



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Elaborazione DIC di test di trazione su provini in cemento rinforzato con fibre**

**DIC elaboration of tensile test on fibre-reinforced concrete specimen**

Relatore:

Prof. **Marco Sasso**

Correlatore:

Prof. **Gianluca Chiappini**

Tesi di Laurea di:

**Stefano Mezzelani**

A.A. 2021/2022



# Indice

<b>Introduzione.....</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1: I materiali.....</b>	<b>6</b>
1.1 GeoLite 40.....	6
1.1.1 Indicazioni d' uso.....	6
1.1.2 Avvertenze.....	7
1.1.3 Dati tecnici.....	7
1.2 GeoCalce F Antisismico.....	9
1.2.1 Indicazioni d' uso.....	9
1.2.2 Avvertenze.....	10
1.2.3 Dati tecnici.....	10
<b>Capitolo 2: Deformazione e spostamenti.....</b>	<b>12</b>
2.1 Deformazioni elementari ed equazioni di congruenza.....	15
2.2 Grandi deformazioni.....	20
<b>Capitolo 3: MATLAB.....</b>	<b>21</b>
3.1 Curve fitting.....	22
3.2 Image processing.....	23
3.2.1 Step basi.....	24
<b>Capitolo 4: La prova di trazione.....</b>	<b>25</b>
<b>Capitolo 5: Correlazione digitale di immagini.....</b>	<b>28</b>
5.1 Il pattern.....	30
5.2 La correlazione delle immagini.....	32
5.3 Tecniche di cross-relation.....	34

5.4 Correlazione a campo intero .....	37
5.5 Stereovisione e 3D DIC.....	39
<b>Capitolo 6: Risultati .....</b>	<b>41</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>61</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>63</b>

## **Introduzione**

In questo elaborato viene studiato il comportamento e il danneggiamento di provini realizzati in cemento rinforzato attraverso la "Digital Image Correlation" nota con l'acronimo inglese DIC.

La Correlazione Digitale di Immagini è un metodo ottico basato sull'analisi di immagini catturate da una o più fotocamere con lo scopo di ottenere la deformazione su una superficie. Viene utilizzato questo metodo in quanto consente di ricavare le informazioni necessarie allo studio del materiale o in generale dell'oggetto su un numero elevato di punti della superficie di interesse.

Durante il mio tirocinio ho utilizzato MATLAB [1], una piattaforma di programmazione e calcolo numerico per l'analisi di dati, lo sviluppo di algoritmi e la creazione di modelli. MATLAB ha analizzato tutte le immagini ottenute con due fotocamere in laboratorio e mi ha consentito di ottenere grafici e mappe a colori che descrivono come avviene la deformazione nei materiali studiati.

Nel primo capitolo verranno descritti i materiali utilizzati durante le prove realizzate in laboratorio, mettendone in luce le principali caratteristiche e proprietà.

Nel secondo capitolo vengono analizzati gli spostamenti e le deformazioni.

Nel terzo capitolo verrà spiegato in maniera più dettagliata il funzionamento di MATLAB, in particolare gli algoritmi "Curve Fitting" e "Image Processing" che ho utilizzato durante il mio tirocinio.

Nel quarto capitolo si descriverà in generale la prova di trazione eseguita su un provino.

Nel quinto capitolo verrà presentato il metodo DIC.

Il sesto capitolo verterà sulla trattazione dei risultati ottenuti.

## Capitolo 1: I materiali

I materiali utilizzati per la realizzazione dei provini sottoposti successivamente a trazione sono **GeoLite 40** e **GeoCalce F Antisismico**.

### 1.1 GeoLite 40

La GeoLite 40 è una geomalta minerale certificata, eco-compatibile, a base di Geolegante a reazione cristallina. Si tratta di una geomalta tixotropica specifica per le basse temperature. Questo materiale viene utilizzato in particolare per la passivazione, ripristino localizzato e generalizzato, rasatura e protezione monolitica di strutture in calcestruzzo armato quali travi, pilastri, solette, frontalini, rampe, facciavista, elementi decorativi, cornicioni e opere infrastrutturali.

#### 1.1.1 Indicazioni d'uso

1. Preparazione dei supporti:

- Prima di applicare GeoLite 40 occorre bonificare il substrato in calcestruzzo e irruvidirlo con asperità di almeno 5 mm mediante scarifica meccanica o idrodemolizione, provvedendo all'asportazione in profondità dell'eventuale calcestruzzo ammalorato; successivamente è necessario rimuovere la ruggine dai ferri d'armatura, che dovranno essere puliti mediante spazzolatura (manuale o meccanica) o sabbiatura. Si procederà quindi alla pulizia della superficie trattata, con aria compressa o idropulitrice, e alla bagnatura a rifiuto fino ad ottenere un substrato saturo, ma privo di acqua liquida in superficie.
- Riporti a spessore su superfici estese: si richiede l'applicazione di un'armatura metallica di contrasto ancorata al supporto mediante tassellatura.

2. Preparazione:

GeoLite 40 si prepara mescolando 25 kg di polvere con l'acqua indicata sulla confezione. La preparazione dell'impasto può essere effettuata in betoniera, mescolando fino ad ottenere una malta omogenea e priva di grumi; compatibilmente alla velocità di presa della geomalta è anche possibile impiegare una macchina idonea per miscelare e successivamente spruzzare. Per ridotte quantità, mescolare il prodotto in secchio utilizzando un trapano con frusta a basso numero di giri. Conservare il materiale al riparo da fonti di umidità.

### 3. Applicazione:

Per il ripristino localizzato e/o generalizzato, che prevede l'applicazione di GeoLite 40 in spessori variabili da 2 a 40 mm per strato, applicare la malta manualmente a cazzuola o mediante macchina spruzzatrice (facendo attenzione all'eccessiva rapidità di presa della geomalta). Per la realizzazione di una rasatura protettiva, applicare GeoLite 40 manualmente (con spatola d'acciaio) o a macchina in spessori non inferiori a 2 mm, previo irruvidimento delle superfici con asperità di 1 – 2 mm.

### 4. Pulizia:

La pulizia degli attrezzi e delle macchine da residui di GeoLite 40 si effettua con acqua prima dell'indurimento del prodotto.

## 1.1.2 Avvertenze

- Operare a temperature comprese tra +5 °C e +40 °C;
- Non aggiungere leganti o additivi all'impasto;
- Non applicare su superfici sporche e incoerenti;
- Non applicare su gesso, metallo o legno;
- Dopo l'applicazione, proteggere dal sole battente e dal vento;
- Curare la stagionatura umida del prodotto nelle prime 24 ore.

## 1.1.3 Dati tecnici

Dati tecnici secondo Norma di Qualità Kerakoll		
Aspetto	polvere	
Massa volumica apparente	≈ 1320 kg/m <sup>3</sup>	UEAtc
Natura mineralogica aggregato	silicatica-carbonatica	
Intervallo granulometrico	0 – 0,5 mm	EN 12192-1
Conservazione	≈ 12 mesi dalla data di produzione in confezione originale e integra; teme l'umidità	
Confezione	sacchi 25 / 5 kg	
Acqua d'impasto	≈ 4,6 l / 1 sacco 25 kg – ≈ 0,9 l / 1 sacco 5 kg	
Spandimento dell'impasto	160 – 180 mm	EN 13395-1
Massa volumica dell'impasto	≈ 2010 kg/m <sup>3</sup>	
pH dell'impasto	≥ 12,5	
Inizio / Fine presa	≈ 35 – 40 min. (≈ 180 – 195 min. a +5 °C) – (≈ 25 – 30 min. a +30 °C)	
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +40 °C	
Spessore minimo	2 mm	
Spessore massimo per strato	40 mm	
Resa	≈ 17 kg/m <sup>2</sup> per cm di spessore	

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Requisiti richiesti EN 1504-2 (C)	Prestazione GeoLite 40
Permeabilità al vapore acqueo	EN ISO 7783-2	classe di riferimento	Classe I: sD < 5 m
Assorbimento capillare e permeabilità all'acqua	EN 1062-3	$w < 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$	$w < 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$
Forza di aderenza per trazione diretta	EN 1542	$\geq 2 \text{ MPa}$	$> 2 \text{ MPa}$
Ritiro lineare	EN 12617-1	$\leq 0,3\%$	$< 0,3\%$
Coefficiente di espansione termica	EN 1770	$\alpha_T \leq 30\cdot 10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	$\alpha_T < 30\cdot 10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$
Resistenza all'abrasione	EN ISO 5470-1	perdita di peso < 3000 mg	specificata superata
Aderenza in seguito a shock termico	EN 13687-2	$\geq 2 \text{ MPa}$	$> 2 \text{ MPa}$
Resistenza all'urto	EN ISO 6272-1	classe di riferimento	Class III : $> 20 \text{ Nm}$
Sostanze pericolose		conformi al punto 5.4	
Caratteristica prestazionale aggregata	Metodo di prova	Requisiti richiesti UNI 8520-22	Prestazione aggregata GeoLite 40
Reazione alcali-aggregati	UNI 11504	classe di reattività	NR (non reattivo)
<b>Qualità dell'aria Interna (IAQ) VOC - Emissioni sostanze organiche volatili</b>			
Conformità	EC 1 plus GEV-Emicode		Cert. GEV 3541/11.01.02

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Requisiti richiesti EN 1504-7	Prestazione GeoLite 40
Protezione dalla corrosione	EN 15183	nessuna corrosione	specificata superata
Adesione per taglio	EN 15184	$\geq 80\%$ del valore della barra nuda	specificata superata
Resistenza a compressione	EN 12190	$\geq 45 \text{ MPa}$ (28 gg)	<b>GeoLite 40</b> <b>Prestazione in condizioni CC e PCC</b>
			$> 6 \text{ MPa}$ (4 h)
			$> 20 \text{ MPa}$ (24 h)
			$> 35 \text{ MPa}$ (7 gg)
Resistenza a trazione per flessione	EN 196/1	nessuno	$> 45 \text{ MPa}$ (28 gg)
			$> 2 \text{ MPa}$ (4 h)
			$> 5 \text{ MPa}$ (24 h)
Legame di aderenza	EN 1542	$\geq 2 \text{ MPa}$ (28 gg)	$> 6 \text{ MPa}$ (7 gg)
			$> 9 \text{ MPa}$ (28 gg)
			$> 2 \text{ MPa}$ (28 gg)
Resistenza alla carbonatazione	EN 13295	profondità di carbonatazione $\leq$ calcestruzzo di riferimento [MC (0,45)]	specificata superata
Modulo elastico a compressione	EN 13412	$\geq 20 \text{ GPa}$ (28 gg)	22 GPa in CC - 20 GPa in PCC (28 gg)
Compatibilità termica ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti	EN 13687-1	forza di legame dopo 50 cicli $\geq 2 \text{ MPa}$	$> 2 \text{ MPa}$
Assorbimento capillare	EN 13057	$\leq 0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$	$< 0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$
Contenuto ioni cloruro (Determinato sul prodotto in polvere)	EN 1015-17	$\leq 0,05\%$	$< 0,05\%$
Reazione al fuoco	EN 13501-1	Euroclasse	A1



## **1.2 GeoCalce F Antisismico**

GeoCalce F Antisismico è una malta strutturale traspirante a grana fine di pura calce naturale NHL e Geolegante. Si tratta di un materiale ideale per il rinforzo strutturale di elementi in muratura, permette di costruire murature nuove e ripristinare parametri murari lesionati. Non deve essere utilizzato su intonaci o rasature esistenti, su supporti sporchi, vecchie pitture e incrostazioni saline.

Gli elementi naturali presenti in GeoCalce F Antisismico:

- Pura calce naturale NHL 3.5 certificata;
- Geolegante minerale;
- Sabbietta silicea lavata di cava fluviale (0,1-0,5mm);
- Sabbia silicea lavata di cava fluviale (0,1-1mm);
- Calcere dolomitico selezionato (0-1,4mm);
- Fino di puro marmo bianco di Carrara (0-0,2mm).

### **1.2.1 Indicazioni d'uso**

#### **1. Preparazione dei supporti:**

Il fondo deve essere pulito e consistente, privo di parti friabili, di polvere e muffe. Successivo idrolavaggio a pressione per rimuovere completamente residui di precedenti lavorazioni che possano pregiudicare l'adesione. Bagnare sempre i supporti prima dell'applicazione del prodotto.

#### **2. Preparazione e applicazione:**

Geocalce F Antisismico si prepara impastando 1 sacco da 25 kg con acqua pulita, nella quantità indicata sulla confezione, in betoniera a tazza. L'impasto si ottiene versando prima l'acqua nella betoniera pulita ed aggiungendo poi tutta la polvere in unica soluzione. Attendere che il prodotto raggiunga la giusta consistenza in corso di miscelazione. Inizialmente (1 – 2 minuti) il prodotto appare asciutto; in questa fase non aggiungere acqua. Miscelare in continuo per 4 – 5 minuti fino ad ottenere una consistenza omogenea, soffice e senza grumi. Preparare il fondo eseguendo, se necessario, il rincoccio al fine di regolarizzare i supporti. Successivamente procedere alla bagnatura a rifiuto fino ad ottenere un substrato saturo ma asciutto, privo d'acqua liquida in superficie. Non aggiungere altri componenti (leganti o inerti generici) all'impasto.

3. Rinforzo di elementi in muratura con placcaggio diffuso:
  - Stesura di un primo strato di GeoCalce F Antisismico con spessore di circa 3,5mm;
  - Con malta ancora fresca procedere alla posa della rete di rinforzo cercando di evitare la formazione di vuoti o bolle d'aria che possano compromettere l'adesione della rete;
  - Eventuale inserimento di sistemi di connessione a fiocco o di connessioni a secco;
  - Esecuzione del secondo strato di GeoCalce F Antisismico, spessore di circa 2.5mm, al fine di inglobare la rete di rinforzo e chiudere eventuali vuoti sottostanti;
4. Rinforzo di elementi in muratura con placcaggio a fasce.
5. Pulizia:
 

Geocalce F Antisismico è un prodotto naturale, la pulizia degli attrezzi si effettua con sola acqua prima dell'indurimento del prodotto.

### 1.2.2 Avvertenze

- Tenere il materiale immagazzinato in luoghi protetti dal caldo estivo e dal freddo invernale;
- Proteggere le superfici dalla corrente d'aria.

### 1.2.3 Dati tecnici

Dati tecnici secondo Norma di Qualità Kerakoll		
Aspetto	polvere	
Natura mineralogica aggregato	silicatica-carbonatica	
Intervallo granulometrico	0 – 1,4 mm	
Conservazione	≈ 12 mesi dalla data di produzione in confezione originale e integra; teme l'umidità	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	≈ 4,5 l / 1 sacco 25 kg	
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 1,73 kg/dm <sup>3</sup>	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essiccata	≈ 1,58 kg/dm <sup>3</sup>	EN 1015-10
Temperature limite d'applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore max per strato	≈ 1,5 cm	
Resa	≈ 14 kg/m <sup>2</sup> per cm di spessore	

<b>Performance</b>			
<b>Qualità dell'aria interna (IAQ) VOC - Emissioni sostanze organiche volatili</b>			
Conformità	EC 1 plus GEV-Emicode	Cert. GEV 4093/11.01.02	
<b>Qualità dell'aria interna (IAQ) ACTIVE - Diluizione inquinanti indoor *</b>			
	Flusso	Diluizione	
Toluene	299 µg m <sup>2</sup> /h	+100%	metodo JRC
Pinene	162 µg m <sup>2</sup> /h	+14%	metodo JRC
Formaldeide	2330 µg m <sup>2</sup> /h	test non superato	metodo JRC
Biossido di Carbonio (CO <sub>2</sub> )	388 mg m <sup>2</sup> /h	+453%	metodo JRC
Umidità (Aria Umida)	26 mg m <sup>2</sup> /h	+21%	metodo JRC
<b>Qualità dell'aria interna (IAQ) BIOACTIVE - Azione batteriostatica **</b>			
Enterococcus faecalis	Classe B+ proliferazione assente	metodo CSTB	
<b>Qualità dell'aria interna (IAQ) BIOACTIVE - Azione fungistatica **</b>			
Penicillium brevicompactum	Classe F+ proliferazione assente	metodo CSTB	
Cladosporium sphaerospermum	Classe F+ proliferazione assente	metodo CSTB	
Aspergillus niger	Classe F+ proliferazione assente	metodo CSTB	

<b>Performance</b>		
<b>HIGH-TECH EN 998-2</b>		
Resistenza a compressione a 28 gg	categoria M15	EN 998-2
Permeabilità al vapore acqueo (µ)	da 15 a 35 (valore tabulato)	EN 1745
Assorbimento idrico capillare	≈ 0,3 kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )	EN 1015-18
Resistenza a taglio	> 1 N/mm <sup>2</sup>	EN 1052-3
Adesione al supporto a 28 gg	> 1 N/mm <sup>2</sup> - FP: B	EN 1015-12
Conducibilità termica (λ <sub>10, dry</sub> )	0,82 W/(m K) (valore tabulato)	EN 1745
Modulo elastico statico	9 GPa	EN 998-2
Conformità	classe di resistenza M15	EN 998-2
<b>HIGH-TECH EN 1504-3</b>		
Resistenza a compressione	> 15 MPa (28 gg)	EN 12190
Resistenza a trazione per flessione	> 5 MPa (28 gg)	EN 196/1
Legame di aderenza	> 0,8 MPa (28 gg)	EN 1542
Adesione su laterizio	> 1 MPa (28 gg)	EN 1015-12
Modulo elastico a compressione	9 GPa (28 gg)	EN 13412
Compatibilità termica ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti	ispezione visiva superata	EN 13687-1
Contenuto ioni cloruro (determinato sul prodotto in polvere)	< 0,05%	EN 1015-17
Reazione al fuoco	Euroclasse A1	EN 13501-1

## Capitolo 2: Deformazione e spostamenti

Studiare la deformazione di un corpo significa confrontare, sia a livello globale che a livello locale, la configurazione geometrica attuale con una configurazione geometrica di riferimento, in cui si assume che sul corpo non agisca alcuna forza (configurazione iniziale).

[2] Il punto di partenza della cinematica dei corpi deformabili è la cinematica dei corpi rigidi. Dal punto di vista matematico, l'estensione alle strutture deformabili consiste nel vedere come si modifica l'espressione:

$$s(P) = s(O) + W(P-O), \quad W = \begin{bmatrix} 0 & -\vartheta_z & \vartheta_y \\ \vartheta_z & 0 & \vartheta_x \\ \vartheta_y & \vartheta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

L'estensione dalla cinematica dei corpi rigidi alla cinematica dei corpi deformabili avviene mantenendo l'ipotesi di piccoli spostamenti e piccole deformazioni, per la quale si richiede che anche le derivate degli spostamenti siano piccole. L'ipotesi di piccoli spostamenti suggerisce di studiare in dettaglio ciò che avviene nell'intorno del generico punto  $P_0$  della configurazione iniziale che per semplicità è il punto dove si posiziona il sistema di riferimento  $O(x,y,z)$ .

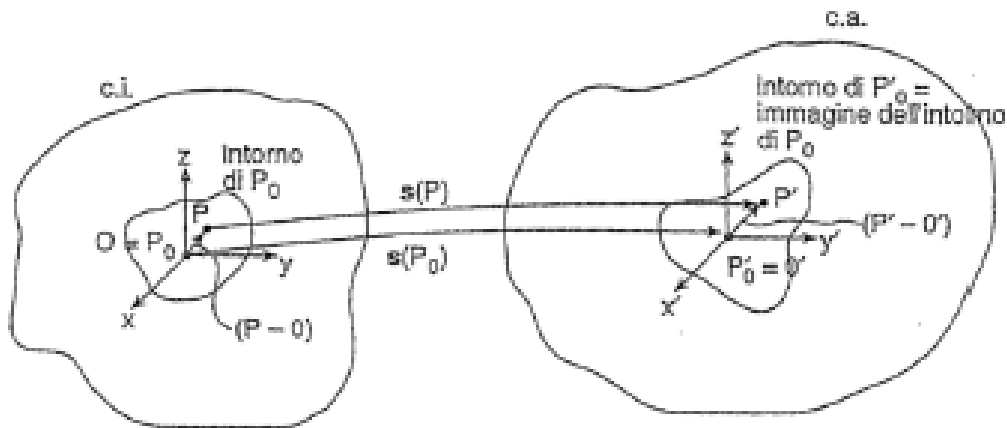


Figura 1: configurazione iniziale e finale del corpo deformabile

Le coordinate del generico punto  $P$  sono:

$$u(P) = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$$

Da un punto di vista fisico, la configurazione deformata di un corpo può essere più o meno diversa dalla configurazione iniziale, a seconda dell'entità dei carichi applicati e delle caratteristiche proprie del materiale.

