

# PY2DIC: UN NUOVO SOFTWARE DI DIGITAL IMAGE CORRELATION PER LA MISURA DI CAMPI DI SPOSTAMENTO

## PY2DIC: A NEW DIGITAL IMAGE CORRELATION SOFTWARE FOR DISPLACEMENT FIELD MEASUREMENTS

V. Belloni

Università di Roma "La Sapienza", Area di Geodesia e Geomatica (DICEA), via Eudossiana 18, 00184 Roma  
valeria.belloni@uniroma1.it

**PAROLE CHIAVE:** Digital Image Correlation (DIC), Software Gratuito e Open Source, Fotogrammetria Close Range, Applicazioni strutturali

**KEY WORDS:** Digital Image Correlation (DIC), Free and Open Source Software, Close Range Photogrammetry, Structural Applications

### RIASSUNTO

Di recente si è assistito ad un crescente interesse nei confronti delle tecniche di misura senza contatto per la misura di deformazioni e spostamenti. Nell'ambito della fotogrammetria, la tecnica Digital Image Correlation (DIC) ha assunto un ruolo fondamentale grazie ai recenti sviluppi nel campo delle camere low-cost ad alta risoluzione e alla crescente capacità di calcolo. La DIC è infatti una tecnica senza contatto in grado di misurare spostamenti e deformazioni a tutto campo confrontando immagini digitali, relative alla superficie di un provino, acquisite a diversi livelli di deformazione; tale tecnica riveste pertanto un ruolo fondamentale nel campo del monitoraggio strutturale.

Per tutte queste ragioni, un nuovo software gratuito e open source, chiamato py2DIC, è stato sviluppato dall'Area di Geodesia e Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Roma "La Sapienza". Il software, interamente implementato in Python, sfrutta il metodo del template matching per il calcolo dei campi di spostamento e deformazione. Le potenzialità di py2DIC sono state valutate processando immagini acquisite durante alcune prove a trazione eseguite nel Laboratorio di Ingegneria Strutturale su tre diversi provini realizzati in polimero Glass Fiber Reinforced.

I risultati sono stati confrontati con quelli misurati indipendentemente da alcuni estensimetri fissati sulle superfici dei provini. Tali risultati dimostrano la possibilità di caratterizzare con successo il meccanismo deformativo del materiale investigato. py2DIC risulta infatti in grado di evidenziare spostamenti a livello di pochi micron, in buon accordo con il riferimento sia in termini di spostamenti che di modulo di Poisson.

### ABSTRACT

Recently, there has been a growing interest in studying non-contact techniques for strain and displacement measurement. Within photogrammetry, Digital Image Correlation (DIC) has received particular attention thanks to the recent advances in the field of lowcost, high resolution digital cameras and computer power. DIC is indeed a non-contact technique able to measure full-field displacements and strains by comparing digital images of the surface of a material sample at different stages of deformation and it plays a major role in structural monitoring applications.

For all these reasons, a new free and open source two-dimensional (2D) DIC software, named py2DIC, was developed at the Geodesy and Geomatics Division of DICEA, University of Rome "La Sapienza". The software is completely implemented in Python and it is based on the template matching method to compute the displacement and strain fields. The potentialities of py2DIC were evaluated by processing the images acquired during tensile test performed in the Laboratory of Structural Engineering. Specifically, three different Glass Fiber Reinforced Polymer samples were subjected to tensile tests by means of a universal testing machine.

The results were compared with those independently measured by several strain gauges fixed on the sample surfaces. They demonstrate the possibility to successfully characterize the deformation mechanism of the investigated material. py2DIC is indeed able to highlight displacements at few microns level, in reasonable agreement with the reference, both in terms of displacements and Poisson's module.

### 1. INTRODUZIONE

Deformazioni e spostamenti sono oggi parametri chiave nel campo dell'ingegneria strutturale. Tuttavia la loro misura risulta complessa al di fuori delle condizioni di laboratorio a causa del setup che le misure tradizionali, quali gli estensimetri, richiedono. Questo è il motivo per cui di recente si è assistito ad un crescente interesse nei confronti delle tecniche di misura senza contatto. In particolare, la tecnica fotogrammetrica ha assunto un ruolo chiave in questo tipo di applicazioni in quanto

permette di ottenere misure a tutto campo a partire dall'analisi di immagini senza la necessità di un contatto diretto con l'oggetto da analizzare. Nello specifico, la fotogrammetria può essere utilizzata per stimare la geometria, gli spostamenti, le deformazioni e la velocità di deformazione di diversi materiali o strutture soggette a carichi. Inoltre, grazie ai progressi tecnologici ottenuti nel campo delle camere digitali low-cost ad alta risoluzione e alla crescente capacità di calcolo, le applicazioni fotogrammetriche si sono diffuse anche

nell'ambito dell'ingegneria civile e meccanica (Baquersad et al., 2017).

