

Sommario

Introduzione.....	2
Capitolo 1: Spostamenti e deformazioni.....	2
1.1 Analisi locale della deformazione e il tensore delle piccole deformazioni	3
1.2 Piccole deformazioni.....	5
1.3 Grandi deformazioni.....	9
1.4 Tensori della deformazione.....	10
Capitolo 2: Digital Image Correlation (D.I.C.)	12
2.1 Immagini speckle.....	15
2.2 Tecniche di cross-correlation	16
2.3 Correlazione a campo intero.....	20
2.4 Stereo visione e 3-D D.I.C.....	22
Capitolo 3: Calcestruzzo.....	24
3.1 Composizione.....	24
ACQUA.....	26
AGGREGATI.....	26
RINFORZO.....	27
ADDITIVI.....	27
Capitolo 4: Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)	28
4.1 Analisi del materiale.....	30
4.2 Protocollo di condizionamento invecchiante.....	32
4.3 Resistenza alla compressione e alla flessione della malta	33
4.4 Resistenza a trazione e modulo elastico dei filati di vetro.....	34
4.5 Prove di legame a taglio singolo.....	37
Capitolo 5: Prova sperimentale	40
Capitolo 6: Risultati sperimentazione	42
6.1 Risultati delle deformazioni	42
6.2 Risultati Estensione FRCM.....	55

Introduzione

La tesi ha come obiettivo principale quello di spiegare l'esperienza fatta in laboratorio, acquisizione e elaborazione dati, nell'intento di studiare il comportamento di un provino in calcestruzzo murato in mattoni e tufo sottoposto a una forza di trazione. Il provino è rinforzato da una griglia in FRCM, sulla quale verrà applicata una forza normale che deformerà il materiale fino a avere una rottura dello stesso. Questa sperimentazione è stata fatta per analizzare i miglioramenti del CLS a trazione dovuti al rinforzo utilizzato. L'esperienza è stata svolta in laboratorio, tramite provini in CLS murati che hanno tra loro geometrie differenti. L'obiettivo della tesi è l'analisi della deformazione del provino in CLS e dello spostamento della griglia, in base alle varie esperienze fatte in laboratorio, utilizzando le immagini raccolte da due telecamere e elaborate tramite il programma di calcolo vettoriale e elaborazione dati "matlab", che ha dato come risultato le deformazioni. Le immagini sono state acquisite tramite il sistema D.I.C. (Digital Image Correlation), sistema successivamente spiegato all'interno della tesi. In conclusione verranno presentati i risultati e una spiegazione più dettagliata dell'esperienza.

Capitolo 1: Spostamenti e deformazioni.

Il modello di corpo rigido si presuppone di dare risposte esaurienti solo per ciò che riguarda l'aspetto statico, e richiede sicuramente di essere ampliato, in effetti l'ipotesi di rigidità deve essere rimossa perché ogni corpo soggetto a un sistema di sollecitazioni esterne, si deforma, ovvero subisce degli spostamenti che lo portano ad assumere una forma e geometria diverse rispetto a quelle che aveva nella configurazione iniziale. Bisogna procedere però gradualmente e operare una prima distinzione tra "piccole" e "grandi" deformazioni le prime sono caratteristiche del campo elastico dove si osserva una relazione biunivoca lineare tra tensione σ e deformazione ϵ (legge di Hooke), dove opera il materiale nei casi comuni, in tale condizione si può ricorrere ad una trattazione approssimata. La seconda invece è tipica del campo plastico, qui la differenza di dimensione è apprezzabile ampiamente e diviene doveroso ricorrere ad una trattazione completa priva di ogni approssimazione.

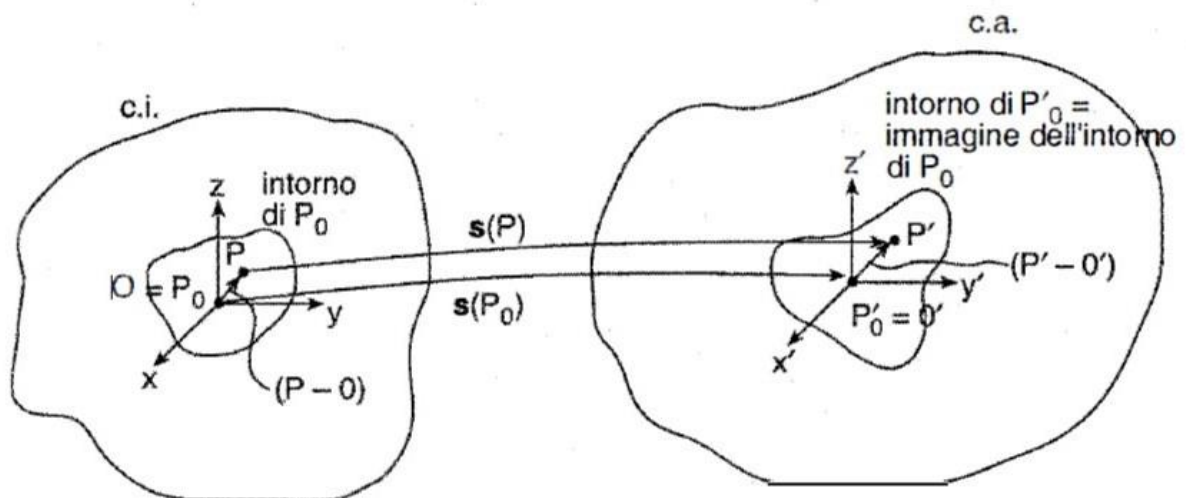
1.1 Analisi locale della deformazione e il tensore delle piccole deformazioni

Da un punto di vista prettamente matematico, l'estensione alla deformabilità dei corpi consiste nell'osservare come si modifica l'espressione fondamentale della cinematica rigida:

$$s(P) = s(O) + \mathbf{W}(P - O); \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & \mathbf{0} & -\theta_x \\ \theta_y & \theta_x & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

L'ipotesi di piccoli spostamenti suggerisce di studiare in dettaglio ciò che avviene nell'intorno di un generico punto P_0 della configurazione in deformata (fig 2.-1), dove si posiziona l'origine del sistema di riferimento, per una semplificazione dei conti, $P_0 = O = (0,0,0)$. Partendo sempre dalla relazione generale di moto rigido per un generico punto P vale la relazione:

$$(P' - O') = (P - O) + s(P) - s(O)$$



Dal momento che P è vicino ad O , il suo spostamento può essere calcolato da quello di O mediante lo sviluppo in serie di Taylor:

$$u(P) = u(x, y, z) = u(0,0,0) + \frac{\partial u}{\partial x}(0,0,0)x + \frac{\partial u}{\partial y}(0,0,0)y + \frac{\partial u}{\partial z}(0,0,0)z + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(0,0,0)x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(0,0,0)y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}(0,0,0)z^2 + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}(0,0,0)xy + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z}(0,0,0)xz + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}(0,0,0)yz + \dots \quad (2.2)$$

Trascurando i termini di ordine superiore al primo, usando una notazione più compatta e ragionando allo stesso modo per v e w , si ottiene

$$\begin{aligned}
 u(P) &= u(O) + \frac{\partial u}{\partial x}x + \frac{\partial u}{\partial y}y + \frac{\partial u}{\partial z}z + \dots \\
 v(P) &= v(O) + \frac{\partial v}{\partial x}x + \frac{\partial v}{\partial y}y + \frac{\partial v}{\partial z}z + \dots \\
 w(P) &= w(O) + \frac{\partial w}{\partial x}x + \frac{\partial w}{\partial y}y + \frac{\partial w}{\partial z}z + \dots \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Trasponendo il tutto in forma matriciale si ottiene:

$$\begin{Bmatrix} u(P) \\ v(P) \\ w(P) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(O) \\ v(O) \\ w(O) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} + \dots \Rightarrow$$

$$\Rightarrow s(P) = s(O) + \nabla s(P - O) + \dots,$$

(2.4)

dove la matrice 3x3 indicata con ∇s è il gradiente di $s(P)$ calcolato in O . Tale matrice chiamata comunemente *giacobiana* (\mathbf{J}_s), contiene le componenti del vettore gradiente di ciascuna componente scalare del vettore spostamento. Tale matrice è quindi, un operatore che associa a ciascun vettore $P_i P_j$ il relativo vettore spostamento di P_j rispetto a P_i , attraverso l'operazione di moltiplicazione matriciale. La matrice gradiente di spostamento inoltre, può essere decomposta come una somma di due matrici: una rappresentativa della deformazione e l'altra rappresentativa degli spostamenti rigidi che non contribuiscono alla deformazione. A tal fine risulta necessario separare \mathbf{J}_s nella somma di una matrice simmetrica e di una antisimmetrica che chiameremo rispettivamente \mathbf{E} e \mathbf{W} .

$$E = \frac{1}{2} (J_s + J_s^T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$W = \frac{1}{2} (J_s - J_s^T) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 0 \end{bmatrix}$$

Appare ora chiaro come si possa scrivere $s(P) = s(O) + W(P - O) + E(P - O) + \dots$.

Facendo adesso un confronto con la relazione fondamentale dei moti rigidi, si ricava che $s(O)$ e $W(P - O)$, descrivono rispettivamente, la traslazione e la rotazione rigida dell' intorno di P_0 .

Di conseguenza la deformazione sarà descritta da $E(P - O)$; E sta a rappresentare infatti il *tensore delle piccole deformazioni* e W il *tensore delle piccole rotazioni* . La scomposizione di J_s nella parte simmetrica e antisimmetrica può essere realizzata solo ed esclusivamente quando le componenti sono piccole rispetto ad un radiante quando rappresentano una rotazione rigida, per realizzare ciò è sufficiente che tutte le componenti del gradiente di spostamento siano piccole se confrontate all'unità, solo in tal caso infatti il vettore della deformazione "e" rappresenta la parte del versore dello spostamento relativo non attribuibile ad una locale rotazione rigida dell'elemento che inizialmente è in P: $e = E \cdot \hat{n}$.

1.2 Piccole deformazioni.

Andando ad analizzare un generico corpo rigido sollecitato esternamente, prendendo un generico punto P_0 , per semplicità $P_0 = O(0,0,0)$, scegliendo un punto P sull'asse delle "x" individuiamo un segmento che nella configurazione che chiameremo iniziale (c.i.) avrà lunghezza l_i , nella configurazione che chiameremo attuale (c.a.), avrà una lunghezza finale

l_f , sicuramente diversa.

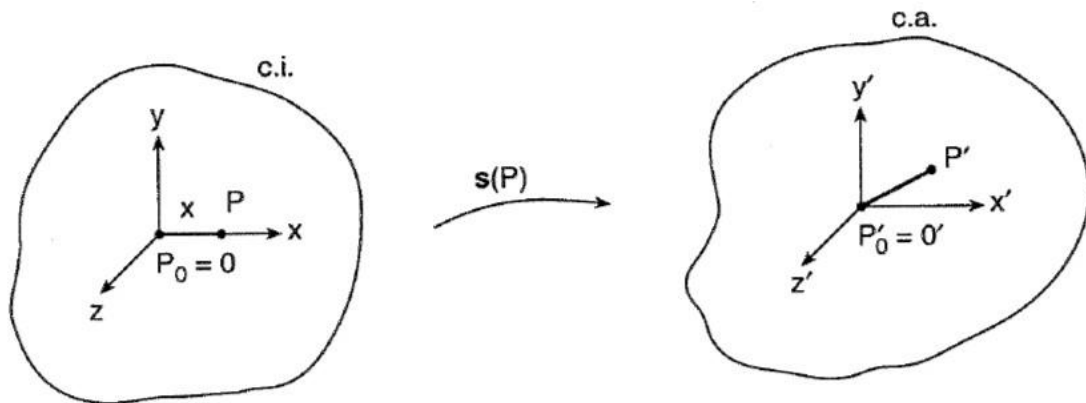


Figura 2.2

Per misurare l'ampiezza di questo scostamento è opportuno introdurre il *coefficiente di dilatazione lineare*, il quale viene calcolato lungo la direzione individuata dal vettore rappresentativo della lunghezza del segmento considerato.

Lungo una generica direzione \hat{s} è il rapporto:

$$\varepsilon_s = \frac{l_f - l_i}{l_i}, \text{ da cui } l_f = (1 + \varepsilon_s)l_i \quad (2.6)$$

Viene assunto positivo per allungamenti, negativo per accorciamenti e in conseguenza dell'ipotesi di piccole deformazioni sarà un numero piccolo.

Per il calcolo di tale coefficiente lungo x , si faccia riferimento alla situazione sopra illustrata di fig. 2.2.

Assumendo $(P - O) = \begin{Bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$, ripartendo dalla matrice gradiente di spostamento avremo:

$$(P' - O') = \begin{Bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} x + \dots \quad (2.7)$$

La lunghezza finale al quadrato di tale segmento vale quindi (trascurando i termini di grado superiore al primo per ipotesi di piccoli spostamenti):

$$l_f^2 = |P' - O'|^2 = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right] x^2 = \left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \dots\right) x^2.$$

Facendo un confronto con la 2.6₂:

$$l_f^2 = (1 + 2\varepsilon_x + \varepsilon_x^2)x^2 = (1 + 2\varepsilon_x + \dots)x^2.$$

Appare evidente che il coefficiente di dilatazione lineare lungo x è pari a:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.8)$$

ragionando in maniera analoga è possibile dedurre le espressioni lungo le altre direzioni degli assi principali:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.9)$$

Queste espressioni mettono in relazione spostamenti e deformazioni. Dalla comparazione con i termini che costituiscono la matrice jacobiana, si può affermare che i termini sulla diagonale principale non sono altro che la misura della variazione di lunghezza lungo gli assi del sistema di riferimento.

Gli angoli così come le lunghezze sono altre grandezze fondamentali che variano a seguito di una sollecitazione, avendo rimosso l'ipotesi di rigidità, subiscono una variazione. Per la loro valutazione occorre però individuare 2 direzioni; facendo riferimento al caso precedente sarà necessario individuare un secondo segmento, tramite la definizione di un punto Q sull'asse delle y , in tal modo otteniamo un angolo iniziale che chiameremo $\alpha_i = \frac{\pi}{2}$ (fig. 2.3).

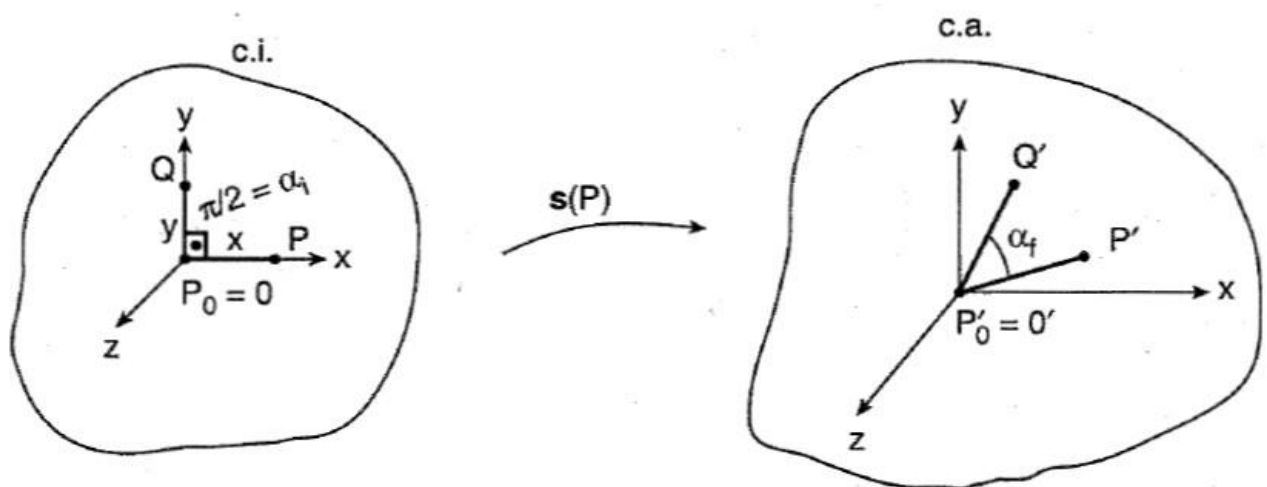


Figura 2.3

Il parametro che ne permette una quantificazione, è il *coefficiente di scorrimento angolare* che per due direzioni generiche \hat{s} e \hat{t} è la differenza:

$$\gamma_{st} = \alpha_i - \alpha_f ; \text{ con } \alpha_f \text{ angolo nella configurazione attuale.} \quad (2.10)$$

Anche questo coefficiente è adimensionale, assunto positivo per angoli che si chiudono, negativo per angoli che si aprono, e anche questo costituirà per le assunzioni fatte un numero "piccolo".

Tornando a valutare lo scorrimento angolare tra x ed y, preso $(Q - O) = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$, dalla relazione

di spostamento:

$$(Q' - O') = \left\{ 1 + \frac{\partial u}{\partial y} \right\} y + \dots \quad (2.11)$$

Per determinare l'angolo $\alpha_f = (P'O'Q')$ si ricorre alle proprietà del prodotto scalare:

$$(P' - O') \times (Q' - O') = |P' - O'| |Q' - O'| \cos \alpha_f \quad (2.12)$$

Ora dal momento che:

$$|P' - O'| = l_f = (1 + \varepsilon_x)x$$

$$|Q' - O'| = l_f = (1 + \varepsilon_y)y$$

$$\alpha_f = \alpha_i - \gamma_{xy} = \left(\frac{\pi}{2}\right) - \gamma_{xy} \Rightarrow \cos \alpha_f = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_{xy}\right) = \sin \gamma_{xy} = \gamma_{xy} + \dots$$

il prodotto scalare diviene:

$$(P' - O') \times (Q' - O') = (1 + \varepsilon_x)x(1 + \varepsilon_y)y\gamma_{xy} + \dots = xy\gamma_{xy} + \dots \quad (2.13)$$

Operando ora lo stesso calcolo per componenti, e operando un confronto:

$$(P' - O') \times (Q' - O') = xy \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] = xy \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \dots \quad (2.14)$$

Si giunge ad affermare che:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (2.15)$$

Analogamente si ottengono le relazioni che misurano le variazioni di angolo tra gli assi del sistema di riferimento:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.16)$$

Le relazioni enunciate nella 2.15 e 2.16 non sono altro che la metà dei termini fuori diagonale della matrice J_s . Si può concludere quindi che il tensore della deformazione può essere riscritto al modo seguente:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{yx}}{2} & \frac{\gamma_{zx}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{zy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Che costituisce a tutti gli effetti una notazione alternativa.

1.3 Grandi deformazioni.

Le definizioni fin ora fornite sono date tutte a partire dal vettore spostamento “ \mathbf{s} ”. Questo è definibile come la minima distanza che congiunge la posizione iniziale a quella finale. Fin tanto che rimaniamo all’interno della teoria elastica dei continui tutto ciò che accade durante il mutamento di configurazione non è rilevante: sono sufficienti le analisi della c.i. e della c.a. per definire in maniera completa la deformazione. Quando invece, entriamo in campo plastico diventa doveroso spiegare il comportamento assunto nelle fasi transitorie che precedono la configurazione attuale, ovvero bisogna spiegare il moto dei punti nel continuo.

È possibile operare quattro tipologie di descrizioni, tutte basate sulla cinematica non relativistica classica:

- *descrizione materiale*: le variabili dipendenti in gioco sono i punti materiali X ed il tempo t. L’equazione del moto è del tipo:

$$x = x(X, t) \quad (2.18)$$

Si determina la posizione x occupata da un punto al tempo t.

- *descrizione referenziale*: le variabili in gioco sono la posizione x del punto materiale X al tempo t in una assegnata configurazione di riferimento. Generalmente in campo elastico si assume quella in deformata, all’istante iniziale t=0. Quando si considera questa condizione per

tale tipo di descrizione, prende un nome caratteristico; si parlerà di *descrizione lagrangiana*.
L'equazione del moto in un riferimento cartesiano è della forma:

$$x_r = x_r(X_1, X_2, X_3, t)$$

Dove X_1, X_2, X_3 , sono le coordinate del punto materiale nella configurazione di riferimento, mentre, le x_r sono le coordinate spaziali al tempo t .

- *descrizione spaziale*: le variabili in gioco qui sono l'attuale posizione x occupata dal punto materiale al tempo t ed il tempo t stesso. L'attenzione è focalizzata su una regione in cui avviene lo spostamento. Tale descrizione viene comunemente chiamata *Euleriana*.

- *descrizione relativa*: le variabili in gioco sono l'attuale posizione x del punto materiale e la variabile tempo τ , che costituisce il tempo che impiega un punto materiale a raggiungere una nuova posizione.

Sono proprio le modalità di descrizione a creare una distinzione tra le varie definizioni che è possibile attribuire alle "grandi deformazioni", tuttavia si possono distinguere due gruppi di formulazioni:

-la *formulazione lagrangiana*

-la *formulazione euleriana*

La prima va a definire le coordinate materiali nella configurazione in deformata, l'altra le coordinate spaziali in quella deformata.

1.4 Tensori della deformazione.

Per l'introduzione dei tensori della deformazione partiamo dalla definizione del tensore gradiente di deformazione, per la sua definizione, prendiamo in considerazione un generico punto materiale P che all'istante iniziale è in una configurazione X , ad un successivo istante di tempo, questo si troverà in una nuova posizione. Per la descrizione possiamo utilizzare sia una notazione lagrangiana che euleriana; rispettivamente possiamo scrivere :

$$\begin{aligned}x &= (X, t) \Rightarrow x_i = x_i(X_1, X_2, X_3, t) \\X &= (x, t) \Rightarrow X_i = X_i(x_1, x_2, x_3, t)\end{aligned}\tag{2.19}$$

In entrambi i casi il gradiente di deformazione è il gradiente delle funzioni che figurano al primo membro, i quali possono essere scritti come $\frac{\partial x_k}{\partial X_K}$, dove con i pedici maiuscoli e minuscoli si esprime la differenza tra configurazione iniziale e attuale. Usualmente il gradiente di deformazione si indica con F e il suo trasposto è $F^T = \nabla x$; F è quindi un tensore a tutti gli effetti le cui coordinate cartesiane sono le derivate parziali $\frac{\partial x_k}{\partial X_K}$, che permettono la trasposizione di un qualsiasi vettore infinitesimo dX di X , nel corrispondente dx di x :

$$dx = F \cdot dX \quad \text{o} \quad dx = dX \cdot F^T \quad (2.20)$$

Va accentuato il fatto che le componenti del gradiente di deformazione sono “finite”, ed esprimono la deformazione in un intorno infinitesimo del punto materiale considerato. A questo punto è possibile definire i tensori della deformazione che si dividono in due categorie, quelli di Almansi-Hemmel e quelli di Cauchy-Green; la differenza risiede nel fatto che i primi determinano il cambiamento dalla lunghezza al quadrato di un vettore materiale. Nel prosieguo della trattazione ci serviremo solo del tensore C , meglio detto *tensore destro di Cauchy*, definito come:

$$C = F^T \cdot F \quad (2.21)$$

Ogni spostamento subito da un corpo, possiede due contributi, uno derivante da uno spostamento rigido, l'altro derivante da un contributo di deformazione pura. In particolare una trasformazione di un generico punto descritta da un tensore F , la si può immaginare come composta da una rotazione dell'intorno e da una deformazione pura del punto. Andando ad analizzare i vari contributi, definito R come un tensore ortogonale descrittore della rotazione, possiamo scrivere:

$$F = R \cdot C \quad (2.22)$$

Il tensore destro di Cauchy costituisce il tensore degli allungamenti λ , in particolare gli autovalori ad esso associati sono gli allungamenti principali $(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3)$. Come tutti i tensori simmetrici del secondo ordine anche il tensore destro possiede 3 valori principali, di conseguenza tre direzioni principali e tre invarianti; se scritto in forma matriciale, la matrice che ne permette una descrizione avrà termini tutti positivi, questo quindi implica che i valori principali di C siano positivi da cui:

$$C \cdot N_k = \lambda_k^2 \cdot N_k \quad (2.23)$$

Dove gli N_k sono gli autovalori, che costituiscono le direzioni principali, elevazione al quadrato degli allungamenti principali.

