



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Analisi DIC di prove di flessione a quattro
punti su materiale cementizio fibro-rinforzato**
**DIC analysis of four point bending tests on
Fiber-Reinforced concrete samples**

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Correlatore:

Prof. Gianluca Chiappini

Tesi di Laurea di:

Bonci Mattia

A.A. 2020 /2021

Indice generale

PREFAZIONE

Capitolo I

- I MATERIALI COMPOSITI
 - I.1 Generalità
 - I.2 Classificazione
 - I.3 Accenni Tipo di materiale utilizzato nelle prove

Capitolo II

- TECNICA DI CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI (DIC)
 - II.1 Introduzione alla tecnica
 - II.2 La correlazione delle immagini
 - II.3 L'algoritmo di correlazione
 - II.4 Fine elaborazione programma

Capitolo III

- SVOLGIMENTO DELLE PROVE
 - III.1 Spiegazione della prova
 - III.2 Elenco prove

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

PREFAZIONE

In questa tesi si vuole studiare il danneggiamento di materiale composito quale il cemento fibro-rinforzato, attraverso il metodo della correlazione digitale delle immagini (DIC).

Si è usata la tecnica DIC perché essa ha la peculiarità di permettere lo studio di un'intera superficie del materiale utilizzato per le prove, con l'estrapolazione delle informazioni riguardo la deformazione dello stesso e la propagazione dei danneggiamenti provocati dalla messa sotto carico del provino che raggiungono la scala macroscopica.

Il lavoro ha richiesto l'analisi delle immagini prese durante gli esperimenti dai provini attraverso un programma di MATLAB, il quale le prendeva, ed attraverso un algoritmo di correlazione, andava a calcolare la deformazione e lo spostamento dei punti del provino fino quando possibile.

Successivamente si è andati a creare il grafico degli spostamenti e delle deformazioni delle varie prove su EXCELL ed infine ad analizzare frame per frame per trovare in quale punto il materiale ha ceduto sotto la pressione del carico.

Nel primo capitolo si tratteranno i materiali compositi, indicando generalità e classificazione per andare poi a parlare del materiale preso per le prove.

Nel secondo capitolo invece si andrà a guardare un po' di più nel dettaglio il metodo della Correlazione Digitale delle Immagini.

Nel terzo capitolo si guarderanno le foto delle prove effettuate analizzando il frame di rottura dei provini e la causa della stessa.

Capitolo 1

Materiali compositi

I.1 GENERALITÀ

In scienza dei materiali, un **materiale composito** è un materiale eterogeneo ed anisotropo, creato dall'accoppiamento di due materiali omogenei che rimangono separati uno dall'altro attraverso un'interfaccia che li lascia ben contraddistinte a livello strutturale.

Solitamente il composito è costituito dai due materiali chiamati costituenti e a seconda della funzione che assolvono, prendono il nome di **Matrice** e **Rinforzo** (o **carica**).

Il **rinforzo** o **carica** ha la principale funzione di assorbire gli sforzi, per esempio nel cemento armato le armature consentono al cemento di resistere meglio a sforzi di trazione.

Esso è caratterizzato da una fase dispersa, diversa a seconda del tipo di composito.

La **matrice** invece è costituita da una fase continua omogenea e consente la distribuzione all'interno del componente del rinforzo garantendo la coesione del materiale composito.

Il particolare di questi materiali è che conferiscono un ottimo rapporto rigidità/peso il che ne giustifica l'interesse da parte dei settori industriali più avanzati (aeronautico, spaziale, automobilistico, nautico, sportivo, nucleare, ecc.).

I più primitivi materiali compositi artificiali furono i mattoni, costituiti da paglia e fango combinati insieme; tuttavia, il loro studio e conseguente utilizzo è relativamente moderno.

Il motivo di tale fenomeno è la richiesta di sempre più specifiche caratteristiche ai materiali, caratteristiche non possedute dai materiali convenzionali.

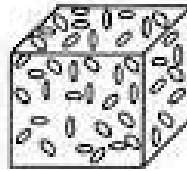
Tuttavia, la mancanza di dati sperimentali a volte scoraggia l'utilizzo dei compositi, questo porta a sperimentare sempre più su questo tipo di materiale, al fine di scoprirne le molteplici proprietà e la loro vasta possibilità di utilizzo. [1]

I.2 CLASSIFICAZIONE

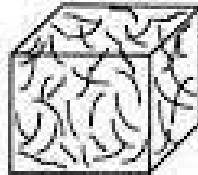
Si possono classificare i materiali compositi in base alla forma dei costituenti o in base al criterio di continuità, qui tratteremo solo la prima delle due.

Classificazioni secondo forma del rinforzo:

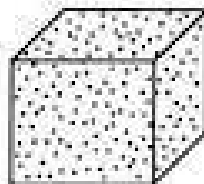
- 1) Materiali a scaglie con o senza matrice



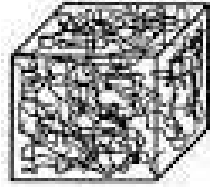
- 2) Materiali fibrosi con o senza matrice



- 3) Materiali particellari con o senza matrice



4) Materiali a scheletro continuo associati ad altri materiali generalmente continui



Il materiale utilizzato durante le prove, fa parte del secondo gruppo; perciò si tratterà quello in maniera approfondita.

MATERIALI FIBROSI CON O SENZA MATRICE

L'utilizzo di questo tipo di materiale composito è molto diffuso, essi possono essere classificati a loro volta in tre categorie a seconda del tipo di fibra utilizzata per il rinforzo:

- Compositi a fibre continue
- Compositi a fibre discontinue allineate tra loro
- Compositi a fibre discontinue disposte in maniera casuale

Questo tipo di materiali mostra una spiccata anisotropia, caratteristica che invece abbiamo in intensità molto minore nei compositi particellari.

Questa anisotropia può essere un vantaggio come uno svantaggio; nel caso il carico a cui è sottoposto il materiale fosse costante in un'unica direzione, l'anisotropia causata dalle fibre potrebbe andare ad aumentare le caratteristiche meccaniche del pezzo lungo quella direzione, creando una direzione preferenziale per la trasmissione dello sforzo, mentre nel caso di carichi con direzione casuale essa potrebbe rappresentare uno svantaggio in termini di prestazioni del materiale.

Anche il tipo di fibra utilizzata come rinforzo può determinare una classificazione di tali compositi, infatti queste possono essere di:

- Fibra di vetro

Fibre di sezione cilindrica con diametro inferiore al decimo di millimetro; questo conferisce al vetro resistenze meccaniche prossime alla resistenza teorica del legame covalente, sono però le fibre che presentano la più bassa resistenza meccanica.

Vengono spesso utilizzate con le resine polimeriche, hanno ottime resistenze al calore, al freddo, all'umidità ed alla corrosione sono le meno costose e le più facili da fabbricare.

- Fibra di carbonio (costituita da carbonio grafítico e carbonio amorfo)

Tra le loro caratteristiche, spiccano l'elevata resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico, resistenza alla variazione di temperatura e ad agenti chimici e buone proprietà ignifughe.

Di contro abbiamo una spiccata anisotropia del materiale composito.

- Fibra Aramidica (come il Kevlar)

Le fibre Aramidiche sono resistenti alla trazione, al calore, agli acidi, agli alcali, ai solventi e all'umidità, hanno un carico di rottura molto simile a quella dell'acciaio e del vetro; invece hanno una tenacità nettamente superiore.

In particolare questo tipo di fibra ha una resistenza a trazione molto elevata lungo la direzione parallela alla fibra, ma bassa in direzione perpendicolare ad essa.

Altra distinzione per i materiali compositi fibrosi, è data dal tipo di materiale utilizzato per la matrice.

Prima di elencare i vari gruppi però va chiarito che la sua funzione non è solo quella di fare da allegante tra le fibre presenti nel pezzo, ma ha anche il compito di proteggere le fibre da sollecitazione esterne lungo direzioni non desiderate, da ambienti corrosivi e proteggerle ambienti troppo caldi o troppo freddi.

I materiali che più si prestano meglio a tali scopi sono: le resine termoplastiche, quelle indurenti o le matrici metalliche.

- Resine termoplastiche

Hanno la particolarità di avere legami atomici facilmente scomponibili con l'aumento della temperatura, il quale quindi ne permette una migliore e ripetuta lavorazione, ogni volta che però si fa un ciclo di riscaldamento, lavorazione e raffreddamento il materiale perde un po' delle sue caratteristiche, sono spesso associate ad una elevata tenacità.

- Resine termoindurenti

Hanno una struttura reticolata che impartisce loro la possibilità di essere rigide anche ad alte temperature al contrario di quelle termoplastiche, una volta indurite le resine termoindurenti mantengono le loro eccellenti proprietà fisiche e non sono in alcun modo rielaborabili.

Queste matrici presentano alcuni svantaggi quali quello di avere bassa viscosità iniziale e a bassi spessori tendono ad avere scarse resistenze alle tensioni.

- Matrici metalliche

Questo tipo di matrici presenta le caratteristiche di leggerezza, buona conducibilità termica, duttilità, elevata rigidità, elevata resistenza ad usura, basso coefficiente di dilatazione termica

I.3 ACCENNI TIPO DI MATERIALE UTILIZZATO NELLE PROVE

Come già accennato precedentemente, nelle prove è stato utilizzato un materiale composito in matrice cementizia con rinforzo in fibre in acciaio di lunghezza 10 mm e diametro inferiore al mm; il nome del materiale è Ultrahigh-Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC), i provini sono stati stampati su cassa con processo di auto-consolidamento e l'orientamento delle fibre è casuale.

Da specificare che questo tipo di cemento fibro-rinforzato può essere anche trattato con alte pressioni o alte temperature per aumentarne le proprietà accelerando la reazione idratante del legante.

Tuttavia questi metodi di consolidamento artificiale non solo sono dispendiosi dal punto di vista energetico, ma limitano anche l'utilizzo del materiale a situazioni specifiche.

La miscela costituente la matrice cementizia, è formata da acqua come allegante, silicio, polvere di vetro, sabbia con granuli che vanno dagli 0,1 ai 0,8 mm e cemento CEM I 52,5 R.

Inoltre, non ci devono essere granuli dell'aggregato grossolano non superiori a 4 mm. Esso ha ottime qualità come lavorabilità auto consolidante, alta resistenza generale, alto modulo di elasticità e bassa permeabilità; cosa che comporta una ottima resistenza agli agenti atmosferici.

Tipici valori per questo composito sono 150 – 200 Mpa di resistenza a compressione e 7 – 15 Mpa in trazione mono assiale.

Inoltre, l'UHPFRC presenta incrudimento quando deformato; questo fenomeno verrà osservato durante l'esposizione delle prove effettuate in laboratorio, dove verranno mostrati i vari grafici delle prove e nei quali sarà possibile osservarlo.

Questo tipo di composito presenta anche un'alta capacità di assorbire energia durante la deformazione e una soglia della stessa per la fessurazione molto alta.

Si riporterà qui di seguito una tabella che metterà a confronto i moduli di elasticità di vari tipi di cemento quali: cemento normale (NSC), Cemento Fibro-Rinforzato (FRC), Cemento ad alte performance (HPC) ed il cemento ultra-performante fibro-rinforzato (UHPFRC), per varie prove.

Bisogna specificare però che l'UHPFRC preso in esame per questa tabella presenta una percentuale di fibre sul volume pari al 2%.

Infatti, aumentando la percentuale di rinforzo, le proprietà del composito aumentano, ma la sua produzione diventa più costosa.

[2]

| Proprietà | Unità di misura | NSC | FRC | HPC | UHPFRC |
|---------------------------|-----------------|------|------|-------|--------|
| Resistenza a compressione | MPa | 42.8 | 37.4 | 132.4 | 151.7 |
| Resistenza a flessione | MPa | 6.2 | 7.1 | 13.9 | 47.5 |
| Resistenza a trazione | MPa | - | - | 6.6 | 10.3 |

Da notare che non si è tabulato il modulo di elasticità normale perché per il cemento ad esso si preferisce il modulo di elasticità secante (E_s); che rappresenta la pendenza della retta che collega l'origine della curva tensione-deformazione con il punto di interesse.