Il termine "Digital Image Correlation" (DIC) è utilizzato in ingegneria strutturale per fare riferimento alla nota tecnica del template matching, largamente utilizzata in fotogrammetria e computer vision per il riconoscimento di punti omologhi. Tale tecnica confronta una serie di immagini di un provino acquisite a diversi intervalli di deformazione, traccia il movimento dei pixel all'interno dell'area di interesse (AOI) e, sfruttando algoritmi di matching, calcola gli spostamenti e le deformazioni mediante il riconoscimento degli stessi punti all'interno di immagini diverse (McCormick e Lord, 2010). La tecnica DIC può essere utilizzata nel caso di analisi bidimensionali (2D) o tridimensionali (3D). Nel primo caso gli spostamenti e le deformazioni sono relative alla superficie planare del provino. Se la superficie del provino è curva oppure se deformazioni tridimensionali si verificano durante la prova di carico, il metodo 2D non è più applicabile ed è necessario fare riferimento alla tecnica 3D che richiede l'utilizzo di due camere con posizione fissa nello spazio (Pan et al., 2009).

Ad oggi sul mercato sono disponibili diversi software commerciali che consentono la valutazione di spostamenti e deformazioni bidimensionali e tridimensionali. Tuttavia tali software presentano delle forti limitazioni trattandosi di software chiusi e particolarmente costosi (Harilal e Ramji, 2014). Sono inoltre disponibili alcuni software gratuiti implementati in Matlab per i quali, tuttavia, è richiesta una licenza (Jones et al., 2014).

Per questi motivi, all'interno dell'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza", è stato sviluppato py2DIC, un nuovo software DIC gratuito e open source. Il software è interamente implementato in Python e il codice sorgente è disponibile gratuitamente sul sito <https://github.com/Geod-Geom/py2DIC>.

## 2. PY2DIC

py2DIC è un software gratuito e open source basato sul template matching, procedimento per il riconoscimento di punti omologhi sulla base del coefficiente di cross-correlazione fra immagini digitali. Il software restituisce campi di spostamenti e deformazioni confrontando due o più immagini, acquisite a diversi livelli di deformazione, di un provino sottoposto a prova di carico. py2DIC, interamente implementato in Python, è dotato di un'interfaccia grafica e sfrutta le potenzialità di OpenCV, una libreria open source di computer vision e machine learning (Bradski e Kaehler, 2008).

La tecnica del template matching implementata all'interno del software si articola in diverse fasi. In primo luogo l'area di interesse (AOI) viene suddivisa in una griglia equispaziata di punti. Successivamente l'indice di cross-correlazione normalizzato viene calcolato attraverso un processo di convoluzione di una parte dell'immagine di riferimento (il template) con una corrispondente porzione (la finestra di ricerca) all'interno dell'immagine di ricerca. La tecnica è illustrata in Figura 1.

Lo spostamento individuato  $u, v$  è quello che massimizza il coefficiente di cross-correlazione. Nello specifico, si considera il pixel  $p(x, y)$  collocato al centro del template e si apre la finestra di ricerca all'interno dell'immagine di ricerca esattamente intorno allo stesso pixel. Si assume infatti che la camera rimanga fissa durante l'acquisizione delle immagini e che quindi il sistema di riferimento delle due immagini sia lo stesso. Se la dimensione del template di riferimento è  $w \times w$ , la dimensione

della finestra di ricerca risulta essere  $(w+d) \times (w+b)$ , dove  $w$  è la dimensione del template e  $d$  e  $b$  rappresentano i bordi rispettivamente lungo le direzioni  $x$  e  $y$ . Per ottenere buoni risultati al termine del matching, è opportuno scegliere un bordo che sia più grande del massimo spostamento atteso per garantire il riconoscimento del template nell'immagine di ricerca. La procedura è effettuata sfruttando la funzione `cv2.matchTemplate` di OpenCV mediante il criterio di similitudine FNCC (Fast Normalized Cross-Correlation).

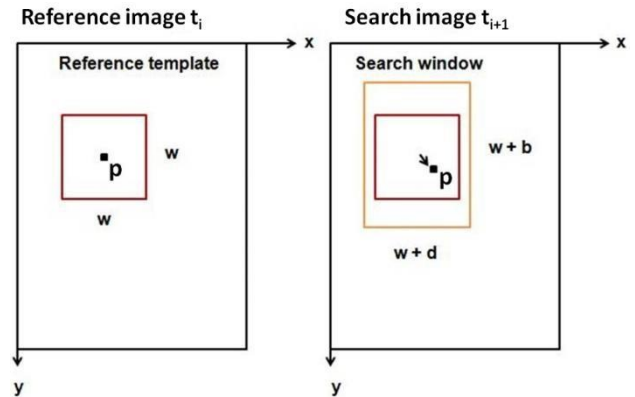


Figura 1. Schema relativo alla coppia di immagini, al pixel centrale, al template di riferimento e alla finestra di ricerca

Infine, muovendo il template di riferimento lungo tutta l'immagine, vengono calcolati gli spostamenti per ciascun nodo della griglia come mostrato in Figura 5a.