Per quanto riguarda la descrizione degli spostamenti, si può quindi concludere, che quando operiamo in campo elastico questi sono molto piccoli e di conseguenza una trattazione lineare è più che sufficiente, quando invece, si studia la plasticità, questi assumono valori sensibili per i quali non è possibile praticare una tale approssimazione.

Capitolo 2: Digital Image Correlation (D.I.C.)

La misura della deformazione in molti campi richiede un'elevata precisione. Per esempio, nel settore minerario e ingegneria strutturale per prevedere i fallimenti di strutture, in biomeccanica per analizzare la stabilità del movimento di diverse parti del corpo, nell'ingegneria elettronica per misurare l'espansione dei circuiti integrati a causa del cambiamento di temperatura, nell'ingegneria meccanica analizzare la stabilità dei veicoli terrestri e aerei ad alta velocità e carico pesante, nelle immagini mediche per misurare il movimento e i cambiamenti nelle diverse parti del corpo, e in sismologia per capire il movimento tra placche tettoniche. La misurazione della deformazione comporta la misurazione degli spostamenti e ceppi di ciascun punto sulla superficie del campione che si trova sottoprocesso di deformazione. Queste misurazioni successivamente aiutano a ricostruire i campi di spostamento e deformazione. Questo studio si concentra su due misure di deformazione dimensionale. Esistono diversi modi per misurare la deformazione. tradizionalmente, gli estensimetri vengono utilizzati collegandoli sulla superficie del campione a più punti per misurare i loro spostamenti. Tuttavia a causa della natura fisica dei dispositivi, il processo di misurazione della deformazione non può essere completato da remoto utilizzando estensimetri senza essere in contatto con la superficie del campione. Inoltre, la dimensione fisica degli estensimetri limita la sua misurazione a un numero limitato di punti sulla superficie di campione. Pertanto, le misurazioni della deformazione devono essere interpolate in punti mancanti sulla superficie del campione. Infine, un altro importante la

limitazione degli estensimetri misura lo spostamento del punto in a solo direzione unica. Alternato al processo di misurazione della deformazione fisica, un telecomando il metodo è usare le immagini. Questo processo richiede due immagini: una prima e una dopo la deformazione chiamate immagini di riferimento e deformate rispettivamente. Ci sono molte tecniche per misurare la deformazione con alta precisione usando le immagini. Molte di queste tecniche sono basate su principio di correlazione di segmenti di immagini e sono generalmente classificati come varianti di Digital Image Correlation (DIC). Il processo di DIC implica la selezione di un segmento dell'immagine di riferimento tale che il punto di interesse sia al centro del segmento selezionato dell'immagine. Questo segmento dell'immagine è noto come sottoinsieme di un Immagine. In DIC, la correlazione tra sottoinsieme dell'immagine di riferimento e il sottoinsieme dell'immagine deformata è massimizzato stimando gli spostamenti del sottoinsieme dei punti di riferimento nell'immagine deformata e i loro gradienti. Ciò richiede DIC per ottimizzare sei variabili che includere spostamenti in due direzioni (orizzontale e verticale) e le loro quattro sfumature. La correlazione massimizzata fornisce la stima nuova posizione spostata del punto di interesse nell'immagine deformata. Il processo di correlazione delle immagini viene ripetuto per tutti i punti dell'immagine di riferimento per ottenere le loro nuove posizioni nell'immagine deformata. Questo aiuta ricostruire i campi di spostamento completi sia in orizzontale che in verticale. I campi di deformazione possono essere ottenuti utilizzando i gradienti stimati degli spostamenti ottimizzati durante il processo di correlazione dei sottoinsiemi. Un altro modo per ottenere campi di deformazione è il calcolo dei gradienti di i campi di spostamento ottenuti numericamente. L'accuratezza misurata degli spostamenti di DIC viene riportata per ottenere un centesimo di pixel in condizioni adeguate. Si prevede che la precisione minima prevista per la misurazione della deformazione nei solidi deformabili sia di un decimo di pixel. Le prestazioni del DIC dipendono da molti fattori come la dimensione del sottoinsieme selezione, processo di stima, modello sulla superficie del campione, equipaggiamento dell'immagine, distorsioni dell'immagine e forma di deformazione sottostante. Tuttavia, esiste una limitazione critica del DIC che presume che la deformazione sulla superficie del campione sia continua. Per tanto la DIC non funziona in presenza di crepe e fessure che causano discontinuità nella deformazione. Questa importante restrizione del DIC rende la ricostruzione dei campi di deformazione e deformazione molto impegnativa in solidi deformabili dove

appaiono regolarmente crepe e fessure. Pochi esempi sono: muri di miniere che hanno rocce di dimensioni diverse, ponti costituiti da spazi vuoti tra blocchi di cemento e edifici con finestre e porte.

L'acquisizione delle immagini può essere effettuata a luce naturale o artificiale, tipicamente viene realizzata sul provino una distribuzione casuale di macchioline (speckles) con vernice nera e bianca ad alto contrasto con il fondo, la cui funzione è di incrementare l'efficacia computazionale. Le telecamere più usate sono dotate di sensore bianco e nero, il cui segnale viene poi convertito in scala di grigi; in tal modo si riesce ad attribuire ad ogni pixel un valore che permette di "digitalizzare" l'immagine in un insieme di intensità (scala 0-255) come mostrato nella figura 1.1. Nell'analisi bidimensionale viene impiegata una sola telecamera mentre rilevazioni tridimensionali ne richiedono un minimo di due; è da rilevare però, che recenti pubblicazioni prevedono l'utilizzo di telecamere a colori RGB (red-green-blue) che consentono di ottenere tre immagini con una sola cattura, semplificando molto le problematiche connesse al posizionamento di più dispositivi.

Sono numerose le tecniche matematiche sviluppate per tracciare le deformazioni, tutte con un livello di precisione del sub-pixel.

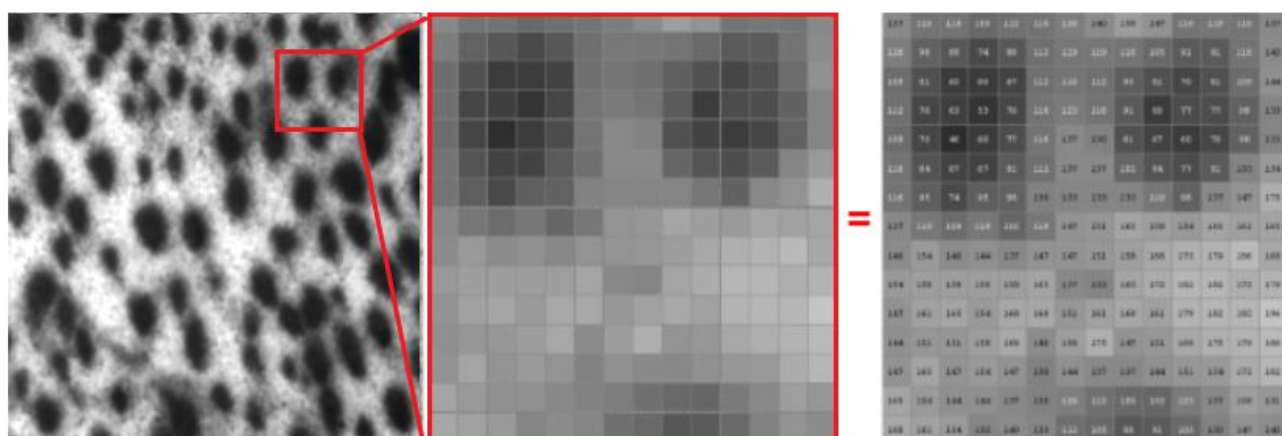


Figura 1

2.1 Immagini speckle

Le immagini speckle come abbiamo sopra accennato sono ottenute mediante la realizzazione sulle superfici oggetto di analisi una distribuzione del tutto casuale di macchioline caratterizzate da una certa tonalità di grigio.

L'esecuzione di tale operazione è estremamente semplice e non richiede nessuna attrezzatura specifica, sono necessarie una bomboletta di vernice acrilica nera ed eventualmente una bianca, qualora la superficie del materiale non riesca a garantire un corretto contrasto.

L'operatore, tuttavia, dovrà effettuare qualche tentativo preliminare che permetta una giusta calibrazione dello spruzzo per ottenere una superficie avente macchie di dimensione abbastanza uniforme. Alternativa valida, consiste nell'utilizzo di luce bianca da laboratorio, orientata parallelamente alla superficie, in modo che sfruttando la normale rugosità del supporto si venga a creare una superficie speckle tramite l'alternanza casuale di zone di luce ed ombra.

L'obiettivo da perseguire è quello di rappresentare ciascun punto della superficie inquadrata un valore corrispondente all'intensità luminosa percepita dal sensore ottico. Si cerca ovvero di rappresentare un intorno di un punto materiale caratterizzato da proprie dimensioni mediante una funzione $f(X;Y)$ che permetta di restituire un valore pari all'intensità della luce riflessa. Bisogna quindi utilizzare un'immagine puntiforme, in pixel, a cui associare questi valori di luminosità. A tal proposito è necessario introdurre un valore che permette di esprimere questa caratteristica che per semplicità chiameremo "i". Tale valore può oscillare in un range compreso tra 0 e 255, corrispondenti rispettivamente al nero e al bianco. I valori intermedi invece rappresentano le diverse tonalità di grigio.

E' proprio la distribuzione casuale a permettere la definizione della funzione $f(X;Y) = i$ su tutto il campo, infatti se la superficie avesse una colorazione omogenea, sarebbe difficile individuare i diversi livelli di grigio, e di conseguenza riferirli ad una posizione sulla superficie materiale.

Partendo da un generico punto materiale $p(x,y)$, il primo step consiste nel creare una corrispondenza "c" con un punto $P(X,Y)$ dell'immagine digitale; da questo poi attraverso $f(X;Y) = i$, si assocerà una certa intensità luminosa.

$$p(x, y) \xrightarrow{c} P(X, Y) \xrightarrow{f(X;Y)} i \quad (3.1)$$

Le grandezze caratterizzanti un'immagine in pixel sono la risoluzione che definisce la quantità dei pixel presenti e la risoluzione spaziale che invece è una misura della densità per unità di lunghezza. A prescindere da questi valori, quando si fa riferimento ad un'immagine di tipo speckle, si parla di un'immagine, sempre rappresentata da un certo numero di elementi $N_x; N_y$ caratterizzati ciascuno da una dimensione predefinita l_x, l_y , pari alla dimensione dei pixel.

Sarà compito dell'operatore di corrispondenza "c" l'attribuzione a ciascun intorno materiale di dimensioni L_x, L_y di un pixel di dimensioni l_x, l_y . Risulta chiaro che la corrispondenza non può essere biunivoca, ma con un buon grado di precisione si possono selezionare delle aree aventi dimensioni $l_{xi}; l_{yi}$ composte da $N_x \times N_y$ pixel aventi un determinato valore i , questa sinteticamente può essere rappresentata come una matrice $M_a(g)$.

In conclusione questo vuol dire che la funzione $f(X; Y)$ non è continua, bensì discreta $F(n_x, n_y)$ con $n_x \leq N_x$, e $n_y \leq N_y$, tali che l'immagine o parte di essa sia rappresentabile attraverso la matrice $M(F(n_x, n_y))$. Il valore di F viene determinato nel momento in cui l'immagine digitale viene acquisita ed è funzione delle caratteristiche ottiche della telecamera digitale.

2.2 Tecniche di cross-correlation

La correlazione di immagini è una tecnica che si è sviluppata negli ultimi 20 anni. L'idea di fondo è la comparazione di due immagini raffiguranti la stessa superficie materiale nel corso della sollecitazione. Il confronto può avvenire tra due frame consecutivi, o con un frame di riferimento che generalmente viene attribuito allo stato superficiale in deformato; per tale scopo, si utilizzano delle funzioni di *cross-correlazione C*.

Come visto in precedenza su ogni immagine è possibile definire una matrice M tale che per ciascun valore delle sue coordinate, sia possibile conoscere il valore del livello di grigio tramite $f(X; Y) = i$.

Si faccia riferimento ad un generico intorno S_0 dell'immagine di partenza (Im_0) in cui è collocato un punto p , a cui l'operatore di corrispondenza associa un pixel P . A seguito di uno

spostamento $s(P) = \begin{Bmatrix} u(P) \\ v(P) \end{Bmatrix}$, in frame successivi, tale pixel, si troverà in una posizione P' (appartenente ad S'). (fig3.2)

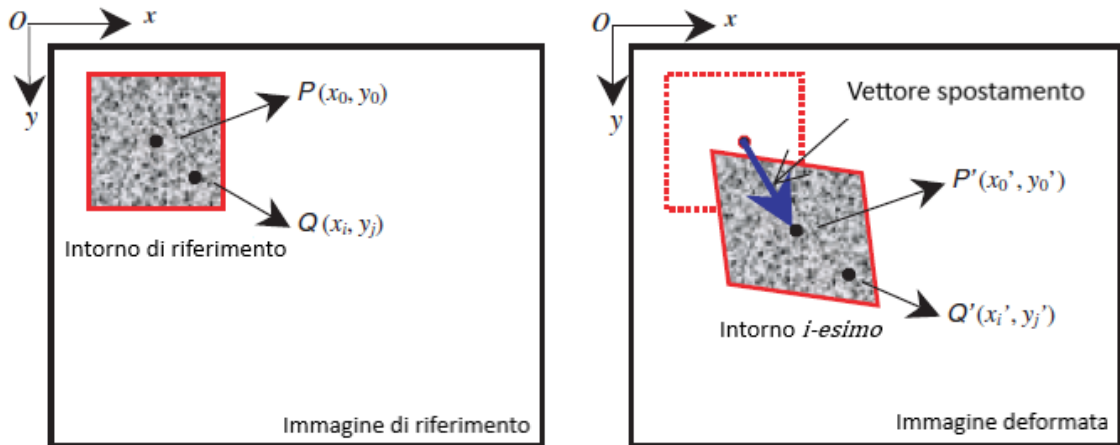


Figura 3.1

Le intensità relative alle posizioni P e P' , sono:

$f(P) = f(X_0; Y_0)$ e $f'(P) = f'(X_0 + u(P); Y_0 + v(P))$ con:

$$\begin{cases} X'_0 = X_0 + u(P) \\ Y'_0 = Y_0 + v(P) \end{cases} \quad (3.2)$$

Bisogna fare attenzione al fatto che lo spostamento è rilevato su immagini differenti ($Im_0; Im_i$), ma si calcola come se fosse appartenente ad una stessa immagine. Ragionando allo stesso modo per un pixel Q appartenente sempre all'intorno S_0 , di coordinate $(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0)$, sull'immagine di riferimento, si definiscono le intensità:

$$f(Q) = f(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0) \text{ e } f'(Q) = f'(X_0 + u(Q) + dX_0; Y_0 + v(Q) + dY_0), \quad (3.3)$$

dove $u(Q)$ e $v(Q)$ sono le componenti dello spostamento $s(Q)$ lungo gli assi, è chiaro dunque che la deformazione subita, determina delle differenze a livello globale nell'intorno considerato, e di conseguenza due matrici differenti M ed M' che conservano però i valori di intensità locale.

Si può quindi scrivere:

$$f(P) = f'(P') \text{ e } f(Q) = f'(Q') \quad (3.4)$$

Come descritto in precedenza, il tensore delle piccole deformazioni può essere approssimato con uno sviluppo in serie di Taylor al primo grado:

$$\begin{aligned} u(P) - u(Q) &\cong \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y \\ v(P) - v(Q) &\cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y \end{aligned} \quad (3.5)$$

Supponendo di aver scelto un intorno sufficientemente piccolo che permetta affermare la costanza di segmenti rettilinei, le coordinate di Q nella configurazione attuale sono $(X'_0 + dX'_0; Y'_0 + dY'_0)$ dove:

$$\begin{aligned} dX'_0 &= dX_0 + u(Q) - u(P) \cong \left(1 + \frac{\partial u(P)}{\partial x}\right) x_0 + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y_0 \\ dY'_0 &= dY_0 + v(Q) - v(P) \cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x_0 + \left(1 + \frac{\partial v(P)}{\partial y}\right) y_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Possiamo quindi scrivere facendo riferimento alla (3.2)

$$Q' = \left\{ X_0 + u(P) + \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y + dX_0; Y_0 + v(P) + \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y \right\} \quad (3.7)$$

Che permette di riscrivere la (3.3) al modo seguente:

$$f'(Q') = f(Q) = f'\left\{ X_0 + u(P) + \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y + dX_0; Y_0 + v(P) + \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y \right\} \quad (3.8)$$

Noto quindi lo spostamento del punto P e calcolate le derivate $\frac{\partial s(P)}{\partial x}$, $\frac{\partial s(P)}{\partial y}$; la posizione di qualsiasi punto Q'_i dell'intorno è esprimibile tramite la (3.7). Al contrario noti $u(P)$, $v(P)$, $\frac{\partial s(P)}{\partial x}$, $\frac{\partial s(P)}{\partial y}$, è possibile fare una stima della posizione del punto P' e di qualsiasi punto Q'_i all'interno dell'intorno $S'(P')$.

Queste variabili fanno parte delle *variabili di correlazione* V_c che possono essere così riassunte:

$$u(P); v(P); \frac{\partial u(P)}{\partial x}; \frac{\partial u(P)}{\partial y}; \frac{\partial v(P)}{\partial x}; \frac{\partial v(P)}{\partial y} \quad (3.9)$$

per un determinato punto P , centrato nell'intorno oggetto di valutazione, permettono il calcolo degli spostamenti e di conseguenza delle deformazioni di tutti i punti appartenenti ad S . La determinazione delle V_c parte dalla differenza fra le matrici M ed M' . Il tutto sta nel

rintracciare due intorni che siano con buona approssimazione sovrapponibili, e operare il confronto tra le intensità $f(X_0; Y_0)$ di un intorno S_0 di $P_0(X_0, Y_0)$ con quella $f'(P) = (X'_0; Y'_0)$ di S'_0 in cui giace il punto $P'(X'_0; Y'_0)$. Il confronto si effettua introducendo una funzione di *cross-correlazione* C esprimibile nella seguente forma:

$$C \left(u(P); v(P); \frac{\partial u(P)}{\partial x}; \frac{\partial u(P)}{\partial y}; \frac{\partial v(P)}{\partial x}; \frac{\partial v(P)}{\partial y} \right) = \frac{\int_{S'_0} f(X_0; Y_0) f'(X_0 + \xi Y_0 + \mu) dIm}{\sqrt{\int_{S_0} [f(X_0, Y_0)]^2 dIm \int_{S'_0} [f'(X_0 + \xi Y_0 + \mu)]^2 dIm}} \quad (3.10)$$

con

$$\begin{aligned} \xi &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ \mu &= u + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (3.11)$$

I valori che massimizzano tale funzione di cross -correlazione, sono i valori locali delle deformazioni nell'intorno considerato. In principio si assumono come variabili le componenti u e v dello spostamento, poi si procede alla determinazione delle $\frac{\partial u}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial y}$ mantenendo u e v pari a $[u(P); v(P)]$ e nulli gli scorrimenti angolari $\frac{\partial v}{\partial x}; \frac{\partial u}{\partial y}$; si procede in maniera analoga per la determinazione delle dilatazioni lineari in direzione degli assi $X; Y$, ed infine si passa alla determinazione dei valori di γ mantenendo costanti $[u(P); v(P)], \varepsilon_x, \varepsilon_y$. La procedura viene poi ripetuta per un certo numero di valori (u, v) scelti intorno a $S(P)$ per valori fissati delle altre variabili. La procedura si ripete fino a che le differenze dei valori sono minori di specifici valori di riferimento. Questo iter può essere replicato per altri elementi superficiali, al fine di determinare spostamenti e deformazioni su una particolare area di interesse. Nel corso degli anni le funzioni di cross-correlazioni hanno subito affinamenti che permettono di calcolare con una precisione sempre maggiore spostamenti e deformazioni, però partono tutti dalla relazione proposta, sviluppata da Sutton, dove sono considerati spostamenti lineari e planari e deformazioni costanti nell'intorno analizzato.

La funzione intensità richiede una precisazione, per come è stata sopra definita, permette di ottenere valori isolati. Per la trattazione, l'interpretazione discreta non è congeniale dal momento che lo spostamento può assumere valori pari anche a frazioni di pixel. In un intorno

S_i infatti, per un punto Q qualsiasi, andando a calcolare $f(Q)$, come nella (3.8), sarà alquanto improbabile trovarsi dinanzi a coordinate intere. È conveniente quindi ricostruire la matrice M_i per ciascun intorno oggetto di calcolo. A tal proposito si introduce una funzione continua I che si ottiene dall'interpolazione dei valori discreti in ogni intorno analizzato, creando una corrispondenza biunivoca tra lo spazio delle coordinate materiale (x, y) e quelle dei pixel nelle sequenze di immagini (X, Y) .

Le modalità di interpolazione sono molteplici e la scelta ha notevoli ripercussioni sulla correlazione, viene riportata qui un'espressione polinomiale per $I(I_{px}; I_{py})$:

$$\begin{cases} I_{px} = a_{x00} + a_{x10}F_x + a_{x01}F_y + a_{x11}F_xF_y + \dots + a_{xnn}F_x^nF_y^n \\ I_{py} = a_{y00} + a_{y10}F_x + a_{y01}F_y + a_{y11}F_xF_y + \dots + a_{yyn}F_x^nF_y^n \end{cases} \quad (3.12)$$

Maggiore è alto il grado del polinomio maggiore risulta l'accuratezza del calcolo, tuttavia aumentano i problemi di convergenza, al contrario per $n = 1$, si rischia di introdurre un errore nella correlazione confrontabile con la misura stessa.

2.3 Correlazione a campo intero.

Quanto finora detto permette l'analisi di intorni isolati all'interno della zona d'interesse. Per un calcolo esteso, sono molteplici gli approcci, tuttavia viene proposta solo la tecnica di griglia, che è alla base del codice utilizzato.