Considerata l'ipotesi di piccoli spostamenti, è conveniente studiare ciò che avviene nell'intorno del generico punto  $P_0$  della configurazione iniziale della figura 1.

La figura mostra che è valida la seguente relazione:

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

da cui si ricava:

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

Poiché  $P(x,y,z)$  è vicino ad  $O$ , è possibile studiare il suo spostamento a partire da quello di  $O$  tramite lo sviluppo in serie di Taylor:

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

Trascurando i termini di ordine superiore al secondo e ragionando in maniera analoga per le componenti  $v$  e  $w$  possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} u(P) &= u(0,0,0) + \frac{\partial u}{\partial x}(0,0,0)x + \frac{\partial u}{\partial y}(0,0,0)y + \frac{\partial u}{\partial z}(0,0,0)z \\ v(P) &= v(0,0,0) + \frac{\partial v}{\partial x}(0,0,0)x + \frac{\partial v}{\partial y}(0,0,0)y + \frac{\partial v}{\partial z}(0,0,0)z \\ w(P) &= w(0,0,0) + \frac{\partial w}{\partial x}(0,0,0)x + \frac{\partial w}{\partial y}(0,0,0)y + \frac{\partial w}{\partial z}(0,0,0)z \end{aligned}$$

Possiamo scrivere quanto ottenuto in una forma più compatta:

$$u(P) = u(0) + \frac{\partial u}{\partial x}x + \frac{\partial u}{\partial y}y + \frac{\partial u}{\partial z}z$$

$$v(P) = v(0) + \frac{\partial v}{\partial x}x + \frac{\partial v}{\partial y}y + \frac{\partial v}{\partial z}z$$

$$w(P) = w(0) + \frac{\partial w}{\partial x}x + \frac{\partial w}{\partial y}y + \frac{\partial w}{\partial z}z$$

e in forma matriciale:

$$\begin{pmatrix} u(P) \\ v(P) \\ w(P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u(0) \\ v(0) \\ w(0) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \dots \Rightarrow$$

$$\Leftrightarrow s(P) = s(O) + \nabla s(P - O) + \dots \quad (2.2)$$

dove la matrice 3x3 indicato con  $\nabla s$  è il gradiente di  $s(P)$  calcolato in  $O$ .

La matrice  $\nabla s$  si può scrivere come la somma delle seguenti matrici:

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

$$\mathbf{W} = \frac{1}{2}(\nabla s - \nabla s^T) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) & 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\nabla s = \mathbf{E} + \mathbf{W}.$$

Sostituendo quanto ottenuto nella (2.2) si ottiene:

$$s(P) = s(O) + \mathbf{W}(P - O) + \mathbf{E}(P - O) + \dots \quad (2.4)$$

Il termine  $s(O) + \mathbf{W}(P - O)$  descrive la traslazione e la rotazione rigida dell'intorno di  $P_0$ , mentre il termine  $\mathbf{E}(P - O)$  descrive la deformazione infinitesima del corpo.

$\mathbf{E}$  rappresenta la parte simmetrica di  $\nabla s$  e viene chiamato tensore della deformazione infinitesima. Viene utilizzato il termine tensore e non matrice per il distinguere il fenomeno fisico descritto da  $\mathbf{E}$  (la deformazione, che è indipendente dal sistema di riferimento) dalla descrizione che se ne dà in un dato sistema di riferimento (che influenza la matrice con cui si rappresenta  $\mathbf{E}$ ).

$\mathbf{W}$  invece rappresenta la parte antisimmetrica di  $\nabla s$  e prende il nome di tensore delle piccole rotazioni. Dal confronto tra la (2.1) e la (2.3) si ottiene:

$$\vartheta_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad \vartheta_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right); \quad \vartheta_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Queste componenti danno un significato fisico a  $\mathbf{W}$  e mettono in relazione le rotazioni rigide infinitesime dell'intorno di  $P_0$  con gli spostamenti.

## 2.1 Deformazioni elementari ed equazioni di congruenza

In questa parte viene preso in considerazione come variano le lunghezze e gli angoli a seguito della deformazione.

Si considera un segmento di lunghezza  $l_i$  lungo la direzione individuata dal versore  $\mathbf{n}$  nell'intorno del generico punto  $P_0$  del corpo.

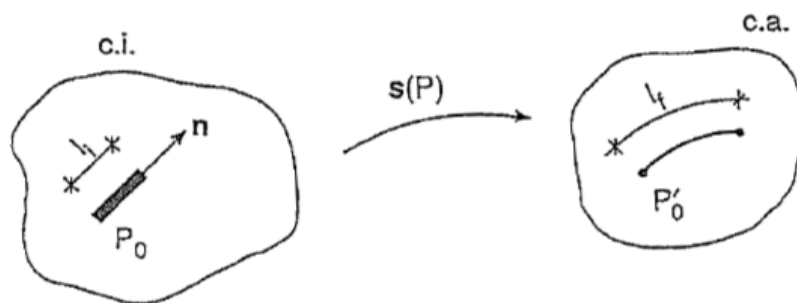


Figura 2: configurazione iniziale e attuale del corpo deformabile

Tale segmento nella configurazione attuale avrà lunghezza  $l_f$  che in generale sarà diversa da  $l_i$  perché si rimuove l'ipotesi di rigidità.

Il coefficiente di dilatazione lineare in  $P_0$  nella direzione  $\mathbf{n}$  è così definito:

$$\varepsilon_n = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (2.4) \text{ da cui si ottiene } l_f = (1 + \varepsilon_n) l_i \quad (2.5)$$

$\varepsilon_n$  misura la variazione di lunghezza relativa ed inoltre:

- È adimensionale;
- È positivo per allungamenti, negativo per accorciamenti;
- Dipende dal punto e dalla direzione di  $\mathbf{n}$ ;
- Dall'ipotesi di piccoli spostamenti, è un numero piccolo ( $\pm 0,0001$ ).

Nel valutare le equazioni di congruenza per le  $\varepsilon$  consideriamo la seguente situazione:

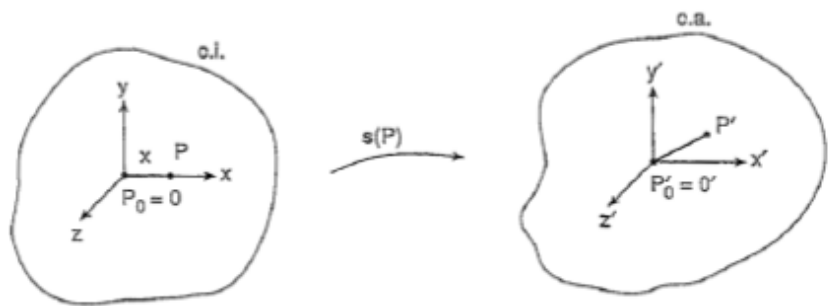


Figura 3: configurazione iniziale e attuale del corpo deformabile semplificata

Per calcolare  $\varepsilon_x$  si considera un punto  $P$  sull'asse delle ascisse in maniera tale che  $l_i = x$  e  $l_f = |P' - O'|$ .

Tenendo conto che  $|P - O| = \begin{Bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$  e  $(P' - O') = (P - O) + \nabla s(P - O)$  otteniamo:

$$(P' - O') = \begin{Bmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} x + \dots \quad (2.6)$$

le componenti lungo  $y$  e  $z$  sono trascurate sotto l'ipotesi di piccoli spostamenti.



La lunghezza finale al quadrato vale (trascurando i termini di ordine superiore al secondo):

$$l_f^2 = |P' - O'|^2 = \left[ \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right] x^2 = \left(1 + 2\frac{\partial u}{\partial x} + \dots\right) x^2 \quad (2.7)$$

Elevando al quadrato la (2.5) e sempre trascurando i termini di ordine superiore al secondo si ottiene:

$$l_f^2 = (1 + 2\varepsilon_x + \varepsilon_x^2)x^2 = (1 + 2\varepsilon_x + \dots) \quad (2.8)$$

Dal confronto tra la (2.7) e la (2.8) si ha:  $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ .

Ragionando in maniera analoga si ottengono:  $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$  e  $\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$ .

Confrontando il tensore della deformazione infinitesima con le espressioni ottenute si ricava che:  $E_{11} = \varepsilon_x$ ;  $E_{22} = \varepsilon_y$ ;  $E_{33} = \varepsilon_z$ .

Possiamo concludere dicendo che i termini sulla diagonale del tensore della deformazione misurano le variazioni di lunghezza.

Così come fatto per le lunghezze, adesso viene fatto per gli angoli e si consideri un angolo iniziale  $\alpha_i$  individuato dai versori  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{m}$  nell'intorno del generico punto  $P_0$ .



Figura 4: configurazione iniziale e deformata del corpo

Tale angolo nella configurazione deformata sarà  $\alpha_f$  che in generale è diverso da  $\alpha_i$  perché si ammette che anche gli angoli possono variare.

Il coefficiente di scorrimento angolare in  $P_0$  relativo alle direzioni  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{m}$  è definito:

$$\gamma_{nm} = \alpha_i - \alpha_f$$

:

Il coefficiente di scorrimento angolare misura la variazione di angolo ed inoltre:

- È adimensionale;
- È positivo per angoli che si chiudono, negativo per angoli che si aprono;
- Dipende dal punto e dalle direzioni di  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{m}$ ;
- Dall'ipotesi di piccoli spostamenti, è un numero piccolo ( $\pm 0,0001$ ).

Nel valutare le equazioni di congruenza per le  $\varepsilon$  consideriamo la seguente situazione:

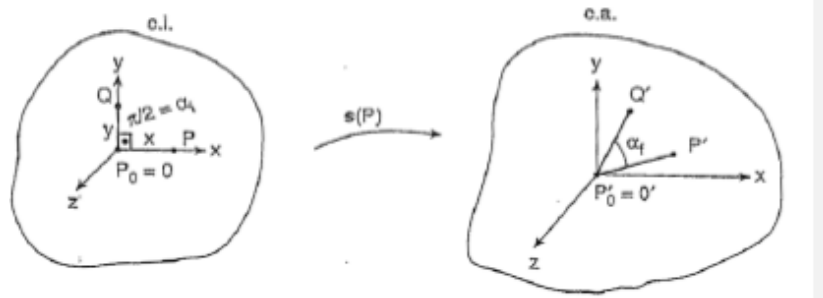


Figura 5: configurazione iniziale e finale del corpo deformabile semplificata

Per calcolare  $\gamma_{xy}$  si considerano un punto  $P$  sull'asse delle ascisse e un punto  $Q$  sull'asse delle ordinate in maniera tale che  $\alpha_i = \frac{\pi}{2}$ .

Abbiamo già valutato  $(P' - O')$  e dobbiamo valutare  $(Q' - O')$ :

$$(Q' - O') = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial y} \\ 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} y + \dots \quad (2.9)$$

Per valutare  $\alpha_f$  consideriamo:  $(P' - O') \cdot (Q' - O') = |P' - O'| |Q' - O'| \cos \alpha_f$ , (2.10)

Essendo  $|P' - O'| = l_f = (1 + \varepsilon_x)x$ ,  $|Q' - O'| = l_f = (1 + \varepsilon_y)y$ ;

$\alpha_f = \alpha_i - \gamma_{xy} \Rightarrow \cos \alpha_f = \cos \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \gamma_{xy} \right] = \sin \gamma_{xy} = \gamma_{xy}$  dato che gli spostamenti sono piccoli.

Sostituendo nella (2.10) otteniamo:

$$(P' - O') \cdot (Q' - O') = (1 + \varepsilon_x)x(1 + \varepsilon_y)y\gamma_{xy} + \dots \quad (2.11)$$

Tale prodotto scalare si può calcolare in maniera differente:

$$(P' - O')x(Q' - O') = xy \left[ \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] = xy \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \dots \quad (2.12)$$

Dal confronto tra (2.11) e (2.12) si ha:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Ragionando in maniera analoga si ottengono:  $\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$ ,  $\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$ .

Confrontando il tensore della deformazione infinitesima con le espressioni ottenute si ricava che:  $E_{12} = \frac{\gamma_{xy}}{2}$ ,  $E_{13} = \frac{\gamma_{xz}}{2}$ ,  $E_{23} = \frac{\gamma_{yz}}{2}$ .

Possiamo concludere dicendo che i termini al di fuori della diagonale del tensore della deformazione misurano le variazioni di angolo.

Una generica deformazione comporta sia una variazione di forma che una variazione di volume del corpo soggetto ad una sollecitazione.

Sia  $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3} = \frac{\theta}{3}$  la dilatazione lineare media. Si ha allora

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{bmatrix} = \mathbf{E}^{sf} + \mathbf{E}^{dev}$$

$\mathbf{E}^{sf}$  è la parte sferica o idrostatica di  $\mathbf{E}$  ed è responsabile della variazione di volume, mentre  $\mathbf{E}^{dev}$  è la parte deviatorica di  $\mathbf{E}$  ed è responsabile della variazione di forma.

## 2.2 Grandi deformazioni

Le definizioni fin ora fornite sono date tutte a partire dal vettore spostamento “ $s$ ”. 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 configurazione iniziale e della configurazione finale 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  $t$ . Si determina la posizione  $x$  occupata da un punto al tempo  $t$ . L'equazione del moto è del tipo:

$$x=x(X,t);$$

- descrizione referenziale: le variabili in gioco sono la posizione  $x$  del punto materiale  $X$  al tempo  $t$  in una assegnata configurazione di riferimento. L'equazione del moto in un riferimento cartesiano è della forma

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

$X_1, X_2, X_3$  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.
- descrizione relativa: le variabili in gioco sono l'attuale posizione  $x$  del punto materiale e la variabile tempo  $\tau$ , che costituisce il tempo che impiega un punto materiale a raggiungere una nuova posizione.

## Capitolo 3: MATLAB

MATLAB, acronimo di Matrix Laboratory, è una piattaforma per il calcolo numerico e l'analisi statistica che include il linguaggio di programmazione standard sviluppato da MathWorks. Fu commercializzato nel 1984 da MathWorks Inc. e si tratta essenzialmente di uno strumento di analisi e visualizzazione dei dati progettato con un potente supporto per le matrici e le operazioni matriciali. [3] Milioni di ingegneri e scienziati utilizzano MATLAB per analizzare dati, sviluppare algoritmi e creare sistemi che danno forma alla realtà che ci circonda. MATLAB è basato su un linguaggio di programmazione ad alto livello che consente di esprimere direttamente matrici e array matematici. Questa piattaforma di progettazione include tutti gli strumenti necessari per l'elaborazione di segnali e immagini.

Quando si avvia MATLAB, il desktop viene visualizzato nel layout predefinito:

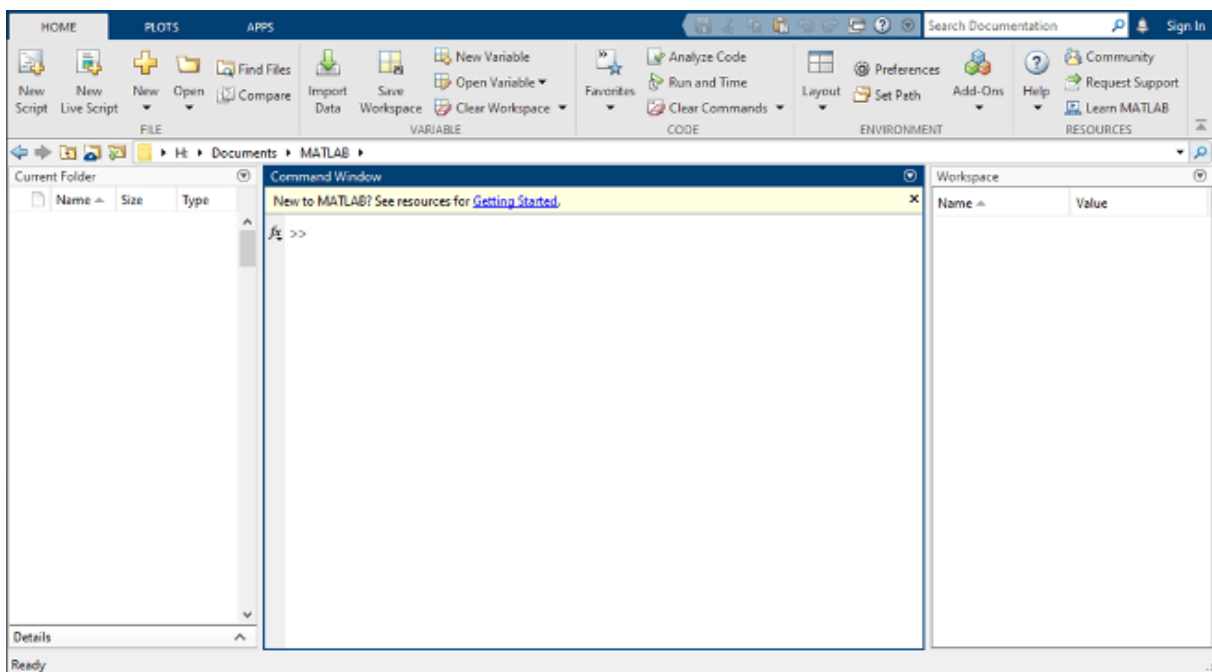


Figura 6 - Layout predefinito di MATLAB

Il desktop comprende i seguenti pannelli:

- Current Folder: consente di accedere ai file dell'utente;
- Command Window: consente di inserire i comandi dalla riga di comando;
- Workspace: consente di visualizzare i dati creati o importati dai file.

Per analizzare il danneggiamento dei materiali sono stati due in particolare gli algoritmi che ho utilizzato: Curve Fitting e Image Processing.

### 3.1 Curve Fitting

Curve Fitting [4] fornisce strumenti interattivi e funzioni che consentono la realizzazione di curve e superfici in base ai dati forniti. Il toolbox consente di esplorare in modo interattivo le relazioni tra i dati, di generare modelli predittivi e di utilizzare o condividere comodamente la curva di adattamento ai dati. Le opzioni di analisi post-elaborazione includono la previsione, il calcolo degli integrali e delle derivate e la stima degli intervalli di confidenza.

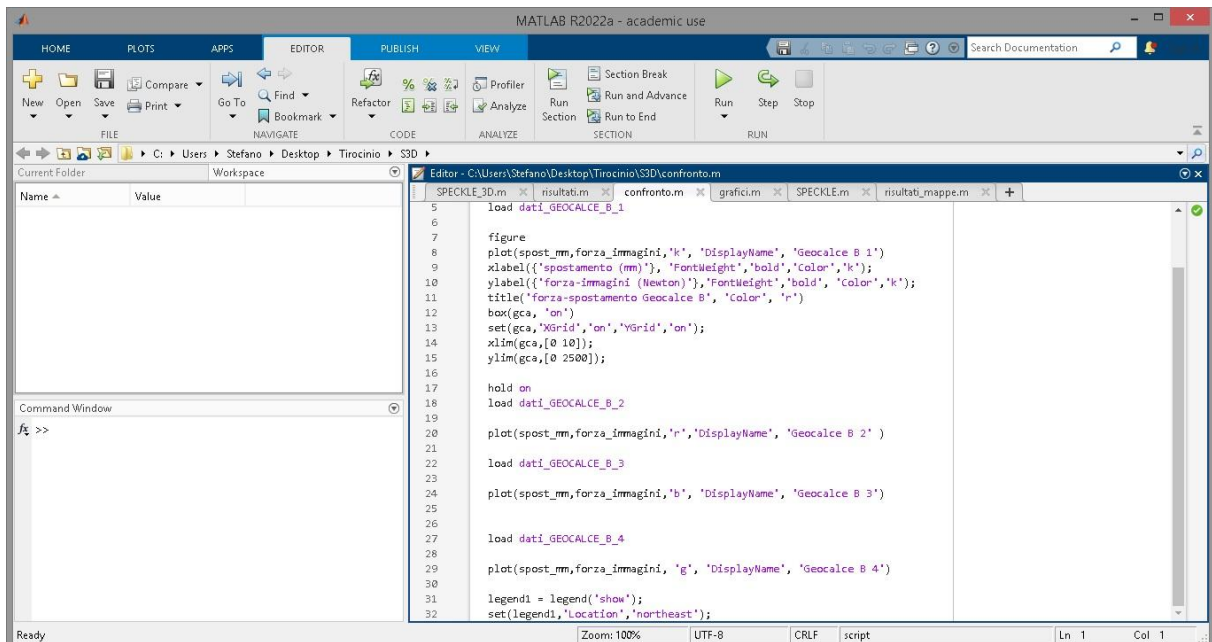


Figura 7: Layout di MATLAB per la realizzazione di curve

Nella figura 7 si vuole mettere in luce tutte le funzioni necessarie per creare un grafico bidimensionale, in particolare in questo caso il risultato è un grafico in cui nell'asse delle ascisse viene riportato lo spostamento e nell'asse delle ordinate la forza-immagini e riguarda il confronto tra i materiali Geocalce\_B\_1, Geocalce\_B\_2, Geocalce\_B\_3, Geocalce\_B\_4.