Per quanto riguarda le deformazioni, esse vengono calcolate attraverso un processo di differenziazione numerica degli spostamenti precedentemente stimati:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1b)$$

ove  $\varepsilon_x$  = deformazione in direzione  $x$   
 $\varepsilon_y$  = deformazione in direzione  $y$   
 $u$  = spostamento in direzione  $x$   
 $v$  = spostamento in direzione  $y$

All'interno del software è infatti utilizzata l'approssimazione delle differenze finite centrate in cui ciascuna derivata viene approssimata con la corrispondente differenza finita:

$$\varepsilon_x = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \quad (2a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2\Delta y} \quad (2b)$$

ove  $\varepsilon_x$  = deformazione in direzione  $x$   
 $\varepsilon_y$  = deformazione in direzione  $y$   
 $u_{i+1}$  = spostamento in direzione  $x$  nel punto  $i+1$   
 $u_{i-1}$  = spostamento in direzione  $x$  nel punto  $i-1$   
 $v_{i+1}$  = spostamento in direzione  $y$  nel punto  $i+1$   
 $v_{i-1}$  = spostamento in direzione  $y$  nel punto  $i-1$   
 $\Delta x$  = spaziatura della griglia in direzione  $x$   
 $\Delta y$  = spaziatura della griglia in direzione  $y$

## 2.1 L'interfaccia grafica di py2DIC

Il software è dotato di un'interfaccia grafica, sviluppata mediante PyQt5, che consente di selezionare l'AOI all'interno delle immagini e impostare facilmente i parametri richiesti per l'elaborazione. Per definire la AOI è possibile utilizzare il tasto "Select AOI" che consente di delimitare l'area di interesse rettangolare con un semplice click del mouse (occorre selezionare il vertice in alto a sinistra e quello in basso a destra). Al termine di questa prima operazione si inseriscono i parametri richiesti dal processamento. In primo luogo occorre definire il parametro "Pixel dimension" necessario per convertire gli spostamenti da pixel a unità di lunghezza. In prima approssimazione la dimensione del pixel è considerata quadrata e costante lungo tutta l'immagine. Tuttavia tale ipotesi non risulta essere esattamente corretta soprattutto se, durante l'acquisizione delle immagini, si sviluppano delle distorsioni. La dimensione del pixel è misurata in millimetri utilizzando un riferimento metrico, in genere un righello, che viene posizionato in prossimità del provino quando la prima immagine viene acquisita. Confrontando la distanza in pixel calcolata sull'immagine con la distanza ottenuta utilizzando il righello, è possibile ottenere facilmente la dimensione del pixel in millimetri. Il parametro "Imposed deformation velocity" fa riferimento alla velocità imposta dalla macchina a trazione durante l'esecuzione della prova; "Camera acquisition time" rappresenta il tempo di acquisizione e corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra l'acquisizione di due immagini successive (durante i test è stato utilizzato un tempo di acquisizione pari a 5 secondi); "Start index" è utilizzato per selezionare la prima immagine che il software deve analizzare; "Levels" fa riferimento al numero di immagini utilizzate per calcolare gli spostamenti; "Image time sampling" è il parametro utilizzato per selezionare alcune immagini e ridurre in questo modo il tempo di calcolo. Gli ultimi tre parametri corrispondono alla dimensione del template (w) e ai bordi in direzione x (d/2) e y (b/2) espressi in pixel. L'ultima opzione che è possibile selezionare fa riferimento alla creazione di GIF animate a partire dai campi di spostamenti e deformazioni ottenuti al termine dell'analisi. Impostati i parametri, il tasto "Run" consente di avviare l'elaborazione delle immagini (Ravanelli et al., 2017).

## 2.2 Risultati di py2DIC

Come già accennato in precedenza, il software py2DIC calcola gli spostamenti ( $u, v$ ) e le deformazioni ( $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ ) confrontando due o più immagini di un provino acquisite a diversi livelli di deformazione.

Il software consente di eseguire le analisi in diverse fasi. Per ciascuna fase di calcolo, i risultati rappresentano gli spostamenti e le deformazioni cumulati che vengono salvati in file di testo per ciascuna coppia di immagini elaborata. Il primo file contiene le coordinate dei punti della griglia, gli spostamenti lungo le direzioni x e y e la lunghezza dei vettori di spostamento per ciascun punto della griglia. Gli altri file riportano i valori degli spostamenti e delle deformazioni lungo la griglia di calcolo.



Figura 2. Interfaccia grafica

Inoltre le mappe degli spostamenti e delle deformazioni, il grafico relativo ai vettori di spostamento e il grafico degli spostamenti in corrispondenza della sezione centrale del provino sono mostrati al termine del processo e salvati nella cartella dei risultati (Figura 3a, Figura 3b, Figura 4a, Figura 4b, Figura 5a, Figura 5b).

## 3. PROVE DI LABORATORIO

Per investigare le potenzialità del software sviluppato sono state condotte alcune prove di laboratorio. Nello specifico, sono state elaborate immagini acquisite durante prove a trazione eseguite nel Laboratorio di Ingegneria Strutturale dell'Università di Roma "La Sapienza".

In particolare, tre provini realizzati in Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) sono stati sottoposti a prove di trazione mediante l'utilizzo di una macchina a trazione universale (Figura 6). Le prove sono state realizzate inserendo i provini all'interno delle ganasce della macchina a trazione e applicando gradualmente una forza di trazione fino a raggiungere la fratturazione del provino. Durante l'esecuzione delle prove è stato imposto uno spostamento pari a 0,5 mm al minuto e sono stati registrati i valori di allungamento del provino al variare della forza applicata.