Secondo tale metodologia, si divide la zona da analizzare in un certo numero di elementi indipendenti, tramite la sovrapposizione sulle immagini di una griglia, costituita da un certo numero di elementi semplici, generalmente 4 nodi, (8 o più nodi per un numero minore di elementi di ordine superiore) la correlazione è basata sulla definizione di *funzioni di forma* che permetta la trasposizione dei nodi dall'immagine di riferimento Im_0 all'immagine corrispondente ad una situazione deformata i -esima Im_i , ovvero permetta di rendere questi nodi sovrapponibili in termini di intensità luminosa i .

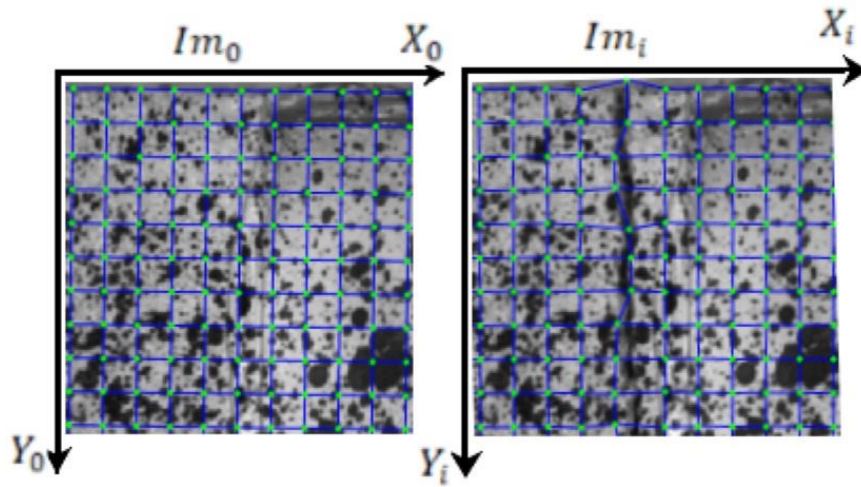


Figura 2.3

Matematicamente si cerca di ridurre il tutto ad un problema ai minimi quadrati della differenza tra i contenuti dei nodi. L'errore da minimizzare in termini di operazioni sulle immagini può essere scritto al seguente modo:

$$E^2 = \sum [Im_i(x_i; y_i) - Im_0(x_0; y_0)]^2 \quad (3.13)$$

Dove con $x_i; y_i; x_0; y_0$, sono indicate le coordinate di un generico pixel, rispettivamente in un immagine deformata e nell'immagine di riferimento. Il simbolo di sommatoria sta ad indicare che è da estendere a tutti i pixel per i quali si trova corrispondenza nelle due immagini.

Si procede poi all'associare ad ogni elemento della griglia una sotto-immagine di forma quadrata, le cui dimensioni non necessariamente devono essere le stesse prefissate per l'intorno di partenza. Tramite funzioni di forma prospettica si potrà poi fornire una relazione in scala di grigi. Non si opera altro che una trasformazione geometrica, che permette di creare una corrispondenza tra le coordinate di un punto $p(x, y)$ e quelle di un punto p' secondo la formula :

$$\begin{cases} x' = (a_0 + a_1x + a_2y)/(c_0x + c_1y + c_2) \\ y' = (b_0 + b_1x + b_2y)/(c_0x + c_1y + c_2) \end{cases} \quad (3.13)$$

con coefficienti reali.

I punti sono quindi ottenuti interpolando i livelli di intensità luminosa, cosa che rende facilmente confrontabili le sotto-immagini, anche se presentano forme e dimensioni tra loro

differenti. A questo punto l'espressione dell'errore riferite ad un immagine intera può essere semplificata al campo delle sotto-immagini:

$$E^2 = \sum \|s_i(X_i; Y_i) - s_0(X_0; Y_0)\|^2 \quad (3.14)$$

Dove la somma è eseguita su un particolare elemento del reticolo a cui viene associata una sotto-immagine s_i . Tutte le sotto-immagini sono funzione delle coordinate dei nodi $X_i; Y_i; X_0; Y_0$, che costituiscono le variabili incognite attraverso cui cercare la migliore approssimazione del contenuto con il metodo dei minimi quadrati.

Raggiunta la convergenza la soluzione è un vettore che definisce la nuova posizione dei nodi nella griglia. Tale vettore viene determinato per ogni elemento del reticolo, in modo da determinare tutti i punti della regione di interesse sull'immagine. In questo modo si calcola in maniera continua gli spostamenti, quindi le deformazioni nell'intera area esaminata.

2.4 Stereo visione e 3-D D.I.C.

I concetti alla base dell'applicazione tridimensionale della tecnica D.I.C. sono gli stessi della versione 2-D, la differenza fondamentale risiede nel fatto che sono necessarie due telecamere.

Una singola telecamera posizionata in un generico punto "C" come in figura 3.4, non può distinguere le differenze tra punti che giacciono sullo stesso raggio di proiezione come Q ed R; solo introducendo una seconda telecamera, posta in C', si riesce ad estrapolare informazioni aggiuntive sufficienti, a distinguere la posizione reale di questi punti nello spazio.

In generale la soluzione 3-D è assai più complessa da effettuare rispetto al caso piano perché subentrano una serie di problematiche dovute al posizionamento. È richiesta l'introduzione di funzioni di forma del secondo ordine; e per operare una corretta associazione delle immagini sono necessarie operazioni di rettifica delle coordinate e operazioni di triangolazione stereoscopica. Prima di ciò tuttavia è doveroso operare una accurata calibrazione dei dispositivi che permetta di utilizzarli insieme.

Nel capitolo seguente verranno spiegate le modalità di calibrazione e il funzionamento delle operazioni di triangolazione e rettifica.

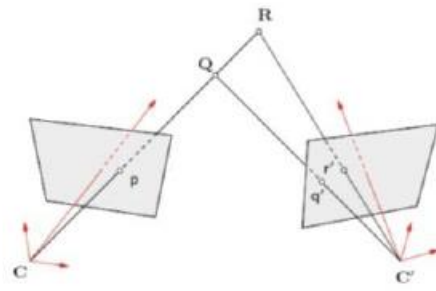


Figura 3.3

Capitolo 3: Calcestruzzo

Calcestruzzo, di solito il cemento Portland è un materiale composito composto da aggregato fine e grossolano legato insieme con un cemento fluido (pasta di cemento) che indurisce nel tempo più frequentemente nel passato un legante cementizio a base di calce, come la calce, ma a volte con altri cementi idraulici, come un cemento alluminato di calcio o cemento Portland. Si distingue dagli altri tipi di cemento non cementizi che legano insieme una qualche forma di aggregato, incluso il cemento asfaltato con un legante bituminoso, che viene frequentemente usato per le superfici stradali, e i calcestruzzi polimerici che usano polimeri come legante. Quando l'aggregato è miscelato con cemento Portland secco e acqua, la miscela forma una sospensione liquida che può essere facilmente versata e modellata in forma. Il cemento reagisce con l'acqua e altri ingredienti per formare una matrice dura che unisce i materiali in un materiale durevole simile alla pietra che ha molti usi. Spesso, gli additivi sono inclusi nella miscela per migliorare le proprietà fisiche della miscela umida o del materiale finito. La maggior parte del calcestruzzo viene colato con materiali di rinforzo incorporati per fornire resistenza alla trazione, cedendo cemento armato. Il calcestruzzo è uno dei materiali da costruzione più utilizzati. Il suo utilizzo in tutto il mondo, tonnellata per tonnellata, è il doppio di acciaio, legno, plastica e alluminio combinati.

3.1 Composizione

Il calcestruzzo è un materiale composito, che comprende una matrice di aggregato e un legante, che tiene insieme la matrice. Sono disponibili molti tipi di calcestruzzo, determinati dalle formulazioni di leganti e dai tipi di aggregati utilizzati per soddisfare l'applicazione del materiale. Queste variabili determinano la resistenza, la densità, nonché la resistenza chimica e termica del prodotto finito. L'aggregato consiste in grossi pezzi di materiale in una miscela di calcestruzzo, generalmente ghiaia grossolana o rocce frantumate come calcare o granito, insieme a materiali più fini come la sabbia. Un cemento, più comunemente cemento Portland, è il tipo più comune di legante concreto. Per leganti cementizi, l'acqua viene miscelata con la polvere secca e l'aggregato, che produce un liquame semiliquido che può essere modellato, tipicamente versandolo in una forma. Il calcestruzzo si solidifica e si indurisce attraverso un processo chimico chiamato idratazione. L'acqua reagisce con il cemento, che lega insieme gli

altri componenti, creando un materiale robusto simile alla pietra. Altri materiali cementizi, come ceneri volanti e cemento di scorie, sono talvolta aggiunti sia premiscelati con il cemento o direttamente come componente concreto e diventano parte del legante per l'aggregato. Additivi vengono aggiunti per modificare la velocità di guarigione o le proprietà del materiale. Gli additivi minerali utilizzano materiali riciclati come ingredienti concreti. Materiali importanti includono ceneri volanti, un sottoprodotto di centrali elettriche a carbone; scorie granulari d'altoforno a terra, un sottoprodotto della fabbricazione dell'acciaio, un sottoprodotto di forni elettrici ad arco industriale. Le strutture che impiegano cemento in cemento Portland solitamente includono rinforzi in acciaio. Tale calcestruzzo può essere formulato con un'elevata resistenza alla compressione, ma ha sempre una minore resistenza alla trazione. Pertanto, di solito è rinforzato con materiali che sono forti in tensione, tipicamente tondo per cemento armato in acciaio. Altri materiali possono essere utilizzati anche come legante per calcestruzzo, l'alternativa più diffusa è l'asfalto, che viene utilizzato come legante in calcestruzzo d'asfalto. Il design del mix dipende dal tipo di struttura in costruzione, da come viene miscelato e consegnato il calcestruzzo e da come viene posizionato per formare la struttura. Il cemento Portland è il tipo più comune di cemento in uso generale. È un ingrediente base di cemento, malta e molti intonaci. Il muratore inglese Joseph Aspdin brevettò il cemento Portland nel 1824. Prese il nome dalla somiglianza del suo colore con il calcare di Portland, estratto dall'isola inglese di Portland e ampiamente utilizzato nell'architettura londinese. È costituito da una miscela di silicati di calcio (alite, belite), alluminati e composti di ferrite che combinano calcio, silicio, alluminio e ferro in forme che reagiscono con l'acqua. Il cemento Portland e materiali simili sono prodotti mediante calcare riscaldante (una fonte di calcio) con argilla o scisto (una fonte di silicio, alluminio e ferro) e macinando questo prodotto (chiamato clinker) con una fonte di solfato (il più comunemente gesso). Nei moderni forni per cemento vengono utilizzate molte funzioni avanzate per ridurre il consumo di carburante per tonnellata di clinker prodotto. I forni per cemento sono impianti industriali estremamente grandi, complessi e intrinsecamente polverosi e hanno emissioni che devono essere controllate. Tra i vari ingredienti utilizzati per produrre una data quantità di calcestruzzo, il cemento è il più energeticamente costoso. Anche forni complessi ed efficienti richiedono da 3,3 a 3,6 gigajoule di energia per produrre una tonnellata di clinker e poi macinarlo in cemento. Molti forni possono essere alimentati con rifiuti difficili da smaltire,

i più comuni sono i pneumatici usati. Le temperature estremamente elevate e lunghi periodi di tempo a quelle temperature consentono ai forni per cemento di bruciare in modo efficiente e completo anche i carburanti difficili da usare.

Il Calcestruzzo è composto da:

ACQUA

La combinazione di acqua con un materiale cementizio forma una pasta di cemento con il processo di idratazione. La pasta di cemento incolla l'aggregato, riempie i vuoti al suo interno e lo fa scorrere più liberamente. Come affermato dalla legge di Abrams, un rapporto acqua-cemento inferiore produce un calcestruzzo più resistente e più resistente, mentre più acqua conferisce un calcestruzzo più scorrevole con una maggiore caduta. L'acqua impura utilizzata per la produzione di calcestruzzo può causare problemi durante l'impostazione o nel causare un guasto prematuro della struttura. L'idratazione comporta molte reazioni diverse, che si verificano spesso allo stesso tempo. Man mano che le reazioni procedono, i prodotti del processo di idratazione del cemento legano gradualmente insieme le singole particelle di sabbia e ghiaia e altri componenti del calcestruzzo per formare una massa solida.

Reazione:

Notazione del chimico del cemento: $C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$

Notazione standard: $Ca_3SiO_5 + H_2O \rightarrow (CaO) \cdot (SiO_2) \cdot (H_2O) (gel) + Ca(OH)_2$

Bilanciato: $2Ca_3SiO_5 + 7H_2O \rightarrow 3(CaO) \cdot 2(SiO_2) \cdot 4(H_2O) (gel) + 3Ca(OH)_2$ (circa, i rapporti esatti di CaO, SiO₂ e H₂O in C-S-H possono variare).

AGGREGATI

Gli aggregati fini e grossolani costituiscono la maggior parte di una miscela di calcestruzzo. Sabbia, ghiaia naturale e pietrisco vengono utilizzati principalmente per questo scopo. Gli aggregati riciclati (dagli scarti di costruzione, demolizione e scavo) sono sempre più utilizzati come rimpiazzi parziali per gli aggregati naturali, mentre un certo numero di aggregati fabbricati, tra cui scorie d'altoforno e ceneri pesanti, sono raffreddati ad aria.

La distribuzione delle dimensioni dell'aggregato determina la quantità di legante necessaria. L'aggregazione con una distribuzione delle dimensioni molto regolare presenta gli spazi maggiori mentre l'aggiunta di aggregati con particelle più piccole tende a colmare queste

lacune. Il legante deve riempire gli spazi tra l'aggregato e incollare le superfici dell'aggregato insieme ed è in genere il componente più costoso. Pertanto, la variazione delle dimensioni dell'aggregato riduce il costo del calcestruzzo. L'aggregato è quasi sempre più forte del legante, quindi il suo uso non influisce negativamente sulla resistenza del calcestruzzo. La redistribuzione degli aggregati dopo la compattazione crea spesso disomogeneità a causa dell'influenza della vibrazione. Questo può portare a gradienti di forza. Pietre decorative come quarzite, piccole pietre di fiume o vetro frantumato vengono talvolta aggiunte alla superficie del calcestruzzo per una finitura decorativa "a vista aggregata", popolare tra i paesaggisti. Oltre ad essere decorativo, l'aggregato esposto può aumentare la robustezza a un calcestruzzo.

RINFORZO

Costruire una gabbia per armature che sarà permanentemente incorporata in una struttura in cemento armato finita. Il calcestruzzo è forte in compressione, poiché l'aggregato trasporta efficacemente il carico di compressione. Tuttavia, è debole in tensione poiché il cemento che tiene in posizione l'aggregato può rompersi, consentendo alla struttura di guastarsi. Il cemento armato aggiunge barre di rinforzo in acciaio, fibre di acciaio, fibre di vetro o fibre di plastica per trasportare carichi di trazione.

ADDITIVI

Gli additivi sono materiali sotto forma di polvere o fluidi che vengono aggiunti al calcestruzzo per conferirgli determinate caratteristiche non ottenibili con le miscele di calcestruzzo. Gli additivi sono definiti come additivi "fatti in preparazione del calcestruzzo".

Capitolo 4: Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)

Negli ultimi decenni, l'uso di nuovi materiali compositi da riparare, rafforzare e riabilitare le strutture in calcestruzzo o in muratura esistenti è diventata una soluzione efficace per ingegneri, imprese di costruzione e professionisti. Insieme all'uso del Fiber Reinforced Polymer (FRP), è stata introdotta una nuova classe di sistemi compositi, nota come Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) o Textile Reinforced Mortar (TRM). La presenza della matrice inorganica consente di superare alcune limitazioni degli FRP, quali l'applicazione su substrati bagnati, la resistenza alle alte temperature e alle radiazioni UV, la compatibilità con i substrati in muratura, la reversibilità dell'intervento e la sicurezza per gli operatori durante l'installazione. La matrice inorganica è generalmente costituita da normale malta cementizia Portland o calce idraulica modificata con l'aggiunta di polimeri, ceneri volanti, silice fume e fibre corte, al fine di aumentarne le proprietà meccaniche e migliorare l'adesione al rinforzo del tessuto e al substrato. Il tessuto è una rete aperta di filati fatto di fibre secche (come vetro resistente agli alcali, aramide, basalto, carbonio e PBO) costituite da fili di direzione primaria (PD) e di direzione secondaria (SD) collegati perpendicolarmente; i rivestimenti polimerici sono tipicamente applicati alle fibre per aumentare la durabilità a lungo termine della rete e la facilità di manipolazione e installazione. Diversi studi si sono concentrati sulla caratterizzazione meccanica di Sistemi FRCM realizzati con diversi tipi di rinforzo in tessuto e matrici inorganiche mentre altre ricerche hanno mostrato l'efficacia di FRCM come sistema di rinforzo con legante esterno per elementi in calcestruzzo o muratura. Tuttavia, ad oggi, pochissimi sono stati condotti studi riguardanti la durabilità dei sistemi FRCM. Micelli ha presentato uno studio sperimentale per discutere le proprietà di tensione residua di diversi filati secchi e impregnati dopo l'esposizione a diversi protocolli di invecchiamento in soluzioni alcaline. Le fibre di vetro AR hanno mostrato una perdita di forza di circa il 20% dopo esposizione alcalina. Nobili ha effettuato test meccanici su tessuti, malte e tagliandi FRCM esposti ad ambienti alcalini e salini. È stata osservata una riduzione della resistenza a trazione di circa il 15%, sia per ambienti alcalini che salini. Le proprietà meccaniche delle malte sono state fortemente influenzate dai due ambienti di esposizione artificiale, con una riduzione della resistenza alla flessione superiore al 50%. Studi sperimentali condotti da Arboleda su

tagliandi FRCCM con PBO e tessuti di carbonio non hanno mostrato alcun degrado significativo delle proprietà di trazione composita quando esposti ad acqua salata o immersi in un ambiente alcalino (in condizioni di laboratorio). Franzoni ha studiato l'effetto della cristallizzazione dell'acqua e del sale sul comportamento meccanico delle strisce di acciaio FRCCM legate a blocchi di mattoni in laterizio. In questo studio l'esposizione artificiale non ha prodotto un decadimento significativo delle proprietà meccaniche del sistema composito applicato ai supporti in laterizio. Oggi ACI 549/2013, AC434 e la linea guida italiana rilasciata da 'Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici' sono gli unici riferimenti normativi che prevedono test di durata sui sistemi FRCCM. Le linee guida italiane prevedono il congelamento e cicli di scongelamento, test di invecchiamento artificiale e test termici. Inoltre, per questo tipo di materiale composito, studi di durabilità sono piuttosto complessi, poiché l'efficacia dei sistemi FRCCM dipende da molti aspetti, come le proprietà fisiche e meccaniche dei singoli materiali costituenti, le proprietà di legame all'interfaccia tra il rinforzo del tessuto e la malta e tra la malta e il substrato, le proprietà fisiche e meccaniche del substrato. Le matrici inorganiche dei compositi FRCCM sono esposte a processi atmosferici che possono deteriorare le loro proprietà fisiche e meccaniche. In particolare, è noto che l'attacco di sale è una delle cause più comuni di alterazione causata dagli agenti atmosferici nelle strutture in muratura. Attacco al sale comporta meccanismi complessi, che dipendono principalmente dalla microstruttura dei materiali, dalla natura del sale e dalle condizioni ambientali. Quando i compositi FRCCM vengono applicati a substrati di muratura, data la natura porosa della matrice, l'attacco di sale potrebbe danneggiare sia l'interfaccia tra matrice e substrato e materiali costitutivi (matrice inorganica e tessuto) e possono influenzare le proprietà meccaniche del sistema, causando una riduzione dell'adesione all'interfaccia tra il substrato e la malta o tra la malta e il rinforzo interno del tessuto. L'efficacia dei sistemi FRCCM, che è correlata allo stress i meccanismi di trasferimento tra il composito e il substrato possono essere fortemente influenzati da eventuali cambiamenti nelle proprietà del substrato. Tuttavia, le linee guida attuali non prevedono test di durata che indagano sul comportamento del legame del substrato FRCCM e pochissimi studi hanno studiato la durabilità dei compositi FRCCM applicati ai substrati in muratura. La linea guida italiana DT215 prevede test di debonding (singolo o test di legame a doppio taglio) su diversi substrati per la qualificazione dei sistemi FRCCM. Questi test sono estremamente importanti per determinare i parametri meccanici da utilizzare per la

progettazione strutturale. Per questo motivo, specialmente per le strutture esposte ad agenti esterni particolarmente aggressivi, è importante stabilire metodi e procedure di test per valutare il comportamento del substrato FRCM in diverse condizioni ambientali. L'obiettivo di questo studio è valutare gli effetti dei diversi protocolli accelerati degli agenti atmosferici sia sulle proprietà meccaniche di i materiali costitutivi dell'FRCM (filati e malta) e il legame di taglio comportamento del sistema quando applicato al substrato. Sono stati effettuati quattro tipi di test meccanici. Prove di trazione su filati di vetro AR; Prove di compressione e flessione su malte; Prove di legame a taglio singolo su strisce di FRCM applicate a mattoni di argilla cotta. Inoltre, analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) e Ion. La cromatografia è stata eseguita per comprendere meglio i meccanismi di danno indotti da esposizioni ambientali e per valutare la penetrazione di sali all'interno dei vari strati del sistema composito.

4.1 Analisi del materiale

Il sistema FRCM studiato è costituito da un flessibile bidirezionale tessuto di vetro accoppiato con una malta idraulica. Le fibre di vetro sono resistenti ad alcali (AR) e i filati sono pre-impregnati con PVA (alcool polivinilico). Le proprietà geometriche del tessuto di vetro sono mostrate in Fig.1. Le proprietà meccaniche del tessuto sono state studiate mediante prove di trazione su filati a fibra singola prelevati dalle direzioni dell'ordito e della trama. I test di trazione su filati di vetro sono stati eseguiti in controllo di spostamento a una velocità di 0,5 mm / min, secondo ISO 10406-1 utilizzando una macchina per prove di trazione con una capacità di carico di 50 kN. I campioni hanno compreso un filo di fibre lungo 300 mm. Le linguette FRP sono state incollate con resina epossidica alle estremità del campione per garantire una presa migliore durante il test. L'area della sezione trasversale del filato singolo è stata calcolata dallo spessore nominale fornito dal produttore. Un macroestensometro con una lunghezza del calibro di 50 mm è stato posizionato al centro di ciascun campione per misurare lo sforzo in caso di cedimento. La resistenza a trazione è stata calcolata dividendo il carico di trazione per l'area della sezione trasversale del filo A_{yarn} . Il modulo elastico è stato calcolato dalla differenza tra la curva di carico (sollecitazione) -strain ottenuta dal livello di carico al 20% e al 50% della capacità di trazione. Resistenza massima alla trazione $\sigma_{max, filato}$, deformazione finale $\epsilon_u, filato$, e il modulo elastico E_{yarn} , ottenuto mediando i risultati di 5

campioni per ciascun tipo di filato di vetro, unitamente al coefficiente di variazione corrispondente, CoV (%). Una matrice idraulica disponibile in commercio è stata utilizzata come matrice FRCM. Sono stati lanciati tre campioni prismatici, polimerizzati in condizioni di laboratorio fino a 70 giorni (per avere risultati confrontabili con quelli di campioni condizionati) e testati secondo le norme UNI EN 1015-11 e UNI EN 12504-4. La resistenza media alla compressione σ_c , m, la resistenza alla flessione σ_f , m, il modulo elastico nella compressione E_m e il peso unitario sono riportati nella Tabella 2, insieme al corrispondente coefficiente di variazione, CoV (%).