Esso descrive il comportamento del cemento nella zona in cui non abbiamo più una retta e il modulo di Young non è costante ma dipende dalla posizione di interesse presa in esame.

Il motivo del suo utilizzo è prettamente di tipo pratico; infatti il moduli di elasticità normale è applicabile solo a livelli di carico o stress bassi, cosa quasi mai presente nella realtà.

Il modulo di elasticità secante può essere espresso anche come percentuale del modulo E secondo la IS 456:2000 [2]

$$E_s = 5000\sqrt{f_{ck}}$$

Dove f_{ck} è la resistenza caratteristica del concreto.

Per le prove sono stati utilizzati due percentuali di fibre diverse nella miscela;

- Il cemento con l'1% di fibra rinforzante che caratterizzerà le prove con diciture 1_ seguito dal nome del test.

- Il cemento con il 2,5% di fibra che invece sarà identificato nelle prove con la dicitura 25_ seguito sempre dal nome della prova (testA, testB, etc).

Come sarà possibile osservare nei successivi capitoli, dove andremo nel dettaglio delle prove, Il primo tipo di materiale presenta un comportamento simile al calcestruzzo non rinforzato a trazione.

Infatti, esso ha il tipico comportamento degradante del cemento; cioè una volta raggiunta la resistenza massima del materiale, la curva rappresentante il legame forza spostamento o tensione deformazione cala a picco.

Questo tipo di comportamento è tipico dei materiali fibro-rinforzati con una percentuale di rinforzo compresa tra lo 0,2% ed il 2%

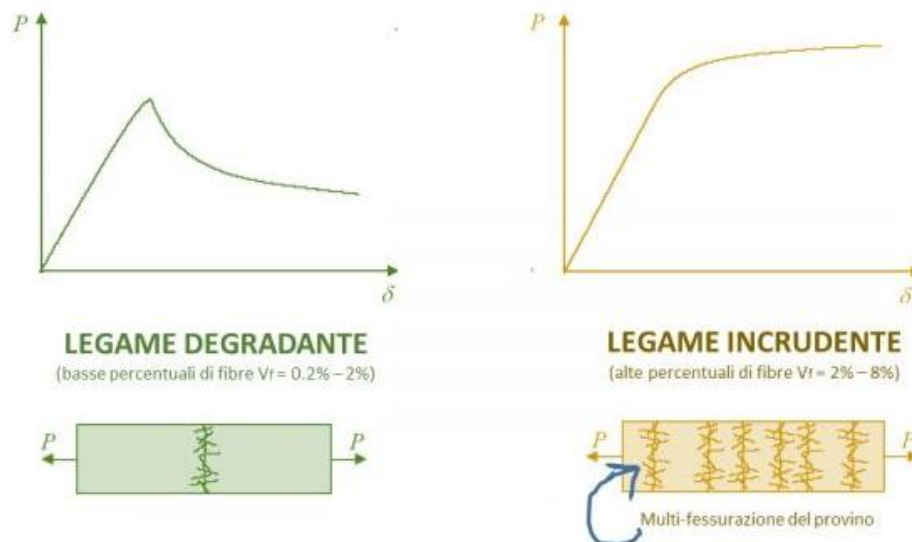


Figura 1; comportamento del cemento fibro-rinforzato a seconda della percentuale di fibre

Mentre Il secondo tipo con una percentuale di fibre più alta, presenta un comportamento più duttile del primo, infatti come si può notare dall'immagine qui sopra il suo grafico è caratterizzato da un andamento del legame forza spostamento tipico dei materiali incrudenti.

Questo comportamento è causato dalla presenza delle fibre nelle zone di fessurazione del materiale che, andando in trazione, tendono a mantenere le particelle della matrice vicine.

Questo fenomeno fa sì che le cricche formatesi per colpa della rottura del cemento, non si propaghino all'interno del materiale, ma invece si creano altre fessure dando luogo alla multi-fessurazione del provino.

Capitolo II

TECNICA DI CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI (DIC)

I.1 Introduzione alla tecnica

La tecnica di correlazione digitale delle immagini, è una tecnica di monitoraggio non distruttiva relativamente nuova, la sua peculiarità è quella di permettere l'osservazione dello spostamento e della deformazione di provini sottoposti a carico in tempo reale, inoltre al contrario di altre tecniche sperimentali che utilizzano l'interferenza delle onde luminose, analisi di fase del modello di frangia e successiva fase di srotolamento, questa tecnica non necessita di un sistema ottico troppo complicato.

Essa permette l'analisi degli spostamenti di un provino attraverso la correlazione di immagini scattate sulla superficie presa in esame, la quale deve essere sottoposta ad una sorgente di luce che permetta di vederla senza sfumature e deve essere stata preventivamente preparata con un pattern casuale di puntini bianchi.

Un altro pregio di questa tecnica è il fatto che essa permette di analizzare un'intera superficie senza bisogno di scansionarla.

Gli aspetti negativi invece si trovano nella parte delle immagini prese vicino ai bordi o vicino alle cricche; infatti i tali zone è difficile ottenere dei risultati precisi per via di come "lavora" la tecnica.

L'approccio per determinare la deformazione della superficie utilizzando la correlazione dell'immagine digitale è iniziata dagli anni '80 ed è stata a lungo sviluppata da un gruppo di ricerca presso l'Università della Carolina del Sud.

Poi, la tecnica è stata migliorata da molti ricercatori per aumentare la risoluzione, migliorare la precisione e superare altri inconvenienti. Oggi, molte applicazioni di questo metodo possono essere trovate nell'ingegneria, come negli studi sulla meccanica della frattura, deformazione ad alta temperatura misurazione, biomateriali, prodotti in legno e analisi delle sollecitazioni inverse. Negli ultimi anni, questa tecnica inizia ad essere applicata alla misurazione della deformazione utilizzando immagini

da Microscopia elettronica a scansione (SEM), microscopia a forza atomica (AFM), raggi X e Micro tomografia.

Prima di entrare nel dettaglio della tecnica, si descriva il principio di funzionamento.

Come già detto essa consiste nello scattare delle foto della superficie da esaminare.

Queste foto vengono successivamente analizzate tramite un programma MATLAB il quale crea una griglia sull'immagine i quali punti di intersezione vengono chiamati markers.

Le coordinate iniziali dei markers vengono poi confrontate con le coordinate degli stessi sulle immagini successive, creando così una "mappa" degli spostamenti dei punti.

Nel momento in cui il programma non riesce più a collegare un marker di un'immagine allo stesso punto dell'immagine precedente l'analisi si blocca ed i dati ricavati dalla prova vengono salvati in un database.

Le immagini prese dal provino sono state scattate con delle telecamere DC opportunamente calibrate per creare immagini con la massima risoluzione possibile.[3]

II.2 LA CORRELAZIONE DI IMMAGINI

La correlazione delle immagini è il cuore della tecnica DIC, essa consiste in 2 passaggi:

- a) Creazione della griglia o mappa nell'immagine
- b) Correlazione dei markers con i pixel dell'immagine e da un'immagine alla successiva

a) CREAZIONE DELLA GRIGLIA O MAPPA NELL'IMMAGINE

Si comincia con l'immagine iniziale dell'esperimento, nella quale il provino non è minimamente deformato, su tale immagine si danno al programma i punti corrispondenti ai quattro angoli dai quali si vuol far partire la griglia, la grandezza delle celle della stessa ed il numero di esse che si vuole lungo la larghezza e della lunghezza dell'immagine

```
x_0=89;    % coordinata x primo nodo in alto a sinistra
y_0=355;   % coordinata y primo nodo in alto a sinistra
l_orizz=16; % larghezza iniziale elementi
l_vert=17.1; % altezza iniziale elementi
nh=71;    %scrivere 0 se griglia estesa su tutta immagine
nv=17;
```

una volta inseriti questi dati si fa partire il programma creando un blocco ad una determinata riga per verificare che la griglia si sia perfettamente adattata all'immagine.

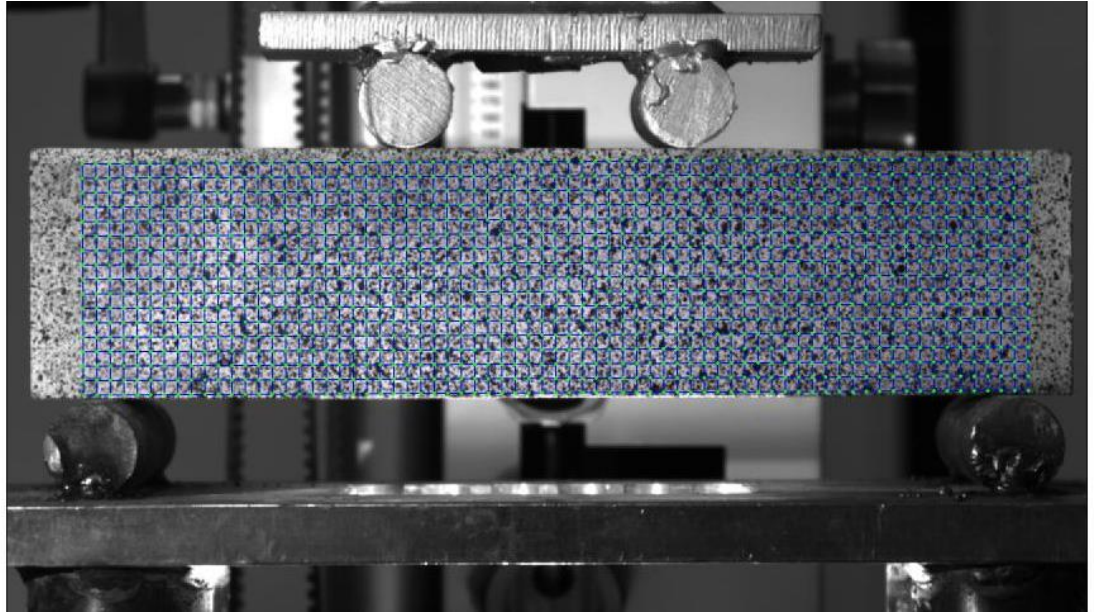


Figura 2: immagine warped con griglia

Questo passaggio è di vitale importanza perché se si sbagliasse a dare le coordinate dei quattro punti cardinali della griglia o se non si nota che la griglia non è posizionata bene nell'immagine, si rischierebbe di dare dei risultati imprecisi o non attendibili, compromettendo tutta la prova.

Come si vede dalla figura 3 la mappatura non deve combaciare con i quattro angoli del provino.

Se così non fosse rischieremo di creare degli errori prematuri durante l'analisi delle immagini successive, perché rischieremo lo "spostamento" dei marker fuori dall'immagine compromettendo la misurazione.

Esiste la possibilità, ai fini di adattare meglio la griglia all'immagine, di andare a ruotare quest'ultima:


```
alfa=atan(0.005);  
R=[cos(alfa) sin(alfa); -sin(alfa) cos(alfa)];  
for i=1:nv*nh  
    nodi_array(i,4:5)=[R*nodi_array(i,4:5)];  
end
```

bisogna però stare sempre attenti a non far andare uno dei marker fuori dall'immagine.

b) CORRELAZIONE DELLE IMMAGINI DEFORMATE

Nel momento in cui si passa da un'immagine all'altra il programma va a "cercare" la posizione dei markers ed a calcolare il loro spostamento.

Siccome questo procedimento sarebbe pressoché impossibile se si prendesse in considerazione un solo pixel, si crea un'area di pixel chiamata subset o Zona di Correlazione (ZC) cioè un'area di più pixel utilizzata durante il processo di convergenza.

Una volta che il programma riesce a trovare questo subset nell'immagine successiva, si salva la sua posizione e si passa al prossimo.