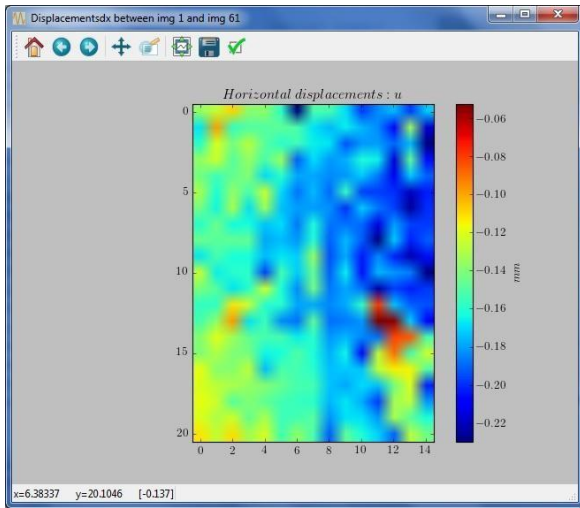


Figura 3a. Spostamenti orizzontali

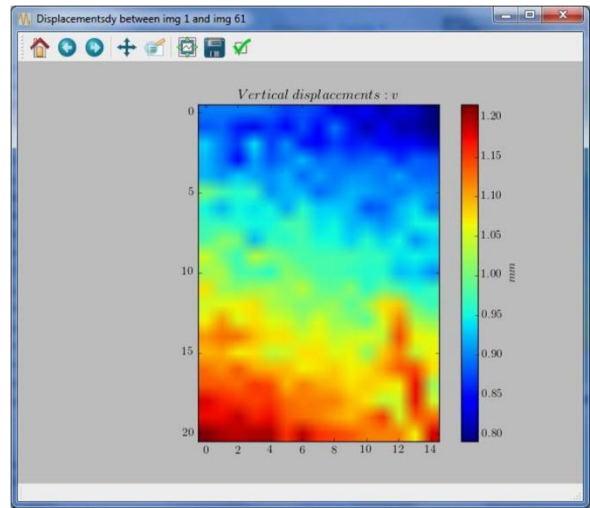


Figura 3b. Spostamenti verticali

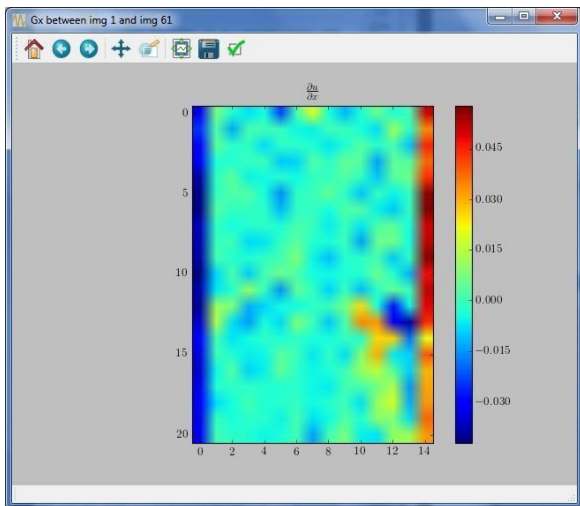


Figura 4a. Deformazioni orizzontali

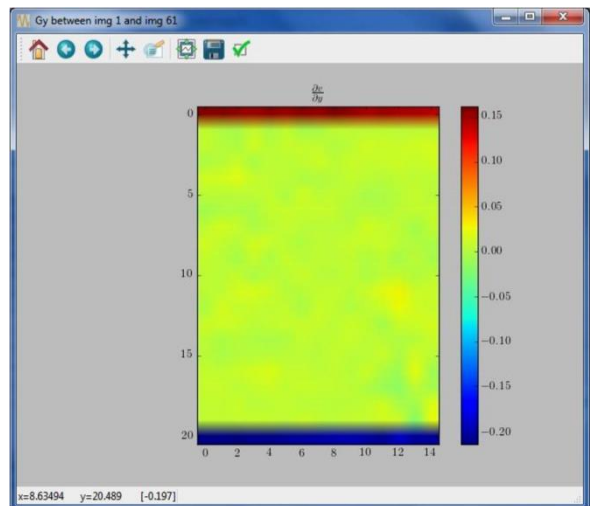


Figura 4b. Deformazioni verticali

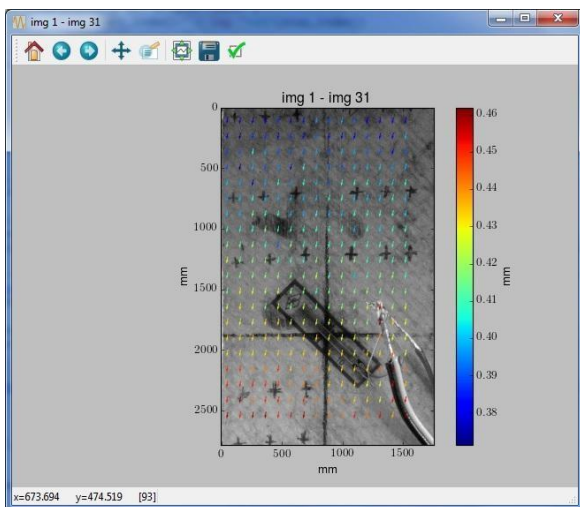


Figura 5a. Vettori spostamento

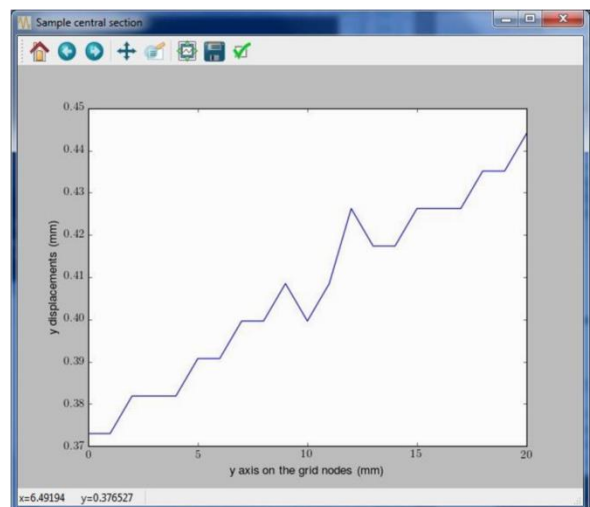


Figura 5b. Spostamenti relativi alla sezione centrale del provino



Figura 6. Setup sperimentale: macchina a trazione e camera Canon EOS 1200D

Una camera Canon EOS 1200D, utilizzata per acquisire le immagini, è stata fissata vicino al provino al di sopra di una barra metallica per evitare vibrazioni durante l'esecuzione delle prove. La camera è stata successivamente connessa ad un computer portatile. Le immagini sono state acquisite mediante il software EOS Digital Solutions Disk Software con un intervallo di acquisizione di 5 secondi e una risoluzione di 5.184x3.456 pixel. Relativamente a tali prove, la distorsione ottica della camera è stata trascurata.

Infine, sono stati installati alcuni estensimetri PFL-10-11 sulla superficie del provino per misurare in modo indipendente le deformazioni durante l'esecuzione delle prove. Tali strumenti sono stati installati come riferimento per valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti tramite l'utilizzo del software sviluppato.

Le immagini acquisite durante le prove sono state processate mediante il software py2DIC e i risultati sono stati confrontati con gli spostamenti ottenuti a partire dalle deformazioni misurate tramite l'utilizzo degli estensimetri. Nello specifico, è stato scelto un valore di  $w$  pari a 65 pixel e valori di  $d/2$  e  $b/2$  rispettivamente pari a 5 e 28 pixel.