4.2 Protocollo di condizionamento invecchiante

Entrambi i materiali costitutivi (filati e malta) e single-shear

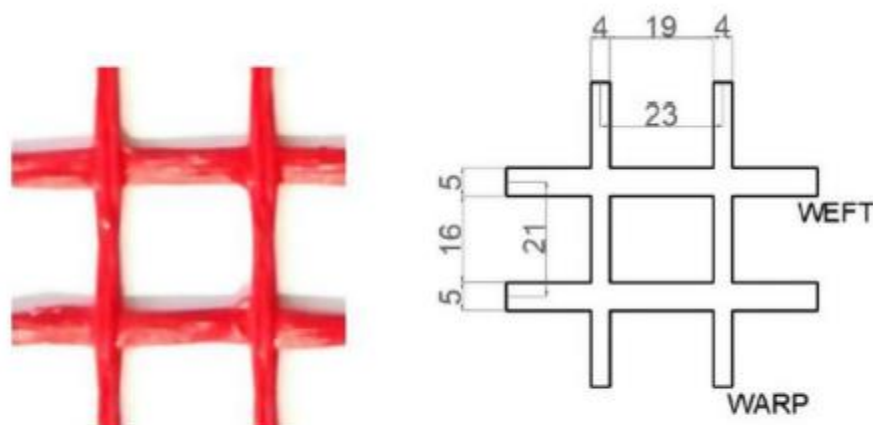


Fig. 1. Geometrical properties of the glass fabric (550 g/m²).

Table 1
Material properties of the glass yarns (warp and weft directions).

Fabric		Maximum tensile strength $\sigma_{max,yarn}$ (MPa)	Elastic modulus E_{yarn} (GPa)	Ultimate strain $\epsilon_{u,yarn}$ (%)	Cross sectional area A_{yarn} (mm ²)	
Glass 550	WARP	Average	1388	68.9	1.9	1.847
		CoV (%)	5.9	2.7	6.9	-
WEFT	Average	1365	68.3	1.9	1.847	
	CoV (%)	5.7	4.2	8.8	-	

Table 2
Mechanical properties of the hydraulic matrix.

Material		Compressive strength $\sigma_{c,m}$ (MPa)	Flexural strength $\sigma_{f,m}$ (MPa)	Elastic modulus E_m (GPa)	Unit weight (kg/m ³)
FRCM	Average	7.12	2.93	8.5	1520
Mortar	CoV (%)	2.4	2.6	2.9	-

Sia i materiali costitutivi (filati e malta) che i provini monostrato, realizzati applicando una striscia di tessuto di vetro sulla superficie dei mattoni di argilla cotta (come meglio descritto nella sezione 3.4), sono stati esposti a quattro diversi ambienti, come descritto in Tabella 3. I filati di vetro (300 mm di lunghezza) e i campioni prismatici di malta sono stati completamente immersi nelle diverse soluzioni, mentre i campioni di mattoni di argilla preparati per i test a legame singolo sono stati parzialmente bagnati dalla soluzione (o semplice acqua), cercando di non bagnare la lunghezza libera del tessuto di vetro (vedi Fig. 2). Il livello delle soluzioni è stato mantenuto costante ricaricando periodicamente il vassoio. Campioni di malta e campioni con legame a taglio singolo sono stati polimerizzati in condizioni di laboratorio fino a 28 giorni prima di iniziare il condizionamento ambientale. Il primo ambiente (S₆₀)

comprende un sodio peso 3,5% soluzione acquosa di cloruro (NaCl), che equivale alla salinità media mondiale dell'acqua di mare dell'oceano. La temperatura di 60 ° C è stata scelta perché è più comunemente utilizzata nei protocolli di condizionamento accelerato per barre di rinforzo FRP ed è anche proposto da ASTM D7705. I campioni sono stati immersi nella soluzione per 1000 ore e quindi essiccati in un forno ventilato a 40 ° C per due giorni prima del test. Il secondo ambiente (SC, cicli in soluzione salina) includeva a fase di bagnatura, in cui i campioni sono stati immersi nella stessa soluzione salina per due giorni, seguita da una fase di essiccazione in un forno ventilato a 60 ° C per due giorni, per un totale di 10 cicli. Il terzo tipo di condizionamento (W_60) consisteva nell'immergere il campioni in acqua naturale a 60 ° C per 1000 ore. Prima di testare i campioni sono stati essiccati in un forno ventilato a 40 ° C per due giorni.

4.3 Resistenza alla compressione e alla flessione della malta

I risultati dei test riportati nella Tabella 4 mostrano gli effetti delle diverse esposizioni sulle proprietà meccaniche della matrice. Si può osservare che, sia gli ambienti S_60 che W_60 hanno portato a un leggero aumento delle proprietà della matrice, probabilmente a causa della maggiore umidità e temperatura dell'ambiente rispetto all'ambiente di riferimento, che può aver indotto ulteriore indurimento della matrice, mentre la presenza di sale nella soluzione non ha influenzato le proprietà della matrice. I campioni di malta sottoposti a cicli in soluzione salina a 60 ° C (SC) hanno mostrato una leggera diminuzione delle proprietà meccaniche, probabilmente a causa dei cicli di wet-dry che possono aver disturbato la polimerizzazione processo e può aver favorito la penetrazione dei sali all'interno della malta. Questi risultati sono confermati dal fatto che, per il verificarsi di danni, i sali devono muoversi all'interno e all'interno di corpi porosi, un processo che richiede la presenza di acqua e / o umidità. Risultati diversi possono essere trovati in letteratura per studi simili, a seconda della procedura di prova adottata e della natura del matrice inorganica usata. Nobili, testando due tipi di malte ricche di calce idrata e pozzolana o calce indurente all'aria, pozzolana e sabbia di marmo, ha scoperto un'importante degradazione delle proprietà della matrice esposte agli ambienti salini. Ciò è probabilmente dovuto alla grande porosità delle matrici testate (anche se la distribuzione della porosità non è stata determinata, le proprietà meccaniche suggeriscono una matrice con elevata porosità). Un altro studio di Lanas et al. ha dimostrato

che nelle malte aeree diverse condizioni ambientali, come le esposizioni esterne o SO₂, danno un aumento della porosità, causando una diminuzione della forza e gradi di alterazione più elevati. Al contrario, nelle malte idrauliche, la riduzione della porosità migliora la resistenza alla compressione in questi ambienti. Ciò suggerisce che la durabilità delle matrici FRCM è fortemente influenzata dalla porosità e dalle proprietà meccaniche della malta stessa, e quindi gli ambienti salini potrebbero essere più aggressivi per le malte a base di calce naturali piuttosto che per calce idraulica o malte cementizie. Tuttavia, sono necessari ulteriori studi per correlare la natura fisica delle matrici FRCM e la loro durata in diversi ambienti aggressivi.

4.4 Resistenza a trazione e modulo elastico dei filati di vetro

Un totale di 20 test di trazione sono stati eseguiti per determinare la resistenza a trazione di filati a fibra singola prelevati dalla direzione dell'ordito del tessuto, dopo essere stati esposti a diversi protocolli di condizionamento dell'invecchiamento. Le procedure di prova, secondo ISO 10406-1, sono state descritte in Sez. 2. La resistenza media a trazione σ_{max} , il filato, la deformazione ultima ϵ_u , il filato, il modulo elastico E_{yarn} e la variazione di resistenza a trazione dei provini condizionati rispetto a quelli di riferimento sono riportati nella tabella 5, unitamente al coefficiente di variazione corrispondente, CoV (%). Le curve di tensione-deformazione dei test di trazione su filati di vetro sono state riportate in Fig. 4. Il comportamento tensile è elastico fino al cedimento, che è sempre fragile. È chiaro osservare un'importante diminuzione della resistenza a trazione dei filati dopo essere stati esposti ad ambienti salini. Resistenza alla trazione la diminuzione era di circa il 40% e il 36% per i filati immersi in soluzione salina (S_60) e soggetti a cicli (SC), rispettivamente. Anche la tensione di trazione finale è stata ridotta mentre il modulo elastico è rimasto pressoché invariato. I filati immersi in acqua naturale a 60 ° C non mostravano un decadimento delle proprietà meccaniche. Considerando questi risultati, si può dedurre che la riduzione della resistenza alla trazione è probabilmente dovuta alla penetrazione di sali all'interno dei filamenti del filato, piuttosto che all'esposizione alla temperatura di 60 ° C. Sebbene sia difficile confrontare i risultati con quelli già disponibili in letteratura, a causa delle diverse condizioni di test o della diversa natura del rivestimento applicato alle fibre, possono essere fatte alcune osservazioni. Effetti dannosi dell'esposizione al sale sulle proprietà meccaniche di Hristozov ha trovato anche fibre di vetro, anche se le fibre erano rivestite con resina vinilestere anziché PVA. Test

sperimentali effettuati da Nobili su filati di vetro AR esposti all'ambiente salino hanno mostrato una riduzione della resistenza alla trazione di circa l'11%. Tuttavia, la minore riduzione delle proprietà di trazione dei filati, rispetto a questo studio, è probabilmente dovuta alla diversa temperatura della soluzione salina (23 C in Nobili, 60 C in questo studio). Una riduzione della resistenza alla trazione tra il 15 e il 25% è stata rilevata da Micelli per i filati di vetro AR esposti ad ambienti alcalini a 45 °C per 60 giorni.

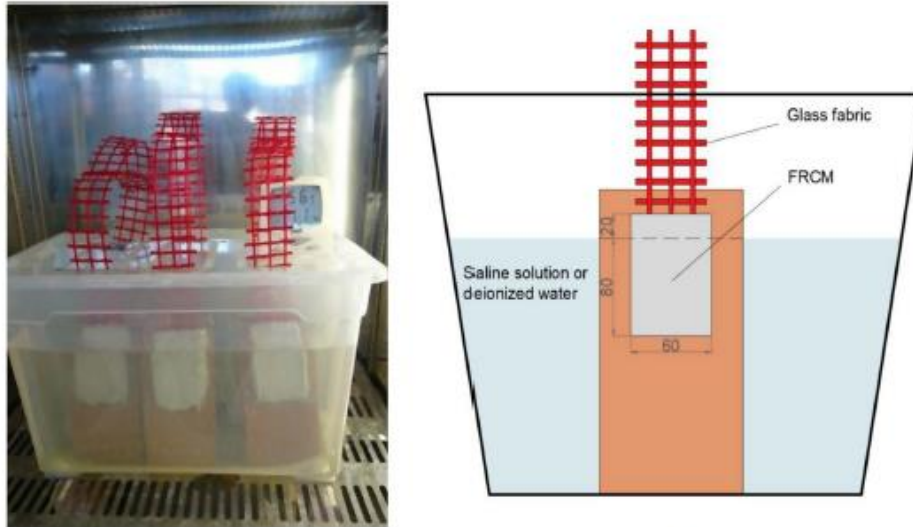


Fig. 2. Conditioning exposure of FRCM specimens for single-shear bond tests.

Table 4
Mechanical properties of the hydraulic matrix before and after environmental exposure.

Specimen		Compressive strength $\sigma_{c,m}$ (MPa)	Flexural strength $\sigma_{f,m}$ (MPa)	Elastic modulus E_m (GPa)
Mortar_Ref	Average	7.12	2.93	8.5
	CoV (%)	4.5	5.9	2.9
Mortar_S_60	Average	7.66	2.68	8.7
	CoV (%)	8.6	6.9	3.2
Mortar_SC	Average	6.74	2.65	8.1
	CoV (%)	8.8	8.5	2.9
Mortar_W_60	Average	7.53	3.01	8.5
	CoV (%)	9.1	8.8	3.5



Fig. 3. Tensile test setup and typical failure mode of glass yarn.

4.5 Prove di legame a taglio singolo

Sono stati eseguiti test di legame a taglio singolo per studiare il comportamento del legame dei sistemi FRCM applicati su substrati di mattoni di argilla cotta. La modalità di guasto generalmente osservata nei sistemi FRCM è dovuta al debonding nell'interfaccia fiber-to-matrix o allo slittamento del tessuto all'interno della matrice (tipo C, D o E in DT215). Tuttavia, a seconda delle caratteristiche dei materiali costitutivi, delle proprietà intrinseche del substrato e della lunghezza del legame adottata nel test, può verificarsi un guasto all'interfaccia matrice-substrato o al di fuori della lunghezza incollata, a causa di un cedimento fibre. L'impostazione del test di legame a taglio singolo adottata in questo studio, secondo RILEM TC250-CSM e CNR DT215, è mostrata in Fig. 5. I mattoni di argilla cotti sono stati immersi in acqua per 24 ore prima di applicare la striscia FRCM, per assicurare la loro completa saturazione. Quindi la striscia di vetro FRCM è stata incollata esternamente su una faccia del mattone di argilla (vedere Fig. 5) e i campioni sono stati polimerizzati in condizioni di laboratorio (20 ° C, 70% di umidità relativa) fino a 28 giorni. Lo spessore totale del rinforzo FRCM era di circa 10 mm. La larghezza e la lunghezza incollate, rispettivamente di 60 mm e 100 mm, erano mantenute costanti per tutti i campioni. Il mattone di argilla era trattenuto contro il movimento da una piastra di acciaio imbullonata alla base della macchina di prova. Le linguette in vetro epossidico sono state applicate all'estremità del tessuto di vetro per una presa migliore e una redistribuzione del carico durante il test. Questa estremità è stata bloccata e collegata alla cella di carico della macchina di trazione. I test sono stati condotti sotto controllo di spostamento, con una velocità di carico di 0,5 mm / min. I risultati sperimentali dei test di legame a taglio singolo sono riportati nella Tabella 6, mentre le curve di spostamento del carico per tutti i campioni testati sono eque per tutti gli esemplari. Il mattone di argilla è stato trattenuto contro il movimento da una piastra di acciaio imbullonata alla base della macchina di prova. Le linguette in vetro epossidico sono state applicate all'estremità del tessuto di vetro per una presa migliore e una redistribuzione del carico durante il test. Questa estremità è stata bloccata e collegata alla cella di carico della macchina di trazione. I test sono stati condotti sotto controllo di spostamento, con una velocità di carico di 0,5 mm / min. I risultati sperimentali dei test di legame a taglio singolo sono riportati nella

Tabella 6, mentre le curve di spostamento del carico per tutti i campioni testati sono mostrate in Fig. 6. Il carico di punta (o carico massimo) e il corrispondente spostamento δ sono stati riportati nella Tabella 6. Il carico di picco per unità di larghezza è stato calcolato dividendo il carico di picco per la larghezza del tessuto (60 mm), mentre lo sforzo massimo nel tessuto σ_f è il rapporto tra il carico di punta e l'area della sezione trasversale di 3 fili longitudinali. Anche le modalità di guasto (secondo DT215) sono state riportate nella Tabella 6. Le curve di carico-spostamento mostrano un comportamento lineare-elastico per tutti i campioni testati, fino a raggiungere il carico di picco F_{max} , seguito da un guasto fragile. Ciò è probabilmente dovuto alla presenza del rivestimento PVA sull'interfaccia matrice e non ha consentito lo slittamento del tessuto all'interno della malta. L'effetto delle diverse esposizioni sul comportamento a legame di taglio dei campioni FRCM applicati su substrati di laterizio di argilla si manifesta sia sui risultati meccanici sia sulle modalità di guasto osservate (Fig. 7). I campioni immersi in soluzione salina a 60 ° C (FRCM_S_60) hanno mostrato la maggiore riduzione della forza di picco, con una riduzione dello sforzo di picco di circa il 29% rispetto ai campioni di riferimento. La modalità di guasto osservata è dovuta alla rottura a trazione del tessuto di vetro fuori dalla lunghezza incollata (vedere Fig. 7). La rottura del tessuto non si verifica simultaneamente nei 3 fili, a causa di alcune eccentricità, come si può notare nelle curve di spostamento del carico di Fig. 6 che mostrano un recupero parziale del carico dopo la rottura del primo filato. L'immersione del campione nella soluzione salina ha causato il vetro fibra da degradare, anche se non direttamente a contatto con la soluzione. Ciò è probabilmente dovuto ai vapori salini che si depositano sulla superficie delle fibre o al sollevamento capillare dovuto all'assorbimento. I campioni sottoposti a cicli di soluzione salina (FRCM_SC) hanno mostrato un errore diverso, a causa del debonding nell'interfaccia matrice-substrato. Anche in questo caso il fallimento è fragile, come si può osservare nelle curve di Fig. 6. Probabilmente i cicli secco-umido hanno permesso la cristallizzazione del sale tra il substrato di mattoni di malta e argilla, riducendo la capacità di legame a questa interfaccia (questo sarà confermato dai risultati riportati nella sezione 5). I campioni immersi in acqua pura a 60 ° C (FRCM_W_60) hanno mostrato la stessa modalità di rottura dei campioni di riferimento e una diminuzione di stress di picco di circa l'11%. Lo sfruttamento del carico di rottura del tessuto, riportato in Tabella 6, ha è stato calcolato come il rapporto tra la sollecitazione di trazione massima media nei 3 filati durante le prove di legame a taglio singolo

e la resistenza a trazione massima del filato di riferimento (σ_{max} , filato nella Tabella 5). Si può osservare che, nel campione di riferimento, il fallimento in le prove di legame a taglio singolo si verificano con una tensione di trazione nei fili pari a circa il 67% della resistenza a trazione massima del singolo filato riscontrata nella prova di trazione.

Capitolo 5: Prova sperimentale

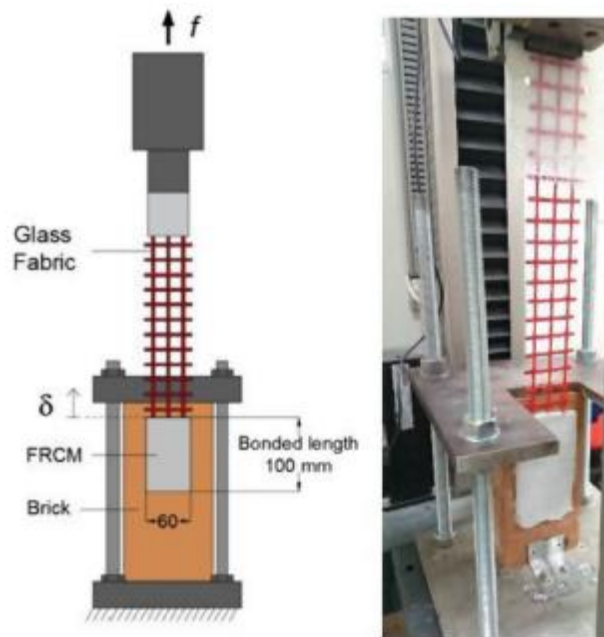
La prova sperimentale consiste nel trovare la resistenza meccanica del provino in calcestruzzo rinforzato da una griglia in FRCM. Questi materiali vengono considerati come strutturali, si avvalgono di un reticolato in fibra vetrosa, lo scopo del FRCM inserito in CLS è di aumentare le proprietà meccaniche dei materiali. La sperimentazione fatta durante il tirocinio è consistita nello studio delle deformazioni del provino in CLS e dello spostamento della griglia, entrambi gli studi sono stati fatti su applicazione della medesima forza.

Il risultato della sperimentazione ha dato una mappa delle deformazioni e un grafico dello spostamento della griglia in FRCM, le deformazioni venivano segnate per ordine di colore, segnalate tramite tonalità di blu, verde e rosso, il primo quando il materiale subiva una deformazione minima, il secondo una discreta, e il terzo critica, questa illustrazione è stata elaborata per le $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ tramite il programma matlab. Lo spostamento della FRCM è graficata sempre tramite lo stesso programma in modo da avere un andamento dello spostamento della stessa su applicazione statica della forza di trazione.

Il numero delle prove sono 24, elaborate tramite due script "SPECKLE" e "estensometro", i test analizzati sono 9 di cui 6 murati in tufo e mattoni, rinforzato in glasstex struttura per ogni test sono stati utilizzati 3 campioni che hanno geometria differente tra loro. Per le sperimentazioni a temperatura differente, i test sono 3, in questo caso però il CLS è stato murato soltanto in mattoni.

I Test sono:

- Mattone pieno rinforzato con glasstex struttura 250 (1,2,3 campioni per ogni test)
- Mattone pieno rinforzato con glasstex struttura 550 (1,2,3)
- Tufo pieno rinforzato con glasstex struttura 250 (1,2,3)
- Tufo pieno rinforzato con glasstex struttura 550 (1,2,3)
- Mattone pieno a temperatura di 80 °C (1,2,3,4)
- Mattone pieno a temperatura di 150 °C (1,2,3,4)
- Mattone pieno a temperatura di 250 °C (1,2,3,4)



La figura precedentemente rappresentata spiega come sono state eseguite le sperimentazioni in laboratorio, come è stata applicata la forza di trazione, la direzione di deformazione del materiale, la muratura in mattoni e come viene inserita la rete FRCM.

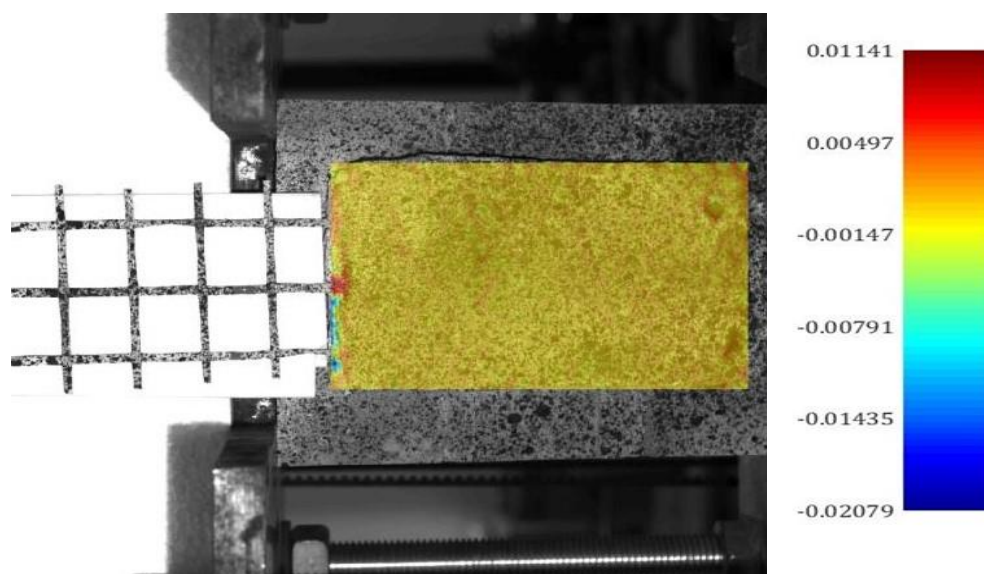
Capitolo 6: Risultati sperimentazione

In questo capitolo vengono mostrati i risultati a fine sperimentazione, dai risultati si è riscontrato una resistenza migliore per i mattoni dovuta la fragilità del tufo, tramite l'applicazione della forza di trazione si sono generate oltre alle tensioni normali anche quelle tangenziali, che sono andate a gravare sulla resistenza del tufo nel punto di giunzione dei materiali (CLS-tufo).