Per ottenere dei grafici bidimensionali viene utilizzata la funzione *plot*. Si possono aggiungere all'interno della stessa parentesi altre funzioni di input e notiamo che in questo caso è presente una lettera che indica il colore del grafico. Il mio obiettivo in questo caso è stato quello di un ottenere un confronto tra i quattro materiali indicati precedentemente per cui si utilizza la funzione *hold on* per fare in modo che sullo stesso grafico ci siano più curve che si sovrappongono; inoltre viene aggiunto un altro argomento di input che è *DisplayName* per indicare il nome della curva nella legenda. Attraverso le funzioni *xlabel* e *ylabel* è possibile aggiungere un nome ai due assi del grafico, e poi con la funzione *title* viene aggiunto un titolo al grafico. Nella figura troviamo altri comandi che consentono di realizzare una griglia

nel grafico e *xlim* e *ylim* definiscono le coordinate limite entro le quali devono essere rappresentate le curve.

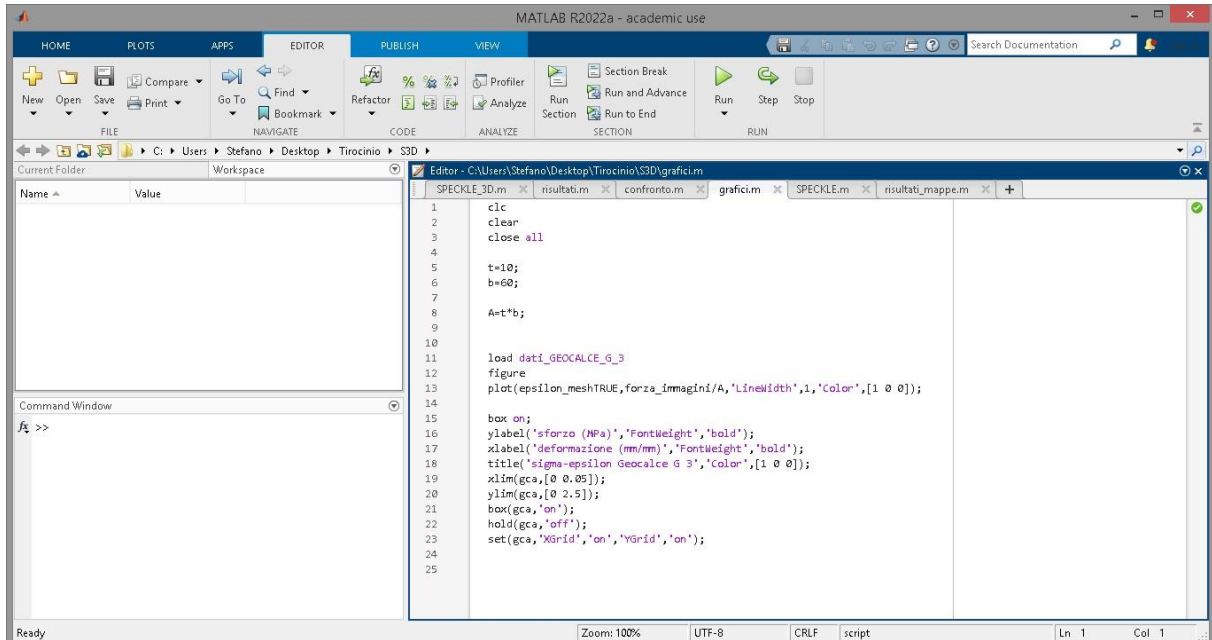


Figura 8: Esempio di layout di MATLAB

Nella figura 8 viene fatto un altro esempio di un codice per realizzare un grafico "*sigma-epsilon*". Tutte le funzioni sono analoghe alle precedenti, cambiano gli argomenti: per le funzioni *xlabel* e *ylabel*, che specificano i nomi dei due assi, viene inserito rispettivamente 'sforzo (MPa)' e 'deformazione (mm/mm)', per la funzione *plot* l'argomento è 'epsilon\_meshTRUE, forza\_immagini/A' in cui poi viene specificato il colore della curva e infine cambiano i valori delle coordinate limite definite da *xlim* e *ylim*.

### 3.2 Image Processing

Image processing [5] fornisce una serie completa di algoritmi standard e applicazioni per l'analisi, la visualizzazione e l'elaborazione di immagini e lo sviluppo di algoritmi. Con Image Processing è possibile eseguire attività di segmentazione di immagini, trasformazione geometrica e registrazione di immagini, ovvero consente di allineare le immagini per analisi quantitative o confronti utilizzando tecniche di registrazione. Il toolbox supporta l'elaborazione di immagini 2D, 3D e di dimensioni arbitrarie.

[6] Un'immagine digitale descritta in uno spazio 2D è ottenuta da un'immagine analogica in uno spazio continuo 2D attraverso un semplice processo che prende il nome di digitalizzazione. Ogni campione è chiamato *pixel*. Un'immagine 2D viene suddivisa in N righe e M colonne: l'intersezione di una riga e una colonna prende il nome di pixel. Possiamo quindi considerarla come un set organizzato di valori nella forma di una matrice. Dato che MATLAB è un ottimo software per le operazioni con matrici, ha senso utilizzarlo nelle operazioni legate alle immagini stesse. Molti ricercatori utilizzano MATLAB come loro piattaforma principale in quanto fornisce un linguaggio comune e consente una comparazione tra diversi algoritmi nell'area dell'immagine processing, dove per image processing si intende una serie di operazioni incluse le acquisizioni di immagini, il potenziamento, la rappresentazione e la classificazione delle stesse.

### 3.2.1 Step basi

Cancellare l'area di lavoro di MATLAB e chiudere le finestre di figure aperte con le funzioni: *clear all, close all*.

Sebbene non sia essenziale, è bene includere questo passaggio all'inizio di un file MATLAB che viene eseguito dall'inizio e non dipende da altri dati.

Per leggere un'immagine si usa il comando *imread*. Per esempio, da `imread('Geocalce_B_4_0_13.jpg')` si deduce che la stessa sia in formato jpg e il nome è "Geocalce\_B\_4\_0\_13".

La figura può essere visualizzata nella command window utilizzando una di queste due funzioni: *imshow, imview*. La scelta di utilizzare una delle due dipende da quello che si vuole fare: *imshow* la visualizza in una "MATLAB figure" e fornisce accesso alle annotazioni della figura, mentre la funzione *imview* la visualizza in una finestra chiamata "Image Viewer" e consente di accedere a strumenti che permettono di ispezionare i pixel, soprattutto per le immagini di grandi dimensioni.



## Capitolo 4: La prova di trazione

[7] La norma UNI EN 10002/1 afferma che la prova di trazione statica, effettuata a temperatura costante, consiste nel sottoporre un provino ad un carico di trazione applicato con una certa velocità d'incremento fino a provocare la rottura, allo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità, deformabilità. È una prova meccanica che permette di misurare le fondamentali proprietà meccaniche con le quali si classificano, si designano e si scelgono i materiali, in particolare i materiali metallici. In particolare, mediante questa prova, sono ricavati il carico unitario di snervamento, il carico unitario di rottura, l'allungamento percentuale a rottura.

Si definisce *forza di trazione* quella forza esercitata su un corpo che viene fissato ad un estremo e tirato dall'altro. La sollecitazione applicata è di tipo statico, cioè gradualmente crescente.

Si prende un provino di un dato materiale, avente inizialmente una sezione iniziale  $A_0$  e lunghezza iniziale  $L_0$ , e lo si sottopone ad una trazione come illustrato nella figura 9.

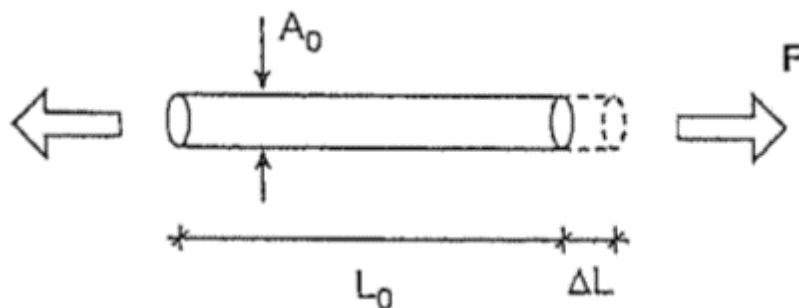


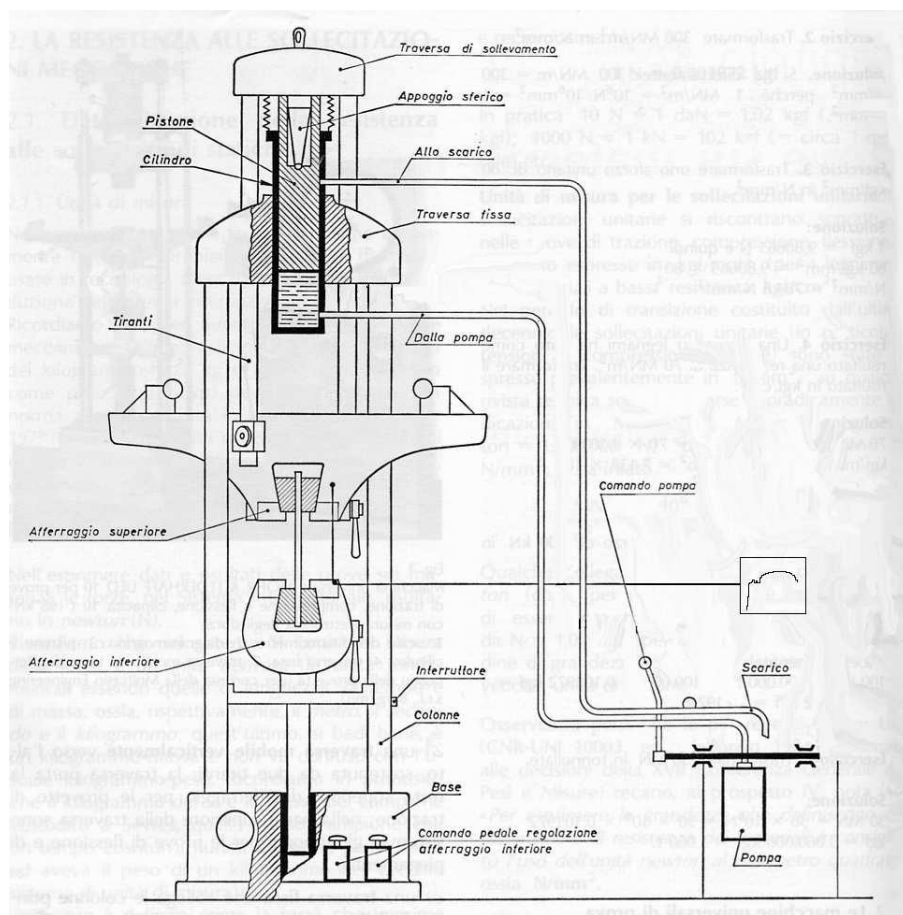
Figura 9: provino sottoposto a trazione [8]

Ad un dato allungamento (cioè ad una deformazione) corrisponde una data forza (ovvero una tensione) e che tale forza sarà differente da materiale a materiale.

I macchinari per la prova di trazione servono per determinare la resistenza a sollecitazioni statiche dei vari materiali. Queste macchine si possono classificare in base alla sollecitazione che riescono ad impartire sul materiale.

La macchina di trazione comprende i seguenti componenti:

- 1) un basamento;
- 2) colonne di sostegno;
- 3) una traversa fissa;
- 4) un cilindro ricavato sopra la traversa fissa;
- 5) uno pistone dentro il cilindro;
- 6) una traversa solidale al pistone;
- 7) due aste montanti;
- 8) una traversa di lavoro.



*Figura 10: Componenti macchina per prova di trazione*

La macchina di prova può essere a comando meccanico o a comando idraulico. Quest'ultimo è quello più potente e diffuso. L'energia per produrre lo sforzo nella macchina viene fornita da una pompa ad alta pressione accoppiata ad un motore elettrico; variando la corsa della pompa oppure il numero di corse al minuto è possibile una regolazione pressoché continua della portata dell'olio e quindi di velocità di applicazione del carico.

Il funzionamento, utilizzando una macchina a comando idraulico, avviene fissando il provino alla ganascia collegata al basamento e alla ganascia collegata alla traversa di lavoro (che corrisponde alla traversa mobile). La pompa invia l'olio dal serbatoio al cilindro, obbligando il pistone a salire. Il pistone trascina la traversa di sollevamento che, tramite i tiranti, solleva l'afferraggio superiore e di conseguenza il provino. Per poter far abbassare il pistone, si apre un rubinetto e l'olio entra in un altro serbatoio. Viene collegato alla macchina un dispositivo per la registrazione delle deformazioni del provino, che fornisce direttamente il grafico della prova.

Nel nostro caso la prova di trazione è stata realizzata con una macchina Zwick-Roell Z050.



[9] Figura 11: Zwick-Roell Z050

Questa particolare macchina presenta le seguenti caratteristiche: telaio con portata massima di 50 kN, velocità della traversa variabile fra 0.0005 e 400 mm/min, flessibilità nella programmazione dei test ed è completamente digitale.

## Capitolo 5: Correlazione digitale di immagini

La Digital Image Correlation (DIC) è un metodo di misura delle deformazioni di una superficie o in generale di un oggetto basato sull'analisi e sul confronto di immagini del provino sottoposto a sollecitazione che vengono realizzate da una o più telecamere. Si tratta di una tecnica di natura ottica che, a differenza di altre, non prevede il contatto tra la superficie oggetto di misurazione e lo strumento utilizzato. Il metodo può essere applicato a qualsiasi materiale sottoposto a distorsione. Attraverso un determinato software, tra i quali MATLAB, viene effettuato un confronto tra un'immagine che rappresenta il provino indeformato e che quindi non è soggetto a sollecitazione e molte altre immagini che invece evidenziano la deformazione del provino stesso. Si può fare una distinzione tra DIC-2D e DIC-3D: nel primo caso durante la prova viene utilizzata una sola fotocamera per l'acquisizione e questa tecnica consente di valutare la deformazione nel piano dell'oggetto, invece nella seconda situazione vengono utilizzate due fotocamere ed è possibile valutare la deformazione anche al di fuori del piano dell'oggetto.

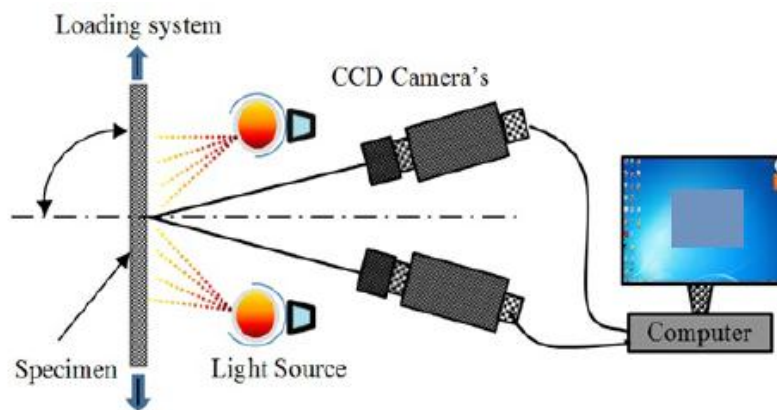


Figura 12a: Sistema di acquisizione DIC-3D [7]

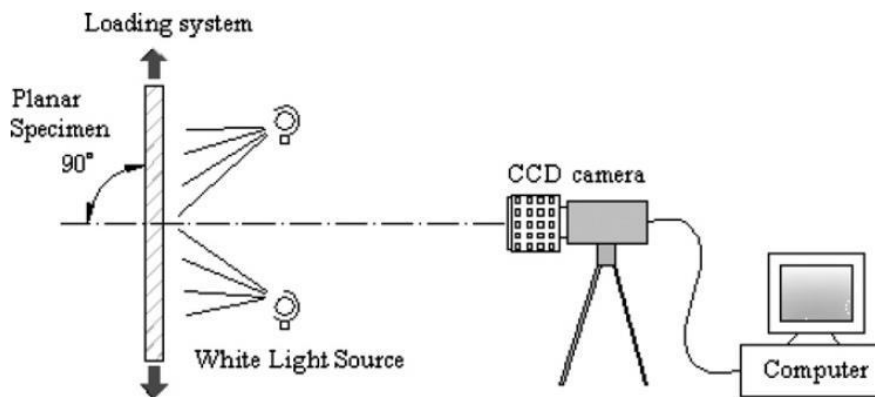


Figura 12b: Sistema di acquisizione DIC-2D è [6]

La tecnica DIC tridimensionale utilizza immagini acquisite contemporaneamente mediante due fotocamere poste di fronte all'oggetto con una diversa angolazione. Conoscendo la distanza relativa delle fotocamere e il loro orientamento rispetto alla superficie inquadrata si possono calcolare le coordinate di un qualsiasi punto della superficie stessa. Le coppie di immagini digitali registrate da ciascuna fotocamera, prima e durante la deformazione dell'elemento considerato, sono poi confrontate pixel a pixel, mediante un algoritmo di correlazione. La corrispondenza di punti delle figure ci consente di determinare il campo di spostamento e mediante un altro algoritmo si può risalire al campo di deformazione. L'accuratezza della tecnica dipende da diversi fattori tra cui la distorsione delle lenti, l'uniformità della distribuzione della luce e la qualità dello speckle pattern. Il primo parametro è caratteristico della strumentazione impiegata mentre la luminosità e il pattern di punti sono invece controllati e definiti dall'operatore. In particolare, la luminosità dovrebbe essere costante e omogenea durante l'intera prova e la superficie da testare preparata in modo da avere un pattern di punti casuale il più possibile non ripetitivo e con zone a elevato contrasto cromatico.

La strumentazione, utilizzata nella Digital Image Correlation (DIC), è costituita da:

- 1 o 2 telecamere in bianco e nero;
- Scheda di acquisizione dati: permette di importare le immagini registrate dalle telecamere;
- Sorgente luminosa per facilitare alle telecamere il riconoscimento del pattern realizzato;
- Computer per la correlazione ed elaborazione delle immagini.

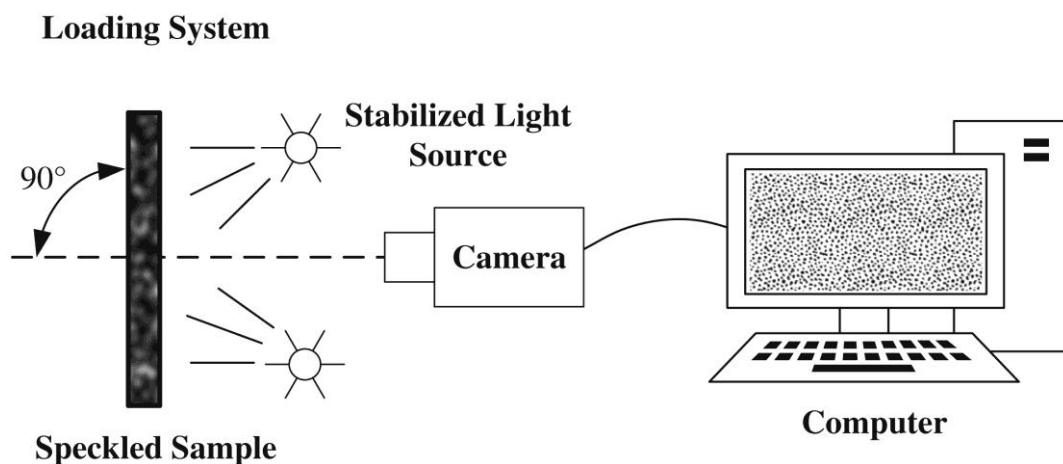
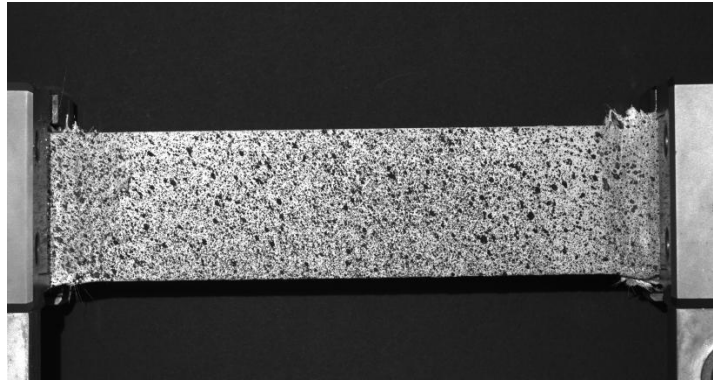


Figura 13: Strumentazione del sistema DIC [12]

## 5.1 Il pattern

Per fare in modo che il sistema funzioni correttamente si applica una passata di vernice bianca uniforme sulla superficie del provino soggetta a deformazione e successivamente un pattern di colore nero in modo tale da accentuare il contrasto. Si può in altri casi invertire tale scelta, ovvero stendere sulla superficie analizzata una vernice di colore nero e realizzare un pattern di colore bianco o è anche possibile utilizzare altri colori che garantiscano un certo contrasto.