Durante le prove sono stati utilizzati tre provini ricavati tagliando una trave in GFRP secondo diversi orientamenti delle fibre come mostrato in Figura 7 e Tabella 1.

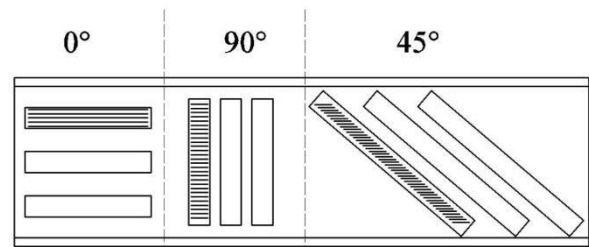


Figura 7. Orientamento delle fibre nei tre provini

Provino n.	Orientamento	Larghezza	Altezza	Spessore
	°	mm	mm	mm
1	0	30	124	8
2	90	30	120	8
3	45	30	164	8

Tabella 1. Caratteristiche dei tre provini

#### 4. RISULTATI

Per quanto riguarda la prima prova, sono stati installati quattro estensimetri sulla superficie del provino caratterizzato da un orientamento delle fibre a 90° (Figura 8).

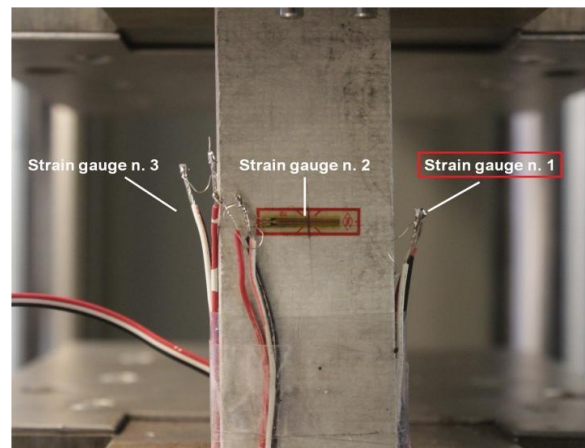


Figura 8. Disposizione degli estensimetri sul provino con orientamento delle fibre a 90°

In particolare un primo estensimetro è stato posizionato orizzontalmente sul lato del provino di fronte alla camera, un secondo è stato collocato sul lato opposto con la stessa disposizione. Gli ultimi due sono stati fissati in posizione verticale al di sopra delle superfici laterali in modo tale da misurare deformazioni verticali. Occorre sottolineare che la tecnica della DIC è in grado di misurare gli spostamenti esclusivamente sulla regione del provino effettivamente contenuta all'interno dell'immagine acquisita. Per questo motivo, poiché l'estensimetro n. 1 non risultava visibile dalla camera, è stato necessario calcolare gli spostamenti verticali considerando la zona della superficie del provino (Figura 9) più vicina all'area effettivamente occupata dall'estensimetro.