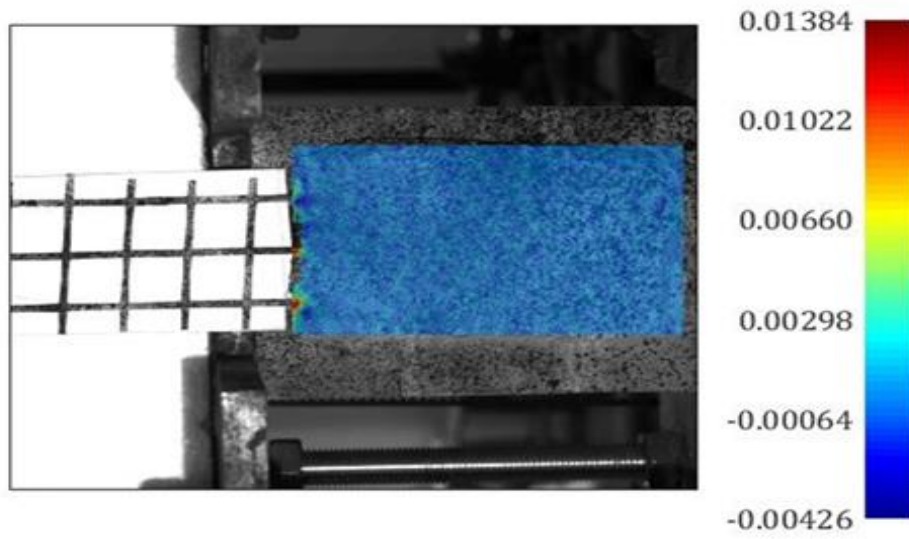
6.1 Risultati delle deformazioni

Tramite l'applicazione di una forza di trazione si sono generate delle deformazioni del provino per ogni campione, in alcune sperimentazione abbiamo dovuto crea delle particolari "mesh" perché matlab fosse in grado di elaborare tutte le immagini, questa "mesh" era più piccola del provino stesso, successivamente abbiamo fatto un'altra elaborazione che abbiamo identificato "bordo", in modo da riuscire a analizzare le deformazioni su tutto il provino fin quando il programma ce lo permetteva.