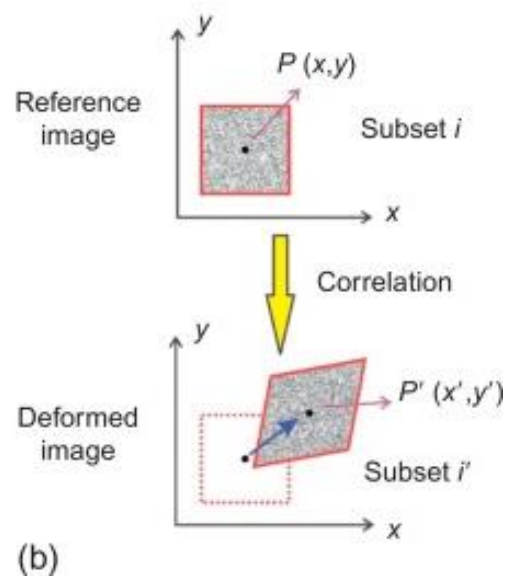
Bisogna dire che il matching dei subset viene fatto confrontando la distribuzione di intensità luminosa all'interno dell'area di pixel, per questo precedentemente si è detto di non creare la griglia perfettamente combaciante con gli estremi del provino e che la superficie presa in esame deve avere un pattern più variegato possibile, se questo non è presente in maniera naturale, lo si può creare andando a mettere della vernice sulla superficie stessa.

II.3 ALGORITMO DI CORRELAZIONE

Si suppone ora di aver indicato al programma la giusta mesh e che sia andato a buon fine, da questo momento esso comincia la correlazione delle immagini.

Si cercheranno di riassumere qui le principali metodologie che esso utilizza per la correlazione di immagini in 2-D, lasciando la trattazione specifica a testi più consoni.

Si ipotizza che questi “sottoinsiemi” creati dal programma sull’immagine in deformata siano legati ai loro corrispettivi nell’immagine deformata da una relazione biunivoca e anche di poter schematizzare questi sottoinsiemi in aree di forma quadrata; si riporta per semplicità qui sotto un’immagine indicante il procedimento, ipotizzato, di deformazione ideale di tale area.



Si suppone inoltre che la relazione tra sottoinsiemi locali possa essere estesa a tutta la superficie.

Sia poi $F(x,y)$ la funzione che lega le coordinate dei markers con i livelli di grigio presenti nei subset. [5]

Si indicano poi con x e y le coordinate dei punti del subset che il programma sta cercando di correlare nell’immagine indeformata.

Si nominano invece con x^* e y^* le coordinate del subset dopo la deformazione; e si definisce la funzione $G(x^*,y^*)$ come la funzione che lega le coordinate dei markers delimitanti il subset con i livelli di grigio presenti dentro di esso dopo la deformazione.

Si faccia adesso un'altra assunzione: ovvero quella di trovarci in un campo di piccoli spostamenti e deformazioni; notare che tale assunzione non è sempre veritiera, ma nel nostro caso per la trattazione che vogliamo fare e con le ipotesi fatte sopra, è più che giustificata.

Con tali assunzioni, siamo capaci di scrivere le relazioni che legano le coordinate dei punti del subset nell'immagine non deformata con quelle dell'immagine deformata, sviluppando in serie di Taylor il vettore posizione di P' (centro del subset dopo la deformazione) rispetto al centro delle coordinate da noi scelto e applicando tale sviluppo ai punti interni al subset, la relazione tra x e x^* tra y e y^* è : [4]

$$- \quad x^* = x + u_x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$- \quad y^* = y + v_y + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

Da notare che nel caso si stesse parlando della correlazione di immagini 3D si avrebbe dovuto includere anche la coordinata z dei punti del subset con relativo sviluppo.

Si è voluto fermare lo sviluppo in serie al primo termine per semplicità, volendo si può continuare lo sviluppo anche al secondo termine rendendo la misurazione più precisa.

Ora che si ha la relazione che lega le coordinate, possiamo definire la formula che lega $F(x,y)$ con $G(x^*,y^*)$.

Si specifica innanzitutto che esistono diverse relazioni matematiche le legano le due funzioni; per esempio, la Magnitude of Intensity Value (MIV) definita come:

$$MIV(x; y; x^*; y^*) = \sum |F(x; y) - G(x^*; y^*)|$$

Di questa funzione si va a cercare i valori di F e G che minimizzano la MIV.

Ma la più utilizzata invece è la Funzione di Intercorrelazione normalizzata (FIn), che tiene conto della variazione luminosa tra le immagini (se presente).

Tale Funzione è definita come: [5]

$$FIn\left(x, y, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \frac{\sum F(x; y) * G\left(x + u_x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y; y + v_y + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y\right)}{\sqrt{\sum F(x; y)^2 * \sum G\left(x + u_x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y; y + v_y + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y\right)^2}}$$

Di questi termini si distinguono $\frac{\partial u}{\partial x}$ e $\frac{\partial v}{\partial y}$ che vanno a rappresentare la dilatazione o la contrazione lineare del subset; invece, $\frac{\partial u}{\partial y}$ e $\frac{\partial v}{\partial x}$ rappresentano la rotazione dello stesso.

Di questa funzione invece si cerca il massimo, il quale calcolo richiede la risoluzione di 6 equazioni differenziali derivate dal numero di variabili al suo interno (da notare che nel caso a tre dimensioni si avrebbero avuto ben 9 variabili).

Il che rende il numero di calcoli che deve fare il programma molto alto, con tempi per la risoluzione troppo lunghi. [7]

Per cui a volte si preferisce un approccio semplificato di cui si indicheranno i punti cardine qui sotto, senza entrare nel dettaglio.

In primis si considera lo spostamento del subset come pura traslazione, senza rotazione; così facendo la relazione tra le coordinate prima e dopo la messa sotto carico diventa:

- $x^* = x + u$

- $y^* = y + v$

Con u , componente dello spostamento lungo l'asse delle x e v invece lungo y .

Si calcolano poi i valori di u e v che minimizzano la F_{In} tenendo però il resto delle variabili nulle; chiameremo queste due variabili u_1 e v_1 .

Poi si ripete il procedimento, questa volta però si limita il campo di esistenza di u e v in un intorno di u_1 e v_1 .

Iterando il procedimento si arriverà ad un punto nel quale i valori di u e v trovati in quell'iterazione differiscono dai valori trovati dall'iterazione precedente di un valore che avremo stabilito a priori.

Arrivati a quel punto avremo trovato i valori di traslazione del subset che chiameremo u_{FIm} e v_{FIm} .

Una volta trovati u_{FIm} e v_{FIm} , si ripete il procedimento per il calcolo dei coefficienti di dilatazione o contrazione del sottoinsieme nel quale però va prima scelto l'intervallo di esistenza dei due e vanno mantenuti costanti u e v con i valori calcolati prima.[8]

Infine, si itera il processo anche per le componenti rappresentati la rotazione del sottoinsieme tenendo costanti sia i coefficienti calcolatisi per u e v e sia quelli trovati precedentemente per la dilatazione e la contrazione del subset.

Una volta finito il procedimento per correlare lo spostamento di un subset da un'immagine all'altra, si passa al calcolo della deformazione degli stessi.

Infatti, una volta che si è calcolato il campo degli spostamenti del marker grazie alle Equazioni di Congruenza, che si riporterà qui in seguito, è possibile andare a calcolare il campo delle deformazioni del provino.

Infatti, ritornando alle formule che legano la x e la y prima e dopo la deformazione e parlando sempre in 2 dimensioni, si può notare che esse possono essere scritte in forma matriciale come:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

Così scritta questa equazione permette di distinguere tre elementi:

- $\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix}$ Che esprime il vettore spostamento del marker
- $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ Che rappresenta invece le coordinate del marker prima dello spostamento
- $\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$ invece rappresenta il gradiente dello spostamento indicato con ∇S

Una volta definito il gradiente dello spostamento, da esso si possono ricavare due tensori attraverso la relazione:

$$\nabla S = W + E$$

Questi due tensori rappresentano:

- E = Tensore delle deformazioni sferico, esso rappresenta la deformazione della sotto immagine
- W = tensore delle deformazioni deviatorico e rappresenta la parte della deformazione dovuta alla semplice rotazione rigida.

Si definiscano adesso le due matrici:

$$- E = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$$

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

Si prenda adesso il tensore E, grazie alle equazioni di congruenza è possibile correlare lo spostamento alla deformazione:[6]

$$- \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$- \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

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

Si tenga a mente che stiamo affrontando la trattazione in due dimensioni, per cui non sono riportate le equazioni per la coordinata z.

Applicando queste equazioni al tensore delle deformazioni, si vede che esso prende la forma:

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y \end{bmatrix}$$

Dal quale si possono ricavare le deformazioni del provino.

Da dire che le deformazioni vengono calcolate marker per marker per tutta la sequenza delle immagini, al fine di ricreare un andamento dello spostamento e della deformazione con lo scorrere del tempo. [6]

II.4 FINE ELABORAZIONE PROGRAMMA

Una volta che il programma ha finito di elaborare la prova, esso salva i risultati in appositi DATA base; Si andrà poi ad estrapolare questi dati per ogni nodo trovando quello che risulta avere la situazione più critica, da esso con l'ausilio di un altro programma sempre di MATLAB si andrà a creare il grafico dello spostamento e della deformazione finendo per individuare il FRAME nel quale il materiale entra in crisi.

Qui di seguito si riporta il programma che va ad estrarre le informazioni di spostamento e deformazione per un nodo e le va a graficare:

```
clear all
close all
clc
load('1_testA_piccolo', 'nodi', 'nh', 'nv');

numero_nodi = nh*nv;

for i = 1:numero_nodi
    delta_spostamento = nodi(i).def(1,1)-nodi(i).def(end,1);
    v(1,i)= delta_spostamento;
end

clear delta_spostamento ; clear i

m = find(v==max(v));

x = nodi(m).def(:,2);
y = nodi(m).def(:,6);

for i = 1:length(x)
    spostamento = x(1,1)- x(i,1);
    w(1,i)= abs(spostamento);
end
```

```
clear i ; clear spostamento
```

```
for i = 1:length(x)
```

```
    z(1,i) = i;
```

```
end
```

```
clear i
```

```
for i= 1:length(y)
```

```
    somma = sum(abs(y(1:i,1)));
```

```
    s(1,i) = somma;
```

```
end
```

```
clear i ; clear somma
```

```
plot(z,w);
```

```
legend('spostamento');
```

```
xlabel('numero dell immagine');
```

```
ylabel('spostamento');
```

```
title('spostamento provino');
```

```
figure
```

```
plot(z,s);
```