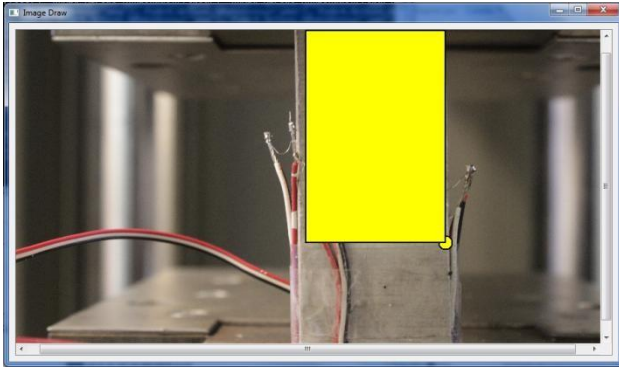


Figura 9. Area selezionata per gli spostamenti verticali

In particolare, tramite l'utilizzo del software, sono stati ricavati i valori di spostamento per ciascun nodo della griglia. Successivamente, per effettuare confronti, sono stati considerati esclusivamente gli spostamenti dei punti collocati vicino le estremità dell'estensimetro. Tali valori sono stati mediati spazialmente ottenendo così due spostamenti, uno relativo alla parte superiore e uno relativo alla parte inferiore dell'estensimetro. In tal modo è stato possibile calcolare la differenza relativa a questi due valori ottenuti mediante tecnica DIC e confrontarla con le deformazioni misurate dall'estensimetro opportunamente moltiplicate per la lunghezza dell'estensimetro stesso. Tale procedura è stata ripetuta per diversi intervalli di tempo; le differenze di spostamenti verticali  $\Delta v$  calcolate sono rappresentate in funzione del tempo in Figura 10.

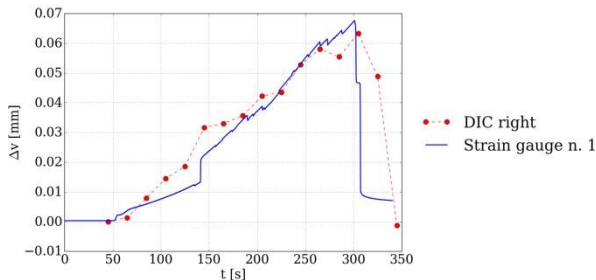


Figura 10. Confronto tra gli spostamenti verticali ottenuti mediante tecnica DIC e le misure estensimetriche relative al provino n. 1

È possibile notare come i risultati ottenuti tramite l'utilizzo del software py2DIC seguano molto bene il trend delle misure registrate dagli estensimetri. Inoltre, il valore di RMSE relativo agli spostamenti calcolati mediante la tecnica DIC risulta essere dell'ordine dei micron rispetto al riferimento dell'estensimetro. Per quanto riguarda questa prima prova, non è stato possibile confrontare i risultati ricavati tramite il software né con l'estensimetro n. 3 per la presenza di fili sull'area di interesse, possibile fonte di errore, né con l'estensimetro n. 2 a causa di spostamenti orizzontali troppo piccoli.

Durante la seconda prova è stato utilizzato il provino caratterizzato da un orientamento delle fibre a 0°. Per quanto riguarda questa prova, sono stati utilizzati tre estensimetri. Due sono stati installati in posizione verticale al di sopra delle superfici laterali del provino in modo da misurare deformazioni verticali, il terzo è stato installato orizzontalmente sulla superficie del provino collocata di fronte alla camera per misurare deformazioni orizzontali. Relativamente a questa seconda prova, è stato possibile misurare sia gli spostamenti verticali sia quelli orizzontali tramite il software py2DIC.

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, è stato utilizzato come riferimento l'estensimetro n. 2. Gli spostamenti misurati tramite py2DIC sono stati mediati spazialmente sui punti della griglia in corrispondenza delle due estremità dell'estensimetro (destra e sinistra). Successivamente, a causa della presenza dei fili in corrispondenza della sezione centrale, è stata calcolata la differenza tra questi spostamenti medi al di sopra e al di sotto dell'estensimetro. Il valore medio tra i due è stato infine confrontato con il valore dello spostamento ricavato a partire dalle misure estensimetriche per diversi intervalli temporali. I risultati sono mostrati in Figura 11.

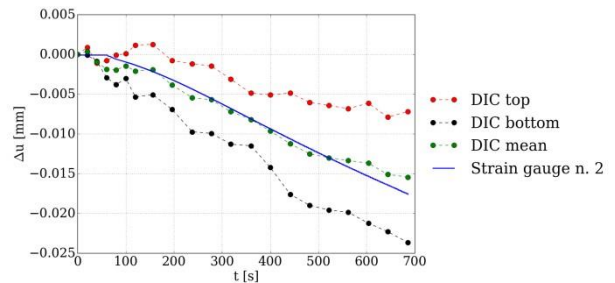


Figura 11. Confronto tra gli spostamenti orizzontali ottenuti mediante tecnica DIC e le misure estensimetriche relative al provino n. 2

Per quanto riguarda gli spostamenti verticali, è stato utilizzato lo stesso approccio della prima prova facendo tuttavia riferimento ad entrambe le superfici laterali del provino. Le differenze di spostamenti  $\Delta v$  calcolate sono rappresentate a diversi intervalli di tempo in Figura 12. I risultati ottenuti mediante l'utilizzo di py2DIC risultano in questo caso leggermente devianti rispetto a quelli ricavati mediante l'uso degli estensimetri, probabilmente a causa dell'effetto dell'eccentricità del carico. È opportuno inoltre ricordare che la tecnica fotogrammetrica è stata in questo caso applicata su aree che non coincidono esattamente con quelle a cui fanno riferimento le misure degli estensimetri collocati sulle superfici laterali del provino e pertanto non visibili nelle immagini.