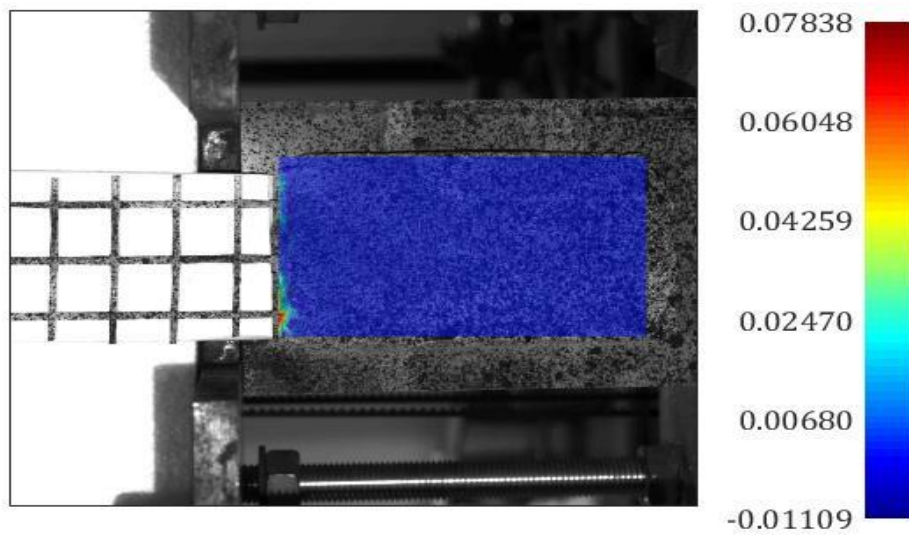
Mattone 250_1 ε_x



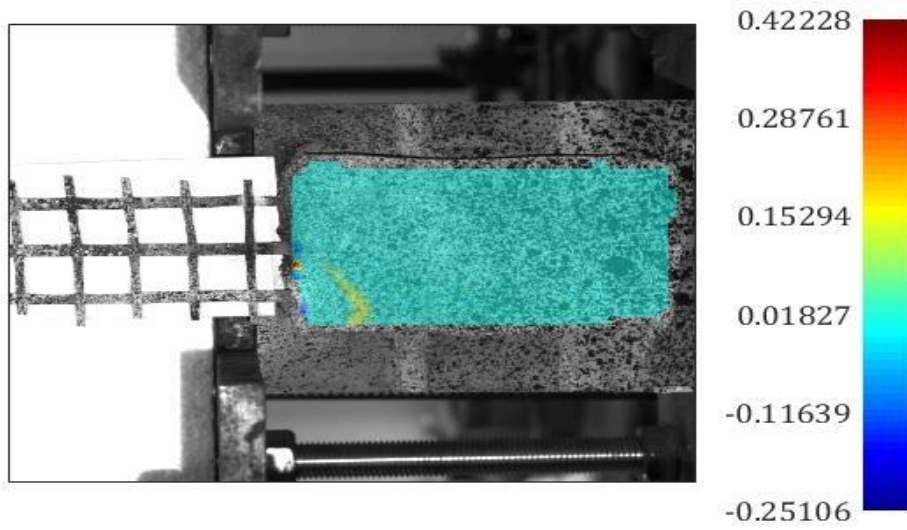
Matrone 250_2 ϵ_x



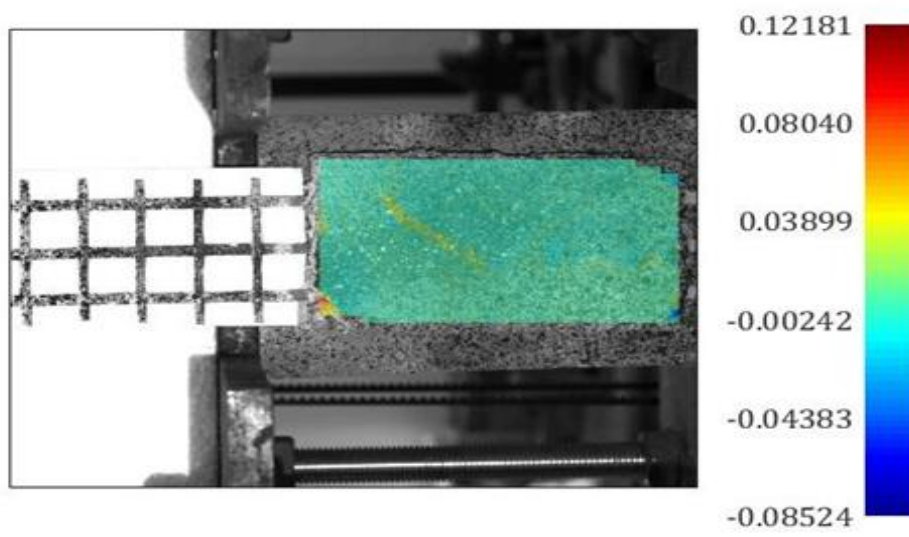
Matrone 250_3 ϵ_x



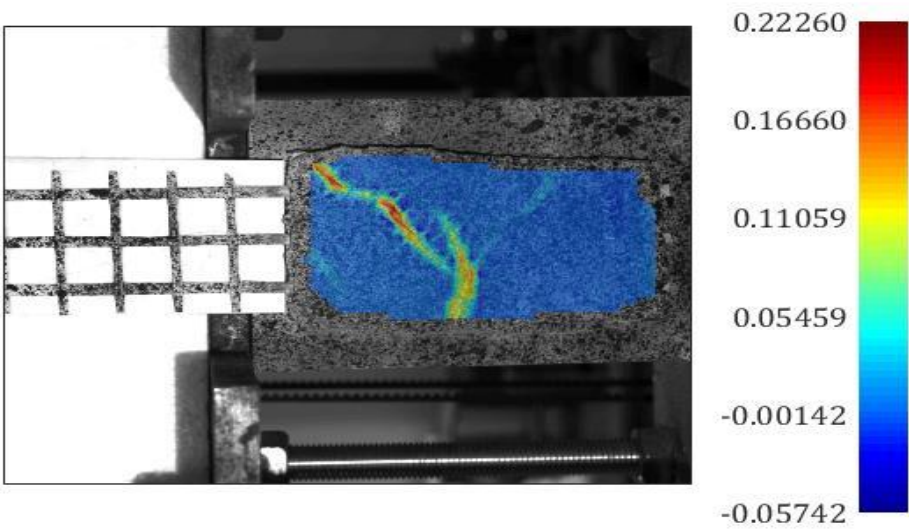
Mattone 550_1 ϵ_x



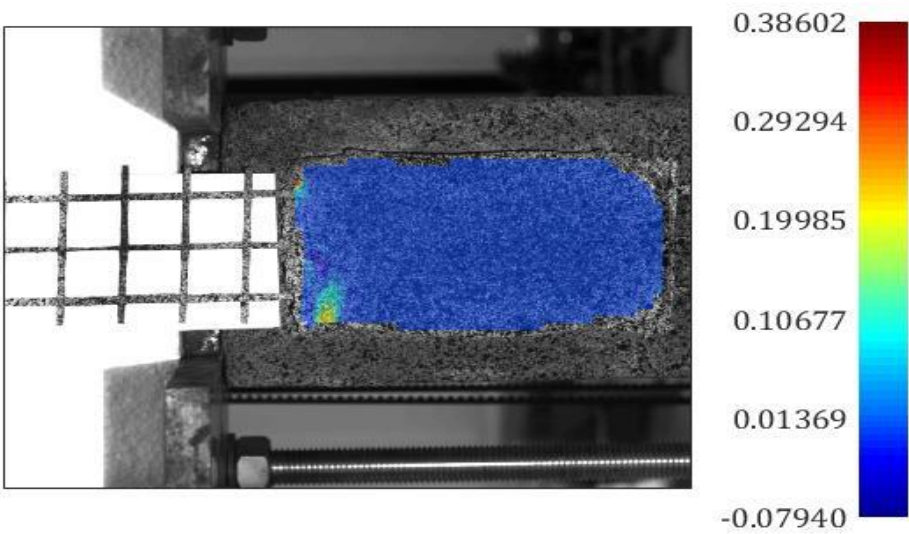
Mattone 550_2 ϵ_x



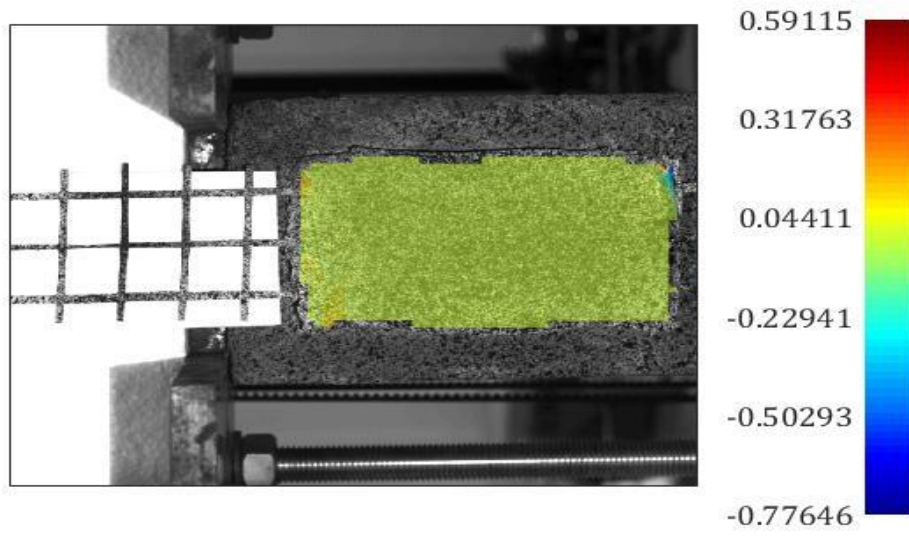
Mattonne 550_3 ϵ_x



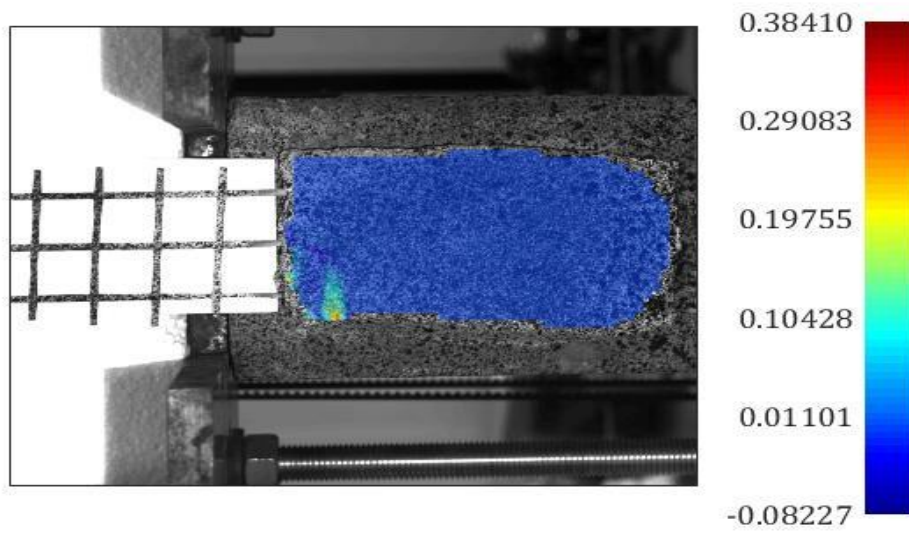
Tufo250_1 ϵ_x



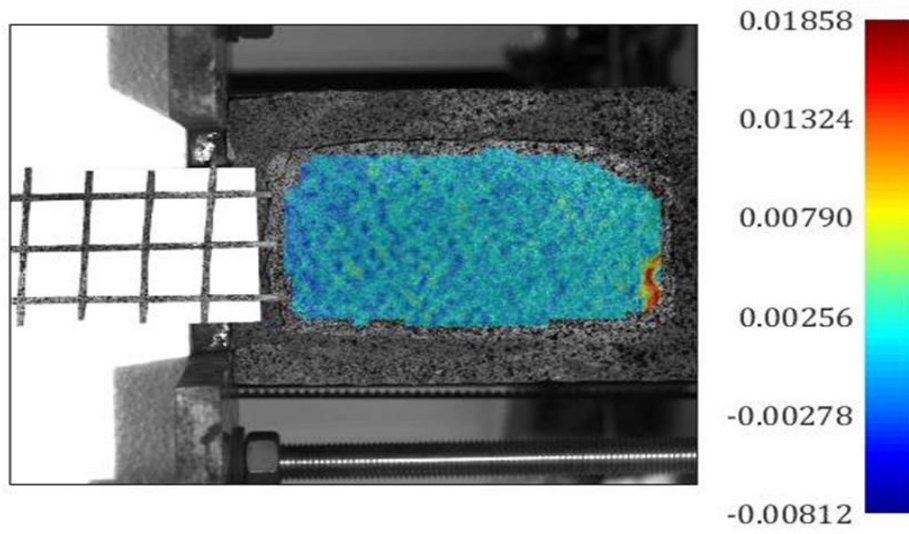
Tufo 250_1 bordo ϵ_x



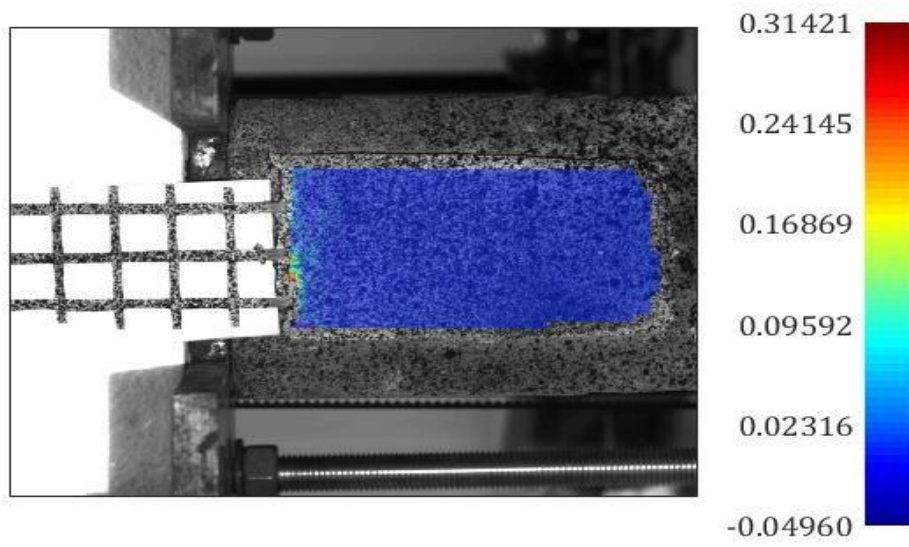
Tufo 250_2 ϵ_x



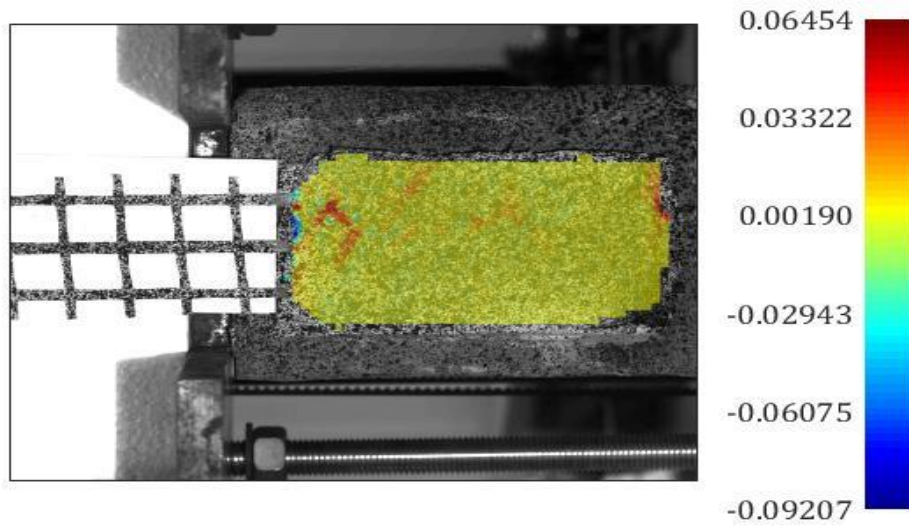
Tufo 250_3 ϵ_x



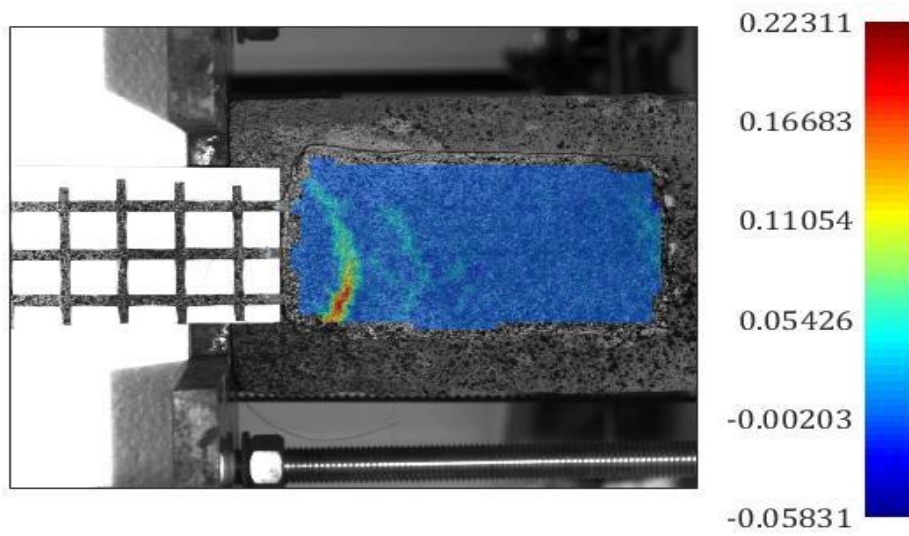
Tufo 550_1 ϵ_x



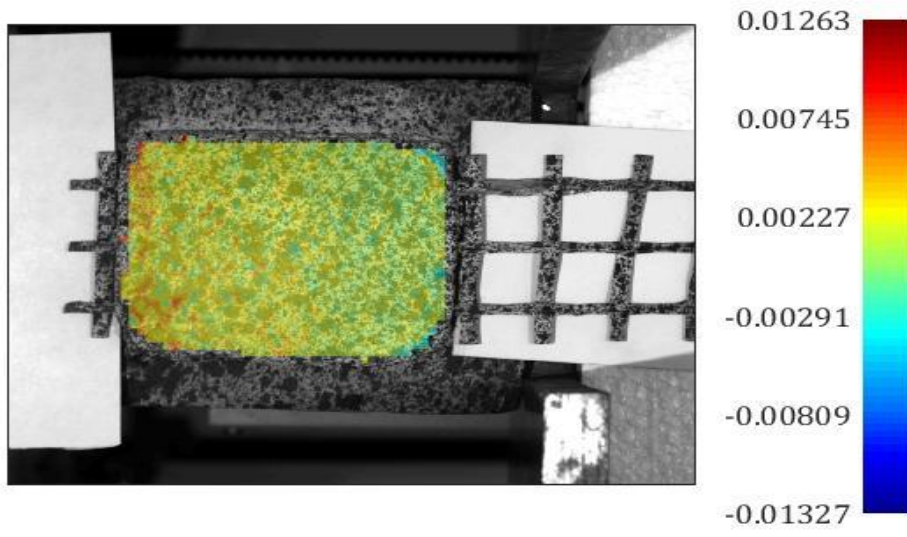
Tufo 550_2 ϵ_x



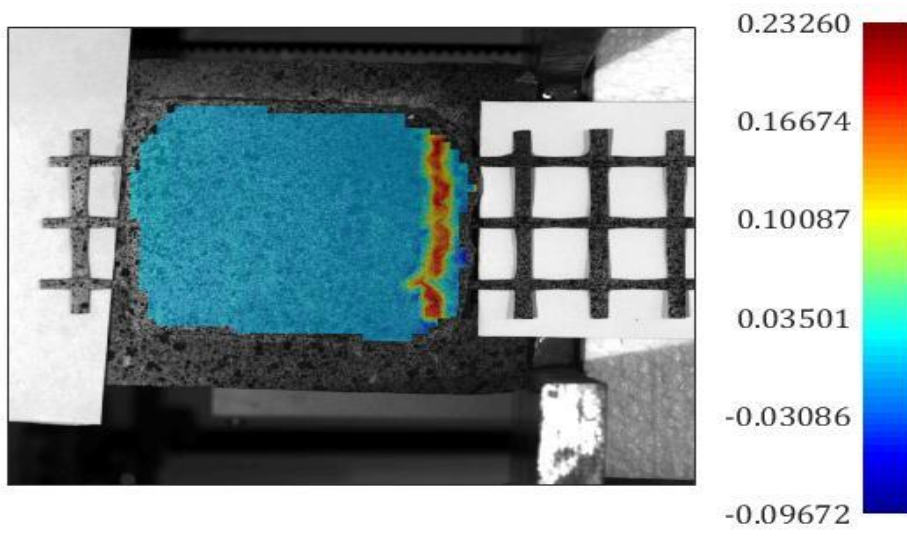
Tufo 550_3 ϵ_x



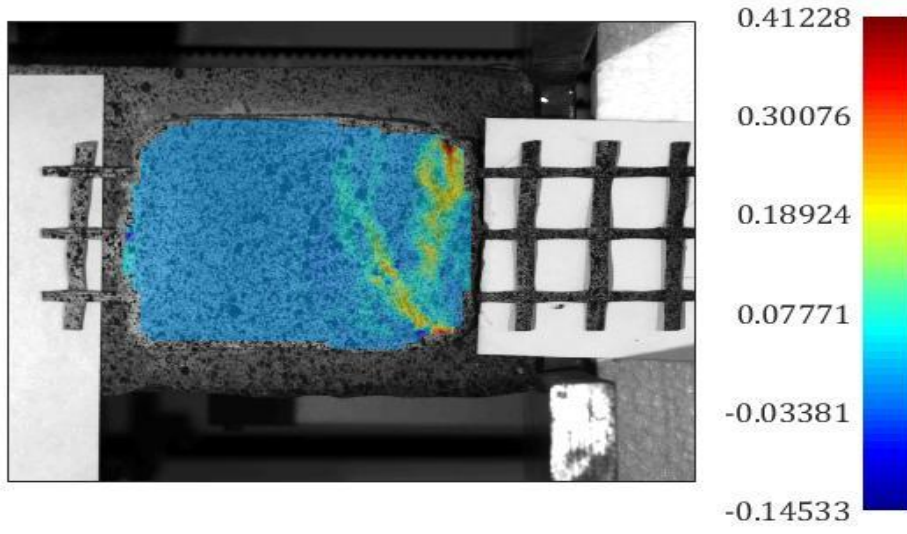
80_1 ε_x



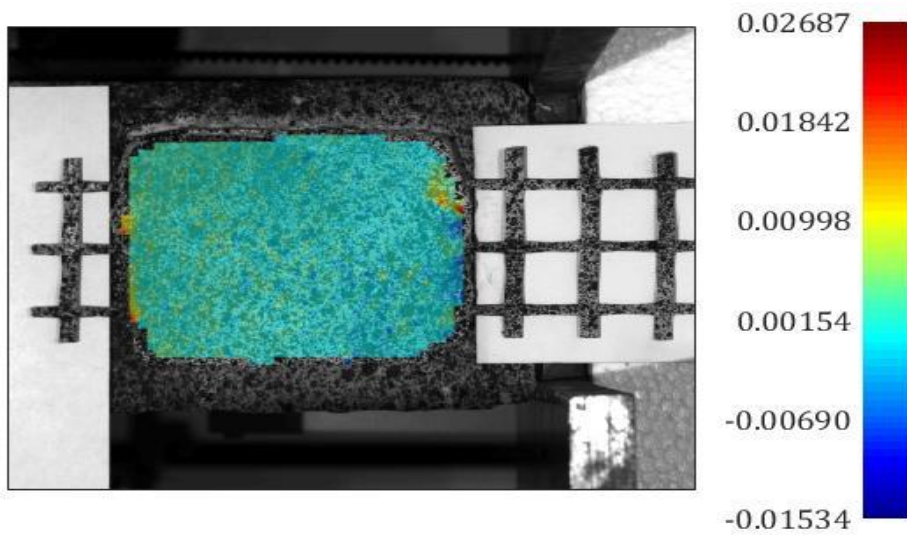
80_2 ε_x



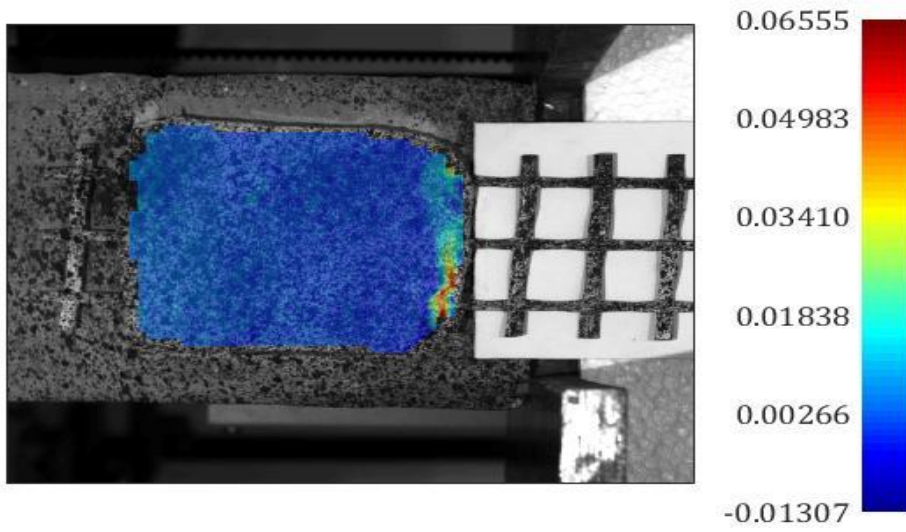
80_3 ε_x



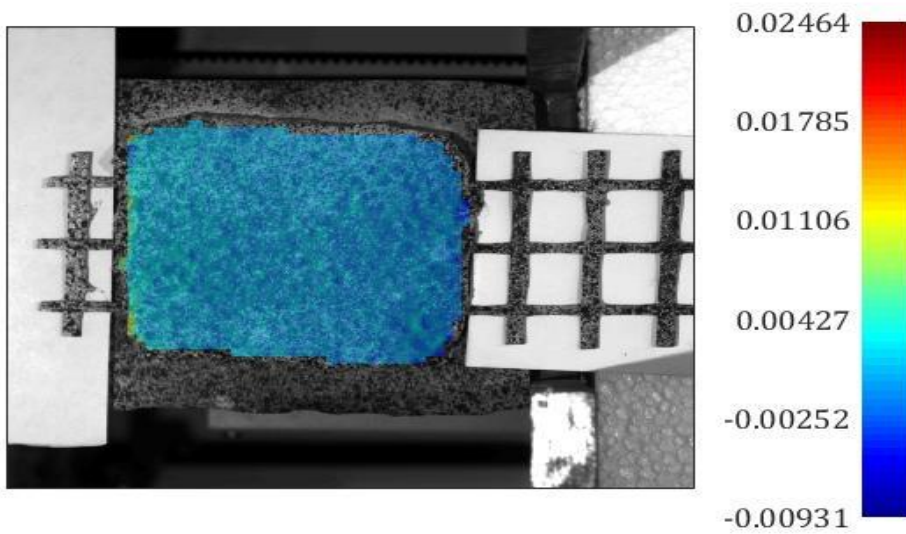
80_4 ε_x



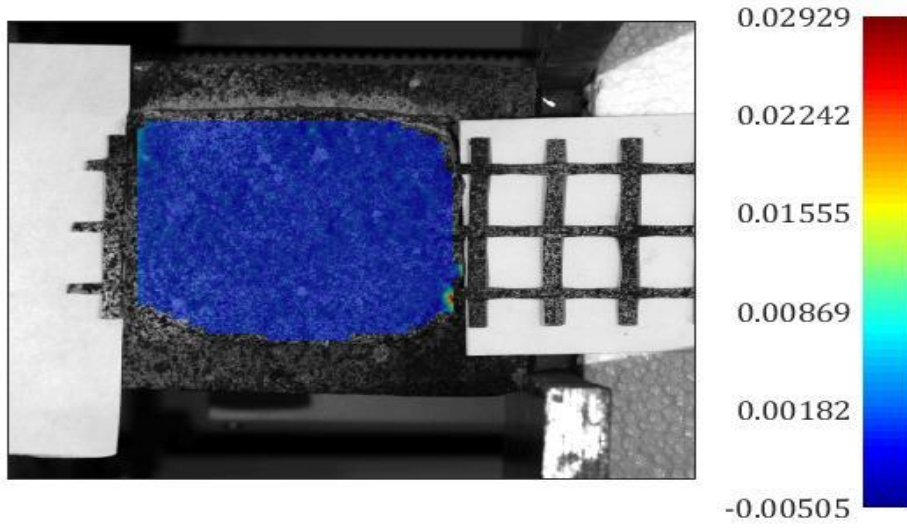
150_1 ϵ_x



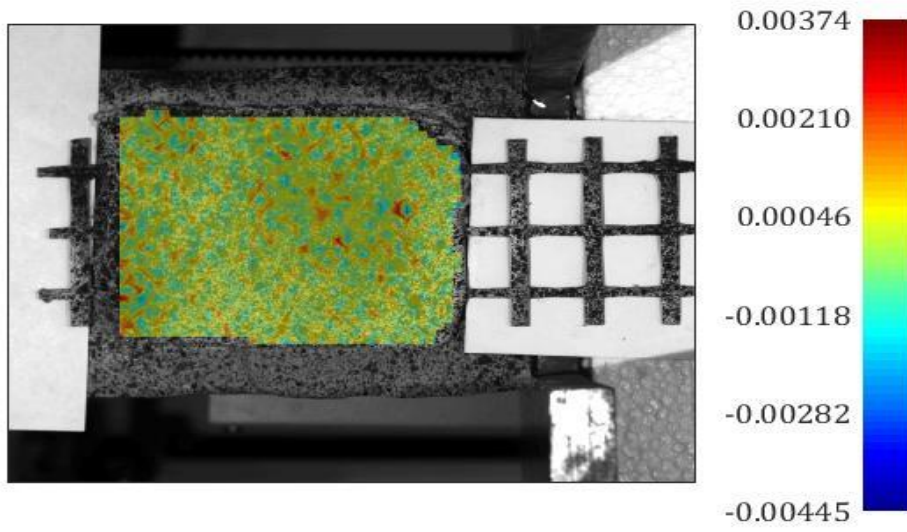
150_2 ϵ_x



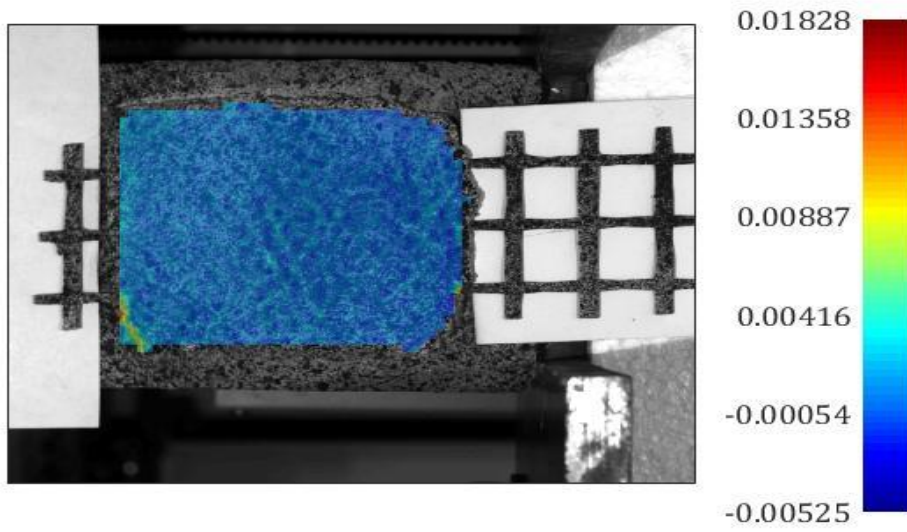
150_3 ϵ_x



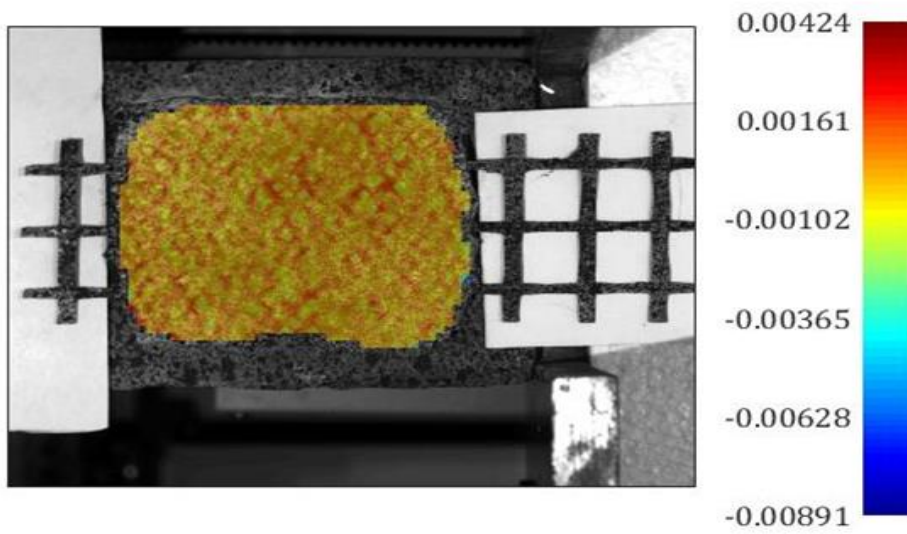
150_4 ϵ_x



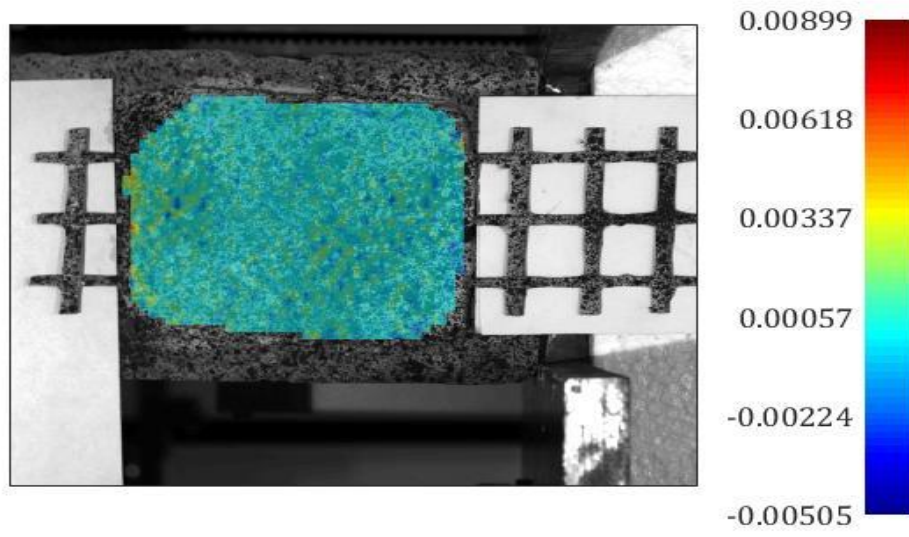
250_1 ϵ_x



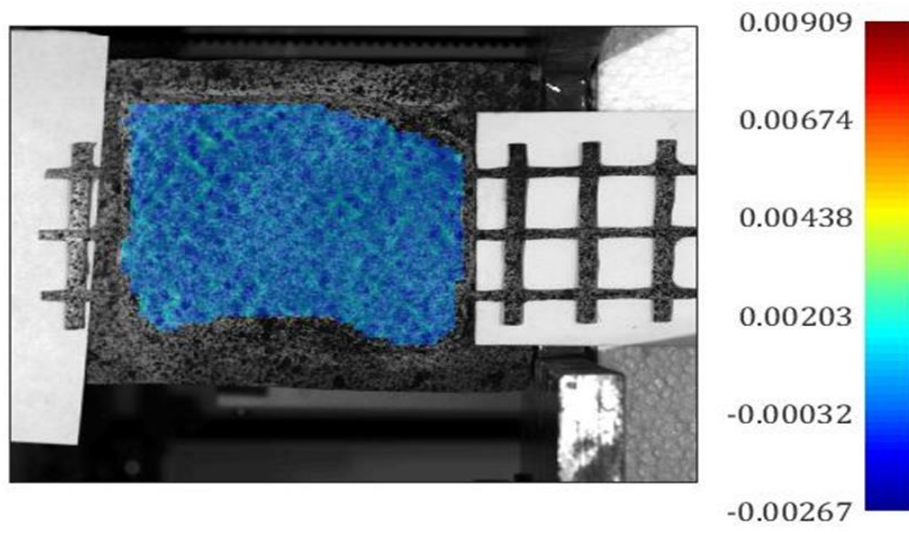
250_2 ϵ_x



250_3 ε_x



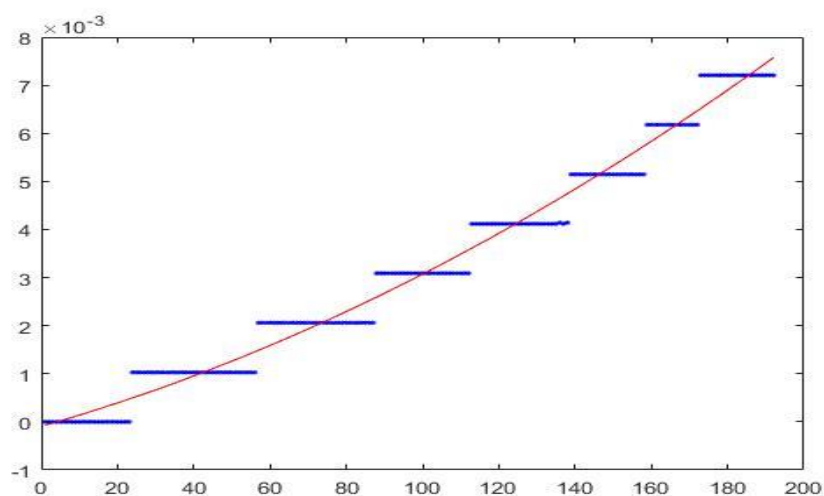
250_4 ε_x



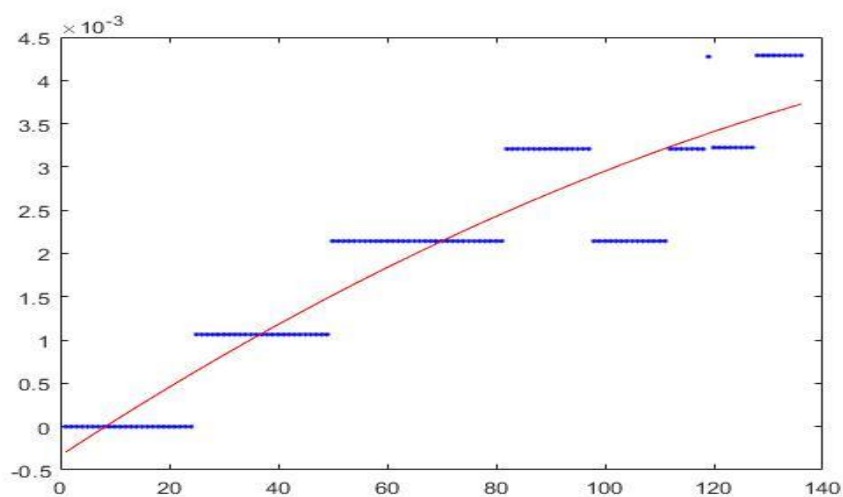
6.2 Risultati Estensometro FRCM

Tramite la forza di trazione la griglia FRCM, come visto dai risultati, tende a separarsi dal CLS quando lo stesso provino tende alla rottura, per questo abbiamo continuato lo studio analizzando lo spostamento della griglia e abbiamo riscontrato questi risultati:

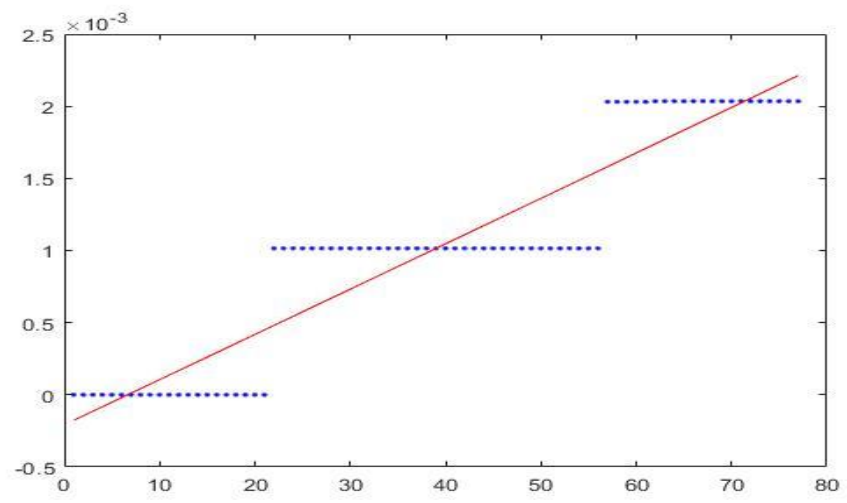
Mattone250_1



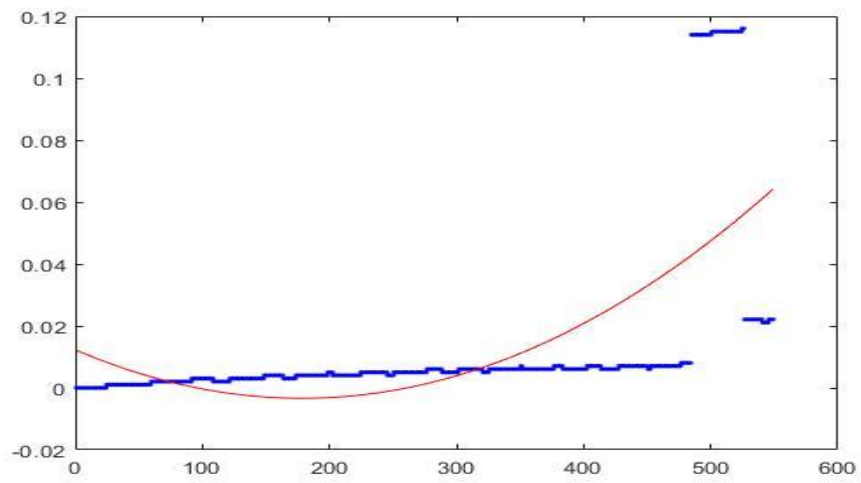
Mattone250_2



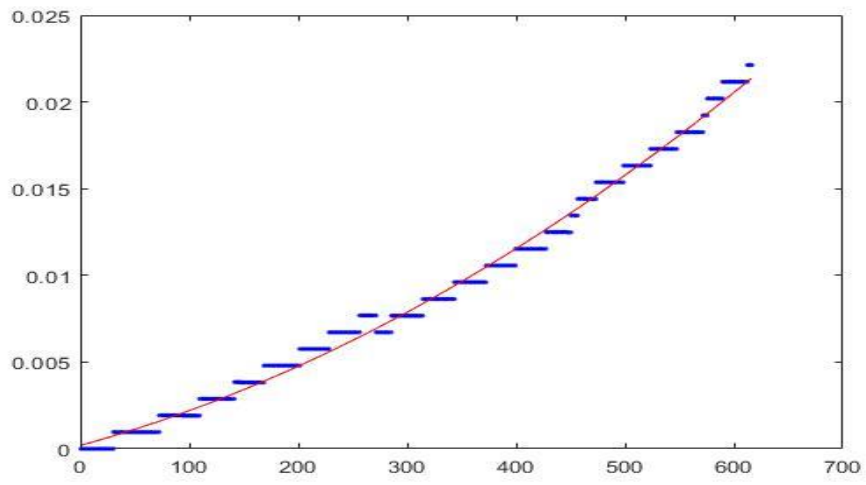
Mattone250_3



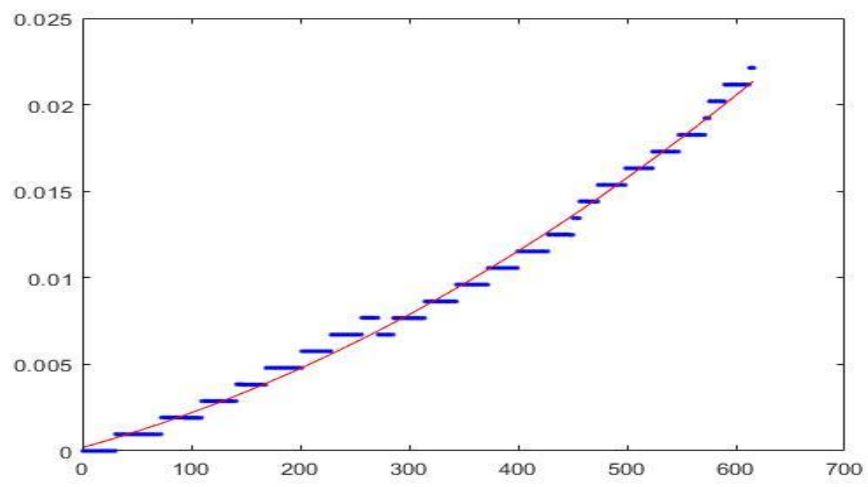
Mattone550_1



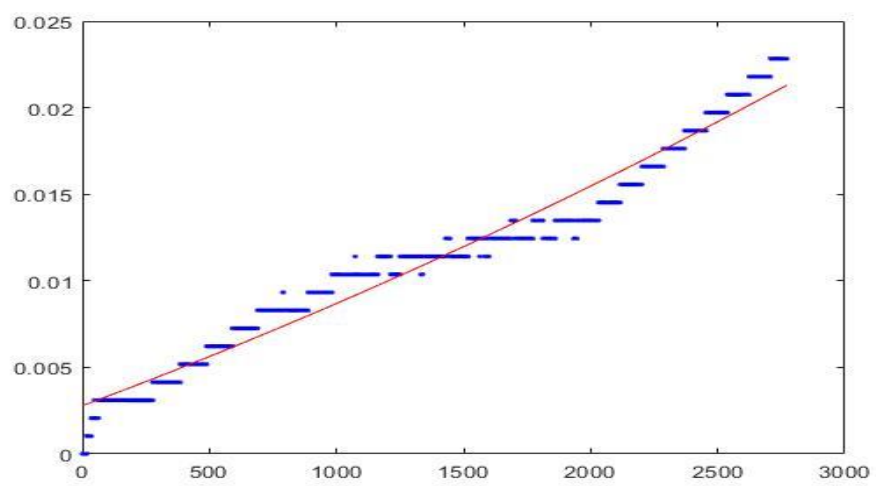
Mattone550_2



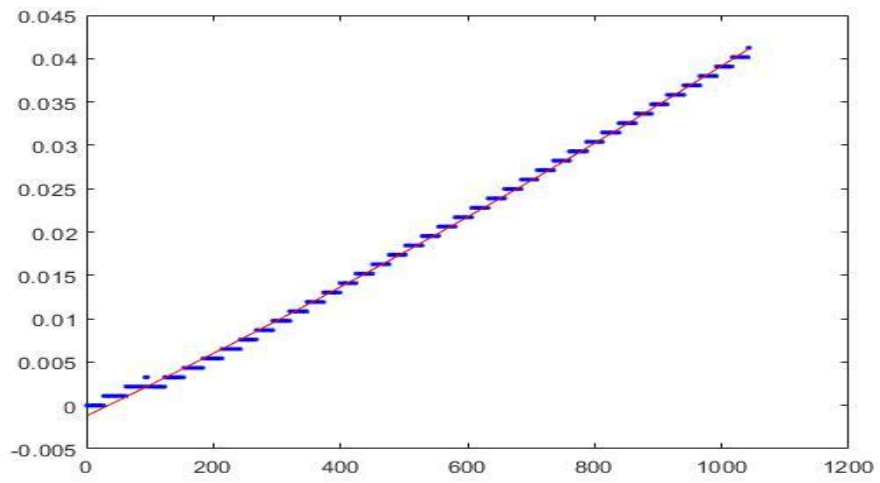
Mattone550_3



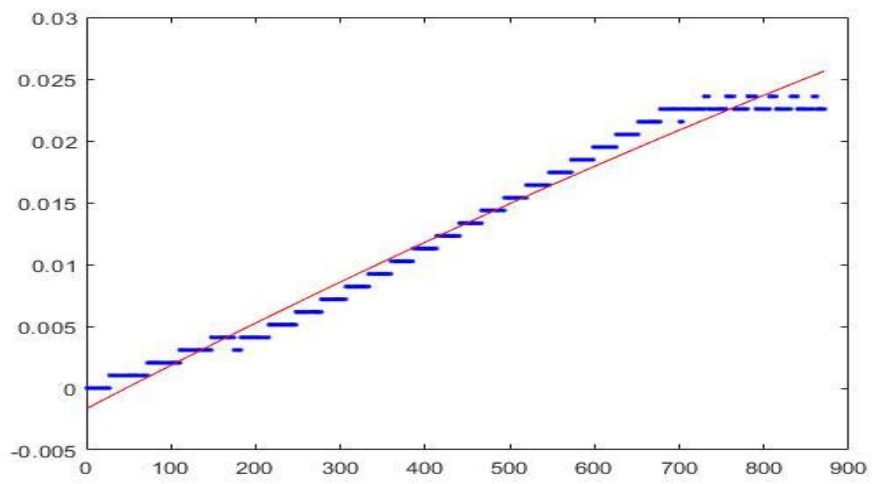
Tufo250_1



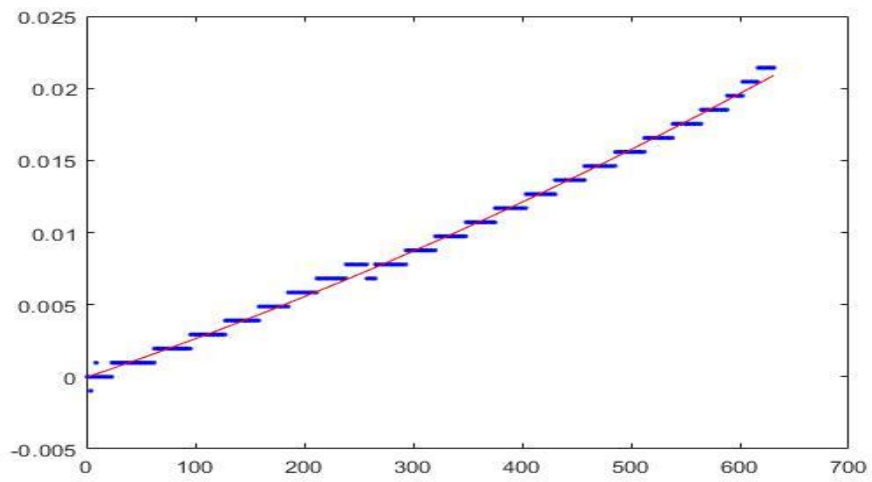
Tufo250_2



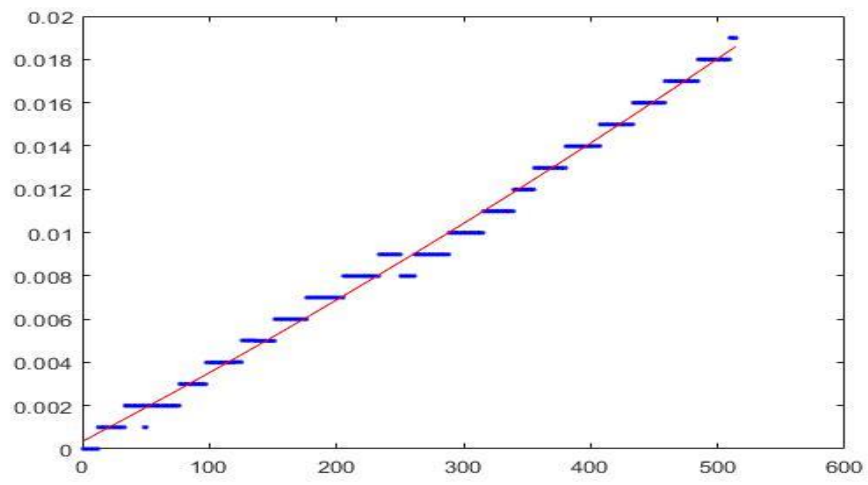
Tuf250_3



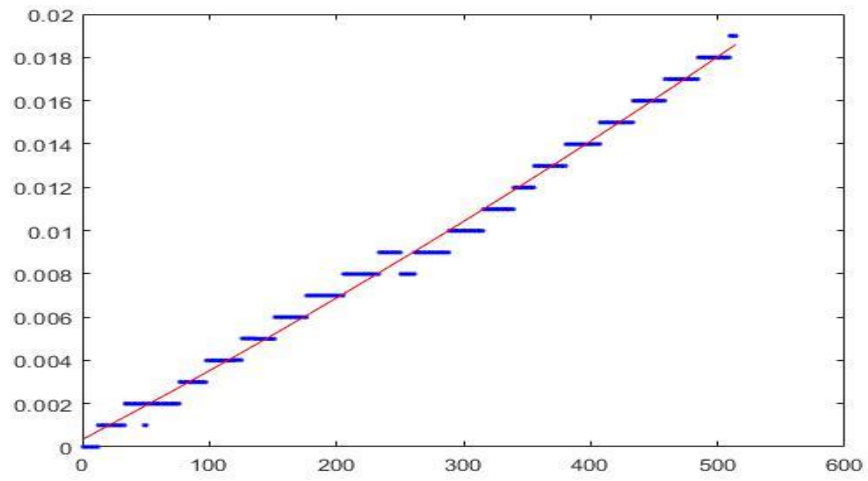
Tuf550_1



Tufo550_2



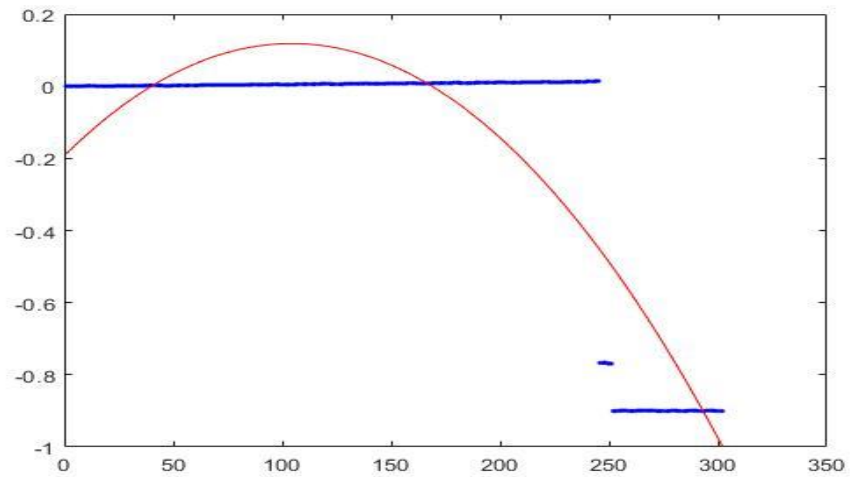
Tufo550_3



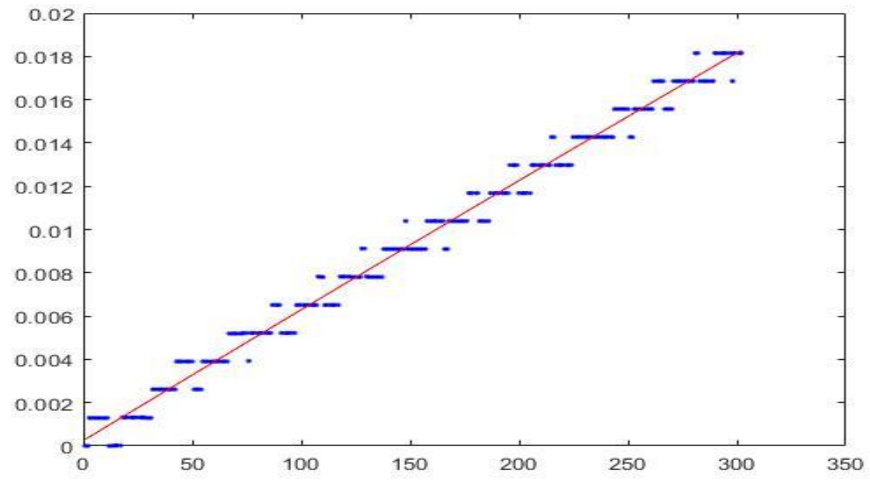
Le sperimentazioni per i provini sottoposti a temperatura differente, sono stati effettuati tramite due telecamere che visionavano due zone differenti della prova, in modo da analizzare meglio gli spostamenti della griglia