*Figura 14: Pattern per la DIC*

Con il termine "*Speckle*" viene indicato un pattern casuale di punti sulla superficie del provino. La sua dimensione deve essere scelta accuratamente perché uno speckle troppo piccolo porta alla perdita di micro spostamenti mentre uno speckle troppo grande causa correlazioni errate.

L'applicazione dello speckle risulta importante soprattutto in oggetti che non presentano una superficie adatta alla correlazione: infatti risulta l'analisi di immagini senza contrasto come ad esempio quelle del calcestruzzo non consente di definire il movimento e la deformazione in quanto non ci sono punti di riferimento.

Lo speckle può essere applicato in diversi modi in base alle esigenze. Si può utilizzare uno spray di vernice o un aerografo, uno strumento in grado spruzzare vernice nebulizzata oppure attraverso l'impiego di uno stencil ovvero una maschera che rappresenta la geometria desiderata dello speckle.

Un'alternativa consiste nell'utilizzare una luce bianca da laboratorio, orientata parallelamente alla superficie, in modo da sfruttare la rugosità del supporto e si venga a creare una superficie speckle tramite l'alternanza casuale di zone di luce ed ombra.

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 15.

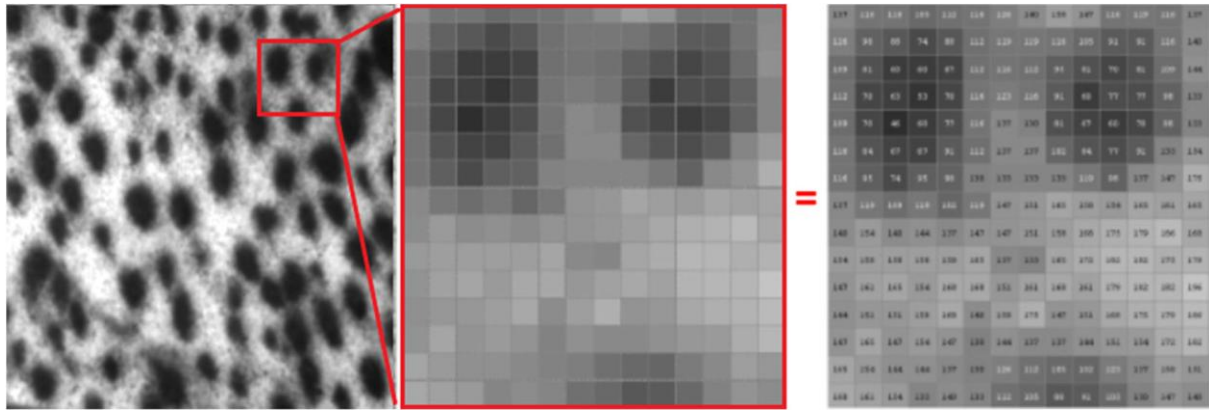


Figura 15: la rappresentazione digitale delle immagini

L’obiettivo è quello di rappresentare ciascun punto della superficie inquadrata con un valore corrispondente all’intensità luminosa percepita dal sensore ottico. Si cerca ovvero di rappresentare un intorno di un punto materiale 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 assumere un valore compreso tra 0 e 255, corrispondenti rispettivamente al nero e al bianco. I valori intermedi invece rappresentano le diverse tonalità di grigio. È 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 passo 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.

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

## 5.2 La correlazione delle immagini

La correlazione delle immagini si compone di due passaggi:

1) Creazione della griglia nell'immagine iniziale nella quale il provino non è sottoposto a sollecitazione. La griglia viene creata con un determinato programma, tra cui MATLAB, e la sua realizzazione avviene definendo determinati parametri che sono:

- Coordinata x primo nodo in alto a sinistra;
- Coordinata y primo nodo in alto a sinistra;
- Lunghezza iniziale elementi;
- Altezza iniziale elementi;
- Nodi orizzontali;
- Nodi Verticali.

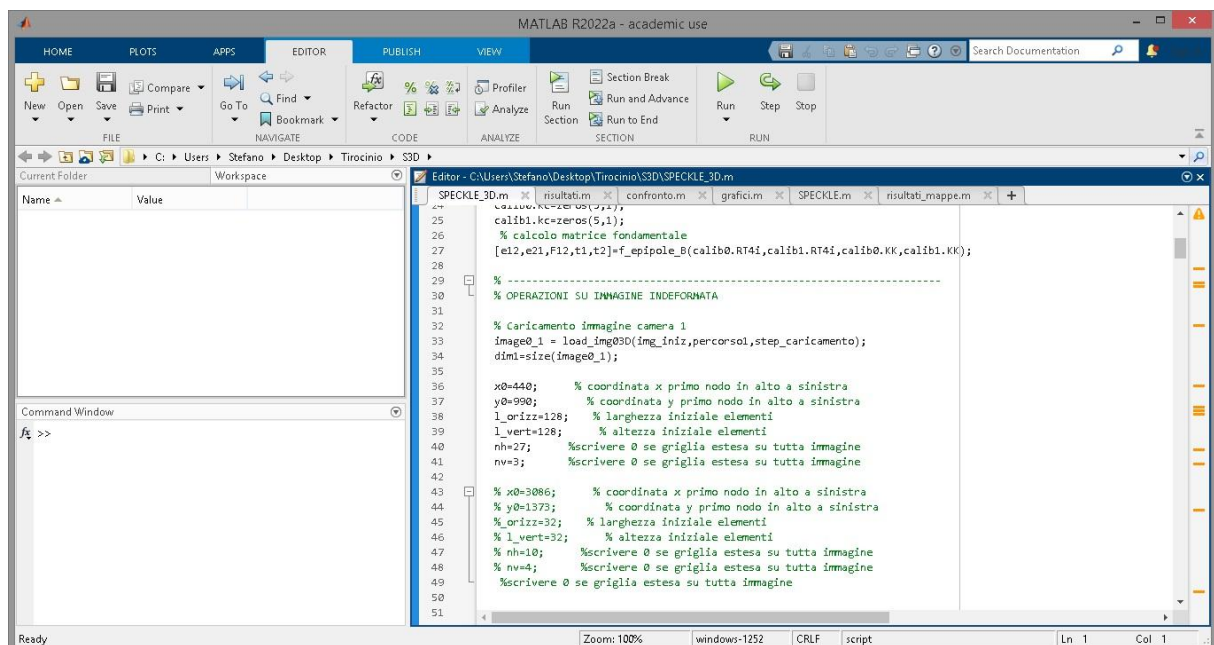
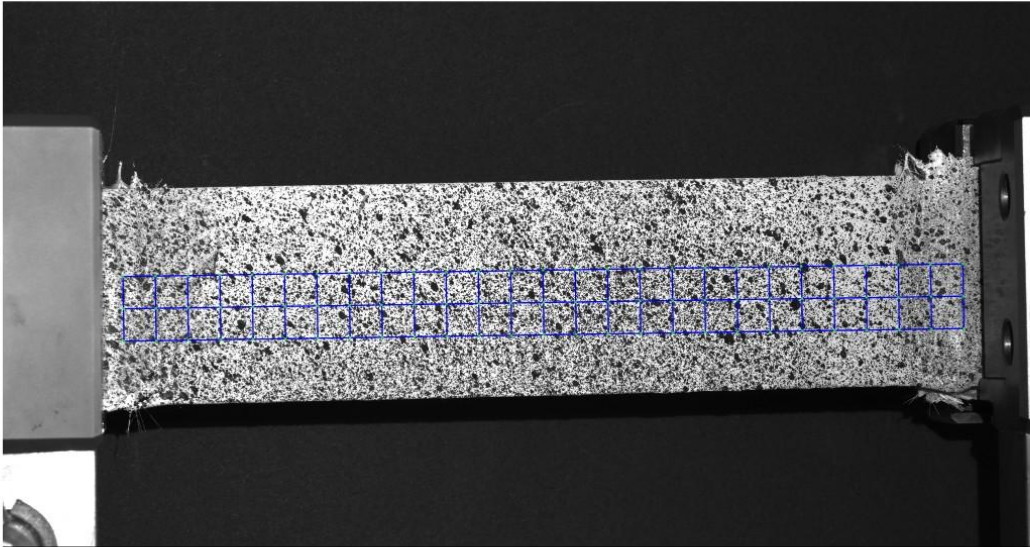


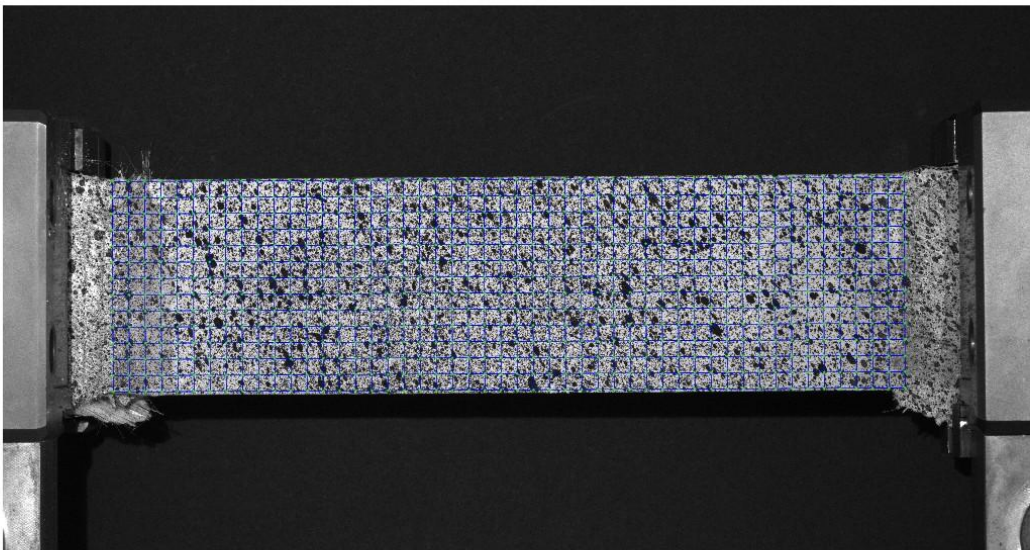
Figura 16: Esempio di creazione griglia eseguito con MATLAB

Una volta impostati questi parametri si procede con la creazione della griglia inserendo nel programma un break point ad una determinata riga per arrestare temporaneamente il calcolo e controllare se la griglia realizzata è posizionata correttamente. In caso contrario ci sono altri fattori utili che ci consentono di modificare la forma e la posizione della griglia tra cui  $\alpha = \text{atan}(0.006)$  che modifica l'angolo della griglia rispetto ad un asse orizzontale parallelo all'asse delle ascisse. A questo punto viene tolto il break point e si procede fino al termine del calcolo per ottenere la griglia sul provino deformato e quindi la sua deformazione.





*Figura 17: Esempio di griglia realizzata su provino non deformato*



*Figura 18: Esempio di griglia estesa su tutto il provino non deformato*

b) Correlazione delle immagini. In questa seconda fase la griglia è già stata creata ed è stato avviato il calcolo su MATLAB. Il programma individua la posizione dei punti di intersezione della griglia, la confronta con quella dell'immagine successiva e calcola il loro spostamento.

### 5.3 Tecniche di cross-relation

Le tecniche di cross-relation sono basate sulla 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 e solitamente viene considerato lo stato superficiale non deformato come frame di riferimento; per tale scopo, si utilizzano delle funzioni di cross-correlazione  $C$ . 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 alla figura 19: nell'intorno  $S_0$  dell'immagine di riferimento è collocato un punto  $p$  a cui l'operatore corrispondenza associa un pixel  $P$ . Si consideri inoltre un punto  $q$  appartenente all'intorno  $S_0$  a cui è associato un pixel  $Q$  di coordinate  $(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0)$ .

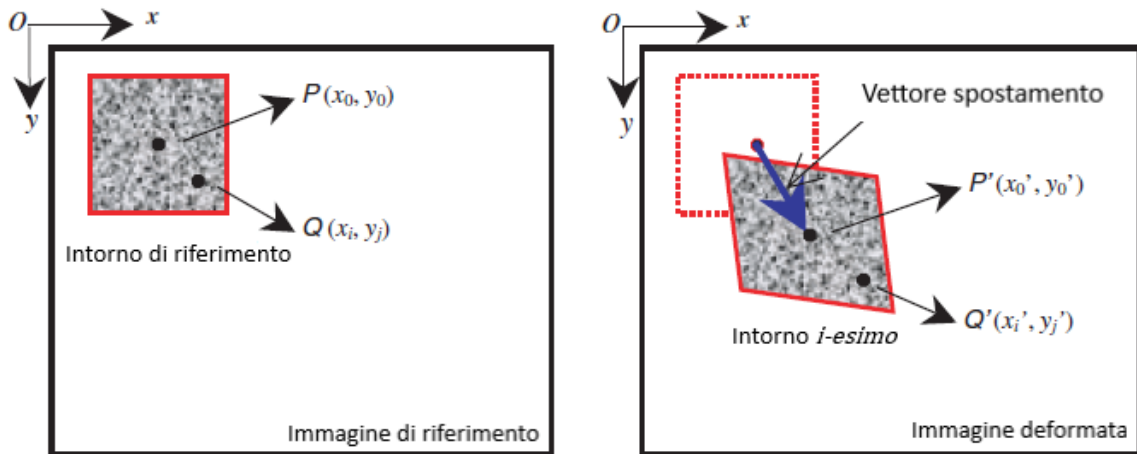


Figura 19: immagine di riferimento e immagine deformata

Detti  $u$  gli spostamenti lungo  $x$  e  $v$  gli spostamenti lungo  $y$ , i pixel  $P$  e  $Q$  si troveranno in una posizione  $P'$  e  $Q'$  nell'intorno  $S'$  come si può notare nell'immagine deformata. Le intensità relative a  $P-P'$  e  $Q-Q'$  sono definite:

$$f(P) = f(X_0; Y_0) \text{ e } f'(P) = f(X_0 + u(P); Y_0 + v(P)) = f(X'_0; Y'_0)$$

$$\text{con } \begin{cases} X'_0 = X_0 + u(P) \\ Y'_0 = Y_0 + v(P) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$f(Q) = f(X_0 + dX_0; Y_0 + dY_0) \text{ e } f'(Q) = f(X_0 + u(Q) + dX_0; Y_0 + v(Q) + dY_0) \quad (5.2)$$

La deformazione subita determina delle differenze a livello globale nell' intorno considerato ma le due matrici  $M$  e  $M'$  conservano i valori di intensità locale e quindi possiamo scrivere:

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

Il tensore delle piccole deformazioni, come descritto nel capitolo 2, può essere approssimato con uno sviluppo in serie di Taylor al primo grado:

$$u(P) - u(Q) \cong \frac{\partial u(P)}{\partial x} x + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y$$

$$v(P) - v(Q) \cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x + \frac{\partial v(P)}{\partial y} y$$

Supponendo di aver scelto un intorno sufficientemente piccolo, le coordinate di  $Q$  nella configurazione attuale sono  $(X'_0 + dX'_0; Y'_0 + dY'_0)$  e possiamo notare dalla figura 20 che:

$$dX'_0 = dX_0 + u(Q) - u(P) \cong \left(1 + \frac{\partial u(P)}{\partial x}\right) x_0 + \frac{\partial u(P)}{\partial y} y_0$$

$$dY'_0 = dY_0 + v(Q) - v(P) \cong \frac{\partial v(P)}{\partial x} x_0 + \left(1 + \frac{\partial v(P)}{\partial y}\right) y_0$$

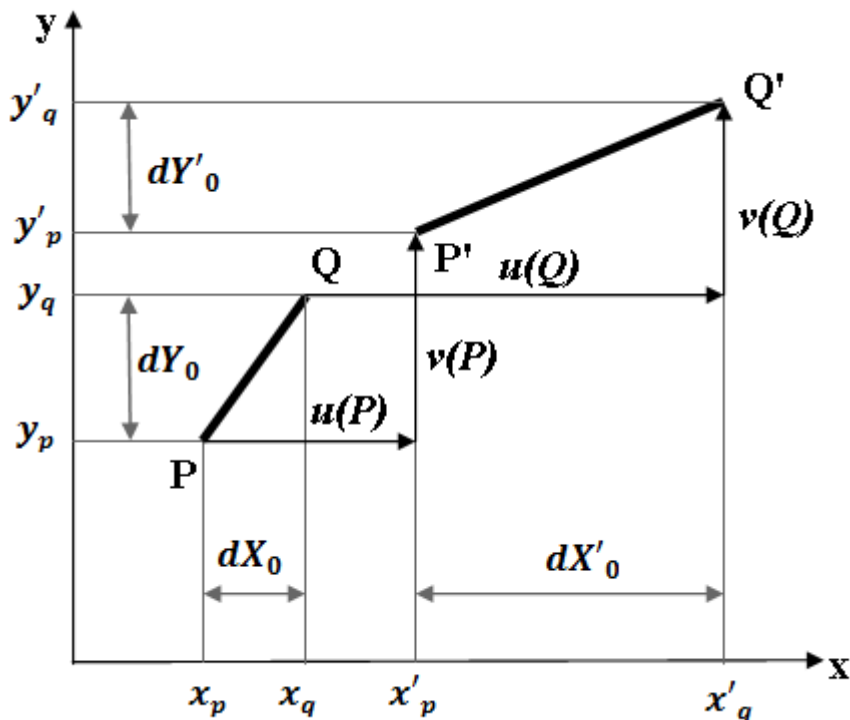


Figura 20: spostamento del segmento  $PQ$

Facendo riferimento alle (5.1), possiamo scrivere:

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

che consente di riscrivere la (5.2) nel seguente modo:

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

Le variabili

$$u(P), v(P), \frac{\partial u(P)}{\partial x}, \frac{\partial u(P)}{\partial y}, \frac{\partial v(P)}{\partial x}, \frac{\partial v(P)}{\partial y}$$

delle *variabili di correlazione*  $V_c$  per un determinato punto  $P$  centrato nell'intorno oggetto di valutazione e consentono il calcolo degli spostamenti e quindi delle deformazioni di tutti i punti apparenti ad  $S_0$ . Per determinare le  $V_c$  si parte dal rintracciare due intorni che siano in 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 sfruttando una funzione di cross-correlazione  $C$  esprimibile come segue:

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

con

$$\xi = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$\mu = u + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

Inizialmente si assumono come variabili le componenti  $u$  e  $v$  dello spostamento, poi si procede alla determinazione delle  $\frac{\partial u}{\partial x}$  e  $\frac{\partial v}{\partial y}$  mantenendo  $u$  e  $v$  pari a  $[u(P); v(P)]$ , e nulli gli scorrimenti angolari  $\frac{\partial v}{\partial x}$  e  $\frac{\partial u}{\partial y}$ ; si procede in maniera analoga per la determinazione delle dilatazioni lineari in direzione degli assi  $X$  e  $Y$ , ed infine si passa alla determinazione degli scorrimenti angolari mantenendo costanti  $[u(P); v(P)]$ ,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ . La procedura viene poi ripetuta

per un certo numero di valori  $(u,v)$  scelti intorno a  $S(P)$  per valori fissati delle altre variabili. Per la trattazione, l'interpretazione discreta non è perfettamente adatta visto che lo spostamento può assumere valori pari anche a frazioni di pixel. Dunque si considera 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  $(X;Y)$ .

