Tramite i suoi studi dimostrò che poteva essere raggiunta utilizzando funzioni interpolanti spline di ordine elevato nella ricostruzione dell'immagine digitale ed eliminando le distorsioni dovute al sistema ottico nelle immagini stesse.

Negli anni '90 si proseguì nel miglioramento della precisione del metodo e iniziarono le misurazioni di deformazione e le prove sul comportamento dei materiali.

Più recentemente l'attenzione si è spostata sulla tecnica DIC 3D. La tecnica 2D infatti richiede deformazioni e spostamenti prevalentemente bidimensionali: movimenti anche piccoli al di fuori del piano possono generare forti

errori nel processo di misura. La problematica emerse studiando l'impatto della curvatura degli oggetti nella propagazione degli errori nel processo di misura. Morimoto e Fujigaki introdussero l'uso di fotocamere multiple e di tecniche di manipolazione in frequenza delle immagini. Luo et al. (1993) svilupparono, automatizzarono e applicarono un sistema stereo a due camere per la misura delle deformazioni tridimensionali di una cricca.

Con l'introduzione della stereovisione, la correlazione di immagine digitale è stata utilizzata nello studio dei fenomeni aerodinamici, nella misura di spostamenti e deformazioni di oggetti cilindrici e strutture sferiche.

Da allora la tecnica DIC ha preso sempre più campo ed ha esteso le sue aree di interesse anche alla caratterizzazione di materiali metallici, ceramici, compositi e dei bio-materiali.

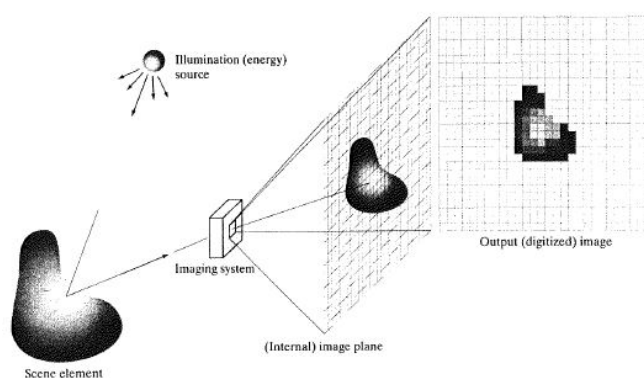
L'ultimo passo dell'evoluzione del metodo DIC è stato l'incontro con le tecnologie medicali come CT (Computer aided Tomography), MRI (Magnetic Resonance Imaging) e PET (Positron Emission Tomography) che ha portato alla nascita di misurazioni volumetriche che investigano l'intera massa dell'oggetto in misura, non solo la sua superficie. [1]

1.2 Il funzionamento

La correlazione di immagine si basa sull'analisi delle differenze fra una immagine dell'oggetto in misura (o una triangolazione di più immagini scattate nello stesso istante) presa come riferimento e altre immagini (o altre triangolazioni di più immagini) scattate mentre l'oggetto si deforma o si muove. La tecnologia DIC è in grado di competere con le altre tecniche di misura delle deformazioni tipiche della meccanica sperimentale come estensimetria o metodi del moirè. Ad esempio gli estensimetri sono in grado di dare solo informazioni locali ed il limite superiore delle deformazioni rilevabili è basso (circa 1%). L'interferometria moirè invece riesce a dare una mappatura di spostamenti e deformazioni più completa ma la tecnica è complessa, richiede lunghi tempi e può portare a risultati insoddisfacenti. Con la correlazione d'immagine possiamo invece ottenere informazioni a tutto campo, in maniera rapida, poco invasiva sul provino e su di un ampio range di valori.

1.2.1 L'acquisizione delle immagini e i sensori CCD

Le immagini digitali sono generate dalla combinazione di una sorgente luminosa e dal riflesso e assorbimento della stessa da parte di un corpo o di una scena da catturare. L'energia luminosa entra nella fotocamera che è un dispositivo composto da alcuni sotto-sistemi. L'ottica è un elemento composto da una serie di lenti, filtri ottici ed un otturatore che ha lo scopo di convogliare la luce e focalizzarla sul piano contenente il sensore CCD (Charged Couple Device). Quest'ultimo è costituito da una riga, o più comunemente da una griglia, di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica (charge) proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica incidente. Gli elementi sono accoppiati fra di loro (coupled) in modo che ciascuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico possa trasmettere la propria carica all'elemento adiacente. La radiazione incidente è così trasformata in un segnale elettrico tramite il quale è possibile costruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine. L'informazione così ottenuta può essere utilizzata direttamente nella sua forma analogica oppure può essere digitalizzata per renderne possibile la processazione in ogni momento. Per fare ciò entra in azione un altro componente del sistema di acquisizione delle immagini: la scheda di acquisizione A/D.



L'output del sensore è quindi una radiazione sinusoidale la cui ampiezza e comportamento spaziale sono legati alla scena e all'illuminazione registrate. Per creare una immagine digitale vengono introdotti due processi: il campionamento e la quantizzazione.

L'immagine è caratterizzata da continuità spaziale e in ampiezza. Nella trattazione seguente tratteremo sempre immagini in bianco e nero che sono quelle utilizzate nella tecnologia DIC dato il buon livello di contrasto e la semplicità computazionale che le caratterizza. Campionare vuol dire digitalizzare i valori delle coordinate, quantizzare vuol dire digitalizzare i valori in ampiezza. Sezionando l'immagine mostrata in (1.1a) lungo il segmento AB si ottiene la funzione monodimensionale mostrata in 1.1b che grafica l'andamento delle ampiezze lungo il segmento stesso. Le fluttuazioni dei valori sono dovute a rumore. Il campionamento nella seconda dimensione viene effettuato prendendo campioni ugualmente spaziatati lungo la linea AB. I valori così trovati sono evidenziati nella stessa figura. A loro volta i valori campionati si estendono verticalmente in un intervallo continuo di livelli di grigio: digitalizzare vuol dire discretizzare anche lungo questa dimensione. In 1.1c viene mostrata la scala dei grigi suddivisa in otto intervalli distinti. Quantizzare l'immagine consiste nell'assegnare un livello discreto di grigio a ciascuno dei punti precedentemente trovati.

L'immagine digitale bidimensionale è ottenuta iniziando dalla parte superiore dell'immagine e portando avanti la procedura sopra descritta linea per linea.

I sensori che incamerano la radiazione luminosa sono organizzati in matrici più o meno grandi: le dimensioni di queste matrici costituiscono il limite massimo di intervalli di campionamento dell'immagine nelle due direzioni. Il risultato finale della digitalizzazione ed i limiti qui sopra esposti sono espressi nell'immagine 1.1d. La qualità dell'immagine digitale sarà quindi determinata in larga parte dal numero di intervalli di campionamento e di livelli di grigio utilizzati.[2]

Nella tecnologia DIC l'elaborazione delle immagini parte una volta effettuata una ulteriore elaborazione: l'interpolazione.

In figura 1.2 è presentata una immagine di 8x8 pixel, mentre nel grafico a destra è riportato l'andamento discreto dei toni di grigio della seconda riga dall'alto interpolato in modo da passare ad una rappresentazione continua del tono di grigio.

Negli ultimi anni l'importanza dei metodi di interpolazione come mezzo per aumentare la precisione dei metodi DIC è stata più volte sottolineata. In particolare la precisione sub-pixel può essere raggiunta solo superando la quantizzazione tipica delle immagini digitali che rende il pixel l'unità minima di raffronto fra le immagini. Uno dei metodi più usati è l'interpolazione bicubica che è un metodo robusto che consente una buona precisione ad un costo computazionale ridotto. Per raggiungere livelli di precisione maggiori però sono preferibili i metodi basati su funzioni B-spline. Tramite algoritmi ricorsivi è possibile diminuire notevolmente i tempi di calcolo che un tempo caratterizzavano questi metodi. [3]

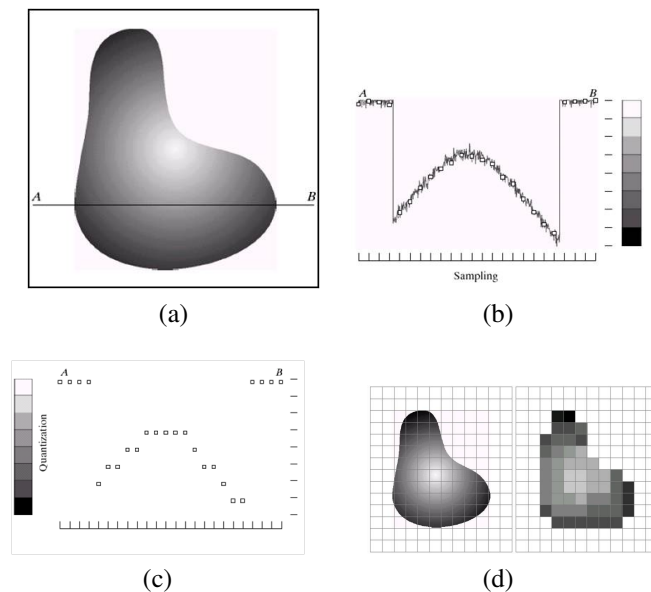


Figura 1.1: Fasi del processo di quantizzazione e digitalizzazione delle immagini digitali.

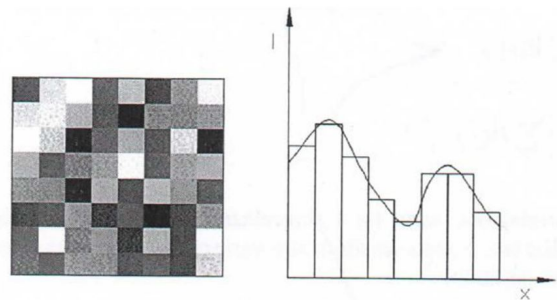


Figura 1.2: Esempio di interpolazione.

1.2.2 Le facet

Generalmente non è possibile stabilire una corrispondenza pixel per pixel fra due immagini. Il valore di grigio che caratterizza un singolo pixel potrà essere trovato in migliaia di pixel differenti nella seconda immagine. La soluzione è quindi quella di passare a cercare le corrispondenze per una regione limitrofa al pixel di interesse, scomponendo cioè l'immagine di partenza in più sottodomini. Tale soluzione può essere esemplificata utilizzando l'immagine 1.3. Nella parte di sinistra abbiamo una apertura circolare sull'immagine di una linea: la componente di moto perpendicolare alla direzione della linea può essere determinata, ma quella lungo la direzione stessa rimane indeterminata. Il problema può essere aggirato come indicato nell'immagine di destra: allargando l'apertura sull'immagine si mettono in evidenza i punti finali della linea stessa ed il suo moto può essere adesso totalmente determinato.

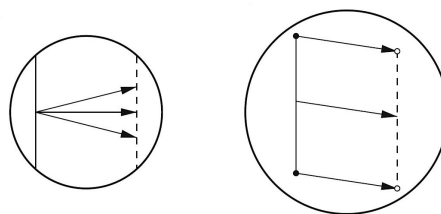


Figura 1.3: Esempificazione del problema di apertura [1]

Sia nella tecnica DIC 2D che per quella 3D l'immagine registrata viene scomposta in dei sottodomini denominati *facets*. Le facets possono avere varie forme e dimensioni e sono sfalsate le une rispetto alle altre di una quantità

di pixels denominata *facet step*. Le varie facets saranno quindi più o meno sovrapposte. Il fenomeno è denominato *overlay*.

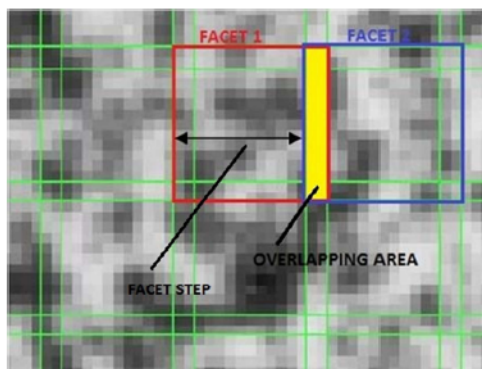


Figura 1.4: Facet size 15 x 15 e facet step 13 x 13.

La dimensione della facet influenza precisione e tempo di computazione della misurazione DIC. Aumentando le dimensioni della facet, i tempi di calcolo aumentano mentre i risultati finali sono più precisi. Allo stesso tempo i fenomeni locali aventi dimensioni inferiore alla facet si perdono ma per contro il rumore di misura generato dall'acquisizione digitale viene ridotto. Diminuendo la dimensione della facet è possibile apprezzare meglio i fenomeni locali ma questo a costo di decorrelazione fra le facets e amplificazione del rumore di misura.

La forma della facet è solitamente quadrata e la dimensione determinata dal numero di pixels per lato che la compongono. A volte per misurazioni in cui le deformazioni in una direzione sono molto forti può essere consigliabile l'uso di facets rettangolari in modo da seguire meglio l'andamento del fenomeno.

L'altro parametro che modifica tempi computazionali e precisione della misurazione è il facet step. Un facet step piccolo porta ad un alto numero di punti di misura che richiedono tempi computazionali lunghi. L'overlay aumenta e le facets sono molto correlate fra di loro. Al contrario un piccolo facet step porta a tempi computazionali ridotti ma anche minori correlazione e precisione della misura. Esistono metodi appositi per il calcolo dei parametri ottimali di facet dimension e facet step. Questi sono legati alla forma del pattern presente sull'oggetto in misura e a come questo appare nell'immagine

catturata dal sistema (1.5). La scelta delle dimensioni e del distanziamento delle facet è legata a come gli algoritmi di correlazione riusciranno a ricavare informazioni dal confronto delle varie facet.

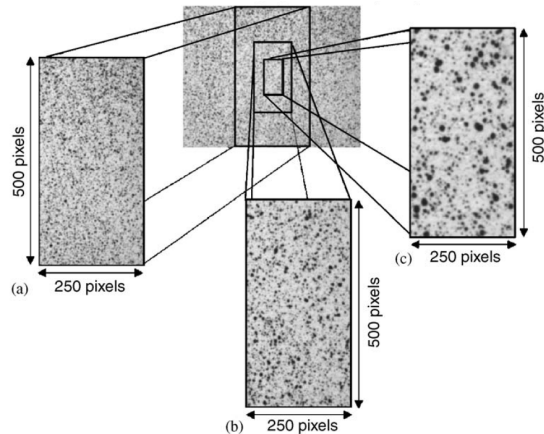


Figura 1.5: Un singolo pattern se osservato con ingrandimenti differenti porta a più distribuzioni di speckle aventi dimensioni differenti.[4]

1.2.3 Le basi matematiche del DIC 2D

Nel metodo bidimensionale le immagini sono riprese da una sola camera. Partire da questo metodo permette di semplificare la trattazione teorica della teoria matematica che regola la correlazione d'immagine digitale.

Considerando nell'immagine di riferimento una sub-immagine centrata nel punto $P(x,y)$ si indichi con $Q(x+dx, y+dy)$ il generico punto dell'immagine (figura 1.6). Le intensità luminose dell'immagine nei punti P e Q saranno:

$$I(P) = I(x_p, y_p)$$

$$I(Q) = I(x_Q, y_Q) = I(x_p + dx, y_p + dy)$$

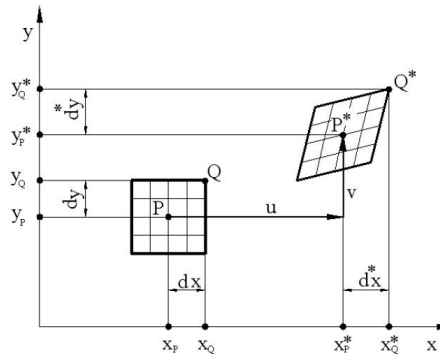


Figura 1.6: Spostamento nel piano di un segmento P-Q

Analogamente le intensità luminose dei punti Q^* e P^* dell'immagine deformata saranno:

$$I^*(P^*) = I^*(x^*_p, y^*_p); I^*(Q^*) = I(x^*_q, y^*_q) = I^*(x^*_p + dx^*, y^*_p + dy^*)$$

dove:

$$x^* = x + u$$

;

$$y^* = y + v$$

Supponendo che la deformazioni non incida sul valore di intensità luminosa, dovrà verificarsi che:

$$I^*(Q^*) = I(Q)$$

Quindi il problema si formula nella ricerca di una facet che nell'immagine deformata presenti la stessa intensità luminosa della facet di riferimento. A causa del rumore di immagine e di digitalizzazione l'uguaglianza non si può soddisfare esattamente. Pertanto il problema si riconduce alla minimizzazione di una funzione di errore:

$$E_p = \sum_i [I^*(Q_i^*) - I(Q_i)]^2 \quad (1.1)$$

Dove con i si intende il generico punto della sub immagine centrata in P .

L'equazione (1) può essere vista come una distanza euclidea fra le due regioni di pixels. Possiamo infatti riformularla come:

$$d^2(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n (I_1(x, y) - I_2(x + u, y + v))^2 \quad (1.2)$$

L'equazione così ottenuta compara ciascun pixel dell'immagine di riferimento con quella deformata ecentrata in $(x+u, y+v)$. Esplicitando i vari termini:

$$d^2(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n (I_1^2(x, y) - 2I_1(x, y)I_2(x + u, y + v) + I_2^2(x + u, y + v)) \quad (1.3)$$

Il primo termine, quello di riferimento, è costante . Se anche il termine riferito alla seconda regione di pixel è approssimativamente costante il rimanente termine

$$c(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n (I_1(x, y)I_2(x + u, y + v)) \quad (1.4)$$

può essere considerato come una misura della similitudine fra regioni di interesse.

Questo approccio però dei forti limiti dovuti alla non invarianza da condizioni di illuminazione esterna e alla dipendenza dalle dimensioni della regione raffrontata. Per questo motivo si preferisce normalizzare il termine per renderlo meno dipendente dalle condizioni descritte:

$$c'(u, v) = \frac{\sum \sum (I_1(x, y)I_2(x + u, y + v))}{\sqrt{\sum \sum I_1^2(x, y) \sum \sum I_2^2(x + u, y + v)}} \quad (1.5)$$

Il valore del coefficiente normalizzato varia fra 0 ed 1 e può essere quindi visto come una probabilità di correlazione fra le due regioni di pixels prese in esame. Introducendo dei vettori parametrici per descrivere le coordinate delle due regioni di pixels, è possibile tramite approssimazioni iterative giungere alla soluzione che meglio soddisfa l'equazione (5).

Il metodo più semplice è quello delle approssimazioni successive. Le due regioni vengono correlate in steps successivi aumentando il numero di parametri che le legano.

Si comincia considerando le sole traslazioni rigide tra le facets considerate. Minimizzando la funzione di costo (2) viene cercata la correlazione fra le due regioni considerando le sole traslazioni rigide. La correlazione viene di nuovo stabilita aggiungendo le componenti di deformazione longitudinale ϵ_x ed ϵ_y tramite le derivate prime degli spostamenti. Per ultime sono introdotte le derivate miste ovvero gli scorrimenti γ_{xy} . Il caso che raggiunge la maggiore correlazione diventa quello adottato per descrivere la correlazione fra le due regioni di pixels. In figura 1.7 vengono riassunte le fasi appena descritte.[5]

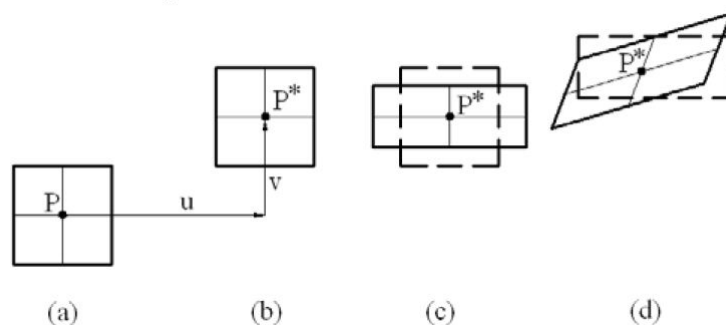


Figura 1.7: Esempificazione del metodo delle approssimazioni successive.

Il metodo Newton-Raphson invece richiede maggiore costo computazionale ma, visto il recente sviluppo delle tecniche di calcolo numerico, è quello che viene maggiormente utilizzato. Con questo metodo l'accuratezza della correlazione scende al di sotto del pixel. Le componenti parametrizzate vengono in questo caso utilizzate tutte insieme ed il calcolo procede per steps di approssimazione successivi. Stabilendo un criterio di arresto per l'iterazione, ad esempio la distanza fra due soluzioni successive, si giunge alla soluzione di ottimo.

Simile al precedente è il metodo di Lavemberg-Marquardt. Anche quest'ultimo è un metodo iterativo che trova la soluzione di un problema di minimi quadrati di funzioni non lineari a valori reali.

Entrambe gli ultimi due metodi si basano sul calcolo derivativo e sulla creazione di matrici di grandi dimensioni. Se i dati in ingresso sono rumorosi,

le matrici che vengono create risultano mal condizionate. Questo porta a degli errori sistematici forti e a risultati a volte privi di senso fisico.

1.2.4 La stereovisione e la tecnologia DIC 3D

L'aggiunta di telecamere, e quindi di punti di vista, al sistema DIC permette di ampliare le capacità dello strumento.

La tecnica DIC 2D ha come restrizione l'ipotesi che l'oggetto sia piano e che i suoi movimenti avvengano su un piano. Nella tecnica DIC 3D questo aspetto viene superato. L'oggetto in misura deve sempre rimanere a fuoco durante la misura e i punti di interesse devono essere ripresi dai sensori delle due o più camere utilizzate nella misura.

La correlazione d'immagine 3D si basa sulla stereovisione. In questa tecnica vengono utilizzati due sistemi camera. Fondamentale è il modo con cui viene recuperata l'informazione di profondità a partire dalle varie immagini bidimensionali.

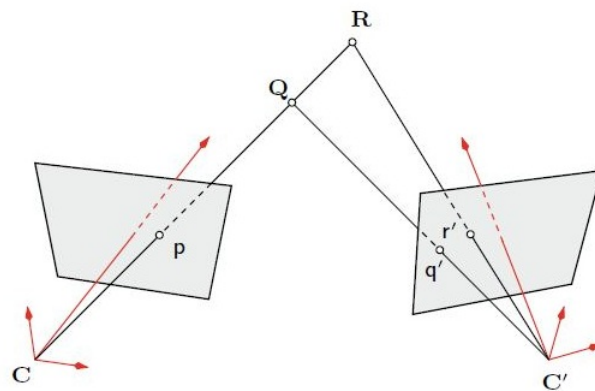


Figura 1.8: Visione stereoscopica [1]

I punti focali sono due C e C' , così come i piani d'immagine come visibile in 1.8. Un punto Q nella scena tridimensionale è proiettato sui piani d'immagine come p per il sinistro e q' per il destro. La differenza di posizione di punti sul piano d'immagine corrispondenti allo stesso punto reale è

detta “disparità” o “parallasse”. Quest’ultima è funzione sia della posizione del punto nella scena, che del posizionamento reciproco delle camere utilizzate. Quando queste posizioni sono note è possibile mappare una scena 3D partendo da immagini bidimensionali. La creazione dei prerequisiti per la ricostruzione della scena è una fase fondamentale del metodo DIC, e viene detta calibrazione. Conoscendo la posizione reciproca delle camere è possibile restringere la ricerca di coppie di punti facenti riferimento allo stesso punto reale ad un problema monodimensionale. In figura 1.9 sono mostrati i sistemi camera destro e sinistro. La linea che connette i punti focali C e C' è detta base stereo. Ogni piano contenente la base stereo è detto piano epipolare. Collegando il punto M della scena con il punto focale sinistro C otteniamo un segmento che unito alla base stereo forma univocamente un piano epipolare. La proiezione di M sul piano destro dovrà perciò giacere lungo la linea intersezione di questo piano epipolare con con il piano d’immagine destro. Se la relazione posizionale fra le camere è nota il problema si riduce a cercare la posizione lungo la linea epipolare nella immagine destra. Il problema si è quindi ridotto ad una ricerca monodimensionale che riduce enormemente la complessità computazionale del problema. Quando due camere sono disposte in modo tale da avere solo uno spostamento orizzontale fra di loro, la disparità potrà verificarsi solo lungo una linea retta e le camere sono dette “in corrispondenza”. [6]

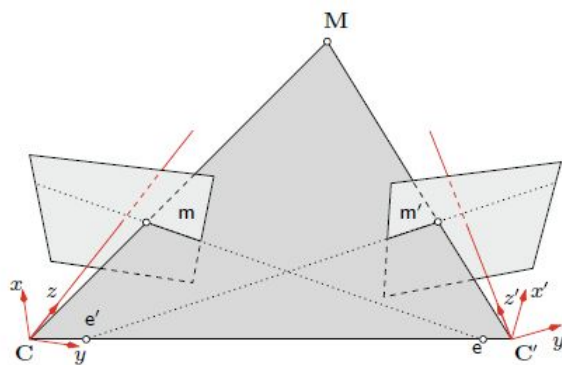


Figura 1.9: Piano epipolare e vincoli associati [1]

Il processo di calibrazione riveste dunque una importanza fondamentale

della tecnologia DIC 3D in quanto permette di definire tutti i parametri intrinseci (distanza focale, centro ottico e la distorsione delle lenti di ogni camera) ed estrinseci (posizione reciproca di ogni camera dei piani d'immagine e loro orientazione). La procedura consiste nell'aquisizione contemporanea con entrambi i sensori di una serie di fotogrammi nei quali viene ripreso un target di calibrazione detto primario (1.10).

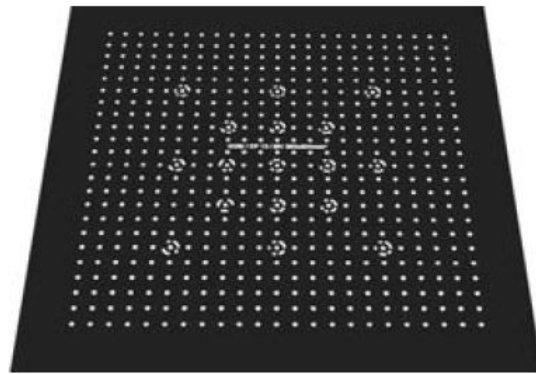


Figura 1.10: Primario di calibrazione per DIC 3D.

Il primario è un oggetto di geometria nota avente dei punti codificati dal sistema DIC denominati markers. Muovendo il primario, il sistema ne registra la posizione tramite i markers e riesce a definire la posizione reciproca delle camere ed il volume di misura entro il quale è possibile effettuare le misurazioni.

Grazie alla calibrazione è possibile portare a termine il processo di triangolazione dei vari punti rilevati sui due sensori camera.

Gli errori di calibrazione costituiscono un forte limite alla risoluzione dei risultati della correlazione d'immagine.

1.3 Le cause di errore nella correlazione di immagine digitale

Le misurazioni effettuate con la correlazione di immagine digitale sono affette, come tutte le misure, da vari tipi di errore. Le cause di errore possono

essere molteplici:

- Errori introdotti dall'algoritmo DIC a causa di contaminazioni e disturbi nell'acquisizione delle immagini (vedi 1.3.1);
- Errori introdotti dall'interpolazione dei toni di grigio (vedi 1.3.2);
- Errori introdotti in fase di calibrazione, dovuti all'applicazione errata del pattern stocastico oppure da attribuire ad insufficiente illuminazione della scena (vedi 1.3.3);

1.3.1 Rumore nelle immagini digitali

La causa principale di rumore nelle immagini digitali è da imputare al processo stesso di acquisizione delle immagini e alla loro digitalizzazione. Le prestazioni dei sensori possono essere influenzate da un gran numero di fattori come le condizioni ambientali durante l'acquisizione, la qualità dei sensori stessi, le condizioni di illuminazione e la temperatura dei sensori CCD. Idealmente ogni fotone che colpisce il sensore dovrebbe essere convertito in esattamente un elettrone. A sua volta il numero di elettroni dovrebbe essere contato con precisione e convertito in un numero tale da dirci quanta luce ha esattamente colpito ciascun pixel. Purtroppo queste due condizioni non si verificano mai con esattezza. Vi sono però degli accorgimenti che rendono possibile la minimizzazione di questi errori di conversione. Il rumore nelle immagini digitali ha diverse modalità per manifestarsi. Può generare dei grani nelle aree più scure delle immagini o creare striature di vario genere che si manifestano nelle aree a basso segnale.

1.3.1.0.1 Tipologie di rumore nelle immagini digitali I principali modelli di rumore si differenziano per come si presenta il loro spettro di Fourier (vedi capitolo 2) e per le differenti funzioni di probabilità che li caratterizzano. In particolare abbiamo:

Rumore Gaussiano Può essere trattato sia nello spettro di frequenza sia in quello spaziale. Anche chiamato normale è caratterizzato da una

funzione di densità di probabilità dei livelli di grigio di tipo gaussiano. Si manifesta con una uniforme granulatura delle immagini:

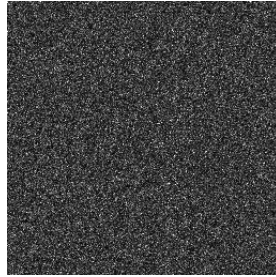


Figura 1.11

Rumore impulsivo o sale-pepe Si manifesta sotto-forma di punti isolati chiari e scuri. Ha una distribuzione di tipo bipolare. Vi sono ovvero due probabilità nella PDF ed entrambe hanno un valore circa uguale.



Figura 1.12: Immagine corrotta da rumore di tipo impulsivo.

Rumore periodico Il rumore periodico è originato da interferenze di tipo elettrico ed elettromagnetico. Si presenta sotto forma di striature di varia natura sull'immagine, a volte complicate a tal punto da formare delle texture. Ha uno spettro di Fourier ben riconoscibile ed è rimuovibile tramite filtri Notch (vedi capitolo 2).

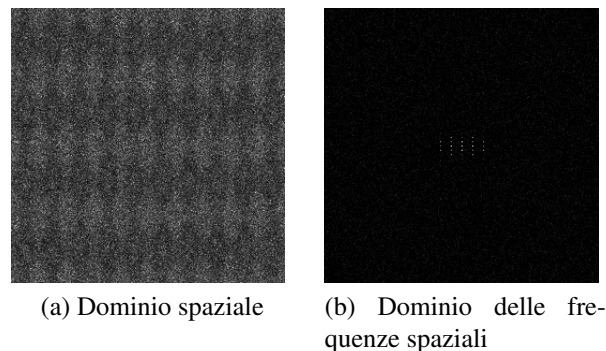


Figura 1.13: Esempio di rumore periodico visto nel dominio spaziale e delle frequenze spaziali.

1.3.1.0.2 Cause di rumore nelle immagini digitali Ognuna delle tipologie di rumore prima descritte può essere originata da fenomeni di varia natura che intervengono nel processo di acquisizione e digitalizzazione delle immagini. I principali fenomeni sono:

Readout Noise Il rumore di lettura viene introdotto in seguito alla lettura del sensore CCD. La digitalizzazione converte un segnale analogico di corrente in un numero: la lettura crea una distribuzione statistica di possibili risultati centrati su di un valor medio. Il read-out noise ha quindi andamento normale. Altro fattore che contribuisce alla creazione di questo fenomeno è l'elettronica della camera digitale che può introdurre elettroni di disturbo nel processo di lettura e conversione. Gli effetti di questo tipo di rumore possono essere mitigati prendendo più frames di una singola scena da acquisire.

Dark Current Si manifesta sia sui CCD esposti alla luce sia su quelli non esposti. Viene creato da elettroni generati termicamente sul sensore CCD che portano informazione fittizia nella creazione dell'immagine digitale. Questo tipo di rumore può essere evitato o fortemente ridotto raffreddando i sensori ed aumenta quanto più il sistema di acquisizione rimane acceso. Nel caso della DIC i tempi di esposizione di una singola immagine non sono lunghi ma le acquisizioni a volte possono richiedere prove e ripetizioni che tengono in funzione i sensori per alcune ore.

Interferenze elettroniche Le camere CCD contengono numerosi circuiti elettronici: amplificatori e convertitori. Ciascuno di essi crea correnti di varia natura che interferiscono con i moti di elettroni sul sensore CCD.

Shot Noise Questa tipologia di rumore è causata dall'arrivo casuale di fotoni. Data la natura della radiazione luminosa ogni fotone è un evento indipendente ed il suo arrivo non può essere predetto con esattezza. L'arrivo di un fotone in un certo intervallo temporale è invece regolato dalla distribuzione di Poisson. Nelle immagini catturate in un tempo breve o se vengono prese immagini singole di un evento questo fenomeno è accentuato. [http://www.qsimaging.com/ccd_noise.html]

La prima parte del lavoro che segue sarà dedicata all'applicazione delle tecniche di rimozione di tali difetti dalle immagini digitali ed alla comprensione di come tali tecniche agiscano sui risultati finali.

1.3.2 Errori sistematici introdotti dall'interpolazione

L'algoritmo DIC utilizza l'interpolazione dei livelli di grigio. Questo procedimento è necessario, come precedentemente indicato (1.2.1), per il raggiungimento della precisione sub-pixel nei risultati finali. Gli errori introdotti nella fase di interpolazione dipendono dalle dimensioni degli speckle, dal metodo di interpolazione e dal contrasto nel pattern stocastico.

In pratica il processo di interpolazione consiste nell'inserimento della matrice delle informazioni ricavata dai toni di grigio dei pixel delle immagini (vedi 1.14) in una matrice più ampia che punta al campionamento dell'informazione ad intervalli più stretti.

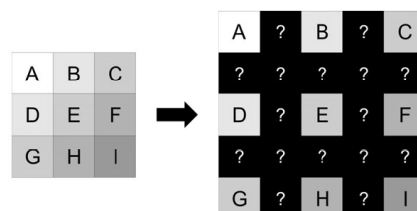


Figura 1.14: Esempio di interpolazione sub-pixel.

Ciò che un buon metodo di interpolazione deve effettuare è preservare le geometrie degli oggetti rappresentati nell'immagine senza introdurre artefatti. In generale l'interpolazione può però condurre ad errori sia di ampiezza che di fase. Il principale artefatto introdotto dall'interpolazione è quello dell'aliasing. Viene definito in tal modo il fenomeno di frastagliamento dei contorni (*edges*) dell'immagine interpolata.

In figura 1.15 sono riportati esempi di interpolazione di una stessa immagine. L'immagine nel riquadro in alto a sinistra, denominata "Box", viene interpolata con 11 metodi di interpolazione differenti. L'immagine di partenza è formata da quadrati bianchi su sfondo grigio ma viene modificata in varie forme dal metodo di interpolazione. Alcuni metodi di interpolazione (qui denominati come Lanczos, Hamming, Blackman) modificano i livelli di grigio dell'immagine introducendo bande fittizie inesistenti nell'immagine di partenza.

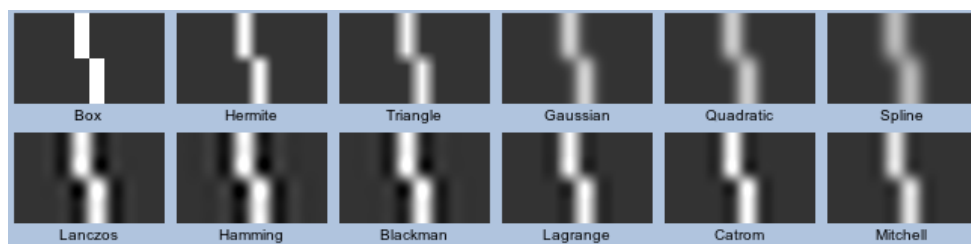


Figura 1.15

Immagini di tipo "Box" si creano nelle acquisizioni con sistema DIC quando gli speckle presenti nel pattern hanno dimensione tale da essere descritta da un unico pixel. In questo modo le caratteristiche del pattern a livello locale vengono totalmente perse nelle immagini acquisite e l'algoritmo di interpolazione, indispensabile per ottenere precisione sub-pixel, può generare distorsioni come quelle visibili in figura 1.15.

Tali distorsioni, se presenti nelle interpolazioni effettuate dal sistema DIC, portano a gravi errori nei risultati finali delle elaborazioni, con l'introduzione di deformazioni fittizie a carattere sinusoidale in provini anche scarichi (vedi 1.16).

La chiave per l'eliminazione dell'aliasing è la scelta accurata della dimensione degli speckle e la creazione di alto contrasto nel pattern stocastico applicato al provino in relazione alle caratteristiche ottiche del setup con cui viene condotta la prova.

Altri metodi per la riduzione degli errori dovuti all'interpolazione riguardano l'affinamento delle tecniche interpolatrici stesse, con l'introduzione di polinomi interpolanti di alto grado e l'implementazione di metodi non-lineari adattivi. (<http://correlatedsolutions.com/support/>)

In questo elaborato il fenomeno dell'aliasing verrà studiato in maniera approfondita e verranno proposte soluzioni per il recupero delle distribuzioni di deformazione affette da tale disturbo.

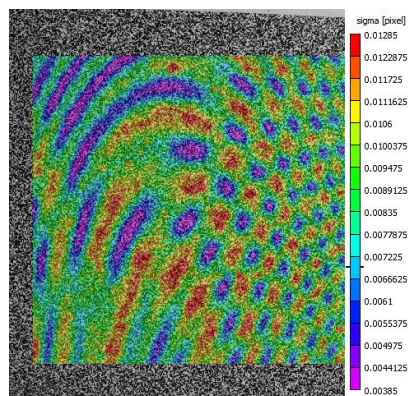


Figura 1.16: Fenomeno di Aliasing nella determinazione delle tensioni di un oggetto indeformato.

1.3.3 Altre fonti di errore

Fra le restanti cause di errore possiamo includere errori nel processo di calibrazione, errori nell'applicazione del pattern ed errori nella scelta dell'angolo di osservazione.

Per quanto riguarda il pattern le caratteristiche che questo deve avere sono omogeneità, casualità ed alto contrasto. Qualora una o più di queste caratteristiche non venga soddisfatta la misurazione effettuata risulta affetta da errore. Per evitare ciò lo sperimentatore deve avere il controllo su distribuzione e dimensione degli speckle. L'utilizzo di aerografi, in grado di spruzzare più o

meno finemente il colore, e di due vernici una bianca e l'altra nera permettono di avvicinarsi alle specifiche richieste per il pattern.

Le dimensioni degli speckle invece sono legate alla distanza dalla quale viene osservato l'oggetto e a come quest'ultimo viene ingrandito dalle camere. In generale la dimensioni di ogni speckle influisce sull'accuratezza della misura. Per osservare spostamenti inferiori al pixel dobbiamo avere speckle più grandi di un pixel. In questo modo a seguito di uno spostamento o di una deformazione il pixel in questione potrà modificare il tono di grigio che lo descrive e potranno essere evitati gli errori di interpolazione precedentemente descritti..

Capitolo 2

Materiali e metodi

2.1 Aramis

Per tutte le misurazioni effettuate in questo lavoro è stata adottata la strumentazione DIC denominata Aramis fornita da GOM mbH (<http://www.gom.com/>).