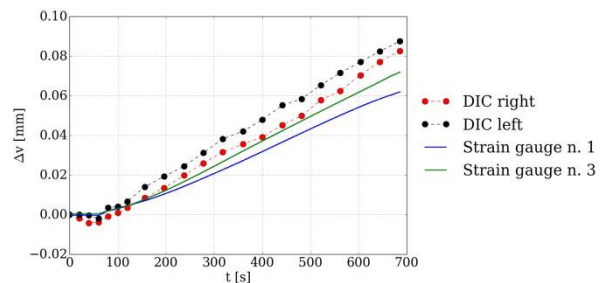


Figura 12. Confronto tra gli spostamenti verticali ottenuti mediante tecnica DIC e le misure estensimetriche relative al provino n. 2

Infine è stato calcolato il modulo di Poisson a diversi intervalli di tempo secondo l'espressione seguente:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (3)$$

ove  $\epsilon_x$  = deformazione in direzione x  
 $\epsilon_y$  = deformazione in direzione y

L'andamento nel tempo del modulo di Poisson è riportato in Figura 13 dove è messo a confronto con il modulo di Poisson relativo alle misure ottenute mediante estensimetri. Per quanto

riguarda i primi 60 secondi, la differenza tra i due andamenti non è da considerarsi significativa perché dovuta ad una fase di assestamento della prova.

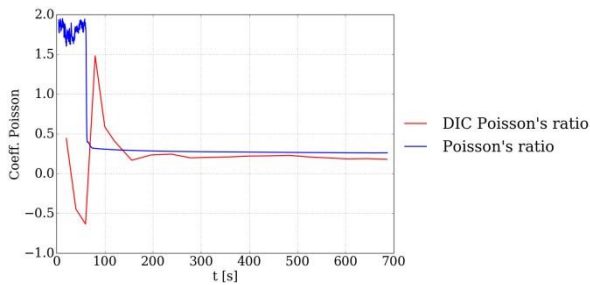


Figura 13. Confronto tra il modulo di Poisson ottenuto mediante tecnica DIC e le misure estensimetriche relative al provino n. 2

I valori medi del modulo di Poisson sono riportati in Tabella 2.

	DIC	Estensimetri
$\nu$ (-)	0.21	0.27

Tabella 2. Confronto del modulo di Poisson per il provino n. 2

Infine, per la terza prova sono stati utilizzati tre estensimetri sul provino con un orientamento delle fibre a 45°. Due di essi sono stati posizionati lateralmente in posizione verticale, il terzo è stato installato a 45° sulla faccia del provino collocata di fronte alla camera.

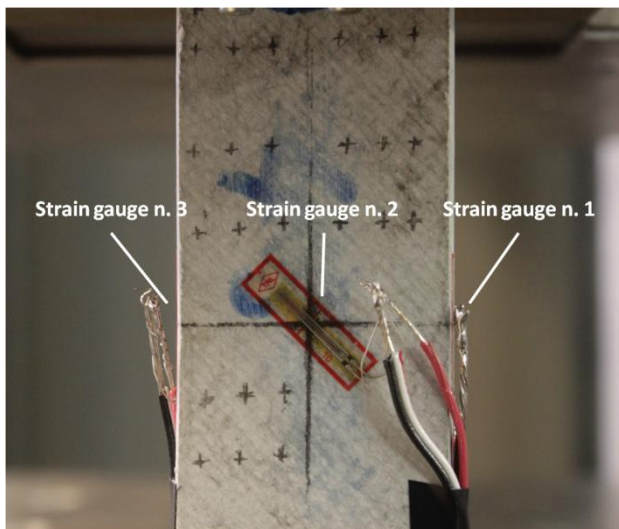


Figura 14. Disposizione degli estensimetri sul provino con orientamento delle fibre a 45°

Come descritto precedentemente per le prime due prove, sono state calcolate le differenze di spostamenti  $\Delta u$  e  $\Delta v$  per diversi intervalli di tempo e sono state riportate rispettivamente in Figura 15 e Figura 16.

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, in questo caso non è stato possibile ottenere un confronto a causa dell'assenza di estensimetri orizzontali. Gli spostamenti verticali sono stati calcolati e risultano in accordo con i valori misurati mediante estensimetri; ciò conferma ancora una volta le buone performance del software sviluppato. Relativamente a questa prova, è stato infine possibile valutare l'andamento del modulo di Poisson per diversi intervalli temporali e il suo valor medio che risulta pari a 0.37.

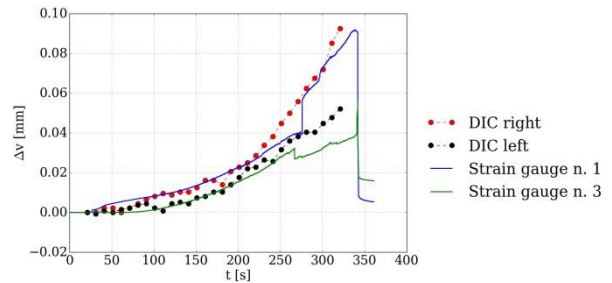


Figura 15. Confronto tra gli spostamenti verticali ottenuti mediante tecnica DIC e le misure estensimetriche relative al provino n. 3

