

**Università Politecnica delle Marche**



**Facoltà di Ingegneria**

**Corso Di Laurea in Ingegneria Meccanica**

**Analisi di prove sperimentali su provini di cemento  
caricati con fibre di carbonio e acciaio**

**Analysis of experimental tests on concrete specimens  
loaded with carbon and steel fibers**

**Relatore**

**Prof. Marco Rossi**

---

**Studente**

**Antonio Di Risio**

---

**Correlatore**

**Prof. Gianluca Chiappini**

---

**Matricola**

**S1097910**

---

**A.A. 2023 / 2024**





# Sommario

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Aspetti generali sui materiali .....</b>	<b>6</b>
2.1 <i>Cemento</i> .....	6
2.2 <i>Carbonio</i> .....	7
2.3 <i>Acciaio</i> .....	9
2.4 <i>Cemento rinforzato con fibre</i> .....	11
2.5 <i>Fibre</i> .....	13
2.6 <i>Prova di compressione</i> .....	14
<b>3. Prova sperimentale e analisi dei dati.....</b>	<b>16</b>
3.1 <i>Provini</i> .....	16
3.2 <i>Prova in laboratorio</i> .....	19
3.3 <i>MatchID</i> .....	23
3.4 <i>MATLAB</i> .....	37
3.5 <i>Sintesi delle problematiche e successiva interpretazione dei dati</i> .....	49
3.6 <i>Confronto dei risultati</i> .....	61
<b>4. Conclusioni.....</b>	<b>69</b>
<b>5. Indice delle figure .....</b>	<b>71</b>
<b>6. Riferimenti .....</b>	<b>73</b>

## 1. Introduzione

La presente tesi di laurea si propone di analizzare prove sperimentali condotte su campioni di cemento rinforzati con fibre di carbonio e acciaio. Le prove sono state condotte presso i laboratori dell'Università, nello specifico sottoponendo i campioni a sollecitazione di compressione, e successivamente utilizzando strumenti avanzati per la raccolta e l'elaborazione dei dati, con particolare attenzione all'impiego di tecniche di analisi di immagine. Queste ultime permettono di studiare in dettaglio la distribuzione delle deformazioni e la propagazione delle fratture nei provini, offrendo una visione precisa del comportamento del materiale sotto carico.

Questa tesi è frutto del lavoro congiunto degli studenti Vincenzo Presenza e Antonio Di Risio. In particolare, Vincenzo si è occupato dello studio dei dati ottenuti dai provini di cemento con fibre di carbonio e acciaio, e Antonio ha rivolto la sua attenzione sull'analisi dei dati ottenuti dai provini di cemento e dagli stessi rinforzati con solo fibre di acciaio. Per completezza e chiarezza si è deciso di presentare un unico elaborato in cui sono riportati tutti i contributi.

La tesi si sviluppa attraverso la descrizione delle caratteristiche dei materiali impiegati, la presentazione delle prove sperimentali eseguite e l'elaborazione dei risultati ottenuti mediante l'analisi di immagini, in modo tale che i dati raccolti permettano di valutare l'efficacia del rinforzo e di identificare eventuali criticità, grazie all'utilizzo di un apposito software.

L'obiettivo principale del lavoro è esaminare la distribuzione delle deformazioni e la propagazione delle fratture nei provini, offrendo una visione del comportamento del materiale sotto carico, valutando l'efficacia del rinforzo con fibre di carbonio e acciaio nel migliorare la resistenza e la duttilità del cemento.

## 2. Aspetti generali sui materiali

Il cemento rinforzato con fibre è un composito che integra elementi di vario tipo per migliorare le prestazioni meccaniche e la durabilità del prodotto finale. Tra le fibre utilizzate, quelle in fibra di carbonio e in acciaio sono tra le più comuni, ognuna con proprietà specifiche che le rendono adatte per determinate applicazioni. Il cemento, pur essendo un materiale molto diffuso e versatile, ha alcune limitazioni intrinseche come la bassa resistenza alla trazione, la tendenza a fessurarsi e la suscettibilità a fenomeni di degrado nel tempo. Per superare queste limitazioni, vengono introdotti materiali di rinforzo, come le fibre, che migliorano le proprietà meccaniche e fisiche del calcestruzzo. Tramite le prove eseguite in laboratorio è possibile analizzare alcune caratteristiche del cemento, come proprietà meccaniche e la sua risposta all'utilizzo combinato con fibre.

### 2.1 Cemento

Il calcestruzzo, noto anche come conglomerato (CLS), è un materiale artificiale molto versatile risultante da una miscela di componenti chiave: cemento, aggregati (come sabbia e ghiaia), acqua e, in alcuni casi, additivi. La sua creazione segue un preciso processo tecnologico, finalizzato a ottenere un composto con caratteristiche di duttilità, durabilità e un'elevata resistenza alla compressione.

La realizzazione del calcestruzzo inizia con la selezione dei suoi componenti principali, che sono:

- **Cemento:** è il legante principale del calcestruzzo che può essere di diversi tipi; la sua reazione con l'acqua forma una pasta che lega insieme gli altri materiali.
- **Aggregati:** costituiscono la maggior parte del volume del calcestruzzo, che includono sabbia, ghiaia o pietrisco, essi influenzano le proprietà del calcestruzzo, come la resistenza e la consistenza.

- **Acqua:** è essenziale per far avvenire la reazione chimica tra il cemento e gli altri materiali. La quantità di acqua influisce sulla resistenza del calcestruzzo.
- **Additivi:** sono sostanze aggiunte al calcestruzzo per migliorarne le prestazioni o per conferire proprietà specifiche, con la possibilità di essere adattato alle diverse esigenze costruttive.

La proporzione e la combinazione di questi elementi determinano le prestazioni specifiche del calcestruzzo, permettendo di adattarlo a molteplici usi nel campo dell'edilizia e delle infrastrutture, ma anche in alcuni aspetti dell'ingegneria meccanica.

La rottura meccanica dei materiali ceramici puri avviene principalmente a causa di difetti presenti nella loro struttura, rispetto a questi, il calcestruzzo ha una capacità leggermente maggiore di redistribuire gli sforzi grazie alla presenza della matrice cementizia e degli aggregati, che gli conferiscono una certa resistenza alla frattura, ma i principi generali di frattura legati ai difetti strutturali sono comunque molto simili.

Ricapitolando, anche per il calcestruzzo, i difetti interni ed esterni (come cricche, porosità, inclusioni) sono le principali cause che innescano la frattura. [1]

## 2.2 Carbonio

Il carbonio (simbolo chimico C, numero atomico 6) è un elemento chimico fondamentale, si trova in natura in diverse forme allotropiche (stati fisici distinti della stessa sostanza chimica, come grafite e diamante), le sue caratteristiche uniche derivano dalla sua capacità di formare legami con altri atomi, che gli permettono di creare strutture molecolari molto complesse, e quindi una delle proprietà più interessanti del carbonio è la sua versatilità chimica. [2] Un'applicazione interessante sono le fibre di carbonio, ovvero un materiale composito costituito da sottili filamenti di carbonio (diametro di circa 5-8  $\mu\text{m}$ ) intrecciati tra loro e una matrice, spesso polimerica, che funge da legante. (fig. 1)



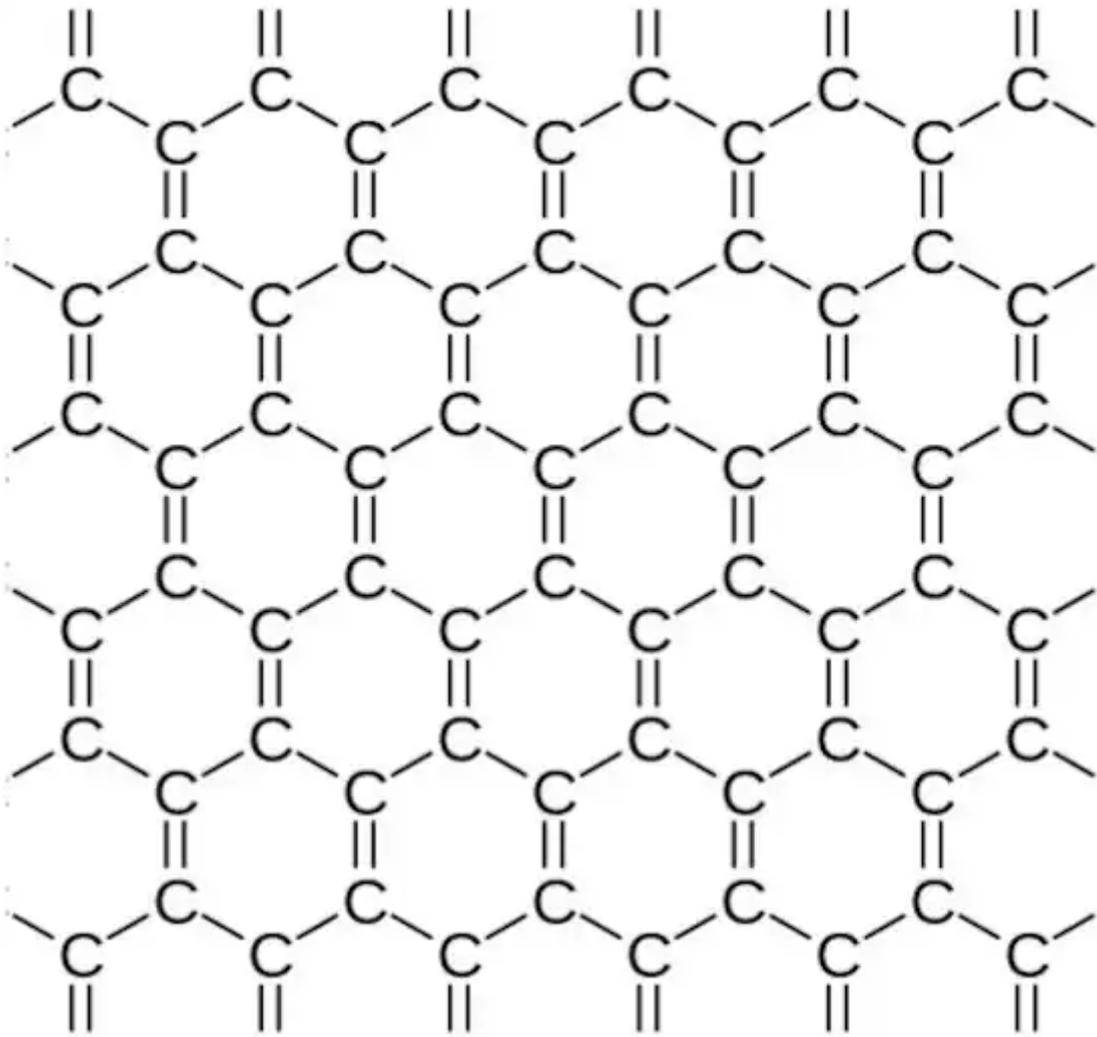
*Figura 1 Fascio di filamenti di fibre di carbonio [3]*

Questi filamenti sono estremamente resistenti e leggeri, di contro il materiale composito in fibre di carbonio risulta non omogeneo e presenta spesso una spiccata anisotropia, ovvero le sue caratteristiche meccaniche hanno una direzione privilegiata. Queste fibre sono fatte principalmente di carbonio in forma cristallina, allineate parallelamente lungo il loro asse longitudinale, il che conferisce loro una grande resistenza meccanica e, allo stesso tempo, una bassa densità.

Le sue proprietà principali sono:

- Resistenza elevata: queste fibre sono circa cinque volte più resistenti dell'acciaio a parità di peso.
- Rigidità: sono molto rigide, rendendole utili in applicazioni dove è richiesta la stabilità.

La struttura atomica della fibra di carbonio è simile a quella della grafite (fig. 2), consistendo in aggregati di atomi di carbonio a struttura planare (fogli di grafene) disposti secondo simmetria esagonale regolare. La differenza consiste nel modo in cui questi fogli sono interconnessi. [3]



*Figura 2 Struttura atomica della grafite [4]*

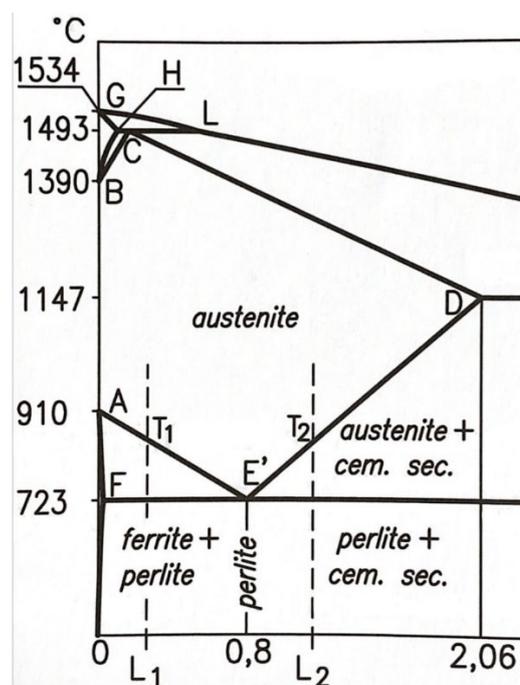
### 2.3 Acciaio

Si definisce acciaio la lega composta fondamentalmente da ferro e carbonio, con tenore massimo di quest'ultimo pari a 2,06%.

Praticamente nell'acciaio sono sempre presenti elementi inquinanti che non è possibile eliminare completamente durante la produzione. I principali sono: silicio, manganese, zolfo e fosforo.

Come possiamo vedere dal diagramma Fe-Fe<sub>3</sub>C (fig. 3), sono presenti dei costituenti e degli aggregati strutturali:

- Ferrite: soluzione solida interstiziale di carbonio nel ferro con cella cubica a corpo centrato.
- Cementite: composto chimico di ferro e carbonio, molto duro e fragile, responsabile della resistenza meccanica nei materiali ferrosi.
- Austenite: soluzione solida di cementite nel ferro  $\gamma$ .
- Perlite: aggregato di ferrite e cementite che, durante il raffreddamento si forma dall'austenite.



**Figura 3** Diagramma Ferro-Cementite [2]

L'acciaio presenta diverse caratteristiche al variare della temperatura e della percentuale di carbonio, in particolare all'aumentare del tenore di carbonio cresceranno carico di

snervamento, carico di rottura e durezza, mentre diminuiranno allungamento, strizione, resilienza, fucinabilità e saldabilità.

Tra le varie caratteristiche degli acciai, oltre a quelle già citate, troviamo:

- Resistenza meccanica: capacità di sopportare carichi senza subire deformazioni o rotture permanenti.
- Duttilità: capacità di deformarsi plasticamente senza rompersi.
- Tenacità: capacità di assorbire energia durante la deformazione plastica e di resistere alla propagazione di fratture.

All'acciaio possono essere aggiunti elementi di alligazione allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche o chimiche. Quelli maggiormente utilizzati sono: nichel, cromo, molibdeno, vanadio, tungsteno, manganese, cobalto e alluminio. In base alla loro presenza e percentuale possiamo avere diverse tipologie di acciai. I più utilizzati in campo ingegneristico sono: acciaio al carbonio, acciaio legato, acciaio inossidabile, acciaio strutturale e acciaio per utensili. [2]

#### 2.4 Cemento rinforzato con fibre

Il cemento rinforzato con fibre (fig. 4), definito anche Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC o UHPC), è un tipo di materiale innovativo che rientra nella categoria di calcestruzzi fibrorinforzati a elevate prestazioni che viene utilizzato per migliorare alcune delle sue proprietà meccaniche, rispetto a quello tradizionale, specialmente in campo post-elastico.



*Figura 4 Sezione di cemento rinforzato al microscopio [5]*

A seconda dell'uso a cui vengono destinati si possono usare diversi tipi di fibre: fibre di acciaio, fibre di carbonio, fibre sintetiche e fibre di vetro. Principalmente si utilizzano quelle di acciaio, dove in alcuni casi è possibile la parziale e/o totale sostituzione con fibre di carbonio, che garantiscono ulteriori prestazioni meccaniche, come ad esempio una maggiore resistenza a trazione.

Con l'aggiunta di queste fibre otterremo diversi vantaggi e svantaggi, rispetto al calcestruzzo ordinario, tra i quali:

- Vantaggi: maggiore resistenza alla fatica, agli urti e allo stress termico, avendo così strutture che durano più a lungo anche in ambienti soggetti a sollecitazioni dinamiche.
- Svantaggi: difficoltà nella miscelazione, costi elevati e proprietà anisotrope, ottenendo quindi delle strutture disomogenee anche nella disposizione delle fibre che possono causare una propagazione non uniforme della sollecitazione nelle diverse direzioni. [6] [7]

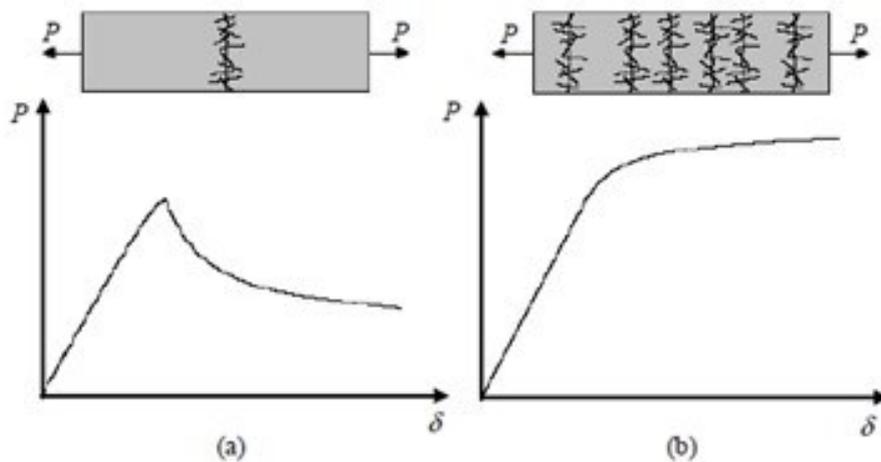
## 2.5 Fibre

Nei calcestruzzi fibrorinforzati si possono utilizzare fibre come acciaio e carbonio, che hanno un elevato modulo elastico, contrastando la crescita delle fessure. Per ottenere questo risultato, le fibre che attraversano la fessura devono riuscire a collegare in modo efficace i due lembi. Tuttavia, questo compito diventa sempre più complesso all'aumentare della distanza tra i lembi stessi. Infatti, le fibre potrebbero rompersi o non aderire adeguatamente alla matrice cementizia, compromettendo così la loro capacità di trasferire gli sforzi.

Il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato varia a seconda della quantità di fibre utilizzate, in rapporto a un determinato "volume critico" ( $V_{cri}$ ). Si possono distinguere due comportamenti principali, come si può osservare da una generica prova di trazione (fig. 5):

- Comportamento incrudente ( $V > V_{cri}$ ): Quando il contenuto di fibre supera il volume critico (fig. 5b), il calcestruzzo, dopo la prima fessurazione, continua ad aumentare le tensioni. Questo accade perché le fibre presenti ricuciono immediatamente le fessure, permettendo la formazione di nuove zone resistenti. Il processo di fessurazione e riparazione si ripete in modo diffuso su tutta la struttura, con un numero elevato di fessure distribuite, che vengono collegate nuovamente dalle fibre.
- Comportamento degradante ( $V < V_{cri}$ ): Se la quantità di fibre è inferiore al volume critico (fig. 5a), dopo la prima fessurazione le tensioni diminuiscono. Le fibre non sono sufficienti per ricollegare la fessura, che si allarga progressivamente fino a portare alla rottura del calcestruzzo. In questo caso, non si formano nuove fessure e le fibre presenti si rompono o vengono sfilate.

In conclusione, con più fibre ( $V > V_{cri}$ ) il calcestruzzo mantiene una resistenza diffusa, mentre con meno fibre ( $V < V_{cri}$ ) il calcestruzzo degrada più rapidamente.