Lo strumento di misura è composto dalle seguenti attrezzature:

- due fotocamere da 5 mega-pixel con polarizzatore,
- 2 faretto LED dotati di polarizzatore;
- cavalletto di supporto per camere e luci;
- controller del sensore ottico (Trigger Box) e scheda di acquisizione;
- software di elaborazione Aramis v. 6.3;
- oggetti di calibrazione;

Il sensore è composto di chip fotosensibili CCD del tipo full frame 2/3 inch. La griglia del sensore ha una risoluzione 2448 x 2050 pixel e permette una frame rate di 15 Hz alla risoluzione massima. Il tempo di otturatore è regolabile fra 0,1 e 2 s. (cita gom 2011)

Le luci LED fornite di polarizzatore hanno la funzione di eliminare i riflessi dovuti all'illuminazione ambientale e massimizza il contrasto nelle immagini.

La scheda di acquisizione è dotata delle interfacce utili ad acquisire i dati in uscita dalle fotocamere. Sono presenti anche 8 canali analogici in ingresso e quattro in uscita per collegare lo strumento a macchine di prova o sensori esterni.

2.1.1 Il software di elaborazione

Il software di elaborazione dati Aramis v.6.3 crea l'ambiente all'interno del quale è possibile gestire le misurazioni. Tramite il software è possibile calibrare il sistema, acquisire i fotogrammi, elaborare i dati, filtrarli e graficarli. E' possibile anche effettuare l'esportazione dei dati elaborati in vari formati (.txt, .xls) oppure immettere fotogrammi creati in varie maniere al di fuori del programma. La natura commerciale del software lo rende abbastanza chiuso alle modifiche dell'utilizzatore che può apportare modifiche solo ad una ridotta quantità di parametri. La fase di calcolo è completamente inaccessibile per l'utente e non sono quindi noti i metodi matematici utilizzati da Aramis per il calcolo di spostamenti e deformazioni.

2.1.2 Prestazioni

Il sistema ha le prestazioni riassunte in tabella:

Finestra di misura	da 15 x12 a 5000 x 4550 mm
Sensore	CCD 2/3 inch
Risoluzione	2448 x 2050 pixel (5 Megapixel)
Frame rate	15 Hz 3D - 20 Hz 2D
Shutter time	da 0.1 ms a 2 s
Range di misura deformazioni	da 200 $\mu\epsilon$ a 10 ⁶ $\mu\epsilon$
Accuratezza misura deformazioni	fino a 0,01%
Ottiche (in dotazione)	17 mm e 50 mm
Primari di calibrazione	CQ 15 x 12 CP 2055 x 44 CP 20250 x 200

2.1.3 Calibrazione di Aramis

La calibrazione in Aramis avviene offline ed è eseguita tramite oggetti aventi caratteristiche geometriche note. Sul pannello di calibrazione sono riportati una serie di punti a formare una schacchiera. Alcuni punti in posizioni specifiche hanno una codifica che ne permette un riconoscimento preferenziale da parte del sistema. Registrando la posizione di questi punti ed operando trasformazioni fra sistemi di coordinate, il sistema è in grado di determinare i parametri intrinseci ed estrinseci utili alla determinazione dei coefficienti di triangolazione. Muovendo il primario in varie posizioni prestabilite dal sistema viene creato il volume di misura, ovvero la porzione di spazio tridimensionale all'interno del quale Aramis può distinguere e mettere a fuoco il pattern dell'oggetto in misura. Metodi così strutturati vengono definiti inversi.

Il processo di calibrazione va ripetuto prima di ogni misurazione se la posizione reciproca di volume di misura e camere è stata modificata.

Per effettuare la calibrazione il costruttore offre tre tipi diversi di pannelli. La scelta del pannello è legata alla finestra di misura che si intende monitorare. In base alla finestra di misura scelta cambiano anche le diverse grandezze che determinano la geometria del sistema: distanza fra le camere, angolo fra le camere e apertura del diaframma. Prima di dare inizio alla procedura di calibrazione devono essere settate messa a fuoco delle camere ed angoli di rotazione dei vari polarizzatori, nonché il posizionamento reciproco delle camere. Per facilitare quest'ultima funzione Aramis dispone di un puntatore laser integrato nel supporto delle camere.

Una volta messi a punto i posizionamenti delle camere è possibile iniziare la procedura iterativa (vedi 2.1) di calibrazione nell'apposito ambiente all'interno del software Aramis.

Una volta ultimata la procedura il software fornisce i risultati della stessa comunicando volume di misura effettivo, angolo fra le camere, temperatura ambiente e coefficiente di deviazione.

La temperatura ambiente viene introdotta dall'utente ed è utilizzata da Aramis per determinare i coefficienti di espansione termica dei materiali coinvolti nel procedimento di misura.

Affinchè il processo di calibrazione possa essere considerato soddisfa-

cente GOM fissa degli estremi per i valori del coefficiente di deviazione. In particolare quest'ultimo deve essere compreso fra 0,01 e 0,04 pixel. Il coefficiente di deviazione esprime l'incertezza con cui può essere determinata la posizione di un pixel nell'immagine. Una volta fissato un coefficiente di deviazione, maggiore è la finestra di misura maggiore è l'incertezza sugli spostamenti calcolati.

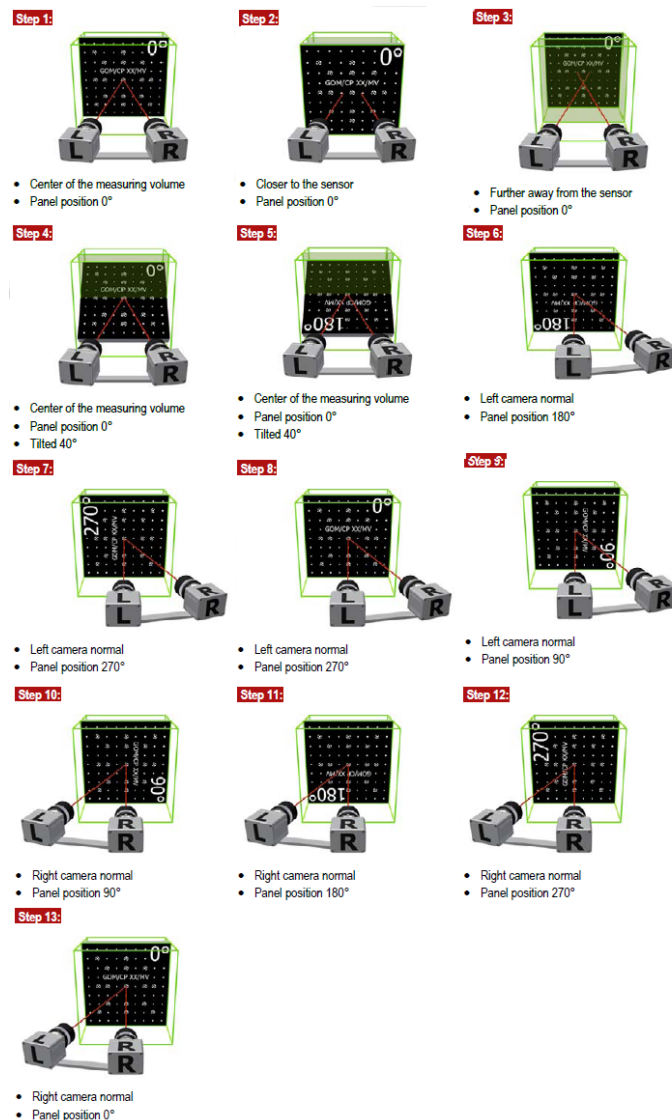


Figura 2.1: Elenco delle operazioni di calibrazione[7]

2.1.3.1 Funzionalità Aramis

In Aramis, come in tutti i sistemi DIC, l'utente ha il controllo su vari parametri e funzionalità operative.

Per primi vi sono i già ricordati *facet size* e *facet step*. Parametro direttamente collegato a questi due è il *facet field*. Con il termine *facet field* si intende l'area all'interno della quale sono disposte le varie *facets*. Questa può essere rettangolare, quadrata o di forma irregolare. La definizione del *facet field* è molto importante quando vengono studiati oggetti dalla forma irregolare o che non occupano l'intera immagine catturata dalle camere di Aramis: in questo modo è possibile restringere l'insieme di punti su cui il sistema effettua le elaborazioni, escludendo quelli di scarso interesse o che rischiano di generare errori di calcolo.

Un altro parametro regolabile dall'utente, che ha effetto sui tempi e sull'accuratezza del metodo, è la *computation size*: ovvero la finestra di punti adiacenti coinvolta nel calcolo delle deformazioni. Il valore di default è 3, ciò vuol dire che per calcolare la deformazione in un qualsiasi punto viene presa in esame una finestra di 9 punti centrata sullo stesso. Questo parametro è importante nel calcolo di deformazioni localizzate: se viene aumentato il rumore diminuisce ma gli effetti locali vengono sfumati e non possono essere apprezzati.[7]

La *validity quote* descrive in percentuale quanti punti adiacenti, compresi nella *computation size*, debbano esistere affinché il calcolo delle deformazioni possa avere luogo. Se la *validity quote*, ad esempio, è settata al 100%, tutti e 9 i punti della *computation window* 3 x 3 devono esistere per procedere al calcolo delle deformazioni in un punto.

2.2 Sistemi sperimentali per per la validazione

Oltre al sistema Aramis la realizzazione delle varie prove ha richiesto l'utilizzo di strumentazioni adatte alle esigenze specifiche di ogni esperimento.

2.2.1 Provino cilindrico

Per testare il sistema DIC su superfici non piane e verificare luminosità e contrasto delle immagini di tali superfici acquisite si è reso necessario l'utilizzo di un provino di forma cilindrica

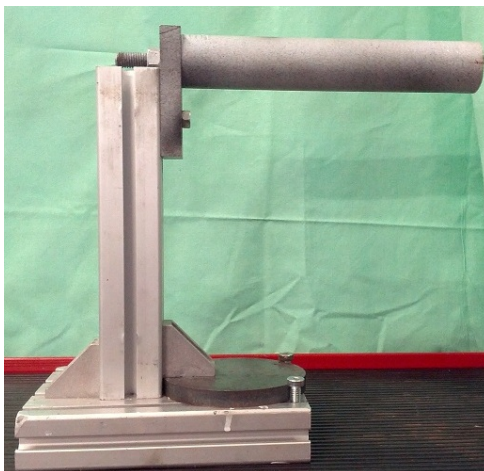


Figura 2.2: Provino cilindrico in alluminio utilizzato per validare le immagini di provini a superficie non piana acquisite dal sistema DIC.

Il provino cilindrico utilizzato è in alluminio. Presenta un foro di estremità tramite il quale viene avvitato ad un supporto anch'esso in alluminio. Su questo provino sono state eseguite prove in assenza di deformazione e spostamento.

Il provino è stato trattato in modo da creare sulla superficie un pattern stocastico omogeneo come raccomandato dal manuale di Aramis ([7]).

2.2.2 Trave a sbalzo

Le prove a sbalzo sono state eseguite su di una attrezzatura apposita, costituita da una barra di alluminio di sezione 100 x 5 mm, incastrata su di un supporto rigido. L'attrezzatura è stata pensata per creare un carico localizzato su una delle estremità della piastra. Ciò è possibile tramite un foro sull'asse di simmetria della piastra, a distanza nota dall'incastro, attraverso il quale passa un filo di nylon avente diametro 0,75 mm. Il filo, fissato alla barra tramite un rimando realizzato con una carrucola, è stato fissato ad una vite con

passo 1,25 mm. In tal modo avvitando e svitando la vite è possibile modulare il carico flettente (figura 2.4).

L'attrezzatura dispone anche di alloggiamenti scorrevoli in plexiglas per gli LVDT, posizionati sui profilati in alluminio che costituiscono il telaio della struttura.

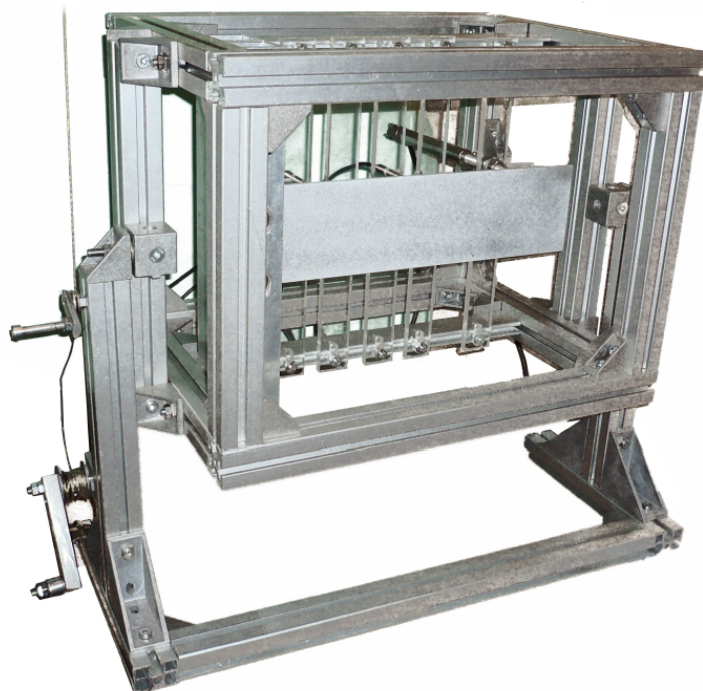


Figura 2.3: Struttura di carico per prove a sbalzo su barra in alluminio.

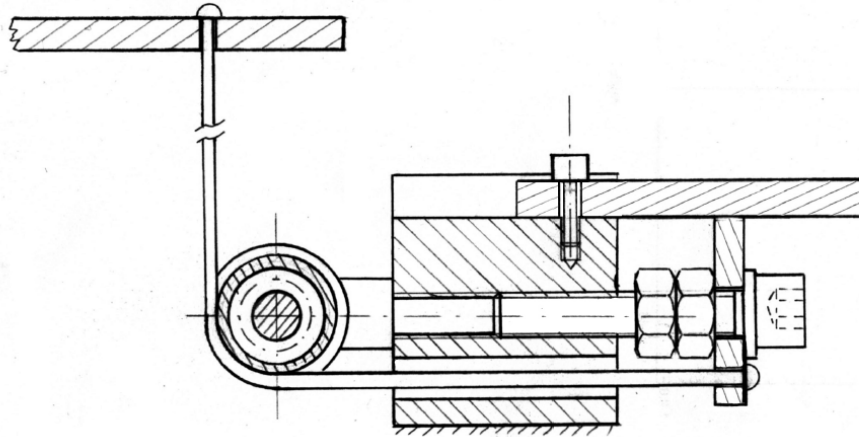


Figura 2.4: Sistema di carico trave a sbalzo

2.2.3 Provino PTFE

Per studiare il comportamento di Aramis su grandi deformazioni, è stato utilizzato un provino in PTFE (figura 2.5). Il provino è stato sagomato e forato con macchina a controllo numerico. I fori sono stati eseguiti per rendere possibile il vincolamento alle morse della macchina di prova. Per il serraggio sono state utilizzate delle strisce di carta vetrata in modo da massimizzare la presa fra morse e provino. Le dimensioni del provino sono state scelte in modo tale da avere un facet field quadrato di circa 50 mm di lato.

Il provino è stato poi portato allo spessore utile (7 mm) tramite fresa. Anche in questo caso la superficie è stata preparata con un pattern omogeneo come indicato sul manuale Aramis.

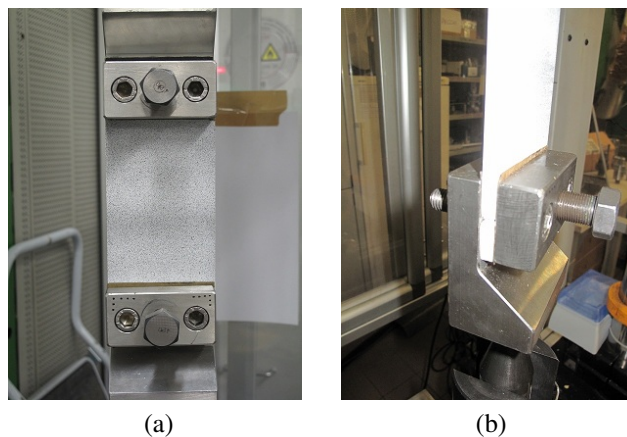


Figura 2.5: Provino in PTFE montato sulla macchina di prova.

2.3 Preparazione della superficie

Le superfici dei vari provini sono state preparate seguendo il protocollo interno al Laboratorio di Tecnologia Medica MMP 34 Rev.0 ([8]) ed i suggerimenti riportati nel manuale di Aramis. Il pattern stocastico è stato realizzato tramite un aerografo, utilizzando una vernice a base d'acqua per il fondo bianco (Aquamax Thinner, Max Mayer) ed una vernice acrilica per il nero (Base D.S. Cologross, Bologna, Italia)

2.4 Tecniche di filtraggio

Nello svolgimento di questo lavoro sono adottate più tecniche di filtraggio che derivano dall'immagine processing. Alcune sono state applicate alle immagini stesse, altre sono state trasportate sui dati finali in uscita da Aramis. Le immagini sono matrici di valori che vanno da 0 a 255 e rappresentano i vari toni di grigio dell'immagine. Le tecniche di filtraggio agiscono sia nel dominio spaziale che in quello in frequenza. Le informazioni nel dominio spaziale possono infatti essere codificate come la sovrapposizione di più armoniche composte da informazione di ampiezza e di fase.

2.4.1 Filtri nel dominio spaziale

I filtri nel dominio spaziale possono essere classificati in varie categorie. La distinzione più importante è fra filtri adattivi e non adattivi.

I filtri non adattivi, siano essi lineari o non lineari, sostituiscono al valore di grigio di un pixel il valore derivato dalla convoluzione con l'immagine di partenza di una maschera di grandezza definita a priori. La maschera individua una regione di prossimità che andrà ad incidere sul nuovo valore di intensità di grigio del pixel in ingresso. Tramite la convoluzione della maschera con l'immagine si va a trovare per ogni pixel un nuovo valore del livello di grigio. I filtri possono operare in modo lineare o non lineare calcolando una media, una media pesata o una mediana dei valori di grigio nell'intorno del pixel. Più la maschera è piccola, minore sarà l'invasività del filtro. Vengono detti anche filtri di regolarizzazione in quanto rimuovono i dettagli di minor peso rispetto alla grandezza della maschera stessa. I filtri si differenziano in base alla composizione della matrice di convoluzione. La forte controindicazione all'uso di questi filtri per ripulire le immagini da immettere in Aramis è la generale ed ingiustificata perdita di dettaglio e contrasto che generano.

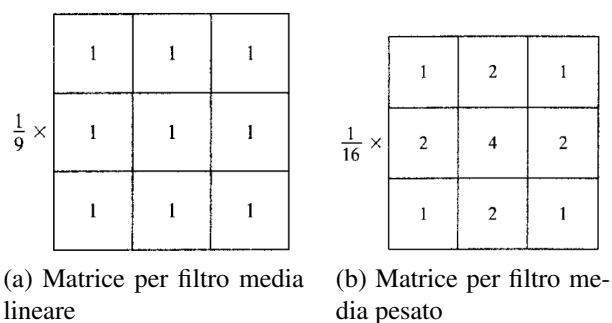


Figura 2.6: Due esempi di maschere per filtro media di dimensione 3x3.

Per quanto riguarda l'utilizzo di filtri adattivi, questi, grazie ad un algoritmo interno, riescono a valutare in che parte dell'immagine ed in che modo andare ad agire. Il filtro adattivo è indicato per riduzioni locali di rumore.

In particolare l'attenzione è stata posta sul filtro mediano adattivo. Questo, valutando il valore massimo, minimo e medio del livello di grigio nella maschera definita a priori, determina come impostare la strategia di filtraggio:

se indirizzarsi sulla rimozione di rumore impulsivo, eseguire uno smoothing di rumore non impulsivo o ridurre le distorsioni.

Il filtro in questione opera come i precedenti su di una finestra di dimensioni prestabilite S_{xy} centrata nel punto (x, y) che però può essere ingrandita a seconda delle condizioni di impiego.

Nell' algoritmo vengono calcolate le seguenti grandezze:

z_{min}	Valore minimo del livello di grigio in S_{xy}
z_{max}	Valore massimo del livello di grigio in S_{xy}
z_{med}	Valore medio del livello di grigio in S_{xy}
z_{xy}	Valore del livello di grigio in (x, y)
S_{max}	Dimensione massima consentita di S_{xy}

L' algoritmo del filtro mediano adattivo lavora su due livelli distinti denominati A e B.

Nel livello A abbiamo le seguenti operazioni:

1. Calcolo della quantità $A1 = z_{med} - z_{min}$;
2. Calcolo della quantità $A2 = z_{med} - z_{max}$;
3. In caso sia $A1 > 0$ e $A2 < 0$, passa al livello B;
4. Altrimenti aumenta le dimensioni della finestra S_{xy} lasciandola quadrata;
5. Se la dimensione della finestra è tale che $S_{xy} \leq S_{max}$ torna al punto (1.);
6. Altrimenti restituisci in output z_{xy} ;

Per il livello B valgono i seguenti passaggi:

1. Calcolo della quantità $B1 = z_{xy} - z_{min}$;
2. Calcolo della quantità $B2 = z_{xy} - z_{max}$;
3. In caso sia $B1 > 0$ e $B2 < 0$, restituisci come output z_{xy} ;
4. Altrimenti restituisci in output z_{med} ;

L'algoritmo può essere compreso facendo la premessa che il rumore impulsivo è la principale forma di rumore che il filtro vuole eliminare. Le quantità z_{min} e z_{max} sono considerate dall'algoritmo come le componenti a più probabile carattere impulsivo, anche se non sono i valori di minimo o massimo assunti dai toni di grigio nell'immagine. Il livello A funge quindi da mezzo sia per calcolare la mediana all'interno della finestra considerata che per valutare se tale valore sia considerabile di tipo impulsivo. Se il valore mediano calcolato è intermedio a z_{min} e z_{max} allora z_{med} non è una componente impulsiva. Una volta raggiunto questo risultato è possibile passare al livello B che stabilisce se il punto centrale della finestra considerata S_{xy} sia lui stesso una componente di rumore impulsivo. Viene effettuato su quest'ultimo valore il medesimo controllo eseguito nel livello A per z_{med} . Se anche tale condizione viene soddisfatta, l'algoritmo fornisce in output il valore non modificato z_{xy} . Se la condizione su z_{xy} non viene soddisfatta l'algoritmo fornisce in output il valore z_{med} che, nel calcolo del livello A, ha dimostrato la sua non impulsività. Quest'ultima operazione è ciò che il filtro mediano non-adattivo farebbe per ogni pixel: questo spiega il perchè della ingiustificata perdita di dettaglio dovuta ai filtri non adattivi.

Tornando all'algoritmo adattivo invece, se nel livello A non viene soddisfatta la condizione in (3.) si procede con l'ingrandimento della finestra con cui viene ispezionata l'immagine. Il loop continua fino a che non si trova o un valore della mediana che possa non considerarsi impulsivo o fino a che le dimensioni della finestra non coincidono con l'immagine ispezionata. Se si verifica l'ultimo caso l'algoritmo restituisce in output il valore di partenza z_{xy} . Ogni volta che l'algoritmo restituisce un valore, il centro della finestra di calcolo si muove al pixel adiacente ed il calcolo comincia di nuovo.

2.4.2 Trasformata di Fourier e filtri nel dominio di frequenza

Le tecniche di filtraggio più potenti non operano nel dominio spaziale, ma in quello delle frequenze. Con questo approccio, problemi molto complessi di separazione fra rumore e informazione nel dominio spaziale sono risolti con facilità nel dominio delle frequenze. Lo strumento che permette il passaggio

fra queste due forme di rappresentazione dell'informazione è la trasformata di Fourier.

Il matematico francese Jean Baptiste Joseph Fourier fu infatti il primo a capire l'importanza del dominio di frequenza nella rappresentazione di funzioni matematiche. Dimostrò infatti la scomponibilità di qualsiasi funzione periodica nella somma di una serie funzioni seno e coseno, ciascuna premoltiplicata da un particolare coefficiente. Anche le funzioni più complesse, purchè periodiche e soddisfacenti poche altre condizioni di regolarità, possono essere decomposte in questa maniera. Tale somma viene denominata serie di Fourier.

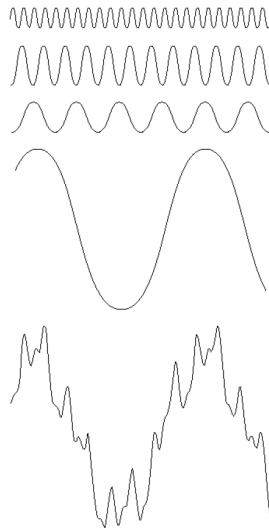


Figura 2.7: Esempio di composizione di un segnale monodimensionale complesso in più funzioni periodiche.

L'idea iniziale venne poi ripresa ed ampliata ad altri casi. In particolare la precedente ipotesi di scomponibilità può venire allargata anche alle funzioni non periodiche, ma che sottendano un'area finita. In questo caso le funzioni possono essere scomposte come l'integrale di seni e coseni premoltiplicati per funzioni pesate. Nasce così la trasformata di Fourier che è una espansione del precedente concetto di serie di Fourier. Entrambe le rappresentazioni matematiche condividono un punto fondamentale: una funzione così scomposta può essere riportata al suo stato originale senza perdere alcuna informazione.

La formulazione matematica della trasformata di Fourier per funzioni monodimensionali è la seguente:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i2\pi ux} dx \quad (2.1)$$

Per la trasformata inversa invece vale la:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{i2\pi ux} du \quad (2.2)$$

Il concetto può essere esteso a funzioni bidimensionali:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y)e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2.3)$$

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v)e^{i2\pi(ux+vy)} du dv \quad (2.4)$$

Negli anni '50 dello scorso secolo vi fu poi il passo finale dello sviluppo della teoria di Fourier. Tramite l'avvento della digitalizzazione venne introdotta l'algoritmo Fast Fourier Transform (FFT). Proprio quest'ultimo è alla base delle tecniche di filtraggio di nostro interesse. Esso si basa sul calcolo della Discrete Fourier Transform (DFT) che applica i concetti delle trasformate di Fourier a funzioni discrete, non continue. I segnali digitali non sono altro che segnali discreti, e le immagini o i dati in uscita da un sistema di misura come Aramis si prestano alla processazione con questo strumento.

Per una funzione bidimensionale discreta $f(x, y)$ di dimensioni $M \times N$ valgono quindi le seguenti formule:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)e^{-i2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2.5)$$

con $u = 0, 1, \dots, M - 1$ e $v = 0, 1, \dots, N - 1$;

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{-i2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2.6)$$

con $x = 0, 1, \dots, M - 1$ e $y = 0, 1, \dots, N - 1$;

Possono essere a questo punto definiti lo spettro di Fourier, l'angolo di fase e lo spettro in ampiezza come segue:

$$|F(u,v)| = [R^2(u,v) + I^2(u,v)]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\phi(u,v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u,v)}{R(u,v)} \right] \quad (2.8)$$

$$P(u,v) = |F(u,v)|^2 \quad (2.9)$$

Dove $R(u,v)$ e $I(u,v)$ sono le parti reale ed immaginaria di $F(u,v)$

Solitamente nella rappresentazione dello spettro di ampiezza viene operata una trasformazione di coordinate in modo da portare l'origine $F(0,0)$ al centro della griglia $M \times N$. Il centro dello spettro di ampiezza sarà quindi posizionato in $(M/2, N/2)$. L'operazione è ottenuta moltiplicando la funzione bidimensionale discreta in ingresso per $(-1)^{x+y}$.

Una importante conseguenza di questo cambio di coordinate è il valore assunto dalla trasformata in $(0,0)$. Dall'equazione (4) infatti si ha sostituendo:

$$F(0,0) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \quad (2.10)$$

La (15) non è altro che l'equazione del valor medio degli elementi costituenti la funzione discreta. Nel caso la funzione in esame sia una immagine in bianco e nero questo equivale al valor medio dei toni di grigio.

Altra conseguenza della premoltiplicazione prima descritta è il nuovo ordine che assumono le varie frequenze nella rappresentazione dello spettro di Fourier. Partendo dal centro della griglia $M \times N$ abbiamo, andando verso i bordi della griglia, punti che descrivono la presenza di sinusoidi a frequenza crescente nella funzione originaria. Ciò è ben rappresentato in figura 2.8.

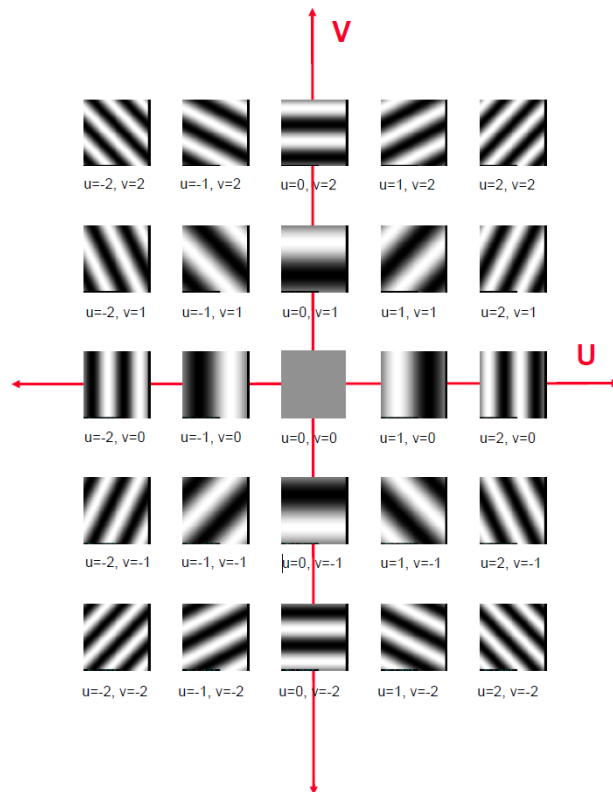


Figura 2.8: Posizionamento armoniche nello spettro di Fourier.

L'altra operazione che viene spesso compiuta sulle rappresentazioni degli spettri di Fourier è quella di accentuare tramite una trasformazione logaritmica la presenza delle frequenze più alte. Queste ultime infatti hanno un peso molto minore rispetto alle basse frequenze in quanto descrivono piccoli particolari e contorni di figure dell'immagine di partenza.

In particolare per le immagini le varietà di spettri di Fourier sono molteplici. La posizione di vertici e particolari di vario genere nel dominio spaziale ha un effetto diretto nel dominio in frequenza. Alcuni esempi sono riportati in figura 2.9.

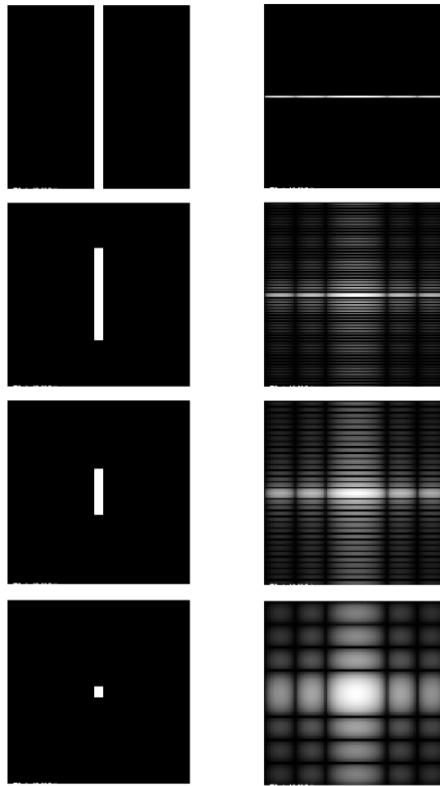


Figura 2.9: Alcuni esempi di spettri di Fourier. Sulla sinistra le immagini originali nel dominio spaziale.

La trasformata di Fourier ha numerose interessanti proprietà che permettono di semplificare i problemi di filtraggio e rendere possibile l'eliminazione di difetti dalle immagini. In particolare abbiamo:

- Simmetria rispetto all'origine dello spettro di Fourier: grazie a questa proprietà i filtri in frequenza sono a loro volta simmetrici, spesso circolari e di semplice implementazione.
- Separabilità: calcolare una trasformata di Fourier 2D equivale a calcolare due trasformate monodimensionali in successione. Questo diminuisce fortemente il costo computazionale della trasformata 2D.
- Teorema di convoluzione: afferma che all'operazione di convoluzione nel dominio spaziale corrisponde la moltiplicazione nel dominio in frequenza e viceversa. Questo è utile per l'applicazione di filtri di im-

immagine: se la convoluzione regolava le operazioni di filtraggio nel dominio spaziale (con forte costo computazionale), passando al dominio in frequenza il filtraggio si riduce ad una moltiplicazione fra matrici.

2.4.2.1 Filtri nel dominio di frequenza utilizzati.

I filtri nel dominio in frequenza non fanno altro che lasciare passare alcune frequenze e bloccarne altre. Vengono applicati allo spettro di Fourier, $F(u,v)$.

Le fasi del filtraggio in frequenza nell'immagine processing possono essere riassunte come segue

1. Moltiplicare l'immagine in ingresso per $(-1)^{x+y}$, per centrare la trasformata;
2. Calcolare $F(u,v)$, ovvero la DFT dell'immagine ottenuta in 1. ;
3. Moltiplicare $F(u,v)$ per la funzione filtro $H(u,v)$;
4. Calcolare DFT inversa di 3. ;
5. Prendere la parte reale di 4. ;
6. Moltiplicare l'immagine di 5. per $(-1)^{x+y}$.

Le funzioni filtro $H(u,v)$ sono descritte da equazioni dette funzioni di trasferimento. Queste funzioni bidimensionali sono descritte su una griglia $M \times N$ delle stesse dimensioni dello spettro di Fourier da filtrare. Le funzioni di trasferimento hanno valori che vanno da 0 ad 1. Nei punti in cui valgono 0 le frequenze corrispondenti dello spettro filtrato vengono annullate, dove il valore è 1 le frequenze rimangono inalterate.

I due principali filtri usati in questa trattazione sono i seguenti:

2.4.2.1.1 Filtro passa-basso Gaussiano Il filtro ha una funzione di trasferimento del tipo:

$$H(u,v) = e^{-D^2(u,v)/2D_0^2} \quad (2.11)$$

dove D_0 è la frequenza di cut-off ovvero quella alla quale il filtro inizia a lavorare. Il filtro è detto gaussiano poichè la forma tridimensionale creata è regolata dall'equazione della funzione di Gauss. I grafici descrittivi della funzione di trasferimento sono riportati in figura 2.10.

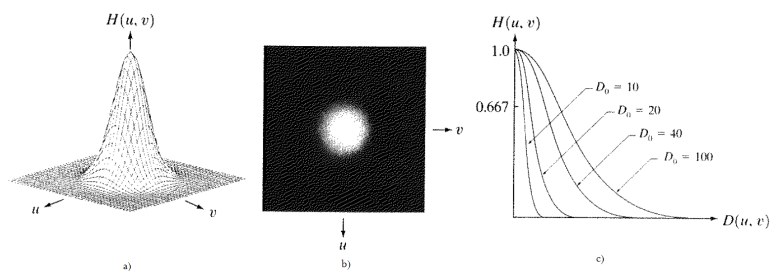


Figura 2.10: a) Grafico 3D della funzione di trasferimento gaussiana passa-basso. b) Funzione di trasferimento gaussiana vista come una immagine. c) Sezione radiale del filtro per vari valori di D_0 . [2]

L'effetto del filtro passa-basso gaussiano è quello di rimuovere le alte frequenze nello spettro di Fourier trattato. L'andamento della campana è tale da sfumare la transizione fra frequenze filtrate e non, in modo da creare le minori distorsioni nella funzione bidimensionale filtrata.

2.4.2.1.2 Filtro Notch Reject Gaussiano Vengono definiti Notch quei filtri che bloccano o permettono il passaggio solo di un gruppo frequenze attorno ad una frequenza centrale. Vista la simmetria dello spettro di Fourier, i filtri Notch appaiono loro stessi come simmetrici rispetto all'origine. I filtri Notch di nostro interesse sono detti Reject in quanto bloccano alcune frequenze mentre lasciano passare le altre. In figura 2.11 sono riportati i plot 3D dei 3 tipi di filtro Notch Reject.

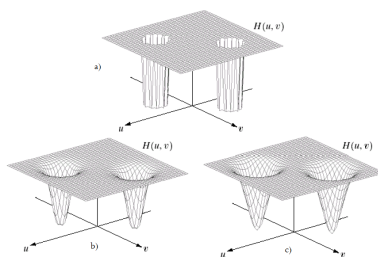


Figura 2.11: a) Andamento filtro Notch Reject ideale. b) Andamento filtro Notch Reject Butterworth (del secondo ordine). c) Andamento Filtro Notch Reject gaussiano [2]

Anche per questo tipo di filtri l'andamento più affine alle esigenze della trattazione è quello del filtro gaussiano.

Il sistema di equazioni di trasferimento che descrive il filtro Noth Reject gaussiano è il seguente:

$$\begin{cases} H(u, v) = 1 - e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{D_1(u, v) D_2(u, v)}{D_0^2} \right]} \\ D_1(u, v) = [(u - M/2 - u_0)^2 + (v - N/2 - v_0)^2]^{\frac{1}{2}} \\ D_2(u, v) = [(u - M/2 + u_0)^2 + (v - N/2 + v_0)^2]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2.12)$$

Con (u_0, v_0) posizione della frequenza da abbattere e D_0 raggio di azione del filtro stesso.

Questi tipi di filtri sono indicati per la rimozione di rumore periodico.

2.5 Sommario attività trattate

Nel presente elaborato verranno affrontate le problematiche della riduzione del rumore di misura nelle deformazioni determinate tramite DIC.

Le cause di tale rumore verranno indagate. Verranno inoltre proposte e valutate varie strategie di filtraggio delle immagini in ingresso al sistema DIC e delle distribuzioni di deformazione determinate sperimentalmente.

L'attività sperimentale affrontata può essere suddivisa in tre gruppi principali:

- Filtraggio nel dominio spaziale e nel dominio delle frequenze spaziali delle immagini in ingresso al sistema DIC;
- Filtraggio nel dominio delle frequenze spaziali delle distribuzioni di deformazione determinate dal sistema DIC;
- Filtraggio nel dominio temporale delle immagini in ingresso e delle distribuzioni di deformazioni determinate dal sistema DIC.

Tramite gli strumenti descritti precedentemente verranno valutati i pro e i contro di ciascuna strategia proposta e sviluppati i metodi per un migliore utilizzo delle stesse.

Capitolo 3

Riduzione del rumore di misura tramite filtraggio delle immagini in ingresso

Nella prima parte della attività sperimentale effettuata è stata verificata l'efficacia delle tecniche di image processing applicate alle immagini create da Aramis, in modo da valutare se queste portino ad una diminuzione del rumore di misura nelle deformazioni calcolate.

Le prove sono state condotte sul provino di forma cilindrica (2.2.1) in modo da trattare immagini di superfici con raggio di curvatura diverso da zero.

Gli obiettivi di questa prima parte sono:

1. Valutare il limite inferiore del rumore di misura su risultati di deformazione dipendente dal solo algoritmo;
2. Valutare l'efficacia dei filtri di immagine adattivi nella rimozione del rumore di misura da risultati di deformazione;
3. Valutare l'efficacia di filtri Notch applicati alle immagini usate per la tecnica DIC, nella rimozione del rumore di misura da risultati di deformazione;

3.1 Valutazione del rumore di misura causato dall' algoritmo

3.1.1 Materiali e metodi

La prova consiste nell'inserire una serie di 15 stages costituiti dalle stesse due immagini destre e sinistre ripetute 15 volte. Così facendo viene creata una situazione ideale per il calcolo delle deformazioni con immagini che non differiscono l'una dall'altra. In questo modo è possibile anche mettere in luce i limiti dell'algoritmo di correlazione di Aramis che viene spinto al limite inferiore della capacità di calcolo. Le due immagini scelte riprendono il provino cilindrico di figura 3.1 indeformato.