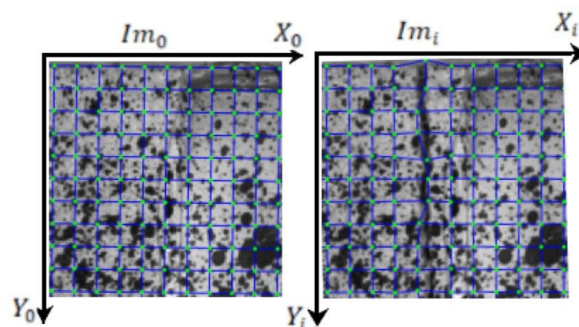
Un'espressione polinomiale per  $I$  è  $I(I_{px}; I_{py})$ :

$$\begin{cases} I_{px} = a_{x00} + a_{x10}F_x + a_{x01}F_y + a_{x11}F_xF_y + \dots + a_{xmn}F_x^nF_y^n \\ I_{py} = a_{y00} + a_{y10}F_x + a_{y01}F_y + a_{y11}F_xF_y + \dots + a_{ymn}F_x^nF_y^n \end{cases}$$

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

## 5.4 Correlazione a campo intero

Quello che è stato introdotto fino ad ora consente l'analisi di intorni isolati all'interno della regione di interesse. Una tecnica, che poi è anche quella utilizzata nella nostra situazione, è la tecnica di griglia. Come anche descritto precedentemente, si realizza una griglia sulle immagini costituita da un certo numero di nodi.



*Figura 21: griglia su immagini*

La correlazione è basata sulla definizione di funzioni che permettono la trasposizione dei nodi dall'immagine di riferimento  $Im_0$  all'immagine corrispondente ad una situazione deformata  $i$ -esima  $Im_i$ .

Dal punto di vista matematico, l'errore da minimizzare in termini di operazioni sulle immagini può essere scritto:

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

dove  $(x_i; y_i)$  sono le coordinate di un generico pixel in un'immagine deformata e  $(x_0; y_0)$  sono le coordinate di un generico pixel nell'immagine di riferimento. L'operazione viene estesa a tutti i pixel e si procede con l'associare ad ogni elemento della griglia una sotto-immagine di forma quadrata e tramite delle funzioni si opera una trasformazione geometrica che consente di creare una corrispondenza tra un punto  $p(x,y)$  e quelle di un punto  $p'$  secondo la relazione:

$$\begin{cases} x' = \frac{a_0 + a_1x + a_2y}{c_0x + c_1y + c_2} \\ y' = \frac{b_0 + b_1x + b_2y}{c_0x + c_1y + c_2} \end{cases}$$

con coefficienti reali.

A questo punto l'espressione precedente che descrive l'errore di un'intera immagine si può semplificare al campo delle sotto-immagini:

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

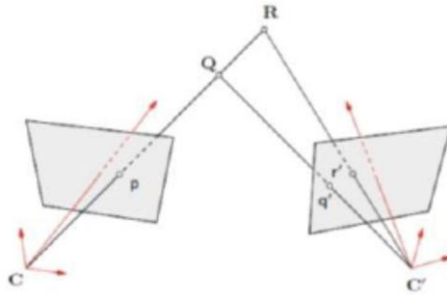
La sommatoria è estesa ad un particolare elemento del reticolo a cui viene associata un'immagine  $s_i$ . Tutte le sotto-immagini sono funzione delle coordinate dei nodi  $(X_i; Y_i)$  e  $(X_0; Y_0)$ .

Una volta raggiunta la convergenza la soluzione è un vettore che definisce la nuova posizione dei nodi nella griglia e viene determinato per ogni elemento della griglia. In questo modo si calcolano in maniera continua gli spostamenti e quindi le deformazioni della regione d'interesse.

## 5.5 Stereovisione e 3D DIC

I concetti alla base della tecnica D.I.C. tridimensionale non si discostano molto da quella bidimensionale. Infatti viene sempre realizzato un pattern, la superficie di interesse viene ripresa durante situazioni differenti e le immagini vengono poi comparate utilizzando determinati criteri di correlazione. La sostanziale differenza risiede nel fatto che la tecnica

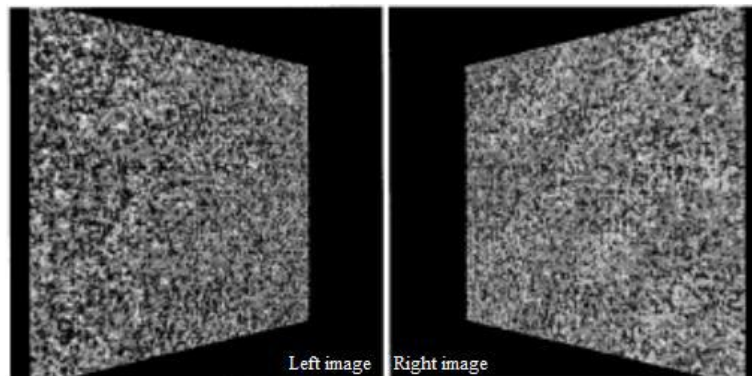
DIC tridimensionale necessita di due fotocamere. La necessità della seconda fotocamera viene illustrata nella figura 22:



*Figura 22: rilevazione delle fotocamere*

Una singola fotocamera posizionata nel punto  $C$  della figura non sarebbe in grado di distinguere le differenze tra i punti  $R$  e  $Q$  o qualsiasi altro punto che giace nello stesso raggio di proiezione. Una seconda fotocamera posizionata in  $C'$  fornirebbe informazioni aggiuntive e consentirebbe univocamente la distinzione della posizione reale dei punti nello spazio.

Nella stereovisione la deformazione di un subset, ovvero quadrati della griglia costruita sulle immagini, da un'immagine di riferimento a un'immagine deformata deve essere trovata da entrambe le telecamere e poi confrontata. La figura 23 per esempio evidenzia la differenza di prospettiva delle due fotocamere.



*Figura 23: esempio di prospettive viste da due diverse posizioni della telecamera*

La tecnica DIC tridimensionale risulta più complicata rispetto a quella 2D anche perché una volta che è stata individuata la posizione di un subset nell'immagine deformata di una telecamera, questa la si deve abbinare alla posizione corrispondente nell'immagine dell'altra telecamera per poter triangolare una posizione tridimensionale unica. Tuttavia, per poter ottenere una corrispondenza tra i due sensori è necessario conoscere le posizioni e i parametri di visualizzazione delle due telecamere e questo richiede una procedura di calibrazione.

La calibrazione è realizzata andando a catturare delle immagini di un bersaglio posizionato secondo diversi orientamenti. Solitamente il bersaglio presenta punti o linee ben distinti che vengono visualizzati da entrambe le fotocamere e utilizzati per determinare matematicamente i parametri di visualizzazione. L'accuratezza della calibrazione influisce sui risultati di misura e anche durante l'acquisizione delle immagini la posizione delle fotocamere non deve cambiare per non andare incontro a errori di misura.



## Capitolo 6: Risultati

In questo capitolo si espongono i risultati ottenuti nel sottoporre i provini in GeoLite 40 e in GeoCalce F Antisismico ad una prova di trazione. I grafici che verranno riportati e che descrivono il comportamento di questi materiali sono stati costruiti con MATLAB. I provini analizzati sono sedici, otto realizzati in Geolite 40 e gli altri otto realizzati in GeoCalce F Antisismico. In ciascuno di questi provini è stata inserita una rete di vetro o una rete di boro. I primi risultati ottenuti sono grafici "forza-spostamento", in cui si vuole evidenziare lo spostamento del provino con il variare della forza applicata, e grafici "sigma-epsilon" che mostrano l'andamento della deformazione  $\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\Delta L}{L}$  al variare della tensione  $\sigma = \frac{F}{A}$  [MPa] in cui F è la forza applicata sul provino mentre A corrisponde all'area del provino. Per ottenere questi grafici abbiamo sfruttato le immagini catturate da due fotocamere che rivelano i cambiamenti dei provini durante la prova. Come descritto nel capitolo precedente, in particolare nella correlazione delle immagini, attraverso MATLAB è stata creata una griglia sull'immagine del provino quando questo non è sollecitato e successivamente si è proceduto con il calcolo della deformazione.

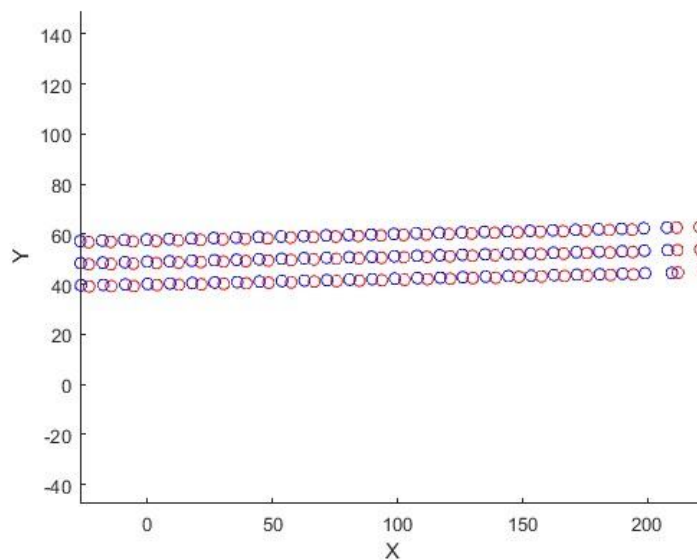


Figura 24: griglia bidimensionale realizzata con MATLAB

La figura 24 mostra la griglia costruita con MATLAB: i pallini blu rappresentano i nodi della griglia costruita sull'immagine del provino non deformato, i pallini rossi sono invece i nodi della griglia ottenuta nell'immagine che rappresenta la fine della prova di trazione.

Oltre a quelli citati precedentemente, è stato possibile ottenere altri grafici:

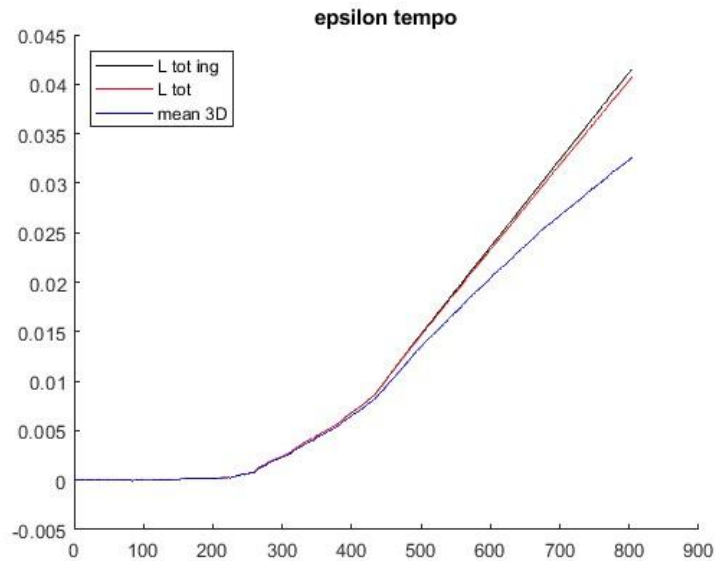


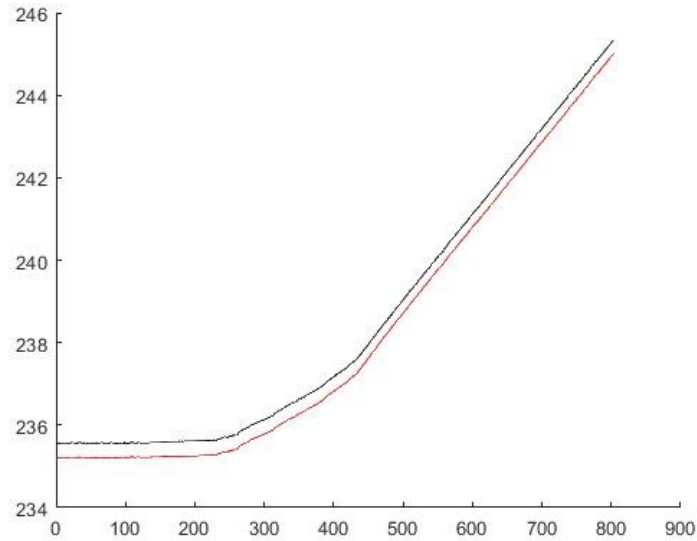
Figura 25: epsilon-tempo

La figura 25 descrive l'andamento della deformazione nel tempo. La curva denominata 'mean 3D' rappresenta la deformazione nel tempo valutata con la tecnica DIC che misura la deformazione media su tutto il provino prendendo in considerazione l'analisi di molti punti sparsi su tutto il provino. Invece le altre due curve rappresentano l'andamento della deformazione nel tempo valutata considerando solamente i punti di estremo del provino. La curva nera denominata 'L tot ing' rappresenta la deformazione ingegneristica quindi valutata con  $e = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta L}{L}$ , mentre la curva rossa denominata con 'L tot' è la deformazione reale valutata con  $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$ .

Esiste una relazione tra la deformazione ingegneristica e quella reale. Indichiamo con  $l_0$  la lunghezza iniziale del provino

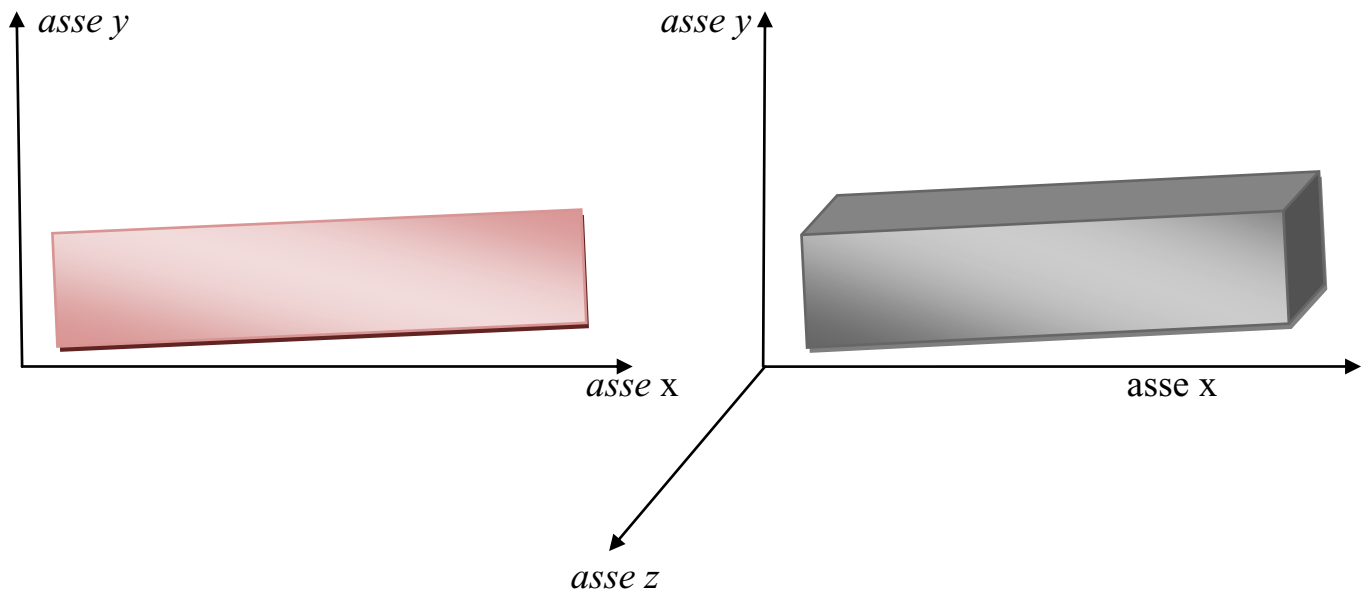
$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \Leftrightarrow \frac{l}{l_0} = e + 1$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln (e + 1)$$



*Figura 26: lunghezze-tempo\_immagini*

La figura 26 mostra l'andamento nel tempo della lunghezza del provino. In particolare la curva rossa tiene conto solamente dello spostamento lungo l'asse delle ascisse, mentre la curva nera tiene conto non solo dello spostamento nel piano  $xy$  ma anche la deformazione al di fuori del piano (lungo  $z$ ). Le due curve non partono dallo stesso punto perché con il sistema di riferimento scelto il provino non è perfettamente allineato e parallelo all'asse delle  $x$ .



*Figura 27: provino in un si sistema bidimensionale e in un sistema tridimensionale*

Con questa rappresentazione si vuole marcare che la curva nera tiene conto anche dello spostamento nel piano  $xz$ , dunque la lunghezza del provino sarà leggermente maggiore.

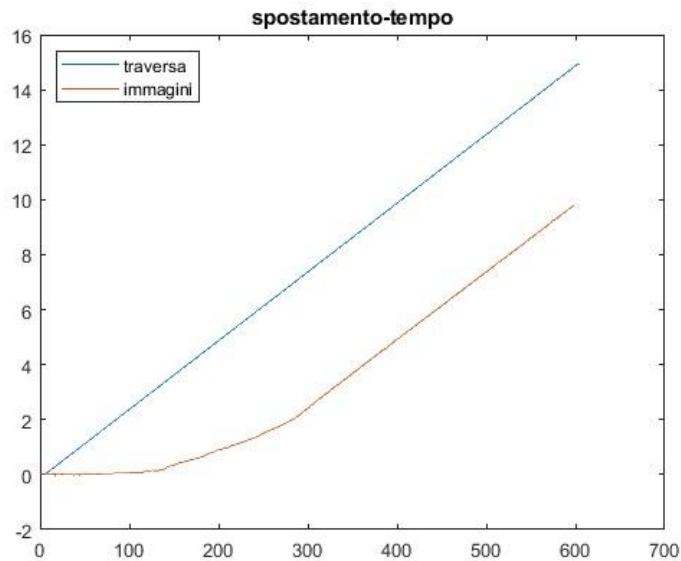


Figura 28: spostamento-tempo

La figura 28 mostra l'andamento dello spostamento della traversa mobile della macchina di trazione e l'andamento dello spostamento valutato attraverso le immagini. In entrambi i casi lo spostamento è valutato in mm. Lo spostamento della traversa mobile è costante nel tempo, ma non lo è quello valutato con le immagini perché quando la macchina di trazione inizia a muoversi lo spostamento comprende il movimento dei componenti e la compensazione dei vari giochi; infatti lo spostamento iniziale valutato con le immagini è quasi nullo, aumenta e poi cresce in maniera pressoché costante.

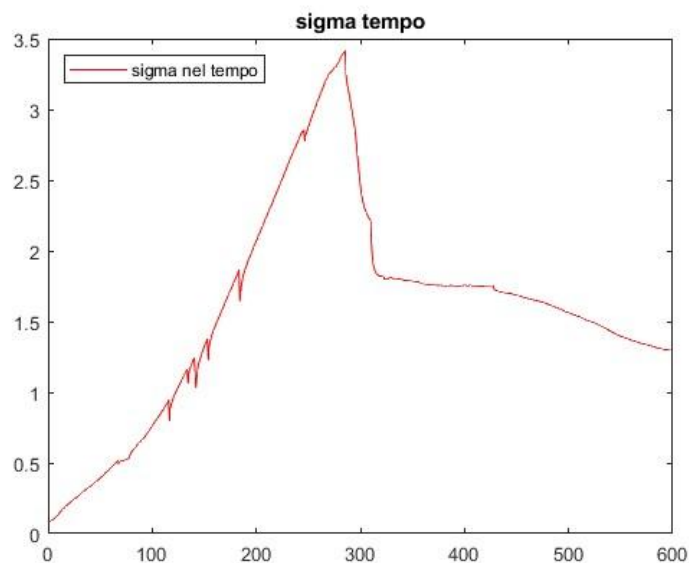
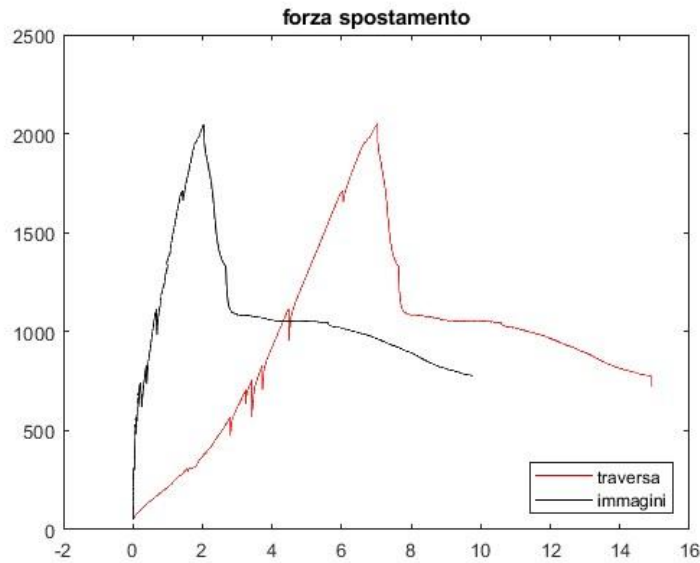


Figura 29: sigma nel tempo



*Figura 30: forza-spostamento*

La figura 30 mostra gli andamenti della forza in Newton in funzione dello spostamento del provino. La curva nera rappresenta l'andamento della forza in funzione dello spostamento valutato attraverso le immagini, mentre la curva rossa mostra l'andamento della forza in funzione dello spostamento della traversa mobile della macchina di trazione. Valgono le stesse considerazioni fatte per la figura 27: gli andamenti della forza sono differenti soprattutto nei tratti iniziali delle curve perché all'istante iniziale la traversa mobile inizia a muoversi ma questi spostamenti comprendono leggeri allungamenti dei componenti della macchina come per esempio gli afferraggi e i vari giochi che sono poi compensati, fattori che invece non vengono presi in considerazione nella curva realizzata considerando le immagini. In conclusione, quindi, la curva nera mostra che inizialmente lo spostamento è nullo o quasi nullo nonostante cresca la forza perché il provino non risente ancora dello spostamento della traversa mobile.