**Figura 5** Curva carico-spostamento per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b) [8]

L'adesione delle fibre alla matrice cementizia migliora con la forma irregolare delle fibre stesse. Forme come estremità piegate, uncinata o ondulate massimizzano l'ancoraggio nella matrice, aumentando l'efficacia del rinforzo. Tuttavia, per sfruttare al meglio l'aggiunta di fibre nella miscela cementizia, è essenziale garantirne una corretta dispersione, altrimenti il rinforzo risulta inefficace. [7]

## 2.6 Prova di compressione

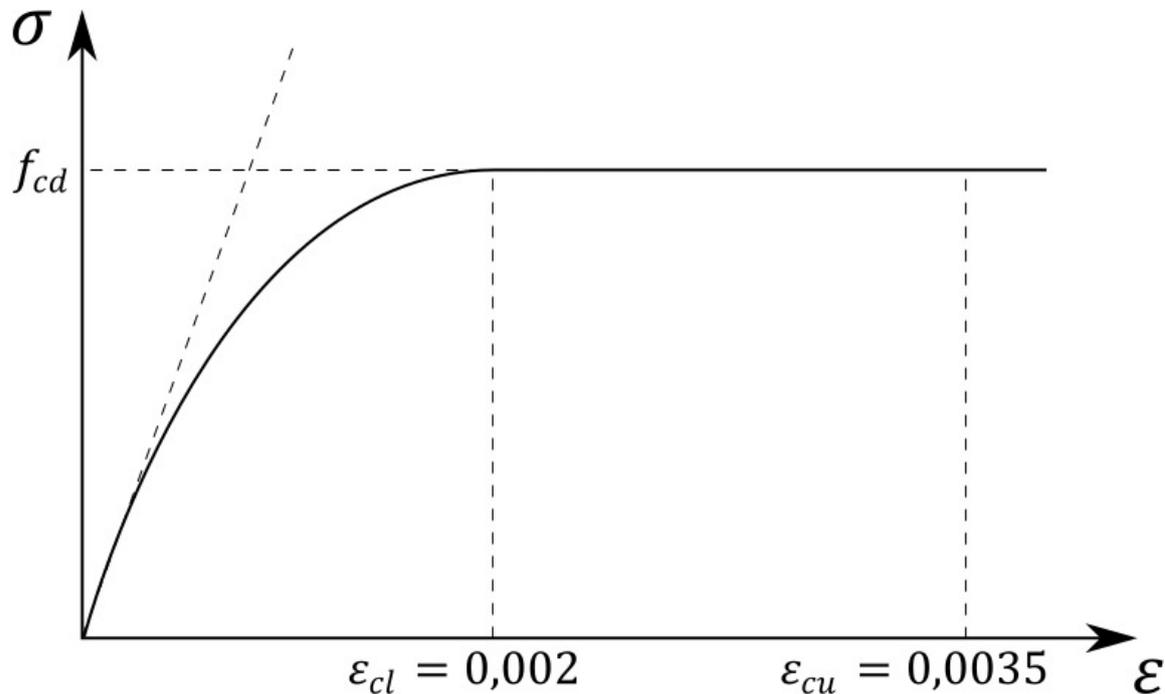
È una prova meccanica distruttiva, realizzata ponendo il provino tra piastre piane, lisce e parallele, successivamente viene applicato un carico lungo l'asse del provino (sollecitazione monoassiale), provocandone una riduzione dell'altezza e un aumento del diametro, o con conseguente rottura, in base al tipo materiale.

A differenza della prova di trazione, che invece provoca un allungamento del provino, non si verifica il fenomeno della strizione, ovvero la riduzione della sezione resistente dove si concentrano ulteriori deformazioni, ottenendo così un aumento della deformazione al termine della prova.

I risultati ottenuti dalla prova di compressione sono i valori della tensione e della deformazione, ottenuti dalla trasformazione dei valori di forza e riduzione di altezza. Questi ci permettono di capire le varie proprietà meccaniche, il comportamento e i limiti del materiale esaminato. [9]

Un materiale che si presta meglio a questo tipo di prova e anche uno dei più testati è il calcestruzzo, dato che con altri tipi di prove, come quella di trazione, non è possibile valutare accuratamente alcune delle sue caratteristiche. Solitamente vengono utilizzati provini cilindrici o cubici, dove le dimensioni sono definite da normative specifiche.

La curva tensione-deformazione (fig. 6) che si ottiene alla fine della prova riporta sulle ordinate come valore massimo la resistenza a compressione ( $f_{cd}$ ), che rappresenta il rapporto tra la forza applicata e la sezione del provino, e sulle ascisse la deformazione iniziale ( $\epsilon_{cl}$ ) e la deformazione ultima ( $\epsilon_{cu}$ ).



**Figura 6** Curva tensione-deformazione per un provino di calcestruzzo [10]

### 3. Prova sperimentale e analisi dei dati

In questo capitolo verrà descritta la fase sperimentale del lavoro di tesi, a partire dai provini utilizzati fino all'analisi dei dati sperimentali. Si approfondiranno le tecniche adottate per l'acquisizione dei dati, ponendo particolare attenzione all'utilizzo dei software MatchID e MATLAB per l'elaborazione e il trattamento dei dati ottenuti durante le prove. Successivamente, verranno effettuati confronti dettagliati tra i diversi risultati. Questo capitolo fornirà una visione completa del processo di sperimentazione, dall'acquisizione dei dati all'interpretazione dei risultati.

#### 3.1 Provini

I provini sono stati realizzati secondo precise specifiche geometriche e dimensionali, al fine di garantire l'accuratezza dei risultati e la ripetibilità delle misurazioni. Per ciascuna tipologia di provino sono stati preparati due campioni. Le dimensioni sono pari a un diametro di circa 130 mm e un'altezza variabile tra 300 e 400 mm, a seconda del campione.

I provini oggetto di studio sono (fig. 7):

- CLS2 e CLS3: provini di solo calcestruzzo senza l'aggiunta di rinforzi;
- 1SF\_05CF\_1 e 1SF\_05CF\_2: provini rinforzati con fibre miste di acciaio all'1% e di carbonio allo 0,5% in volume rispetto al volume totale del composito;
- 15SF\_1 e 15SF\_2: provini rinforzati con l'1,5% di fibre di acciaio;
- 1CF\_1 e 1CF\_2: provini rinforzati con l'1% di fibre di carbonio.



*Figura 7 Esempio di provino*

In merito alle ultime due tipologie possiamo specificare che le fibre di acciaio (fig. 8) presentano lunghezze variabili, generalmente comprese tra 6 mm e 70 mm, con diametri equivalenti che vanno da 0,1 mm a 1,20 mm.



*Figura 8 Esempio di fibre di acciaio [11]*

Mentre per le fibre di carbonio abbiamo un diametro compreso tra 6 e 7,5  $\mu\text{m}$ , ma il loro utilizzo nei calcestruzzi presenta alcune problematiche. Una tra queste può essere l'aderenza

tra il carbonio e la pasta cementizia, che è limitata a causa delle loro diverse proprietà chimiche, impedendo reazioni in grado di favorire un'adesione tra i materiali. Pertanto, l'adesione avviene esclusivamente per attrito tra le superfici. Tuttavia, la lunghezza delle fibre di carbonio può aumentare la superficie di contatto, migliorando l'attrito e l'aderenza meccanica, a patto che le fibre non si aggrovino nel getto. È quindi fondamentale garantire una dispersione omogenea delle fibre nel calcestruzzo, in modo da creare un reticolo fitto che possa influenzare positivamente il comportamento meccanico del materiale. Questo approccio consente di massimizzare i benefici delle fibre di carbonio, migliorando la resistenza e la durabilità del calcestruzzo. Un'altra problematica è legata all'assorbimento dell'acqua, a causa della differente natura organica e inorganica dei due materiali. Nelle fasi iniziali, l'acqua può essere trattenuta tra le fibre di carbonio e successivamente rilasciata attraverso fessure nel composito, fenomeno amplificato dall'idrofobicità delle fibre e dalla loro lunghezza.

Le fibre non sono state impiegate direttamente nei campioni, ma le miscele di UHPC sono state utilizzate per realizzare l'incamiciatura dei pilastri in calcestruzzo. L'incamiciatura, ovvero il rivestimento esterno in materiale cementizio ad alte prestazioni, serve a migliorare le caratteristiche meccaniche della struttura esistente. Per simulare il comportamento dei pilastri e valutare in modo accurato l'effetto del confinamento in condizioni reali, sono stati utilizzati cilindri di calcestruzzo con basse prestazioni meccaniche. Questo metodo consente di ripristinare la continuità strutturale persa a seguito dell'innescamento di fessurazioni, fornendo una nuova armatura non danneggiata e assicurando un confinamento efficace al calcestruzzo residuo. L'incamiciatura comporta un incremento locale della resistenza, della rigidezza e, in alcuni casi, anche della duttilità. [7]

### 3.2 Prova in laboratorio

La prova di compressione è stata realizzata dal Professore Gianluca Chiappini, presso il SIMAU dell'UNIVPM tramite una pressa idraulica (fig. 9) dotata di cella di carico, collegata a un terminale che consente di regolare la velocità di esecuzione delle prove. In questa prova, i vari campioni sono stati sottoposti a compressione monoassiale fino a rottura. Il carico è stato applicato esclusivamente alla parte centrale in calcestruzzo di bassa qualità, escludendo il rinforzo. Per ottenere questo, è stato utilizzato un disco in UHPC, progettato appositamente. Questo disco ha una rigidità e una resistenza significativamente superiori di un ordine di grandezza maggiore rispetto al resto del sistema. Si è deciso di applicare il carico unicamente alla parte centrale per simulare una condizione realistica, in cui un aumento di carico si trasferirebbe solo parzialmente al rinforzo. Questo approccio permette di valutare meglio il comportamento del calcestruzzo di bassa qualità, rispecchiando più fedelmente le situazioni pratiche in cui il rinforzo non assorbe completamente lo sforzo. [7]



*Figura 9* Pressa utilizzata per la prova a compressione con set-up di telecamere

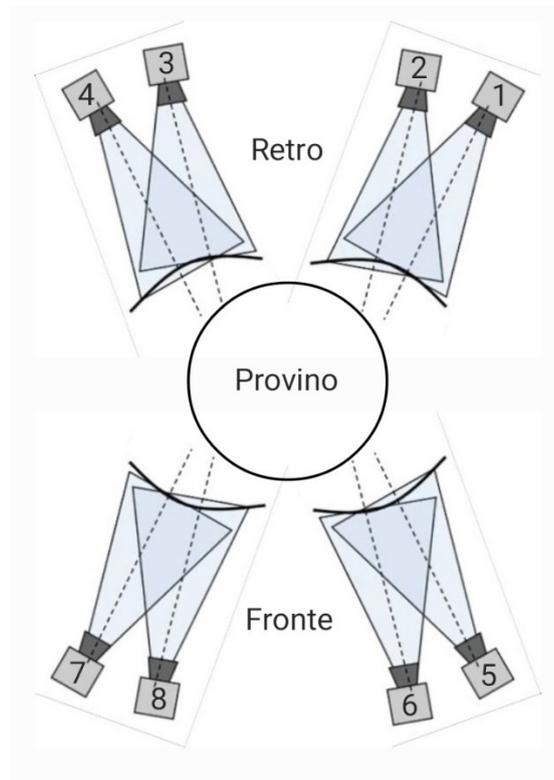
Le deformazioni durante la prova sono state misurate utilizzando la tecnologia della Digital Image Correlation (DIC), un metodo di misurazione senza contatto che misura deformazioni e spostamenti utilizzando software specializzato e telecamere. La base di questa tecnica è l'elaborazione di immagini digitali acquisite dall'oggetto sottoposto a sollecitazione. La capacità di fornire misurazioni ad alta densità e la possibilità di analizzare significativi campi di spostamenti e deformazioni rispetto ai metodi tradizionali sono alcuni dei principali vantaggi della DIC.

Il set-up delle telecamere (fig. 10) è stato configurato in modo da disporre due coppie per lato, due sul retro del provino e due sul fronte, garantendo così la registrazione continua di fotogrammi per l'intera durata della prova. Questa disposizione ha permesso di ottenere una visione completa e dettagliata dell'evoluzione del provino, dal principio alla conclusione dell'esperimento.

Le telecamere utilizzate offrono prestazioni avanzate, come un'elevata risoluzione e la capacità di catturare migliaia di fotogrammi al secondo, garantendo un'eccezionale accuratezza per l'elaborazione successiva delle immagini tramite MatchID.

Le coppie di telecamere frontali (camere 5-6 e camere 7-8) utilizzate avevano una risoluzione di 4000x2000 pixel, mentre quelle posteriori (camere 1-2 e camere 3-4), non essendo in alta definizione, avevano una risoluzione di 1200x1400 pixel.

È stato considerato un sistema di coordinate cartesiane con l'asse x orientato positivamente verso destra, l'asse y orientato positivamente verso l'alto, e l'asse z orientato positivamente in direzione ortogonale al piano xy, uscendo da esso.



*Figura 10 Schematizzazione del set-up delle telecamere per la prova*

Nella tecnologia DIC i provini vengono verniciati con un marker per migliorare la precisione e l'affidabilità della misura dei campi di deformazione superficiale. Questo processo è fondamentale per il corretto funzionamento della tecnica, e la verniciatura viene realizzata creando uno schema di punti casuali (chiamato "speckle pattern") sulla superficie del campione (fig. 7). Viene effettuata per le seguenti ragioni:

- Rilevamento accurato del movimento: la tecnologia DIC si basa sul monitoraggio visivo della superficie del provino attraverso immagini acquisite dalle telecamere. Applicare un pattern ben definito consente al software di correlare i cambiamenti di posizione tra le immagini acquisite prima e dopo la deformazione. Questo pattern facilita il tracciamento accurato del movimento e delle deformazioni del provino.

- **Contrasto elevato:** Il pattern di verniciatura, solitamente composto da punti neri su uno sfondo bianco, aumenta il contrasto visivo, rendendo più facile per il software DIC individuare e tracciare piccoli spostamenti di porzioni della superficie.
- **Distribuzione uniforme delle informazioni:** per ottenere una mappa di deformazione accurata, il pattern applicato deve essere distribuito in modo casuale e uniforme su tutta la superficie del provino. Questo consente al sistema DIC di acquisire informazioni dettagliate sulla deformazione in ogni punto, senza che ci siano aree prive di dati utili.
- **Minimizzazione degli errori di calcolo:** senza un pattern adeguato, il software di correlazione potrebbe avere difficoltà a identificare i cambiamenti di forma della superficie, causando errori nelle misurazioni di spostamento e deformazione. La verniciatura con un marker consente di minimizzare questi errori.

Quindi, la verniciatura con un marker è necessaria per garantire un pattern visibile e tracciabile sulla superficie del provino, indispensabile per il funzionamento della tecnologia DIC, che si basa sulla correlazione delle immagini per misurare con precisione le deformazioni.

Inoltre, è stata eseguita la calibrazione del sistema per ciascuna coppia di telecamere per determinarne le posizioni relative. Il processo di calibrazione inizia posizionando la telecamera e inserendo la carta di calibrazione in entrambi i campi visivi. Successivamente, vengono scattate una serie di immagini mentre la carta di calibrazione viene spostata in diverse posizioni e angolazioni. Il software utilizza specifici algoritmi di elaborazione delle immagini per analizzare i punti di riferimento sulla carta in ciascuna immagine, consentendogli di determinare con precisione le posizioni spaziali delle due telecamere, iterando il processo per tutte le altre coppie. [12]

### 3.3 MatchID

Come già introdotto nel sottocapitolo precedente, è stata utilizzata la tecnologia DIC, in particolare quella 3D (due telecamere in configurazione stereoscopica), generando mappe ad alta risoluzione che rappresentano i campi di deformazione. Questa tecnologia rispetto ad altri metodi della misura della deformazione, come ad esempio gli estensimetri, ha buona risoluzione spaziale e una facilità di set-up elevata, oltre ad essere l'unico metodo efficace per misurare la deformazione di grandi spostamenti.

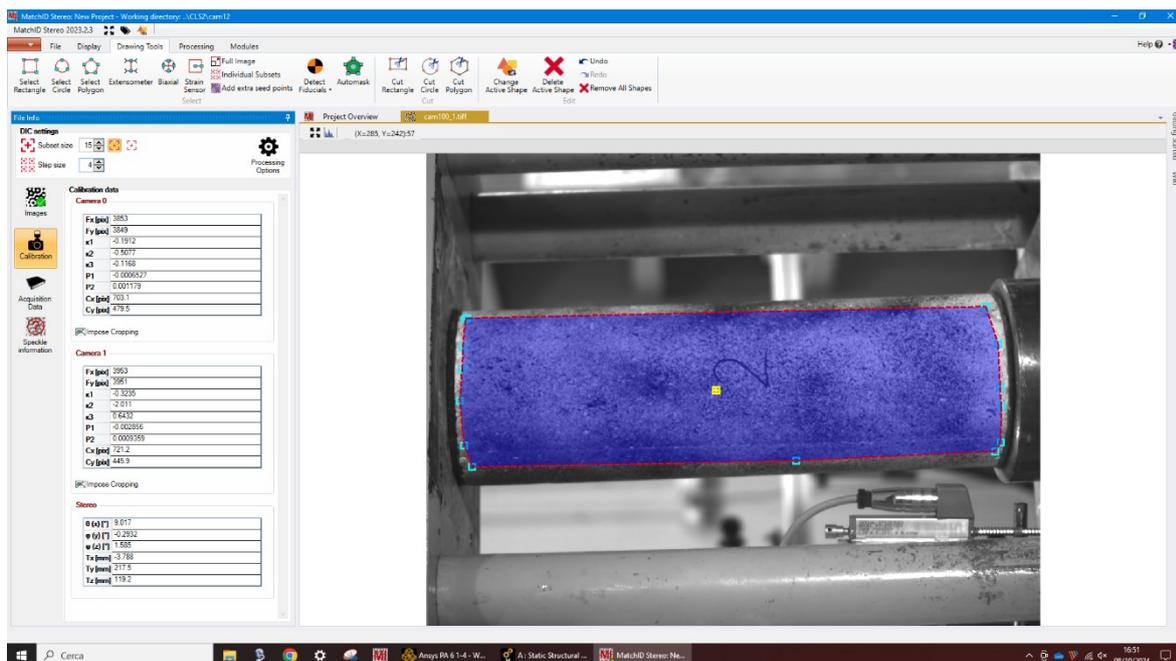
In questa versione, due telecamere vengono posizionate con angolazioni diverse rispetto all'oggetto da analizzare. Grazie a questa configurazione, ogni punto della superficie può essere correlato con specifici pixel dell'immagine. Gli algoritmi DIC confrontano i cambiamenti di posizione dei punti (o "speckles") tra le immagini acquisite durante le diverse fasi della deformazione. Il confronto pixel a pixel permette di calcolare il campo di spostamento e, attraverso ulteriori algoritmi matematici, di derivare il campo di deformazione, solitamente rappresentato con mappe cromatiche o in scala di grigi. [13]

Il software MatchID, impiegato nel contesto della sperimentazione, rappresenta una piattaforma avanzata dedicata all'analisi DIC. Di seguito vengono spiegati i passaggi per l'estrazione dei dati.

Tramite il "camera filename settings" si determina il nome dei file delle immagini acquisite durante il processo, mantenendo un ordine logico, automatizzando il riconoscimento delle immagini e riducendo errori manuali. Questa funzione risulta fondamentale in questo contesto in cui si utilizzano numerose telecamere e si acquisiscono molte immagini. In tutte le elaborazioni l'ordine seguiva un ordine crescente, tranne per le camere 5-6, dove l'ordine è invertito.

Durante l'impostazione di un esperimento DIC, il campo visivo (FOV) richiesto deve essere determinato sulla base della regione di interesse (ROI) del pezzo in esame e delle deformazioni previste. Per massimizzare la risoluzione spaziale, è consigliabile che la ROI occupi quasi tutto il FOV, assicurandosi comunque che la ROI resti visibile anche durante i movimenti. Nel caso del DIC stereo, il FOV effettivo sarà l'area comune osservata da entrambe le telecamere, corrispondente alla stessa regione nello spazio.

Definito il FOV, si sceglie un'immagine di riferimento non deformata, ovvero l'immagine iniziale acquisita prima dell'esecuzione della prova. Utilizzando l'opzione "Drawing tools-Select polygon" si traccia un'area di lavoro rettangolare, facendo attenzione a lasciare dei margini per evitare un eccessivo rumore in fase di elaborazione (fig. 11).



*Figura 11 Schermata MatchID con le varie configurazioni*

Successivamente si impostano i parametri "Subset size" e "Step size":

- Il subset size definisce la dimensione della porzione di immagine che verrà considerata durante il processo di allineamento o registrazione. Viene impostata

come un'area quadrata o rettangolare, che può variare in pixel. Un subset size più piccolo fornirà maggiori dettagli locali, ma potrebbe essere più sensibile al rumore o alle variazioni non rilevanti, viceversa, un subset size più grande può essere meno sensibile al rumore, ma potrebbe perdere dettagli importanti, con il rischio di un allineamento meno accurato. Esistono due tipi di subset, rigidi e deformabili, il primo viene usato quando si presuppone un movimento uniforme senza cambiamenti interni, mentre il secondo quando si permette la deformazione interna, per cui i punti al suo interno possono muoversi indipendentemente, consentendo di catturare cambiamenti locali di forma. In questo caso si è utilizzato subset deformabili.

- Lo step size definisce la distanza in pixel tra i centri dei subset successivi che l'algoritmo analizza per la registrazione. Se lo step size è impostato a un valore alto, l'algoritmo esaminerà porzioni d'immagine più distanti tra loro, il che può rendere il processo più veloce ma meno accurato, mentre un valore più basso per lo step size porta a un'analisi più dettagliata, ma anche a un processo computazionale più intensivo.

In questa elaborazione vengono impostati i valori di "Subset size" pari a 15 e "Step size" pari a 4 per le coppie di telecamere 1-2 e 3-4, invece per le altre coppie i valori di "Subset size" e "Step size" sono rispettivamente di 21 e 10.

Tramite la funzione di cross-correlation è possibile determinare la distanza tra la posizione di un data point, ovvero un punto in cui vengono riportati i risultati del DIC. Si può definire la funzione di errore come la differenza in scala di grigi tra la configurazione iniziale e deformata:

$$Err = \sum_i |S_1 - S_{1,def}|$$

Dove  $S_1$  è un subset di riferimento e  $S_{1,def}$  è lo stesso dopo la deformazione. Se il risultato della funzione è nullo, il subset nella deformazione non si è spostato.