I dati vengono esportati e ne viene calcolato RMSE e deviazione standard.

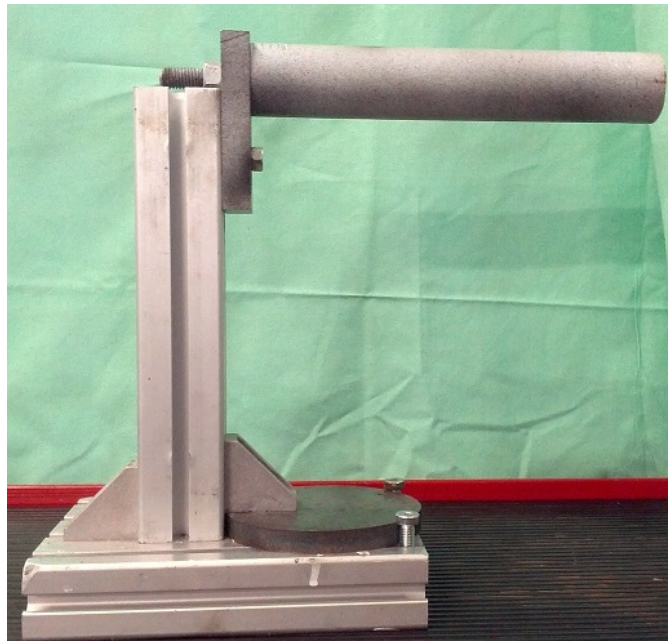


Figura 3.1: Provino cilindrico utilizzato per le misurazioni. Il provino è stato osservato in assenza di deformazioni.

3.1.2 Risultati

I risultati di Eps X di ogni punto del facet-field relativo allo stage 15, sono riportati in figura 3.2. Osservando il grafico è possibile notare sia come la maggioranza dei punti abbia deformazione pressochè nulla (circa $10^{-2}\mu\epsilon$) che la presenza di punti a deformazione elevatissima (fino a $10^4\mu\epsilon$). La premessa è fondamentale per comprendere i dati di RMSE che sono presentati nel seguito.

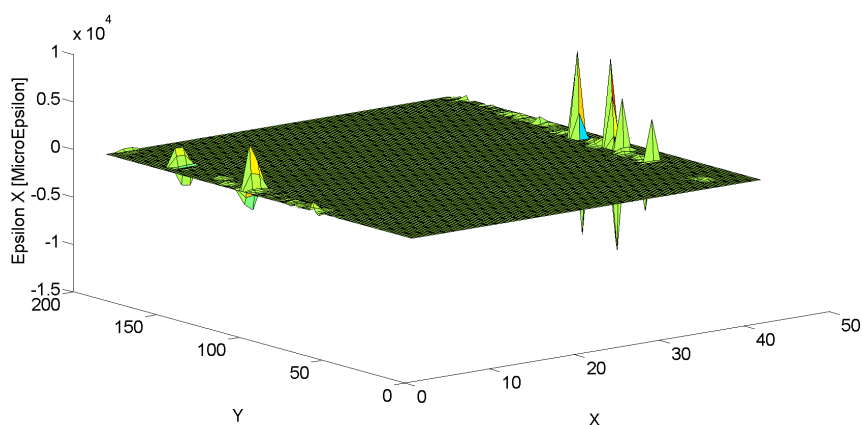
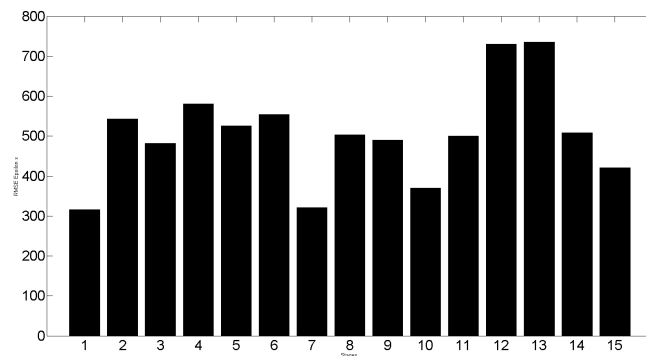
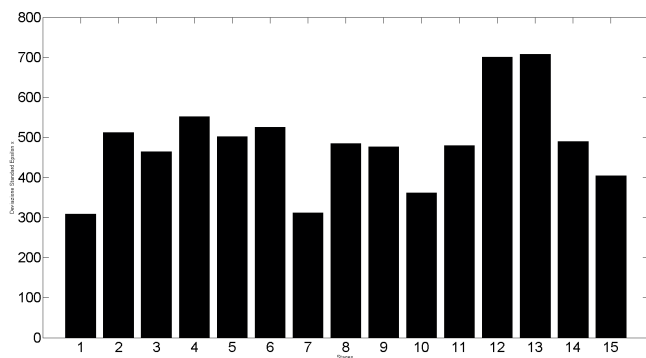


Figura 3.2

In figura 3.3 è riportato l'andamento di RMSE e deviazione standard di ϵ_x fra i vari stages. Si nota subito come i valori di RMSE coincidano con quelli di deviazione standard: valore medio e fluttuazione della misura coincidono.



(a) Andamento RMSE ϵ_x



(b) Andamento deviazione standard ϵ_x

Figura 3.3: Istogrammi rappresentanti l'andamento di RMSE rispetto al valore nominale e deviazione standard nei dati misurati.

3.1.3 Conclusioni

Da questa prova emerge come l'algoritmo di Aramis soffra nel campo delle deformazioni molto piccole. Come conseguenza alcuni risultati perdono di senso fisico. L'esperimento dimostra anche come vi sia un errore introdotto dall'algoritmo, che non può essere eliminato in nessun modo se non con un filtraggio a valle dei dati in uscita.

3.2 Filtraggio delle immagini nel dominio spaziale

In questa prova viene valutata l'efficacia del filtro mediano adattivo nella rimozione di rumore impulsivo locale dalle immagini. La tecnica opera nel dominio spaziale, ovvero il filtraggio è effettuato sul valore del livello di grigio dei pixel che compongono l'immagine.

3.2.1 Materiali e metodi

Il provino cilindrico (figura 3.1) è stato ripreso in condizioni statiche utilizzando una finestra di misura di 250 x 210 mm utilizzando le ottiche da 50 mm. In fase di elaborazione dati è stata creata una maschera di calcolo in modo che il facet field fosse creato escludendo i punti vicini al bordo del provino. Questo per evitare la creazione di facet in punti ad illuminazione scarsa che possono creare distorsioni nella creazione delle facet da parte del sistema.

La prova così condotta è stata elaborata con i seguenti parametri del software:

- Facet size: 28 x 28;
- Facet step: 12 x 12;
- computation size: 5;
- Validity quote: 80%

Le immagini utilizzate in questa prima prova sono state esportate, insieme al file contenente i parametri di calibrazione del sistema ottico.

Le immagini esportate sono state in seguito elaborate con il software MATLAB©. In particolare è stato applicato alle immagini un filtro mediano adattivo avente finestra di convoluzione 3x3, in modo da ridurre al minimo effetti di perdita di contrasto generalizzati ma tale da impattare localmente su eventuali fenomeni di disturbo presenti nell'immagine.

Le immagini così trattate sono state reinserite in Aramis sotto forma di un nuovo progetto, insieme al file di calibrazione precedentemente esportato. Il nuovo progetto così creato è stato elaborato mantenendo i parametri del software utilizzati per la prima parte del lavoro.

3.2.2 Risultati

Le deformazioni apparenti su provino indeformato calcolate da Aramis con immagini filtrate e non, sono state valutate calcolando la radice dell'errore quadratico medio di ciascuno stage rispetto alla deformazione reale nulla applicata al provino secondo la formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=m}^m (\epsilon_{x,ARAMIS_{i,j}} - \epsilon_{x,real_{i,j}})^2}$$

Prendendo ad esempio i valori di RMSE per le ϵ_x abbiamo i seguenti risultati:

Stage	$RMSE(\epsilon_x)$ pre-filtraggio [$\mu\epsilon$]	$RMSE(\epsilon_x)$ post-filtraggio [$\mu\epsilon$]
1	225	357
2	218	338
3	231	366

3.2.3 Conclusioni

Dai dati di RMSE prima riportati si ricava come il filtraggio spaziale tramite filtro mediano adattivo non porti miglioramento ai risultati di deformazione trovati, ma anzi peggiori le condizioni di calcolo per l'algoritmo DIC. Questo è dovuto alla inevitabile perdita di contrasto che si registra nelle immagini con qualsiasi tecnica di filtraggio spaziale.

Poichè il filtro mediano adattivo con maschera di convoluzione 3 x 3 rappresenta una delle tecniche di filtraggio nel dominio spaziale meno invasive, i risultati suggeriscono di cambiare approccio al problema. I filtri d'immagine nel dominio spaziale vengono abbandonati e si passa ad esplorare quelli nel dominio delle frequenze.

3.3 Filtraggio delle immagini nel dominio delle frequenze spaziali

In questa sezione viene studiato l'effetto sulle immagini del filtraggio in frequenza. In particolare è stata posta l'attenzione sui filtri Notch reject gaussiani che rimuovono il rumore lavorando localmente nello spettro di Fourier. Sono stati tralasciati altri filtri, come quelli passa-basso, che hanno un impatto più generalizzato sullo spettro ed hanno come controindicazione la perdita di contrasto nell'immagine filtrata.

3.3.1 Materiali e metodi

La prova si è svolta prendendo in esame il provino dell'esperimento precedente. Il provino è stato ripreso in assenza di spostamento e deformazione. Sono stati scattati 15 frames che sono stati elaborati usando i seguenti parametri del software:

- Facet size: 28 x 28;
- Facet step: 12 x 12;
- computation size: 5;
- Validity quote: 80%

Una volta salvati i risultati dell'elaborazione, le immagini sono state esportate insieme al file di calibrazione della prova.

Le immagini sono state processate tramite un algoritmo elaborato con MATLAB©. Per ogni immagine è stato trovato lo spettro di Fourier delle ampiezze per le coordinate spaziali, al quale successivamente è stata applicata una trasformazione logaritmica per evidenziare i contributi delle alte frequenze: in questo modo è possibile esaminare visivamente l'evoluzione dello spettro di Fourier nei vari frames. Poiché l'algoritmo di calcolo raffronta ciascuna immagine con quella considerata di riferimento (nel caso specifico la prima), lo stesso raffronto è stato operato per gli spettri di Fourier. Nella

prova in esame non vi erano nè spostamenti nè deformazioni, quindi gli unici fattori in grado di spiegare le eventuali differenze erano da ricercare nei disturbi presenti al momento dell'acquisizione delle immagini con Aramis.

Andando a sottrarre gli spettri di Fourier in ampiezza di ciascuna immagine con quello dell'immagine di riferimento è stata creata una serie di immagini in grado di indicare la posizione delle frequenze dei disturbi.

La serie di immagini così ottenuta mostra una regolarità nel posizionamento dei picchi di rumore. In figura 3.4 sono riportate 3 delle immagini create. Si nota la ricorrenza nella spaziatura dei picchi di rumore ed il loro incremento in numero con il progredire dell'acquisizione dei frames. Questa caratteristica può essere spiegata ricollegandosi al fenomeno del thermal noise, tipico dei sensori CCD. L'aumento della temperatura collegato al riscaldamento delle fotocamere incrementa il rumore nelle immagini. In figura 3.5 è riportato lo spettro di Fourier in ampiezza del thermal frame di una delle telecamere di Aramis: l'immagine è scattata senza fare entrare luce nelle telecamere (ad ottiche tappate) e l'informazione che vi si legge è dovuta al solo riscaldamento del sensore.

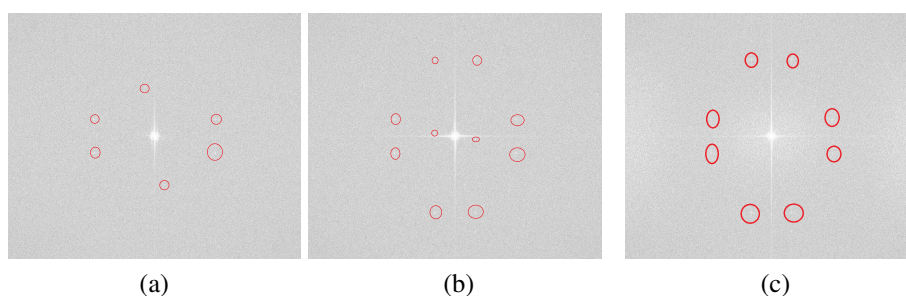


Figura 3.4: Risultati della sottrazione fra spettri.(3.4a)Differenza fra stage 1 e frame di riferimento.(3.4b)Differenza fra stage 5 e frame di riferimento.(3.4c)Differenza fra stage 9 e frame di riferimento.

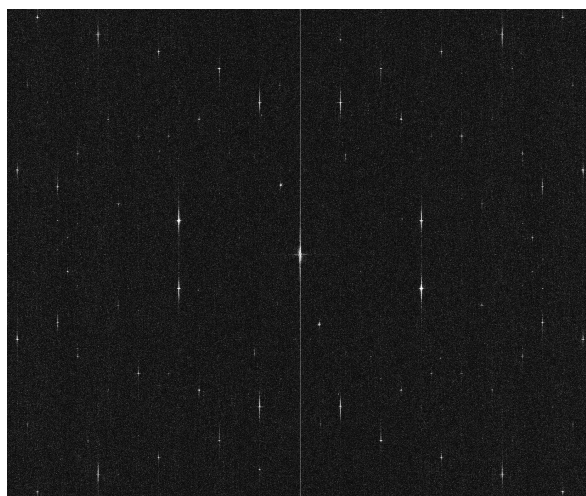


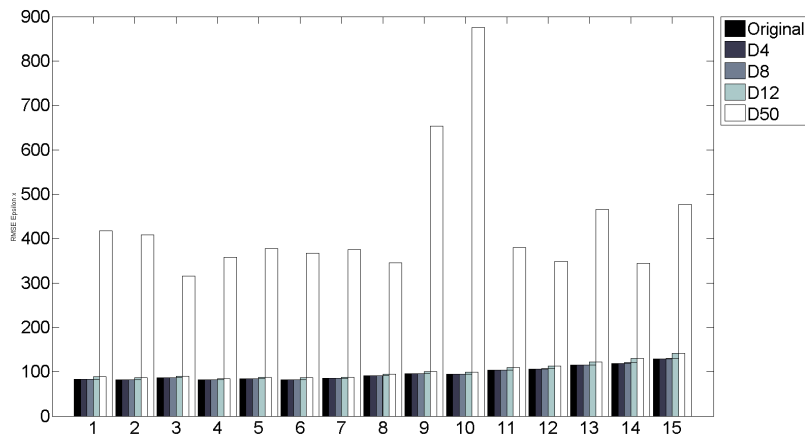
Figura 3.5: Spettro di Fourier del thermal frame ricavato per la fotocamera sinistra di Aramis tappata.

In base a questa regolarità di differenziazione delle immagini è possibile creare un filtro Notch gaussiano che sopprima le frequenze portatrici di rumore.

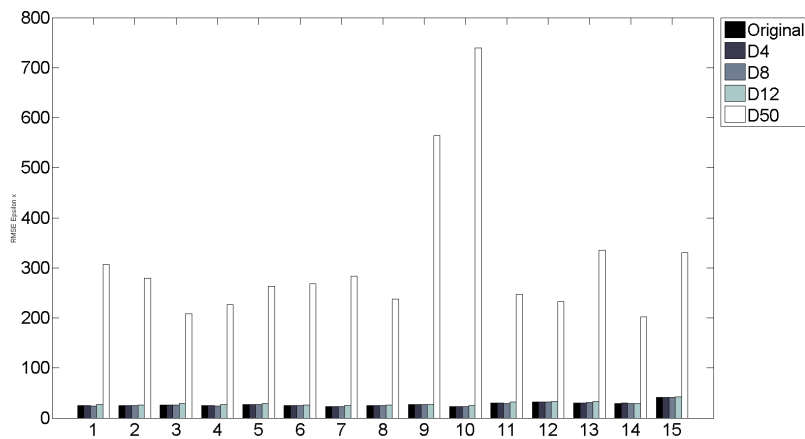
Le immagini così filtrate sono state reimmesse in Aramis e sono state elaborate nuovamente. Sono state eseguite più prove con diametro di applicazione del filtro via via crescente, partendo da 4 pixels di diametro.

3.3.2 Risultati

Diagrammando i valori di RMSE e della deviazione standard nei vari stages al variare del diametro del filtro Notch applicato, otteniamo i risultati di figura 3.6:



(a) Andamento RMSE sulle ϵ_x nei vari stages



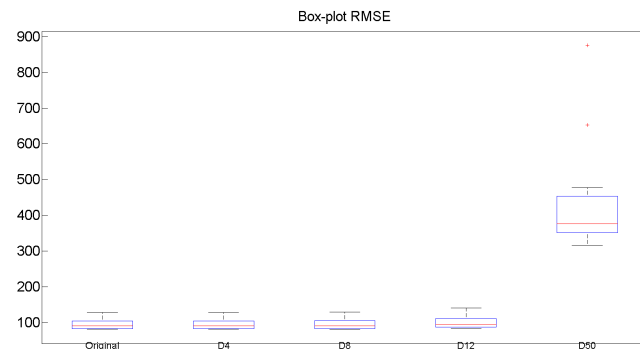
(b) Andamento deviazione standard sulle ϵ_x nei vari stages

Figura 3.6

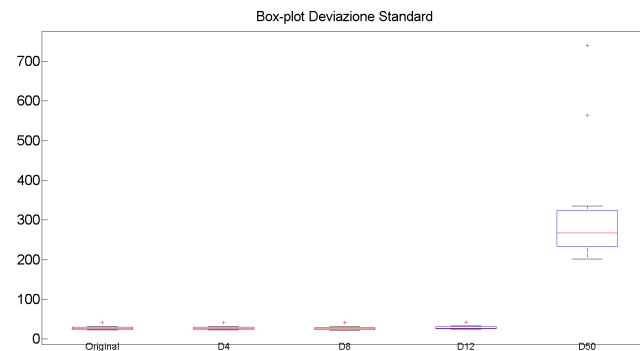
I valori di RMSE non differiscono di molto fra di loro fra prova filtrata e non per diametro del filtro fino a 12 pixel. I valori di deviazione standard a loro volta non sembrano particolarmente significativi in quell'intervallo di valori. Da una prima osservazione dei risultati si deduce una sostanziale inefficacia del filtro per piccoli diametri fino a passare al deterioramento dei risultati per alti valori di diametro. L'applicazione di un filtro con diametro

100 px ha portato alla decorrelazione delle immagini e non è stata riportata nel riassunto dei risultati.

In figura 3.7 sono riportati i grafici a scatola e baffi di RMSE rispetto al valore nominale di $0 \mu\epsilon$ e deviazione standard per le ϵ_x .



(a)



(b)

Figura 3.7: Diagrammi a scatola e baffi di RMSE e deviazione standard. Il primo è un indice di quanto la misura si discosti dal valore nominale di $0 \mu\epsilon$, il secondo descrive la dispersione della misura nei dati presi in esame.

3.3.3 Conclusioni

Il filtraggio in frequenza delle immagini da inserire in Aramis non sortisce alcun effetto degno di nota nella riduzione del rumore di misura. Questo per-

chè è possibile intervenire solo su di un numero limitato di frequenze con filtri Notch reject. Il peso di queste frequenze è per altro molto piccolo nella formazione delle immagini finali. Aumentare il numero di frequenze su cui si interviene, ad esempio con l'ingrandimento del diametro di filtraggio, porta alla perdita di particolare nell'immagine e alla decorrelazione da parte del sistema di misura DIC. Questo aspetto scoraggia anche dall'intraprendere lo studio dell'effetto di filtri passa-basso che finirebbero solo per togliere contrasto e danneggiare ancor di più le immagini. Il miglioramento delle immagini in ingresso può essere quindi conseguito solo migliorando le condizioni di illuminazione dei provini e le caratteristiche del pattern inquadrato, e non tramite tecniche di processazione d'immagine.

Capitolo 4

Riduzione del rumore di misura tramite filtraggio in frequenza delle distribuzioni di deformazione in uscita.

La seconda parte dell'attività si pone come obiettivo l'implementazione di filtri per eliminare il rumore di misura sulle distribuzioni di deformazione in uscita dal sistema DIC. In particolare si vuole valutare l'efficacia di strategie di filtraggio delle deformazioni nel dominio delle frequenze. I filtri nel dominio spaziale sono stati tralasciati in questa trattazione in quanto già implementati nel software Aramis e trattati in altri elaborati ([9]).

Inizialmente vengono effettuate delle prove per comprendere come lo spettro di Fourier si evolva modificando i parametri di elaborazione del software, la tipologia delle sollecitazioni applicate all'oggetto in misura e l'intensità delle stesse.

Successivamente le informazioni raccolte tramite queste prove vengono utilizzate per elaborare la strategia di filtraggio che meglio si adatti alle esigenze. Vengono pertanto valutati filtri Notch e filtri passa-basso di diverse forme e aventi diverse funzioni di trasferimento.

4.1 Relazione fra tipo di sollecitazione applicata e spettro di Fourier delle deformazioni

In questa prima prova si è cercato di capire come si presenti e si modifichi lo spettro di Fourier delle distribuzioni di deformazione qualora al sistema di misurazione DIC siano sottoposte differenti situazioni di deformazione e spostamento. In questo momento non è oggetto di interesse l'intensità delle sollecitazioni ma soltanto il gradiente di deformazioni reali o apparenti creato. L'analisi dei risultati è pertanto principalmente qualitativa.

4.1.1 Materiali e metodi

Per questo esperimento è stata utilizzata l'attrezzatura per prove a flessione su lastra di alluminio piana descritta in 2.2.2. La comodità di utilizzo dell'attrezzatura e la situazione di carico stabile ottenibile con essa sono state le principali cause della scelta.

Sono stati quindi acquisiti:

1. 20 frames con provino fermo ed indeformato;
2. 21 frames con provino fermo e deformato;
3. 20 frames con provino deformato e spostato;

Per quanto riguarda la fase di elaborazione delle immagini così acquisite, il frame di riferimento è stato scelto nel secondo gruppo di immagini. Per l'elaborazione con Aramis, le immagini di spostamenti e deformazioni sono state così distribuite:

- A)** 20 frames con spostamento nullo e deformazione non nulla (provenienti da 1.);
- B)** 1 frame di riferimento (proveniente da 2.);
- C)** 20 frames con spostamento nullo e deformazione nulla (anch'essi provenienti da dal gruppo 2.);

D) 20 frames con spostamento non nullo e deformazione nulla (provenienti da 3.);

In questo modo è possibile valutare separatamente gli effetti di ciascuna sollecitazione (che sia uno spostamento o una deformazione) sulle frequenze spaziali del rumore.

Lo spostamento del provino è avvenuto in maniera tale da mantenere costante la distanza fra piani ottici delle camere e provino stesso. Il provino è stato spostato di 50 mm, parallelamente al piano ottico delle camere. Per deformare la trave a sbalzo, la freccia applicata è stata di circa 5 mm.

Sempre nella fase di elaborazione dati sono stati seguiti alcuni accorgimenti per diminuire problemi di correlazione delle facets da parte di Aramis:

- Il campo di facet è stato scelto rettangolare per evitare problemi di distorsione delle facets. In questo modo le varie facets create sono tutte quadrate e di dimensioni identiche;
- Considerando le dimensioni del volume di misura (200 x 170 mm) e i dati di risoluzione delle telecamere (2448 x 2050 pixel) il campo di facet 500 x 500 considerato corrisponde ad un quadrato di circa 50 mm di lato;
- Il campo di facet è stato scelto nella zona di massima di illuminazione della piastra in modo da facilitare il riconoscimento delle facets;
- La validity quote è stata fissata al 100%. In questo modo per fare avvenire il calcolo della deformazione in un punto, tutti i punti compresi nella finestra di grandezza determinata dalla facet size devono essere determinati. Vengono eliminate uniformemente le facets contenenti punti non calcolabili che solitamente si trovano ai limiti del campo di facets. In output si ottiene quindi una matrice completa di valori di deformazione.

I dati in uscita da Aramis sono stati organizzati in matrici contenenti le deformazioni calcolate per il campo di facet. Sono state ottenute quindi 20 matrici 94x94 per ogni situazione di sollecitazione :

- Spostamento e deformazione assenti (appartenenti al precedente gruppo C);
- Deformazione assente con presenza di spostamento (appartenenti al precedente gruppo D);
- Spostamento assente con presenza di deformazione (appartenenti al precedente gruppo A);

Per ognuna delle matrici è stato calcolato il corrispondente spettro di ampiezza della trasformata di Fourier. Vengono quindi ottenuti 3 gruppi, ciascuno composto da 20 spettri di Fourier.

Prese le posizioni corrispondenti in ciascuna delle venti matrici di ogni gruppo si è passati a calcolare la mediana di tali valori. Sono state ottenute quindi 3 matrici 94x94 contenenti la mediana punto per punto delle deformazioni calcolate nei vari stages da Aramis.

In questo modo è possibile descrivere l'andamento dei picchi di frequenza dello spettro di Fourier in ampiezza, avendo con una buona approssimazione una mappa di quali siano le frequenze caratteristiche di rumore ed informazione. In particolare l'utilizzo della mediana permette di escludere il contributo di componenti che per vari motivi hanno valori in disaccordo con l'andamento generale riscontrato negli altri spettri.

4.1.2 Risultati

L'elaborazione dati è stata effettuata utilizzando il sistema di riferimento di figura 4.1 dove l'asse x è quello lungo la dimensione maggiore della trave, l'asse y la percorre in larghezza e l'asse z è diretto verso le telecamere.

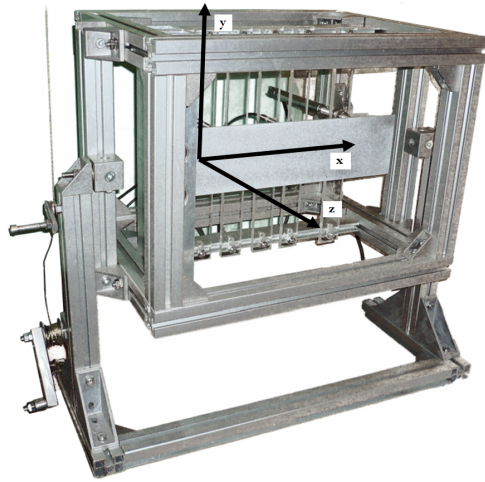


Figura 4.1

Gli spettri di Fourier trovati sono riassunti nelle figure 4.2, 4.3 e 4.4.

Osservando gli spettri riportati in figura è possibile notare come vi sia una direzionalità nel posizionamento dei picchi di frequenza in ogni configurazione. In particolare le posizioni sono sfalsate di 90° a seconda che vengano esaminate ε_x ed ε_y . Per quanto riguarda le intensità dei picchi è possibile notare una intensificazione dei picchi centrali passando da spettri generati con solo rumore di misura (4.2), con solo spostamento (4.3) e quelli generati effettivamente dall'osservazione della trave deformata (4.4). Questo ci fa intuire come l'informazione descritta nei risultati si concentri alle basse frequenze e come il rumore di misura si manifesti alle frequenze più elevate. Queste ultime frequenze osservando le figure 4.2 e 4.4 risultano immutate in posizione ed intensità.

Interessante notare anche i valori massimi raggiunti dai picchi centrali in figura (4.4): il picco in frequenza delle ε_y ha un valore che è circa un terzo di

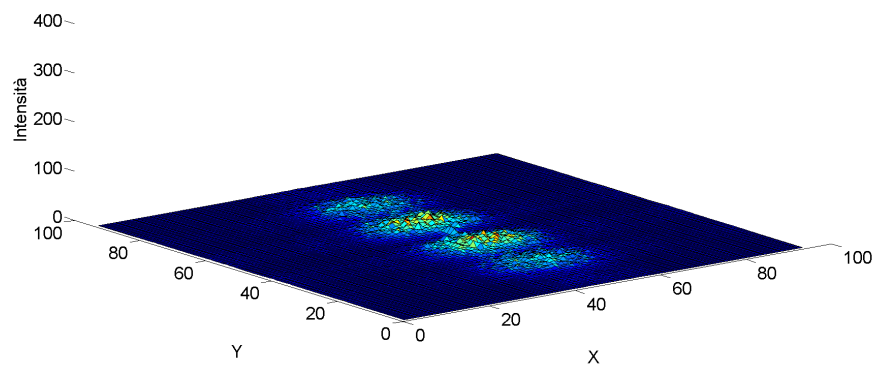
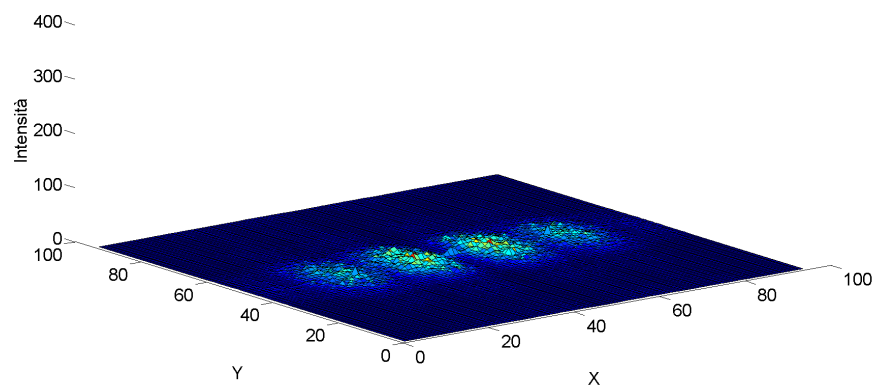


Figura 4.2: Spettro di Fourier di ϵ_x ed ϵ_y in assenza di deformazione e spostamento. Le figure fanno riferimento alla matrice “mediana” costruita per gli stages appartenenti al gruppo di acquisizioni C.

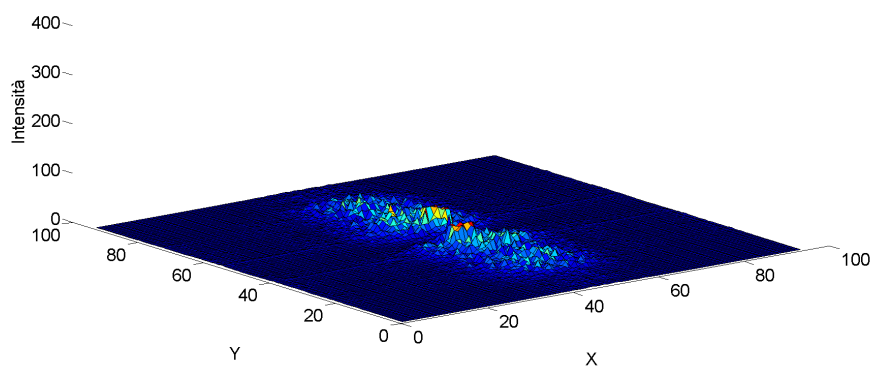
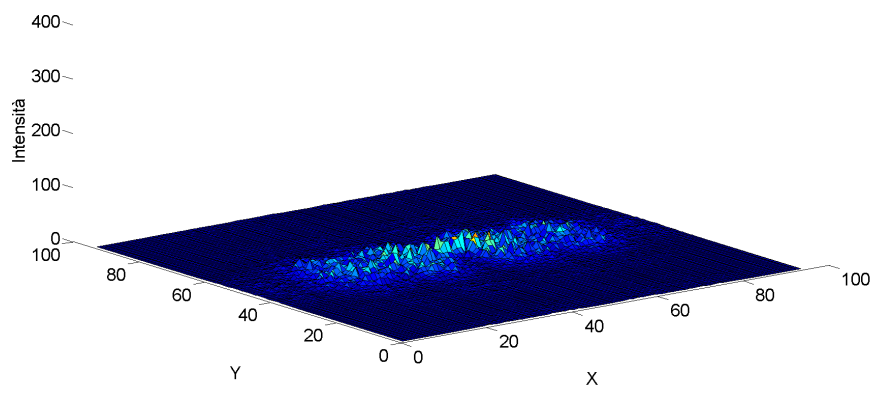


Figura 4.3: Spettri di Fourier costruito su di ϵ_x ed ϵ_y costruito sulla matrice mediana del precedente gruppo D. I dati sono stati ricavati in presenza di sola traslazione lungo l'asse x.

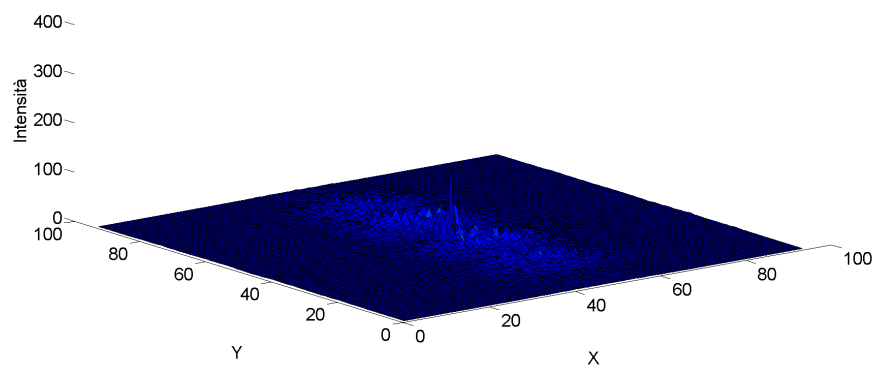
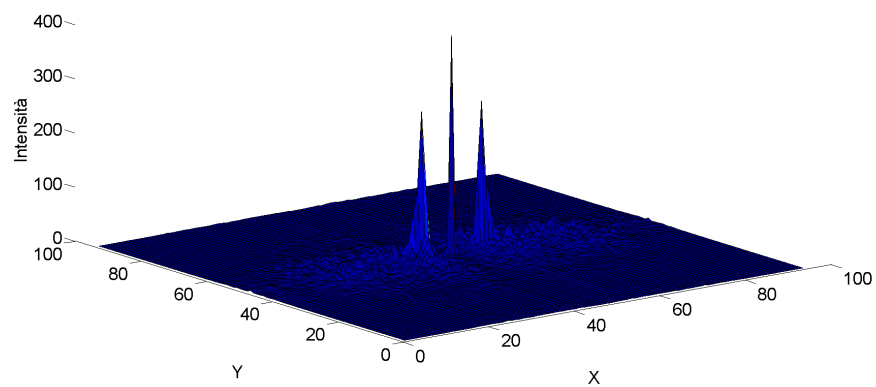


Figura 4.4: Spettro di Fourier di ε_x ed ε_y in presenza di sola deformazione. Dati ricavati dalle osservazioni facenti parte del gruppo A.

quello delle ε_x , come regolato dal coefficiente di Poisson che per l'alluminio vale 0.3. Nelle situazioni in cui non vi era deformazione reale invece, al centro non vi è nessun picco poichè non esiste una deformazione reale da rappresentare.

In generale possiamo quindi affermare che l'andamento degli spettri di Fourier dei risultati in uscita da Aramis segue le regole alla base dell'immagine processing: la maggior parte dell'informazione è concentrata nelle basse frequenze, mentre il rumore si manifesta nelle frequenze più alte. E' possibile anche affermare che il rumore di misura che affligge Aramis non è un rumore bianco: esistono frequenze afflitte preferenzialmente da rumore rispetto ad altre.

Durante questa prova sono emersi dei fenomeni di aliasing nelle misure di deformazione, dovuti al deterioramento del pattern stocastico sulla piastra (vedi 1.3.2). La superficie della piastra in alluminio, trattata secondo le specifiche del protocollo interno del laboratorio un anno prima dell'esperimento, ha perso in contrasto soprattutto a causa dello sbiadimento della vernice bianca. Tali problemi sono visibili in 4.4 nella forma dei due picchi ai lati del picco centrale ed al momento dell'esperimento non erano note le implicazioni di tale deterioramento. La forma dei risultati affetti da tali disturbi e le possibili strategie di rimozione saranno trattati più approfonditamente in 4.5.

4.2 Relazione fra parametri di elaborazione e spettro di Fourier delle deformazioni

L'altra correlazione da stabilire per implementare un metodo di filtraggio in frequenza dei risultati di deformazione, è quella con i parametri del software Aramis. In particolare è necessario comprendere se i parametri di elaborazione influenzino le posizioni reciproche di informazione e rumore negli spettri.

4.2.1 Materiali e metodi

La prova consiste nell'elaborazione ripetuta delle immagini acquisite nell'esperimento precedente, andando a variare i parametri del software. Vengono presi in considerazione solo gli spettri relativi alla trave deformata, appartenenti al gruppo A definito in 4.1.1. Per semplificare la trattazione l'attenzione è concentrata sullo spettro delle ϵ_x sia perchè per le ϵ_y valgono le medesime conclusioni, sia perchè la deformazione è diretta principalmente lungo l'asse della trave (asse x di figura 4.1). I risultati sono stati elaborati considerando un facet field con dimensioni reali di circa 50 mm di lato ed utilizzando una validity quote del 100%.

I parametri oggetto di indagine sono i seguenti:

- Facet size;
- Facet step;
- Computation window;

Ciascuno dei parametri è stato fatto variare a due valori limite. I valori limite presi in esame sono stati:

Parametro	Valore inferiore	Valore superiore
Facet size	10	50
Facet step	1	9
Computation window	3	15

La scelta di tali valori è legata al facet field in esame, composto da 500x500 facets. Poichè i parametri di elaborazione possono essere variati a piacimento dallo sperimentatore, una strategia di filtraggio utile deve dimostrarsi robusta nei confronti di tali fluttuazioni.

Le combinazioni di parametri del software risultanti sono 8. Per ciascuna di queste è stata effettuata una differente elaborazione dati ed una successiva esportazione dei risultati. Dai risultati dei vari stages deformati di ciascuna prova sono stati creati gli spettri di Fourier in ampiezza, e ne è stata fatta la mediana come spiegato in 4.1.1.

4.2.2 Risultati

Gli spettri risultanti sono riportati nella figura 4.5.