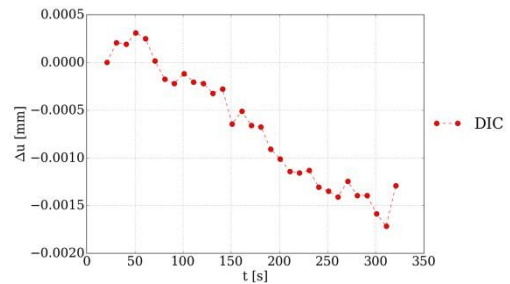


Figura 16. Andamento degli spostamenti orizzontali ottenuti mediante tecnica DIC relativi al provino n.3

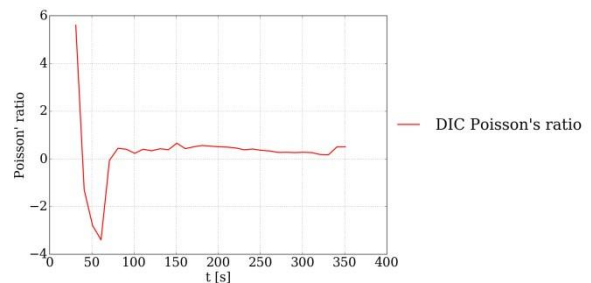


Figura 17. Andamento del modulo di Poisson relativo al provino n. 3

In questo caso, a causa dell'assenza di misure relative ad un estensimetro orizzontale, il modulo di Poisson calcolato mediante py2DIC è stato confrontato con quello ottenuto con l'utilizzo di un Modello agli Elementi Finiti (FEM) implementato tramite il software SAP2000 (Computers and Structures Inc, 2017). Il modello utilizzato è raffigurato in Figura 18 nella quale sono evidenziati i punti utilizzati per il calcolo del modulo.

A partire dai valori di spostamento relativi a questi punti sono state calcolate le deformazioni in direzione x e y e il modulo di Poisson. La Tabella 3 riporta il confronto relativo al modulo di Poisson calcolato mediante DIC e quello ottenuto tramite l'utilizzo del modello agli elementi finiti.

	DIC	Modello SAP2000
$\nu$ (-)	0.37	0.40

Tabella 3. Confronto del modulo di Poisson per il provino n.3

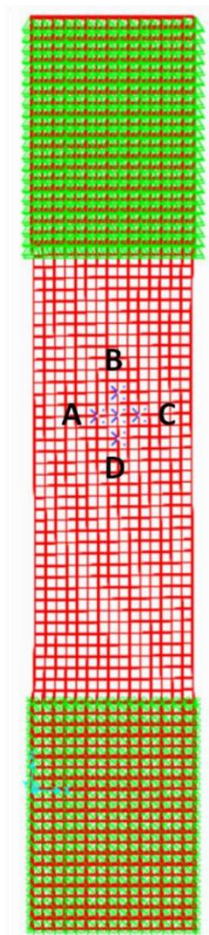


Figura 18. Modello agli Elementi Finiti (FEM)

#### 4. CONCLUSIONI

py2DIC è un software gratuito e open source sviluppato interamente all'interno dell'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza".

Le potenzialità di tale software sono state valutate processando immagini relative a tre provini in GFRP acquisite durante tre prove a trazione eseguite nel laboratorio di Ingegneria Strutturale dell'Università di Roma "La Sapienza". I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli misurati tramite l'utilizzo di estensimetri installati al di sopra delle superfici del provino; tali risultati dimostrano la possibilità di caratterizzare il meccanismo di deformazione di un materiale in GFRP sottoposto ad un sistema di carico.

Il software implementato è in grado di evidenziare spostamenti a livello del micron che sono in accordo con le misure di riferimento sia in termini di spostamenti che di modulo di Poisson.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si potrebbe utilizzare una frequenza di acquisizione di fotogrammi maggiore in modo da poter studiare fenomeni transitori come le fratture. Infine, potrebbe essere interessante implementare un approccio stereo per caratterizzare le deformazioni tridimensionali che possono verificarsi durante l'esecuzione delle prove di carico.

#### RINGRAZIAMENTI

L'autrice è sinceramente grata al Prof. Mattia Crespi e all'Ing. Roberta Ravanelli per il sostegno, gli incoraggiamenti ed i consigli ricevuti durante la stesura di questo lavoro.

#### BIBLIOGRAFIA

Baqersad, J., Poozesh, P., Niezrecki, C. e Avitabile, P., 2017, Photogrammetry and optical methods in structural dynamics a review. *Mechanical Systems and Signal Processing* 86, pp. 17–34.

Bradski, G. e Kaehler, A., 2008, *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc.

Computers and Structures Inc, 2017, <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>.

Harilal R. e Ramji M., 2014, Adaptation of open source 2D DIC software Ncorr for solid mechanics applications, *International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*.

Jones, E. M. C., Silberstein, M. N., White, S. R. e Sottos, N. R., 2014, In situ measurements of strains in composite battery electrodes during electrochemical cycling, *Experimental Mechanics* 54(6), pp. 971–985.

McCormick, N. e Lord, J., 2010, Digital image correlation, *Materials Today* 13(12), pp. 52–54.

Pan, B., Qian, K., Xie, H. e Asundi, A., 2009, Two dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review, *Measurement science and technology* 20(6), pp. 06201.

Ravanelli, R., Nascetti, A., Di Rita, M., Belloni, V., Mattei, D., Nistico, N. e Crespi, M., 2017, A new digital image correlation software for displacements field measurement in structural applications, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W2*, pp. 139–145.