Un subset deformabile può anche cambiare forma e assumere una geometria diversa rispetto alla sua configurazione iniziale. Tuttavia, il processo di image warping riporta il subset deformato alla sua forma originale, il che potrebbe comportare la perdita della funzione di cross-correlation. Dopo aver ottenuto la forma deformata, si distorce nuovamente l'immagine in un quadrato. Se il risultato è ancora errato, il processo viene ripetuto generando un nuovo subset modificato che è diverso dal precedente e viene aggiornato fino a ottenere la migliore corrispondenza tra le immagini.

Altra impostazione fondamentale è caricare i file di calibrazione (fig. 12) su “Calibration”, ottenuti come già descritto nel capitolo precedente, dove ne sono stati realizzati due diversi:

- Calib1: per le prove CLS2, CLS3 e 15SF\_1;
- Calib2: per le prove 15SF\_2, 1CF\_1, 1CF\_2, 1SF\_05CF\_1 e 1SF\_05CF\_2.

```
Cam1_Fx [pixels];3853.00244076835
Cam1_Fy [pixels];3849.41404220429
Cam1_Fs [pixels];-0.122174046875259
Cam1_Kappa 1;-0.19123112837808
Cam1_Kappa 2;-0.507691372951184
Cam1_Kappa 3;-0.116836416174061
Cam1_P1;-0.000652714927549811
Cam1_P2;0.00117895481951158
Cam1_Cx [pixels];703.07432178168
Cam1_Cy [pixels];479.495028269408
Cam2_Fx [pixels];3953.30587747976
Cam2_Fy [pixels];3951.37549501113
Cam2_Fs [pixels];-0.324509304771319
Cam2_Kappa 1;-0.323495308723499
Cam2_Kappa 2;-2.01123284855134
Cam2_Kappa 3;0.643152022235242
Cam2_P1;-0.00285640252608599
Cam2_P2;0.00093594853276987
Cam2_Cx [pixels];721.214542963955
Cam2_Cy [pixels];445.934742708411
Tx [mm];-3.78838032214236
Ty [mm];217.543438272384
Tz [mm];119.225678948268
Theta [deg];9.01694540367862
Phi [deg];-0.293220988054561
Psi [deg];1.58530553457597
```

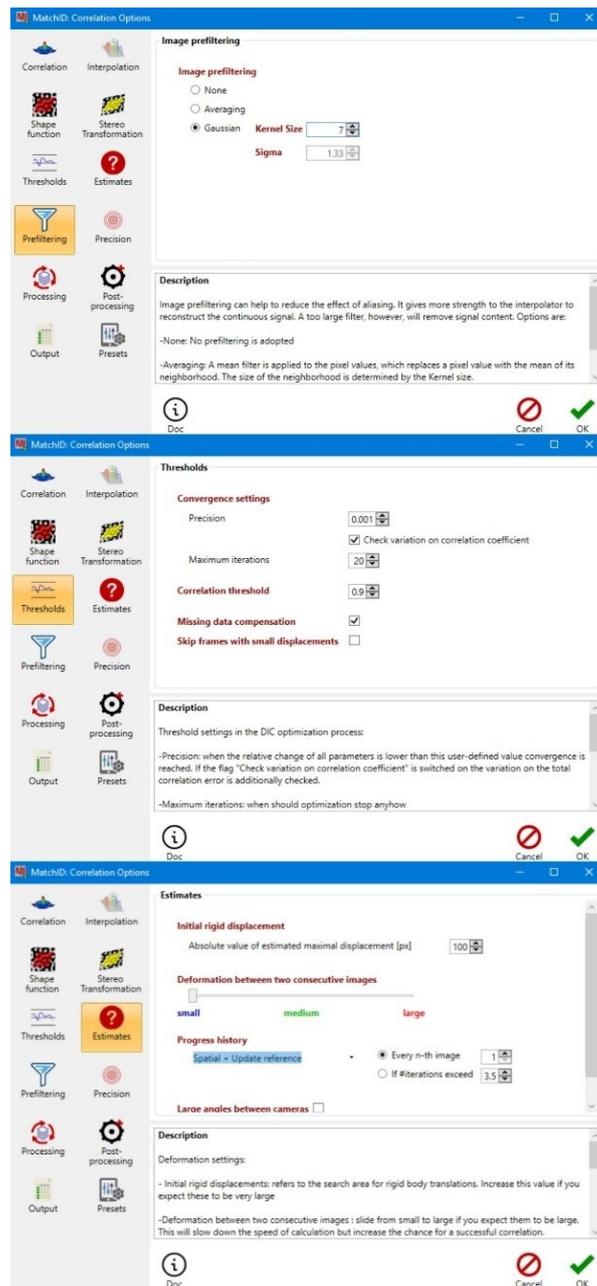
**Figura 12** Esempio file di calibrazione calib1 per telecamere 1-2

Nella fase seguente, tramite il “Processing options” (fig. 13), si vanno a configurare diversi parametri chiave che permettono di migliorare la qualità dell’analisi, adattandole alle esigenze del test.

Il parametro Kernel Size, selezionato durante la fase di Prefiltering, definisce la dimensione dell'area utilizzata dal filtro per migliorare l'immagine prima della correlazione. Questo filtro, applicato ai pixel, serve a ridurre il rumore e migliorare la qualità dello speckle pattern. La scelta della dimensione del kernel bilancia tra la riduzione del rumore e la conservazione dei dettagli, influenzando l'accuratezza dell'analisi DIC. Un kernel più grande rende l'immagine più uniforme, mentre uno più piccolo preserva maggiori dettagli ma riduce meno il rumore.

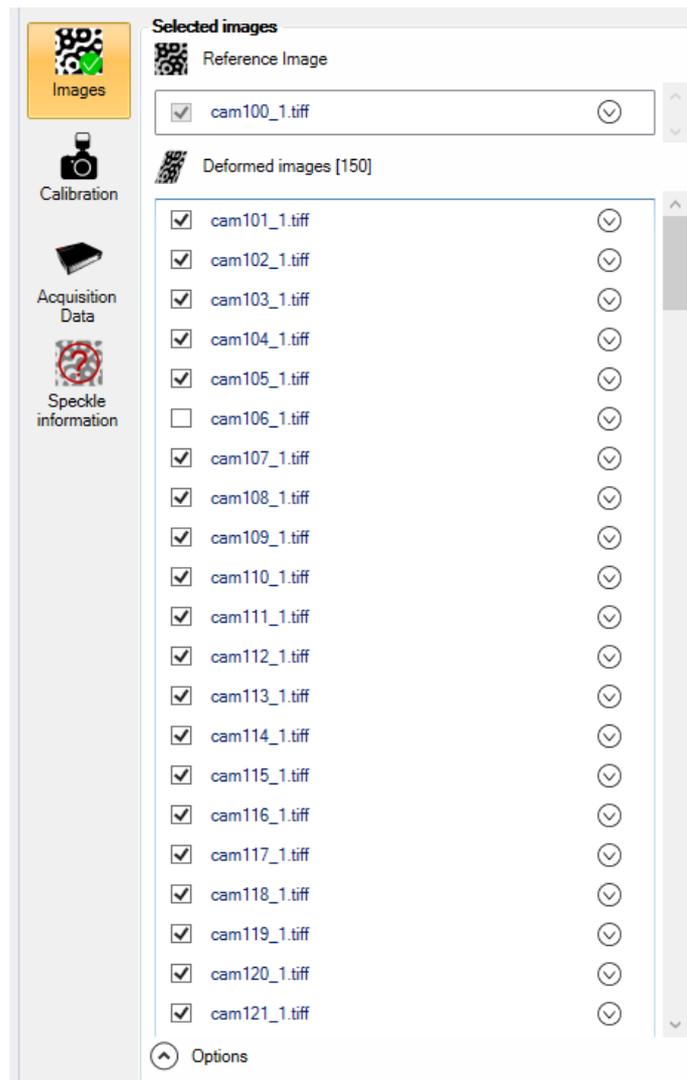
Utilizzando Thresholds e selezionando l'opzione Missing data compensation, si ottiene un vantaggio importante nel gestire i dati mancanti. Questa funzionalità consente di correggere o riempire eventuali aree in cui i dati non sono stati correttamente acquisiti o elaborati.

Quando si seleziona l'opzione Spatial + Update reference nella sezione Estimates, sotto Progress history, il software esegue un aggiornamento continuo dell'immagine di riferimento durante l'analisi. In pratica, invece di confrontare ogni immagine successiva con la prima immagine di riferimento (quella iniziale), viene utilizzata l'ultima deformata come nuovo riferimento per le immagini successive. Garantisce quindi una maggiore stabilità e precisione nella valutazione delle deformazioni, soprattutto in scenari in cui le variazioni geometriche del provino sono rilevanti.



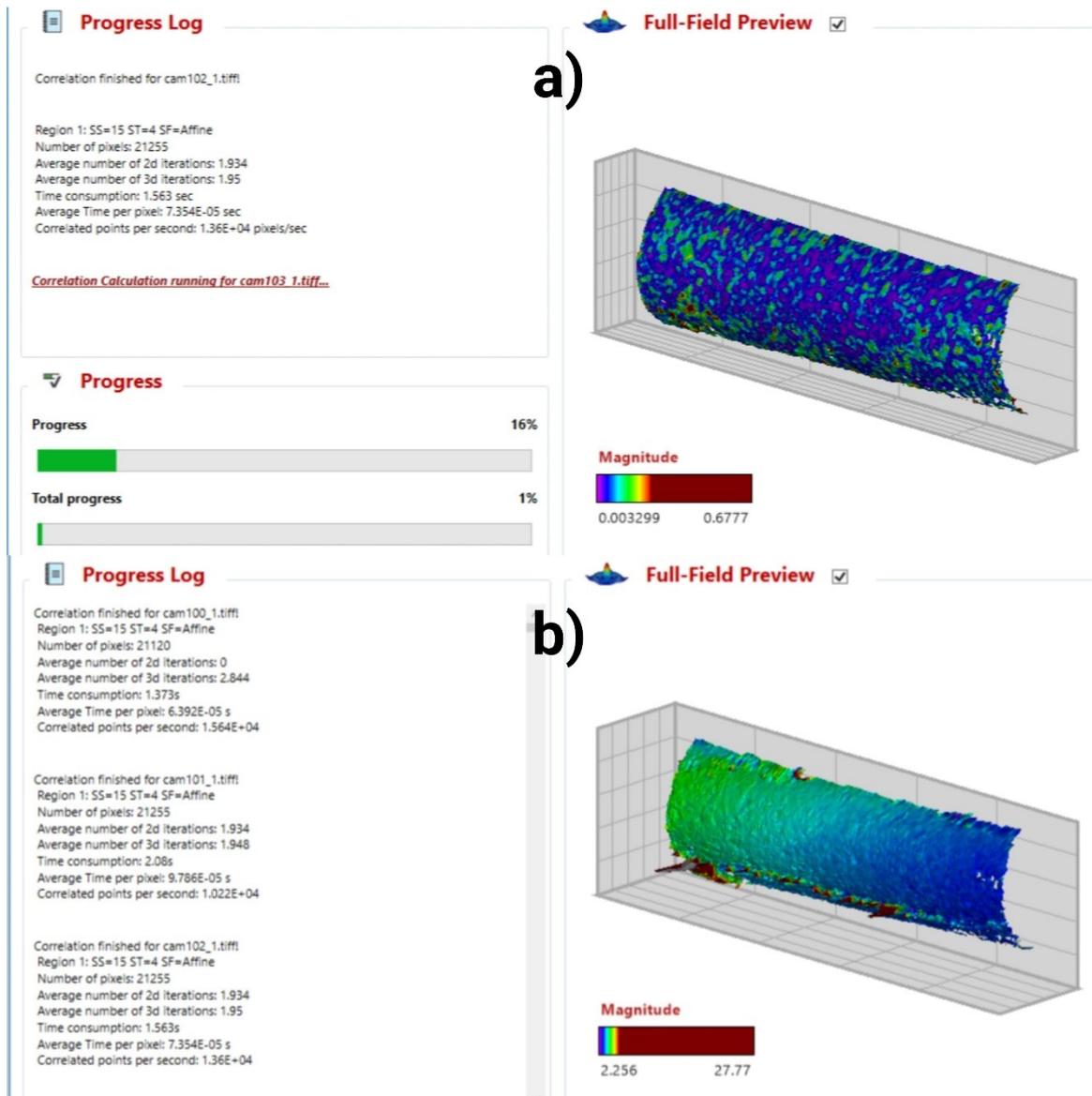
*Figura 13* Varie impostazioni menzionate in “Processing options”

Successivamente, tutte le immagini registrate vengono caricate nella sezione “Deformed images”, selezionandole integralmente. Tuttavia, poiché per ogni acquisizione erano presenti quantità variabili di immagini, a causa della diversa durata della prova o delle differenti caratteristiche delle telecamere, si è deciso di uniformare il processo di selezione scegliendo 150 immagini per ogni elaborazione (fig. 14). Particolare attenzione è stata posta nel mantenere le immagini finali, dove la deformazione risultava più evidente.



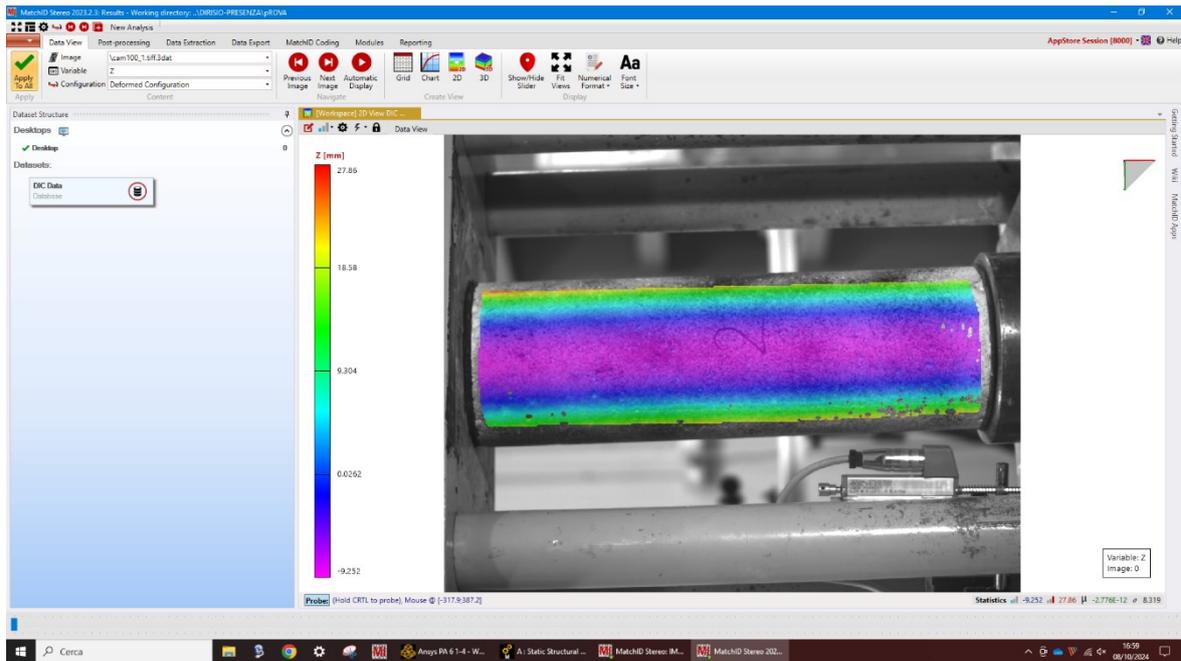
*Figura 14* Processo di selezione delle immagini

Subito dopo, mediante la funzione “Processing” e avviando lo "Start correlation", inizia l'analisi delle immagini, un metodo che utilizza specifici algoritmi per confrontare la distribuzione dei pixel tra le immagini. Durante questo processo, il software rileva le variazioni locali nelle posizioni dei punti all'interno delle immagini deformate, calcolando i campi di spostamento e deformazione. Questo permette di ottenere una mappa dettagliata delle deformazioni (fig. 15), che descrive come e quanto ciascuna parte dell'oggetto o della superficie osservata si sia deformata rispetto all'immagine originale.



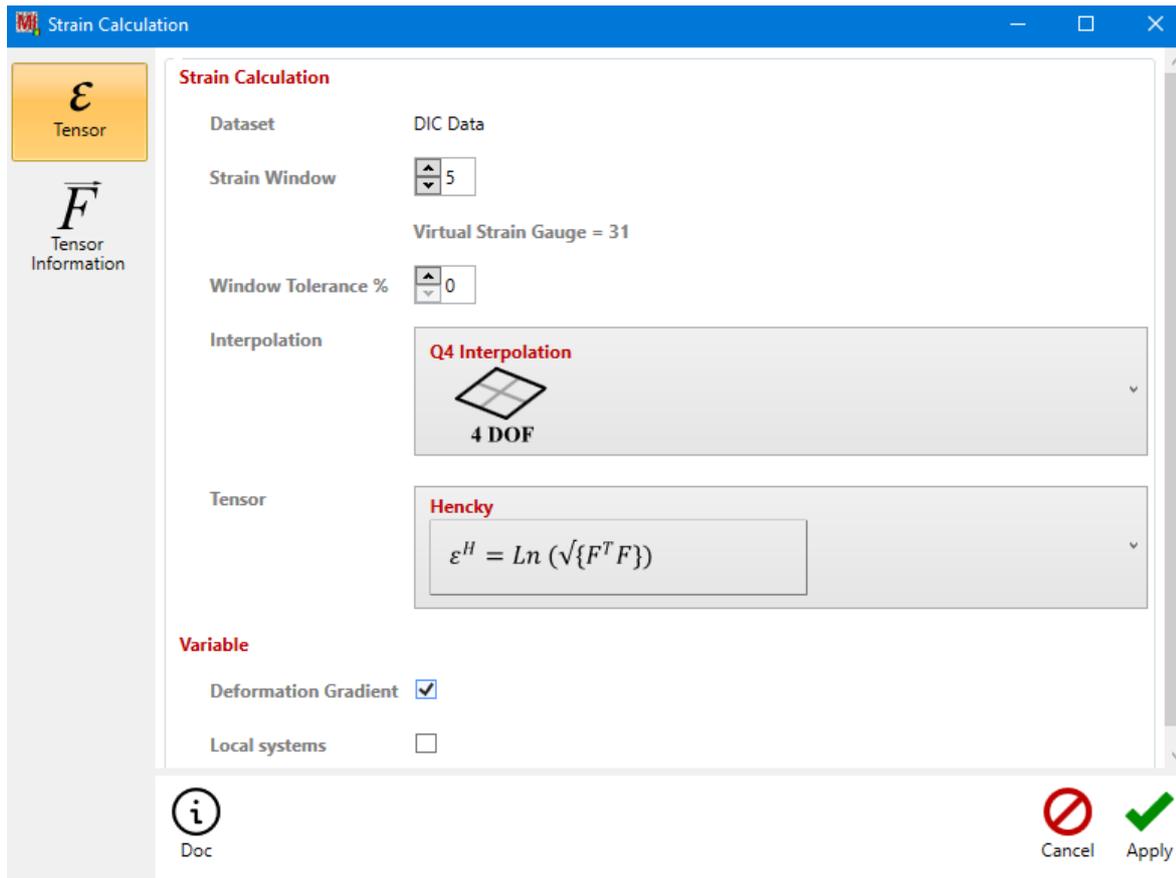
*Figura 15 Inizio Start correlation (a), fine Start correlation (b)*

Utilizzando la funzione “View results”, è possibile visualizzare i risultati dell'analisi effettuata dopo lo start correlation. Nello specifico, si possono osservare sia i campi di deformazione che i campi di spostamento. Questi risultati includono una rappresentazione visiva e quantitativa delle variazioni locali avvenute, fornendo una mappa dettagliata delle deformazioni (fig. 16).



*Figura 16 Mappa fornita dal View results dello spostamento lungo Z*

In “Post-processing”, per l’analisi delle deformazioni si utilizza quella di Hencky (fig. 17). La deformazione di Hencky, o deformazione logaritmica, è una misura che considera in modo continuo e cumulativo le variazioni relative di lunghezza. Grazie alla sua natura logaritmica, offre una rappresentazione più accurata delle deformazioni reali, rendendola particolarmente utile per descrivere i comportamenti di materiali che subiscono cambiamenti significativi nella loro geometria e struttura. Questo approccio è essenziale per un’analisi meccanica realistica del comportamento di materiali come il cemento in condizioni di compressione, poiché permette di catturare in modo più preciso l’andamento delle deformazioni sotto carico.