Tra i risultati ottenuti ci sono grafici "forza-spostamento" e "sigma-epsilon":

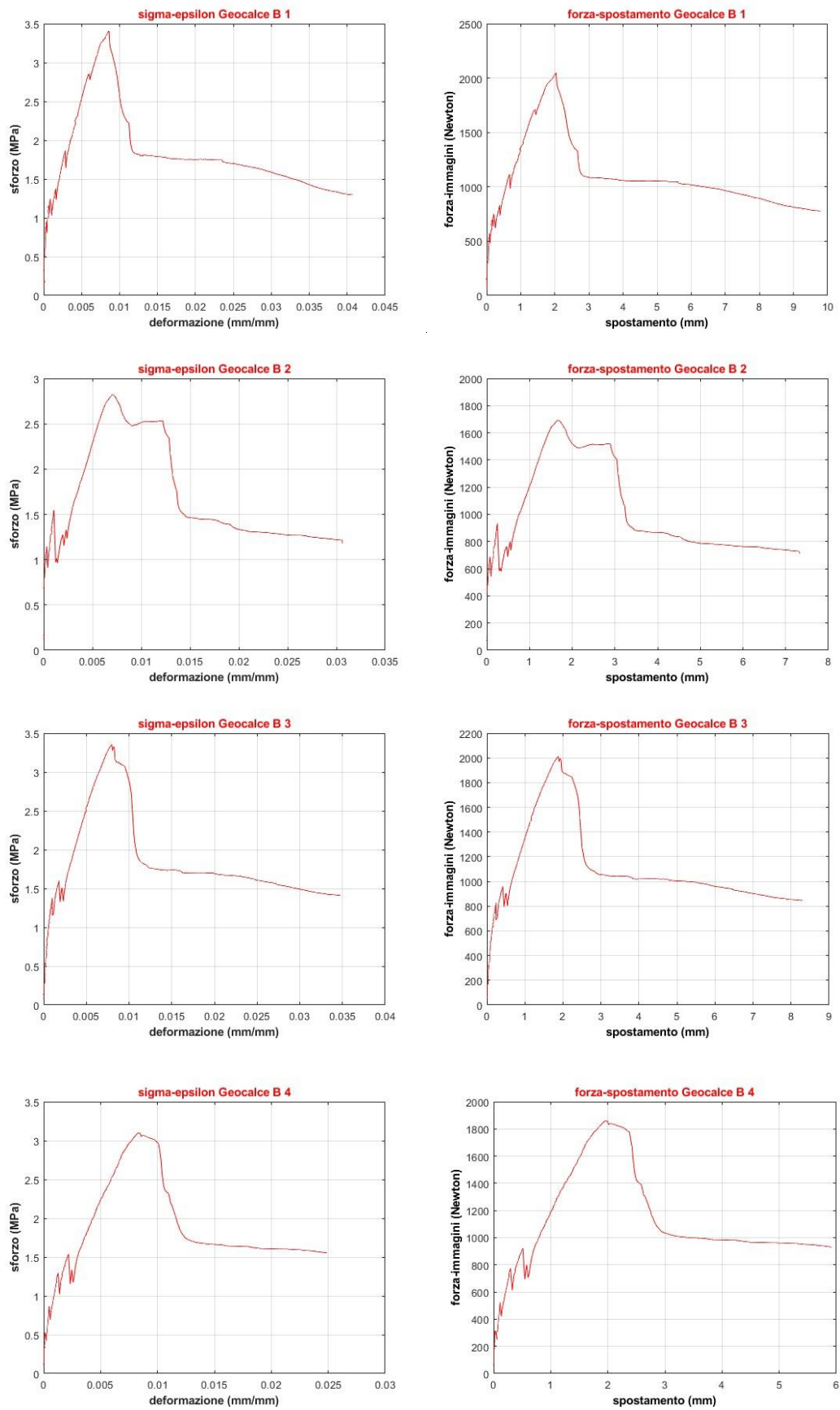


Figura 31: grafici dei quattro provini in GeoCalce F Antisismico con rete di boro

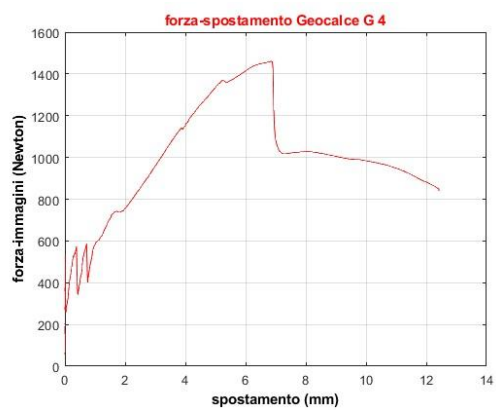
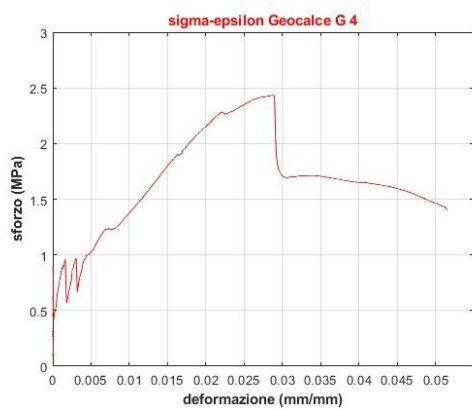
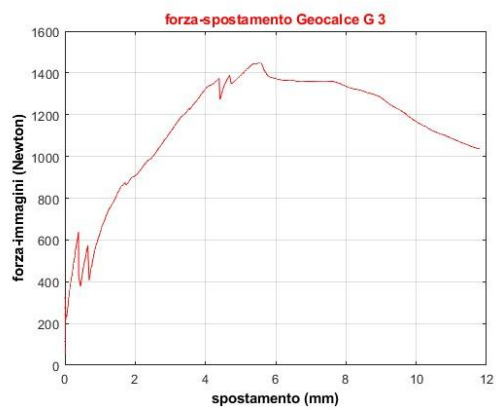
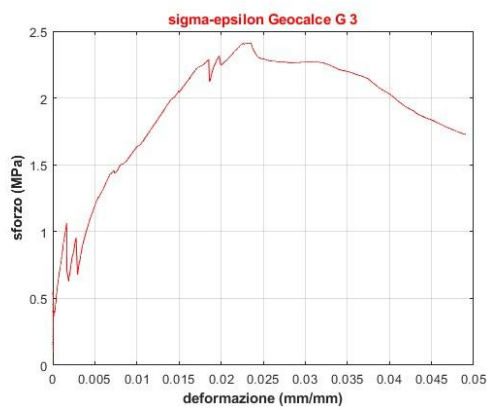
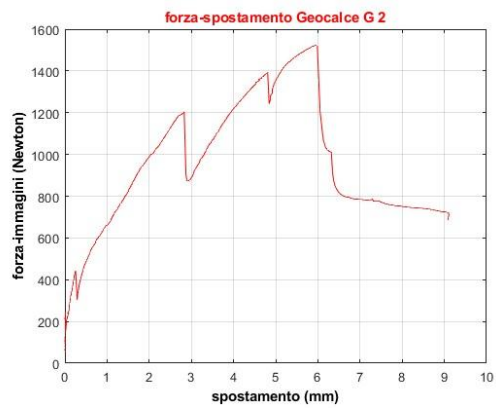
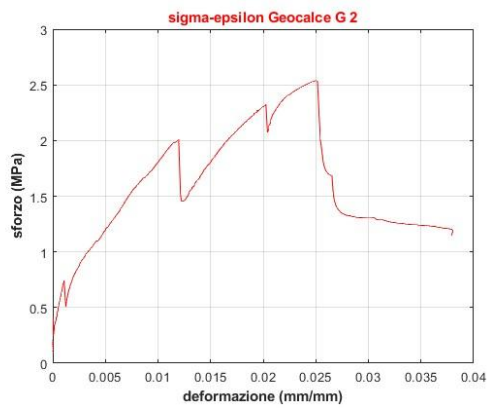
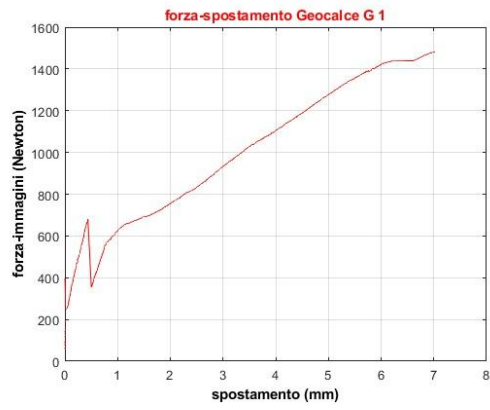
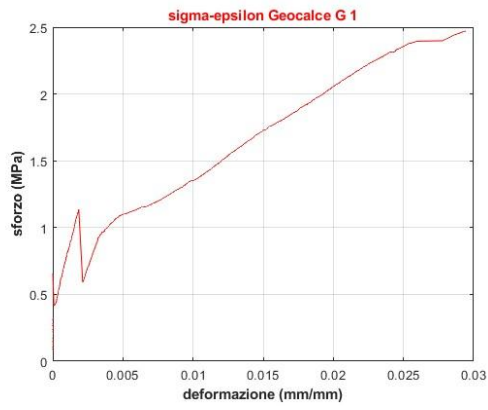


Figura 32: grafici dei quattro provini in GeoCalce F Antisismico con rete di vetro

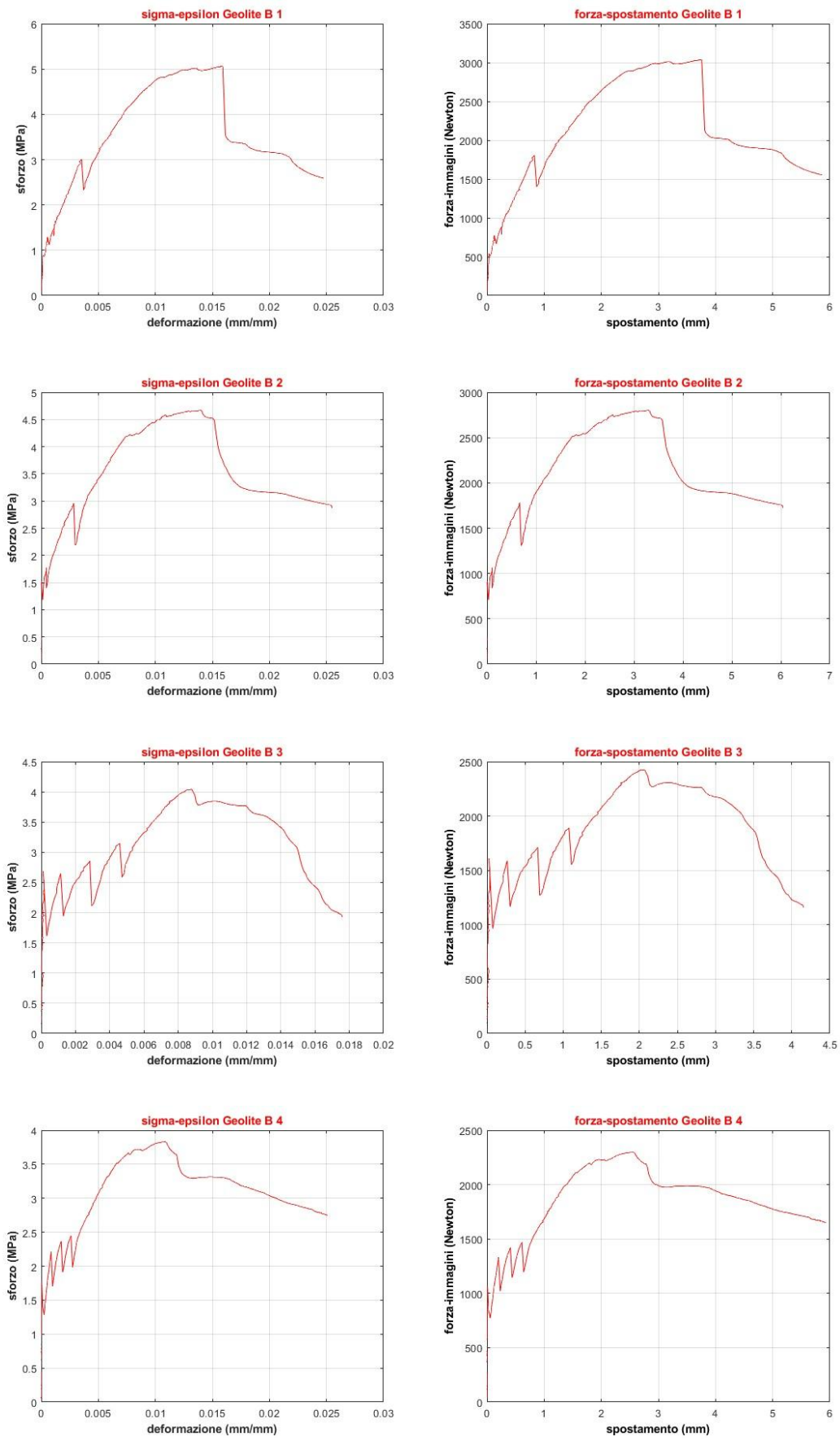


Figura 33: Grafici dei quattro provini in Geolite 40 con rete di boro



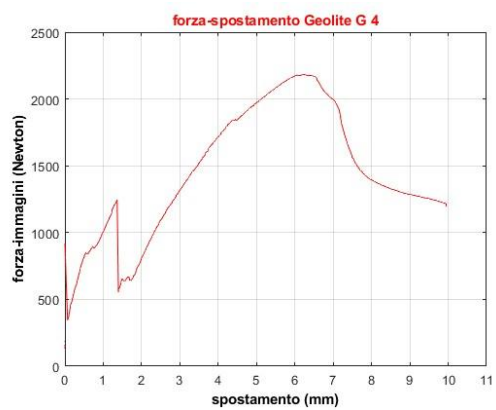
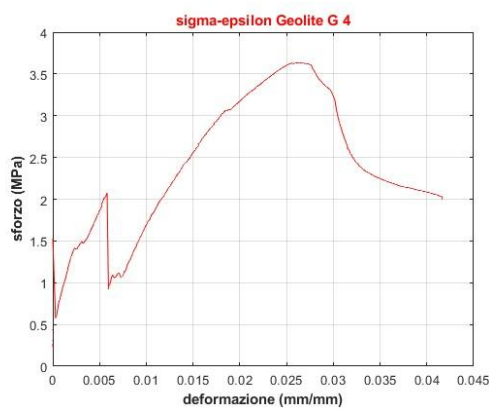
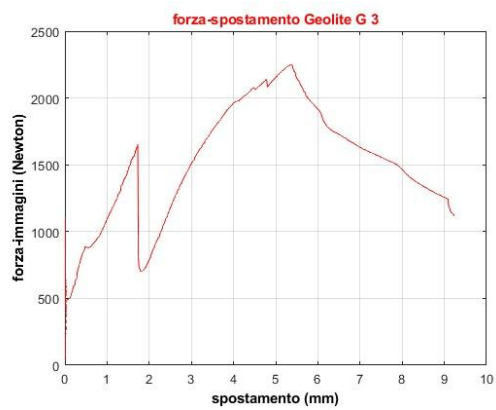
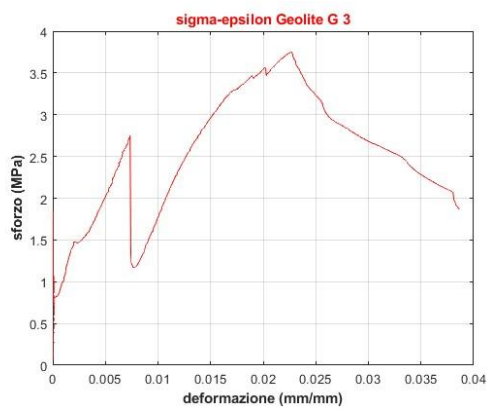
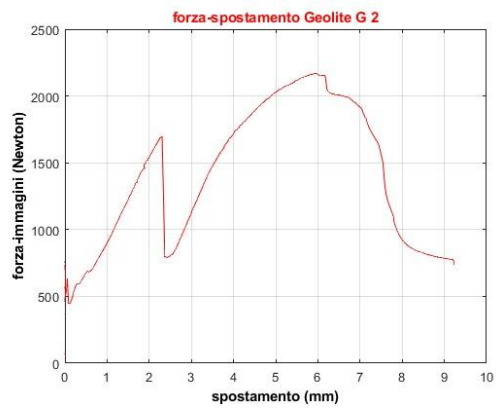
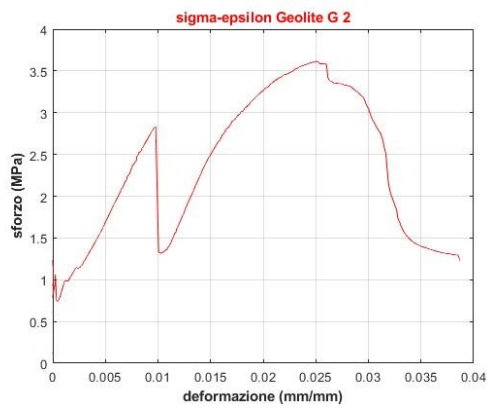
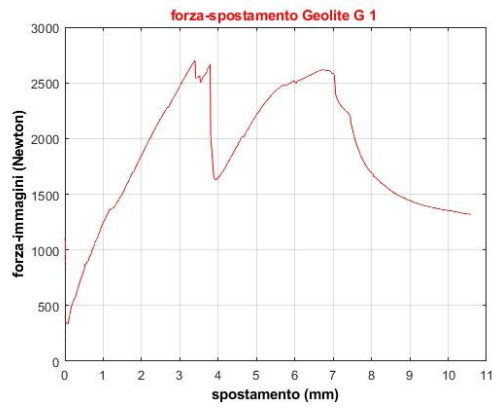
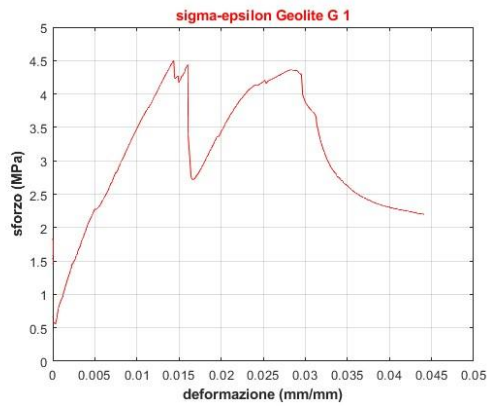


Figura 34: grafici dei quattro provini in Geolite 40 con rete di vetro

Con l'utilizzo sempre di MATLAB ho costruito poi i seguenti quattro grafici in cui viene fatto un confronto tra i quattro provini che sono realizzati con stesso materiale e stessa rete:

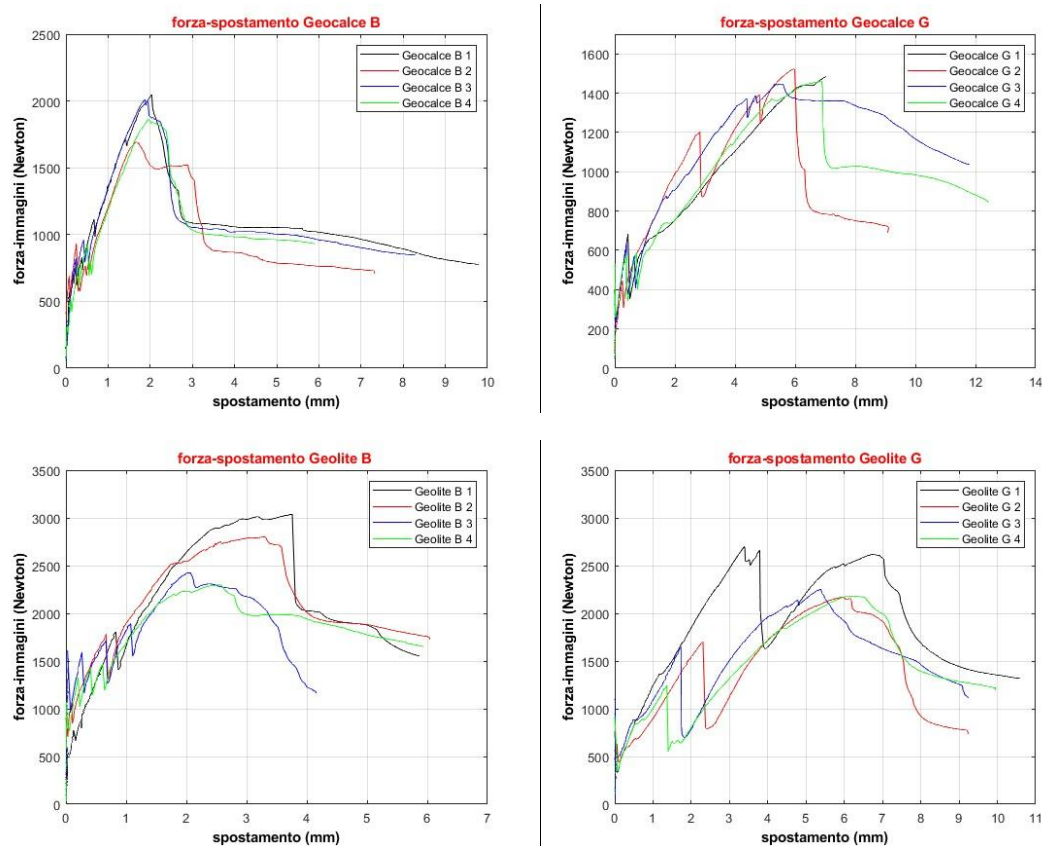


Figura 35: confronto tra provini

Da questo confronto è possibile notare che le curve nello stesso grafico hanno all'incirca un andamento simile con un'eccezione in particolare ovvero la curva 'Geolite\_G\_1': infatti questa curva mantiene un andamento pressoché lineare fino al raggiungimento del suo punto massimo in corrispondenza di 2663 Newton e poi successivamente presenta un grande picco, invece le altre tre curve ('Geolite\_G\_2', 'Geolite\_G\_3', 'Geolite\_G\_4') hanno un andamento pressoché lineare fino a valori di forza molto più bassi, tra i 1300 e i 1700 Newton, per poi presentare dei picchi che testimoniano la formazione di fessure. Sia nei provini realizzati in GeoLite 40, sia in quelli in GeoCalce F Antisismico la rete di boro consente il raggiungimento di un picco di forza maggiore rispetto alla rete di vetro, invece in generale lo spostamento raggiunto è inferiore ad eccezione del 'Geocalce\_G\_1' che raggiunge uno spostamento massimo di circa 7 millimetri. Inoltre i provini che hanno al loro interno una rete di boro presentano la formazione di un numero di fessure più elevato, come verrà anche mostrato con le mappe a colori, soprattutto nei tratti iniziali delle curve. Confrontando invece i provini realizzati con materiali differenti ma che hanno al loro interno la stessa rete di rinforzo si può

notare come i provini in GeoLite 40 consentono un raggiungimento di un picco di forza maggiore rispetto a quelli in GeoCalce F Antisismico.

Un'ulteriore analisi è stata realizzata con mappe a colori che evidenziano la deformazione nei vari punti del provino. Per ogni gruppo di provini, ne è stato scelto uno campione e sono: 'Geocalce\_B\_4','Geocalce\_G\_2','Geolite\_B\_4' e 'Geolite\_G\_4'.

Il primo passaggio è stato quello di creare un grafico che rappresentasse l'andamento della forza con il variare delle immagini. Questo grafico è necessario per la realizzazione delle mappe a colori in quanto nel grafico è possibile notare i punti in cui si hanno la formazione delle fessure, ovvero in corrispondenza dei crolli della forza; nell'asse delle ascisse viene individuata l'immagine corrispondente al punto da analizzare e poi nell'algoritmo di MATLAB viene inserito il numero di tale immagine per ottenere la mappa a colori riferita a quella determinata immagine.

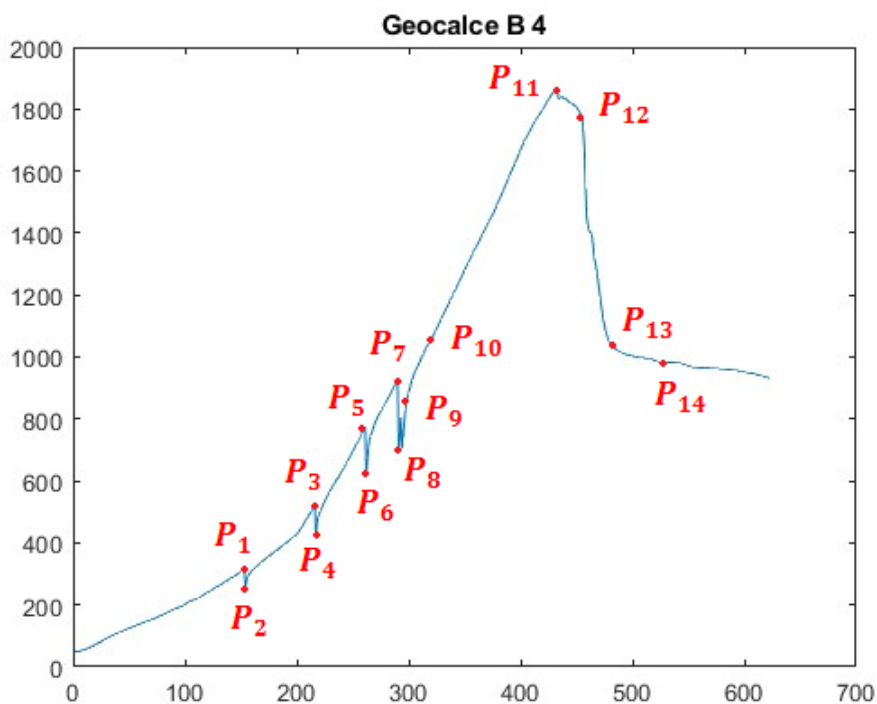


Figura 36: grafico "forza-immagini" Geocalce\_B\_4

Il grafico precedente mostra l'andamento della forza nel provino 'Geocalce\_B\_4'. I punti evidenziati in rosso sono i punti in cui nelle rispettive immagini ottenute con la fotocamera sono sovrapposte le mappe a colori.

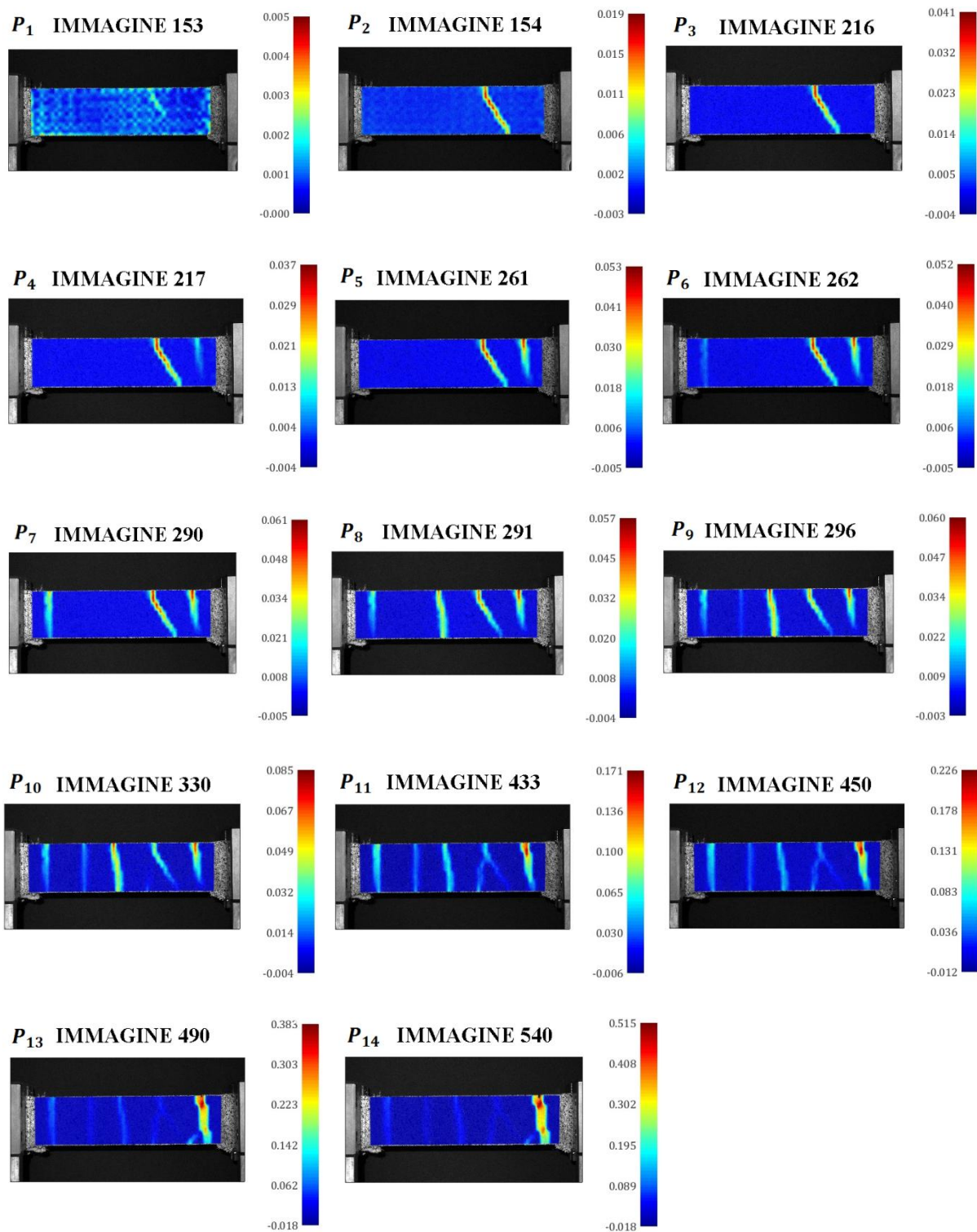


Figura 37: mappe a colori Geocalce\_B\_4

Le mappe a colori riportate mostrano come si distribuisce la deformazione nel provino. Fino a quando la forza non raggiunge il valore di 308,38 N, la deformazione è pressoché distribuita uniformemente nel provino poi inizia a formarsi una piccola fessura e la forza subisce un calo

fino a 253,23 N. La forza continua ad aumentare e la deformazione cresce fino a raggiungere un valore massimo di 4,1% nella fessura che si è formata (immagine 216), poi raggiunto un valore di 521,49 N, si forma una seconda fessura (immagine 217) con un calo della forza a 420,68 N. La stessa cosa si verifica qualche frame più avanti quando la forza passa da 774,14 N (immagine 261) a 616,08 N (immagine 262) e nasce una terza fessura. La deformazione continua a crescere fino ad un valore massimo di 0,0061, la sollecitazione arriva a 923,60 N e in corrispondenza del frame successivo (immagine 291) si può notare una nuova fessura che nasce già con una deformazione del 3,4%. Aumentandola, si formano ancora due piccole fessure (immagine 296 e immagine 330). Al frame 433 si raggiunge il valore di forza massimo, 1860,40 N, e da questo in poi la deformazione si concentra in una sola fessura fino a raggiungere una deformazione massima di 0,515 (immagine 540).

Anche per gli altri tre provini è stato realizzato un grafico che rappresentasse l'andamento della forza con le immagini e poi sono state realizzate le mappe a colori.

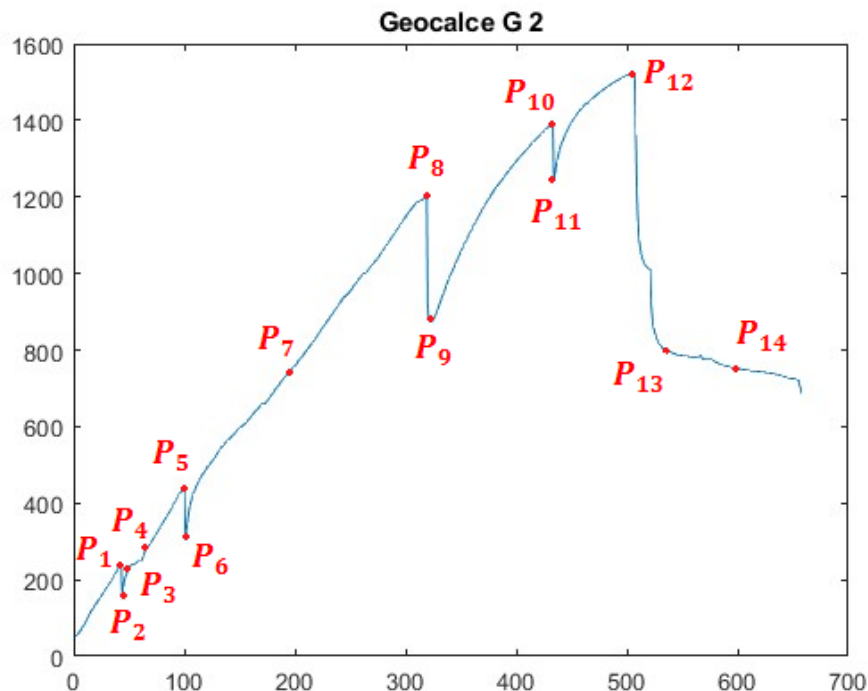


Figura 38: grafico "forza-immagini" Geocalce\_G\_2



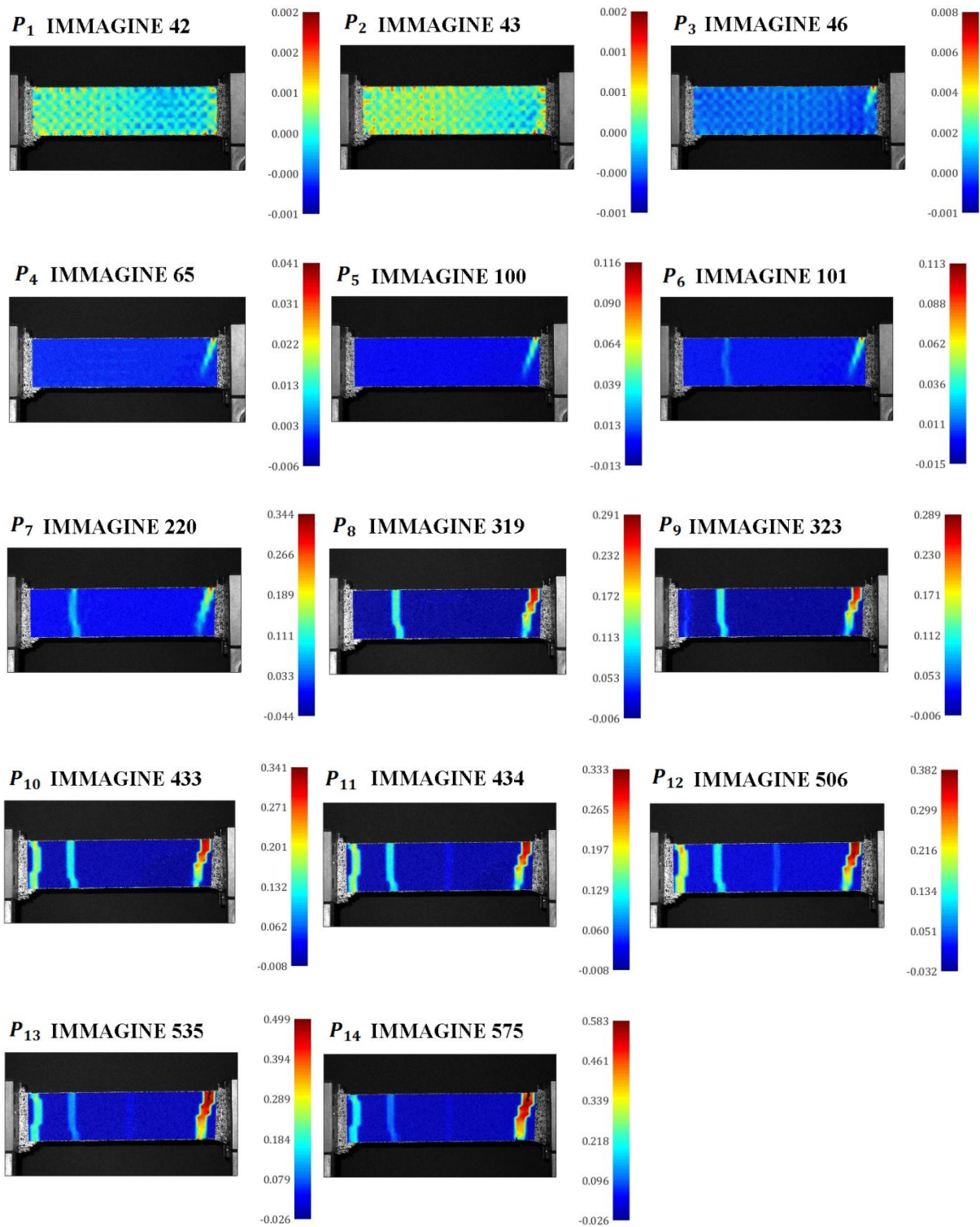


Figura 39: mappe a colori Geocalce\_G\_2

Anche per 'Geocalce\_G\_2', come per 'Geocalce\_B\_4', vengono utilizzate quattordici mappe a colori per descrivere la deformazione del provino. Inizialmente la deformazione è leggermente maggiore nella parte sinistra come si può notare ai frame 42 e 43, anche se è

molto piccola (in alcuni punti arriva a 0,002). Tra questi due frame la forza subisce un calo e poi quando raggiunge il valore di 202,50 N (immagine 46) si forma una piccola fessura nella parte alta di destra del provino. La prova prosegue e la forza aumenta fino a quando non raggiunge i 442,91 N (immagine 100), infatti nel frame successivo ha un valore di 305,02 N e si è formata una fessura nella parte sinistra. Queste due fessure che si sono formate fino in questo momento continuano a deformarsi raggiungendo un valore massimo pari 0,291 e 0,113 (immagine 319). La forza ha raggiunto una quota 1203,37 N per poi subire un calo fino a 872,59 N (immagine 323) con un'ulteriore formazione di una fessura nella parte di estrema sinistra del provino. La forza riprende ad aumentare fino al frame 433 quando la deformazione massima raggiunta è pari al 34% mentre nell'istante successivo si riduce nuovamente a 1243,5 N con formazione di una fessura nella zona centrale. La forza massima raggiunta è pari a 1522,11 N (immagine 506) dopodiché continua a ridursi mentre la deformazione aumenta concentrandosi nella fessura più a destra del provino raggiungendo un valore massimo di 0,583 (immagine 575).