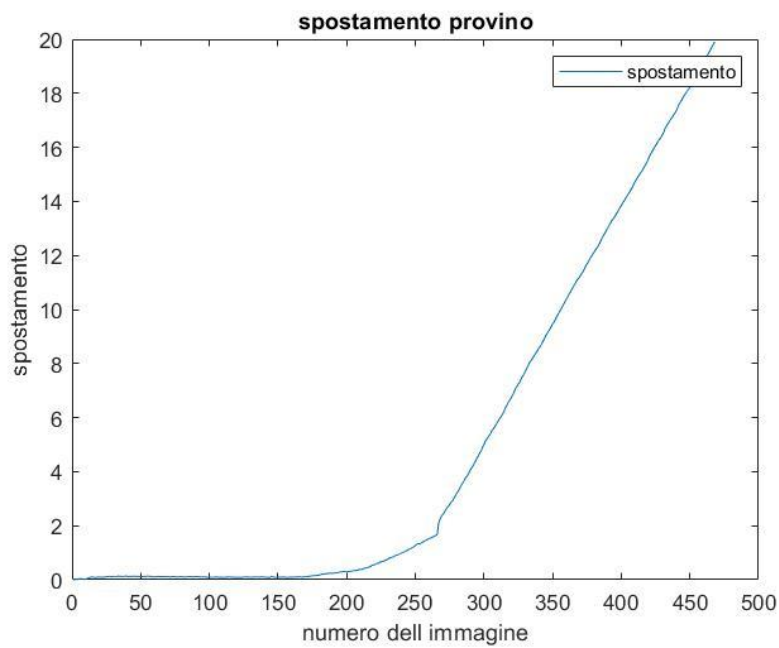
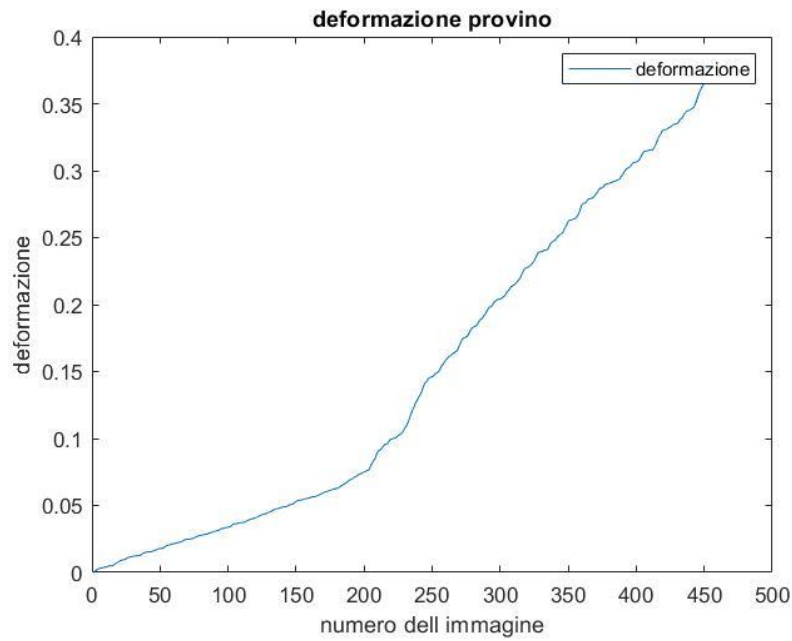
```
legend('deformazione');
```

```
xlabel('numero dell immagine');
```

```
ylabel('deformazione');
```

```
title('deformazione provino');
```

Facendolo partire come si è già accennato, si potranno ottenere i grafici dello spostamento e della deformazione del nodo più sollecitato, riportati qui di seguito:



Capitolo III

Svolgimento delle prove

III.1 SPIEGAZIONE E PREPARAZIONE

Per le prove si è posizionato il campione nella macchina su degli appositi appoggi.

Successivamente si è caricato il provino mentre il suo comportamento veniva monitorato attraverso delle telecamere che scattavano delle foto sia nella parte frontale che nella parte sottostante.

Infine le immagini così ottenute venivano elaborate dal programma MATLAB che tramite la tecnica di correlazione digitale di immagini, dava i valori per lo spostamento e la tensione applicata.

Successivamente si andava a prendere questi dati e con essi, sempre tramite MATLAB, si è andati a creare i grafici che mostrano l'andamento della tensione in funzione della deformazione del provino.

Per le prove si è utilizzata una macchina ZWICK Z050; questa tipologia è adattabile e versatile, ideale a tutte le applicazioni industriali.



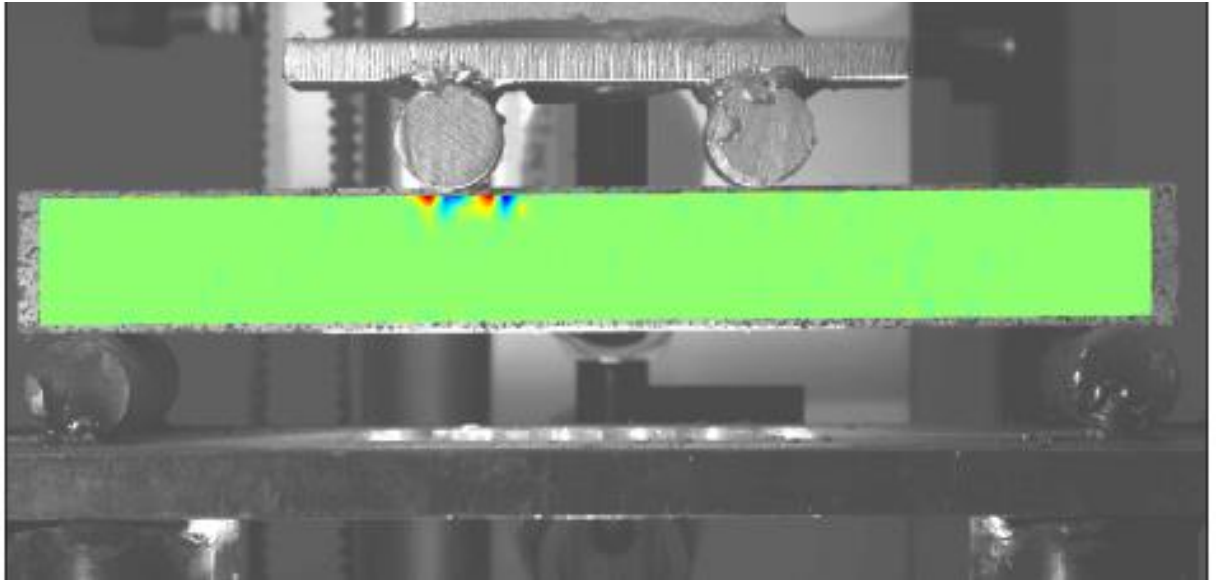
Il modello da noi usato ha una cella di carico di 50 KN, sono stati montati poi degli appositi appoggi su di essa per vincolare il provino durante la prova, suscitando in esso uno stato tensionale da noi voluto e ben conosciuto; al fine di poter “prevedere” le zone nelle quali si sarebbero create le cricche durante la fase di carico.

Oltre alle barre sono state posizionate 3 telecamere pixeling esse sono state posizionate 2 di fronte al provino a 50 cm da esso e a 30 cm una dall'altra, e una sotto lo stesso a 20 cm dal campione.

Le 2 telecamere frontali hanno un obiettivo da 50 mm mentre la telecamera inferiore da 12 mm.

Si è accennato prima allo stato tensionale indotto nel provino durante la prova, e se ne parlerà adesso più in dettaglio così da indicare anche la zona nella quale si prevede si formeranno le crepe.

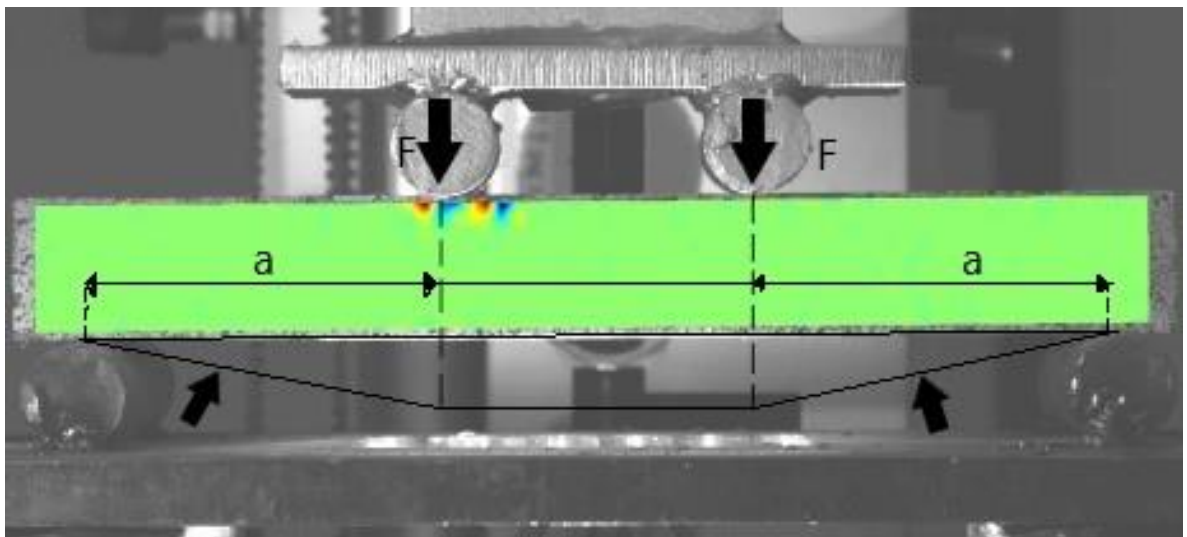
I test sono stati fatti in 4 point bending, questo sta ad indicare che il campione è vincolato alla macchina in 4 punti; 2 di appoggio e 2 di spinta.



Si metta qui una delle immagini prese durante il test per rendere chiaro il posizionamento di tali vincoli.

Come si vede i due vincoli di appoggio si trovano sotto il provino, mentre quelli di spinta si trovano nella parte superiore.

Volendo rappresentare il grafico del momento flettente scaturito nel provino per colpa della sua messa sotto carico, si presenterebbe come nell'immagine qui sotto:



Dove si può vedere come nella prima parte esso cresca, mentre nella parte finale invece decresce linearmente con la lunghezza del provino, mentre nella parte centrale rimane costante al suo valore massimo.

Volendo essere più specifici con il valore del momento, esso sarebbe:

- Nella prima parte: $M_1 = Fx$

- Nella parte in mezzo: $M_2 = Fa$

- Nella parte finale invece: $M_3 = F(l - x)$

Dove l è la lunghezza tra i due appoggi e la x è presa uguale a zero nell'appoggio di sinistra e crescente verso destra.

Essendo poi il momento flettente legato alla tensione dalla formula:

$$\sigma = \frac{M}{I}y$$

Dove M è il momento flettente, I è la matrice d'inerzia della sezione del provino e y è la distanza del punto preso in esame dall'asse neutro; ovvero quell'asse nel quale le tensioni normali dovute alla flessione sono nulle.

Dalla relazione si capisce come ci si aspetti che le cricche si formino proprio tra i due vincoli centrali al campione.

Da notare che una stima dello spostamento delle varie regioni del provino poteva essere fatta anche per integrazione una volta conosciuta la funzione che descrive il momento flettente.

Infatti, grazie alla relazione:

$$\frac{M(x)}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Con le dovute condizioni al contorno (si tratta di un'equazione differenziale di secondo grado) si può giungere alla relazione che lega lo spostamento dei punti del campione in direzione perpendicolare alla sua superficie in relazione alla coordinata x presa come in precedenza.

Si indicheranno qui sotto le soluzioni di tale equazione considerando tutti i vincoli perfetti cioè che non cedono sotto l'applicazione del carico (cosa anche necessaria per la riuscita dei test).

$$- y_{ab} = \frac{Fx}{6EI} (x^2 + 3a^2 - 3la)$$

$$- y_{bc} = \frac{Fa}{6EI} (3x^2 + a^2 - 3lx)$$

Dove per A si è preso il punto corrispondente alla posizione del primo vincolo da sinistra, B il secondo, C il terzo e D il quarto.

Da notare che vista la specularità del problema, lo spostamento dei punti nella parte AB e nella parte CD sono uguali, per cui basta la funzione della prima parte.

Da notare anche che, per quanto detto fino ad ora, si può ipotizzare che il provino subirà lo spostamento maggiore nel il punto a $x=l/2$ situato nella zona descritta dalla seconda equazione scritta sopra.