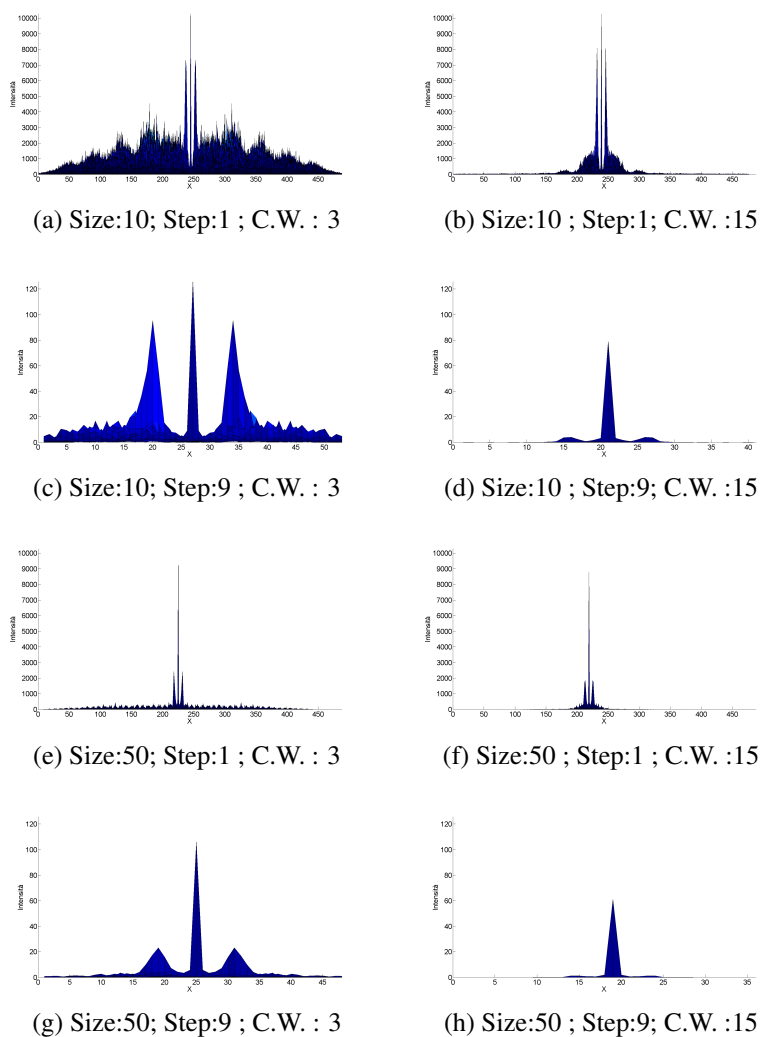


Figura 4.5: Riassunto spettri mediana trovati nelle 8 prove. In ogni sotto-figura sono indicati i valori dei parametri impiegati (facet size, facet step e computation window). Gli spettri sono rappresentati in proiezione ortogonale sul piano formato dall'asse delle intensità con quello che individua la direzione lungo cui si concentrano i picchi di rumore ed informazione.

4.2.3 Conclusioni

Come prevedibile la principale differenza fra i vari spettri riguarda le dimensioni degli stessi, direttamente collegate al numero di facet create dal software Aramis al momento dell'elaborazione. Conseguenza di questa differenziazione è l'intensità variabile dei picchi in frequenza che per motivi matematici è strettamente legata al numero di punti presi in esame.

Ciò che lega i vari spettri di Fourier è la presenza del picco centrale formato da un numero variabile di frequenze che domina su quelli presenti alle alte frequenze. Questo indica che a prescindere dai parametri di calcolo del software la posizione reciproca di informazione e rumore rimane la stessa.

Gli andamenti degli spettri di Fourier riportati rispettano le indicazioni presentate nel catalogo Gom ([7]) riguardo gli effetti della variazione dei parametri del software sull'accuratezza dei risultati. In particolare nelle figure 4.5e, 4.5f, 4.5g e 4.5h è possibile vedere come un facet size ampio, mediando l'informazione su una maggiore superficie, faccia scomparire l'informazione locale ovvero tenda ad appiattare lo spettro di Fourier ed eliminare frequenze sia alte che basse. Lo stesso si può dire per l'uso di una computation window molto grande. Per quanto riguarda il facet step, le figure 4.5a, 4.5e e 4.5f mostrano come una eccessiva riduzione di questo parametro porti ad un aumento in numero ed intensità delle frequenze portatrici di rumore. La bassa differenziazione fra facets legata al piccolo step porta alla perdita di informazioni sui gradienti reali e a dare troppo peso a fenomeni locali come il rumore.

4.3 Relazione fra intensità della sollecitazione e spettro di Fourier delle distribuzioni di deformazione

L'aspetto successivo da chiarire per comprendere come si presentino gli spettri di Fourier dei risultati delle deformazioni è capire la loro evoluzione all'aumentare della deformazione stessa a parità di tipo di distribuzione. In particolare ciò che interessa è vedere dove si concentri l'informazione pas-

sando dal limite inferiore di Aramis nella determinazione delle deformazioni a valori di ϵ maggiori.

4.3.1 Materiali e metodi

Visti gli obiettivi prima esposti è stata pensata una prova per raggiungere deformazioni molto alte con un sistema di carico relativamente semplice. Si è scelto di monitorare la trazione di un provino in PTFE 2.2.3 sagomato in modo tale da poter esaminare un facet field quadrato di circa 50 mm di lato. La scelta è ricaduta su questo materiale plastico a causa della facilità di lavorazione che lo contraddistingue, del basso modulo elastico (1 GPa circa) e per i forti allungamenti a rottura (anche 300% su provini per prove a trazione standardizzate http://www.rjchase.com/ptfe_handbook.pdf).

Il provino è stato montato sulla macchina di prova (Instron 8502, Instron, Canton, MA, USA) dotata di cella di carico da 5kN ed LVDT interno per monitorare lo spostamento dell'attuatore.

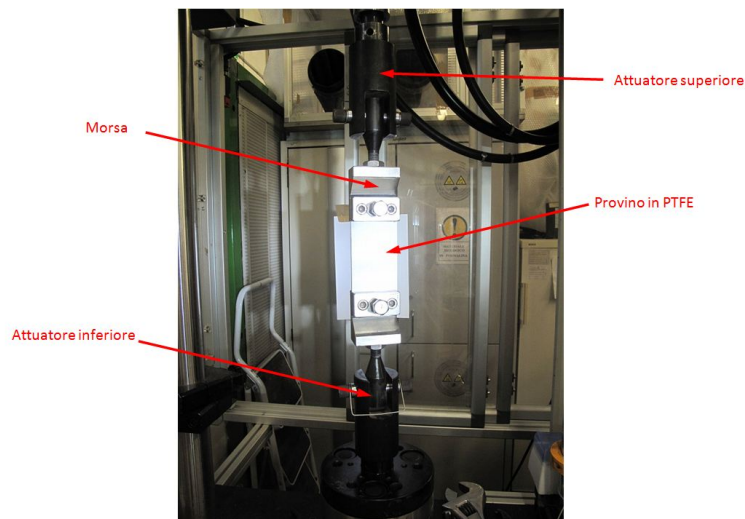


Figura 4.6: Provino di PTFE montato sulla macchina di prova

Una volta posizionato il provino, è stato montato il set-up di Aramis. La finestra di misura monitorata è stata di 200 x 170 mm.

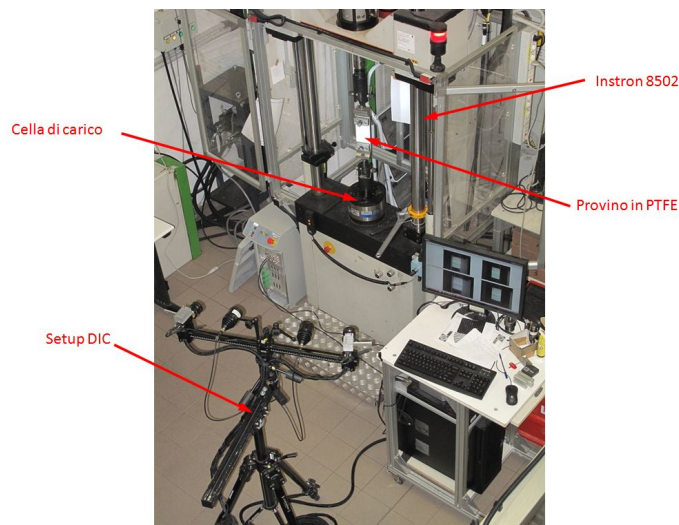


Figura 4.7: Setup di Aramis montato

La macchina è stata utilizzata in controllo di spostamento. I cicli di spostamento impostati sono stati pensati per portare progressivamente a rottura il provino. La sequenza di scalini di spostamento impostati sulla macchina di prova è stata:

- 5 rampe consecutive da 0.2 mm;
- 10 rampe consecutive da 1 mm;

L'intervallo temporale nell'applicazione delle rampe è stato di 50 secondi in modo da dare al materiale la possibilità di stabilizzarsi e manifestare le sue caratteristiche di non linearità. I frame registrati con Aramis sono stati 40 per ogni rampa di spostamento impostata. In particolare i primi 20 sono registrati nei 4 secondi impostati per l'applicazione dello spostamento, mentre gli ultimi 20 sono registrati negli ultimi 4 secondi ad attuatore fermo. Per ogni stage sono anche stati registrati i valori di carico e spostamento su cella di carico ed attuatore al momento dell'acquisizione frames, tramite i canali analogici della scheda di acquisizione Aramis. Per ogni step di spostamento quindi ci sono 20 frames a deformazione crescente e 20 a deformazione stazionaria.

In figura 4.8 è riportato l'andamento degli scalini di carico in funzione dei vari stages acquisiti.

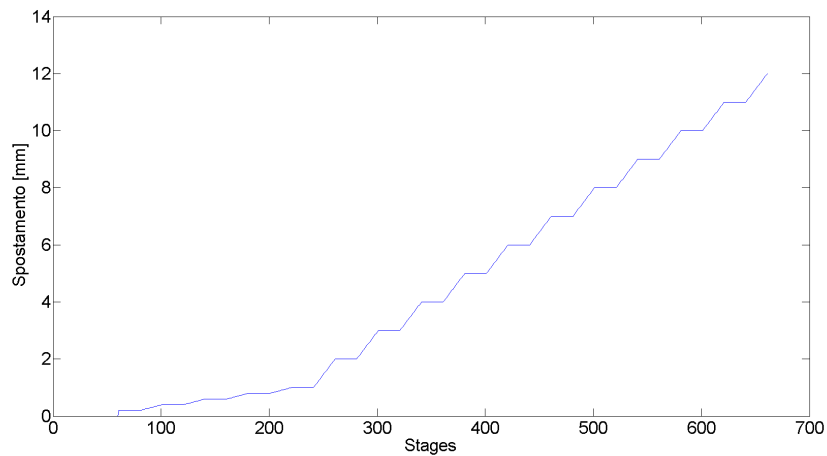


Figura 4.8: Andamento teorico dello spostamento dell'attuatore nei vari stages. Con i cicli inizialmente programmati gli stages acquisiti sarebbero stati 661.

Le immagini sono state elaborate scegliendo i seguenti parametri di elaborazione:

- Facet size: 13
- Facet step: 3
- Computation window: 3

I risultati ottenuti sono stati esportati e ne è stato calcolato lo spettro di Fourier.

4.3.2 Risultati

La prova si è interrotta per l'avvenuta rottura del provino. Come prevedibile la zona in cui si è avuta rottura è stata quella in corrispondenza di uno dei fori per gli afferraggi, figura 4.9.

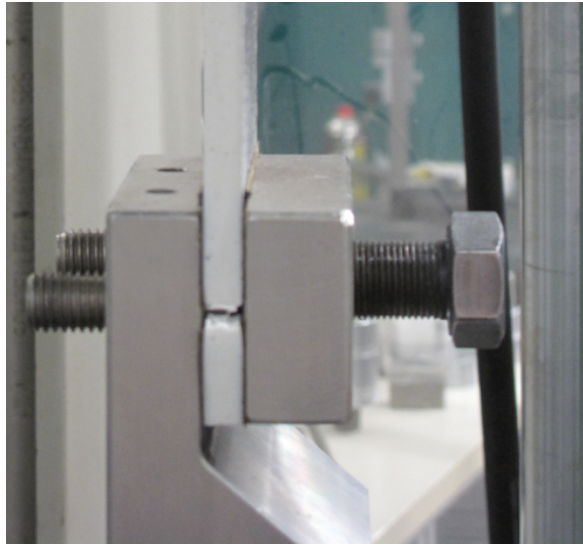


Figura 4.9: Posizione del cedimento del provino PTFE, provino ancora montato sulla macchina di prova

La prova si è conclusa alla settima rampa da 1 mm, per uno spostamento totale dell'afferraggio di 8 mm. I frames utili acquisiti in totale sono stati 480.

In figura 4.10 è rappresentato l'andamento degli scalini di carico in funzione del numero effettivo di stages acquisiti, come registrato dal canale analogico del sistema DIC. Si può notare la brusca interruzione degli scalini dovuta alla rottura del provino attorno allo stage numero 500.

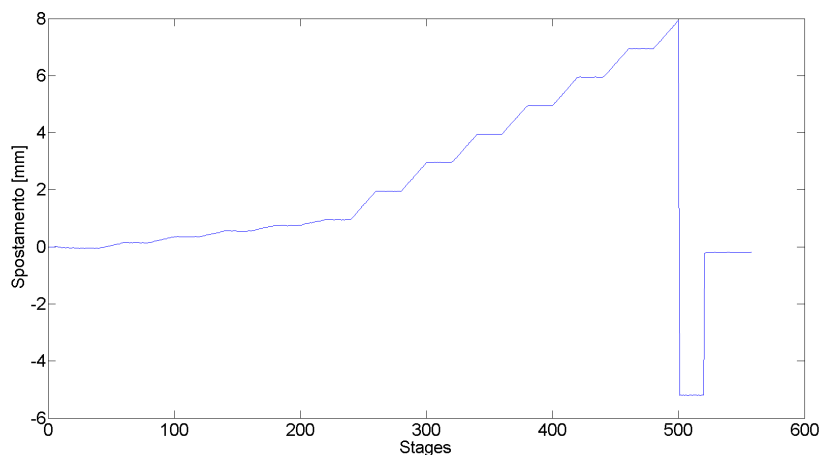


Figura 4.10: Andamento effettivo dello spostamento dell'attuatore durante la prova come registrato dal canale analogico della scheda di acquisizione. La prova si è bruscamente interrotta attorno allo stage 500 causa rottura del provino.

Nella discussione dei risultati vengono prese in esame le deformazioni lungo l'asse di trazione. Vista la ridotta superficie di provino presa in esame e la lontananza del campo di facets da intagli e fori è possibile considerare in prima approssimazione costante la deformazione nei punti che compongono ciascuno stage. Viene quindi presa in esame, per avere una indicazione numerica dei livelli di deformazione raggiunti nella prova, la deformazione media nel facet field di ciascuno stage esaminato. Per questa elaborazione dei risultati viene preso in esame, per ogni rampa di spostamento imposta, l'ultimo stage registrato da Aramis prima del passaggio alla rampa successiva.

Vengono anche calcolati dei valori di deformazione nominale di riferimento a partire dai valori di carico registrati dal canale analogico collegato alla scheda di acquisizione. La formula utilizzata è quella classica per sollecitazioni a trazione:

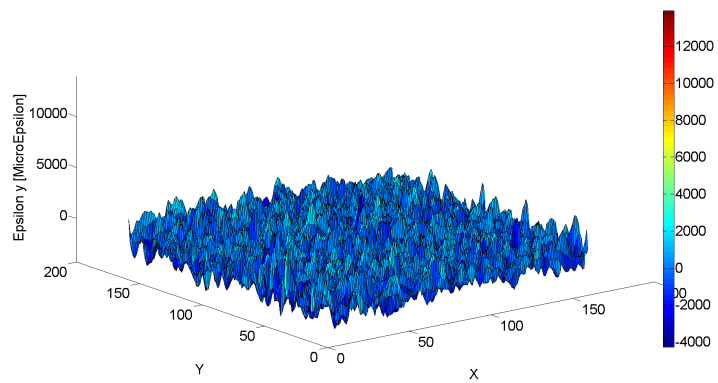
$$\varepsilon = \frac{P}{sbE}$$

dove P è il carico registrato dal sensore, s è lo spessore del provino, b la sua larghezza ed E il modulo elastico.

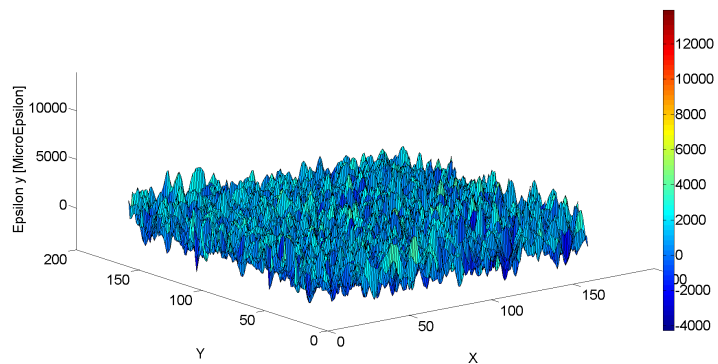
I valori medi di deformazione nei 12 stages così scelti e la relativa deviazione standard sono riportati in tabella insieme alla deformazione nominale prevista:

Stage	Deformazione Nominale [$\mu\epsilon$]	Deformazione media registrata [$\mu\epsilon$]	Deviazione standard [$\mu\epsilon$]	
40	-15	-51	102	Fig.4.11a
80	156	255	192	
120	220	370	153	
160	284	443	107	
200	381	516	83	
240	467	793	87	
280	1333	1651	101	Fig.4.11b
320	3251	3390	96	
360	5348	5394	102	
400	7228	7157	113	
440	8332	8140	102	
480	8383	8238	133	
				Fig.4.11c

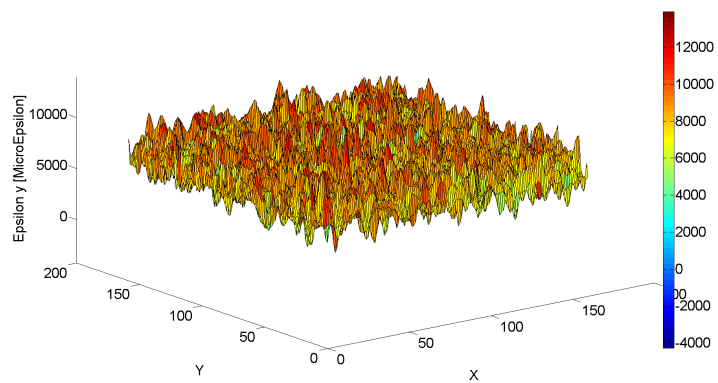
Le deformazioni raggiunte sono superiori di quasi due ordini di grandezza rispetto al limite inferiore di applicazione dichiarato dall'azienda costruttrice. Come evidenziato dai valori pressochè costanti di deviazione standard, l'incertezza sulla misura non è cambiata. L'errore di misura si mantiene infatti costante come evidenziato dalla rappresentazione tridimensionale dei risultati in figura 4.11.



(a) ϵ_y stage 40



(b) ϵ_y stage 240



(c) ϵ_y stage 480

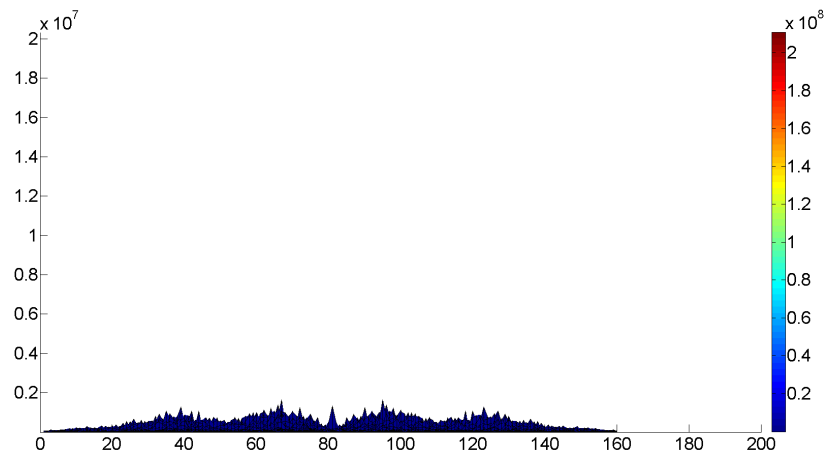
Figura 4.11: Andamento delle deformazioni in differenti stages

Si passa quindi ad esaminare gli spettri di Fourier corrispondenti degli stages della precedente tabella. Gli spettri vengono esaminati in termini di

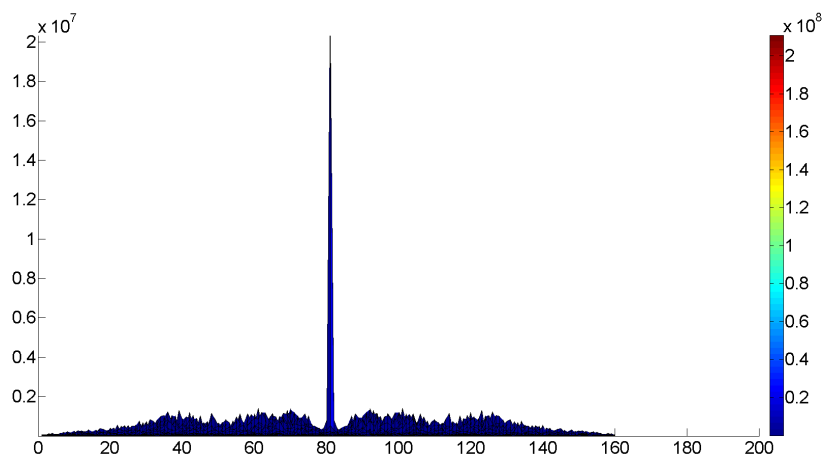
valore di intensità raggiunto dal picco centrale:

Stage	Intensità massima
40	1.65×10^6
80	6.55×10^6
120	9.49×10^6
160	1.14×10^7
200	1.32×10^7
240	2.03×10^7
280	4.23×10^7
320	8.68×10^7
360	1.38×10^8
400	1.83×10^8
440	2.08×10^8
480	2.11×10^8

I valori del picco dello spettro di Fourier sono crescenti, al crescere delle deformazioni applicate. Per quanto riguarda la posizione e l'entità dei picchi di rumore si nota come questi si mantengano costanti, come visibile in figura 4.12.



(a) Stage 40



(b) Stage 240

Figura 4.12: Alcuni degli spettri di Fourier trovati per gli stages di deformazione della prova a trazione.

4.3.3 Conclusioni

Dai risultati precedenti emerge la possibilità di mettere in relazione la quantità di informazione presente nei risultati, con il valore di picco nello spettro di Fourier.

E' possibile peraltro affermare che nell'intervallo di deformazioni a cui siamo interessati il rumore di misura si mantiene all'incirca costante, e l'an-

damento dei picchi di rumore che lo descrive riflette questa costanza: sia in termini quantitativi che posizionali. La prova era stata pensata per mostrare la soglia di transizione fra deformazioni con alto rumore di misura e deformazioni con basso rumore di misura. Questo spiega il perchè dell'alto numero di frames acquisiti. Dall'elaborazione dei dati risulta che questa soglia non esiste per il campo di deformazioni esaminato.

4.4 Elaborazione di un filtro passa-basso gaussiano nel dominio delle frequenze spaziali delle deformazioni

Nella presente sezione verranno esaminati gli effetti del filtro gaussiano passa-basso dei risultati di deformazione nel dominio delle frequenze spaziali. La trattazione ha l'obiettivo di mettere a punto una strategia di filtraggio utilizzando un provino in alluminio e valutarne l'applicabilità a provini di materiale biologico.

4.4.1 Messa a punto del filtro gaussiano passa-basso su di un provino metallico

Dai risultati precedentemente ottenuti è possibile mettere in evidenza alcune caratteristiche che rendono il filtro passa-basso utile nella riduzione del rumore di misura nei risultati di deformazione elaborati con Aramis:

- I picchi contenenti rumore sono concentrati alle alte frequenze e la loro posizione è influenzata dalla direzionalità dei risultati presi in esame;
- Lo spettro di Fourier dei risultati è simmetrico e l'informazione è concentrata al centro dello spettro;
- L'entità e la posizione dei picchi di rumore non è alterata dall'aumento delle deformazioni, nel nostro intervallo di interesse;

Il filtro gaussiano passa-basso incontra tutti questi requisiti:

- Annulla i picchi a frequenze elevate, preservando l'informazione alle basse frequenze;
- Agisce simmetricamente su ogni settore dello spettro e può quindi essere utilizzato per filtrare risultati a prescindere dalla loro direzionalità.

Inoltre grazie alle conclusioni delle prove già effettuate, le precedenti condizioni valgono anche al variare dei parametri del software (4.2), al variare dell'intensità delle deformazioni applicate (4.3) e al variare delle situazioni di carico (4.1).

4.4.1.1 Materiali e metodi

Per testare l'efficacia del filtro passa-basso gaussiano vengono elaborate le immagini della trave a sbalzo 2.2.2 acquisiti dall'Ing. Giacomo Lionello quando l'apparato sperimentale era stato appena costruito.

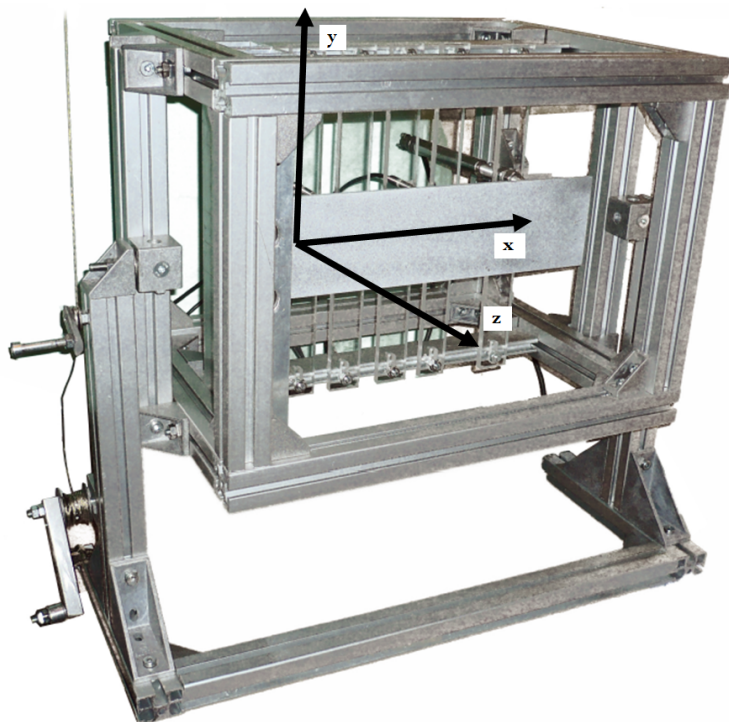


Figura 4.13: Attrezzatura per prove su trave a sbalzo. Viene riportato anche il sistema di riferimento utilizzato.

Questa misura si è resa necessaria a causa del deterioramento temporale subito dal pattern presente sulla trave che ha fatto insorgere problemi di aliasing nei risultati di deformazione (vedi 4.2).

La prova era costituita da 24 stages a deformazione crescente, con il primo stage a deformazione nulla. La prova era stata pensata per raggiungere una deformazione massima di circa $1000 \mu\epsilon$.

Gli stages vengono elaborati dopo aver creato un facet field che comprenda tutta la porzione di trave inquadrata in figura ed utilizzando i seguenti parametri di elaborazione del software:

- Facet size: 28;
- Facet step: 12;
- Computation window: 5;

Le deformazioni così trovate vengono esportate.

Ciascuno stage contiene anche le indicazioni di spostamento in vari punti della trave registrati da 7 LVDT in differenti posizioni.

In figura 4.14 sono indicate le posizioni degli LVDT. In tabella invece sono riportate le posizioni utilizzate per l'installazione degli LVDT e la rispettiva distanza dei punti dall'incastro. Alcuni di essi sono posizionati a coppie a distanza costante dall'incastro per rilevare eventuali torsioni ed asimmetrie nella deformazione della trave.

Punto	Distanza
1	55
2	55
3'	95
4'	135
5'	135
7	300
8	300

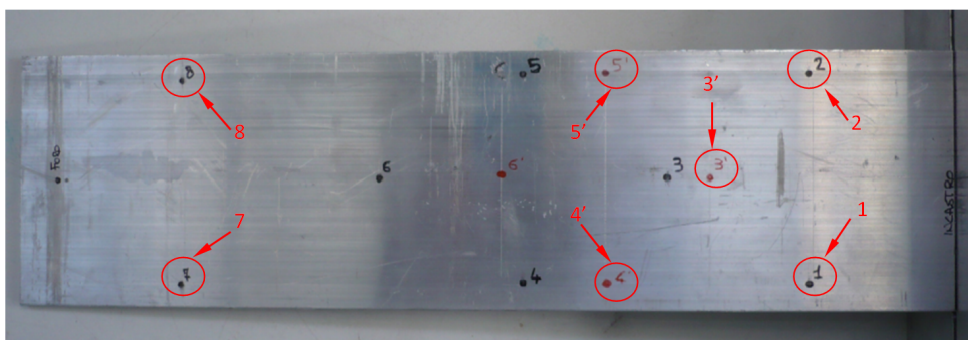


Figura 4.14: Posizioni degli LVDT sulla piastra di alluminio.

Per ogni frame sono quindi registrati gli spostamenti rilevati dagli LVDT. In fase di elaborazione poi i contributi degli LVDT accoppiati sono stati mediati. Tramite queste informazioni è possibile conoscere lo spostamento a diverse distanze dall'incastro e costruire la deformata della trave. I valori di spostamento di ciascuno stage sono stati quindi fittati con l'equazione della linea elastica per sollecitazioni a momento flettente. Vengono mantenuti diversi da zero spostamento e rotazione all'incastro in modo da conservare la non idealità della situazione di carico ed in particolare la cedevolezza dell'incastro. L'equazione di fittaggio utilizzata è stata quindi:

$$z(x) = -\frac{F(3L-x)}{6EI}x^2 + \theta x + x_0 \quad (4.1)$$

con θ ed x_0 a rappresentare rispettivamente rotazione e spostamento all'incastro ipotizzato cedevole. In figura 4.15 sono presentati punti di interpolazione e linea di fittaggio trovata per gli spostamenti determinati nello stage 24 dagli LVDT.

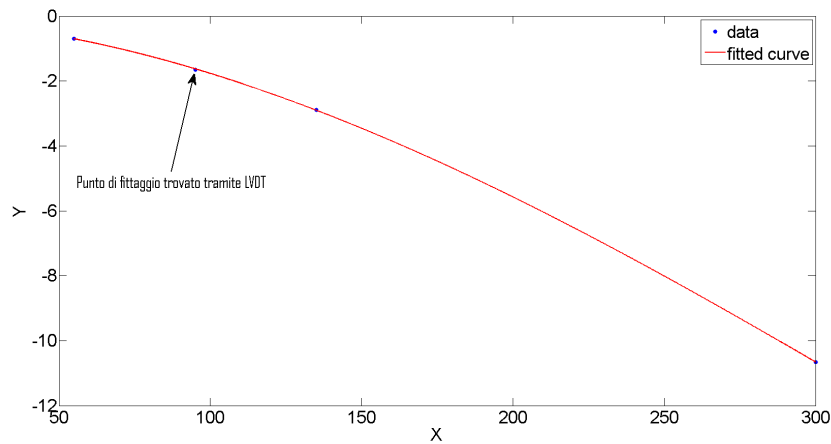


Figura 4.15: Andamento della curva di miglior fittaggio avente equazione descritta da 4.1 per gli spostamenti registrati allo stage 24 dagli LVDT. Dall'equazione di best fit qui trovata vengono ricavati carico, rotazione all'incastro e spostamento all'incastro per lo stage 24.

Una volta noti i termini incogniti F , θ ed x_0 per ogni stage, il passo successivo è stato il calcolo delle deformazioni longitudinali dal lato delle fibre tese in ciascuno stage. Una volta determinata la posizione del facet field sulla trave rispetto all'incastro, vengono calcolati per ciascuno stage i valori di deformazione agli estremi della porzione di trave, generati dalla forza calcolata al passo precedente. I valori di deformazione su tutta la porzione di piano vengono trovati facendo un fittaggio lineare di questi valori estremi ed ipotizzando che lungo la dimensione minore della trave (quella individuata dall'asse y , riferendosi a figura 4.1) la deformazione si mantenga costante. Queste ipotesi sono legate all'isotropia del materiale metallico che costituisce la trave.

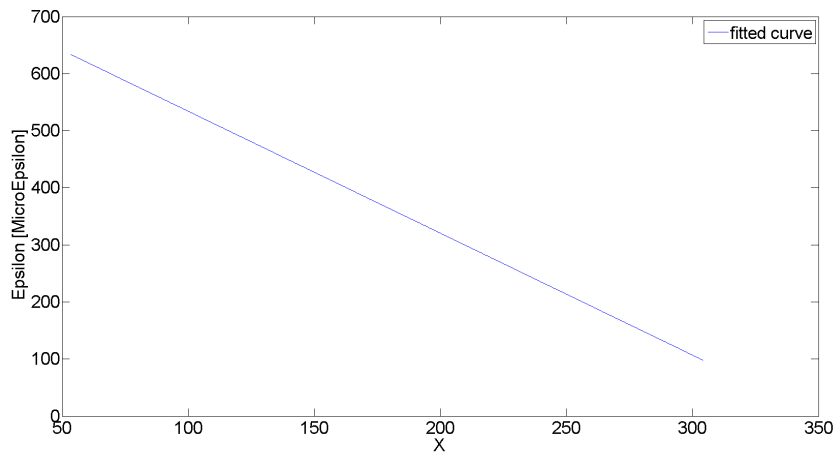
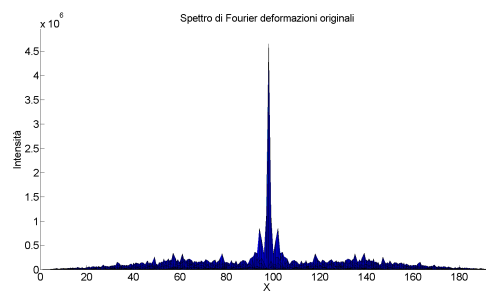


Figura 4.16: Gradiente di deformazione rilevato sulla trave a sbalzo allo stage 24. I valori limite vengono calcolati conoscendo il carico applicato nello stage considerato e la geometria della trave in esame. Interpolando linearmente i valori limite sono noti i valori di deformazione su tutta la trave.

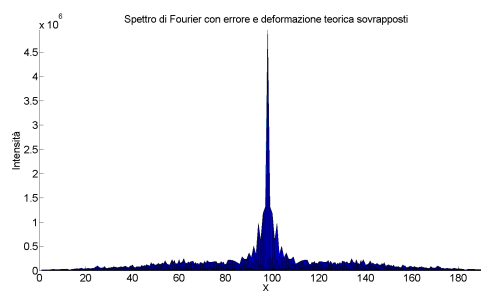
In questo modo risulta determinato il campo di deformazioni teoriche che avrebbe dovuto trovare Aramis in caso la misura fosse stata esatta. Per ciascuna distribuzione di deformazioni teoriche viene calcolato lo spettro di Fourier delle ampiezze.

A questo punto visto quanto evidenziato dalla prova a trazione discussa in 4.3, ovvero la costanza in intensità e posizione dei picchi di rumore all'aumentare della deformazione, viene preso come spettro del rumore di misura quello ricavato dall'elaborazione delle ϵ_x del primo stage, quello a deformazione nulla.

Sono così determinati separatamente lo spettro del rumore e della deformazione teorica di ciascuno stage. La somma di questi due spettri coincide con lo spettro di Fourier ricavato dalle deformazioni calcolate originariamente da Aramis. La sommabilità degli spettri di Fourier è una delle proprietà della trasformata discreta. In figura 4.17 sono rappresentati lo spettro originale delle deformazioni e quello generato dalla somma di cui sopra. La loro coincidenza al netto di fluttuazioni minime, è la prova della bontà del principio di sovrapposizione degli effetti adottato in questa elaborazione.

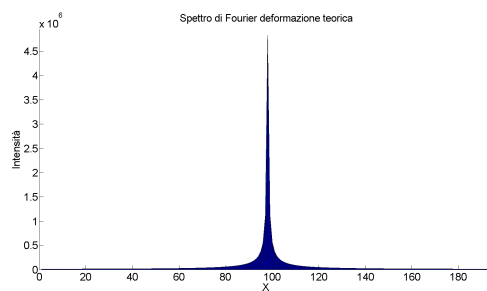


(a)

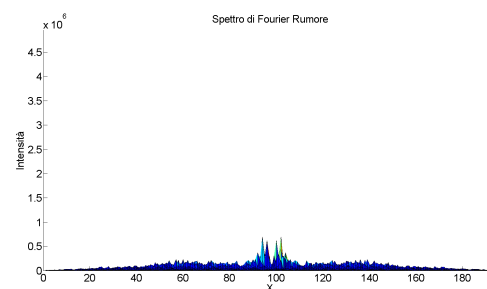


(b)

Figura 4.17: Confronto fra spettro delle deformazioni originali ricavate da Aramis e spettro ricavato con il principio di sovrapposizione degli effetti



(a)



(b)

Figura 4.18: Spettro di Fourier delle deformazioni teoriche e spettro del solo rumore

Le prove di filtraggio sugli spettri così ottenuti sono state effettuate seguendo i seguenti passi:

1. Lo spettro del solo rumore viene filtrato con una serie di filtri passa-basso aventi forma circolare e frequenza di cut-off crescente da 0 alla posizione della decima frequenza riportata sullo spettro di Fourier, con incrementi di un decimo della distanza fra le varie frequenze.
2. Viene effettuata la trasformata inversa di ciascuno dei cento spettri di Fourier così creati e per ciascuno di essi viene calcolato il valore efficace o RMS, che rappresenta la quantità di rumore ancora presente e non eliminato dal filtro, secondo la formula:

$$RMS_k = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \varepsilon_{i,j}^2}$$

con k che indica la frequenza di cut-off considerata, N numero di punti di discretizzazione del facet field nella direzione dell'asse x ed M nella direzione dell'asse y .

3. Lo spettro di ciascuna deformazione teorica viene anch'esso filtrato seguendo le modalità riportate al punto 1. Per ciascuno stage vengono quindi creati 100 spettri filtrati con frequenza di cut-off crescente.
4. Per ciascuno spettro così creato viene calcolata la trasformata inversa e ne viene calcolato l'errore quadratico medio dal valore teorico originario o RMSE, che determina quanta informazione sia andata persa in seguito al filtraggio, secondo la formula:

$$RMSE_{s,k} = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\varepsilon_{i,j} - \hat{\varepsilon}_{i,j})^2}$$

con s ad indicare lo stage considerato e k in riferimento alla frequenza di cut-off, $\varepsilon_{i,j}$ valore di deformazione dopo il filtraggio ed $\hat{\varepsilon}_{i,j}$ valore di deformazione prima del filtraggio.

5. In ogni stage teorico e per ciascuna frequenza di cut-off viene calcolato l'RMS complessivo secondo la formula:

$$T_{s,k} = \sqrt{(RMS_k)^2 + (RMSE_{s,k})^2}$$

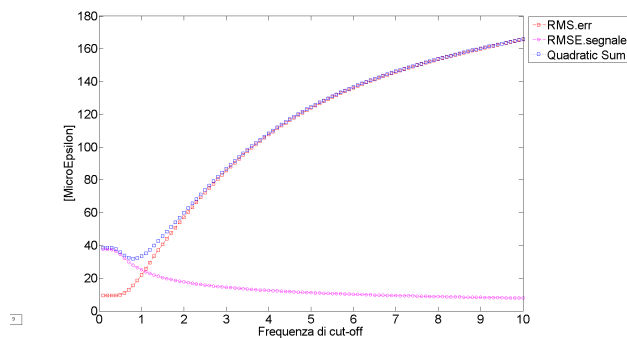
6. Per ciascuno stage viene generato un grafico contenente i valori di RMS, RMSE e T al variare della frequenza di cut-off del filtro passa-basso.