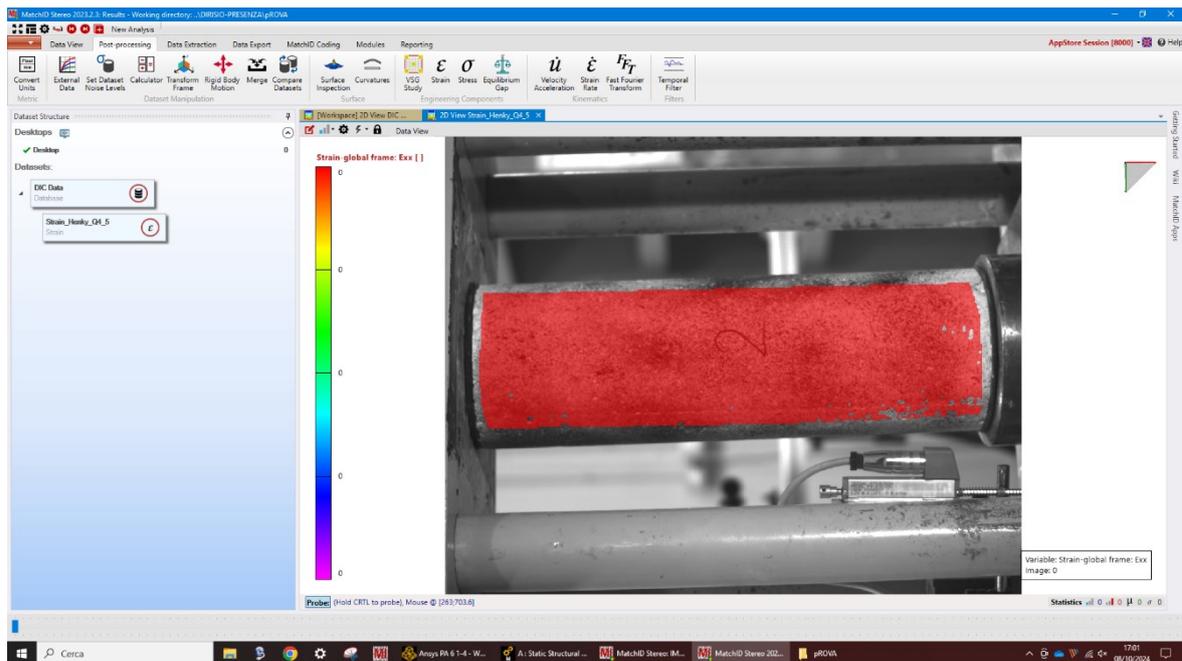
*Figura 17 Formula di Hencky utilizzata da MatchID per il calcolo della deformazione*

Nella formula è possibile trovare “F”, ovvero il Deformation Gradient, che rappresenta una matrice con elementi situati esclusivamente sulla diagonale principale. Questo è dovuto al fatto che "F" è definito dalle derivate delle deformazioni rispetto alla configurazione iniziale:

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

dove  $\lambda$  è l'incremento dello spostamento rispetto alla disposizione non deformata. [7]

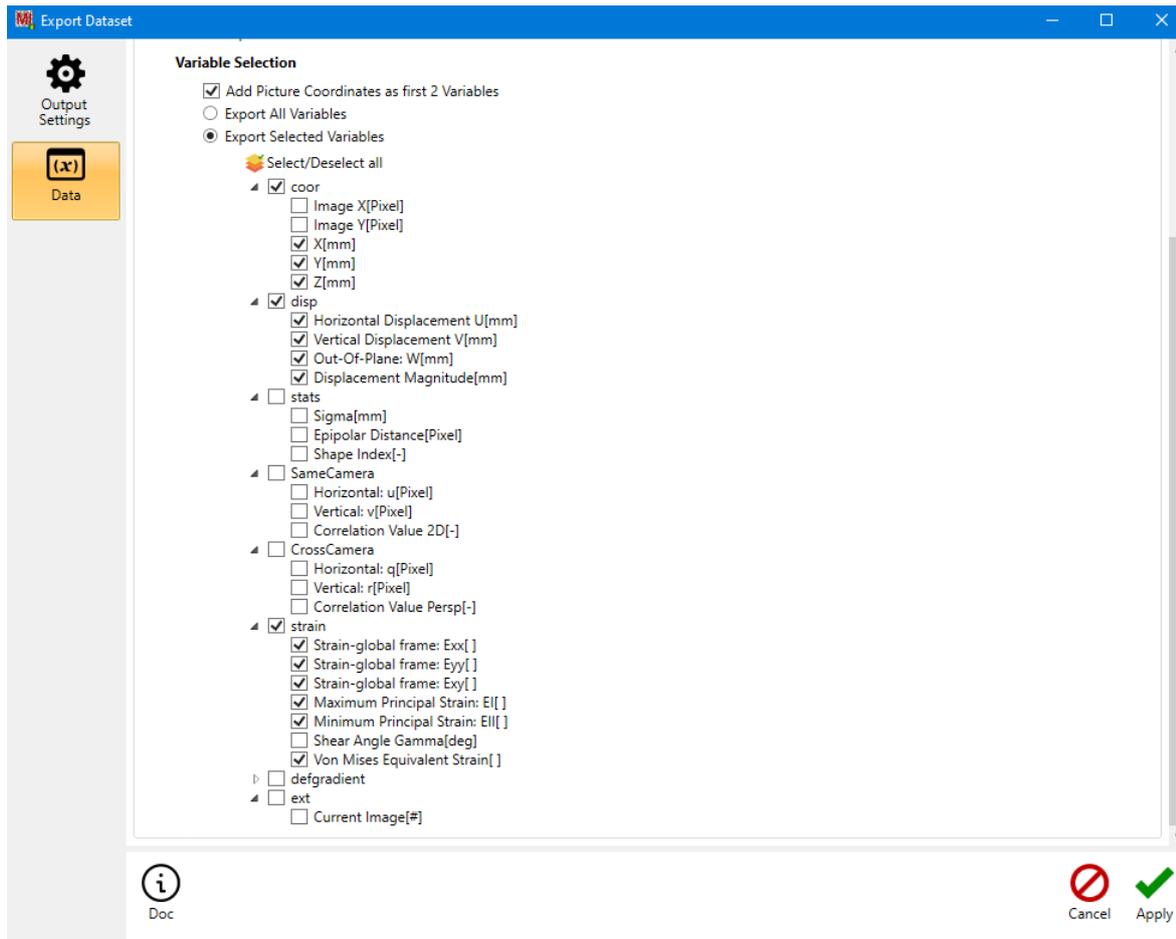
Immediatamente dopo aver applicato la deformazione di Hencky, è possibile visualizzare i valori delle diverse deformazioni nell'area di lavoro (fig. 18). Tuttavia, tali valori risultano nulli poiché l'immagine di riferimento è quella iniziale.



*Figura 18 Deformazione lungo x nulla*

Successivamente, si passa alla fase di esportazione dei dati attraverso la funzione specifica del software "Export as matrix". In questa fase, i dati raccolti durante l'analisi vengono organizzati in una matrice che riflette le informazioni di deformazione e spostamento nei vari punti del dominio analizzato. Il formato matriciale è ideale per permettere una gestione strutturata e ordinata dei dati, facilitando successivamente l'elaborazione e la visualizzazione. I dati esportati includono le coordinate della deformazione misurate lungo i tre assi cartesiani x, y e z, espresse in millimetri. Oltre a queste, sono inclusi anche i valori degli spostamenti lungo le tre direzioni, rispettivamente: lo spostamento orizzontale (u) lungo l'asse x, lo spostamento verticale (v) lungo l'asse y, e lo spostamento fuori dal piano (w), ossia lungo l'asse z. Questi spostamenti, anch'essi espressi in millimetri, forniscono un quadro dettagliato delle variazioni dimensionali del corpo sotto sollecitazione. Parallelamente agli spostamenti, vengono esportati anche i dati relativi alle componenti di deformazione nel piano. Si tratta delle deformazioni normali lungo x ( $\epsilon_{xx}$ ) e y ( $\epsilon_{yy}$ ), nonché della deformazione tangenziale  $\epsilon_{xy}$ , che rappresenta la deformazione di taglio tra gli assi x e

y. A queste si aggiungono le deformazioni principali,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , che descrivono le deformazioni massima e minima che agiscono lungo le direzioni principali del campo di deformazione. Infine, è inclusa la deformazione di von Mises ( $\epsilon_{vm}$ ), una grandezza scalare che sintetizza lo stato di deformazione complessivo, utilizzata in particolare per valutare l'inizio della deformazione plastica in materiali duttili (fig. 19).



*Figura 19* Processo di selezione dei dati da esportare

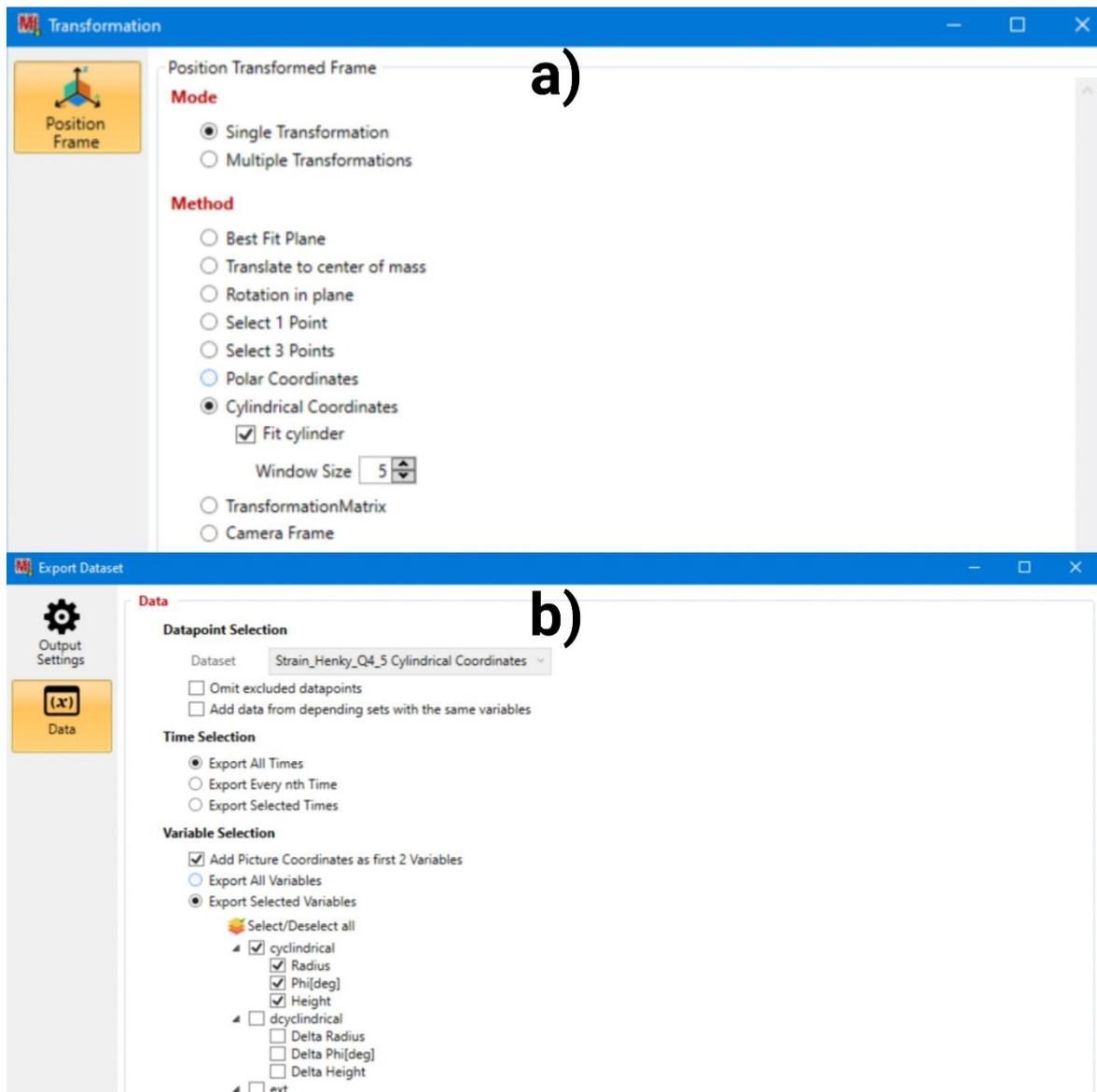
Dopo aver completato la fase preliminare di esportazione dei dati in coordinate cartesiane, il processo descritto prevede un ritorno alla sezione di post-processing, dove viene eseguita una trasformazione del sistema di coordinate. Utilizzando l'opzione "Transform frame", si effettua la conversione delle coordinate dal sistema cartesiano a quello cilindrico. Questo cambiamento di sistema di riferimento è cruciale per l'analisi di geometrie o fenomeni che

presentano una simmetria radiale o assiale, rendendo più agevole la rappresentazione e l'interpretazione dei dati. Una volta selezionate le coordinate cilindriche, viene attivata l'opzione "Fit cylinder", la quale consente di adattare i dati al nuovo sistema di coordinate (fig. 20a). Questo passaggio implica l'applicazione di una trasformazione geometrica che adatta i punti di riferimento ai parametri tipici del sistema cilindrico, ossia il raggio, l'angolo e l'altezza. Il raggio rappresenta la distanza radiale di ciascun punto dall'asse centrale del cilindro, l'angolo è la coordinata angolare che indica la posizione del punto rispetto all'asse di riferimento, e l'altezza definisce la posizione lungo l'asse longitudinale del cilindro.

Una volta completata la trasformazione, si procede nuovamente con la fase di esportazione dei dati. Nella sezione di export, vengono selezionati i nuovi parametri ottenuti dalla conversione in coordinate cilindriche, ossia il raggio, l'angolo e l'altezza, per poterli salvare in formato matriciale (fig. 20b). Questa esportazione è fondamentale per poter analizzare il comportamento del sistema o della struttura oggetto di studio in un contesto che tiene conto delle specifiche geometriche legate alla simmetria cilindrica.

L'intero processo consente di lavorare con un sistema di riferimento più appropriato alla geometria del problema e, una volta completata l'esportazione, i nuovi dati possono essere utilizzati per ulteriori analisi o per confronti con i dati precedenti in coordinate cartesiane.

[14]



*Figura 20 Applicazione Fit cylinder (a), parametri del sistema cilindrico (b)*

In conclusione, il processo descritto relativo all'utilizzo di MatchID rappresenta un ciclo completo di acquisizione, analisi e gestione dei dati sperimentali, portando alla generazione di una vasta gamma di informazioni utili. Al termine di questo processo, si dispone di un'ampia serie di dati esportati in formato Excel (CSV), contenenti spostamenti, deformazioni e i parametri derivanti dalla conversione delle coordinate. Questi file costituiscono una risorsa informativa per condurre ulteriori analisi o approfondimenti tramite l'utilizzo di altri software di calcolo.

### 3.4 MATLAB

Per analizzare l'andamento delle deformazioni ottenute tramite il software MatchID, è possibile generare delle curve utilizzando MATLAB. Questo consente di rappresentare graficamente l'evoluzione delle deformazioni nel tempo e di effettuare analisi quantitative sui dati acquisiti. L'elaborazione delle curve in MATLAB permette di visualizzare l'interpolazione dei valori misurati, identificare eventuali tendenze o anomalie e, se necessario, eseguire altre operazioni per ottenere informazioni aggiuntive sulla risposta del materiale o della struttura sottoposta a test.

MATLAB (Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica, sviluppato in C, che include un linguaggio di programmazione dedicato, creato dalla MathWorks. Questo ambiente consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente e interagire con altri programmi. L'interfaccia di MATLAB è composta da quattro finestre principali che sono:

- Command Window: consente di inserire comandi ed eseguire calcoli in tempo reale.
- Workspace: contiene le variabili dichiarate e permette la gestione e visualizzazione delle stesse attraverso vari comandi.
- Current Directory: consente di esplorare il contenuto delle cartelle del sistema e di aprire file compatibili con MATLAB.
- Command History: mostra la cronologia dei comandi eseguiti, organizzati per data e ora, permettendo di rieseguire i comandi con un doppio click. [15]

Il primo script utilizzato, denominato “salva”, è progettato per gestire e analizzare i dati ottenuti da MatchID, ottenendo matrici (array) tridimensionali, e salvandoli in nuovi file MAT per elaborazioni future. Di seguito è riportato parte dello script descritto solo per una coppia di telecamere, dato che il procedimento è analogo anche per le altre coppie (fig. 21):

```

1 clear
2 clc
3 close all
4
5
6 ref_cam=7;
7
8 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\el'
9
10
11 listing=dir;
12
13
14 i=1;
15 for n=3:length(listing)
16     a=listing(n).name;
17     if length(a)==21
18         imm_tot(i,1) = str2num(char(extractBetween(a,'_','_')));
19         i=i+1;
20     end
21 end
22
23
24
25 %%
26
27 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\r_cyl'
28 for ii = 1:length(imm_tot)
29     imm_num = imm_tot(ii);
30     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.\
tiff_r_cyl.csv'])
31     eval(['r_78(:,:,,' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(
ref_cam,'%d') '_tiff_r_cyl;'])
32     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '\
_tiff_r_cyl'])
33 end
34
35 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\phi_cyl'
36 for ii = 1:length(imm_tot)
37     imm_num = imm_tot(ii);
38     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.\
tiff_phi_cyl.csv'])
39     eval(['th_78(:,:,,' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(
ref_cam,'%d') '_tiff_phi_cyl;'])
40     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '\
_tiff_phi_cyl'])
41 end
42
43 app=th_78(:,:,1);
44 mmm=-min(app(:))+180;
45 th_78=th_78+mmm;
46
47 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\z_cyl'
48 for ii = 1:length(imm_tot)
49     imm_num = imm_tot(ii);
50     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.\
tiff_z_cyl.csv'])
51     eval(['z_78(:,:,,' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(

```

```

(ref_cam,'%d') '_tiff_z_cyl;'])
52     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_z_cyl'])
53 end
54
55
56 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\u'
57 for ii = 1:length(imm_tot)
58     imm_num = imm_tot(ii);
59     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.tiff_u.
csv'])
60     eval(['u_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str
(ref_cam,'%d') '_tiff_u;'])
61     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_u'])
62 end
63
64 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\el'
65 for ii = 1:length(imm_tot)
66     imm_num = imm_tot(ii);
67     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.
tiff_el.csv'])
68     eval(['el_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str
(ref_cam,'%d') '_tiff_el;'])
69     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_el'])
70 end
71
72 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\evm'
73 for ii = 1:length(imm_tot)
74     imm_num = imm_tot(ii);
75     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.
tiff_evm.csv'])
76     eval(['evm_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_'
num2str(ref_cam,'%d') '_tiff_evm;'])
77     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_evm'])
78 end
79
80 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\exx'
81 for ii = 1:length(imm_tot)
82     imm_num = imm_tot(ii);
83     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.
tiff_exx.csv'])
84     eval(['exx_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_'
num2str(ref_cam,'%d') '_tiff_exx;'])
85     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_exx'])
86 end
87
88 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\eyy'
89 for ii = 1:length(imm_tot)
90     imm_num = imm_tot(ii);
91     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.
tiff_eyy.csv'])
92     eval(['eyy_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_'
num2str(ref_cam,'%d') '_tiff_eyy;'])
93     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d')
'_tiff_eyy'])

```

```

'_tiff_eyy'])
94 end
95
96 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\exy'
97 for ii = 1:length(imm_tot)
98     imm_num = imm_tot(ii);
99     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.\
tiff_exy.csv'])
100     eval(['exy_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' \
num2str(ref_cam,'%d') '_tiff_exy;'])
101     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') \
'_tiff_exy'])
102 end
103
104 cd 'C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2\risultati78-CLS2\e2'
105 for ii = 1:length(imm_tot)
106     imm_num = imm_tot(ii);
107     eval(['load cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') '.\
tiff_e2.csv'])
108     eval(['e2_78(:, :, ' num2str(ii) ') = cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str \
(ref_cam,'%d') '_tiff_e2;'])
109     eval(['clear cam_' num2str(imm_num,'%d') '_' num2str(ref_cam,'%d') \
'_tiff_e2'])
110 end
111
112
113 cd C:\Users\prese\Desktop\tirocinio\CLS2
114
115 save dati_CLS2_78 exx_78 evm_78 e1_78 eyy_78 exy_78 e2_78 u_78 th_78 r_78 th_78 \
z_78 imm_tot

```

**Figura 21** Script "salva\_CLS2" per la prova CLS2, telecamere 7-8

Il suo funzionamento inizia con l'inizializzazione di un riferimento numerico per una telecamera, assegnato alla variabile *ref\_cam*, con valore 7. Successivamente, viene cambiata la directory di lavoro spostandosi nella cartella contenente i risultati.

Nella fase seguente, lo script crea una lista dei file presenti nella directory attuale mediante il comando *dir*. Utilizzando un ciclo *for*, che parte dal terzo elemento per ignorare i primi due, vengono estratti i nomi dei file che contengono esattamente 21 caratteri. Per ciascun nome di file valido, viene estratto un numero compreso tra due caratteri di sottolineatura (“\_”), convertito in un valore numerico, e successivamente memorizzato nell'array *imm\_tot*.