Per cui si può anche calcolare la $y(\max)$ che prende la forma:

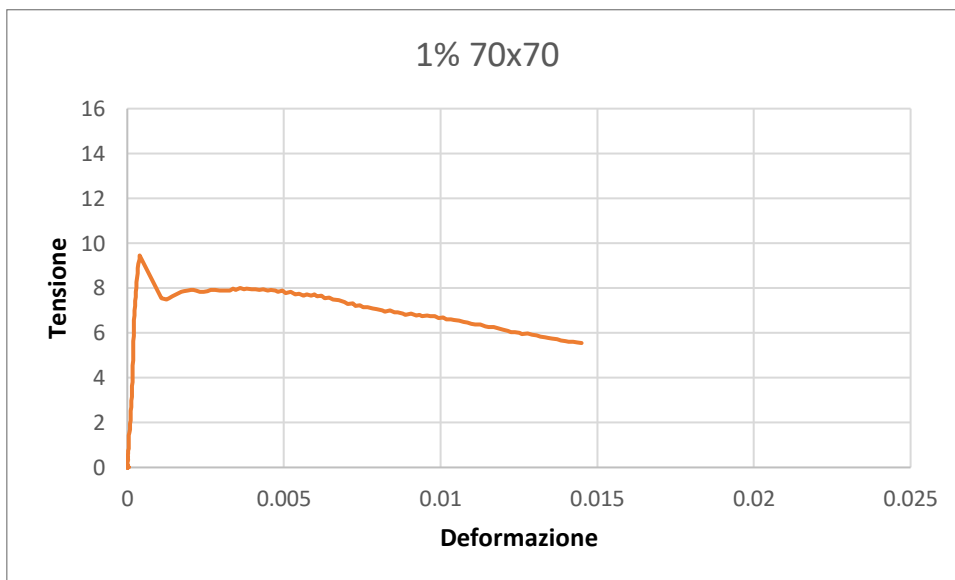
$$y_{max} = \frac{Fa}{24EI} (4a^2 - 3l^2)$$

Adesso che si è spiegato nel dettaglio come avverranno le prove e in maniera approssimativa la teoria che si trova dietro di esse, si va ad analizzarle una ad una.

III.2 ELENCO PROVE

Si inizia ora con la spiegazione dettagliata prova per prova effettuata in laboratorio, andando ad indicare il frame di rottura ed i frame nei quali, se presenti, si palesavano altre cricche o difetti dovuti alla crisi locale del materiale per colpa del crescente carico applicato su di esso:

1_TESTA



Analizzando la prova con i programmi MATLAB e con i grafici costruiti grazie ad esso, si vede che il provino comincia ad entrare in crisi ai frame 255 – 257 nei quali si comincia già a vedere un primo accenno di cricca

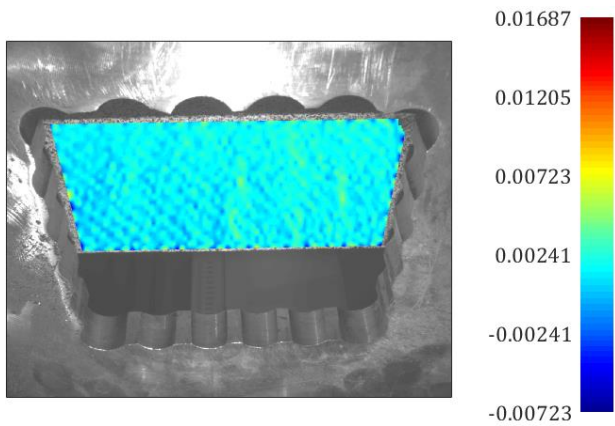


Figura 3: Frame 255

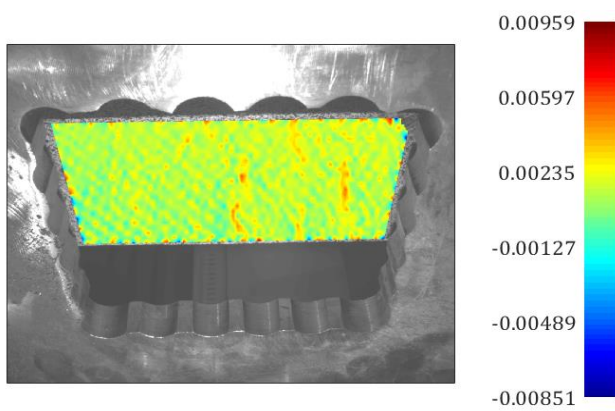


Figura 4: frame 257

Infatti, andando ad analizzare tali frame sul grafico deformazione – tensione si può notare che esso ha un cambiamento di pendenza proprio in quei frame:

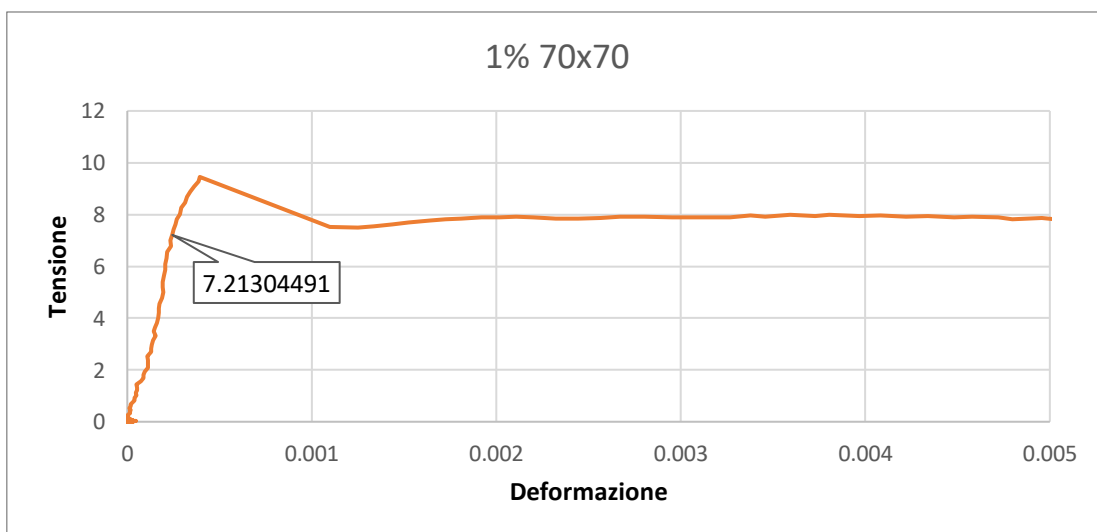


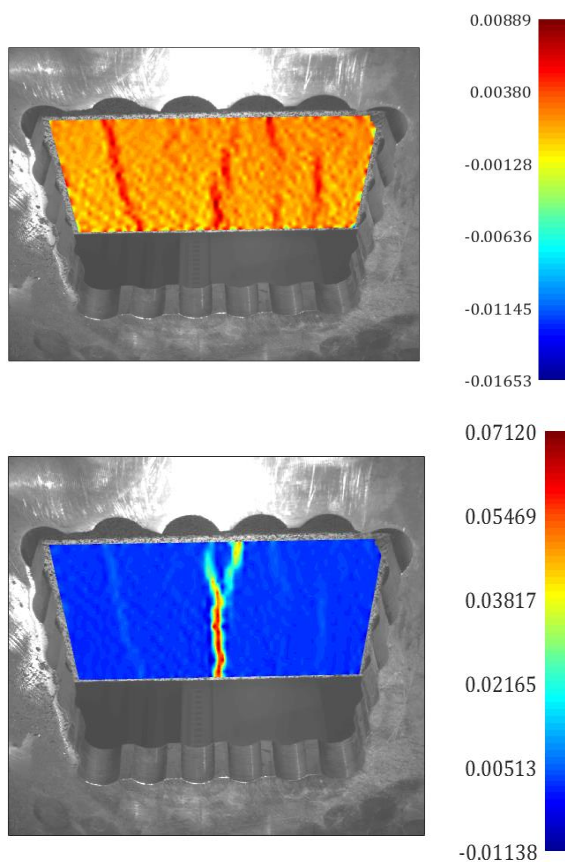
Figura 5: Grafico 1_testA

Si è riportato il grafico con il valore di tensione in quel punto per rappresentare meglio i frame in questione.

Andando invece a guardare i dati veri e propri della tabella in quei frame il cambiamento della pendenza non si nota; questo sta a significare che il materiale sta per entrare in crisi ma ancora non ha raggiunto un valore di tensione tale da generare delle discontinuità nel rapporto deformazione - tensione.

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 255 | 0,042674 | 10308,64 | 0,000244 | 7,213045 |
| 256 | 0,043981 | 10600,96 | 0,000251 | 7,417585 |
| 257 | 0,045821 | 10881,49 | 0,000261 | 7,613874 |

Valore che verrà raggiunto poche immagini più in la, precisamente al frame 266 – 267, nei quali si vede proprio la fessurazione del provino grazie alle immagini prese da sotto di esso.



Si riporta qui di seguito i valori tabulati ed il grafico per una migliore visualizzazione della crisi locale:

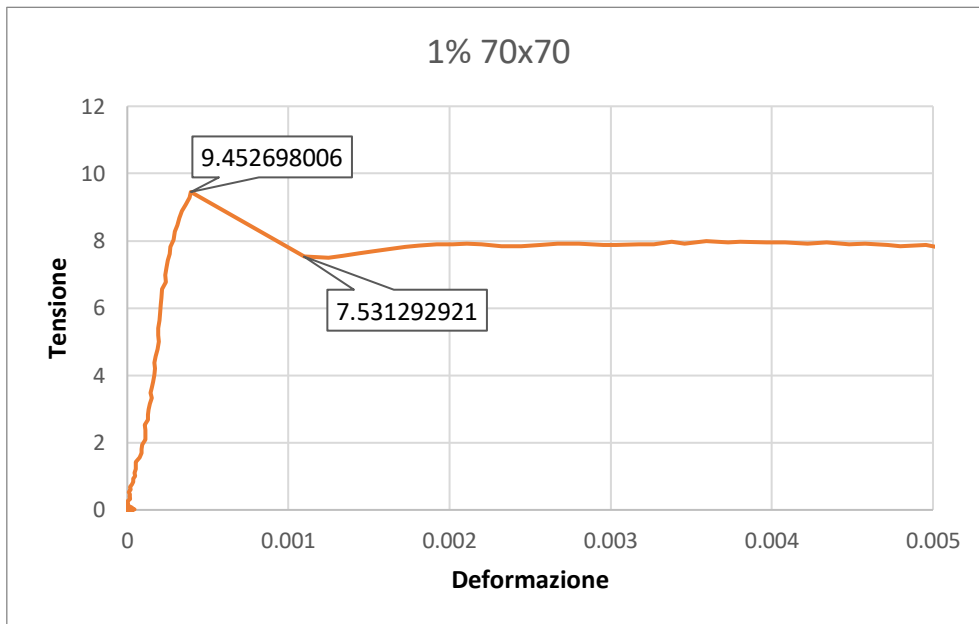


Figura 6: grafico deformazione - tensione 1_testA

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 266 | 0,069133 | 13509,48 | 0,000395 | 9,452698 |
| 267 | 0,192047 | 10763,47 | 0,001096 | 7,531293 |

Durante la rottura si nota un vero e proprio cambiamento di pendenza del grafico, una perdita di resistenza del materiale di circa 1,9Mpa e un calo della forza applicata 2.746,01 N.

Inoltre, se si andasse a guardare il grafico che mette in relazione il numero di frame e la deformazione del provino, che verrà messo per semplicità di trattazione qua sotto,

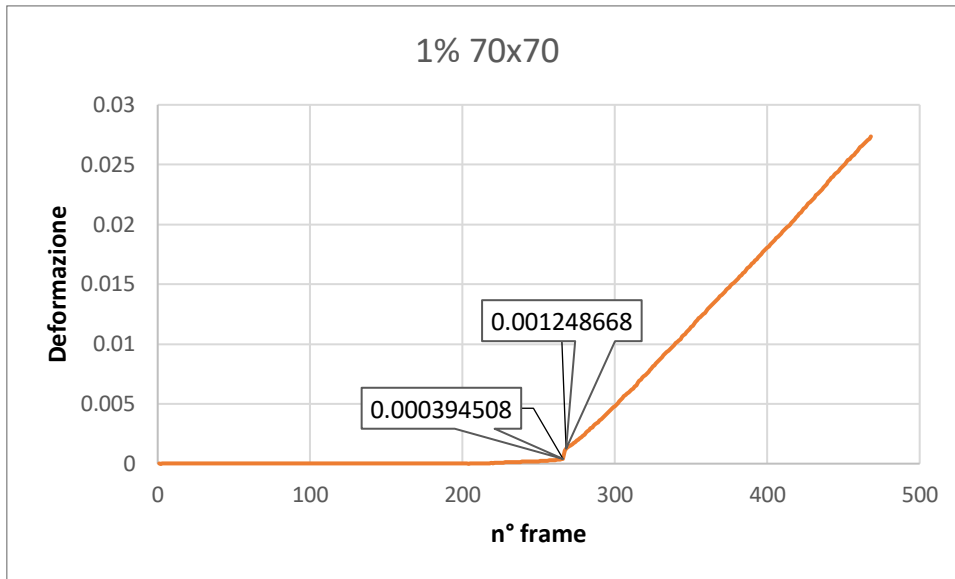


Figura 7: grafico 1_testA frame – deformazione

si noterebbe come la deformazione del provino era rimasta al minimo fino al frame 266, punto nel quale avviene la rottura del materiale e dal quale comincia la relazione di linearità tra frame e deformazione.