La procedura così strutturata ha come scopo quello di trovare la frequenza di cut-off ottima che elimina il massimo del rumore preservando la maggior quantità possibile di informazione.

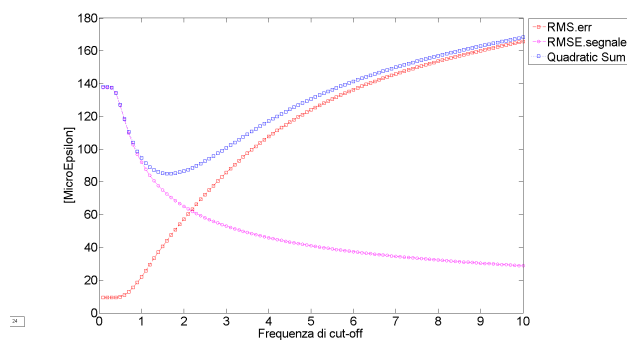
4.4.1.2 Risultati

Dai grafici che riuniscono RMS, RMSE e T al variare della frequenza di cut-off del filtro passa-basso emerge come vi sia effettivamente un punto di

ottimo per l'applicazione del filtro. In figura vengono riportati due esempi di grafici ottenuti: per gli stages 9 e 24.



(a) Stage 9



(b) Stage 24

Figura 4.19: Due esempi dei grafici ottenuti per trovare la frequenza di cut-off ottima del filtraggio passa-basso.

Dai grafici precedenti è possibile individuare un punto di minimo per la somma quadratica di rumore rimasto ed informazione perduta in seguito alle diverse strategie di filtraggio. Dal grafico si nota poi come al crescere della frequenza di cut-off e allontanandosi quindi dalle basse frequenze, il filtro diventi sempre più inefficace. In particolare le componenti di rumore aventi maggior peso si trovano vicine al centro dello spettro di Fourier, ovvero alle basse frequenze.

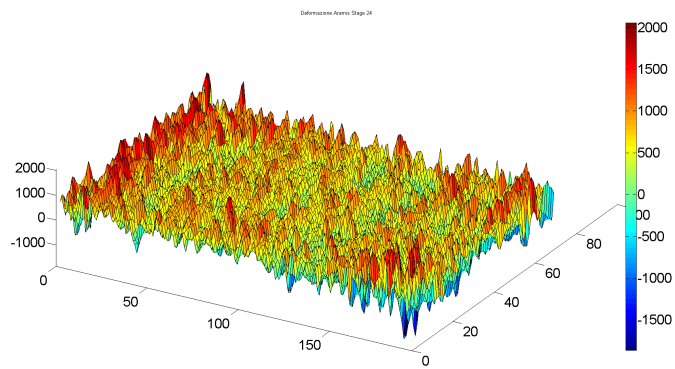
Nella tabella 4.1 sono riportati i risultati di frequenza di cut-off ottima, RMS del rumore ed RMSE dell'informazione per tutti gli stages esaminati.

Dai risultati emerge un progressivo aumento di frequenza di cut-off ottimale, RMS ed RMSE all'aumentare della deformazione. Ciò è una diretta conseguenza dell'aumento della concentrazione di informazioni che si registra al centro dello spettro di Fourier che costringe a filtrare meno, come visto in 4.3.

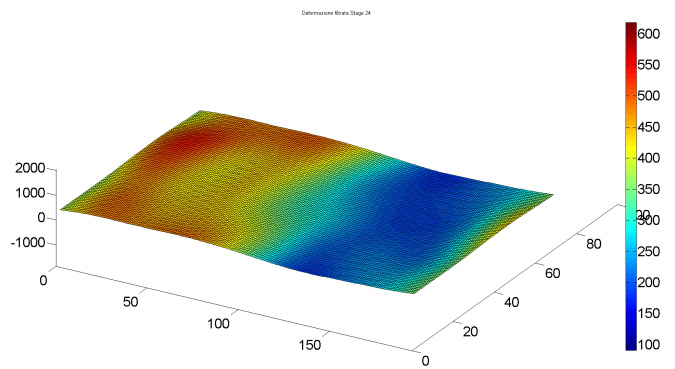
I filtri così implementati vengono utilizzati per trattare i risultati originariamente trovati da Aramis. Nella figura 4.20 il confronto fra i risultati di deformazione di Aramis, quelli teorici e quelli filtrati con il filtro passa basso per lo stage numero 24.

Stage	Frequenza spziale di cut-off	RMS rumore [$\mu\epsilon$]	RMSE segnale [$\mu\epsilon$]
0	0,1	9	0
1	0,2	9	1
2	0,2	9	0
3	0,3	9	1
4	0,4	9	6
5	0,5	10	11
6	0,6	11	17
7	0,7	13	22
8	0,8	15	28
9	0,9	19	30
10	0,9	19	37
11	1	22	41
12	1,1	26	46
13	1,2	30	50
14	1,2	30	53
15	1,3	33	54
16	1,3	33	58
17	1,3	33	60
18	1,4	37	61
19	1,4	37	64
20	1,5	41	66
21	1,6	44	68
22	1,6	44	72
23	1,6	44	73
24	1,8	51	75

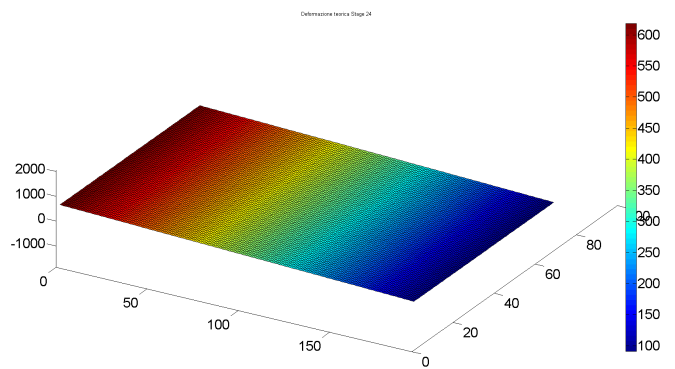
Tabella 4.1: Risultati di frequenza spziale di cut-off ottima. Vengono riportati anche i corrispondenti valori RMS del rumore ed RMSE del segnale



(a) Deformazioni originali Aramis.



(b) Deformazioni filtrate.

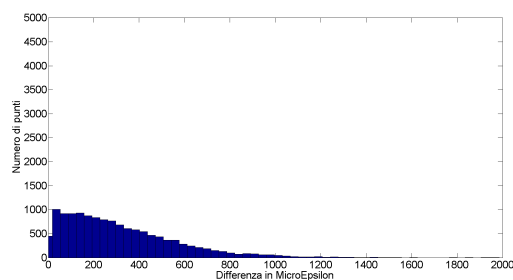


(c) Deformazioni teoriche.

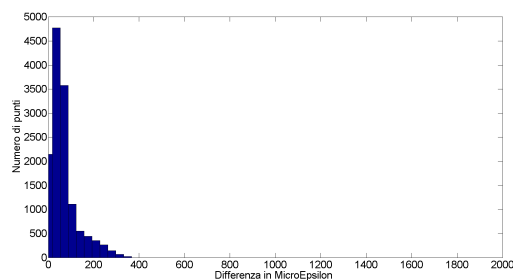
Figura 4.20

Per avere una impressione visiva del miglioramento della predizione dei risultati avvenuta dopo il filtraggio è possibile osservare gli istogrammi in

figura 4.21. In figura 4.21a sono riportati in ascissa i valori assoluti delle differenze fra i valori di deformazione determinati da Aramis e quelli teorici, suddivisi in 10 intervalli uguali, mentre in ordinata è riportato il numero di punti che cadono in ciascun intervallo. In figura 4.21b le stesse quantità sono riferite alle deformazioni filtrate. Entrambi gli istogrammi sono riferiti allo stage numero 24.



(a) Istogramma delle differenze puntuali per la misura originale.



(b) Istogramma delle differenze puntuali per la misura filtrata.

Figura 4.21: Istogrammi costruiti riportando le differenze fra misura puntuale di deformazione e corrispondente deformazione teorica. Sono stati creati 10 intervalli per classificare i valori delle discrepanze trovati e per ognuno di essi è stato contato il numero di punti che vi apparteneva.

Dal confronto fra gli istogrammi è possibile vedere come mentre prima del filtraggio vi fossero punti di calcolo che differivano dalla misurazione reale anche di $2000 \mu\epsilon$, dopo il filtraggio il massimo scostamento fra misura e andamento teorico si attesta sui $370 \mu\epsilon$ e la maggior parte dei punti (4800 su 13455 punti di calcolo totali) si discosta di circa $70 \mu\epsilon$.

4.4.1.3 Conclusioni

Grazie al precedente esperimento è stata messa a punto una tecnica di filtraggio nel dominio delle frequenze spaziali valida per strutture di cui si conosca l'andamento teorico delle deformazioni. Grazie a questa conoscenza è possibile costruire un filtro passa-basso in grado di massimizzare la diminuzione del rumore, minimizzando la perdita di informazioni. In queste condizioni è anche possibile conoscere a priori il criterio con cui fermare l'iterazione di filtraggio. Difficilmente però ci si trova ad operare in tali situazioni. Nel proseguimento del lavoro si è quindi cercato di mettere a punto una strategia utilizzabile anche in condizioni meno restrittive di quelle viste precedentemente ed applicabile nella maggior parte dei casi pratici.

4.4.2 Applicazione del filtro passa-basso a misure di deformazione su tessuto biologico

Il filtro passa-basso messo a punto nella sezione precedente viene adesso sfruttato per ridurre il rumore in misure di deformazione su provini in materiale biologico. Questi materiali non hanno le proprietà di isotropia, omogeneità e linearità che caratterizzano i materiali metallici come quello costituente il provino precedentemente studiato. Per questo non è possibile creare un modello teorico puntuale di deformazione per un provino costituito da materiale biologico. Lo strumento utilizzato per verificare la bontà della tecnica di filtraggio applicata a questa categoria di materiali è la misura effettuata tramite estensimetri.

4.4.2.1 Materiali e metodi

Le considerazioni sul filtraggio qui riportate sono state effettuate a partire dai risultati sperimentali acquisiti dall' Ing. Marco Salvà ([10]) e sono riferiti a prove a sbalzo su tibia umana. Per la campagna di prove è stata utilizzata la tibia umana, catalogata come #3018, di un donatore maschio di 46 anni (altezza: 197 mm, peso: 120 kg). In una prima fase sono state effettuate prove in campo elastico sulla tibia estensimetrata, mentre nella seconda le

misure di spostamenti e deformazioni sono state ottenute con la correlazione di immagini digitali in condizioni di carico analoghe alle precedenti.

4.4.2.1.1 Procedura sperimentale (come descritta in[10]) Come operazioni preliminari sono state effettuate la tracciatura e realizzate le colate di PMMA per il posizionamento del provino secondo la procedura interna al laboratorio. Successivamente sono state applicate sul provino 28 rosette estensimetriche del tipo a tre griglie a 45 gradi fra di loro. Le rosette sono state distribuite su 4 lati anatomici (anteriore - laterale - posteriore - mediale) e 7 livelli trasversali equidistanti. In figura 4.22 sono riportati i livelli e le colate con l'indicazione della numerazione degli stessi in relazione all'orientazione della tibia. I livelli sono ordinati in modo crescente passando dall'estremità prossimale a quella distale. Le griglie a 0° sono state posizionate lungo gli assi di tracciatura corrispondenti ai differenti piani anatomici.

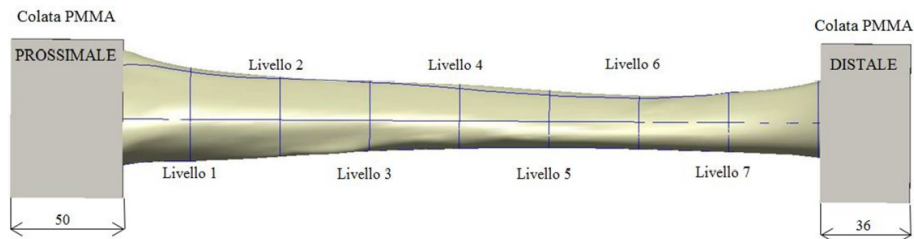


Figura 4.22: Posizione dei vari livelli e colate in PMMA sulla tibia #3018.[10]

In figura 4.23 è invece rappresentato il setup della prova a flessione sulla tibia estensimetrata posizionata sulla macchina di prova Instron 8502.

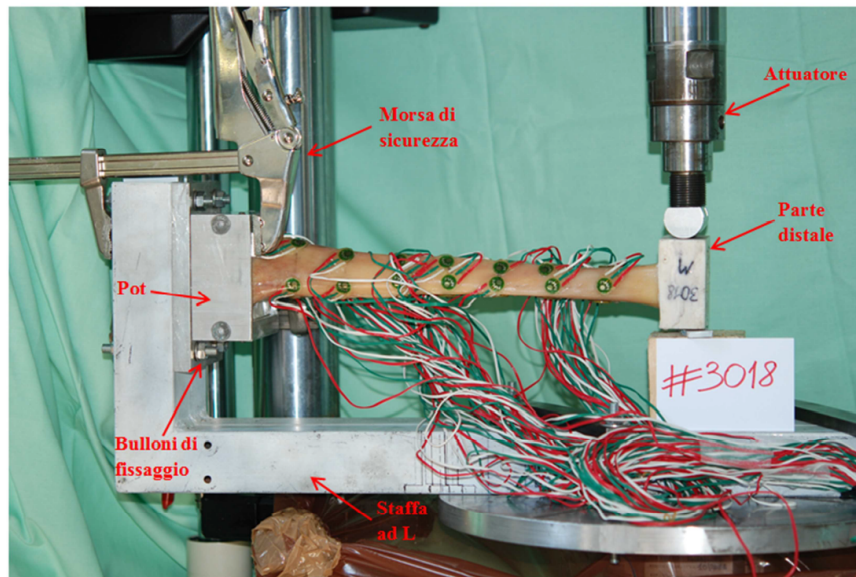


Figura 4.23: Tibia #3018 estensimetrata montata sulla macchina di prova Instron 8502 per prova asbalzo P-A. [10]

La tibia è stata testata in varie configurazioni di carico. Per ciascuna configurazione di carico sono state effettuate 6 ripetizioni.

Tutte le prove sono state condotte in controllo di posizione, con una rampa caratterizzata da tempo di carico e scarico costante pari a 0,2 secondi.

Lo spostamento imposto è stato tale da generare deformazioni massime nella tibia pari a circa $1000\mu\epsilon$. I risultati ottenuti dalle varie ripetizioni sono stati scalati ad un valore unico di carico e spostamento. In particolare per ogni estensimetro sono stati presi come riferimento dei risultati i valori di angolo di giacitura e di deformazione massima e minima scalati al carico di 176,40 N (ovvero il 15% del peso corporeo del donatore).

Delle varie configurazioni testate, per il confronto con i risultati derivanti dalla tecnologia DIC, è stata considerata quella a sbalzo denominata P-A con parte posteriore in compressione e anteriore in trazione.

La seconda fase della procedura sperimentale consiste nella misura di spostamenti e deformazioni della tibia in configurazione di carico P-A tramite DIC. Una volta rimossi gli estensimetri, la superficie del provino è stata

trattata per l'applicazione del pattern stocastico. Sulla superficie sono state poi segnate le posizioni occupate precedentemente dalle rosette estensimetriche, tramite punti riconoscibili ed individuabili durante la fase di calcolo con il sistema DIC.

Una volta montato il setup DIC la tibia è stata osservata tramite una finestra di misura di 335x290 mm con ottiche da 17 mm. Per ogni lato (laterale e mediale) sono disponibili osservazioni da tre punti di vista differenti: frontale, dall'alto e dal basso. Tale metodo è stato scelto per inquadrare tutti i differenti lati anatomici della tibia. Nella figura 4.24 sono rappresentati schematicamente i punti di vista utilizzati e la denominazione scelta. Nella successiva tabella 4.2 sono riassunte le osservazioni effettuate e i rispettivi lati visibili in ciascuna di esse.

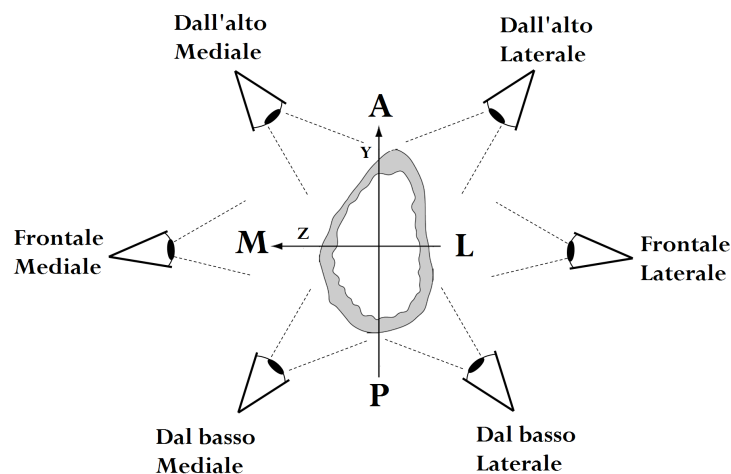


Figura 4.24: Punti di vista adottati per l'osservazione della tibia. Nell'immagine la tibia è rappresentata in sezione secondo il piano individuato dal livello 5 di figura 4.22. Le lettere A, P, L ed M indicano la posizione dei lati anatomici nella sezione. Accanto ad ogni punto di vista è riportata la denominazione adottata per identificarlo.

Osservazione	Lati anatomici visibili
Dal basso mediale	Mediale
Dal basso laterale	Posteriore - Laterale
Dall'alto mediale	Mediale - Anteriore
Dall'alto laterale	Laterale
Frontale mediale	Anteriore - Mediale
Frontale laterale	Laterale

Tabella 4.2: Corrispondenza fra le osservazioni individuate in figura 4.24 e corrispondenti lati anatomici visibili in esse.

Nelle intenzioni dello sperimentatore la tibia avrebbe dovuto subire le stesse sollecitazioni a flessione in controllo di spostamento precedentemente descritte per la parte con estensimetri.

Per ciascuno degli stages creati sono disponibili, grazie ai canali analogici della scheda di acquisizione del sistema DIC, anche lo spostamento dell'attuatore ed il carico corrispondente registrati da LVDT e cella di carico presenti nella macchina di prova.

4.4.2.1.2 Elaborazione dati e filtraggio La presente elaborazione inizia dai frames e dai valori registrati dai canali analogici ottenuti nella fase precedente. I vari stages sono stati elaborati con i seguenti parametri del software:

- Facet size: 16;
- Facet step: 7;
- Computation window: 5;
- Validity quote: 100%;

Il facet field preso in esame varia a seconda dell'osservazione esaminata. In particolare l'area di interesse è stata scelta in modo da escludere le aree delle immagini a scarso contrasto per ridurre errori nella fase di creazione delle facets. Per ognuna delle sei osservazioni sono stati individuati i punti

corrispondenti all'applicazione delle rosette estensimetriche tracciati in precedenza. In tali punti sono stati posizionati degli stage points, ovvero punti di calcolo creati dal software la cui posizione può essere esportata singolarmente. In questo modo è disponibile la posizione di ciascun punto di misura degli estensimetri per elaborazioni all'esterno dell'ambiente di calcolo del sistema DIC.

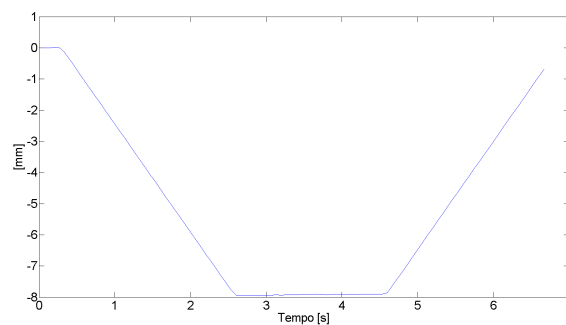
Tramite i valori registrati dai canali analogici è stata poi eseguita una verifica sui valori di carico e spostamento raggiunti negli stages all'interno delle varie osservazioni. Tali valori sono di fondamentale importanza per capire se i risultati derivanti da correlazione di immagini digitali e quelli misurati sulla tibia estensimetrata siano confrontabili. I risultati derivanti dalle misure estensimetriche sono infatti disponibili per valori di carico e spostamento massimo raggiunti durante la prova. Le varie prove effettuate con Aramis invece contengono più stages, ciascuno caratterizzato da un proprio valore di carico e spostamento. Di seguito vengono riportati in tabella i valori di carico e spostamento massimo registrati nelle varie prove effettuate tramite DIC. Le prove sono distinte in base al punto di osservazione e al lato della tibia inquadrato.

Osservazione	Carico Massimo [N]	Spostamento massimo attuatore [mm]
Dal basso mediale	159,1	7,95
Dal basso laterale	193,3	8,01
Dall'alto mediale	164,5	7,99
Dall'alto laterale	188,4	7,99
Frontale mediale	141,4	7,94
Frontale laterale	189,9	8,00

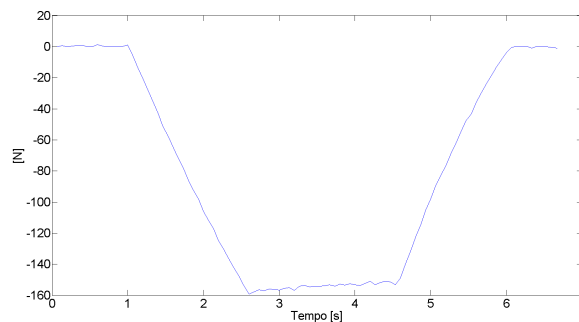
Per la prova effettuata sulla tibia estensimetrata il valore di carico scelto per la scalatura delle deformazioni è stato 176,4 N, ovvero il 15% del peso corporeo del donatore. Il valore dello spostamento dell'attuatore era stato preso a 6,976 mm. La prova tramite DIC, condotta anch'essa in controllo di spostamento ha quindi avuto spostamenti massimi dell'attuatore superiori di circa un millimetro rispetto a quelli della prova condotta con gli estensimetri.

Per quanto riguarda il carico massimo raggiunto nelle varie osservazioni è possibile notare come questo sia molto variabile e si discosti in maniera più o meno marcata dal carico di scalatura delle misure estensimetriche.

Il valore di carico applicato alla tibia subisce fluttuazioni anche nei vari stages a spostamento massimo a causa della non linearità e tempo-dipendenza tipica della risposta al carico che contraddistingue i tessuti biologici. Di seguito vengono graficati gli andamenti dei valori di carico e spostamento registrati dai canali analogici in funzione del tempo per l'osservazione dal basso del lato mediale. I valori graficati hanno segno negativo poichè lo spostamento dell'attuatore durante le prove era verso il basso.



(a) Spostamento.



(b) Carico.

Figura 4.25: Valori di carico e spostamento in funzione del tempo raggiunti durante l'osservazione dal basso dal lato del mediale. Da notare come nel tratto a spostamento massimo il carico non si mantenga costante. Le fluttuazioni sono da imputare al comportamento non lineare del materiale testato.

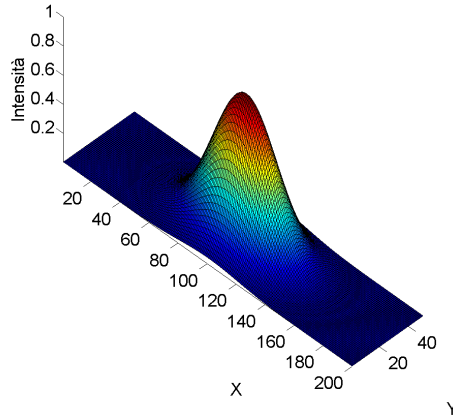
Per effettuare un confronto sulle deformazioni si è scelto di scalare i valori di deformazione ottenuti nei vari stages al valore di carico della prova effettuata con gli estensimetri. Tale assunzione di linearità nella risposta della tibia è valida nel campo di deformazioni studiato. Si è scelto comunque di fissare una soglia di validità per l'ammissione dei vari stages al confronto. Sono stati ammessi solo gli stages nei quali il carico applicato differisse in valore assoluto al massimo del 20% rispetto ai 176,4 N utilizzati per scalare le deformazioni estensimetriche.

In questo modo per le varie osservazioni il numero di stages validi è risultato:

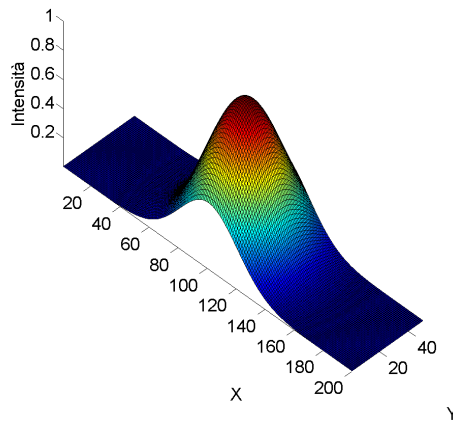
Osservazione	Numero di stages ammessi al confronto
Dal basso mediale	34
Dal basso laterale	31
Dall'alto mediale	31
Dall'alto laterale	31
Frontale mediale	0
Frontale laterale	32

L'osservazione frontale dal lato del laterale è stata esclusa dall'elaborazione dati in quanto contraddistinta da valori di carico troppo distanti da quelli registrati nella prova sulla tibia estensimetrata.

Una volta determinati quali stages fossero utilizzabili per il confronto, ed ottenute le corrispondenti informazioni scalate sulle deformazioni, queste ultime sono state filtrate con filtri passa basso a frequenza spaziale di cut-off decrescente. La sequenza di frequenze spaziali di cut-off implementate nei filtri è stata: 20, 10, 5, 1. Tali valori di frequenza si intendono misurati in numero di punti di discretizzazione del facet field. Per conservare la forte direzionalità del facet field, esteso principalmente in lunghezza a causa della forma allungata della tibia, i filtri passa basso utilizzano una funzione di trasferimento che crea una campana a base ellittica, e non circolare come nei casi precedenti. In figura 4.26 vengono comparati i grafici tridimensionali delle due funzioni di trasferimento prima citate.



(a) Rappresentazione tridimensionale del filtro con campana a base ellittica.



(b) Rappresentazione tridimensionale del filtro con campana a base circolare.

Figura 4.26: Nelle due figure vengono messe a confronto i grafici 3D di un filtro passa-basso ellittico e di uno circolare con frequenza di cut-off pari a 20 su base con dimensioni in rapporto 4:1. Si può notare come il grafico della funzione a base ellittica abbia un andamento meglio scalato rispetto alle dimensioni della base.

Dopo aver estratto i valori di deformazione, filtrati e non, nei punti individuati precedentemente tramite gli stage points, è stato effettuato un confronto per determinare quale filtro rappresentasse meglio le deformazioni misurate dagli estensimetri.

Il confronto è stato effettuato sulle deformazioni rilevate lungo gli assi del sistema di riferimento utilizzati dal software DIC. Il sistema di riferimento è stato adattato per ogni inquadratura in modo da rispettare le giaciture originariamente scelte per le rosette estensimetriche. L'asse x è stato posizionato sulla direzione utilizzata per la griglia a 0°, quello delle y sulla direzione della griglia a 90°. Un esempio dei sistemi di riferimento così costruiti è riportato in figura 4.27 dove è rappresentato quello scelto per l'inquadratura laterale dal basso. La scelta di effettuare il confronto in termini di deformazioni lungo gli assi x-y e non lungo le direzioni principali è legata sia alla volontà di creare una continuità con i risultati ricavati nelle precedenti sezioni, sia alla scarsa affidabilità del sistema Aramis nella determinazione delle direzioni e delle deformazioni principali [10].

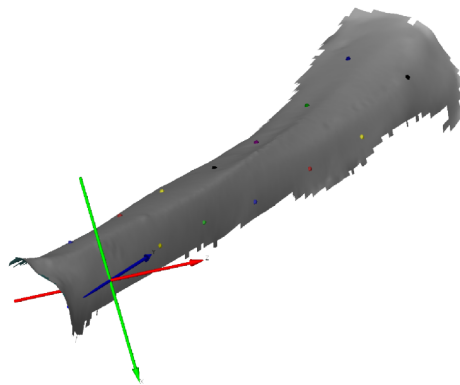


Figura 4.27: Immagine 3D della tibia come ricostruita da Aramis nella vista laterale dal basso. Sono riportate le posizioni degli stage points visibili in questa inquadratura del provino (posteriori e laterali) ed il sistema di riferimento adottato nel calcolo delle deformazioni.

4.4.2.1.3 Metodologia di confronto Per permettere il confronto fra le deformazioni, viste le premesse appena descritte, si è resa necessaria la trasformazione dei risultati di deformazione ricavati dalle rosette estensimetriche. In particolare si è passati dalle deformazioni lungo le direzioni principali a quelle originariamente trovate su ciascuna griglia estensimetrica. Il

passaggio è stato possibile utilizzando le seguenti formule matematiche:

$$\varepsilon_{0^\circ} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos(2\phi) = \varepsilon_x;$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos[2(\phi + 45^\circ)];$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos[2(\phi + 90^\circ)] = \varepsilon_y;$$

In cui ε_1 ed ε_2 sono le deformazioni principali derivanti dalla misura estensimetrica, mentre ϕ è l'angolo di giacitura della direzione principale rispetto al sistema di riferimento x-y. In figura 4.28 sono riportate le posizioni reciproche degli assi di riferimento.

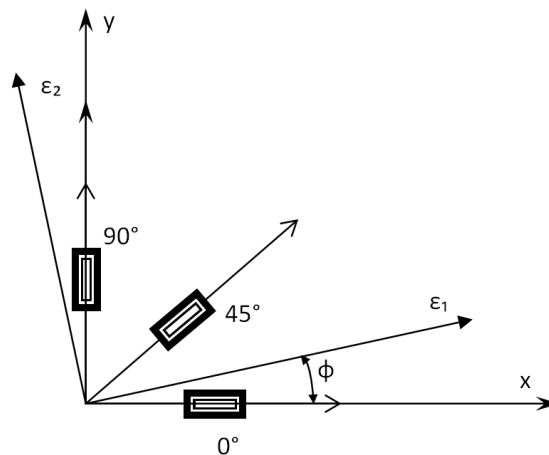


Figura 4.28: Schema di passaggio fra il sistema di riferimento delle griglie e quello degli assi individuati dalle direzioni principali. Da notare la coincidenza imposta fra asse x e posizione della griglia estensimetrica a 0° .

L'elaborazione per il confronto dei risultati è invece partita, per la prova tramite DIC, raggruppando a seconda dell'appartenenza ad uno stesso piano anatomico le deformazioni originali e filtrate determinate per ogni stage in corrispondenza dei vari stage points. Per questi punti è infatti nota la misura estensimetrica.

La scelta della configurazione di filtraggio migliore per ciascuna osservazione è stata poi vincolata al soddisfacimento di due condizioni:

- A)** Minimizzazione del valore di RMSE fra deformazioni estensimetriche e deformazioni rilevate dal sistema DIC, nei punti di applicazione delle rosette estensimetriche;
- B)** Conservazione dei gradienti di deformazione presenti sulla tibia e descritti dagli estensimetri.

La procedura per il raggiungimento del requisito A) può essere così schematizzata per ogni gruppo di punti appartenente allo stesso lato anatomico all'interno di ogni osservazione:

1. Per ciascun tipo di filtraggio è stato calcolato il valore di RMSE fra i valori di deformazione trovati negli stage points e la corrispondente misura estensimetrica;
2. I valori di RMSE per tipo di filtraggio trovati al punto 1. sono stati riuniti in un istogramma in modo da facilitare il confronto;

Per il raggiungimento del requisito B) è stato messo a punto il seguente metodo:

1. Per ciascun lato anatomico sono stati fittati i valori di deformazione estensimetrica noti. Il fittaggio scelto, di tipo lineare, è descritto da coefficiente angolare e intercetta della retta di best fit;
2. Per ciascuno stage e tipo di filtro è stato effettuato il fittaggio lineare fra le deformazioni determinate appartenenti ad uno stesso lato anatomico. Anche questi fittaggi sono determinati da coefficiente angolare ed intercetta della retta di best fit;
3. I valori di coefficiente angolare ottenuti dal fittaggio in 2. sono stati elaborati, calcolando il valore di RMSE rispetto ai corrispondenti coefficienti angolari delle deformazioni estensimetriche trovati in 1.;
4. I valori di RMSE in funzione al tipo di filtraggio sono stati riuniti in un istogramma per facilitarne la visualizzazione;

5. I punti 3. a 4. sono stati ripetuti anche per i valori di coefficiente angolare dei vari fittaggi lineari determinati in 2.

In questo modo sono disponibili tre istogrammi per ogni gruppo di punti appartenenti ad un medesimo lato anatomico e contenuti nella stessa osservazione. Dal confronto dei risultati ottenuti in termini di scostamento dalla misura estensimetrica viene scelto il tipo di filtraggio ottimale da utilizzare in ognuna delle sei osservazioni. In particolare si cerca di trovare il tipo di filtraggio meglio performante in tutte le situazioni. In caso non vi sia nessun filtro che prevalga nettamente viene utilizzato quello meno invasivo sullo spettro di Fourier, ovvero quello a frequenza spaziale di cut-off maggiore.

I filtri di ottimo così determinati sono stati utilizzati per filtrare gli stage componenti le varie osservazioni e determinare l'andamento delle deformazioni. I risultati qui riportati si riferiscono alla ϵ_x per ragioni di brevità e per i motivi precedentemente enunciati 4.4.2.1.2.

4.4.2.2 Risultati

In tabella 4.3 sono riassunti i risultati della prova condotta sulla tibia estensimetrata. Per ognuno dei 28 punti di applicazione delle rosette sono riportati deformazione massima, deformazione minima, angolo di giacitura degli assi principali e deformazioni lungo la griglia a 0° e 90° . I valori sono stati scalati e mediati sulle 6 ripetizioni della prova di flessione a sbalzo P-A.

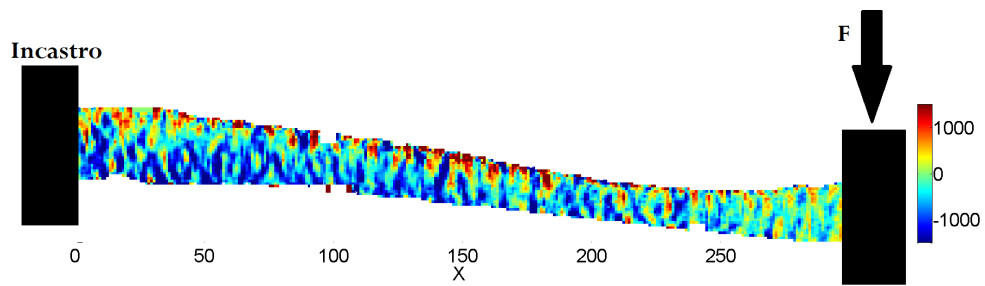
L'estensimetro posizionato sul livello 1 del piano laterale al momento delle misurazioni non era attivo. L'estensimetro posizionato al livello 5 sul piano anteriore era invece mal posizionato come riportato in [10] e come visibile dal dato molto differente di angolo di giacitura rispetto all'andamento degli estensimetri adiacenti. Il dato dell'estensimetro L1 è stato quindi eliminato dal computo degli stage points, mentre quello dell'estensimetro A5 è stato rimosso dai fittaggi sul gradiente delle deformazioni sull'anteriore.

Nelle figure 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 sono riportate le deformazioni lungo l'asse x rilevate dall'elaborazione effettuata tramite DIC. Sono riportati per ogni osservazione i risultati di deformazione puntuale riscontrati nel facet field scelto, l'immagine elaborata dal sistema Aramis nell'osservazione esaminata con indicate posizioni di carico, incastro e punti dei lati anatomici

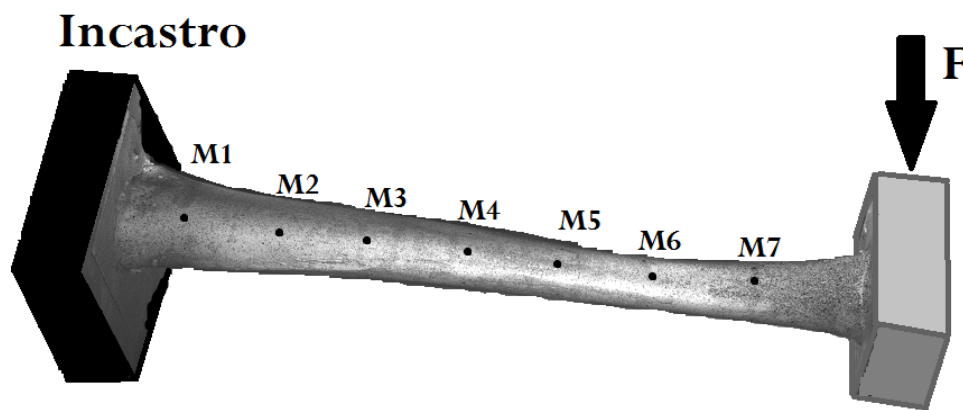
visibili. Viene inoltre riportata la posizione del punto di vista in esame rispetto alla tibia. I risultati sono riferiti ad uno degli stages acquisiti a spostamento massimo di ciascuna osservazione.

	Livelli	ϵ_{max} [$\mu\epsilon$]	ϵ_{min} [$\mu\epsilon$]	Angolo [$^{\circ}$]	ϵ_x [$\mu\epsilon$]	ϵ_y [$\mu\epsilon$]
Anteriore	A1	879	-418	1	879	-418
	A2	887	-324	-1	886	-324
	A3	764	-281	5	756	-273
	A4	911	-361	1	911	-361
	A5	85	-193	-89	-193	85
	A6	668	-211	-6	659	-202
	A7	408	-80	-4	406	-78
Laterale	L1	-	-	-	-	-
	L2	75	-420	83	-412	68
	L3	83	-17	15	76	-10
	L4	101	-238	84	-234	98
	L5	716	-263	-9	692	-239
	L6	72	-122	55	-59	9
	L7	112	-190	47	-47	-31
Mediale	M1	126	-309	86	-307	124
	M2	176	-443	78	-416	150
	M3	131	-304	89	-304	131
	M4	125	-295	-85	-291	122
	M5	163	-132	-42	31	0
	M6	104	-188	-56	-98	14
	M7	12	-342	33	-94	-237
Posteriore	P1	332	-1046	86	-1040	326
	P2	356	-913	89	-913	355
	P3	347	-944	83	-926	329
	P4	272	-829	88	-828	271
	P5	259	-766	85	-757	251
	P6	224	-634	86	-630	219
	P7	166	-356	90	-356	166

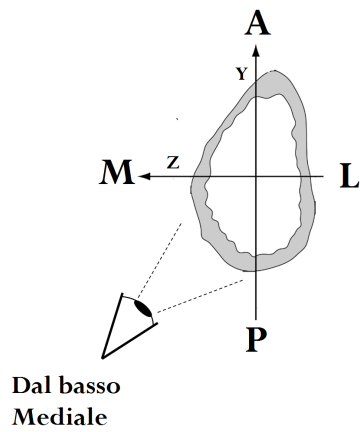
Tabella 4.3: Tabella riassuntiva delle misurazioni estensimetriche nella prova di flessione a sbalzo per valori di spostamento massimo.