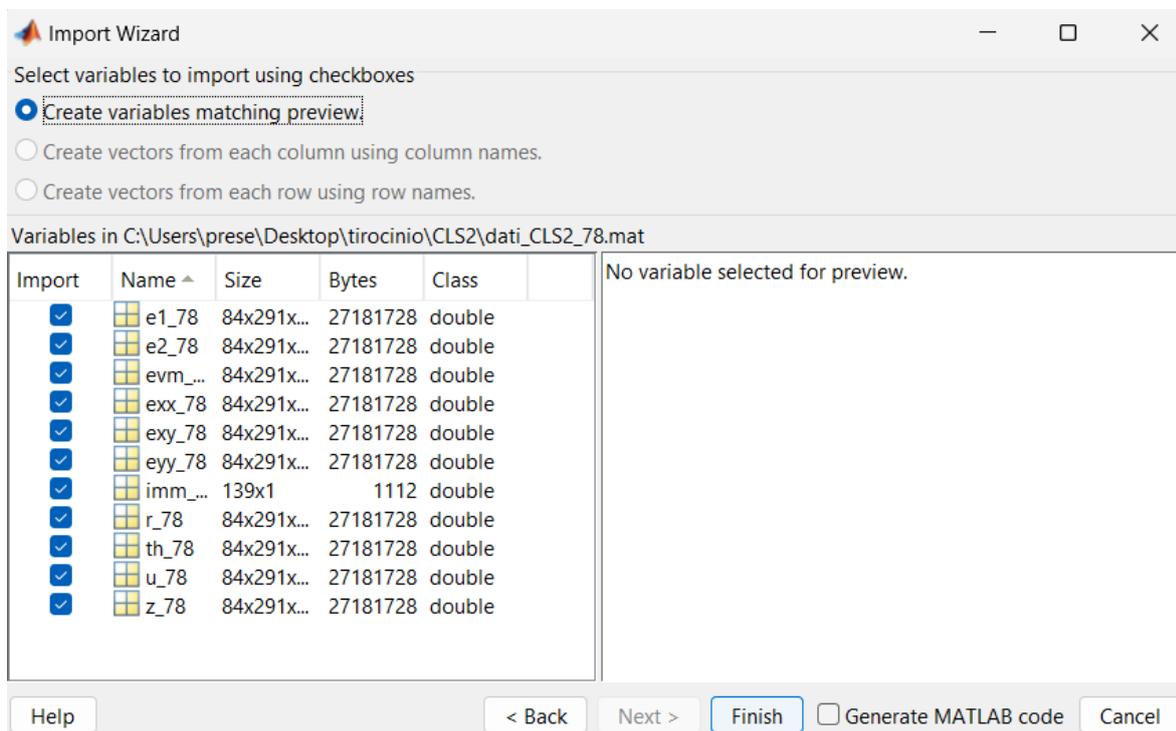
Lo script continua cambiando directory più volte per accedere a diverse cartelle contenenti dati relativi a parametri specifici come le coordinate cilindriche (*r\_cyl*, *phi\_cyl*, *z\_cyl*) e altre grandezze legate alla deformazione e alle proprietà meccaniche del sistema. Per ogni parametro, i file CSV corrispondenti ai numeri di immagine presenti in *imm\_tot* vengono caricati tramite l'uso del comando *eval*, che permette di gestire dinamicamente i nomi dei file. I dati caricati vengono organizzati in array tridimensionali, come *r\_78*, *th\_78*, *z\_78*, *u\_78*, e così via.

Dopo aver caricato i dati relativi all'angolo cilindrico contenuti nella cartella *phi\_cyl*, lo script esegue una correzione sull'array *th\_78*. In particolare, viene determinato il valore minimo dell'array relativo alla prima immagine e, successivamente, viene sommata una costante ottenuta sottraendo questo valore minimo da 180, al fine di riallineare gli angoli su tutte le immagini.

Lo stesso processo di caricamento viene ripetuto per altri parametri di deformazione, tra cui *exx*, *eyy*, *exy*, *e1*, *e2*, e il parametro equivalente di deformazione *evm*. Anche in questo caso, i dati vengono letti da file CSV con l'utilizzo di *eval*, e memorizzati in array tridimensionali.

Alla fine del processo, lo script conclude salvando tutti gli array caricati, che includono *exx\_78*, *evm\_78*, *e1\_78*, *eyy\_78*, *exy\_78*, *e2\_78*, *u\_78*, *th\_78*, *r\_78*, *z\_78* e *imm\_tot*, in un file chiamato “dati\_CLS2\_78” (fig. 22) all'interno della directory principale.

Il codice si estende seguendo la stessa struttura di codice per diversi set di dati modificando il valore di *ref\_cam*, consentendo di processare in modo sistematico considerando tutte le altre coppie di telecamere.



*Figura 22 File MAT “dati\_CLS2\_78” con matrici tridimensionali*

Dopo aver salvato i dati elaborati nel primo script “salva”, questi vengono successivamente caricati e analizzati nel secondo script “curve” (fig. 23). In questo passaggio, si procede al calcolo delle medie delle deformazioni e degli spostamenti relativi a ciascuna immagine, con l'obiettivo di rappresentarne l'andamento complessivo.

```

1 clear
2 clc
3 close all
4
5 ref_cam=7;
6
7
8 load dati_CLS2_78
9 load dati_CLS2_56
10 load dati_CLS2_34
11 load dati_CLS2_12
12
13 %%
14
15 for n = 1:length(imm_tot)
16     app=(exx_78(:, :, n));
17     Ex_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
18
19     app=(eey_78(:, :, n));
20     Ey_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
21
22     app=(exy_78(:, :, n));
23     Exy_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
24
25     app=(e1_78(:, :, n));
26     E1_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
27
28     app=(e2_78(:, :, n));
29     E2_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
30
31     app=(evm_78(:, :, n));
32     EVM_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
33
34     app=(u_78(:, :, n));
35     U_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
36 end
37
38 figure
39 hold on
40 plot(Ex_78, 'r', 'DisplayName', 'Ex')
41 plot(Ey_78, 'g', 'DisplayName', 'Ey')
42 plot(Exy_78, 'b', 'DisplayName', 'Exy')
43 plot(E1_78, 'k', 'DisplayName', 'E1')
44 plot(E2_78, 'm', 'DisplayName', 'E2')
45 plot(EVM_78, 'c', 'DisplayName', 'EVM')
46 xlabel('Immagini')
47 ylabel('Deformazioni')
48 title('Andamento deformazione provino CLS2 cam78')
49 legend({'Ex', 'Ey', 'Exy', 'E1', 'E2', 'EVM'}, 'Location', 'northwest')
50 lgd = legend;
51 lgd.NumColumns = 2;
52
53 %%
54
55
56 for n = 1:length(imm_tot56)
57     app=(exx_56(:, :, n));
58     Ex_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');

```

```

59
60     app=(eyy_56(:, :, n));
61     Ey_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
62
63     app=(exy_56(:, :, n));
64     Exy_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
65
66     app=(e1_56(:, :, n));
67     E1_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
68
69     app=(e2_56(:, :, n));
70     E2_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
71
72     app=(evm_56(:, :, n));
73     EVM_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
74
75     app=(u_56(:, :, n));
76     U_56(n)=mean(app(:), 'omitnan');
77 end
78
79 figure
80 hold on
81 plot(Ex_56, 'r', 'DisplayName', 'Ex')
82 plot(Ey_56, 'g', 'DisplayName', 'Ey')
83 plot(Exy_56, 'b', 'DisplayName', 'Exy')
84 plot(E1_56, 'k', 'DisplayName', 'E1')
85 plot(E2_56, 'm', 'DisplayName', 'E2')
86 plot(EVM_56, 'c', 'DisplayName', 'EVM')
87 xlabel('Immagini')
88 ylabel('Deformazioni')
89 title('Andamento deformazione provino CLS2 cam56')
90 legend({'Ex', 'Ey', 'Exy', 'E1', 'E2', 'EVM'}, 'Location', 'northwest')
91 lgd = legend;
92 lgd.NumColumns = 2;
93
94 %%
95
96 for n = 1:length(imm_tot34)
97     app=(exx_34(:, :, n));
98     Ex_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
99
100     app=(eyy_34(:, :, n));
101     Ey_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
102
103     app=(exy_34(:, :, n));
104     Exy_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
105
106     app=(e1_34(:, :, n));
107     E1_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
108
109     app=(e2_34(:, :, n));
110     E2_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
111
112     app=(evm_34(:, :, n));
113     EVM_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');
114
115     app=(u_34(:, :, n));
116     U_34(n)=mean(app(:), 'omitnan');

```

```

117 end
118
119 figure
120 hold on
121 plot(Ex_34,'r','DisplayName','Ex')
122 plot(Ey_34,'g','DisplayName','Ey')
123 plot(Exy_34,'b','DisplayName','Exy')
124 plot(E1_34,'k','DisplayName','E1')
125 plot(E2_34,'m','DisplayName','E2')
126 plot(EVM_34,'c','DisplayName','EVM')
127 xlabel('Immagini')
128 ylabel('Deformazioni')
129 title('Andamento deformazione provino CLS2 cam34')
130 legend({'Ex','Ey','Exy','E1','E2','EVM'},'Location','northwest')
131 lgd = legend;
132 lgd.NumColumns = 2;
133
134 %%
135
136 for n = 1:length(imm_tot12)
137     app=(exx_12(:, :, n));
138     Ex_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
139
140     app=(eey_12(:, :, n));
141     Ey_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
142
143     app=(exy_12(:, :, n));
144     Exy_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
145
146     app=(e1_12(:, :, n));
147     E1_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
148
149     app=(e2_12(:, :, n));
150     E2_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
151
152     app=(evm_12(:, :, n));
153     EVM_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
154
155     app=(u_12(:, :, n));
156     U_12(n)=mean(app(:), 'omitnan');
157 end
158
159 figure
160 hold on
161 plot(Ex_12,'r','DisplayName','Ex')
162 plot(Ey_12,'g','DisplayName','Ey')
163 plot(Exy_12,'b','DisplayName','Exy')
164 plot(E1_12,'k','DisplayName','E1')
165 plot(E2_12,'m','DisplayName','E2')
166 plot(EVM_12,'c','DisplayName','EVM')
167 xlabel('Immagini')
168 ylabel('Deformazioni')
169 title('Andamento deformazione provino CLS2 cam12')
170 legend({'Ex','Ey','Exy','E1','E2','EVM'},'Location','northwest')
171 lgd = legend;
172 lgd.NumColumns = 2;
173

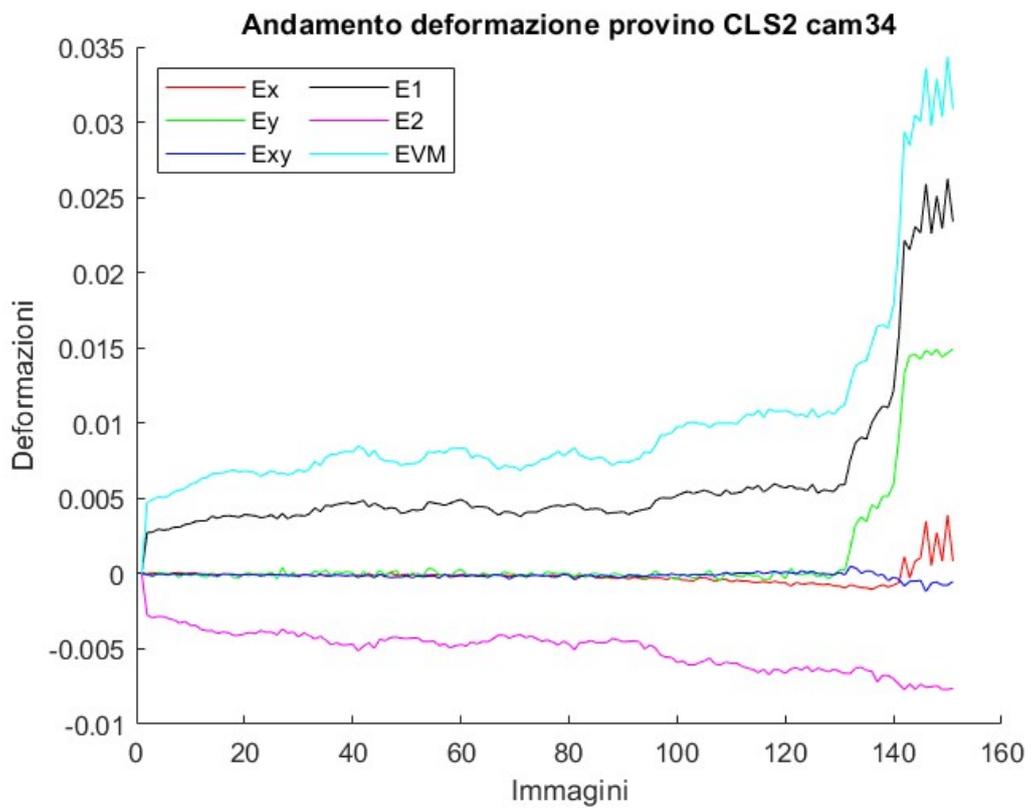
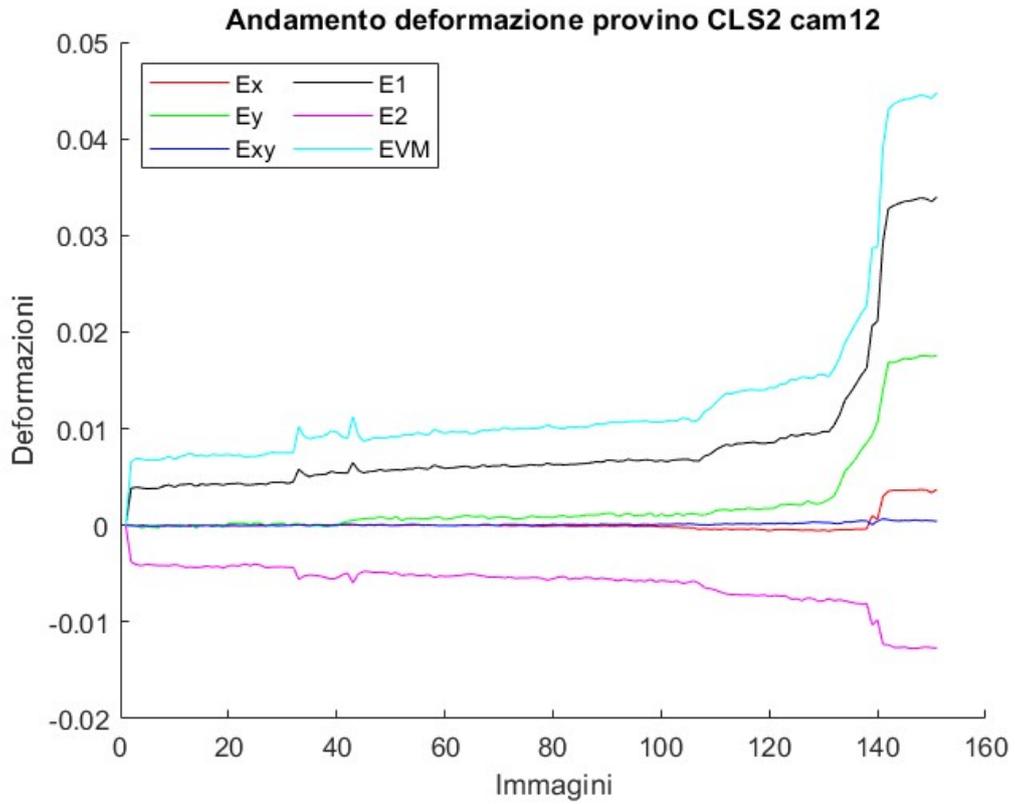
```

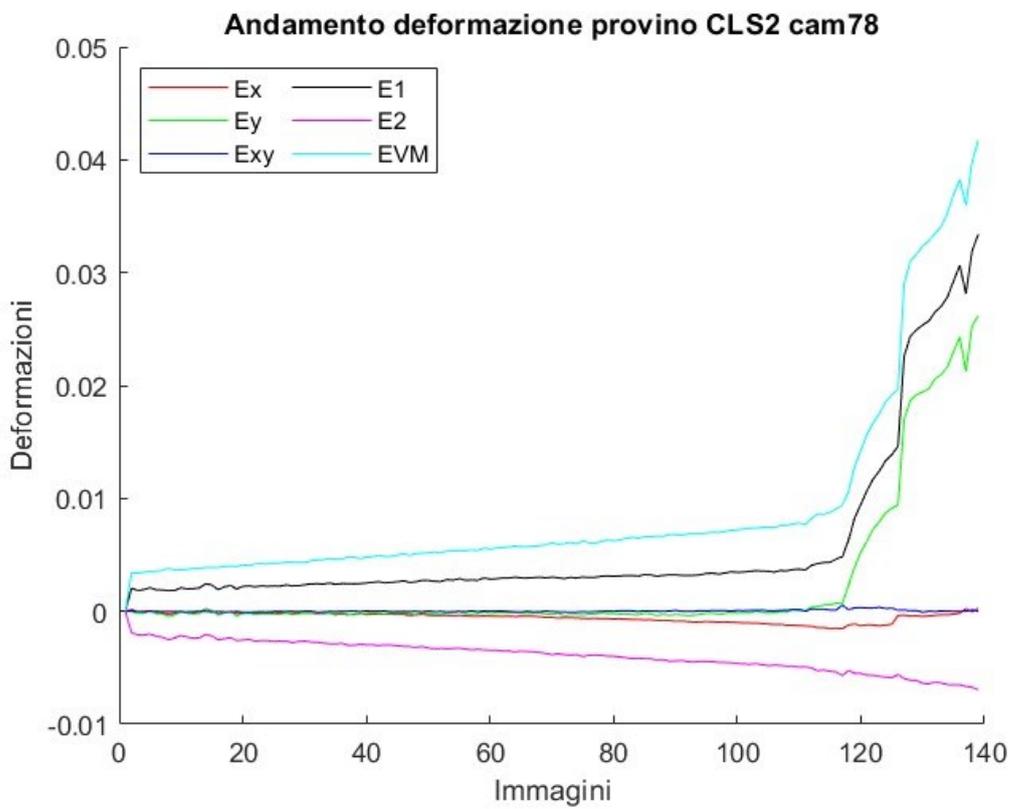
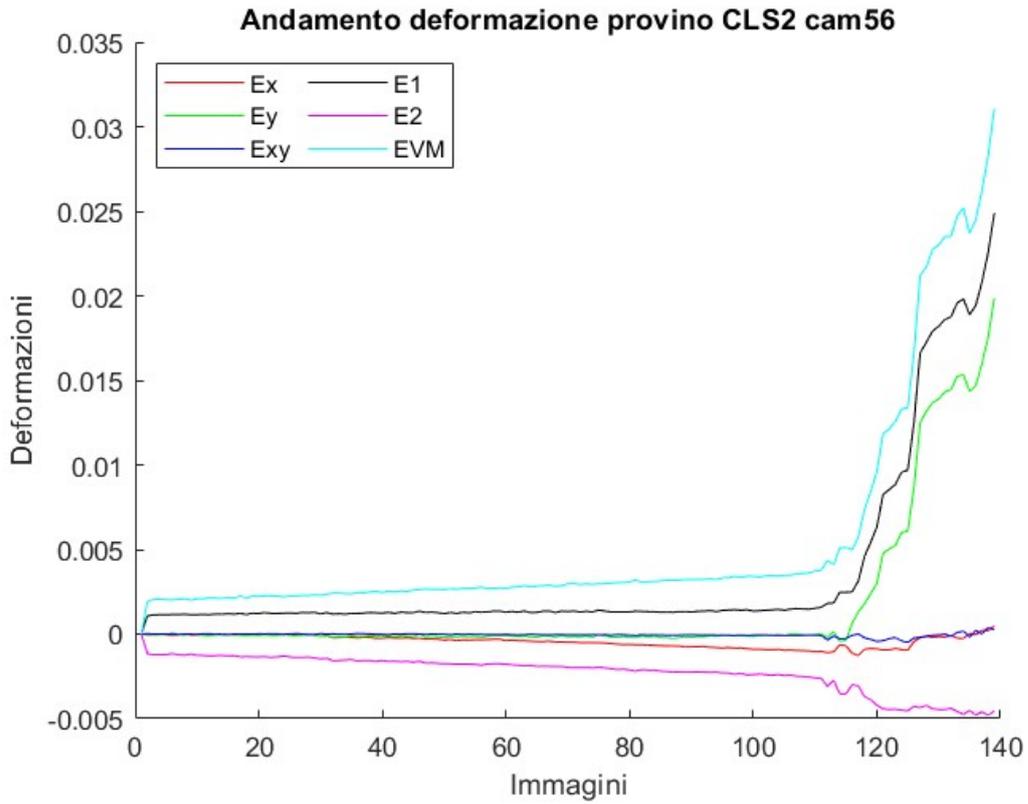
*Figura 23 Script "curve\_CLS2" complete di tutte le coppie di telecamere*

Questo script inizia dal caricamento dei dati salvati nel file “dati\_CLS2”, dopo il quale esegue una serie di operazioni per ciascun elemento dell'array *imm\_tot*, che contiene il numero delle immagini.