Si nota inoltre che vista la poca percentuale di fibre nel provino, si ricorda che 1_ sta per 1% di fibra, il materiale ha un comportamento di tipo fragile, infatti dopo la sua rottura non abbiamo una fase crescente della curva.

Durante il carico del provino 1_testA si sono quindi raggiunti i valori massimi di tensione e forza pari a:

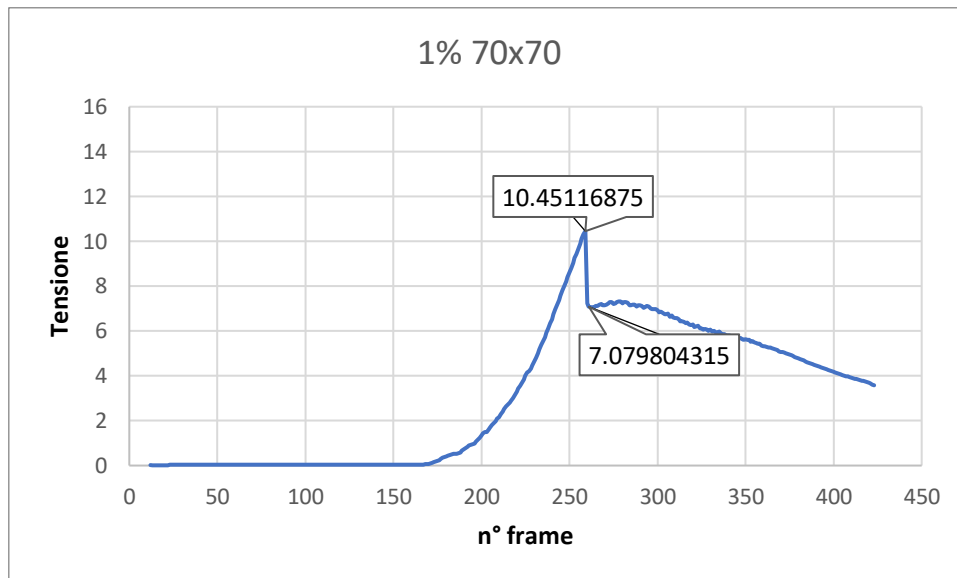
- MaxTensione : 9,452698 MPa
- MaxForza : 13509.48 N

Dopo questo frame non sono stati notati altri punti di interesse, per cui si termina qui la sua trattazione.

1_TestB

In questa prova, si è andato ad analizzare in primis il grafico che lega la tensione con il n° dell'immagine.

Figura 8: andamento n°imm - tensione



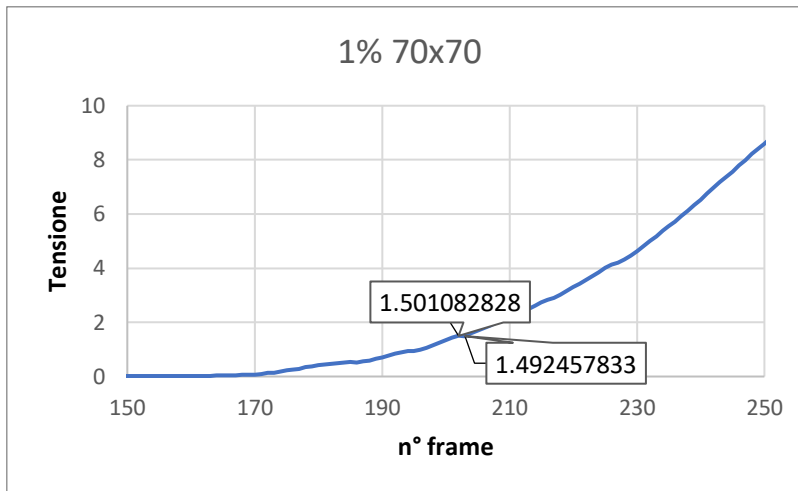
Come si vede dal grafico, si ha una brusca diminuzione della resistenza del materiale ai frame 259-260

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 259 | 0,073326 | 14936,46 | 0,000418 | 10,45117 |
| 260 | 0,223834 | 10352,48 | 0,001277 | 7,24372 |

Con una riduzione della stessa di circa 4600N.

Prima di andare a studiare tale punto però, si vuol vedere se prima di esso ci siano degli andamenti interessanti prendendo solo i frame dal primo al duecentocinquantesimo:

Figura 9: andamento n°imm - tensione nei frame 150 - 250



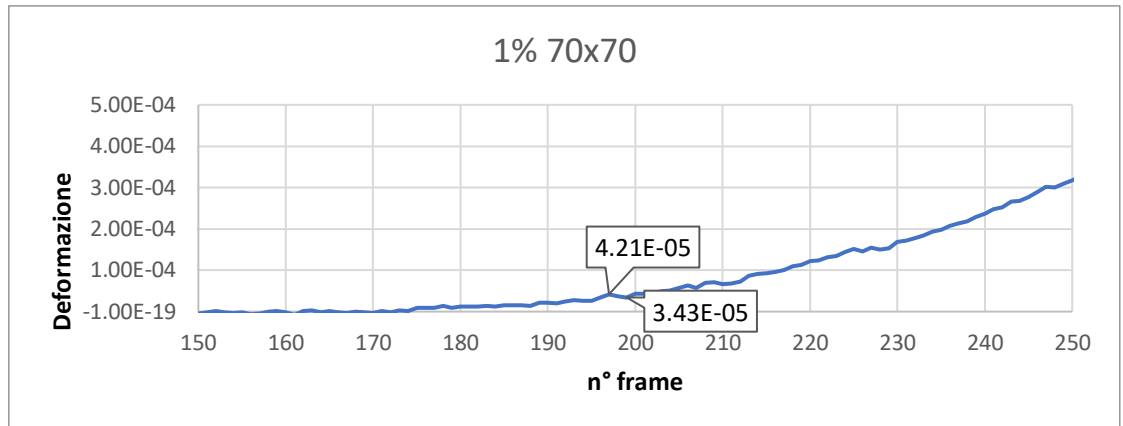
Dal grafico si vede che abbiamo 2 punti di interesse prima del punto di massimo assoluto della curva:

- Frame 202 - 203

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 201 | 0,007507 | 2044,573 | 4,28E-05 | 1,430605 |
| 202 | 0,007902 | 2145,298 | 4,51E-05 | 1,501083 |
| 203 | 0,008541 | 2132,971 | 4,87E-05 | 1,492458 |
| 204 | 0,008884 | 2283,917 | 5,07E-05 | 1,598076 |

- Frame 198

In questo frame non si ha una fluttuazione della tensione, ma un cambiamento di pendenza sospetto della curva come si vede meglio dal grafico che relazione numero immagine e deformazione.



Analisi frame 198

In questo frame si nota un cambiamento di pendenza da parte della curva rappresentante l'andamento della deformazione in funzione del numero di frame, non la formazione di una cricca vera e propria.

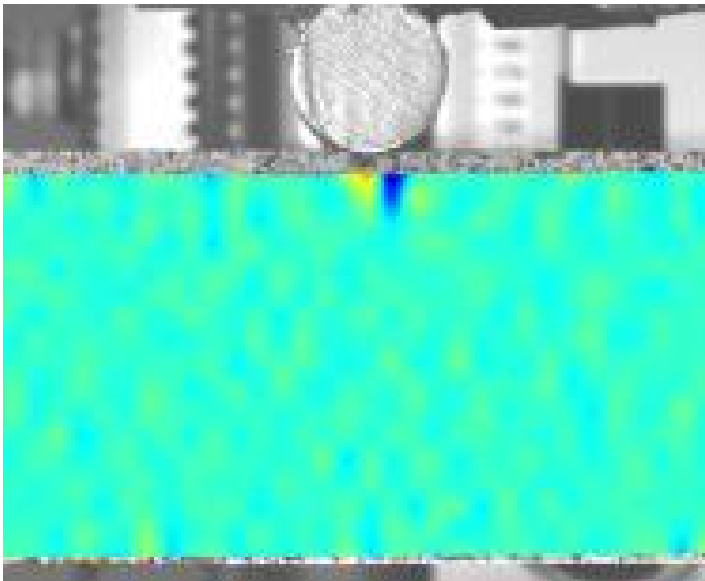
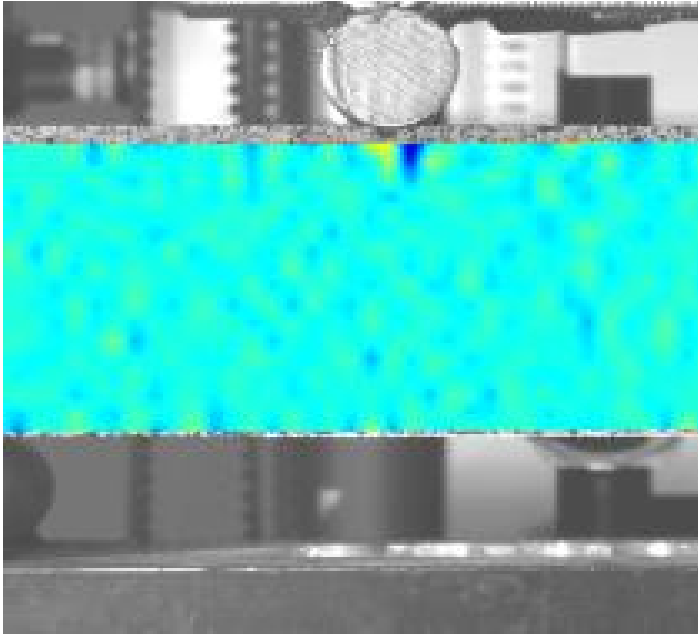
Tale comportamento è dovuto dal fatto che si sono formate delle cricche nelle zone limitrofe agli appoggi.

Frame 202 – 203

In questi frame invece ha l'inasprimento delle cricche precedentemente formati nelle vicinanze degli appoggi che fanno diminuire, seppur di poco, la resistenza del materiale; infatti, andando ad analizzare sia le immagini prese di fronte al provino e i dati del grafico si nota tale calo.