(a) ϵ_x

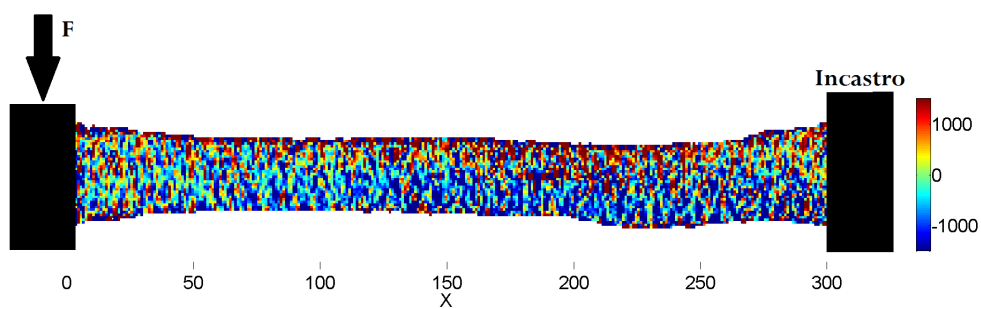


(b) Immagine elaborata.

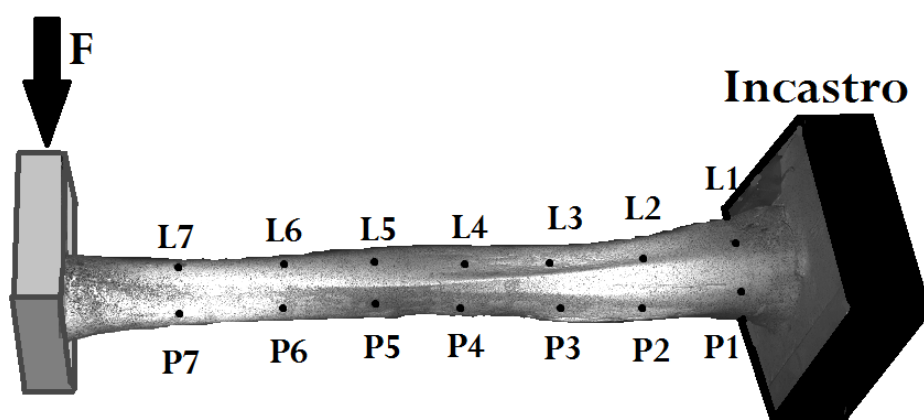


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

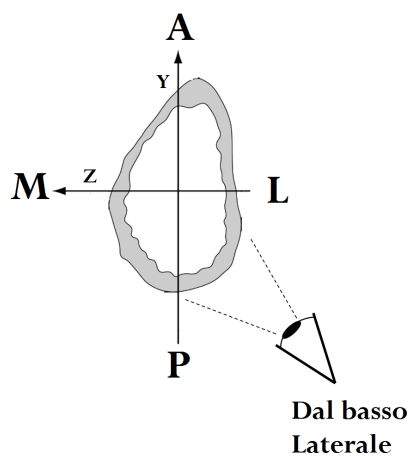
Figura 4.29: Osservazione dal basso dal lato del mediale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.



(a) ϵ_x

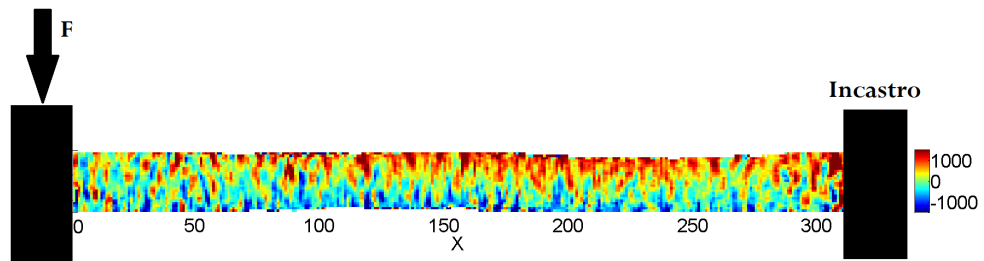


(b) Immagine elaborata

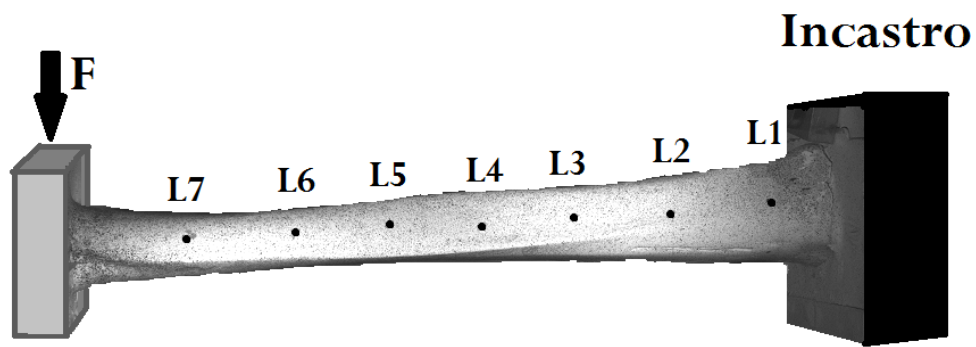


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

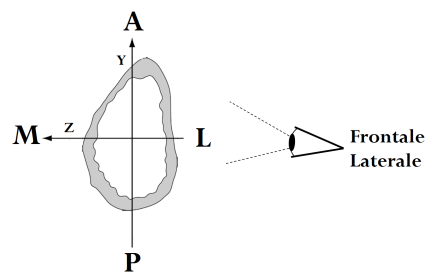
Figura 4.30: Osservazione dal basso dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.



(a) ϵ_x

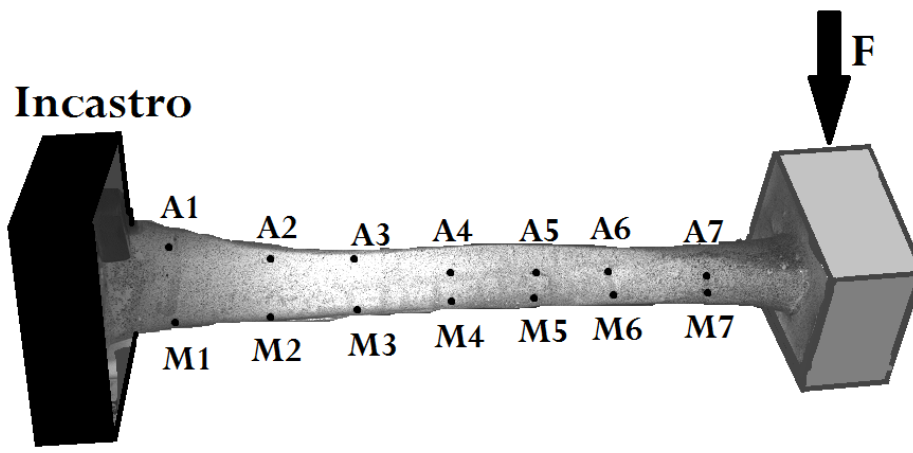
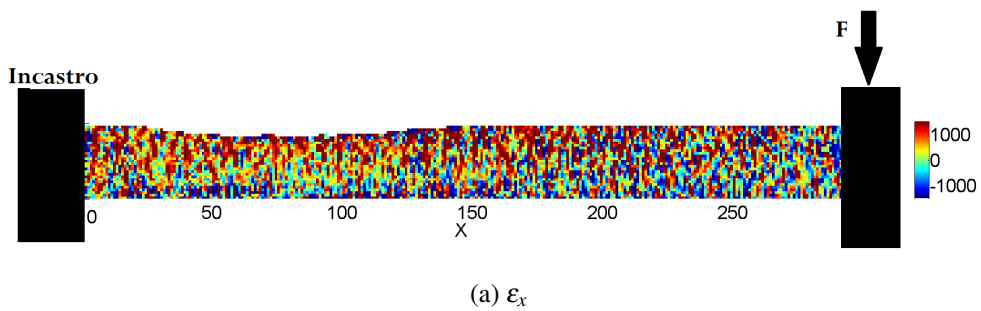


(b) Immagine elaborata

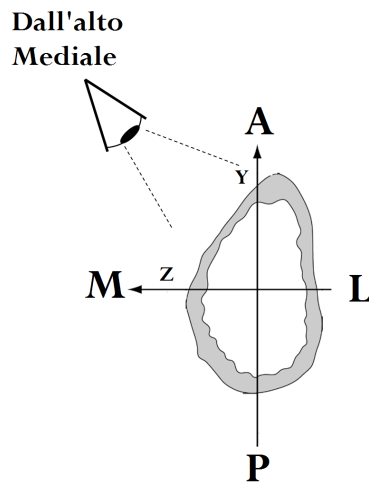


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

Figura 4.31: Osservazione frontale dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.

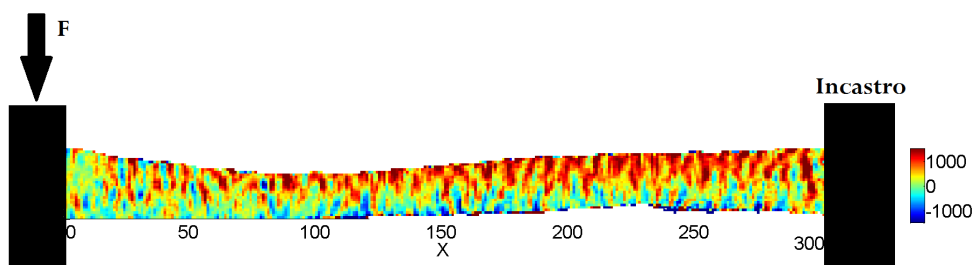


(b) Immagine elaborata.

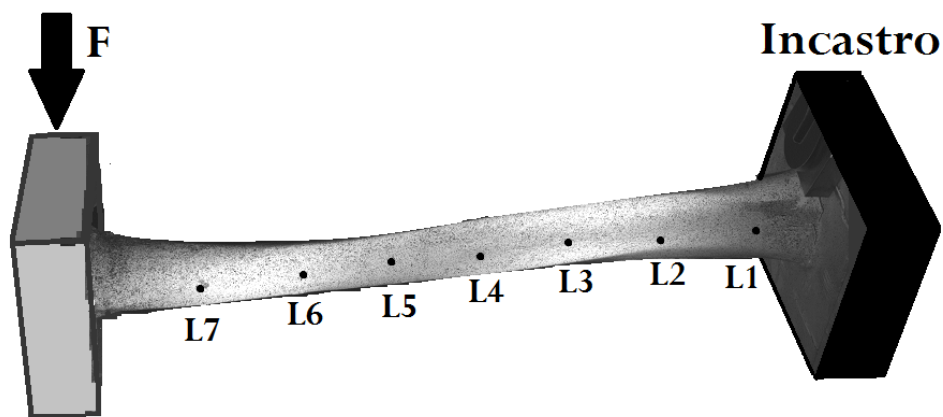


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

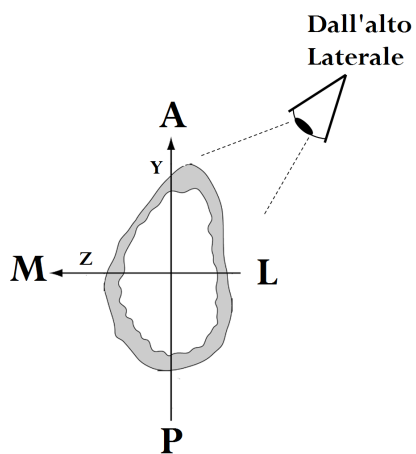
Figura 4.32: Osservazione dall'alto dal lato del mediale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.



(a) ϵ_x



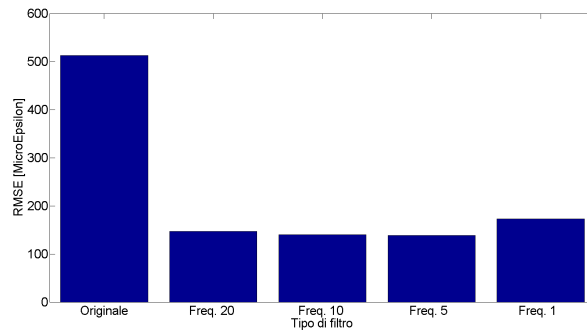
(b) Immagine elaborata.



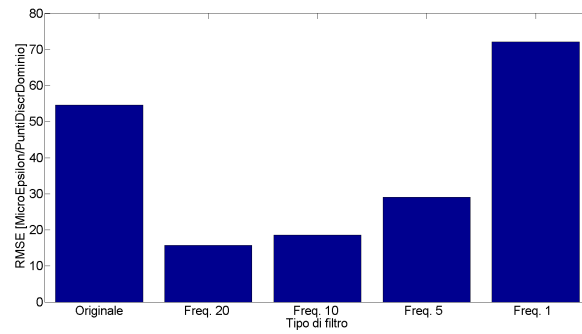
(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

Figura 4.33: Osservazione dall'alto dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.

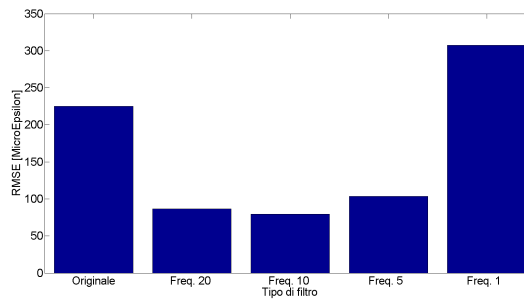
Vengono di seguito riportati i risultati del confronto prestazionale dei filtri implementati. Per ciascun gruppo di punti appartenente ad uno stesso lato anatomico vengono costruiti tre grafici a barre. Il primo riassume i valori di RMSE puntuali fra misurazioni DIC filtrate e misurazioni estensimetriche. I valori di RMSE sono espressi in $\mu\epsilon$. Il secondo riassume i valori RMSE fra i coefficienti angolari del fittaggio lineare delle deformazioni filtrate di uno stesso lato anatomico ed il corrispondente coefficiente angolare del fittaggio delle deformazioni estensimetriche appartenenti a quel lato. I valori di RMSE per i coefficienti angolari sono espressi in $\mu\epsilon$ per punti di discretizzazione del dominio (punti di calcolo presenti nel facet field). Il terzo infine riassume i valori di RMSE fra le intercette dei fittaggi lineari di punti appartenenti ad uno stesso lato anatomico e la corrispondente intercetta del fittaggio fra le deformazioni estensimetriche. I valori di RMSE per le intercette sono espressi in $\mu\epsilon$. In tutti i grafici a barre sono riportati anche i valori di ciascuna tipologia di RMSE ricavabili utilizzando le deformazioni originariamente calcolate dal sistema DIC.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

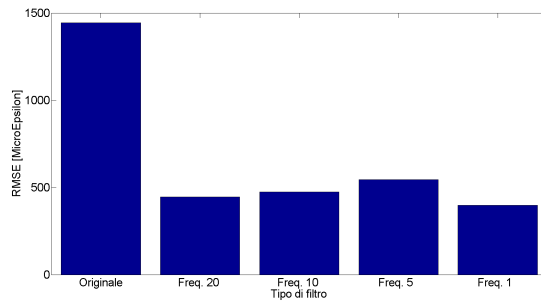


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

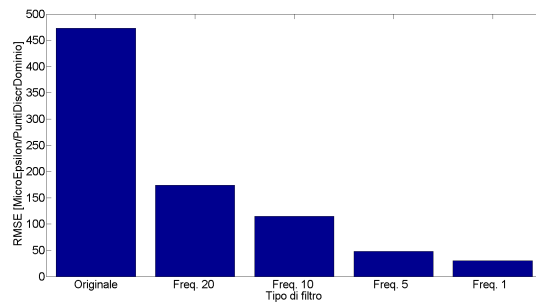


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

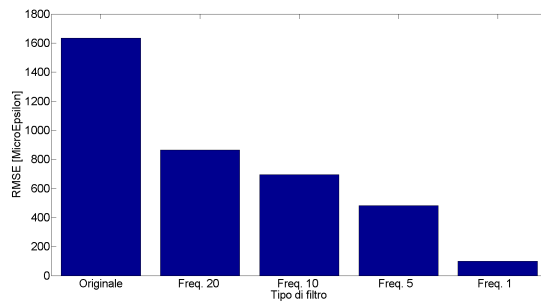
Figura 4.34: Osservazione dal basso dal lato del mediale. Confronto effettuato sui punti del mediale.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

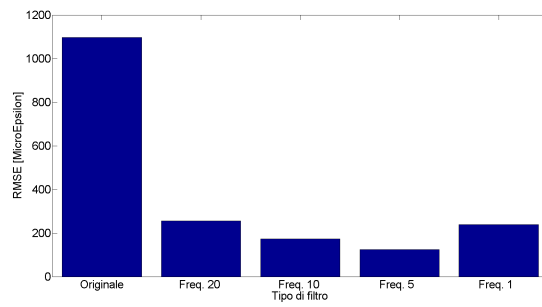


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

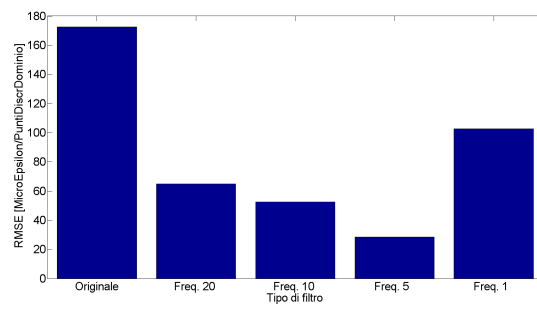


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

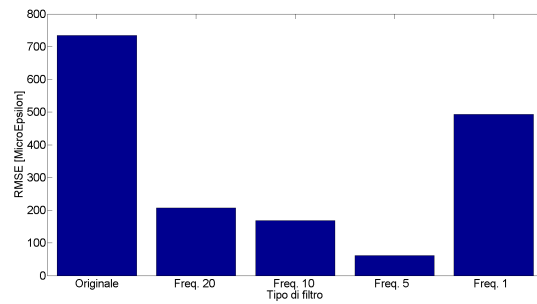
Figura 4.35: Osservazione dal basso dal lato del laterale. Confronto effettuato sui punti del laterale.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

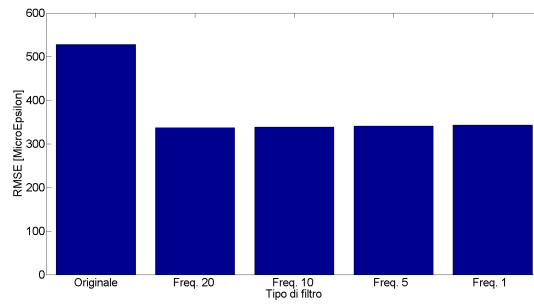


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

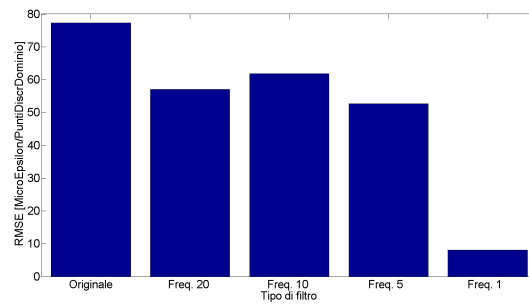


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

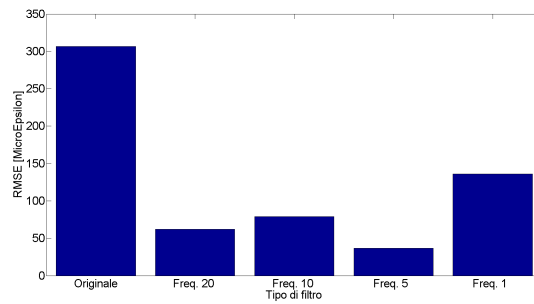
Figura 4.36: Osservazione dal basso dal lato del laterale. Confronto effettuato sui punti del posteriore.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

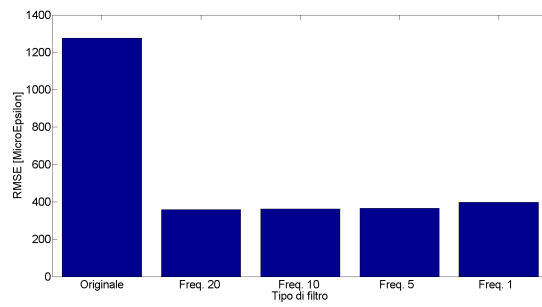


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

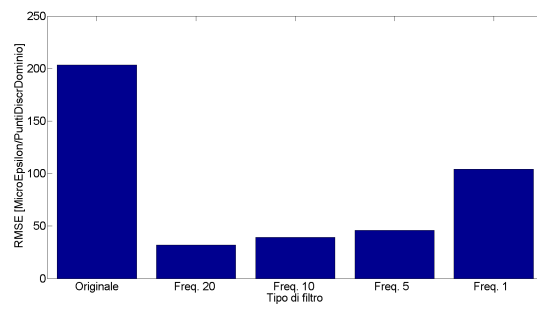


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

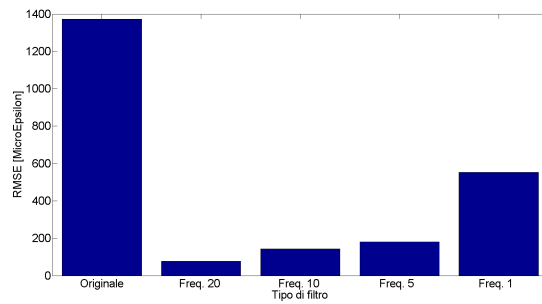
Figura 4.37: Osservazione frontale dal lato del laterale. Confronto effettuato sui punti del laterale.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

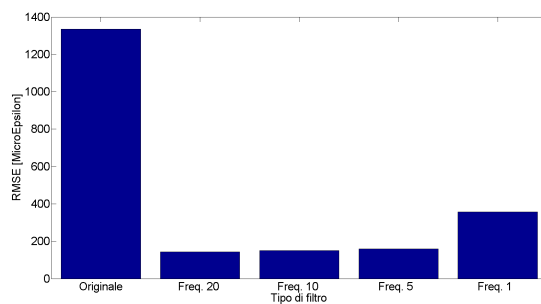


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

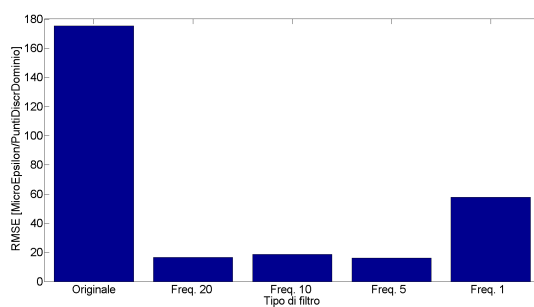


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

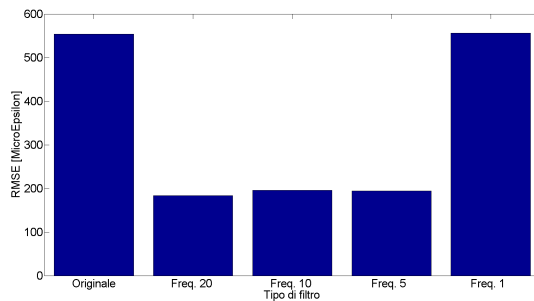
Figura 4.38: Osservazione dall'alto dal lato del mediale. Confronto effettuato sui punti del' anteriore.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.

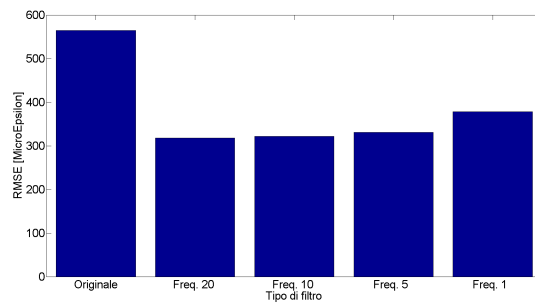


(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.

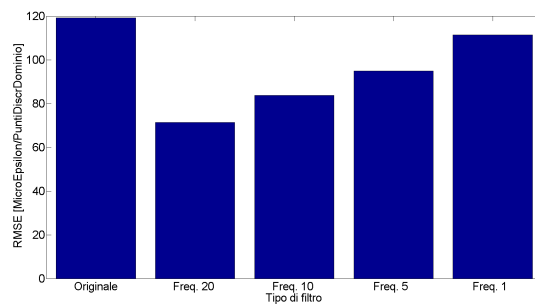


(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

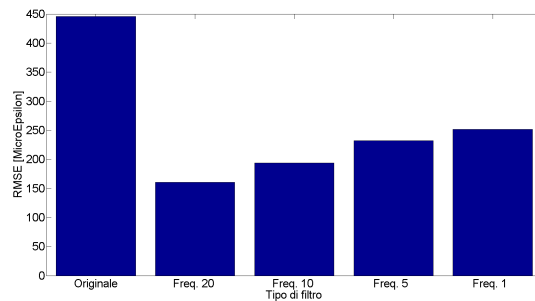
Figura 4.39: Osservazione dall'alto dal lato del mediale. Confronto effettuato sui punti del mediale.



(a) Grafico a barre delle differenze puntuali.



(b) Risultati del confronto fra coefficienti angolari dei fittaggi.



(c) Risultati del confronto fra le intercette dei fittaggi.

Figura 4.40: Osservazione dall'alto dal lato del laterale. Confronto effettuato sui punti del laterale.

Dai risultati riportati negli istogrammi è possibile notare come il filtraggio porti a valori di RMSE sempre migliori rispetto a quelli originariamente ottenibili dalla misura DIC. Va però notato come non vi sia un predominio prestazionale di un tipo di filtraggio rispetto agli altri, ma anzi in quasi tutti i

confronti vi sono tipi di filtraggi che portano a risultati equivalenti in termini di RMSE.

Osservando gli istogrammi viene creata la tabella 4.4. Per le varie osservazioni e lati anatomici vengono riportati i tipi di filtraggio migliori determinando quale filtro per ciascun grafico a barre minimizzi il valore corrispondente di RMSE.

Dai risultati di tabella 4.4 è possibile notare come il filtro che nella maggioranza dei confronti (15 su 21) offre le migliori prestazioni sia quello con frequenza spaziale di cut-off pari a 20. Tale filtro viene quindi scelto per filtrare le distribuzioni di deformazioni nelle varie osservazioni. In questo modo viene realizzato un filtraggio uniforme su tutte le distribuzioni.

Nella successiva tabella 4.5 sono riportati alcuni dei risultati puntuali di deformazione determinati tramite il filtraggio scelto precedentemente. I valori si riferiscono ad un solo stage scelto per ogni osservazione. Viene riportato il nome dell'osservazione di riferimento, il punto preso in esame, la deformazione estensimetrica in quel punto e le deformazioni rilevate con il sistema DIC prima e dopo il filtraggio passa-basso alla frequenza di cut-off di ottimo. Per questi ultimi due dati viene computato anche l'errore assoluto e quello relativo commesso rispetto alla misura estensimetrica. Infine vengono determinati gli errori assoluti cumulativi prima e dopo l'applicazione del filtro.

Nelle tabelle 4.6 e 4.7 vengono poi confrontati i risultati del fittaggio dei gradienti di deformazione sulla misura su un singolo stage. I risultati sono quelli riferiti a prima e dopo l'applicazione del filtro di ottimo scelto in precedenza. Vengono riportati anche gli errori relativi rispetto al fittaggio sulle misure estensimetriche. Le pendenze si intendono espresse in $\mu\epsilon$ per punti di discretizzazione del dominio.

Nelle figure 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 e 4.45 sono riportati gli andamenti delle deformazioni determinate nei facet field considerati di ogni osservazione. Sono anche riportati i gradienti di deformazione presenti nelle posizioni degli stage points corrispondenti.

Osservazione	Lato anatomico	Frequenza di cut-off del filtro con prestazioni migliori		
		RMSE puntuale	RMSE coeff. angolari	RMSE intercette
Dal basso mediale	Mediale	20	20	20
Dal basso laterale	Laterale	20	1	1
	Posteriore	5	5	5
Frontale laterale	Laterale	20	1	20
Dall'alto mediale	Anteriore	20	20	20
	Mediale	20	20	20
Dall'alto laterale	Laterale	20	20	20

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva delle prestazioni dei vari filtri nelle diverse osservazioni. I filtri con prestazioni migliori riportati sono scelti su ogni grafico a barre quale portasse al minor RMSE.

Osservazione	Livelli	Eps x [$\mu\epsilon$]	ϵ_x [$\mu\epsilon$]	Err.	Err. Rel.	ϵ_x [$\mu\epsilon$]	Err.	Err. Rel.
		Estensimetri	DIC	Ass. [$\mu\epsilon$]	[%]	Filtrate	Ass. [$\mu\epsilon$]	[%]
Dall'alto Lato mediale	A1	879	2012	-1133	-129	438	441	-50
	A2	886	1532	-645	-73	934	-48	5
	A3	756	1209	-453	-60	724	32	-4
	A4	911	2198	-1287	-141	589	322	-35
	A5	-193	-485	292	-152	537	-730	-379
	A6	659	1195	-536	-81	580	79	-12
	A7	406	-92	498	123	206	200	-49
Dall'alto Lato laterale	L1	-	-	-	-	-	-	-
	L2	-412	-259	-154	37	28	-441	-107
	L3	76	19	58	76	70	6	-8
	L4	-234	-326	92	-39	155	-389	-166
	L5	692	-370	1061	153	-5	696	-101
	L6	-59	1194	-1252	2137	135	-193	-330
	L7	-47	-299	252	-535	111	-158	-335
Dall'alto Lato mediale	M1	-307	-537	230	-75	-181	-126	-41
	M2	-416	-497	81	-19	-461	45	11
	M3	-304	232	-535	176	-246	-58	-19
	M4	-291	364	-655	225	-215	-76	-26
	M5	31	18	14	43	0	31	-99
	M6	-98	163	-261	267	-70	-28	-28
	M7	-94	-819	726	-774	-117	23	25
Dal basso Lato laterale	P1	-1040	-2631	1591	-153	-1050	10	1
	P2	-913	-252	-660	72	-963	50	6
	P3	-926	-2137	1211	-131	-927	1	0
	P4	-828	-1156	328	-40	-955	127	15
	P5	-757	-3103	2346	-310	-898	141	19
	P6	-630	-320	-310	49	-740	109	17
	P7	-356	-1093	737	-207	-562	206	58
Errore totale				1633				275

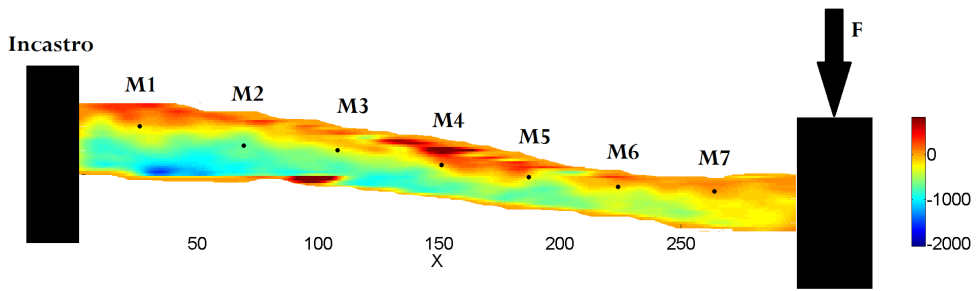
Tabella 4.5: Tabella riassuntiva di esempi delle differenze puntuali fra pre e post filtraggio. Per i diversi punti sono riportati errore assoluto e relativo in configurazione non filtrata e filtrata.

Osservazione	Lato anatomico	Pendenza da estensimetri	Pendenza DIC	Err. Rel. [%]	Pendenza filtrato	Err. Rel. [%]
Dal basso Laterale	Posteriore	99	125	-26	69	30
	Laterale	67	-315	570	43	37
Dal basso Mediale	Mediale	58	19	67	45	21
Frontale Laterale	Laterale	67	-97	244	-6	109
Dall'alto Mediale	Anteriore	-101	-393	-289	-46	54
	Mediale	58	-129	324	37	35
Dall'alto Laterale	Laterale	67	94	-40	46	31

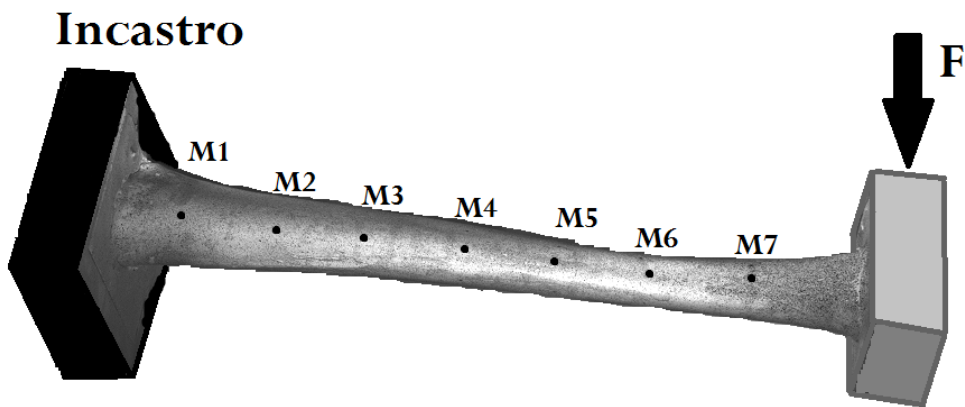
Tabella 4.6: Tabella riassuntiva delle pendenze riscontrate nei fittaggi fra misure estensimetriche, originali DIC e filtrate con frequenza spaziale di cut-off pari a 20.

Osservazione	Lato anatomico	Intercetta Estensimetri [$\mu\epsilon$]	Intercetta DIC	Err. Rel. [%]	Intercetta Filtrato [$\mu\epsilon$]	Err. Rel. [%]
Dal basso Laterale	Posteriore	-1176	-2029	-72	-1148	2
	Laterale	-232	1336	675	-160	31
Dal basso Mediale	Mediale	-441	-361	18	-358	19
Frontale Laterale	Laterale	-232	729	414	158	168
Dall'alto Mediale	Anteriore	1018	2863	-181	773	24
	Mediale	-441	-74	83	-211	52
Dall'alto Laterale	Laterale	-232	-335	-44	-6	97

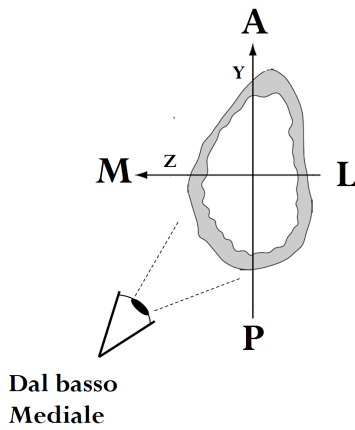
Tabella 4.7: Tabella riassuntiva delle intercette riscontrate nei fittaggi fra misure estensimetriche, originali DIC e filtrate con frequenza spaziale di cut-off pari a 20..



(a) ϵ_x

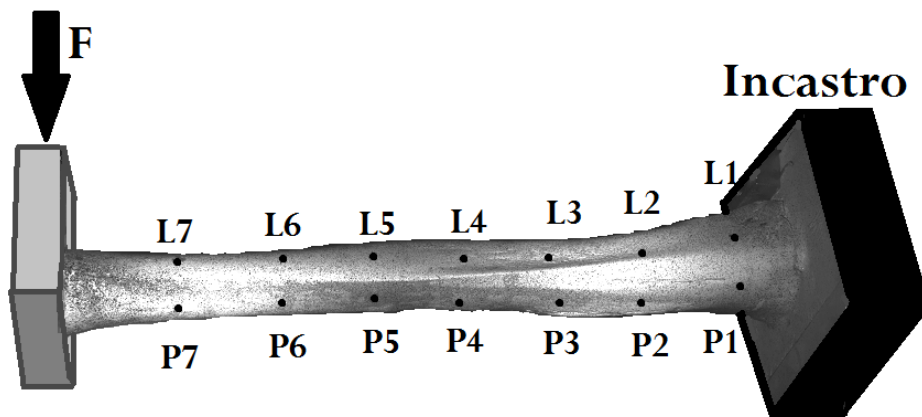
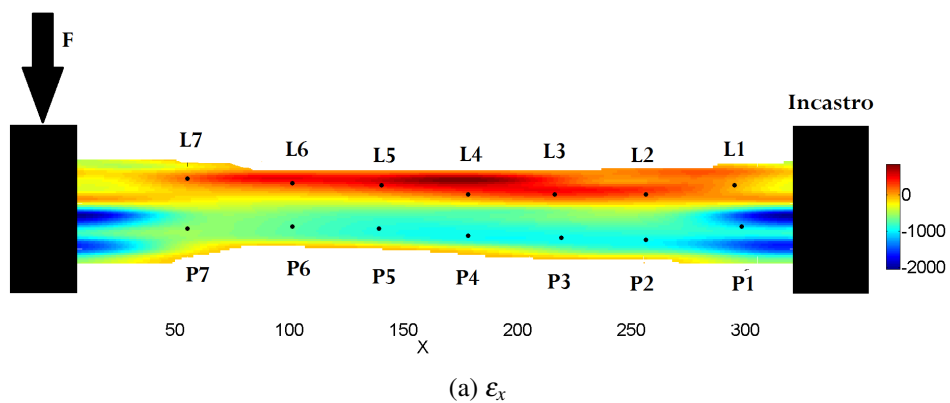


(b) Facet field e posizione degli stage points elaborati.

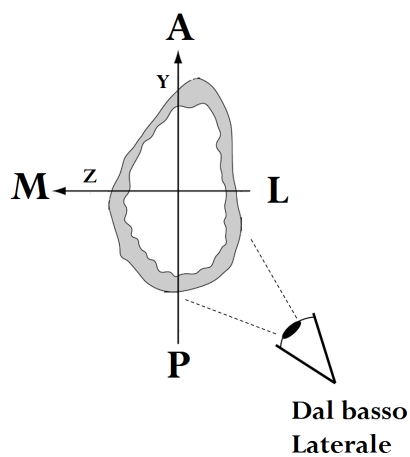


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

Figura 4.41: Osservazione dal basso dal lato del mediale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.

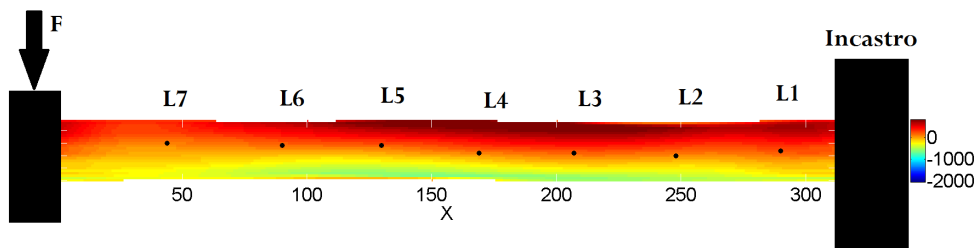


(b) Facet field e posizione degli stage points elaborati.