Per ogni immagine, i dati relativi alle deformazioni (*exx*, *eyy*, *exy*, *e1*, *e2*, *evm*) e allo spostamento (*u*) vengono estratti e processati. Per ogni parametro, viene calcolata la media di tutti i valori presenti nella matrice corrispondente a quella specifica immagine, ignorando eventuali valori mancanti. Le medie calcolate per ciascun parametro vengono quindi memorizzate in vettori distinti: *Ex*, *Ey*, *Exy*, *E1*, *E2*, *EVM* e *U*, ciascuno contenente le medie relative a tutte le immagini caricate.

Nella parte finale, dopo il ciclo *for*, lo script genera dei grafici (fig. 24) in cui vengono tracciate le curve corrispondenti ai diversi parametri di deformazione calcolati, utilizzando diversi colori per distinguerli: rosso per *Ex*, verde per *Ey*, blu per *Exy*, nero per *E1*, magenta per *E2*, e ciano per *EVM*. L'asse delle ascisse rappresenta le immagini, mentre quello delle ordinate rappresenta le deformazioni.





**Figura 24** Grafici dell'andamento delle deformazioni ottenuti da "curve\_CLS2"

### 3.5 Sintesi delle problematiche e successiva interpretazione dei dati

A seguito dell'analisi condotta mediante lo script "curve", si è riscontrata una difficoltà nell'interpretare correttamente l'andamento delle deformazioni. In particolare, si è osservato che, mentre le deformazioni  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  tendevano verso lo zero, le deformazioni principali  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , insieme alla deformazione di von Mises, presentavano valori significativamente più elevati. Questo risultato appariva contraddittorio, poiché le deformazioni principali e quella di von Mises derivano da calcoli che includono proprio  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ .

Per risolvere tale ambiguità e comprendere meglio i fenomeni in atto, è stato necessario sviluppare un ulteriore script, denominato "mappe" (fig. 25). Questo nuovo strumento ha consentito di ottenere una rappresentazione tridimensionale del provino, fornendo una visione più chiara e dettagliata dei punti di concentrazione delle deformazioni presenti. La visualizzazione con una colorbar, inoltre, ha facilitato l'osservazione delle fratture in fase di sviluppo, permettendo un'analisi più accurata delle loro caratteristiche e del loro andamento.

Le elaborazioni sono state applicate a tutte le prove, concentrandosi però esclusivamente su determinati frame, selezionando quelli in cui i punti di concentrazione delle deformazioni risultavano più visibili. Questo processo è stato condotto solo per le coppie di telecamere che permettevano una chiara osservazione di tali fenomeni, garantendo così una maggiore precisione nell'analisi dei dati.

```

1 clear
2 clc
3 close all
4
5 load dati_CLS2_78
6
7
8 frame=135;
9
10 X_78=r_78(:,:,frame).*cos(deg2rad(th_78(:,:,frame)));
11 Y_78=r_78(:,:,frame).*sin(deg2rad(th_78(:,:,frame)));
12 Z_78=-z_78(:,:,frame);
13
14 EVM_78=evm_78(:,:,frame);
15 Ex_78=exx_78(:,:,frame);
16 Ey_78=eyy_78(:,:,frame);
17 Exy_78=exy_78(:,:,frame);
18 El_78=e1_78(:,:,frame);
19 E2_78=e2_78(:,:,frame);
20
21 figure1 = figure(1);
22 hold on
23 title('ε_V_M')
24 surface(X_78,Y_78,Z_78,EVM_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
25 axis equal
26 colorbar
27 caxis([-0.01 0.01])
28 box(gca,'on');
29 grid(gca,'on');
30
31 figure2 = figure(2);
32 hold on
33 title('ε_x')
34 surface(X_78,Y_78,Z_78,Ex_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
35 axis equal
36 colorbar
37 caxis([-0.01 0.01])
38 box(gca,'on');
39 grid(gca,'on');
40
41 figure3 = figure(3);
42 hold on
43 title('ε_y')
44 surface(X_78,Y_78,Z_78,Ey_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
45 axis equal
46 colorbar
47 caxis([-0.01 0.01])
48 box(gca,'on');
49 grid(gca,'on');
50
51 figure4 = figure(4);
52 hold on
53 title('ε_x_y')
54 surface(X_78,Y_78,Z_78,Exy_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
55 axis equal
56 colorbar
57 caxis([-0.01 0.01])
58 box(gca,'on');

```

```

59 grid(gca,'on');
60
61 figure5 = figure(5);
62 hold on
63 title('ε_1')
64 surface(X_78,Y_78,Z_78,E1_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
65 axis equal
66 colorbar
67 caxis([-0.01 0.01])
68 box(gca,'on');
69 grid(gca,'on');
70
71 figure6 = figure(6);
72 hold on
73 title('ε_2')
74 surface(X_78,Y_78,Z_78,E2_78,'LineStyle','none','FaceAlpha',1)
75 axis equal
76 colorbar
77 caxis([-0.01 0.01])
78 box(gca,'on');
79 grid(gca,'on');
80
81 xlabel('$x$ (mm)','Interpreter','Latex')
82 ylabel('$y$ (mm)','Interpreter','Latex')
83 zlabel('$z$ (mm)','Interpreter','Latex')

```

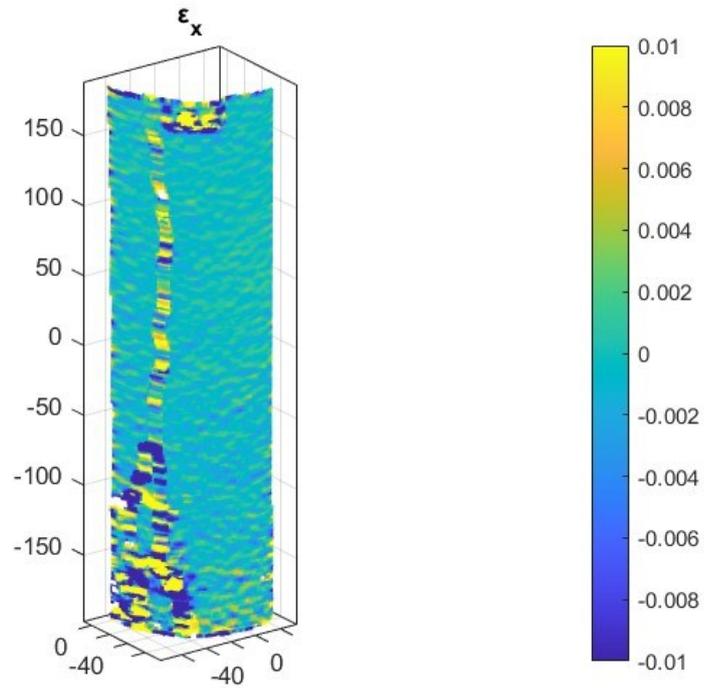
**Figura 25** Script "mappe135\_CLS2\_78" completo, per frame 135 e telecamere 7-8

Lo script fornisce una rappresentazione tridimensionale delle deformazioni su un provino specifico, utilizzando i dati salvati in precedenza. Dopo aver caricato il file contenente i dati “dati\_CLS2\_78”, viene selezionato un particolare frame, identificato dalla variabile *frame*, per cui le deformazioni verranno visualizzate. Le coordinate tridimensionali del provino vengono calcolate a partire dalle coordinate cilindriche  $r_{78}$ ,  $th_{78}$ , e  $z_{78}$  associate al frame specifico. In particolare, le coordinate cartesiane  $X_{78}$  e  $Y_{78}$  vengono determinate tramite le funzioni trigonometriche coseno e seno applicate alle coordinate angolari  $th_{78}$ , convertite da gradi a radianti. La coordinata  $Z_{78}$  è ottenuta come l'opposto della coordinata cilindrica  $z_{78}$ .

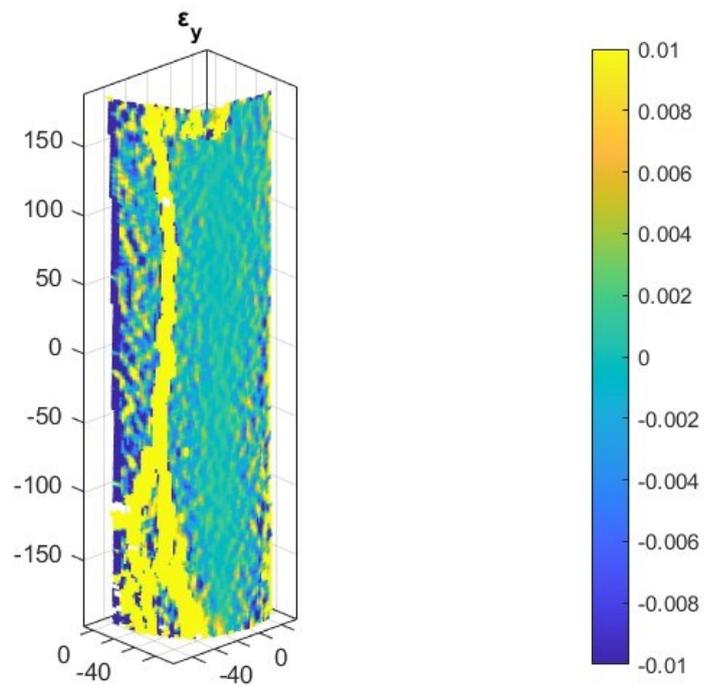
Successivamente, vengono estratti i valori delle diverse componenti di deformazione per il frame selezionato, tra cui la deformazione di von Mises ( $evm_{78}$ ), le componenti di deformazione lungo gli assi x e y ( $exx_{78}$  e  $eyy_{78}$ ), la deformazione di taglio  $exy_{78}$ , e le deformazioni principali ( $e1_{78}$  e  $e2_{78}$ ).

Lo script crea poi una serie di figure grafiche in cui vengono visualizzate le superfici tridimensionali del provino, colorate in base ai valori delle diverse componenti di deformazione (fig. 26, 27, 28, 29, 30, 31). Ogni figura rappresenta una componente diversa: la deformazione di von Mises, le componenti lungo gli assi x e y, la deformazione di taglio, e le due principali deformazioni. Le superfici tridimensionali vengono generate tramite il comando *surface*, che visualizza le superfici senza linee di contorno e con una trasparenza completa. Il range dei valori di deformazione è limitato all'interno dell'intervallo [-0.01, 0.01] utilizzando il comando *caxis*, e ogni grafico è dotato di una barra dei colori (*colorbar*) per facilitare l'interpretazione visiva dei valori.

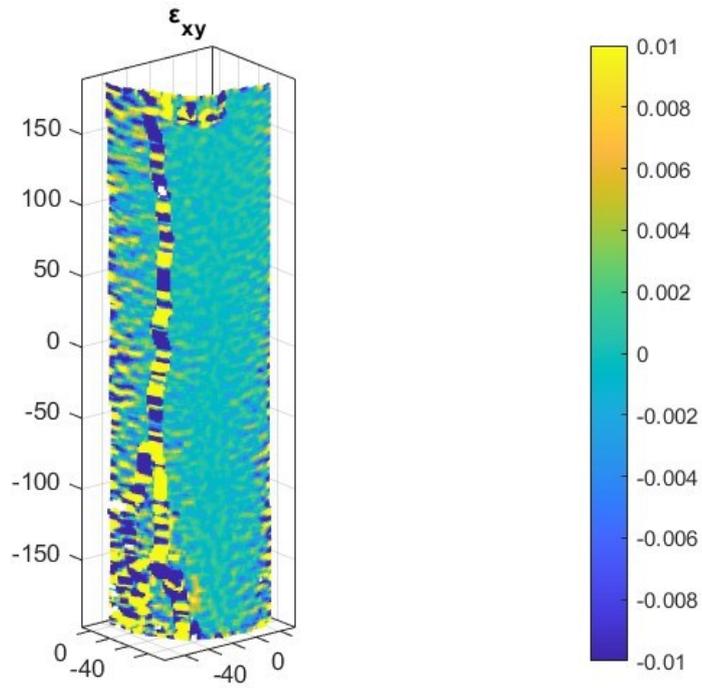
Infine, le figure presentano un sistema di assi uniformi (*axis equal*), una griglia e una scatola di contorno attivati, per migliorare la leggibilità. I titoli di ogni figura sono impostati in modo da indicare chiaramente la componente di deformazione rappresentata.



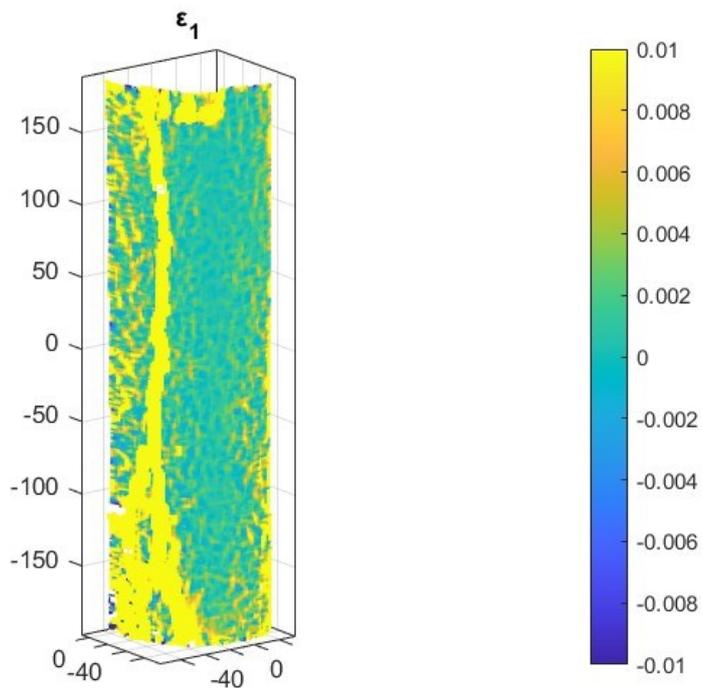
*Figura 26 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della deformazione lungo x*



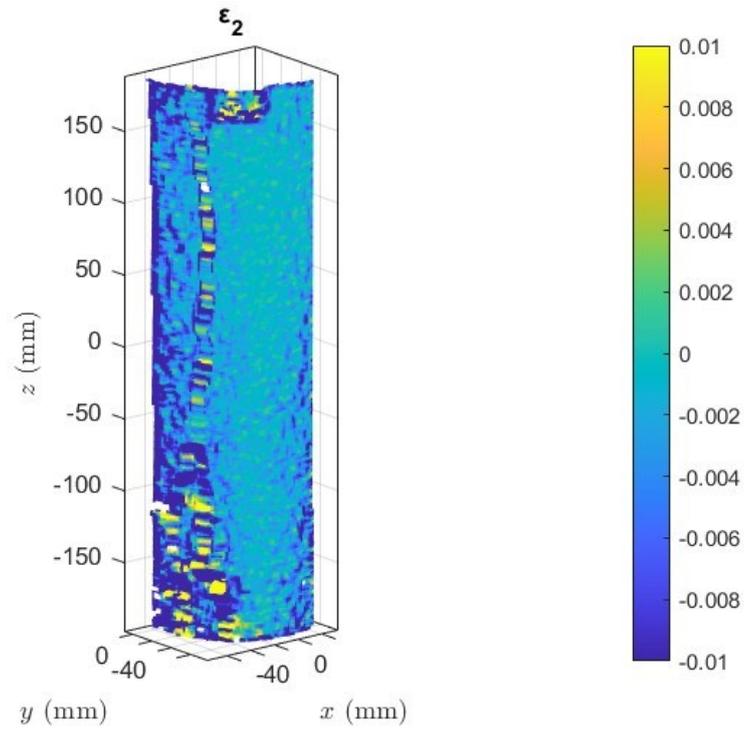
*Figura 27 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della deformazione lungo y*



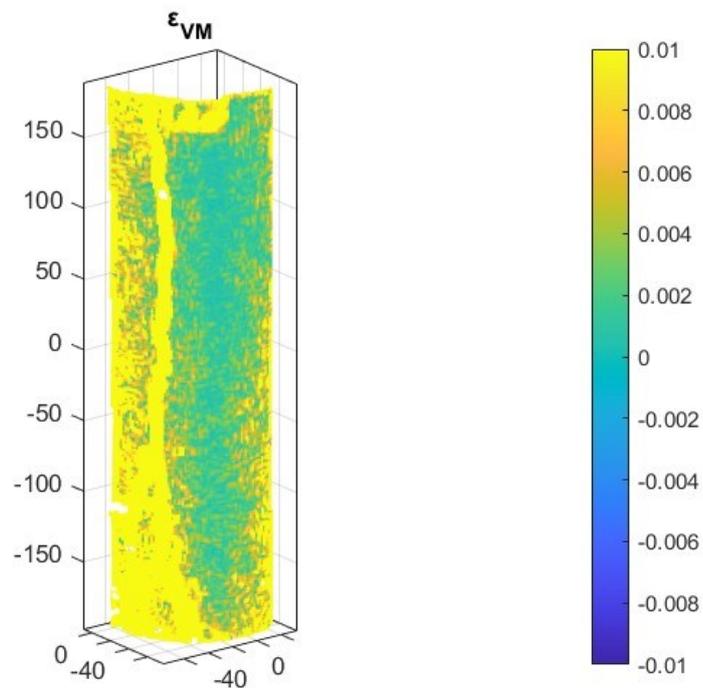
*Figura 28 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della deformazione di taglio*



*Figura 29 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della deformazione principale*



*Figura 30 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della seconda deformazione principale*



*Figura 31 "mappel35\_CLS2\_78", andamento della deformazione di von Mises*

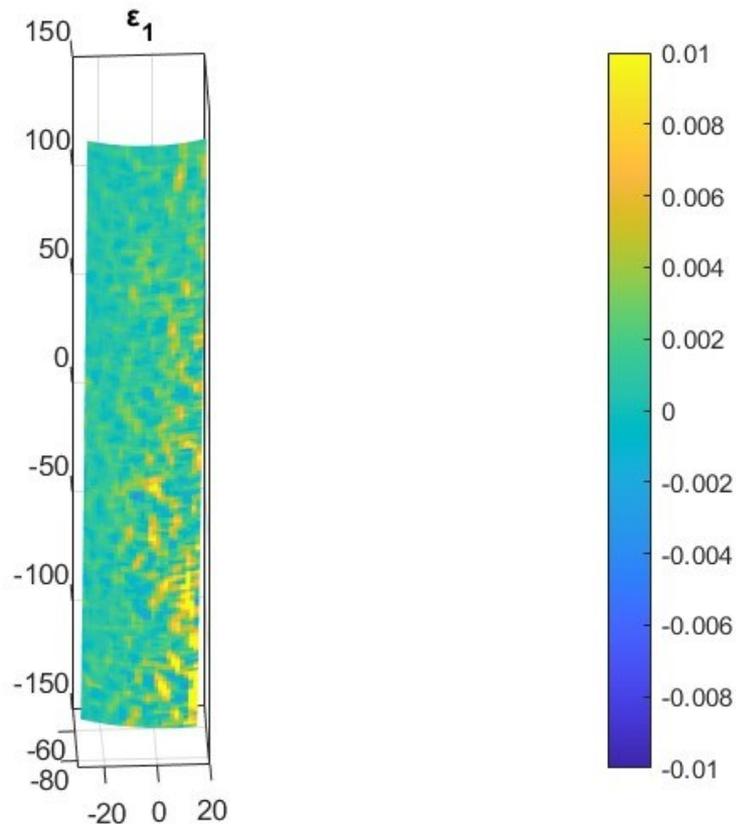
Tuttavia, l'analisi condotta tramite la *colorbar* ha evidenziato un problema: i valori delle deformazioni venivano calcolati includendo quelli presenti nella frattura, falsando così i risultati e non riflettendo i valori reali della deformazione sulla superficie del provino.

Per risolvere tale problematica, è stato necessario riscrivere lo script "mappe" (fig. 32) in modo da considerare esclusivamente la zona della superficie soggetta alle deformazioni, inserendo le coordinate che delimitavano l'area di interesse.

```
9 X_78=r_78(50:80,50:250,frame).*cos(deg2rad(th_78(50:80,50:250,frame)));
10 Y_78=r_78(50:80,50:250,frame).*sin(deg2rad(th_78(50:80,50:250,frame)));
11 Z_78=-z_78(50:80,50:250,frame);
12
13 EVM_78=evm_78(50:80,50:250,frame);
14 Ex_78=exx_78(50:80,50:250,frame);
15 Ey_78=eey_78(50:80,50:250,frame);
16 Exy_78=exy_78(50:80,50:250,frame);
17 E1_78=e1_78(50:80,50:250,frame);
18 E2_78=e2_78(50:80,50:250,frame);
```

**Figura 32** Porzione dello script "mappe" contenente le correzioni sulle coordinate

Questo ha permesso di escludere le regioni con punti di concentrazione delle deformazioni, ottenendo così i valori reali delle deformazioni presenti sulla superficie del provino (fig. 33). Lo script è stato utilizzato principalmente per verificare che le coordinate selezionate fossero corrette, evitando la presenza di fratture.