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 202 | 0,007902 | 2145,298 | 4,51E-05 | 1,501083 |
| 203 | 0,008541 | 2132,971 | 4,87E-05 | 1,492458 |

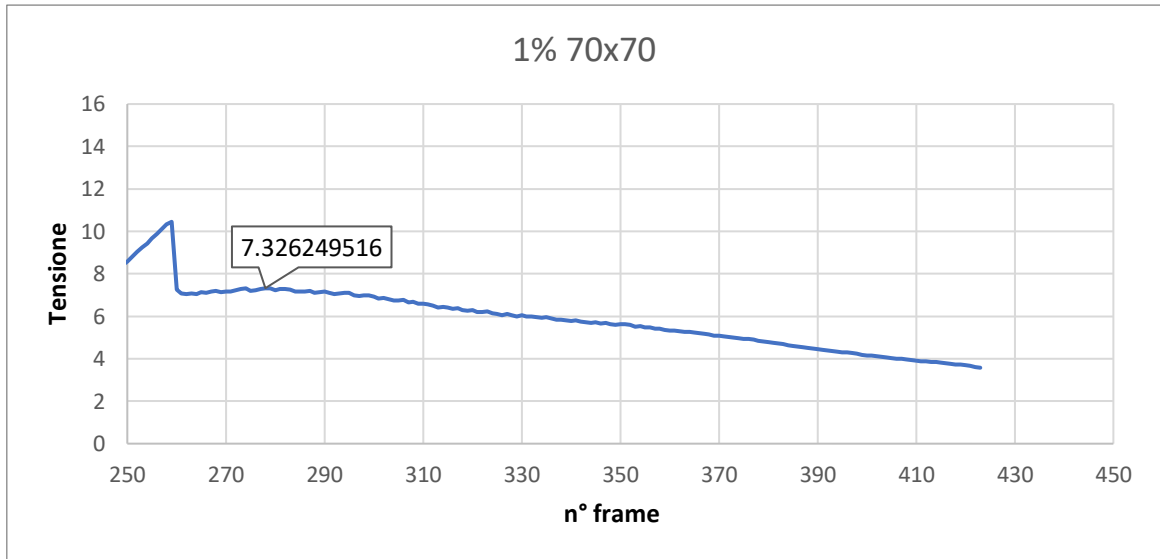
frame 202



frame 203

Dalle immagini si può anche notare l'inizio della formazione di delle cricche anche nelle zone limitrofe all'appoggio di sinistra, dove prima erano assenti o di dimensione trascurabile.

Si vada adesso ad analizzare il massimo assoluto del grafico e la parte dopo di esso:



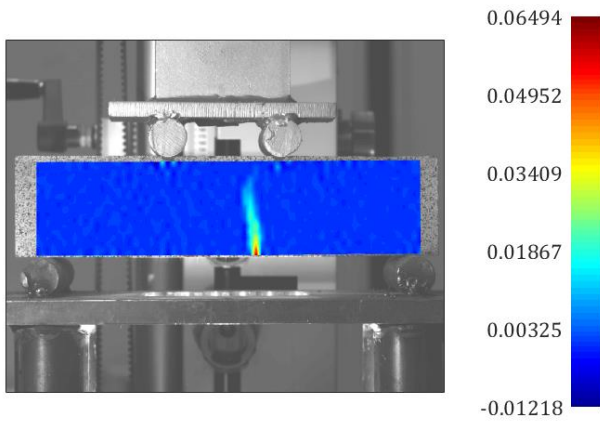
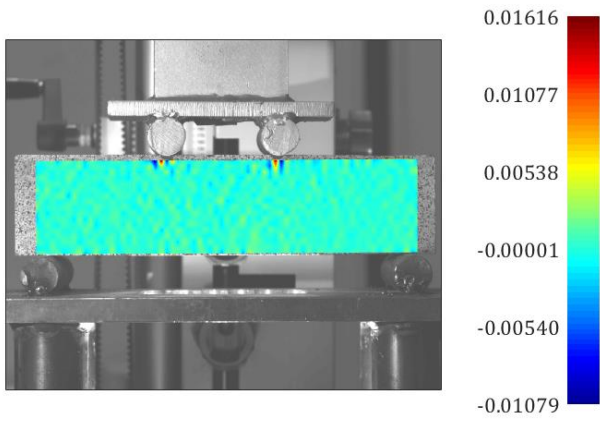
Si vede che oltre al massimo assoluto della curva, un altro punto di interesse è quello di massimo relativo della stessa al frame 278.

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 276 | 0,508366 | 10338,51 | 0,002901 | 7,233944 |
| 277 | 0,522479 | 10413,87 | 0,002982 | 7,286672 |
| 278 | 0,538102 | 10470,43 | 0,003071 | 7,32625 |
| 279 | 0,559673 | 10457,06 | 0,003194 | 7,316897 |
| 280 | 0,577768 | 10348,16 | 0,003297 | 7,240696 |
| 281 | 0,591734 | 10404,05 | 0,003377 | 7,279801 |

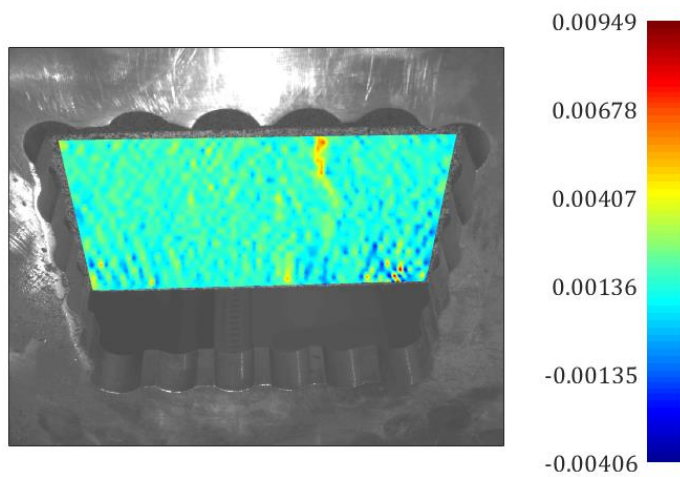
Si decida di analizzare prima il massimo assoluto al frame 259

Frame 259 – 261

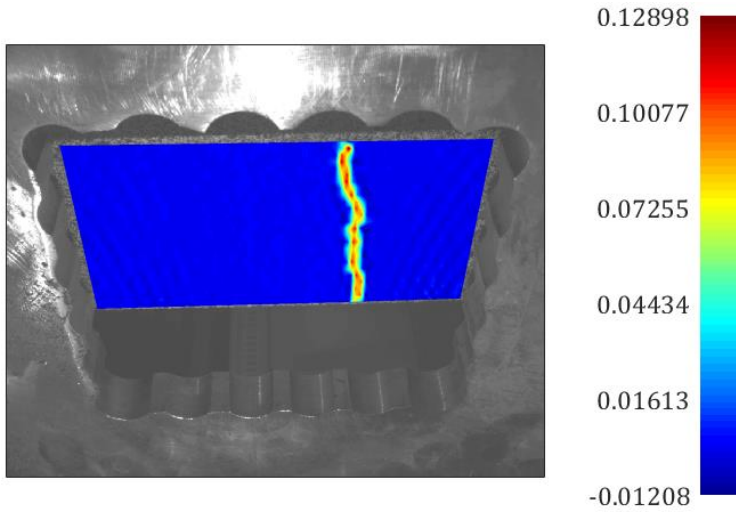
Analizzando le immagini di questi frame, si può notare come il materiale abbia subito una rottura netta, rottura che ha causato l'enorme sbalzo di tensione e di forza registrato dal programma matlab.



Osservando invece le immagini prese da sotto il provino, si può notare come la cricca si è formata tra i frame 259 – 260 ma la sua completa propagazione la si ha tra i frame 260 e 261



frame 260



frame 261

Infatti, andando a guardare il grafico deformazione – tensione si nota che dopo il frame 160, si ha una ulteriore diminuzione della tensione e della forza.

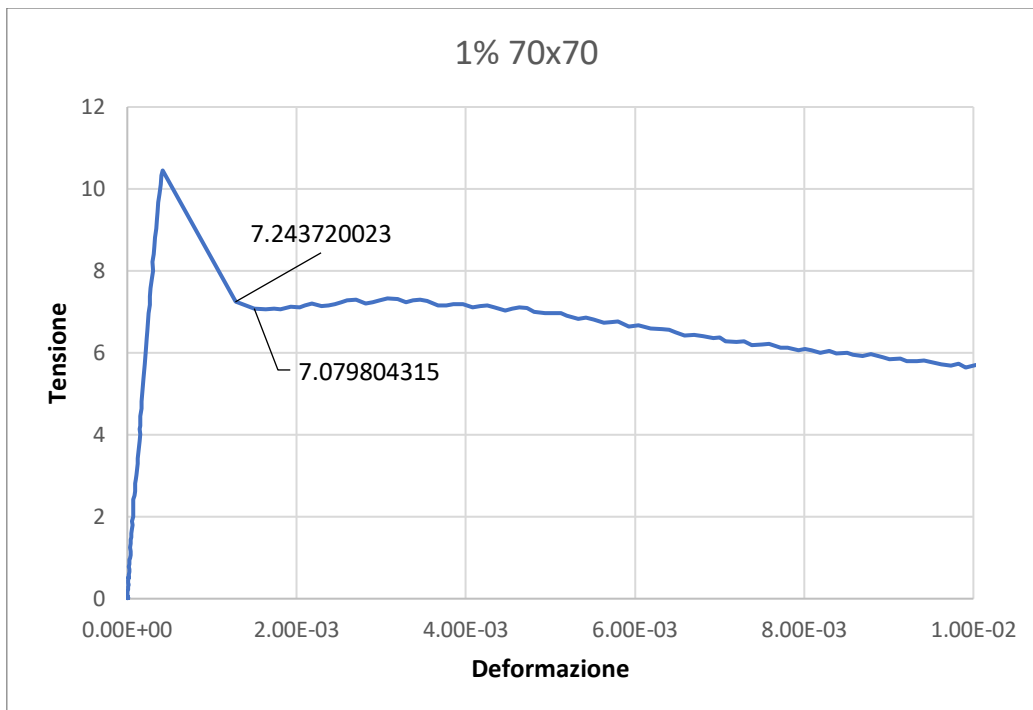


Figura 10: grafico tensione - deformazione frame 260 – 261

Per semplicità di lettura si riportano qui i dati tabulati di excell:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 259 | 0,073326 | 14936,46 | 0,000418 | 10,45117 |
| 260 | 0,223834 | 10352,48 | 0,001277 | 7,24372 |
| 261 | 0,262902 | 10118,22 | 0,0015 | 7,079804 |

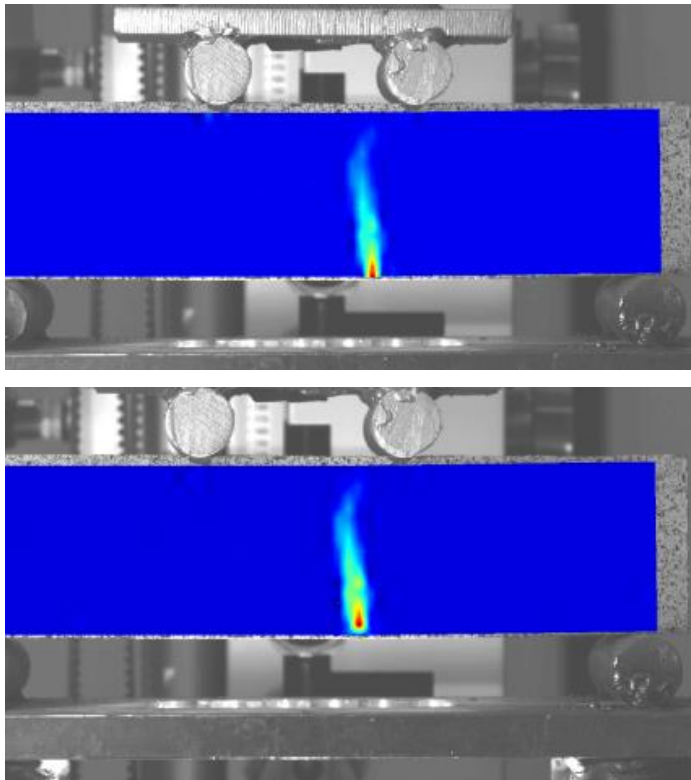
Frame 278 – 284

Andando ad analizzare il semplice frame di massimo relativo, non si riescono a notare i motivi del perché il provino abbia perso la capacità di resistere all'aumento del carico.