Cam0

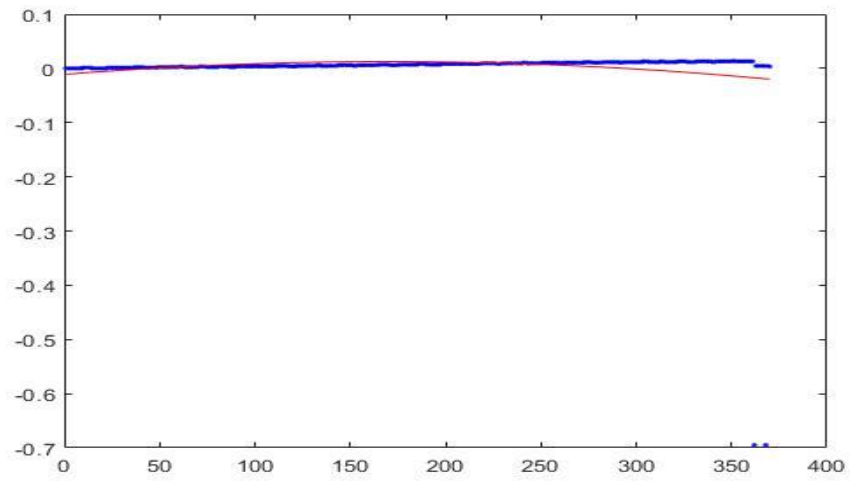
80_1



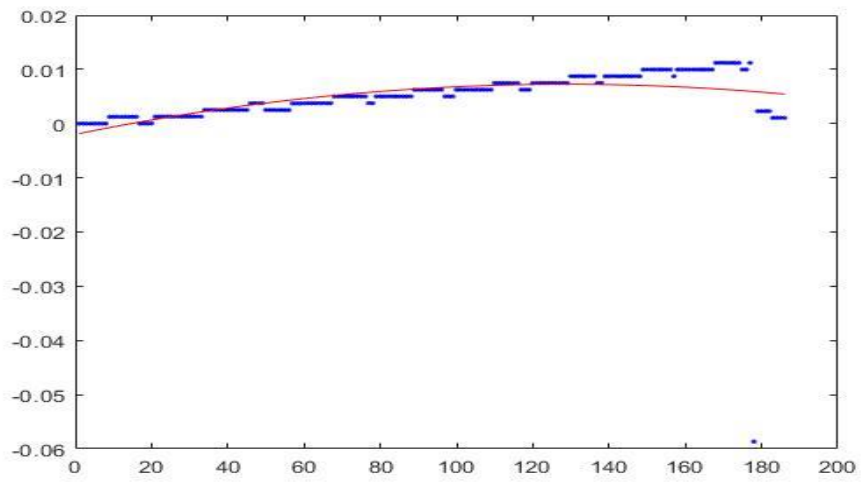
80_2



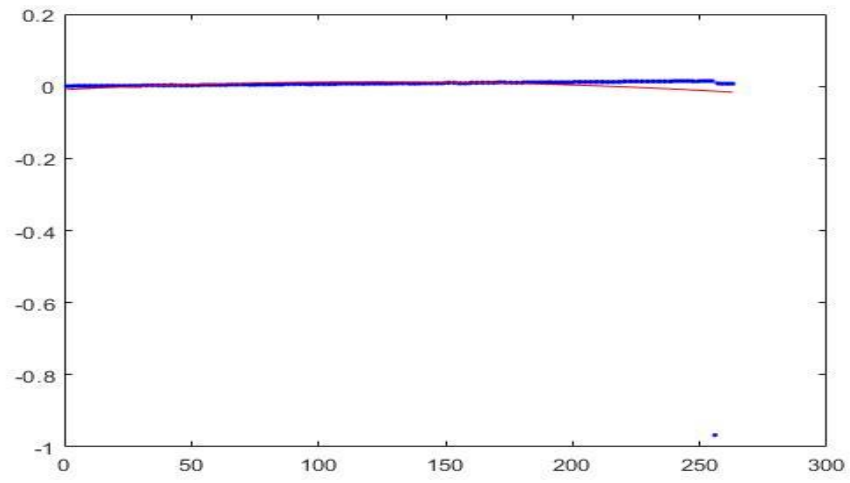
80_3



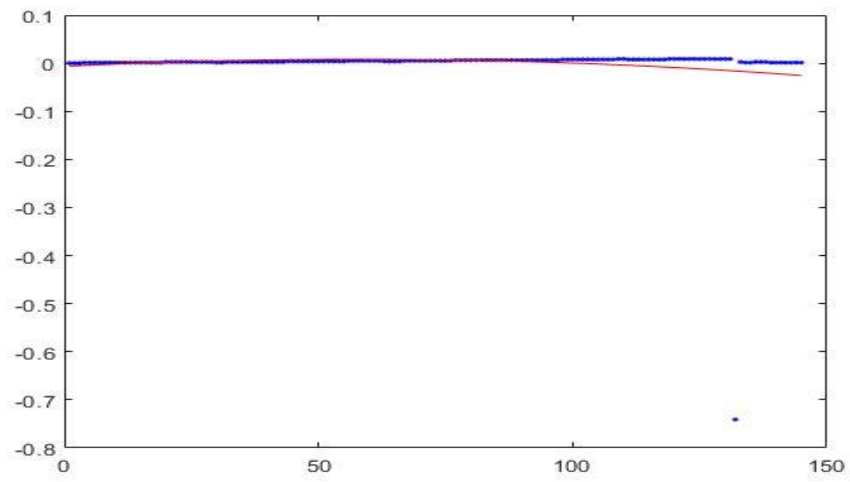
80_4



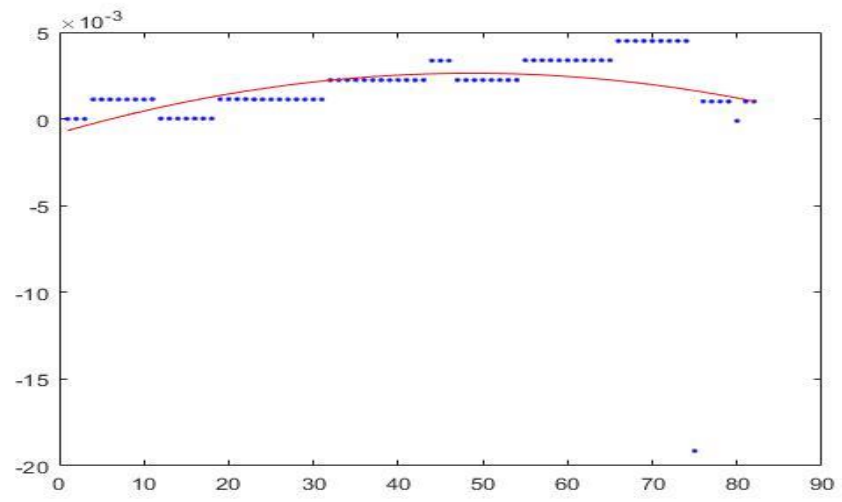
150_1



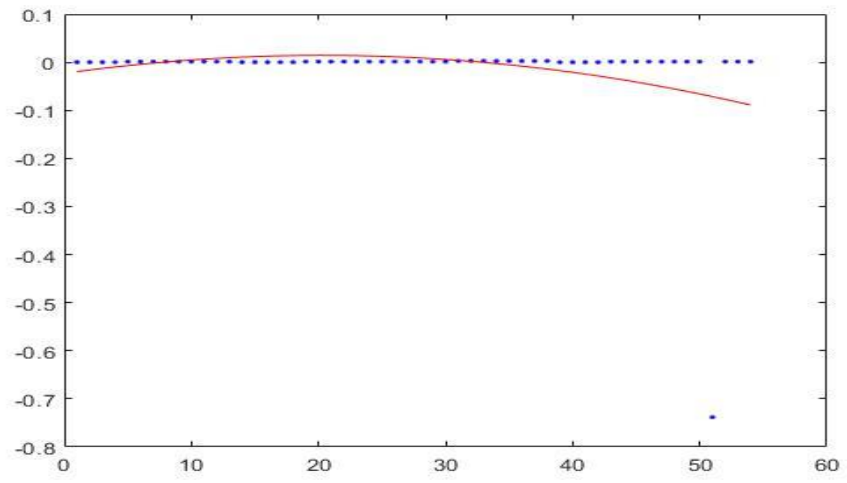
150_2



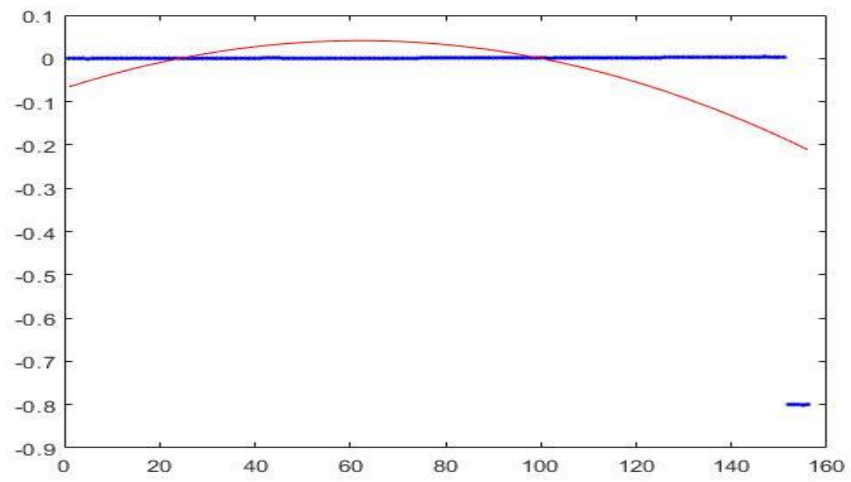
150_3



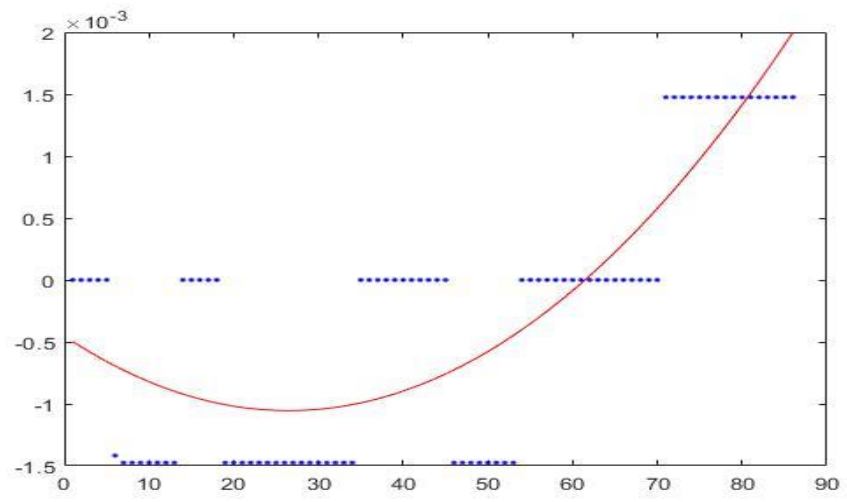
150_4



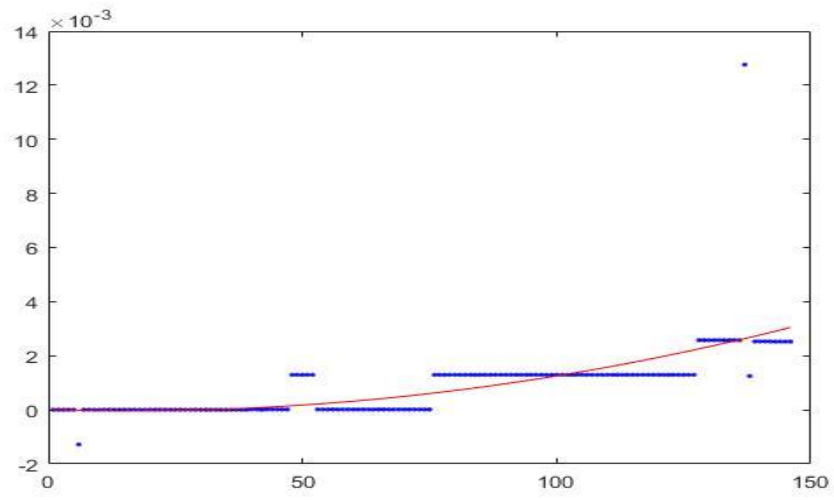
250_1



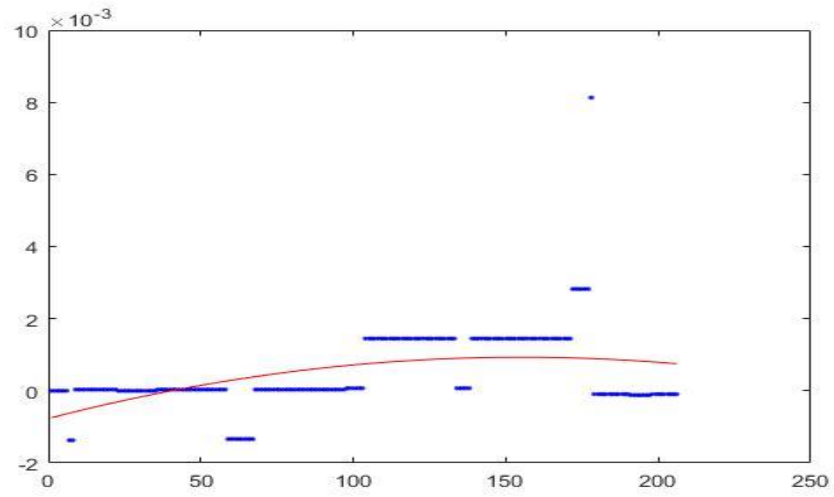
250_2



250_3

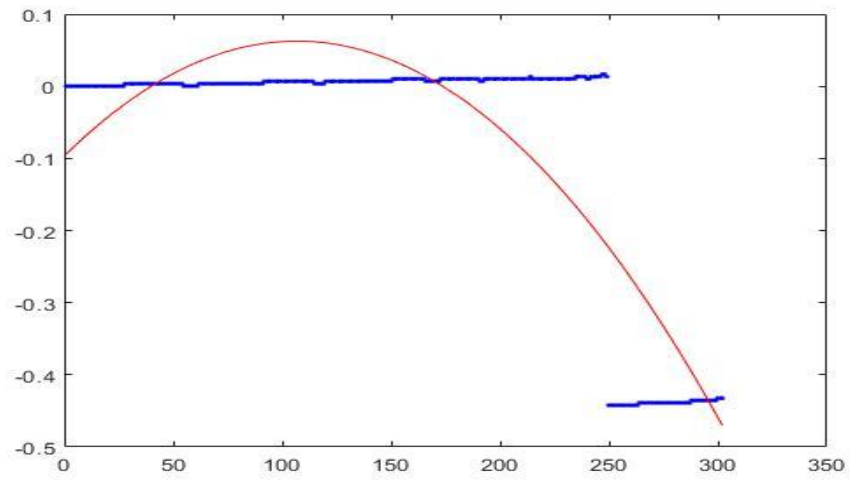


250_4

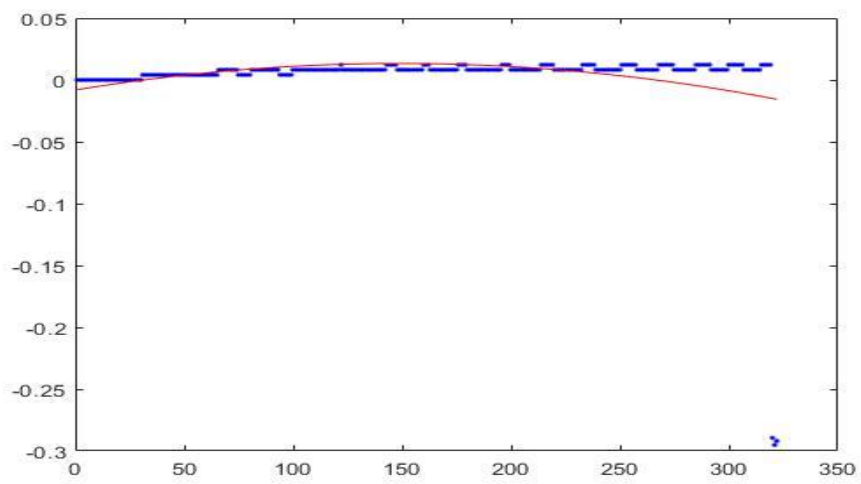


Cam1

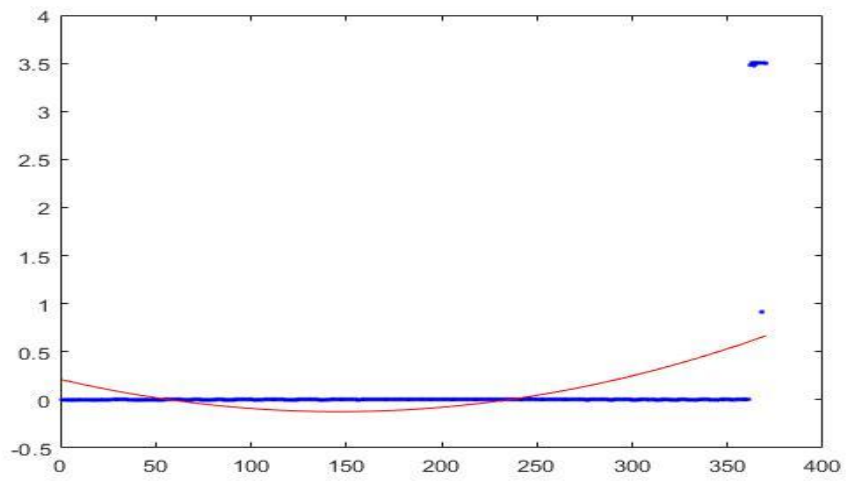
80_1



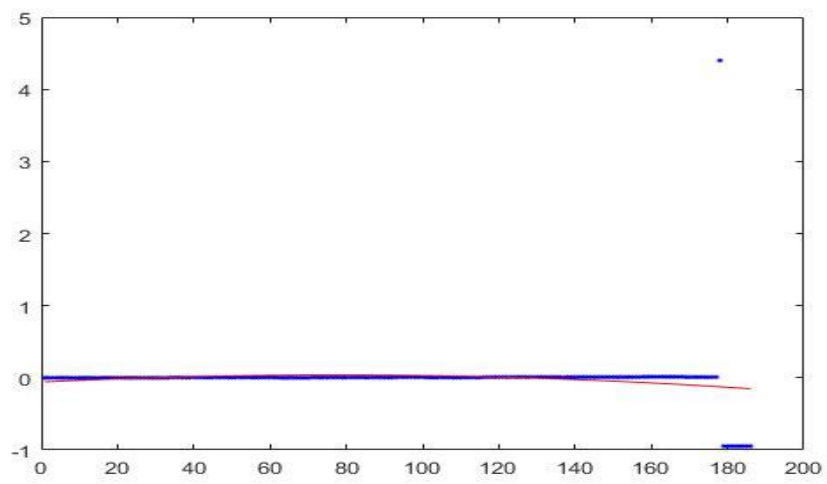
80_2



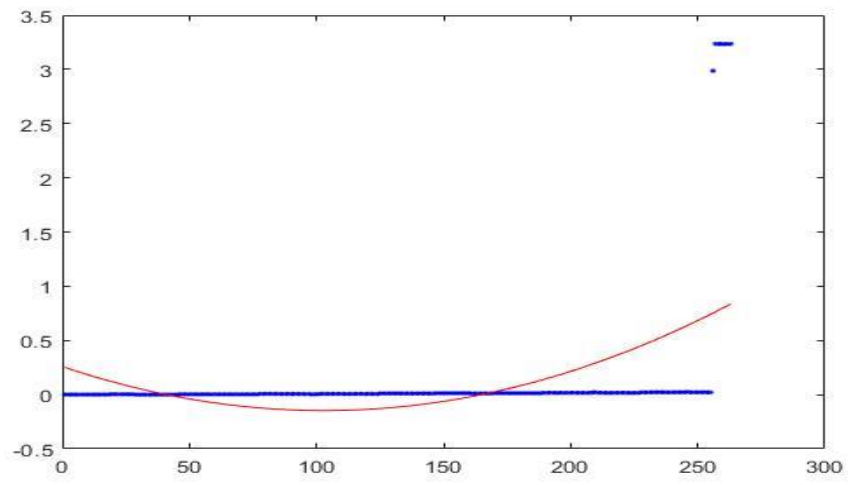
80_3



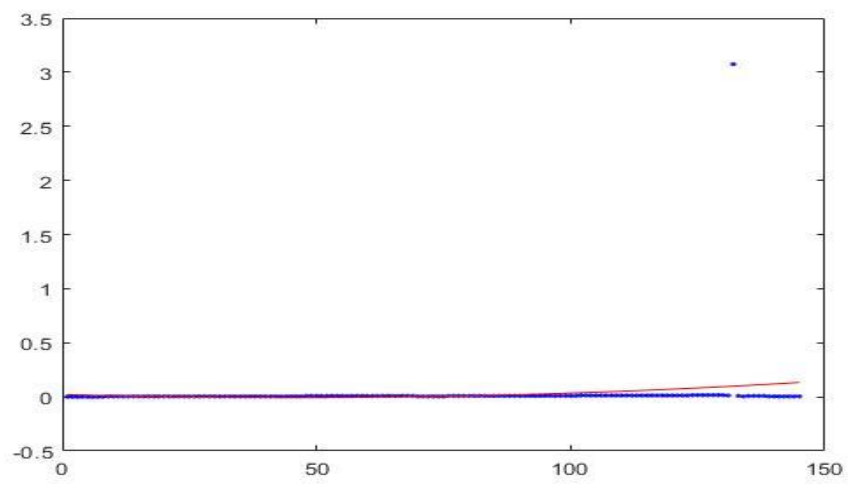
80_4



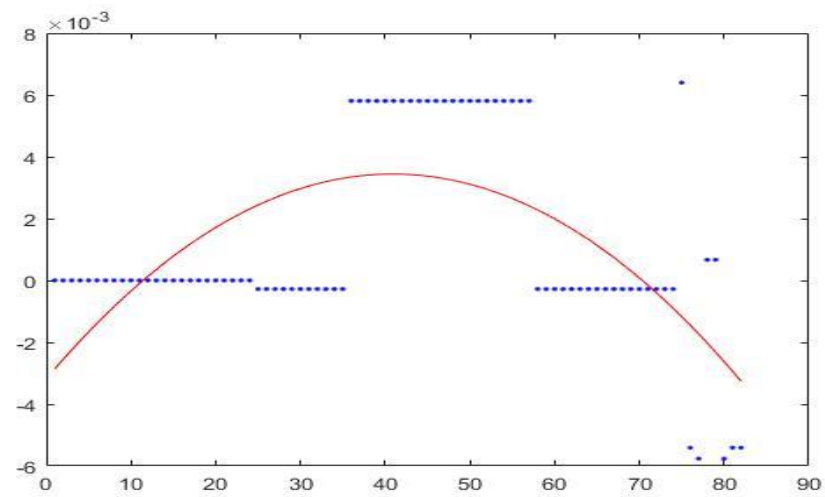
150_1



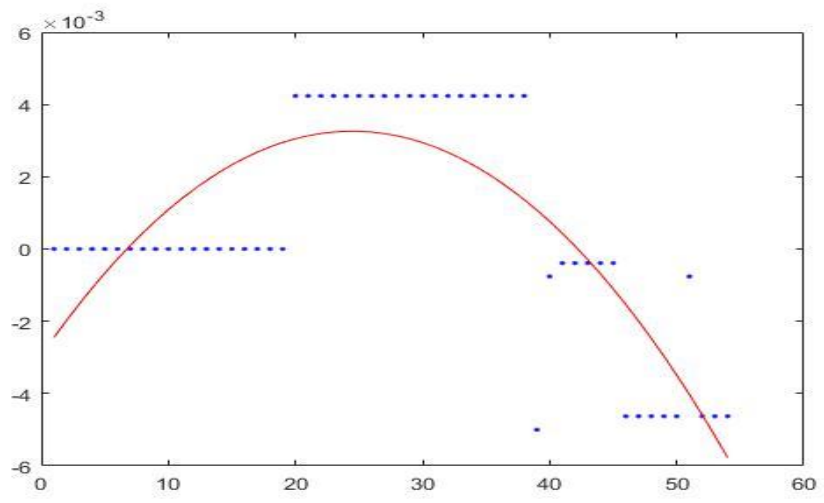
150_2



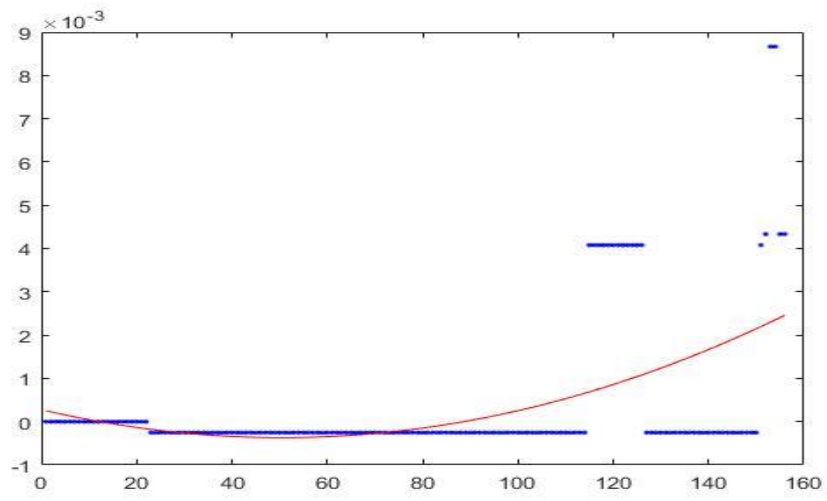
150_3



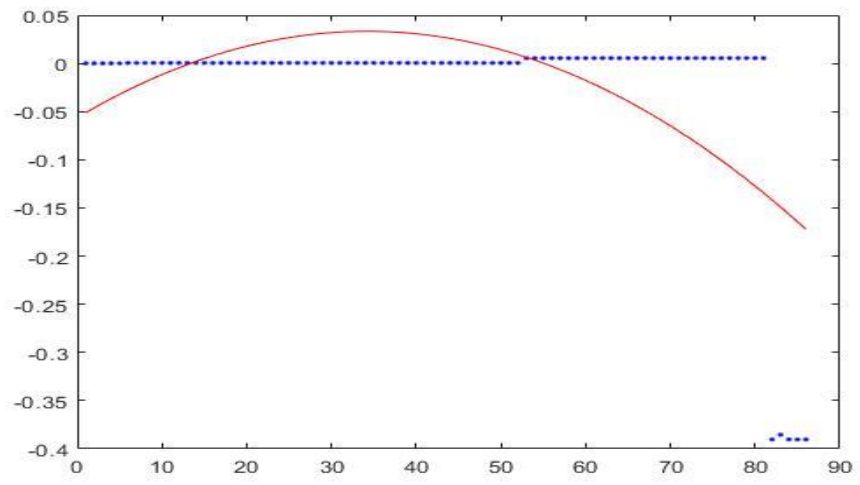
150_4



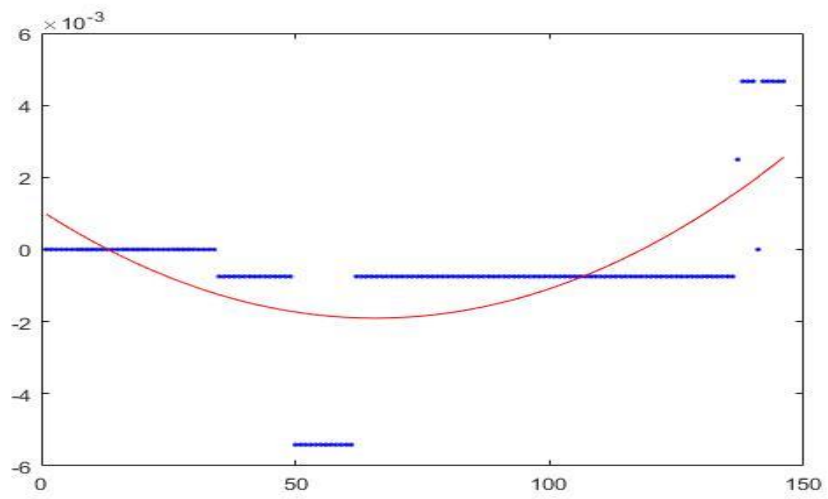
250_1



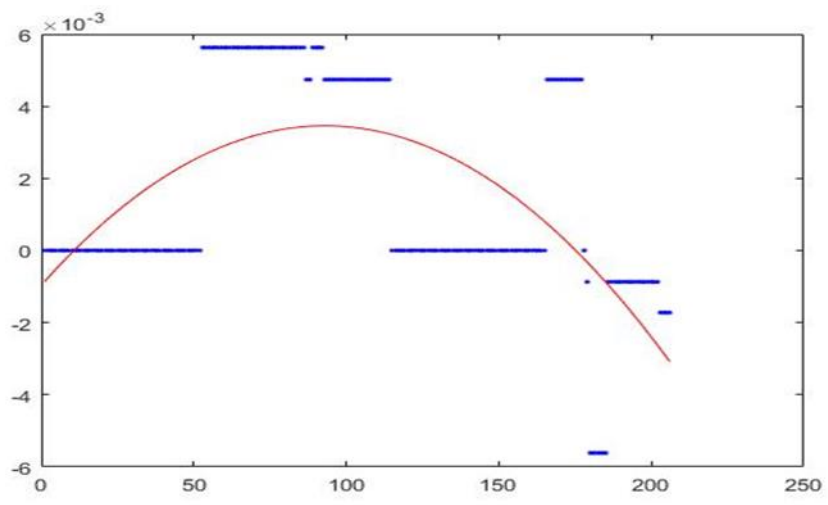
250_2



250_3



250_4



Conclusione

La tecnica D.I.C. discussa con l'algoritmo proposto ha permesso una caratterizzazione completa del materiale. L'algoritmo SPEKLE ha permesso tempi di elaborazione molto rapidi, a differenza dei software commerciali, essendo realizzato integralmente tramite MATLAB® è estremamente versatile, per diversi materiali e tipologie di prove. La DIC come tecnica di acquisizione richiede l'utilizzo di due telecamere e un notebook, cosa che permette un setup rapido e veloce. Questa elaborazione ha generato risultati confrontabili con quelli presenti in bibliografia, sulla mappa delle deformazioni abbiamo notato dei punti di rottura.

Queste rotture hanno direzione perpendicolare rispetto l'applicazione della forza di trazione e sono illustrate da un colore rosso (esempio mattone550_3). Lo scopo della nostra sperimentazione è stato anche quello di analizzare lo spostamento della griglia FRCM, nel nostro caso abbiamo notato nella quasi totalità delle prove, uno spostamento direttamente proporzionale, il provino con il passare del tempo mostrava uno spostamento quasi uniforme.

Bibliografia

Wikipedia “concrete” <https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>

Tesi Acquisizioni ottiche per il rilievo di deformazione DIC su murature FRCM a cura di Stefano Felicioni relatore Marco Sasso, correlatore Gianluca Chiappini

Digital Image Correlation for discontinuous displacement measurement using subset segmentation of Ghulam Mubashar Hassan, Department of Computer Science & Software Engineering, University of Western Australia, Australia

Durability of glass FRCM systems: Effects of different environments on mechanical properties Jacopo Donnini

Wade Gubbels “3-D DIGITAL IMAGE CORRELATION USING A SINGLE COLOR-CAMERA” -Post doctoral thesis; UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA- B.S., New Mexico State University, (2012).