*Figura 33 Mappa del provino dove si evidenzia l'assenza delle fratture*

Dopo aver confermato l'accuratezza delle coordinate, è stato corretto lo script "curve", che ha permesso di ottenere grafici affidabili contenenti l'andamento reale delle deformazioni sul provino, escludendo le zone con concentrazioni di deformazione. Nonostante questi accorgimenti, è emerso che le deformazioni lungo gli assi x e y ( $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ ) tendevano nuovamente a zero, mentre le deformazioni principali ( $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ ) e la deformazione di von Mises mostravano un andamento significativamente più elevato. Questo risultato appariva anomalo, poiché, come noto, le deformazioni principali e quella di von Mises dipendono da  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ .

Si è quindi compreso che lo script "curve" calcolava la media delle deformazioni lungo gli assi x e y utilizzando la funzione *mean*, la quale prendeva in considerazione sia i valori

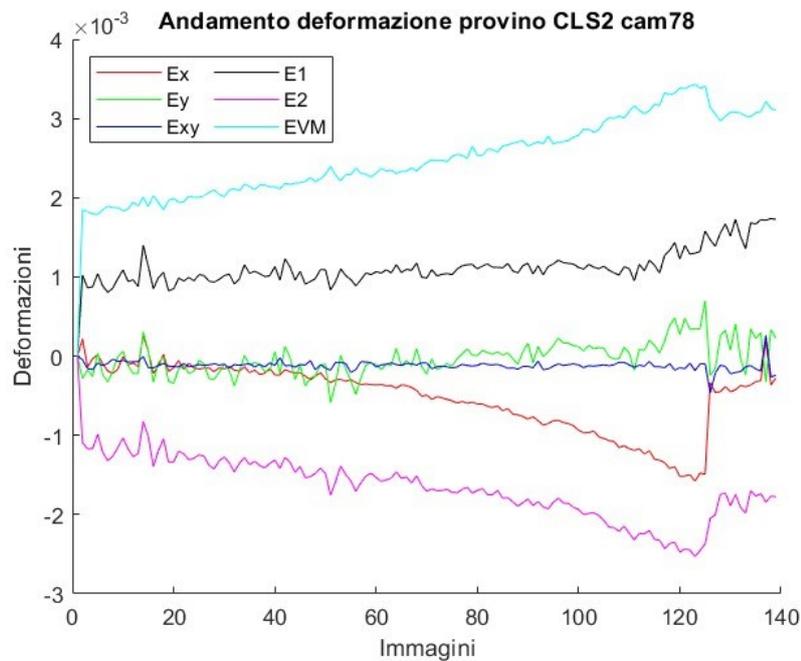
positivi che quelli negativi delle deformazioni, portando a un valore medio prossimo allo zero. Per correggere questa distorsione, è stato necessario ricalcolare la media utilizzando il valore assoluto delle deformazioni, impiegando la funzione *abs*, al fine di ottenere un andamento più accurato (fig. 34, 35).

```

12     app=abs(exx_78(50:80, 50:250, n));
13     Ex_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
14
15     app=abs(eyy_78(50:80, 50:250, n));
16     Ey_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');
17
18     app=abs(exy_78(50:80, 50:250, n));
19     Exy_78(n)=mean(app(:), 'omitnan');

```

**Figura 34** Porzione dello script "curve" corretto con le coordinate e il valore assoluto



**Figura 35** Grafico corretto dell'andamento delle deformazioni

L'ultima verifica per confermare la correttezza dell'analisi è stata effettuata scrivendo la formula di  $\epsilon_1$  e confrontandola graficamente con i risultati ottenuti (fig. 36).

```

1 clear
2 clc
3 close all
4
5 ref_cam=7;
6
7 load dati_CLS2_78
8
9 %%
10
11 for n = 1:length(imm_tot)
12     app=(e1_78(50:80, 50:250, n));
13     E1_78(n)=mean(app(:),'omitnan');
14
15     app=((exx_78(50:80, 50:250, n))+(eyy_78(50:80, 50:250, n)))/2+sqrt((((exx_78
(50:80, 50:250, n)-(eyy_78(50:80, 50:250, n)))/2).^2+(exy_78(50:80, 50:250, n)).
^2);
16     Elcal(n)=mean(app(:),'omitnan');
17 end
18
19 figure
20 hold on
21 plot(1:139,Elcal,'o-',1:139,E1_78,'.-')
22 xlabel('Immagini')
23 ylabel('Deformazioni')
24 title('Andamento deformazione provino CLS2 cam78')

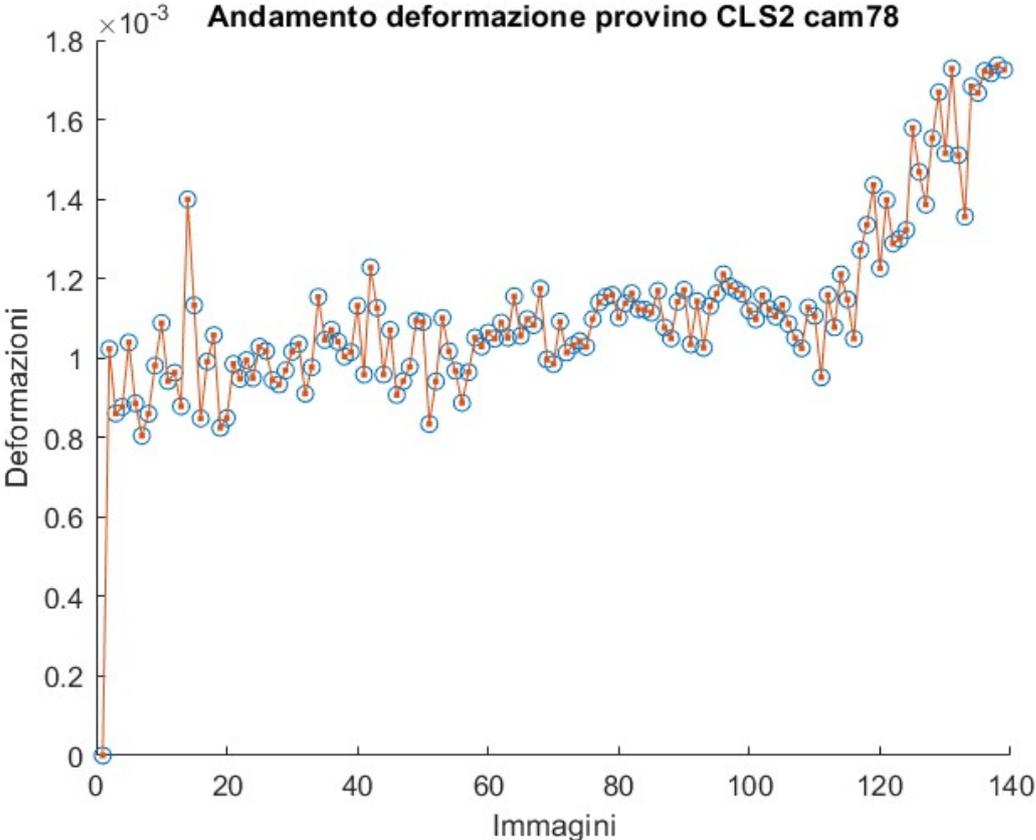
```

**Figura 36** Script "curve" con calcolo di  $\epsilon_1$  e confronto con la media dello stesso

La formula utilizzata per il calcolo di  $\epsilon_1$  è descritta nella riga 15 dello script, che equivale alla seguente:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \epsilon_{xy}^2}$$

Le due curve risultavano perfettamente sovrapponibili, dato che una è identificata con “.-” e l’altra da “o-”, confermando così che l’approccio adottato era corretto e che l’andamento delle deformazioni era stato determinato con precisione (fig. 37).



*Figura 37* Grafici sovrapposti dell’andamento delle deformazioni  $\mathcal{E}_1$  a confronto

### 3.6 Confronto dei risultati

Le correzioni necessarie per risolvere le anomalie riscontrate negli script "mappe" e "curve" sono state effettuate, per ragioni di tempo, esclusivamente sulla prova "CLS2" per la coppia di telecamere 7-8. Dopo aver identificato che il problema riguardava l'andamento delle deformazioni lungo gli assi x e y, che nei grafici tendevano a zero, si è compreso che la causa risiedeva nel metodo con cui il software MATLAB calcolava la media dei valori. Per ottenere risultati corretti, era necessario calcolare la media utilizzando il valore assoluto delle deformazioni. Poiché questo problema risultava comune a tutte le altre prove, è stato possibile confrontare i risultati di tutte le prove e di tutte le coppie di telecamere.

Si precisa che la prova "CLS2", ampiamente descritta nei capitoli precedenti relativi a MatchID e MATLAB, costituisce un esempio rappresentativo: i medesimi procedimenti, passaggi, elaborazioni e analisi sono stati applicati in maniera coerente a tutte le altre prove, assicurando per ognuna di esse la completa generazione delle curve corrispondenti.

Dall'analisi condotta, si è rilevato che l'andamento delle deformazioni lungo gli assi x e y non è attendibile e, pertanto, non deve essere considerato, in quanto viziato dall'errore precedentemente descritto. Al contrario, gli andamenti delle deformazioni principali  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , così come la deformazione di von Mises, risultano corretti e quindi utilizzabili per l'analisi.

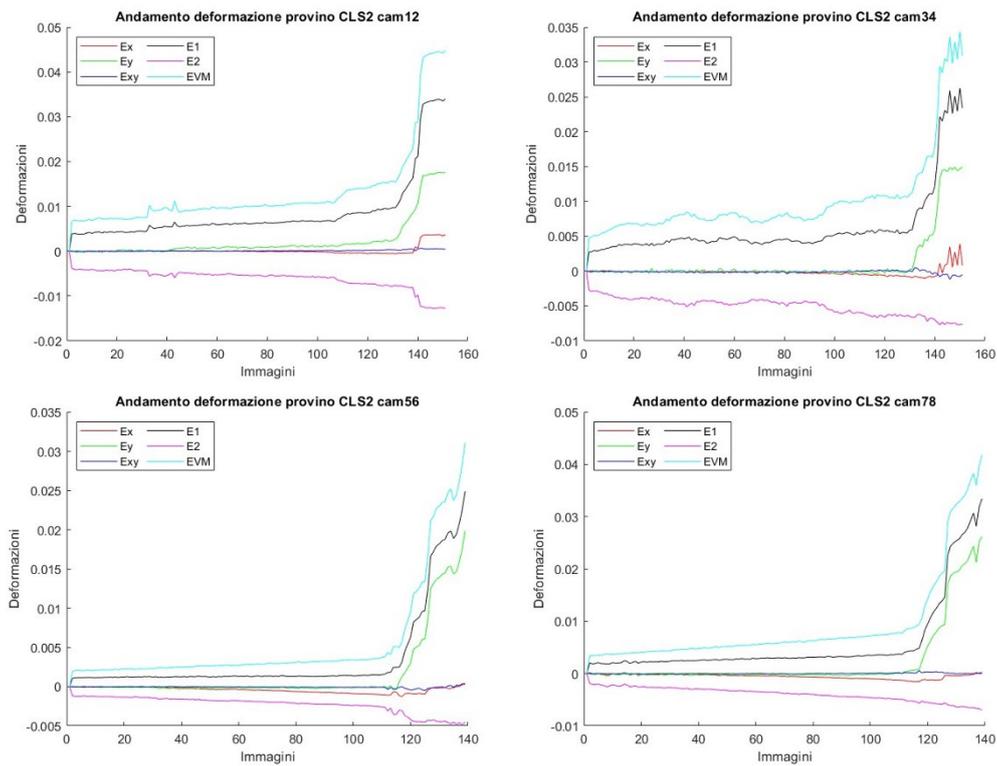
Tale verifica ha permesso di confrontare i vari provini, consentendo di determinare quelli con caratteristiche meccaniche superiori rispetto agli altri. Sono state inoltre valutate le influenze delle fibre di carbonio e acciaio, sia singolarmente sia in combinazione tra loro, all'interno della matrice cementizia, per analizzarne le prestazioni e l'impatto sulle proprietà meccaniche complessive del materiale.

Dall'analisi dei risultati ottenuti durante le prove di compressione sui vari provini, emerge un quadro chiaro in relazione all'influenza dei materiali utilizzati, delle percentuali di fibre

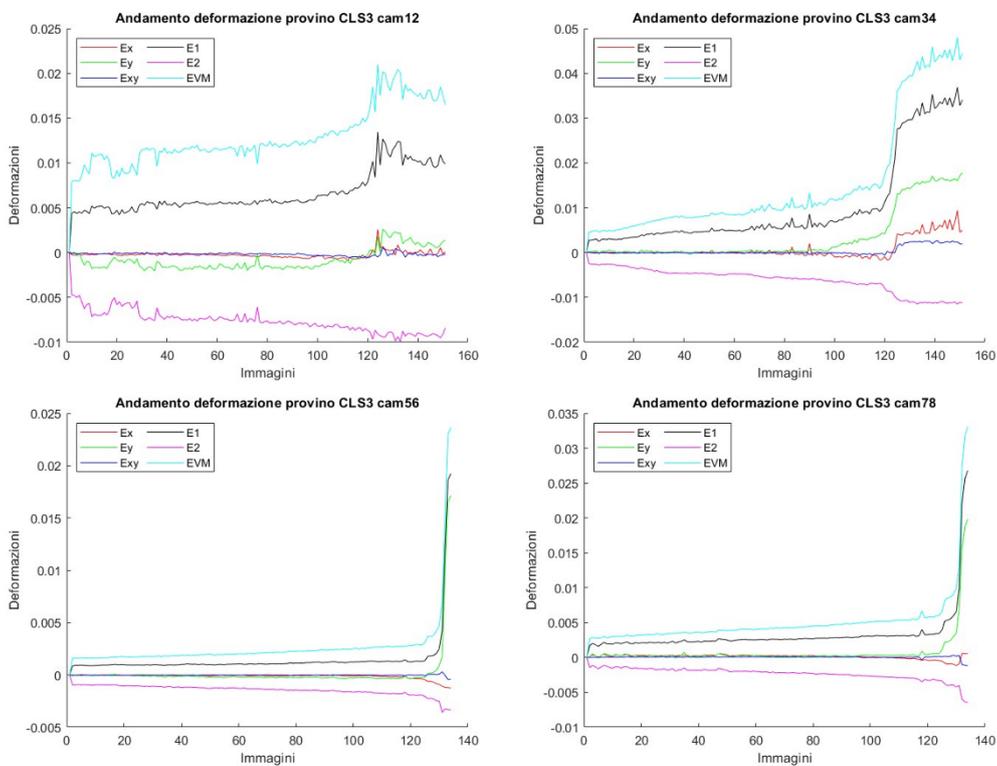
introdotte nella matrice cementizia, e delle deformazioni misurate. Le prove, condotte su due provini identici per ogni tipologia e monitorate tramite quattro coppie di telecamere, hanno portato all'estrapolazione dei valori massimi di deformazione di von Mises.

Le prove rappresentate nei grafici, evidenziano un comportamento generale di progressivo incremento delle deformazioni totali, con un'attenzione particolare alla deformazione equivalente di von Mises ( $\epsilon_{vm}$ ) dove questa deformazione risulta essere il parametro più significativo per valutare la risposta complessiva del materiale sotto compressione, poiché tiene conto delle deformazioni multidirezionali.

I provini realizzati con calcestruzzo semplice, privi di rinforzi in fibra, hanno mostrato una deformazione massima di von Mises pari a circa 0.045. Questo valore riflette le caratteristiche meccaniche tipiche del calcestruzzo, materiale notoriamente fragile e poco resistente alle deformazioni. La frattura si è verificata al raggiungimento di un valore di deformazione elevato, confermando che, in assenza di rinforzi, il calcestruzzo presenta una capacità limitata di resistere agli sforzi, con una bassa capacità di dissipare l'energia prima del collasso. Le curve (fig. 38 e 39) evidenziano un incremento netto, specialmente nelle immagini finali, che coincide con il momento in cui il provino ha raggiunto i limiti della sua capacità meccanica.

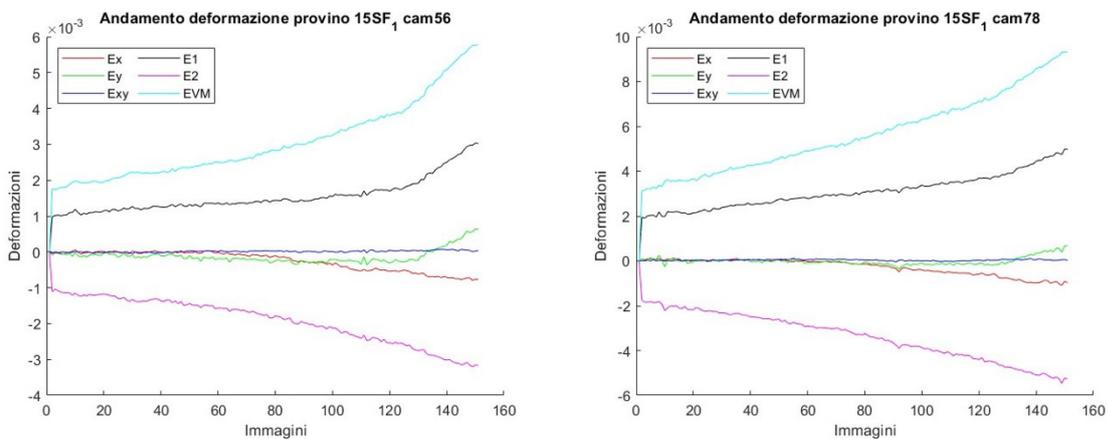


*Figura 38* Andamento delle deformazioni per il provino CLS2

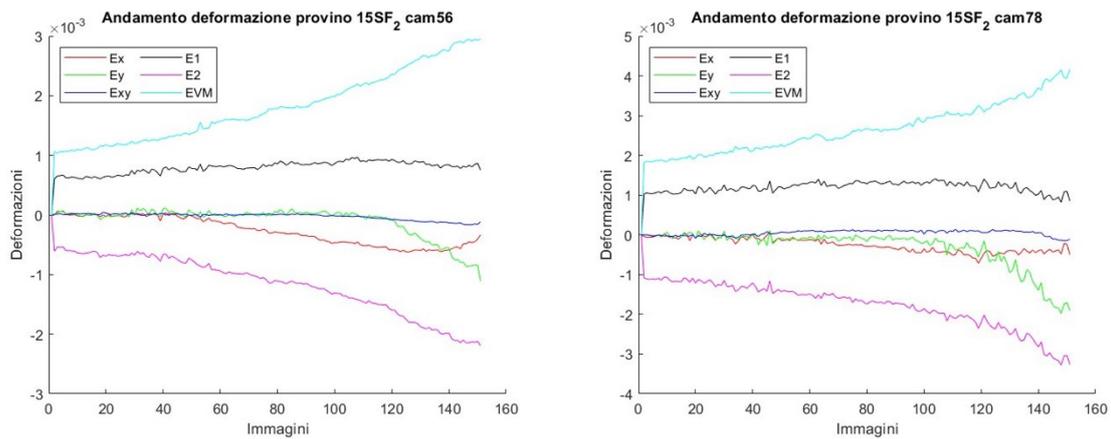


*Figura 39* Andamento delle deformazioni per il provino CLS3

Nel caso dei provini in matrice cementizia con fibre di acciaio all'1.5% in volume, la deformazione massima di von Mises è risultata significativamente inferiore, pari a circa 0.009. Questo risultato indica che l'inserimento delle fibre di acciaio ha portato a un comportamento più rigido del materiale, con una maggiore resistenza alla deformazione rispetto al calcestruzzo semplice. L'acciaio, con le sue proprietà meccaniche superiori, contribuisce a limitare la propagazione delle fessurazioni e ad aumentare la capacità del materiale di sostenere carichi senza subire deformazioni rilevanti. Tuttavia, la ridotta deformazione massima suggerisce che, pur migliorando la resistenza meccanica, i provini hanno raggiunto la rottura con una capacità di deformazione limitata, che potrebbe influire sulla loro duttilità. Le curve (fig. 40 e 41), dove nello specifico gli andamenti di  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_{vm}$  suggeriscono un comportamento meccanico più rigido e lineare, con deformazioni compressive più contenute lungo tutta la durata della prova.