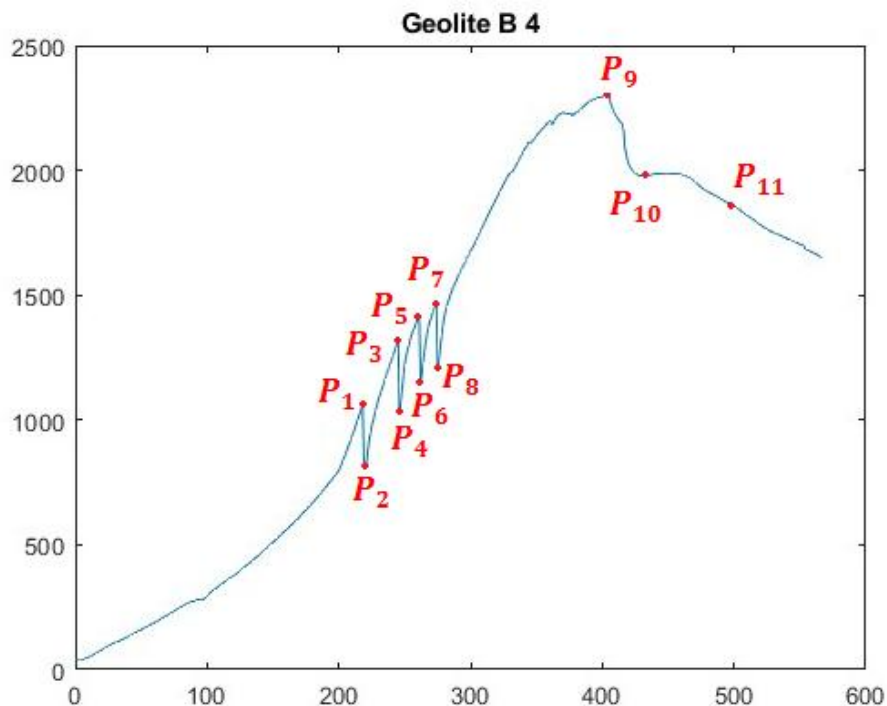


Figura 40: grafico "forza-immagini" Geolite\_B\_4

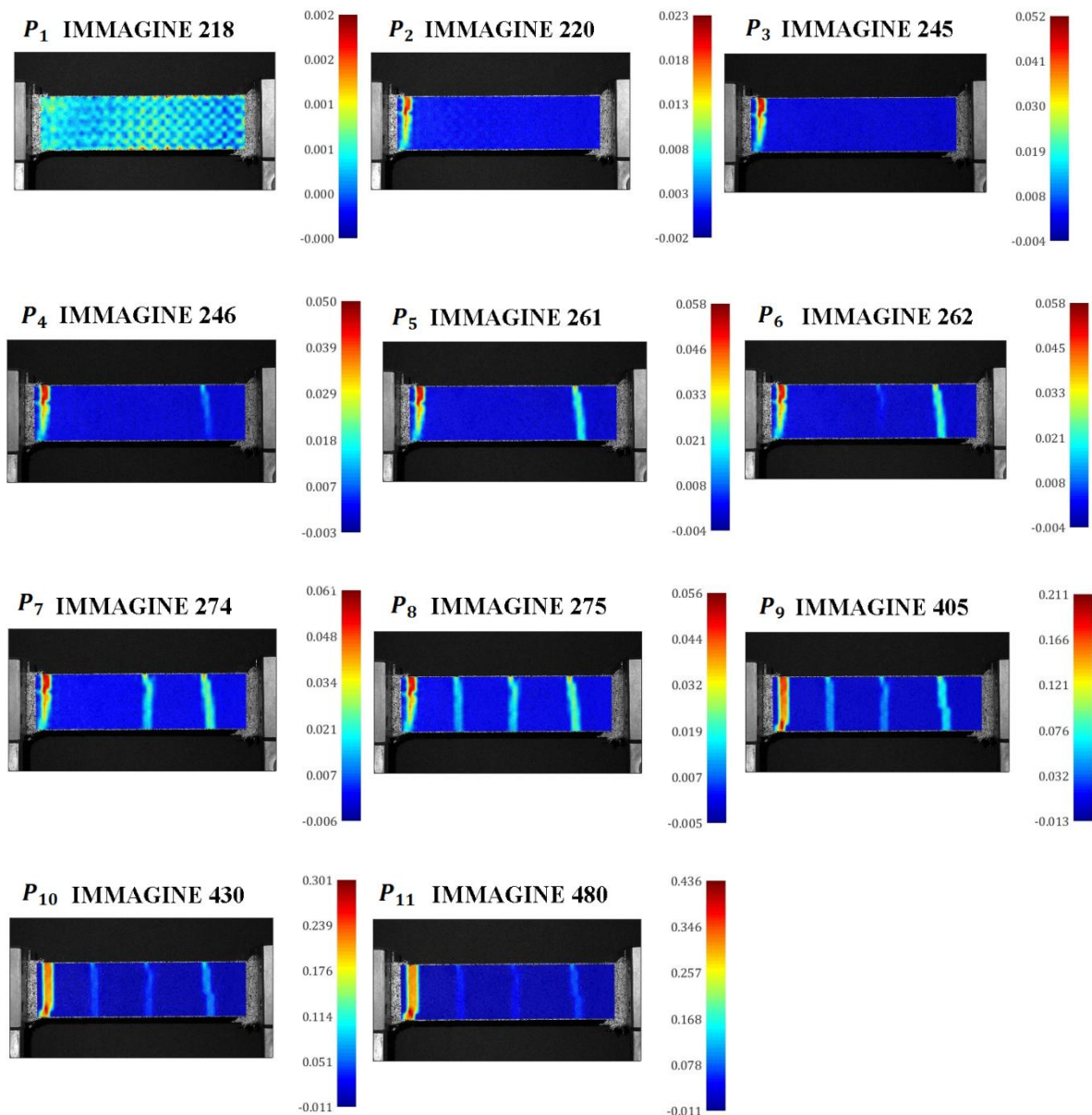


Figura 41: mappe a colori Geolite\_B\_4

Per analizzare il provino 'Geolite\_B\_4' sono stati sufficienti undici frame. Notiamo innanzitutto il primo declino della forza si ha in corrispondenza del frame 218 e si tratta quindi di una situazione molto diversa rispetto alle precedenti in quanto i primi crolli della forza si verificano molte immagini precedenti alla 218. Fino a che la sollecitazione subita dal provino non raggiunge un valore di 1062,50 N, la deformazione è pressoché la stessa in tutto il materiale ed è molto limitata. Raggiungo questo valore la forza crolla fino a 772,94 N e nasce una prima fessura nell'estrema sinistra del provino raggiungendo subito una deformazione pari al 2,3% (immagine 220). Negli istanti successivi si verifica ben tre volte



ancora lo stesso fenomeno appena descritto: la forza cresce fino a raggiungere una certa soglia, poi crolla immediatamente e si forma una nuova fessura. Questo crollo si verifica in corrispondenza dei frame 245-246 quando la forza passa 1326,70 N a 1020,54 N, nei frame 261-262 e la forza si riduce da 1421,26 N a 1144,89 N e nei frame 274-275 quando il si ha un passaggio da 1468,53 N a 1194,96 N. Dopo queste situazioni la deformazione massima raggiunta è pari a 0,056. La forza riprende ad aumentare, ma soprattutto la deformazione dato che in corrispondenza del frame 405 ha un valore massimo di 0,211. In questo istante si raggiunge il valore massimo della forza, 2295,0 N, e da questo punto la forza diminuisce continuamente mentre la deformazione aumenta concentrandosi nella fessura di sinistra che è la prima che si è formata raggiungendo un valore massimo pari a 0,436 (immagine 480).

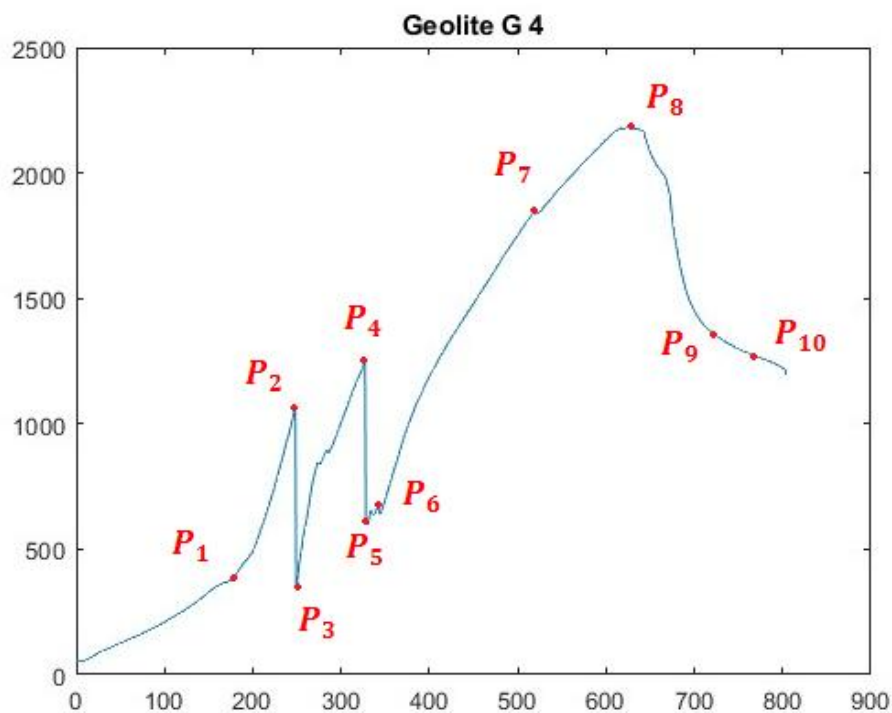


Figura 42: grafico "forza-immagini" Geolite\_G\_4

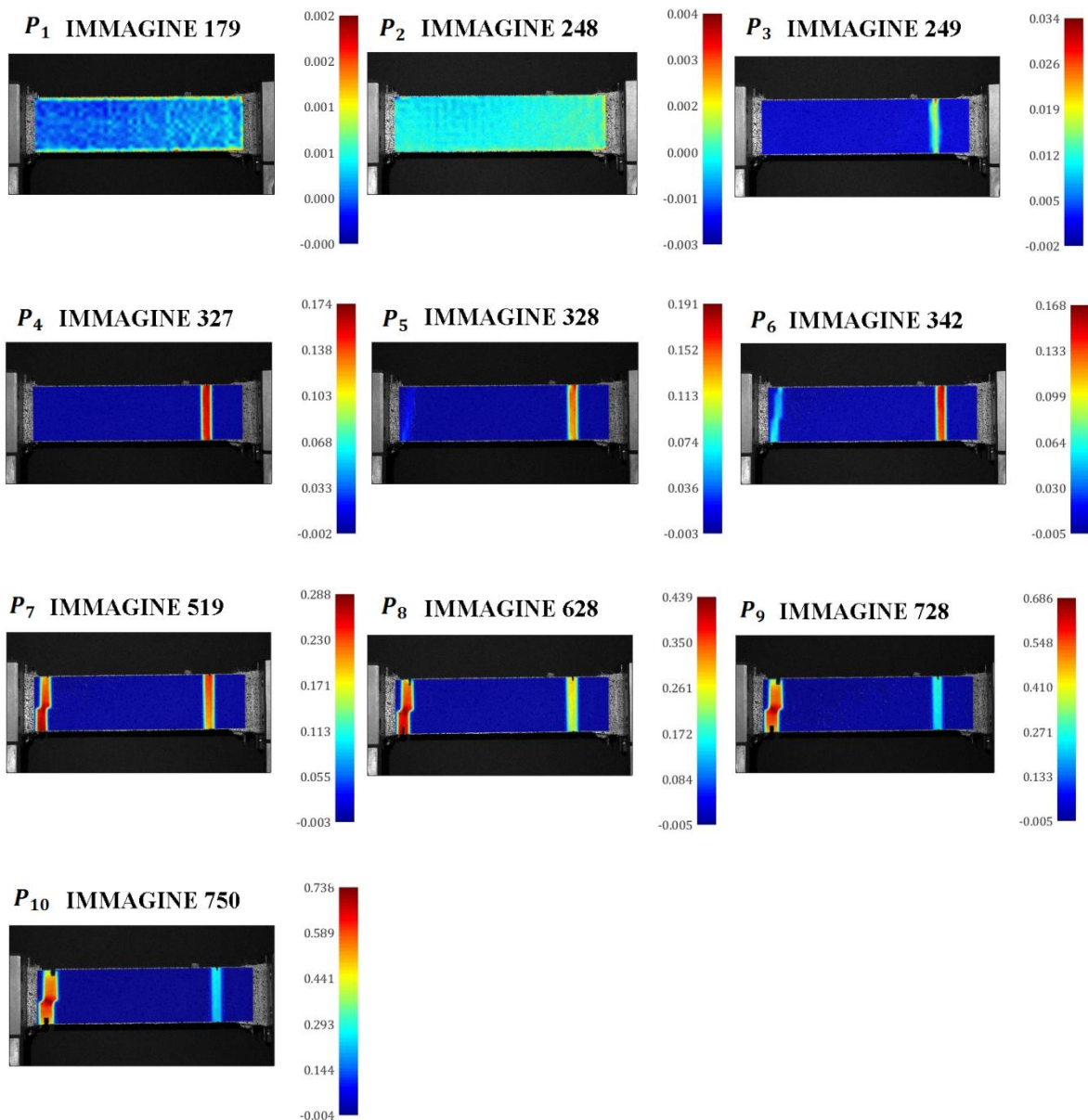


Figura 43: mappe a colori Geolite\_G\_4

L'ultimo provino analizzato è il 'Geolite\_G\_4'. Il comportamento inizialmente è simile a quello di 'Geolite\_B\_4' dato che fino a quando la forza non raggiunge un valore di 1067,79 N non si formano delle fessure ma la deformazione si distribuisce in egual modo sul provino anche se quest'ultima è quasi nulla fino a questo istante (immagine 248). Una piccola differenza con 'Geolite\_G\_4' risiede nel fatto che mentre nel caso precedente è possibile approssimare la crescita della forza in maniera costante per via del fatto che si può approssimare ad una retta il tratto iniziale del grafico, in questa situazione la forza cresce con una certa pendenza fino al frame 179 per poi aumentare più velocemente fino al frame 248.

L'andamento della forza lo possiamo approssimare a due rette con due pendenze diverse fino al raggiungimento di 1067,79 N. Raggiunto questo valore la forza ha un calo arrivando a 346,22 N e si forma una prima fessura (immagine 249). La forza ritorna a crescere e la deformazione si concentra nell' unica fessura che si è formata raggiungendo un valore massimo pari al 17,4% (immagine 327). Dal frame 327 al frame 328 la forza passa da 1246,55 N a 553,58 N e inizia a formarsi una fessura nella parte sinistra del provino. La forza riprende ad aumentare senza dei cali fino al frame 628 quando raggiunge 2180,59 N e anche la deformazione delle due fessure è cresciuta, in particolare quella della fessura di sinistra che si è formata successivamente all'altra. 2180,59 N corrisponde alla forza massima esercitata sul provino (immagine 628) e da questo momento decresce continuamente mentre la deformazione aumenta soprattutto nella fessura nella parte sinistra del provino.

## Conclusioni

In questo elaborato viene presentata un'esperienza di laboratorio riguardo lo studio ed il monitoraggio del comportamento di provino realizzati in GeoLite 40 e GeoCalce F Antisismico. I provini analizzati sono sedici e sono stati sottoposti ad una prova di trazione che in questo caso è stata realizzata con una macchina Zwick-Roell Z050. La deformazione e la tensione sui vari provini sono stati valutati non solo attraverso il software collegato alla macchina che registra tali dati, ma anche attraverso una tecnica che prende il nome di Digital Image Correlation. Si tratta di una tecnica innovativa in quanto consente la valutazione della deformazione evitando il contatto tra l'oggetto sottoposto a misurazione e lo strumento di misura. Risulta vantaggiosa anche per via del fatto che necessita di un computer, una scheda di acquisizione dati e una o due telecamere. In particolare è stata illustrata la tecnica 2D DIC ma è stata introdotta anche la tecnica 3D DIC: la principale differenza risulta essere che mentre per la DIC bidimensionale è sufficiente una sola telecamera per la registrazione delle immagini, nella 3D DIC ne sono necessarie due. L'ottenimento dei risultati è stato possibile anche grazie al software MATLAB con il quale è stata ogni volta costruita la griglia sulle immagini che risulta essere un passaggio fondamentale per ricavare le informazioni sul comportamento dei materiali: nell'analisi tridimensionale è stata costruita una griglia di altezza ridotta e centrata nell'asse del campione altrimenti i tempi di calcolo sarebbero stati molto lunghi, invece nell'approccio bidimensionale per ricavare le mappe a colori la griglia è stata realizzata su tutta la superficie. Sono stati ricavati gli andamenti di tensione-deformazione (grafici "sigma-epsilon") e inoltre anche delle mappe a colori che mostrano e rilevano la deformazione nei vari punti della superficie del provino. Questi risultati consentono una valutazione del comportamento di tali materiali rendendo possibile anche un confronto tra di essi.

## Bibliografia

- [1] MATLAB - Il linguaggio del calcolo tecnico  
URL: <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>;
- [www.kerakoll.com](http://www.kerakoll.com) (GeoLite 40 e GeoCalce F Antisismico);
- [2]Lezioni di MECCANICA STRUTTURALE, S. Lenci;
- [3]MATLAB - Il linguaggio del calcolo tecnico  
URL: <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>;
- [4]Curve Fitting - URL:<https://it.mathworks.com/videos/curve-fitting-toolbox-overview-61198.html>;
- [5]Image Processing Toolbox URL:<https://it.mathworks.com/products/image.html>;
- [6]Digital Image Processing, An Algorithmic Approach with MATLAB, Uvais Qidwai, C.H. Chen;
- [7]Tecnologie meccaniche di processi e produzione. - Appunti dalle lezioni del prof. Di Cara Nicola - URL: [https://www.unife.it/interfacolta/design/insegnamenti/materiali-per-prodotto-industriale/PROVA%20DI%20TRAZIONE%20STATICA\\_sito.pdf/view](https://www.unife.it/interfacolta/design/insegnamenti/materiali-per-prodotto-industriale/PROVA%20DI%20TRAZIONE%20STATICA_sito.pdf/view);
- [8]Provino sottoposto a trazione - Libro "Lezioni di MECCANICA STRUTTURALE" di Stefano Lenci;
- [9]Macchina per prova di trazione - URL: <https://www.macchine-per-prove-di-trazione.it/>;
- Macchina Zwick Z050 - URL: <https://www.istec.cnr.it/ricerca/risorse/laboratorio-di-propriet%C3%A0-meccaniche-e-tribologiche/zwick-roell%20z050/>;
- [10]Sistema di acquisizione 3D - URL: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-3D-DIC-setup\\_fig2\\_274311629](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-3D-DIC-setup_fig2_274311629);
- [11]Sistema di acquisizione 2D - URL: [https://www.researchgate.net/figure/Typical-optical-image-acquisition-system-for-the-2D-DIC-method\\_fig15\\_305503750](https://www.researchgate.net/figure/Typical-optical-image-acquisition-system-for-the-2D-DIC-method_fig15_305503750);
- Correlazione digitale di immagini - URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Correlazione\\_digitale\\_di\\_immagini](https://it.wikipedia.org/wiki/Correlazione_digitale_di_immagini);

-Sutton M., Orteu J.J., Schreirer H.W., 2009, Image Correlation for shape, motion and deformation measurements;

- La tecnica della correlazione digitale di immagini per il monitoraggio di provini di muratura sottoposti a prove meccaniche, E. Gabrielli, C. Colla;

-[12] Strumentazione del sistema DIC - URL:  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eng2.12038>;

-Tesi "Ottimizzazione dei parametri di acquisizione ed elaborazione per l'analisi di segmenti ossei tramite correlazioni di immagini digitali" di Marco Palanca, relatore Luca Cristofolini, anno accademico 2012/2013;

-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);

-Tesi "Acquisizioni ottiche per il rilievo di deformazione DIC su murature FRCM" di Stefano Felicioni, relatore Marco Sasso, correlatore Gianluca Chiappini, anno accademico 2017/2018;

-Elementi di meccanica strutturale - Università di Salento - URL:  
<file:///C:/Users/Stefano/Downloads/Lezione%20-%20Meccanica%20del%20continuo-tensore%20di%20deformazione.pdf>.

## **RINGRAZIAMENTI**

Ringrazio innanzitutto il mio tutor Marco Sasso e il mio correlatore Gianluca Chiappini per la loro disponibilità ed il loro aiuto nello svolgimento dell'attività di tirocinio e nella stesura della tesi.

Ringrazio i miei genitori Marta e Renato che mi sono sempre stati vicini, soprattutto nei momenti difficili e hanno sempre cercato di mettermi nelle condizioni migliori per affrontare lo studio.

Ringrazio mia sorella Samuela che grazie alla sua esperienza universitaria mi ha saputo sempre consigliare la scelta migliore da prendere durante il percorso accademico.

Infine, ringrazio i miei amici con i quali mi sono divertito parecchio in questi tre anni dandomi la possibilità di svagarmi dall'ambiente universitario e di poter condividere con loro momenti belli e momenti di difficoltà.

Grazie davvero a tutti.