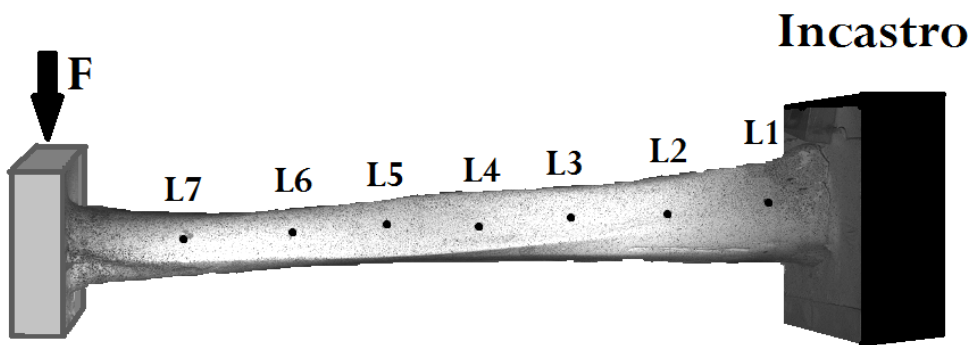


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

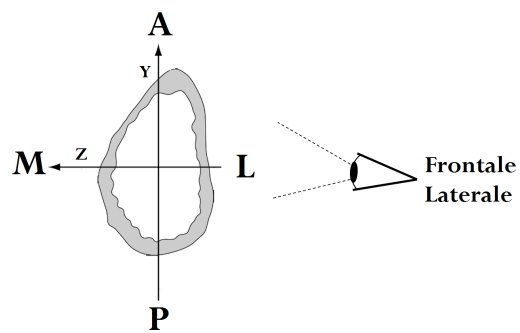
Figura 4.42: Osservazione dal basso dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.



(a) ϵ_x

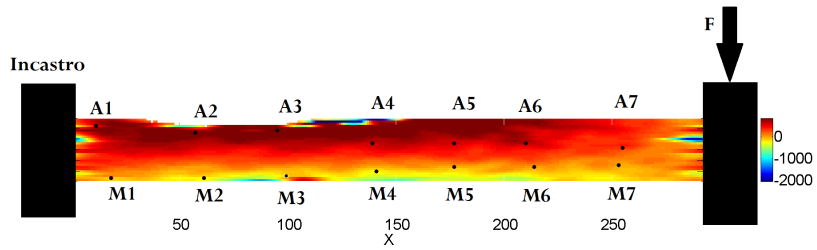


(b) Facet field e posizione degli stage points elaborati.

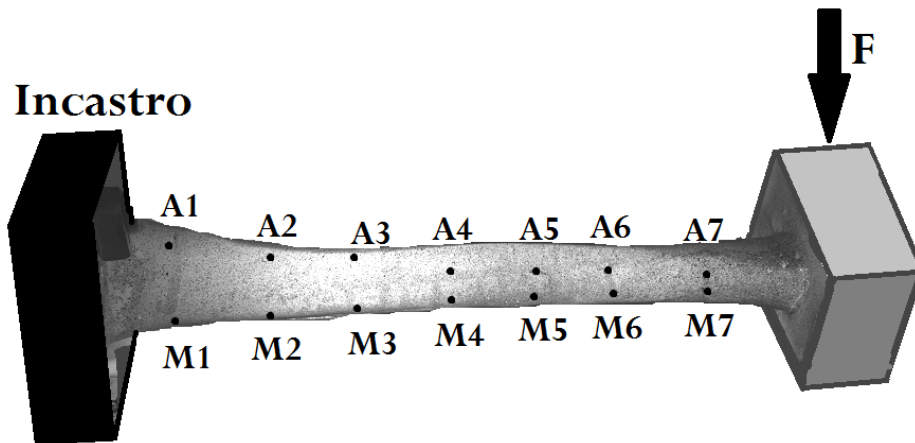


(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

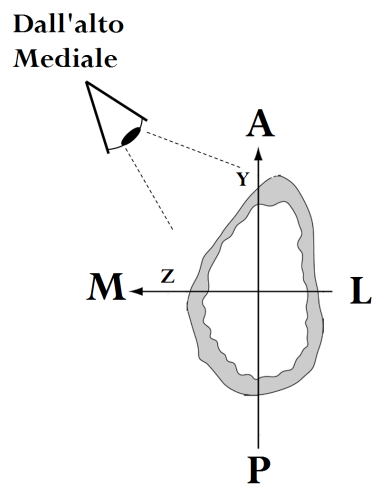
Figura 4.43: Osservazione frontale dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.



(a) ϵ_x



(b) Facet field e posizione degli stage points elaborati.



(c) Posizione del punto di vista nell'osservazione della tibia.

Figura 4.44: Stage 30, osservazione dall'alto dal lato del mediale.

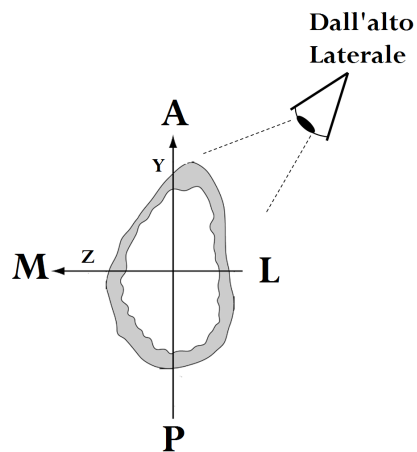
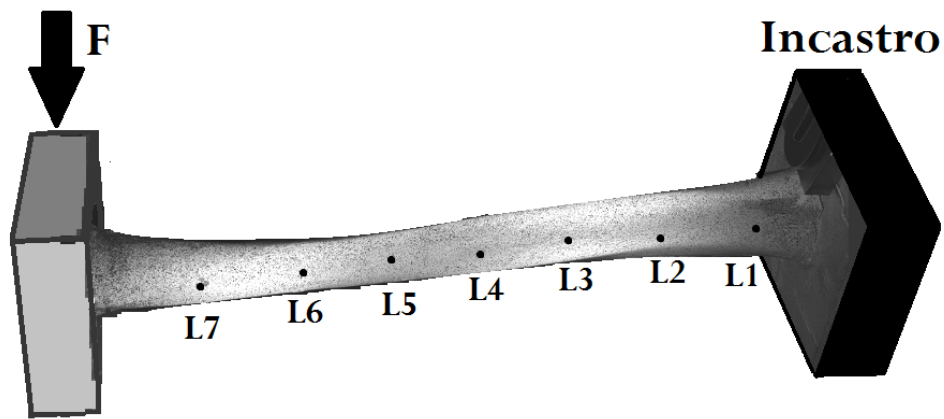
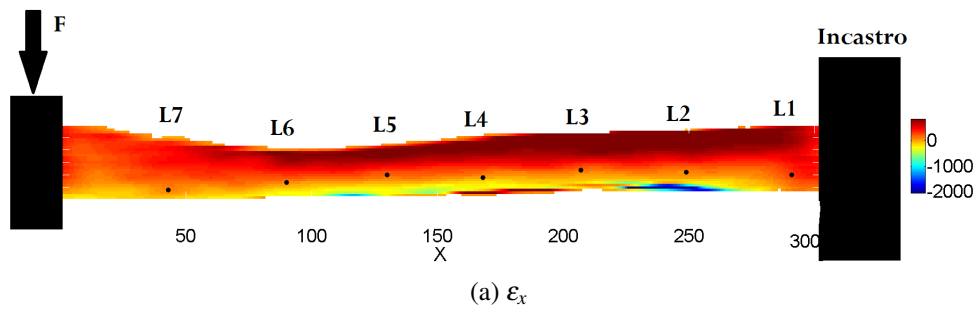


Figura 4.45: Osservazione dall'alto dal lato del laterale, flessione a sbalzo P-A a spostamento imposto massimo.

4.4.2.3 Conclusioni

Dal confronto delle deformazioni prima e dopo il filtraggio emerge come i valori risultanti rispecchino meglio gli andamenti delle deformazioni trovati tramite le misure estensimetriche. Risultano in particolare più visibili le zone in trazione e compressione caratteristiche delle deformazioni di flessione e sono completamente sparite le macchie che contraddistinguevano le misura non filtrate.

Il metodo di filtraggio passa-basso applicato a provini di tessuto biologico presenta maggiori difficoltà rispetto all'applicazione su materiali metallici. In particolare il principale problema incontrato è stata l'impossibilità di determinare a priori uno spettro di Fourier delle deformazioni teoriche. Questo rende impossibile una predizione esatta della quantità di rumore rimosso ed informazione persa in seguito all'applicazione del filtro.

L'utilizzo delle rosette estensimetriche come strumento di confronto sposta l'analisi delle prestazioni dal dominio delle frequenze a quello spaziale. Le informazioni puntuali, nonostante il livello di complicazione sperimentale raggiunto applicando 28 rosette sulla tibia, rimangono scarse dal punto di vista quantitativo. Sono infatti note le deformazioni di 7 o 14 punti per ogni osservazione a fronte di un facet field da determinare che ha una composizione variabile dai 5000 ai 10000 punti a seconda dell'osservazione esaminata.

La decisione su quale frequenza di cut-off adottare per l'implementazione del filtro viene quindi lasciata allo sperimentatore che si trova a valutare volta per volta quale filtro utilizzare. Sono stati messi a punto degli indicatori sulle prestazioni dei vari filtri (differenza puntuale dei risultati e prestazioni nel fittaggio) in modo da facilitare tali decisioni.

I risultati riportati in 4.5 mostrano in generale il notevole miglioramento della congruenza fra le deformazioni estensimetriche e quelle determinate tramite DIC in seguito al filtraggio. L'errore relativo scende al di sotto del 20% nella maggior parte dei casi. L'errore assoluto totale passa poi da 1633 $\mu\epsilon$ a 275. L'osservazione dei dati mostra alcuni limiti nella determinazione puntuale delle deformazioni sul lato laterale: le deformazioni determinate risul-

tano costantemente più basse rispetto a quelle determinate dagli estensimetri. Altre discordanze sono rilevabili per il valore puntuale di deformazione determinato nel livello A5.

I risultati relativi ai gradienti di deformazione riportati in 4.5 mostrano come i gradienti siano meglio rispettati in seguito al filtraggio nella maggior parte dei casi ma confermano l'inesattezza dei risultati per i punti appartenenti al laterale.

Tali inesattezze possono essere ricondotte all'intervento di più fattori:

- Problematiche dovute al riposizionamento di provino e carichi in seguito alla prova estensimetrica;
- Problematiche dovute al posizionamento degli estensimetri. L'ipotesi su cui si basa il passaggio fra sistema di riferimento delle griglie estensimetriche e sistema di riferimento utilizzato dal sistema DIC è che le griglie a 0° siano posizionate sulla stessa linea comune. Errori di posizionamento sulle griglie, come quello verificatosi per il livello A5, portano a risultati incongruenti.
- Problemi di illuminazione del provino e di contrasto nel pattern. Il fatto che il problema si verifichi sempre dal lato del laterale può indicare che in tali osservazioni non vi fosse una corretta illuminazione.

4.5 Elaborazione di un filtro Notch per ridurre l'aliasing nei risultati di deformazione

La scarsa qualità del pattern e condizioni di illuminazione non ottimali possono generare aliasing nei risultati di deformazione. Il fenomeno, legato agli algoritmi di calcolo del software, è in generale da prevenire migliorando il contrasto, l'illuminazione del pattern e scegliendo le dimensioni ottimali degli speckle in funzione della finestra di misura in uso. Detto questo, nella presente sezione si intende esplorare il fenomeno dell'aliasing e stabilire se strategie di filtraggio in frequenza appropriate possano fare recuperare risultati affetti da questo problema. In particolare ci si è chiesti se i filtri Notch possano essere di aiuto in tale recupero.

4.5.1 Esplorazione del fenomeno di aliasing

La prima parte della prova si è concentrata nella valutazione del fenomeno dell'aliasing e sulla possibilità di ridurne l'entità adattando la finestra di misura alle caratteristiche del pattern osservato.

4.5.1.1 Materiali e metodi

La prova viene effettuata sulla trave a sbalzo in alluminio descritta in 2.2.2 e visibile in figura.

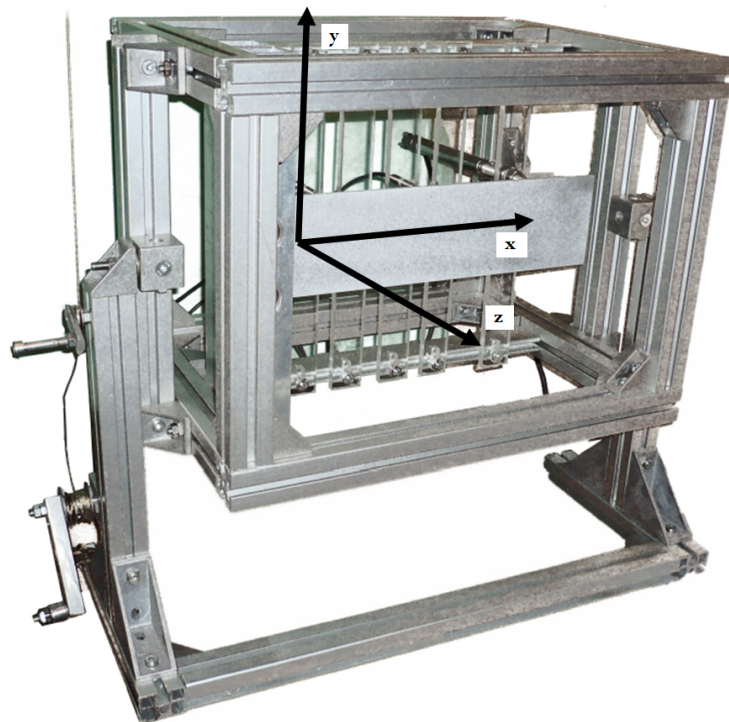


Figura 4.46: Strumentazione per prove su trave a sbalzo utilizzata con indicato il sistema di riferimento utilizzato.

Come già accennato in precedenza il pattern sulla sua superficie si è deteriorato ed ha perso in contrasto e qualità degli speckle.

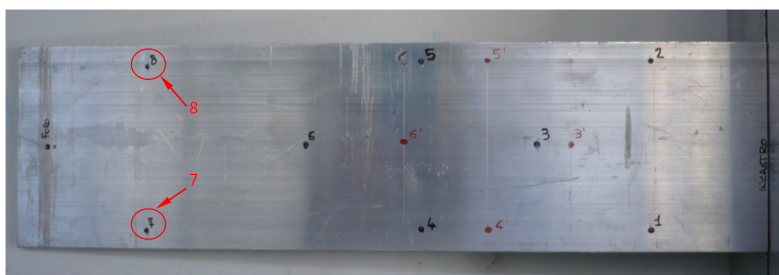


Figura 4.47: Punti di contatto degli LVDT utilizzati nella prova con la piastra piana in alluminio.

Sulla struttura sono stati montati 2 LVDT posti nei seguenti punti in riferimento alla figura 4.47:

Punto	Distanza
7	300
8	300

Il provino è stato poi osservato con una finestra di misura 200 x 170 mm da una distanza di 1300 mm come da indicazioni del manuale GOM ([7]). Una volta azzerate le posizioni degli LVDT è iniziata l'acquisizione dei frames. Sono stati imposti 12 scalini di spostamento con la freccia sugli LVDT incrementata di 1mm per volta. Per ogni scalino sono stati registrati 20 frames impostando una frame rate di 10 Hz. In totale sono stati ottenuti 260 stages di cui i primi 20 a provino scarico.

In fase di elaborazione è stato creato un facet field che contenesse tutta la porzione di trave registrata nei frames per un totale di 2419 pixels in lunghezza e 873 in altezza. I parametri del software scelti sono stati quindi:

- Facet size: 28
- Facet step: 12
- Computation window: 5;
- Validity quote: 100%;

I risultati così ottenuti sono stati esportati insieme ai valori di spostamento degli LVDT registrati per ogni stage dai canali analogici.

La prova è stata successivamente ripetuta modificando la posizione delle camere e la distanza da cui era ripreso il provino. In particolare si è scelto di utilizzare una finestra di misura di 125 x 100 mm con una distanza di misura di 845 mm.

Al provino sono stati applicati gli stessi scalini di spostamento descritti nel passo precedente. Sono stati anche qui acquisiti 260 frames.

La prova è stata quindi elaborata utilizzando gli stessi parametri visti in precedenza ad eccezione delle dimensioni del facet field che sono state adatte alla nuova porzione di piastra inquadrata. In figura il confronto fra due frames corrispondenti nelle due prove.

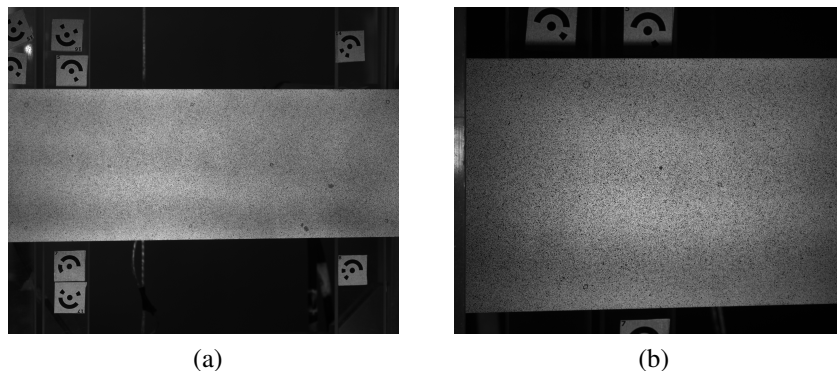


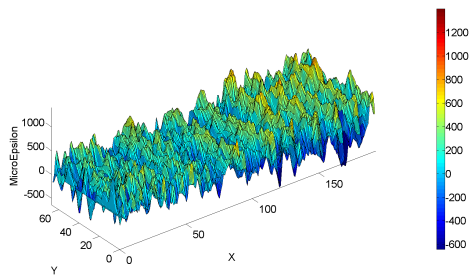
Figura 4.48: Confronto fra i frames ricavati rispettivamente con finestra di misura 200 x 170 mm e 125 x 100 mm.

I risultati ottenuti dall'elaborazione sono stati anche in questo caso esportati assieme ai dati derivanti dai canali analogici.

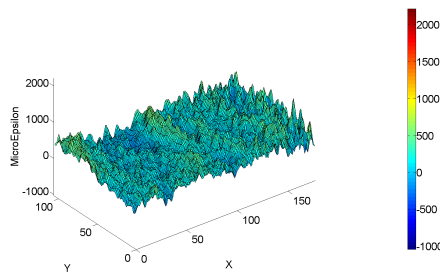
4.5.1.2 Risultati

Dall'elaborazione dei dati delle prove precedenti emerge come il fenomeno di aliasing si sia presentato maggiormente nella prima prova, quella con finestra di misura 200 x 170 mm.

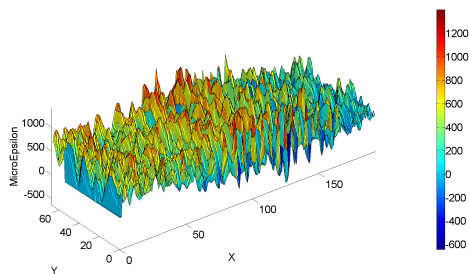
In figura 4.49 sono riportate le deformazioni lungo l'asse x (seguendo il sistema di coordinate riportato in 4.46) per gli stages 60 e 200. Vengono raffrontati i risultati ottenuti nella prova con finestra di misura 200 x 170 mm con quelli derivanti dalla prova con finestra 125 x 100 mm. In questi stages la freccia applicata era rispettivamente di 3 e 10 mm.



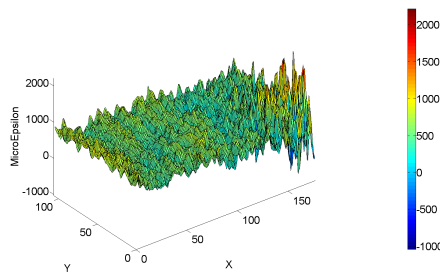
(a) Stage 60 della prova con finestra di misura 200 x 170 mm



(b) Stage 60 della prova con finestra di misura 125 x 100 mm.



(c) Stage 200 della prova con finestra di misura 200 x 170 mm.

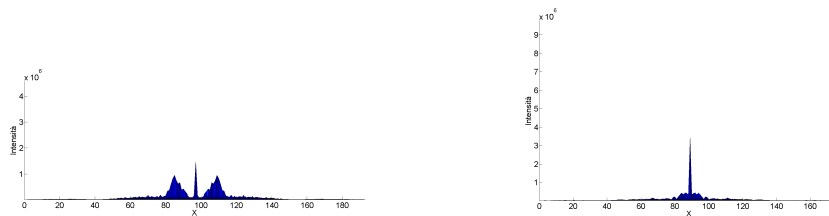


(d) Stage 200 della prova con finestra di misura 125 x 100 mm.

Figura 4.49: Esempi delle deformazioni riscontrate nelle due prove.

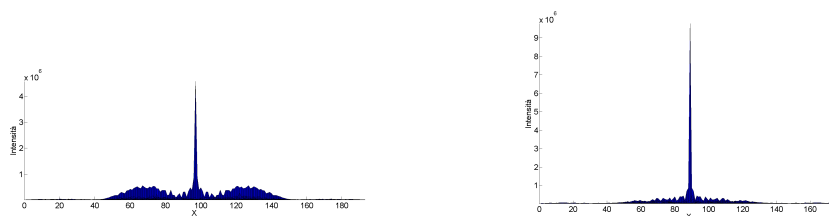
Dal confronto dei risultati emerge subito come nella prova effettuata con finestra di misura 200 x 170 mm siano presenti le sinusoidi tipiche del fenomeno di aliasing. Nella prova con finestra ridotta le sinusoidi scompaiono quasi del tutto.

Questa disposizione assunta dalle deformazioni genera effetti visibili anche negli spettri di Fourier delle ampiezze. Vengono riportati in figura i corrispondenti spettri di Fourier delle ampiezze degli stages prima descritti.



(a) Stage 60 della prova con finestra di misura 200 x 170 mm

(b) Stage 60 della prova con finestra di misura 125 x 100 mm.



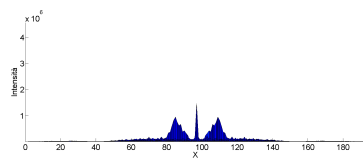
(c) Stage 200 della prova con finestra di misura 200 x 170 mm.

(d) Stage 200 della prova con finestra di misura 125 x 100 mm.

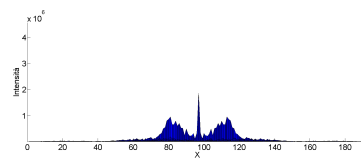
Figura 4.50: Esempi degli spettri di Fourier delle deformazioni riscontrate nelle due prove.

Emerge dal confronto dei vari spettri come il fenomeno di aliasing porti allo sviluppo di picchi importanti nello spettro di Fourier nel campo delle medie-alte frequenze. Tali picchi sono di numero limitato e non vanno a sovrapporsi al picco centrale che porta l'informazione. Andando nel dettaglio a valutare l'evoluzione dei picchi di aliasing al crescere del carico notiamo

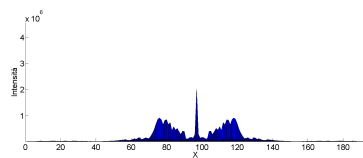
(figura 4.51) che i picchi si mantengono all'incirca costanti in posizione ed intensità all'aumentare della deformazione applicata. In generale è possibile affermare che i picchi costituenti aliasing sono i più elevati nello spettro a parte il picco centrale portatore di informazione.



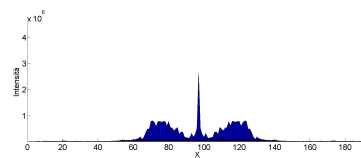
(a) Stage 60



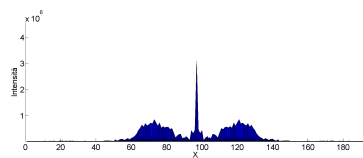
(b) Stage 80



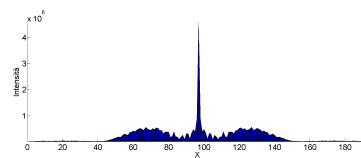
(c) Stage 100



(d) Stage 120



(e) Stage 140



(f) Stage 200

Figura 4.51: Evoluzione degli spettri di Fourier all'aumentare della freccia applicata alla trave.

4.5.1.3 Conclusioni

Dal confronto dei risultati di deformazione derivanti dalle due prove emerge come la riduzione della distanza da cui viene osservato il pattern riduca fortemente il fenomeno di aliasing. Questa tendenza conferma quanto esposto

nella teoria riguardante i disturbi di misura della tecnologia DIC: gli speckle osservati da una distanza ravvicinata risultano di dimensioni maggiori nelle immagini costituenti i vari frames facilitando il procedimento di interpolazione a monte dell' algoritmo di calcolo delle deformazioni. Quest'ultimo risulterà più efficace ed i risultati presenteranno minori problemi di aliasing.

L'osservazione degli spettri di Fourier precedenti ci permette poi di affermare che l'aliasing ha il principale effetto di creare picchi aventi intensità e posizioni costanti all'interno della stessa prova. Questi picchi non sono portatori di informazione e si collocano in posizioni di frequenza medio-alta senza intaccare le basse frequenze che portano il grosso dell'informazione.

4.5.2 Messa a punto di un filtro di Notch gaussiano per ridurre il fenomeno di aliasing

Vista la particolare forma degli spettri di Fourier delle ampiezze trovati nella sezione precedente ci si chiede se sia possibile mettere in atto una strategia di filtraggio che porti all'eliminazione o riduzione del fenomeno di aliasing. Il filtro che meglio si adatta alle esigenze è il filtro di Notch gaussiano. Con questo filtro è possibile agire localmente andando ad eliminare ciascuna frequenza portatrice del disturbo.

4.5.2.1 Materiali e metodi

Il procedimento descritto è stato effettuato sui risultati di deformazione ricavati con la finestra di misura 200 x 170 mm, quelli affetti in maniera più evidente da aliasing.

Sono stati creati gli spettri di Fourier delle deformazioni teoriche a partire dai dati di spostamento ricavati dagli LVDT. Le due misurazioni disponibili per ciascun frame sono state mediate ed è stata rilevata la freccia f per ogni stage, a una distanza di 300 mm dall'incastro. A partire da questo dato, utilizzando l'equazione della linea elastica, è stato trovato il carico generato dall'applicazione della freccia in ogni stage. In particolare l'equazione utilizzata è stata:

$$f = \frac{1}{6} \frac{P}{EI} x^3 - \frac{1}{2} \frac{PL^2}{EI} x + \frac{1}{3} \frac{PL^3}{EI}$$

in cui L è la distanza dall'incastro a cui è applicato il carico (350 mm), x è la distanza fra punto di applicazione del carico e punto in cui è stata effettuata la misurazione ovvero 50 mm nel nostro caso, P è il carico incognito che vogliamo determinare mentre E ed I sono il modulo elastico ed il momento d'inerzia della trave in alluminio. Una volta determinata la posizione del facet field sulla trave rispetto all'incastro, vengono calcolati per ciascuno stage i valori di deformazione agli estremi della porzione di trave esaminata. I valori di deformazione puntuali sul facet-field vengono trovati facendo un fittaggio lineare di questi valori estremi ed ipotizzando che lungo la dimensione minore della trave (quella individuata dall'asse y, riferendosi a figura 4.46) la deformazione si mantenga costante.

A questo punto partendo dalle considerazioni fatte precedentemente sulla posizione reciproca di picchi di rumore ed informazione è possibile determinare gli effetti di un filtro Notch nella rimozione delle frequenze contraddistinte da aliasing. Viene messo a punto per fare questo un filtro Notch gaussiano con frequenza di cut-off unitaria in modo da localizzare al massimo l'impatto sullo spettro di Fourier. Dall'osservazione degli spettri di Fourier ricavati in 4.5.1.2 c'è la certezza che i picchi ad intensità maggiore una volta escluso quello centrale sono quelli che descrivono l'aliasing.

La determinazione del numero ottimale di frequenze su cui far agire il filtro si basa sui seguenti passi:

1. Preso lo spettro di Fourier di uno degli stages che presentano aliasing viene applicato il filtro Notch sulla frequenza a maggiore intensità presente nello spettro dopo aver escluso il picco centrale che porta informazioni;
2. Viene calcolato l'RMSE punto per punto fra le deformazioni filtrate e quelle non filtrate in modo da vedere quanto segnale è stato perso in seguito al filtraggio;
3. Vengono ripetuti il punto 1 ed il punto 2 incrementando il numero di frequenze abbattute contemporaneamente dal filtro Notch. L'iterazione

viene fermata alla cancellazione delle 50 maggiori frequenze presenti nello spettro;

4. Viene ripetuto il procedimento descritto ai punti 1. 2. e 3. per il corrispondente spettro delle deformazioni teoriche;

Applicando il procedimento appena esposto abbiamo una mappa di segnale perso e dell'informazione vera cancellata dall'applicazione del filtro Notch all'aumentare del numero di frequenze portatrici di aliasing azzerate.

4.5.2.2 Risultati

Andando a graficare i risultati di RMSE del segnale di Aramis e della deformazione teorica otteniamo i seguenti risultati:

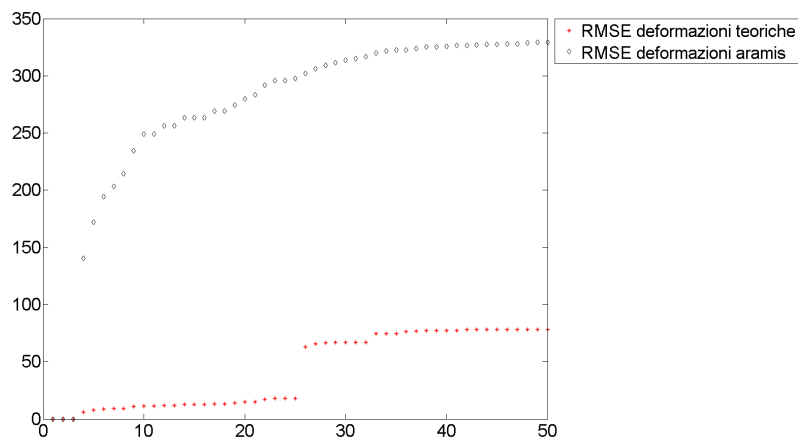
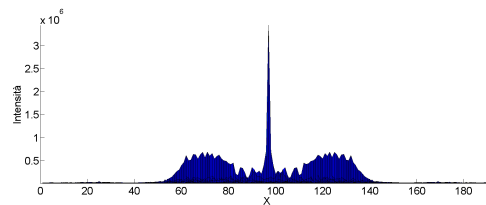


Figura 4.52: Grafico riassuntivo dei risultati di RMSE al crescere del numero di frequenze eliminate.

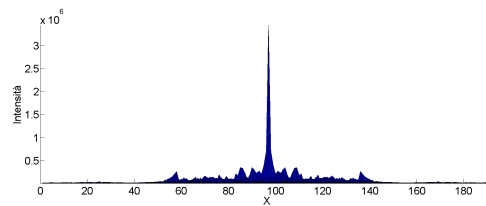
Osservando il grafico, riferito allo stage 173, è possibile vedere come l'eliminazione mirata di un numero limitato di frequenze che non costituiscono il picco centrale non abbia un forte impatto sullo spettro di Fourier della deformazione teorica. L'impatto invece è molto forte sulle deformazioni rilevate da Aramis. Passando dalle 25 alle 26 frequenze rimosse abbiamo

uno scalino nel valore di RMSE della deformazione teorica: si passa da un valore di informazione persa di $20\mu\epsilon$ ad uno superiore ai 60. Il valore di 25 frequenze soppresse sarà quindi quello scelto per l'applicazione del filtro Notch, in quanto compromesso migliore fra forte impatto sulle deformazioni misurate con Aramis e basso impatto sull'informazione da misurare.

Viene effettuato quindi il filtraggio dello spettro di Fourier delle deformazioni misurate da Aramis con un filtro Notch seguendo le indicazioni prima trovate. In figura 4.53 è mostrato l'effetto sullo spettro delle frequenze del filtro così implementato.



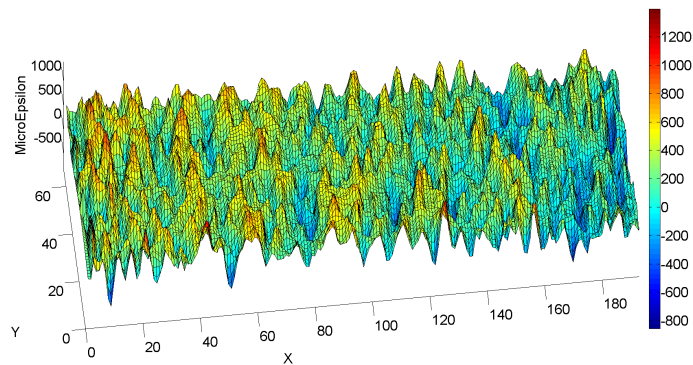
(a) Spettro di Fourier delle ampiezze riferito allo stage 173 non filtrato.



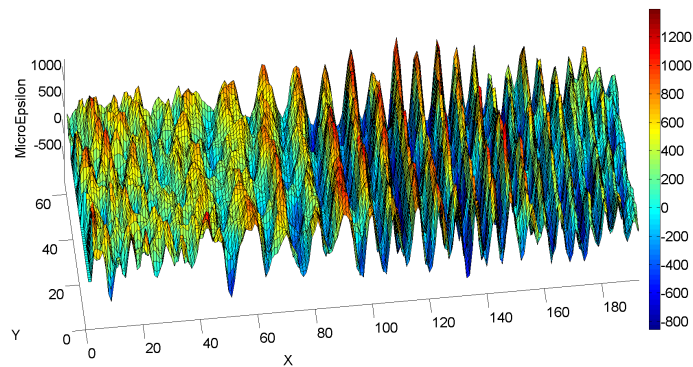
(b) Spettro di Fourier delle ampiezze dello stage 173 in seguito ad applicazione del filtro Notch

Figura 4.53: Confronto fra lo spettro di Fourier delle ampiezze originario e quello filtrato.

Andando ad effettuare la trasformata inversa di questo spettro si ottengono le deformazioni di figura 4.54a.



(a) Andamento delle deformazioni dopo l'applicazione del filtro Notch sulle frequenze portatrici di aliasing;



(b) Deformazione affetta da aliasing originariamente trovata con Aramis

Figura 4.54: Confronto fra pre e post filtraggio anti-aliasing;

Confrontando le deformazioni prima e dopo il filtraggio (figura 4.54b) emerge come l'aliasing sia stato drasticamente ridotto.

Il risultato è ancor più visibile andando a considerare la linea mediana del campo di deformazione delle figure precedenti. Sezionando con un piano longitudinale passante per la dimensione maggiore e sovrapponendo in un grafico gli andamenti di deformazione nei due casi abbiamo il risultato di figura 4.55.

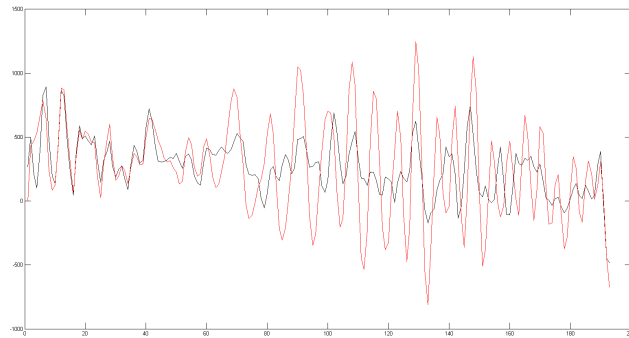


Figura 4.55: Confronto fra le deformazioni lungo la linea mediana del facet field considerato, prima e dopo l'applicazione del filtro anti-aliasing

4.5.2.3 Conclusioni

In questa sezione è stato implementato un filtro Notch in grado di recuperare i risultati di deformazione affetti da aliasing sacrificando una quantità ridotta di informazioni. Il fatto che le frequenze che descrivono le sinusoidi dell'aliasing si trovino in posizione diversa rispetto all'informazione è alla base del metodo. Il metodo per poter essere implementato richiede la conoscenza a priori del campo di deformazioni teorico in modo da poter stabilire quante frequenze annullare senza nuocere all'informazione contenuta nello spettro.

Capitolo 5

Riduzione del rumore di misura tramite filtraggio temporale

In questo capitolo verranno studiati gli effetti del filtraggio nel dominio temporale su immagini e risultati di deformazione delle elaborazioni tramite sistemi DIC. Il principale effetto del filtraggio nel dominio temporale è quello di ridurre le componenti di rumore non sistematico, ovvero quelle aventi valor medio nullo. Come visto precedentemente (1.3.1) il rumore che affligge i risultati del processo di digitalizzazione delle immagini ha natura sia sistematica che non. La presente di trattazione ha come scopo la messa a punto di un metodo in grado di ridurre le componenti di tale rumore a valor medio nullo. Stesso discorso vale per i risultati di deformazione del processo di calcolo DIC.

Ci si chiede anche se tale procedimento di filtraggio possa ridurre il fenomeno di aliasing nei risultati di deformazione. Le elaborazioni dati sono fatte a partire dai risultati e dalle immagini utilizzate nella sezione 4.5 e a tale sezione si rimanda per la descrizione dettagliata della parte sperimentale.

5.1 Filtraggio nel dominio temporale delle immagini in ingresso al sistema DIC

5.1.1 Materiali e metodi

Per la prova vengono utilizzate le immagini della trave a sbalzo acquisite in 4.5.1.1.

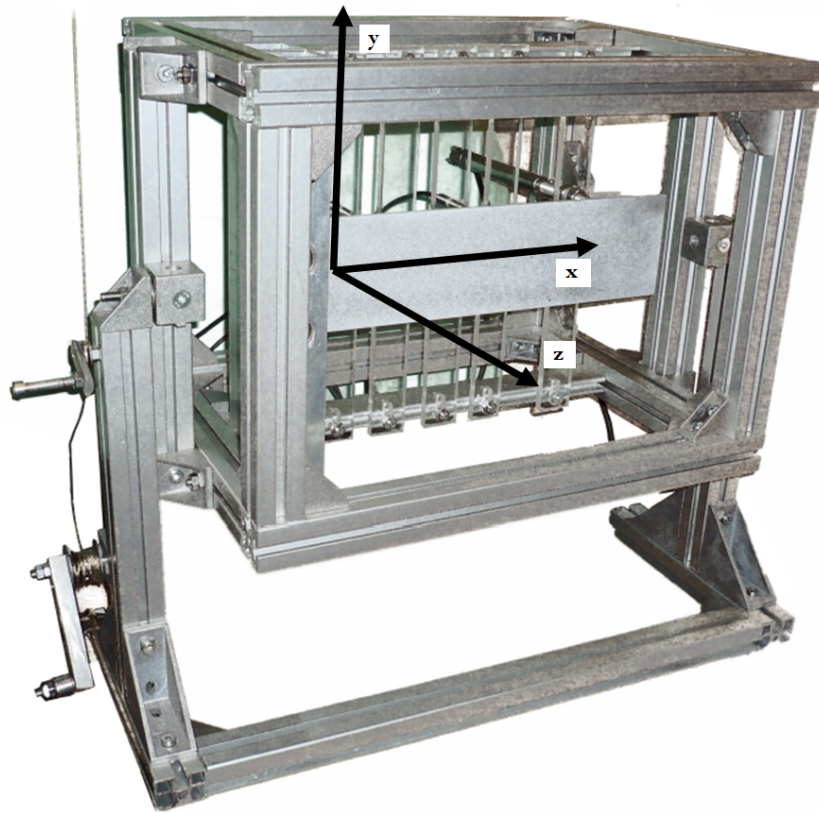


Figura 5.1: Apparato sperimentale utilizzato e sistema di riferimento adottato nello svolgimento della prova.