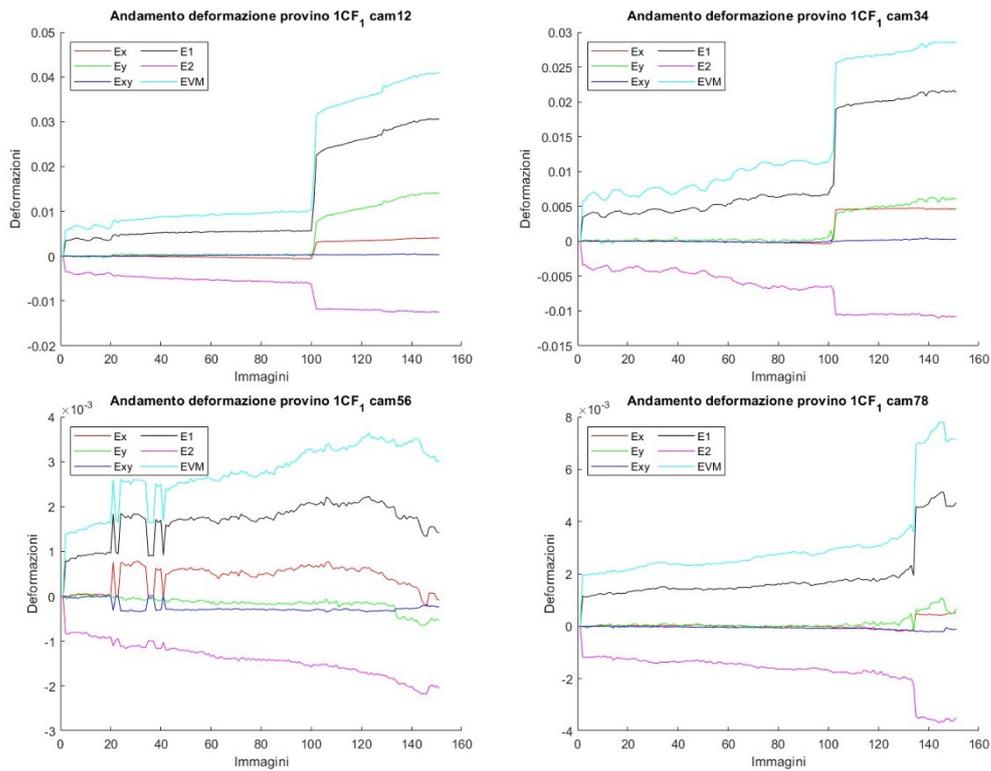


**Figura 40** Andamento delle deformazioni per il provino 15SF\_1

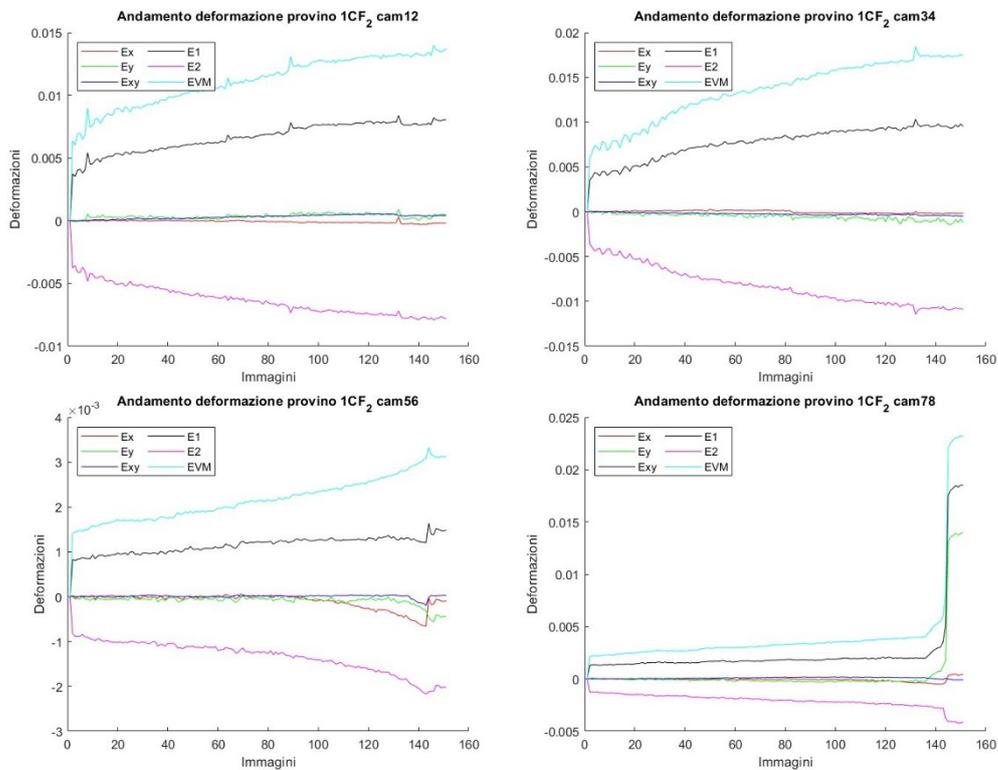


*Figura 41 Andamento delle deformazioni per il provino 15SF\_2*

I provini rinforzati con fibre di carbonio all'1% in volume hanno mostrato una deformazione massima di von Mises di circa 0.04, simile a quella del calcestruzzo semplice, ma inferiore rispetto a quella con fibre d'acciaio. Le fibre di carbonio, pur essendo leggere e dotate di elevate proprietà meccaniche, forniscono un contributo differente rispetto all'acciaio. In particolare, il loro comportamento rigido e la loro elevata resistenza a trazione migliorano le prestazioni del calcestruzzo in termini di resistenza alla rottura, ma non hanno lo stesso effetto nell'impedire la deformazione sotto compressione rispetto all'acciaio. Pertanto, i provini mostrano un comportamento intermedio, con una capacità di deformarsi maggiore rispetto ai provini con fibre d'acciaio, ma inferiore in termini di resistenza complessiva. Le curve (fig. 42 e 43), dove nello specifico gli andamenti di  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_{vm}$  mostrano un aumento progressivo delle deformazioni, con picchi verso la fine della prova che indicano la comparsa di fratture.

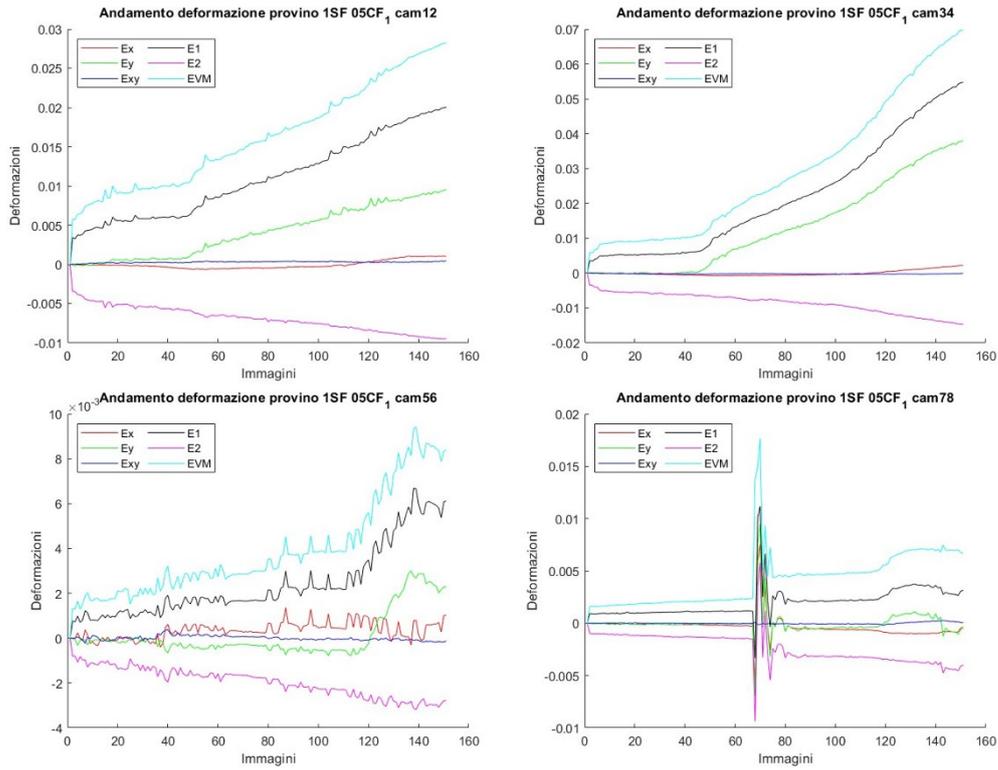


*Figura 42 Andamento delle deformazioni per il provino 1CF<sub>1</sub>*

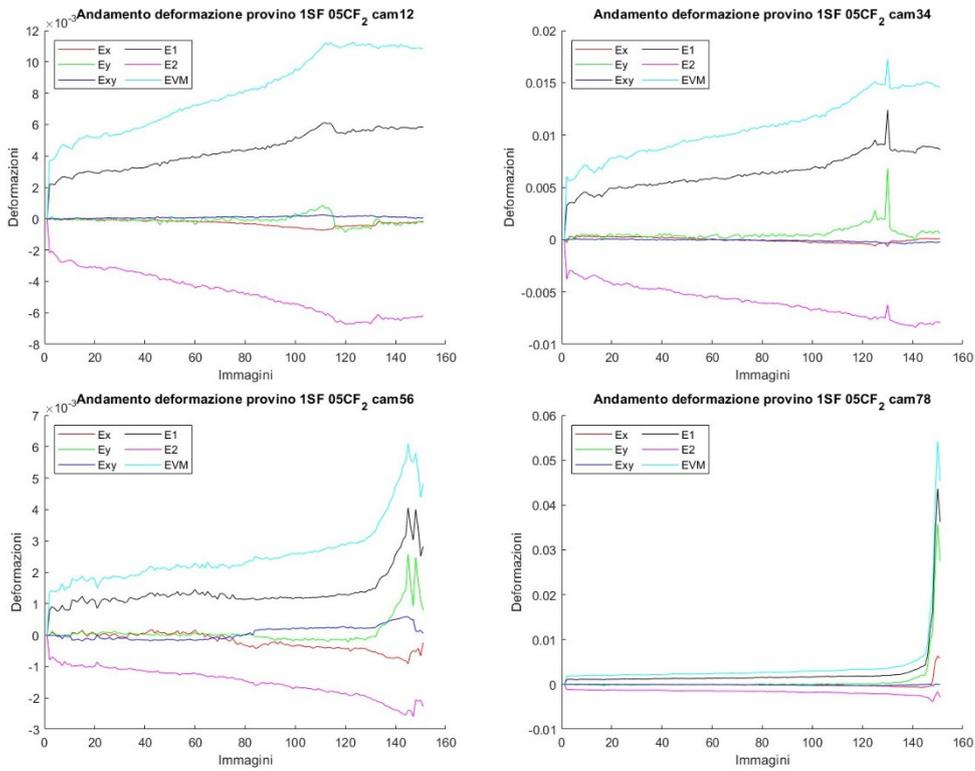


*Figura 43 Andamento delle deformazioni per il provino 1CF<sub>2</sub>*

Infine, i provini composti da fibre miste di acciaio (1%) e carbonio (0.5%) hanno registrato la deformazione massima più alta, pari a circa 0.07. Questo risultato indica che la combinazione delle due fibre ha portato a un comportamento migliorato sia in termini di resistenza che di capacità di deformazione. L'acciaio ha probabilmente fornito rigidità e resistenza alla compressione, mentre il carbonio ha contribuito a migliorare la resistenza alla frattura e a dissipare parte dell'energia accumulata durante la prova. La presenza di fibre miste ha permesso ai provini di resistere a un carico maggiore prima di raggiungere una deformazione critica, dimostrando un equilibrio tra rigidità e duttilità, conferendo al materiale proprietà meccaniche complessive superiori rispetto ai provini rinforzati con fibre singole. L'andamento delle deformazioni (fig. 44 e 45) risulta, in generale, caratterizzato da un incremento relativamente costante e lineare, ad eccezione di quanto osservabile dalle telecamere 7-8 per il provino 1SF\_05CF\_1, dove si verifica un forte picco tra i frame 60 e 80, in quanto tutte le curve subiscono una brusca variazione. Successivamente, le deformazioni tornano a stabilizzarsi, con un andamento nuovamente crescente per la deformazione di von Mises, che raggiunge valori leggermente inferiori rispetto agli altri grafici. Questo comportamento potrebbe essere dovuto a un'anomalia nel test o a un fenomeno di cricatura localizzata o distacco parziale delle fibre rinforzanti.



**Figura 44** Andamento delle deformazioni per il provino 1SF\_05CF\_1



**Figura 45** Andamento delle deformazioni per il provino 1SF\_05CF\_2

## 4. Conclusioni

Le conclusioni che emergono dall'analisi dei quattro provini di matrice cementizia rinforzati con fibre di diversa natura, sia in termini qualitativi che quantitativi, offrono un quadro chiaro sull'influenza che tali rinforzi esercitano sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo. L'introduzione delle fibre modifica in modo significativo la capacità del materiale di resistere alle sollecitazioni e di deformarsi, migliorando, in particolare, la sua capacità di assorbire energia e di ritardare l'insorgenza di fratture. Tuttavia, ogni tipologia di rinforzo presenta specifiche peculiarità, con pro e contro che vanno valutati attentamente in funzione degli obiettivi progettuali e applicativi.

Il provino privo di rinforzi ha confermato i limiti tipici del calcestruzzo, evidenziando una fragilità intrinseca e un'elevata vulnerabilità a cedimenti improvvisi, seppur con costi contenuti. Al contrario, il rinforzo con fibre d'acciaio all'1.5% ha garantito una maggiore rigidità meccanica, ma con una minore capacità di deformazione. Le fibre di carbonio all'1% hanno offerto un buon compromesso tra rigidità e flessibilità, rendendo il provino più duttile e resistente alla frattura, ma con costi generalmente più elevati rispetto all'acciaio. Il provino con fibre miste (1% acciaio, 0.5% carbonio) ha mostrato il miglior comportamento globale, combinando una buona rigidità e una maggiore capacità di deformazione, rendendolo versatile per diverse applicazioni ingegneristiche, a fronte di costi intermedi.

Nonostante l'analisi abbia riscontrato una certa rumorosità nei dati raccolti durante la prova di compressione, dovuta principalmente alla rigidità dei provini che si deformano poco, questo aspetto ha complicato l'interpretazione dei risultati. La rumorosità è stata accentuata anche dalla superficie non perfettamente liscia dei provini, che ha introdotto ulteriori variazioni nei dati acquisiti. Questa irregolarità ha reso meno accurata l'elaborazione delle immagini tramite il software MatchID, rendendo più difficile ottenere misurazioni precise

delle deformazioni e complicando l'analisi successiva con MATLAB. Nonostante queste problematiche, i risultati permettono di concludere che la scelta del rinforzo ottimale dipende dalle esigenze specifiche del progetto. Se è richiesta elevata resistenza e un contenimento dei costi, le fibre d'acciaio sono preferibili, mentre per progetti che necessitano di una maggiore duttilità, le fibre di carbonio o le soluzioni miste risultano più efficaci.

In conclusione, per futuri sviluppi si può considerare l'integrazione di un'elaborazione dati che consenta l'estrapolazione delle tensioni durante la prova. Ciò permetterebbe di ottenere un quadro completo non solo sulle deformazioni, come già fatto, ma anche sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, in particolare sulla resistenza a compressione. Avere a disposizione un'analisi parallela su deformazioni e tensioni consentirebbe di costruire le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  (sigma-epsilon), offrendo una comprensione più approfondita del comportamento del materiale durante la sollecitazione, facilitando così anche un confronto più accurato tra le diverse soluzioni studiate. Questo approccio contribuirebbe a migliorare la precisione dell'analisi e a fornire una base più solida per la valutazione delle prestazioni strutturali dei provini testati.

## 5. Indice delle figure

<b>Figura 1</b> Fascio di filamenti di fibre di carbonio [3] .....	8
<b>Figura 2</b> Struttura atomica della grafite [4] .....	9
<b>Figura 3</b> Diagramma Ferro-Cementite [2].....	10
<b>Figura 4</b> Sezione di cemento rinforzato al microscopio [5] .....	12
<b>Figura 5</b> Curva carico-spostamento per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b) [8] .....	14
<b>Figura 6</b> Curva tensione-deformazione per un provino di calcestruzzo [10] .....	15
<b>Figura 7</b> Esempio di provino .....	17
<b>Figura 8</b> Esempio di fibre di acciaio [11].....	17
<b>Figura 9</b> Pressa utilizzata per la prova a compressione con set-up di telecamere.....	19
<b>Figura 10</b> Schematizzazione del set-up delle telecamere per la prova.....	21
<b>Figura 11</b> Schermata MatchID con le varie configurazioni .....	24
<b>Figura 12</b> Esempio file di calibrazione calib1 per telecamere 1-2 .....	26
<b>Figura 13</b> Varie impostazioni menzionate in “Processing options”.....	28
<b>Figura 14</b> Processo di selezione delle immagini .....	29
<b>Figura 15</b> Inizio Start correlation (a), fine Start correlation (b) .....	30
<b>Figura 16</b> Mappa fornita dal View results dello spostamento lungo Z .....	31
<b>Figura 17</b> Formula di Hencky utilizzata da MatchID per il calcolo della deformazione ...	32
<b>Figura 18</b> Deformazione lungo x nulla.....	33
<b>Figura 19</b> Processo di selezione dei dati da esportare .....	34
<b>Figura 20</b> Applicazione Fit cylinder (a), parametri del sistema cilindrico (b) .....	36
<b>Figura 21</b> Script "salva_CLS2" per la prova CLS2, telecamere 7-8 .....	40
<b>Figura 22</b> File MAT “dati_CLS2_78” con matrici tridimensionali .....	42
<b>Figura 23</b> Script "curve_CLS2" complete di tutte le coppie di telecamere.....	45

<b>Figura 24</b>	Grafici dell'andamento delle deformazioni ottenuti da "curve_CLS2" .....	48
<b>Figura 25</b>	Script "mappe135_CLS2_78" completo, per frame 135 e telecamere 7-8.....	51
<b>Figura 26</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della deformazione lungo x.....	53
<b>Figura 27</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della deformazione lungo y.....	53
<b>Figura 28</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della deformazione di taglio.....	54
<b>Figura 29</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della deformazione principale.....	54
<b>Figura 30</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della seconda deformazione principale....	55
<b>Figura 31</b>	"mappe135_CLS2_78", andamento della deformazione di von Mises .....	55
<b>Figura 32</b>	Porzione dello script "mappe" contenente le correzioni sulle coordinate .....	56
<b>Figura 33</b>	Mappa del provino dove si evidenzia l'assenza delle fratture.....	57
<b>Figura 34</b>	Porzione dello script "curve" corretto con le coordinate e il valore assoluto ....	58
<b>Figura 35</b>	Grafico corretto dell'andamento delle deformazioni.....	58
<b>Figura 36</b>	Script "curve" con calcolo di $\epsilon_1$ e confronto con la media dello stesso .....	59
<b>Figura 37</b>	Grafici sovrapposti dell'andamento delle deformazioni $\epsilon_1$ a confronto.....	60
<b>Figura 38</b>	Andamento delle deformazioni per il provino CLS2 .....	63
<b>Figura 39</b>	Andamento delle deformazioni per il provino CLS3 .....	63
<b>Figura 40</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 15SF_1 .....	64
<b>Figura 41</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 15SF_2 .....	65
<b>Figura 42</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 1CF_1 .....	66
<b>Figura 43</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 1CF_2.....	66
<b>Figura 44</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 1SF_05CF_1 .....	68
<b>Figura 45</b>	Andamento delle deformazioni per il provino 1SF_05CF_2 .....	68

## 6. Riferimenti

- [1] Pedago, [Online]. Available: <https://www.pedago.it/blog/calcestruzzo.htm>.
- [2] L. Caligaris, S. Fava e C. Tomasello, «Manuale di meccanica,» Hoepli.
- [3] Wikipedia, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_di\\_carbonio](https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio).
- [4] Geopop, [Online]. Available: <https://staticgeopop.akamaized.net/wp-content/uploads/sites/32/2023/06/struttura-del-grafene-atomi-di-carbonio-fibra.jpg?im=Resize,width=570;>
- [5] Biblus, [Online]. Available: <https://biblus.acca.it/wp-content/uploads/2018/02/calcestruzzo-fibrorinforzato-e1519228668577.jpg.webp>.
- [6] Wikipedia, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo\\_fibrorinforzato](https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo_fibrorinforzato).
- [7] M. Rossi e G. Chiappini, *Materiale sperimentale*.
- [8] «ingegneriastrutturale.net,» [Online]. Available: [https://www.ingegneriastrutturale.net/Tematiche/2MS/2MSfrcB/2MSfrcB\\_strutturale/2MSfrcB\\_strutturale\\_file/image023.jpg](https://www.ingegneriastrutturale.net/Tematiche/2MS/2MSfrcB/2MSfrcB_strutturale/2MSfrcB_strutturale_file/image023.jpg).
- [9] A. Forcellese, «learn univpm,» [Online]. Available: [https://learn.univpm.it/pluginfile.php/945954/mod\\_resource/content/1/Comportamento%20plastico%202023-24.pdf](https://learn.univpm.it/pluginfile.php/945954/mod_resource/content/1/Comportamento%20plastico%202023-24.pdf).
- [10] Wikipedia, [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo#/media/File:Legame\\_costitutivo\\_del\\_calcestruzzo.svg](https://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo#/media/File:Legame_costitutivo_del_calcestruzzo.svg).
- [11] edilportale, «img.edilportale.com,» [Online]. Available: [https://img.edilportale.com/product-thumbnails/b\\_STEEL-FIBER-Kerakoll-500375-relc071fb1b.jpg](https://img.edilportale.com/product-thumbnails/b_STEEL-FIBER-Kerakoll-500375-relc071fb1b.jpg).
- [12] correlated solutions, [Online]. Available: <https://www.correlatedsolutions.com/>.
- [13] eikosim, [Online]. Available: <https://eikosim.com/en/technical-articles/how-to-make-a-speckle-pattern-suitable-for-digital-image-correlation/>.
- [14] international digital image correlation society, A good practices guide for digital image correlation, 2018.
- [15] Wikipedia, «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.