In un primo momento vengono elaborate le immagini riprese con finestra di misura 200 x 170 mm. Le immagini sono state riprese con frame rate di 15 Hz e sono in totale 260. A gruppi di 20 fanno riferimento a 13 configurazioni di carico differenti. Le prime 20 sono state riprese a provino scarico, le successive sono state riprese con la freccia imposta alla trave crescente a scalini di 1 mm fino a 12 mm. La freccia della trave è stata monitorata tramite due

LVDT posti a 300 mm dall'incastro. Per i vari stages sono disponibili i valori di spostamento registrati dai canali analogici della scheda di acquisizione. In figura 5.2 è riportato l'andamento della freccia come registrata da uno degli LVDT posti a 300 mm dall'incastro.

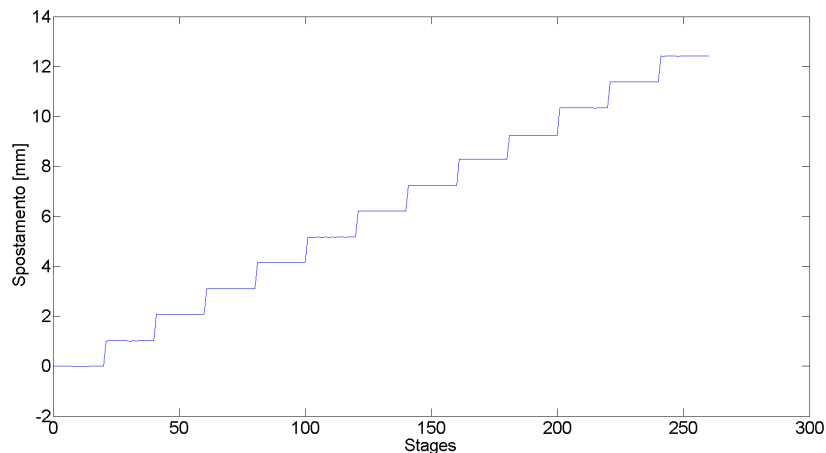


Figura 5.2: Grafico del segnale di spostamento rilevato da uno degli LVDT posti a 300 mm dall'incastro.

Le immagini originarie sono state elaborate utilizzando i seguenti parametri del software:

- Facet size: 28;
- Facet step: 21;
- Computation window: 5;
- Validity quote: 100%;

I risultati così ottenuti sono stati esportati insieme alle immagini utilizzate.

Le immagini esportate sono state mediate a gruppi di 20 in modo da creare 13 stages derivanti dalla media punto per punto dei valori di grigio trovati nelle 20 acquisizioni della stessa configurazione di carico.

I 13 nuovi stages così creati vengono reimmessi nel sistema DIC e viene fatta partire una nuova elaborazione dati con gli stessi parametri del software

che caratterizzavano la precedente. Anche in questo caso i dati ottenuti sono stati esportati.

I risultati ottenuti sono stati elaborati in termini di MSE ed RMSE, in modo da vedere come i risultati siano cambiati dopo l'applicazione del filtro temporale. Le formule utilizzate per il calcolo di tali valori sono state:

$$MSE_s = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\varepsilon_{i,j} - \hat{\varepsilon}_{i,j})^2 \quad (5.1)$$

$$RMSE_s = \sqrt{MSE_s} \quad (5.2)$$

con s ad indicare lo stage considerato, $\varepsilon_{i,j}$ valore di deformazione puntuale rilevato dal sistema DIC (su immagini filtrate e non) ed $\hat{\varepsilon}_{i,j}$ valore di deformazione nominale.

Come deformazioni nominali di riferimento per il calcolo degli errori medi vengono prese quelle ricavate dalla conoscenza degli spostamenti tramite gli LVDT ed elaborate precedentemente per le prove sull'aliasing.

In un secondo momento lo stesso procedimento viene applicato alle immagini riprese con finestra di misura 125 x 100 mm.

5.1.2 Risultati

Di seguito sono riportati i valori di MSE, prima e dopo il filtraggio nel dominio temporale, ottenuti nella prima prova: quella con immagini acquisite con finestra di misura 200 x 170 mm. Le immagini in esame in questa prima prova presentano forti problemi di aliasing. Ognuno degli stages presi in esame appartiene ad uno dei differenti gruppi composto da 20 stages a deformazione costante.

Stage	MSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	MSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	32541	33502
43	53568	49363
63	87991	78511
83	131768	109529
103	146821	118210
123	171109	143465
143	195559	155824
163	225098	182989
183	212763	180802
203	240030	202479
223	264285	226303
243	272572	231251

I risultati sono poi riassunti nell'istogramma di figura 5.3. Emerge come in questa prima prova l'applicazione del filtro abbia portato ad una diminuzione dei valori di MSE.

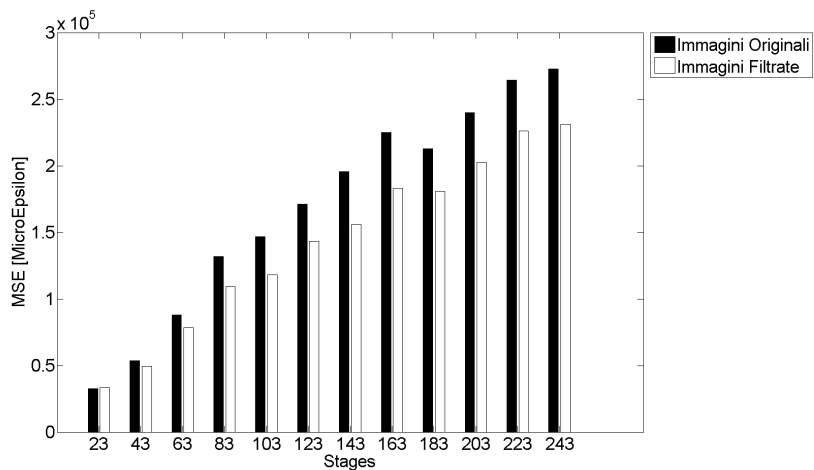


Figura 5.3: Istogramma di confronto fra i valori di MSE, prima e dopo il filtraggio delle immagini nel dominio temporale, in stages appartenenti ai diversi scalini di spostamento.

Nella tabella successiva si riportano i valori di RMSE corrispondenti:

Stage	RMSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	RMSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	180	183
43	231	222
63	297	280
83	363	331
103	383	344
123	414	379
143	442	395
163	474	428
183	461	425
203	490	450
223	514	476
243	522	481

Anche qui si procede alla creazione di un istogramma (fig.5.4). Dal confronto fra i valori di RMSE prima e dopo il filtraggio emerge come il valore di RMSE sia diminuito per ogni gruppo di stages a deformazione costante.

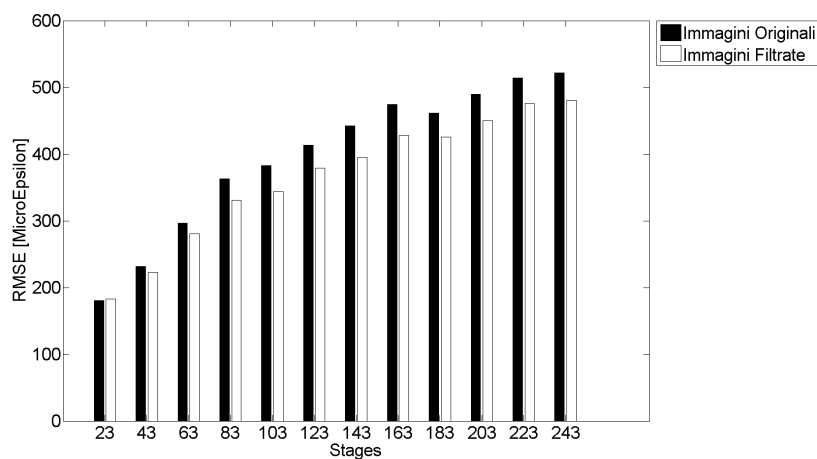
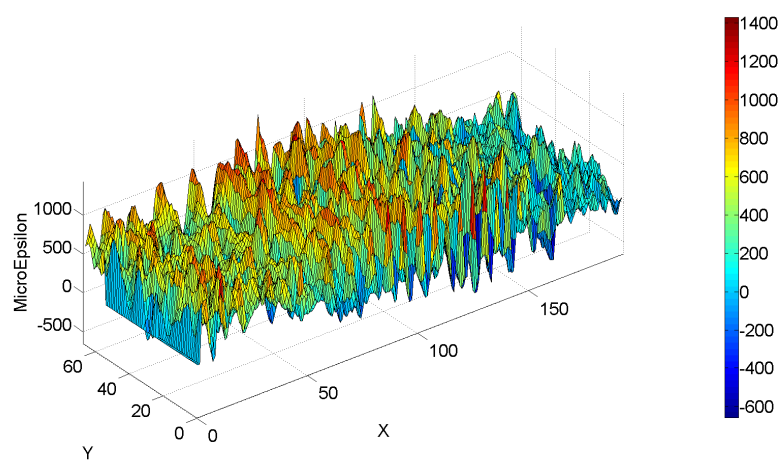
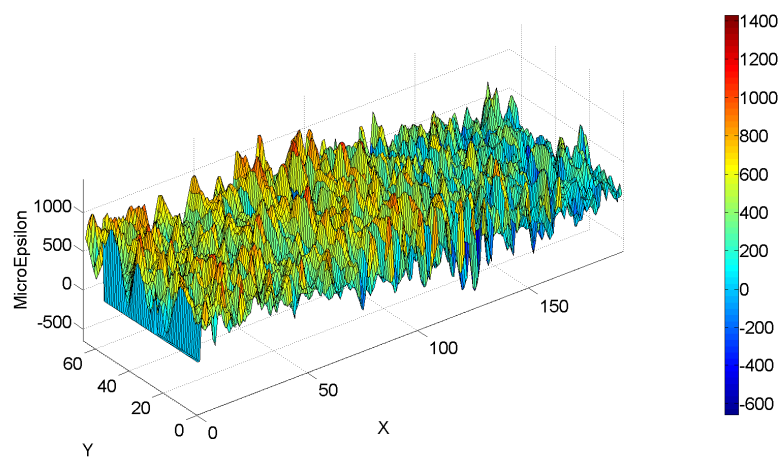


Figure 5.4: Istogramma di confronto fra i valori di RMSE, prima e dopo il filtraggio delle immagini nel dominio temporale, in stages appartenenti ai diversi scalini di spostamento.

Vengono poi rappresentati e raffrontati in figura gli andamenti delle distribuzioni di epsilon x prima del filtraggio e dopo il filtraggio. Successivamente vengono estratte dalle precedenti distribuzioni le righe centrali nella direzione delle x individuata in 5.1. I confronti sono riferiti allo stage 203.



(a) Distribuzione epsilon x originale



(b) Distribuzione epsilon x filtrate

Figura 5.5: Confronto fra le distribuzioni di epsilon x per lo stage 203.

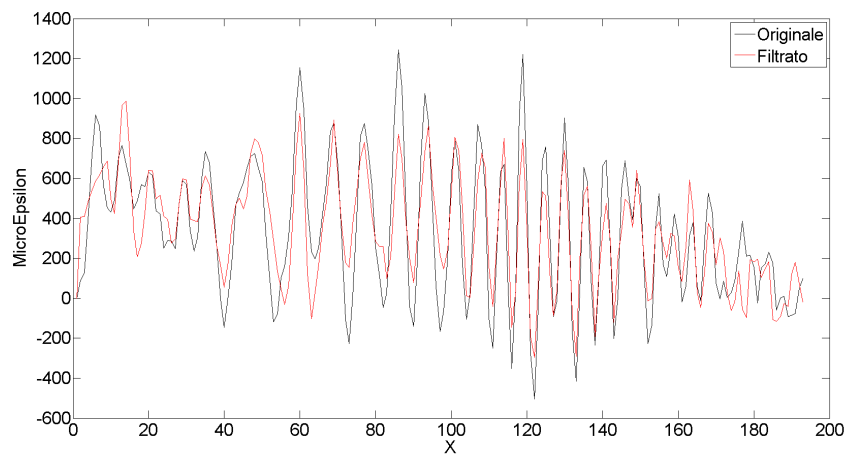


Figura 5.6: Confronto dell'andamento delle ϵ_x sulla riga centrale della distribuzione delle deformazioni. La direzione indagata è quella lungo l'asse delle x di figura 5.1.

Dalle figure 5.5 e 5.6 è possibile notare una generale diminuzione dei picchi delle sinusoidi che contraddistinguono il fenomeno di aliasing.

I valori di MSE ed RMSE sono stati ricavati anche per il secondo set di immagini, quelle riprese con finestra di misura 100 x 125 mm.

Prima vengono trovati i valori di MSE, come riportato in tabella:

Stage	MSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	MSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	17742	16654
43	16528	15658
63	42804	24159
83	24273	21731
103	28174	24942
123	31269	24509
143	39464	40444
163	39015	38842
183	81207	136139
203	66114	52851
223	61951	60576
243	64939	65343

In seguito si passa a riassumere i dati di tabella in un istogramma che renda più facile il confronto (fig. 5.7):

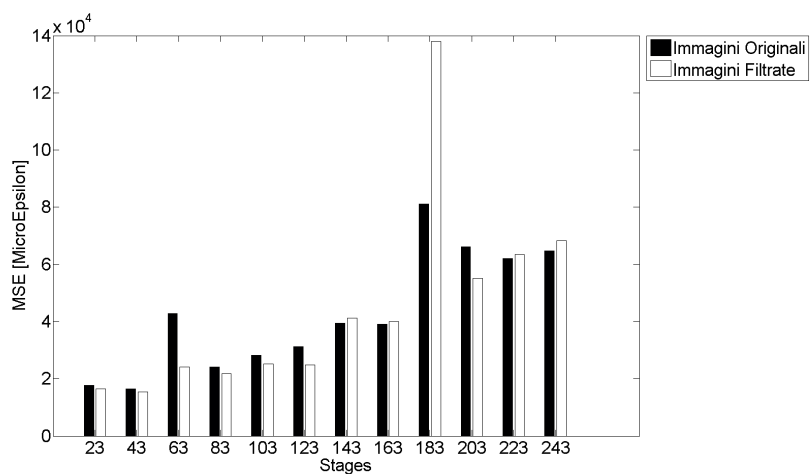


Figura 5.7: Istogramma di confronto fra i valori di MSE, prima e dopo il filtraggio delle immagini nel dominio temporale, in stages appartenenti ai diversi scalini di spostamento.

Osservando l'istogramma 5.7 è possibile notare come l'effetto del filtro temporale non sia più univoco come in precedenza. Si può comunque affer-

mare che nella maggior parte dei gruppi di stages a deformazione costante il valore di MSE tende a rimanere costante.

Successivamente vengono riportati i corrispondenti valori di RMSE. Prima tabulati e poi riassunti in istogramma (fig. 5.8) :

Stage	RMSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	RMSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	133	129
43	129	125
63	207	155
83	156	147
103	168	158
123	177	157
143	199	201
163	198	197
183	285	369
203	257	230
223	249	246
243	255	256

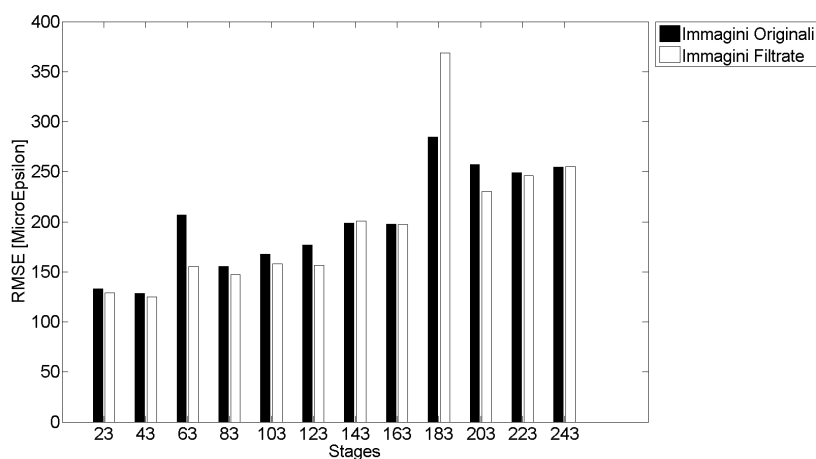
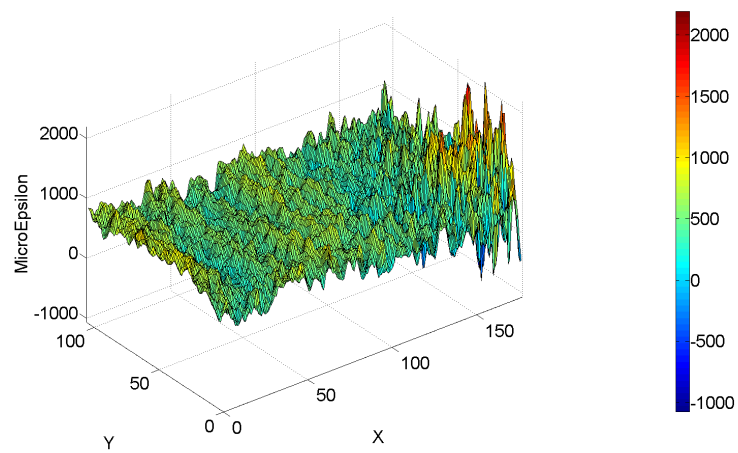


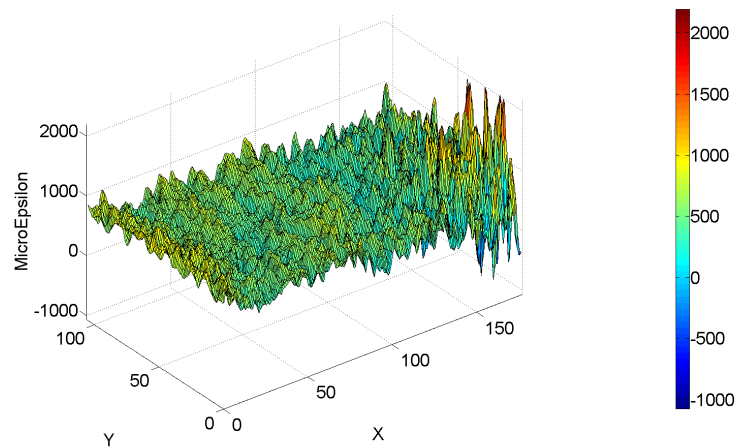
Figura 5.8: Istogramma di confronto fra i valori di MSE, prima e dopo il filtraggio delle immagini nel dominio temporale, in stages appartenenti ai diversi scalini di spostamento.

Le conclusioni precedentemente raggiunte per l'istogramma di MSE possono essere estese anche a quello dell'RMSE di figura 5.8.

I risultati di distribuzione ed il confronto lungo la linea centrale effettuati precedentemente vengono ripetuti anche per questa prova. Nelle figure 5.9 e 5.10 sono riportati i risultati ottenuti.



(a) Distribuzione epsilon x originale



(b) Distribuzione epsilon x filtrate

Figura 5.9: Confronto fra le distribuzioni di epsilon x per lo stage 203.

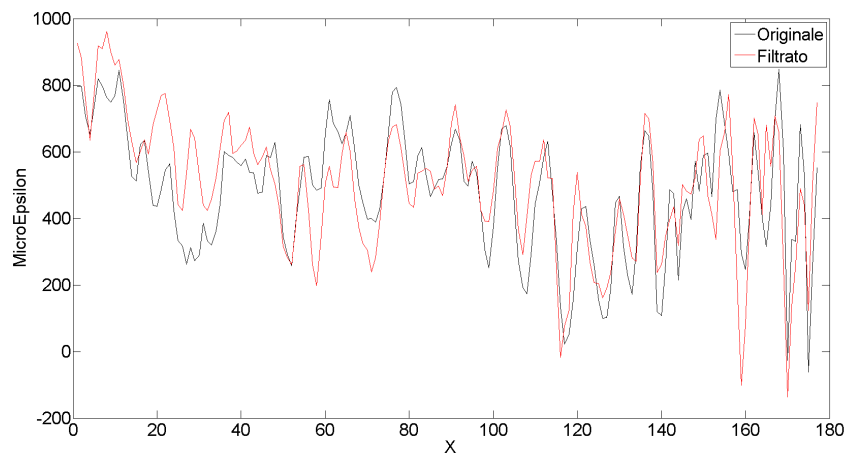


Figura 5.10: Confronto dell'andamento delle ϵ_x sulla riga centrale della distribuzione delle deformazioni. La direzione indagata è quella individuata dall'asse delle x di figura 5.1.

5.1.3 Conclusioni

Dal confronto dei risultati di MSE ed RMSE della prima prova, quella affetta da aliasing, è possibile notare un miglioramento generalizzato dei risultati rilevati. Entrambi i dati tendono a calare in seguito a filtraggio temporale in tutte le configurazioni di carico, questo ad indicare che mediamente i risultati calcolati si avvicinano di più a quelli nominali. Tale tendenza è riscontrabile anche confrontando l'andamento delle deformazioni lungo l'asse x. L'ampiezza delle sinusoidi caratteristiche del fenomeno di aliasing viene ridotta. Tale riduzione è però di piccola entità e non paragonabile al miglioramento raggiunto precedentemente con l'utilizzo di filtri Notch nel dominio delle frequenze spaziali.

Nel caso di immagini aventi minori problemi di aliasing tali miglioramenti tendono quasi completamente a sparire. In tali casi il filtraggio temporale non sembra portare alcun giovamento pratico ma anzi può portare in alcuni casi a risultati anche peggiori di quelli originali non filtrati (vedi stage mediato 9 di figura 5.8).

5.2 Filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione calcolate dal sistema DIC

Viene ora trattato il filtraggio temporale per le distribuzioni di deformazione calcolate dal sistema DIC. Il filtraggio si sposta quindi a valle dell'elaborazione. I risultati derivanti da questo approccio alternativo verranno poi comparati con quelli ottenuti nella sezione precedente.

5.2.1 Materiali e metodi

Nel corso di questa esperienza sono stati presi in esame gli stages acquisiti nella sezione 5.1.1. A partire dalle distribuzioni di deformazione originariamente calcolate dal sistema DIC sono state create 12 matrici di distribuzione di deformazione medie. Ciascuna di queste è il risultato della media per posizioni corrispondenti delle deformazioni puntuali determinate nei 20 stages appartenenti ad una stessa configurazione di carico. Vengono quindi calcolati i valori di MSE ed RMSE utilizzando le formule 5.1 e 5.2. Le deformazioni nominali utilizzate sono le stesse che erano state ricavate precedentemente tramite i dati raccolti dai canali analogici. I valori di scostamento dalle deformazioni nominali così trovati vengono poi confrontati con quelli corrispondenti per le distribuzioni di deformazione originali e quelle derivanti dal filtraggio temporale delle immagini in ingresso.

Tutti i passaggi precedentemente enunciati sono stati applicati sia alle osservazioni con finestra di misura 200 x 170 mm, che a quelle con finestra 125 x 100 mm.

5.2.2 Risultati

Vengono di seguito riportati in tabella i valori MSE trovati per il filtraggio dei dati della prima prova, quella con finestra di misura 200 x 170 mm. Gli stages scelti appartengono ciascuno a diversi gruppi di osservazioni a deformazione nominale costante

Stage	MSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	MSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	32541	34001
43	53568	52067
63	87991	87027
83	131768	125440
103	146821	141408
123	171109	175034
143	195559	191533
163	225098	221040
183	212763	216646
203	240030	236317
223	264285	259958
243	272572	261595

Si passa a visualizzare i valori trovati di MSE tramite un istogramma. Nell'istogramma in figura 5.11 sono comparati tali valori con quelli derivanti dal filtraggio delle immagini nel dominio temporale. Il filtraggio delle distribuzioni di deformazione appare meno efficace di quello effettuato sulle immagini nel fare avvicinare le misure puntuali al loro valore nominale. Rimane in ogni caso un leggero miglioramento dei risultati rispetto alle distribuzioni originariamente determinate dal sistema DIC.

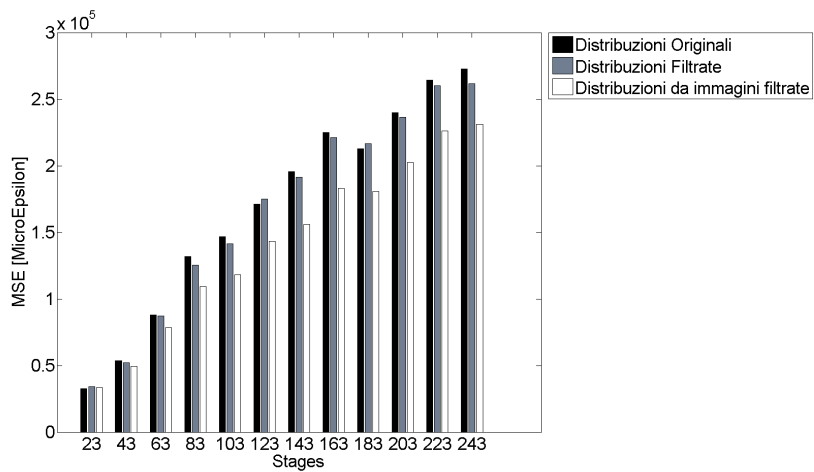


Figura 5.11: Istogramma dei valori di MSE riscontrati in seguito a filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione. Tali valori sono confrontati con i valori derivanti dalle prove originali e da quelle derivanti dal filtraggio nel dominio temporale delle immagini in ingresso. Valori riferiti alla prova effettuata con finestra di misura 200 x 170 mm.

Si passa poi a riportare i valori di RMSE per gli stessi stages prima esaminati:

Stage	RMSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	RMSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	180	184
43	231	228
63	297	295
83	363	354
103	383	376
123	414	418
143	442	438
163	474	470
183	461	465
203	490	486
223	514	510
243	522	511

Andando a riassumere tali risultati in un istogramma ed andando a confrontarli con i medesimi indicatori ricavati per le distribuzioni originali e per quelle derivanti dal filtraggio delle immagini nel dominio temporale otteniamo la situazione di figura 5.12. Anche in questo istogramma emerge la maggiore efficacia del filtraggio temporale delle immagini in ingresso.

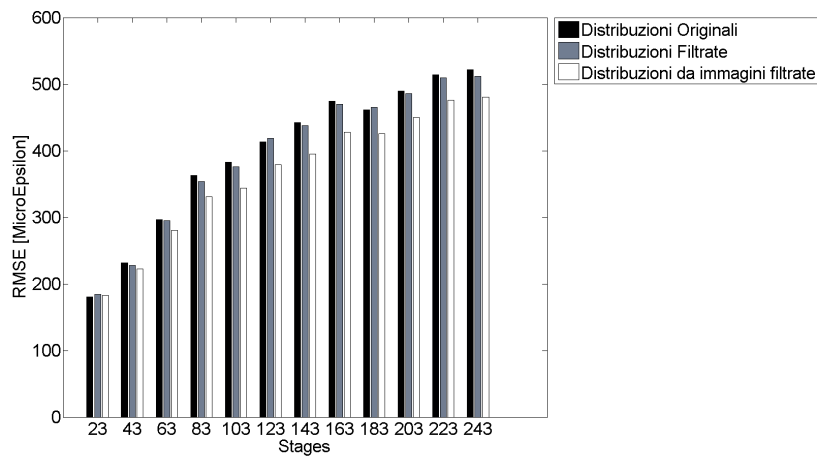


Figura 5.12: Istogramma di confronto fra valori di RMSE riferiti a stages aventi situazione di carico differente.

Infine vengono riportati i valori di MSE ed RMSE per la prova effettuata con finestra di misura 125 x 100 mm.

Per i valori di MSE otteniamo:

Stage	MSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	MSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	17742	16459
43	16528	15471
63	42804	24154
83	24273	21797
103	28174	25241
123	31269	24904
143	39464	41302
163	39015	39969
183	81207	137916
203	66114	55041
223	61951	63482
243	64939	68455

Ciò porta ad un istogramma di confronto con il metodo di filtraggio precedente che ha la struttura di figura 5.13.

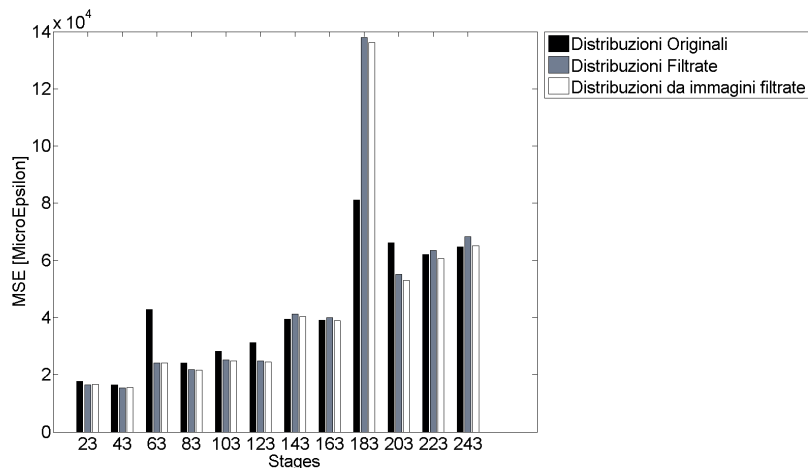


Figura 5.13: Istogramma dei valori di MSE riscontrati in seguito a filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione. Tali valori sono confrontati con i valori derivanti dalle prove originali e da quelle derivanti dal filtraggio nel dominio temporale delle immagini in ingresso. I valori sono riferiti alla prova effettuata con finestra di misura 125 x 100 mm.

Per i valori di RMSE vengono trovati i seguenti risultati e l'istogramma di figura :

Stage	RMSE - Epsilon originali [$\mu\epsilon$]	RMSE - Epsilon filtrate [$\mu\epsilon$]
23	133	128
43	129	124
63	207	155
83	156	148
103	168	159
123	177	158
143	199	203
163	198	200
183	285	371
203	257	235
223	249	252
243	255	262

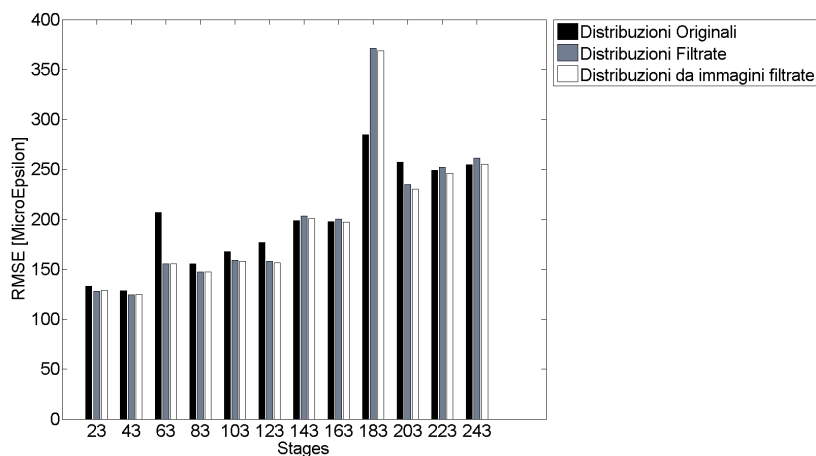


Figura 5.14: Iistogramma di confronto fra valori di RMSE riferiti a stages aventi situazione di carico differente.

Dai dati riportati per la prova con finestra di misura 125 x 100 mm emerge la sostanziale equivalenza degli effetti del filtraggio nel dominio temporale di

distribuzioni ed immagini. In questo caso è possibile affermare che non vi siano vantaggi nell'uso di filtri nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione.

5.2.3 Conclusioni

Dai risultati delle prove condotte sul filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione, emerge come il metodo sia da prendere in considerazione solo in caso vi siano fenomeni di aliasing nelle immagini utilizzate. Anche in tali casi però risulta più utile procedere al filtraggio nel dominio temporale delle immagini.

Capitolo 6

Conclusioni

Nel presente elaborato sono state esaminate alcune strategie di filtraggio per ridurre il rumore nelle misure di deformazione effettuate tramite sistemi DIC. A conclusione del lavoro è possibile affermare che sono state esplorate a fondo problematiche e vantaggi di tali tecniche di filtraggio e che per alcune di esse è stato messo a punto un metodo tramite cui utilizzarle al meglio.

La prima fase ha riguardato lo studio di strategie di filtraggio che riguardassero le immagini in ingresso. Sono stati valutati approcci sia nel dominio spaziale che in quello delle frequenze spaziali. La trattazione ha evidenziato come qualsiasi strategia di filtraggio che coinvolga le immagini in ingresso abbia ripercussioni negative per quanto riguarda l'andamento di contrasto e luminosità delle immagini da introdurre nel sistema DIC. Pertanto tali strategie di riduzione del rumore di misura sono da considerarsi insoddisfacenti ed in alcuni casi controproducenti.

La seconda strategia di filtraggio presa in esame è stata quella riguardante il dominio delle frequenze spaziali delle distribuzioni di deformazione. In una prima fase è stata effettuata una esplorazione delle dinamiche che legano gli spettri Fourier delle ampiezze delle distribuzioni al tipo di sollecitazione applicata ed è stata rilevata la costanza delle posizioni reciproche di frequenze portatrici di informazione e rumore. Tale costanza si è dimostrata indipendente dai parametri di elaborazione scelti per il calcolo delle distribuzioni stesse. Andando ad esaminare in un secondo momento l'intensità ed il posizionamento dei picchi rumore al variare dei range di deformazione misurati

è stata evidenziata la costanza di tali picchi in intensità e posizione. Dopo questa prima fase di screening è stato possibile mettere a punto un filtro passa basso in grado di rimuovere le frequenze portatrici di rumore conservando la maggior parte dell'informazione presente negli spettri di Fourier esaminati. Le frazioni di rumore eliminato ed informazione rimossa dal filtro sono note con precisione nel caso in cui vengano esaminati provini in materiale isotropo in situazioni di carico delle quali possa essere determinato l'andamento puntuale delle distribuzioni di deformazione. Tale condizione è però estremamente restrittiva per le applicazioni della tecnologia DIC. Nella fase successiva è stato quindi messo a punto un metodo per l'utilizzo del filtro passa-basso in situazioni in cui le deformazioni puntuali non possano essere determinate a priori. Tale metodo si avvale dell'utilizzo di sistemi di misura già noti e collaudati aventi precisione superiore rispetto alla correlazione di immagini. In particolare è stato studiato il caso di una prova a sbalzo su provino in tessuto biologico condotta in parallelo tramite estensimetria e correlazione di immagini digitali. Per tale situazione i parametri per la determinazione del filtro passa-basso di ottimo sono scelti tramite la minimizzazione della distanza fra le misure puntuali in unione con la conservazione dei gradienti di deformazione presenti nel provino. Così facendo i risultati ottenuti uniscono l'affidabilità puntuale della misura estensimetrica alla possibilità di determinare l'intero campo deformativo del provino propria della tecnologia DIC.

Sempre per quanto riguarda il filtraggio nel dominio delle frequenze spaziali delle distribuzioni di deformazione è stato messo a punto un filtro Notch in grado di mitigare fortemente le distorsioni derivanti dal fenomeno di aliasing. L'esplorazione ha anche permesso di mettere in luce e capire le cause di tale fenomeno di cui esiste una letteratura limitata. Il filtro Notch nel dominio delle frequenze spaziali messo a punto gode delle medesime limitazioni di quello passa-basso precedentemente descritto e va comunque sottolineato come il fenomeno di aliasing sia da prevenire migliorando le caratteristiche di dimensione degli speckle e contrasto del pattern stocastico utilizzato.

In ultimo sono state esaminate tecniche di filtraggio nel dominio temporale per le immagini e per le distribuzioni di deformazione elaborate dal

sistema DIC. Il filtraggio temporale delle immagini in ingresso si basa sull'acquisizione di più immagini acquisite in un intervallo di tempo minimo dell'oggetto in condizioni di deformazione costanti. Tali immagini vengono utilizzate per costruire l'andamento medio del tono di grigio di ciascun pixel che determina l'immagine da immettere nel sistema DIC. L'utilizzo di una tale strategia ha portato a risultati benefici per quanto riguarda la riduzione del rumore di misura nei casi in cui le immagini stesse fossero affette da problemi di aliasing. Tali effetti benefici vanno ad annullarsi nel caso di osservazioni in cui il fenomeno di aliasing non sia presente. Conclusioni identiche possono essere trovate considerando il filtraggio nel dominio temporale delle distribuzioni di deformazione. In questo caso le elaborazioni del software eseguite su più immagini acquisite in condizioni di deformazione costante del provino, determinano l'andamento medio della deformazione di ciascun punto della distribuzione di deformazione risultante. Il filtraggio nel dominio temporale non si presenta quindi come una tecnica vantaggiosa nella riduzione del rumore di misura.

Il lavoro effettuato ha permesso di escludere alcune strategie di filtraggio che potevano essere viste come risolutive del problema del rumore di misura nella determinazione delle deformazioni. La strategia di filtraggio più promettente individuata in questo elaborato è senza dubbio il filtraggio passa-basso delle distribuzioni di deformazione. Sviluppi possibili di tale tecnica sono da legare ad uno studio estensivo su di una più ampia casistica di materiali e forme dei provini. Altro interessante sviluppo potrebbe essere la traduzione in linguaggio Python degli script di filtraggio in modo da integrare la post-processazione dei risultati con il software DIC.

Bibliografia

- [1] M. Sutton, J.-J. Orteu, and H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape Motion and Deformation Measurements*. New York: Springer Science, 2009.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, “Digital Image Processing.pdf,” p. 793, 2002.
- [3] L. Luu, Z. Wang, M. Vo, T. Hoang, and J. Ma, “Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation.” *Optics letters*, vol. 36, no. 16, pp. 3070–2, Aug. 2011. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21847163>
- [4] D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, and A. M. Habraken, “Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 44, no. 11, pp. 1132–1145, 2006. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816605001727>
- [5] W. Clocksin, Q. da Fonseca, and P. Withers, “Image processing issues in digital strain mapping,” in *Proceedings of*, vol. 4790, 2002. [Online]. Available: <http://cms.brookes.ac.uk/staff/PhilipTorr/Papers/Clocksin/issues.pdf>
- [6] S. T. Barnard and M. a. Fischler, “Computational Stereo,” *ACM Computing Surveys*, vol. 14, no. 4, pp. 553–572, Dec. 1982. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=356893.356896>
- [7] GOM, “User Manual - Software,” Tech. Rep. 0, 2011.

- [8] V. Pontorno, “Analisi sperimentale delle sollecitazioni in provini di tessuto osseo per mezzo di metodi di Correlazione di Immagini (DIC),” Mechanical Engineer, Università degli studi di Bologna, 2011.
- [9] G. Lionello, “Messa a punto del metodo di correlazione di immagine per applicazioni biomediche,” Mechanical Engineer, Università degli studi di Bologna, 2012.
- [10] M. Salvà, “Analisi sperimentale delle sollecitazioni in strutture ossee per mezzo di metodi di correlazione di immagini (DIC),” pp. 1–125, 2011.