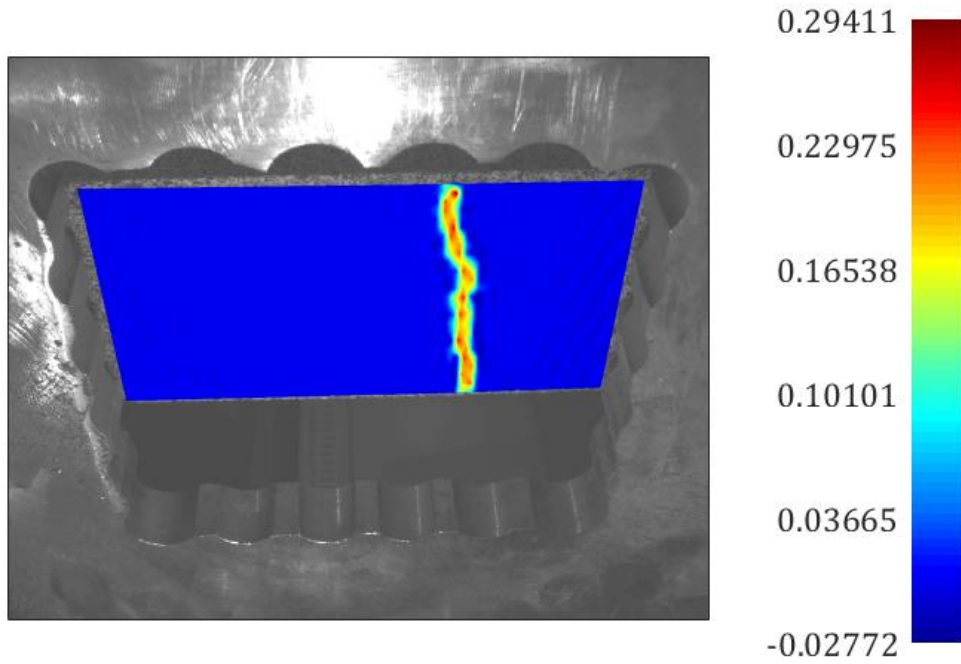
Infatti, per notare la causa di ciò bisogna aumentare il numero di frame analizzati intorno ad esso.

Così facendo infatti si vede che il definitivo cambio di pendenza della curva invece, è stato causato dall'insinuarsi della crepa formatasi in precedenza all'interno del provino.

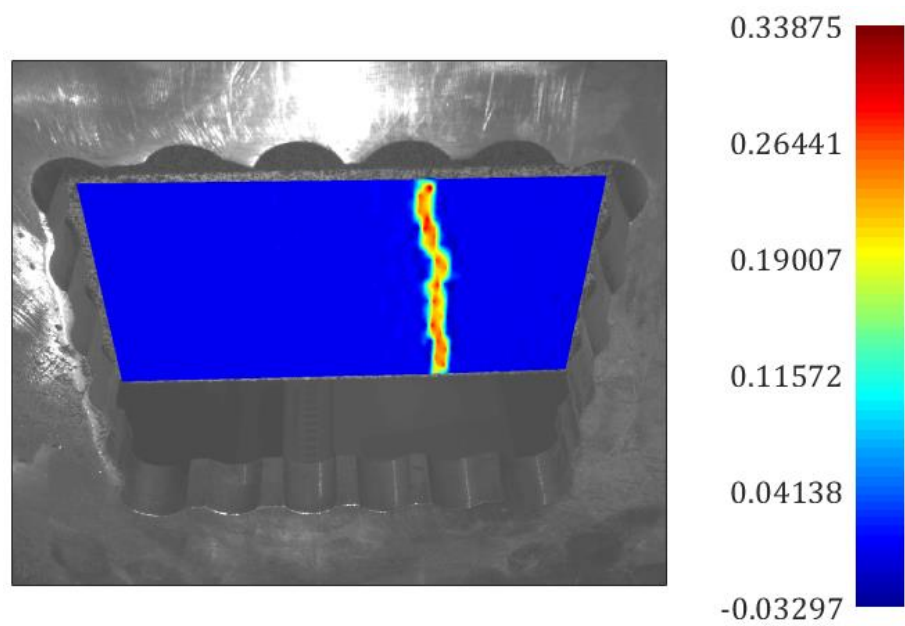
Infatti, andando a studiare le immagini dei frame sopracitati, si vede come essa scavi all'interno del provino compromettendone così le proprietà meccaniche



Questo inasprimento è più evidente attraverso le immagini prese da sotto il provino:



Frame 278



frame 284

Quindi dalla prova, si è visto che i valori massimi di resistenza e forza a cui il provino può essere sottoposto prima della rottura sono:

- Max Tensione: 10,45 Mpa
- Max Forza: 14936.46 N

Si passi adesso all'analisi dello stesso tipo di provino ma con una percentuale di rinforzo in fibra del 2,5%.

25_TestA

La prima cosa che si nota è l'aumento della duttilità di tali materiali.

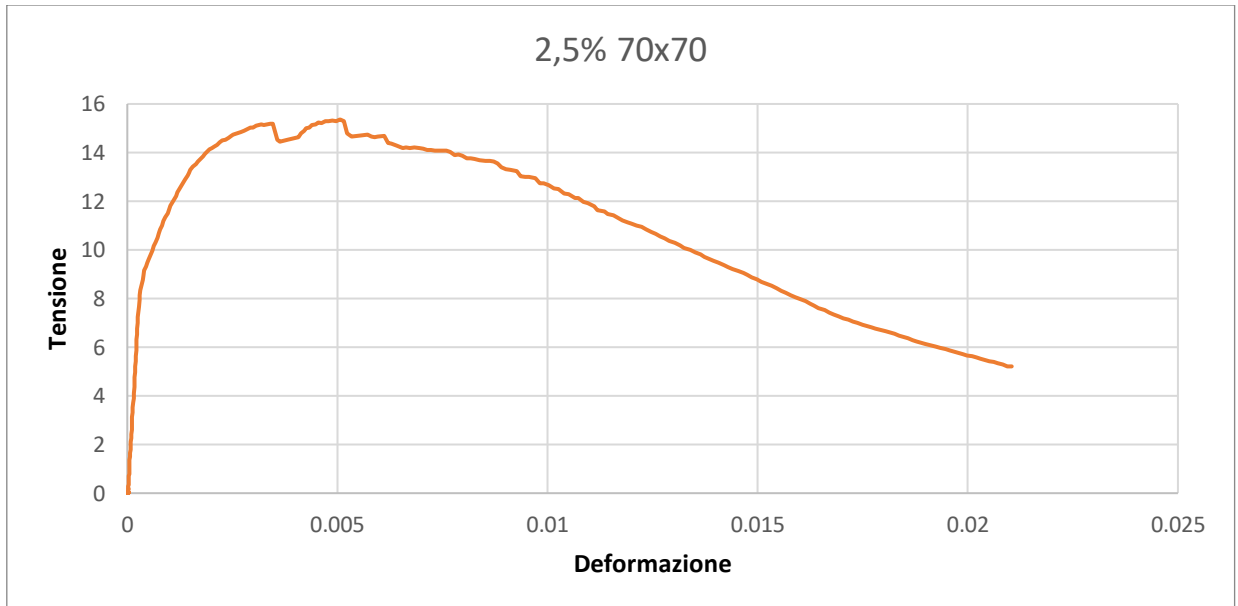


Figura 11: grafico tensione - deformazione 25_TesA

Infatti, da come si evince dal grafico, il cambio di direzione dello stesso avviene in maniera molto più graduale dei provini precedenti.

Questo comportamento è dovuto dalla percentuale di fibre presenti nel provino; infatti, aumentando la loro presenza nella matrice del materiale composito, se ne aumenta la duttilità modificando anche il comportamento del materiale quando viene posto sotto stress.

Infatti, si vede dal grafico che, contrariamente a quanto accaduto nelle prove precedenti, esso ha un comportamento più simile a materiali che manifestano l'incrudimento.

Anche per questo non è possibile individuare un punto preciso in cui si 'rompe' il provino, perché, sempre grazie alla percentuale di rinforzo, esso non sarà soggetto alla sola rottura ma andrà in contro al fenomeno della multi-fessurazione.

Per cui bisognerà analizzare le varie fluttuazioni della forza (e della resistenza) del materiale durante la prova.

Prima di cominciare l'analisi delle cause di tali fluttuazioni però, si riporta il grafico di tale prova cambiando la variabile presente sull'asse delle x ; ove si metterà il numero di frame.

Questo permetterà di analizzare in maniera più veloce i vari punti di interesse e rendere la comprensione più agevole:

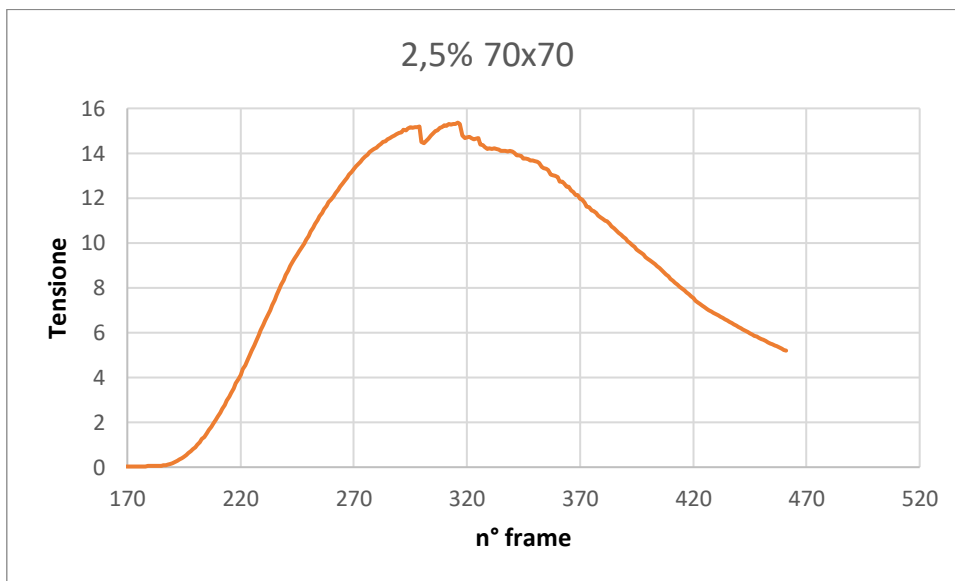
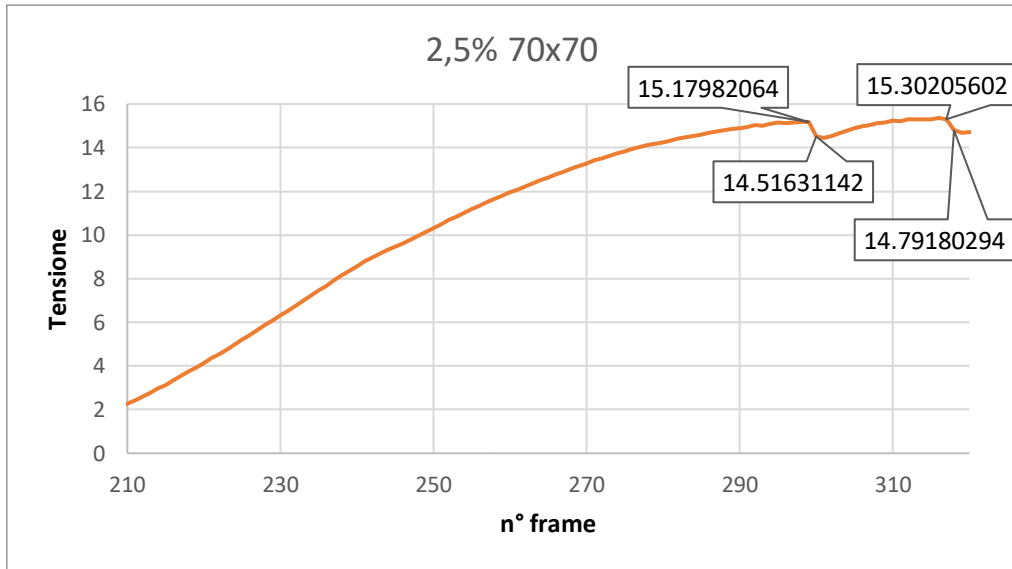


Figura 12: andamento n°frame - tensione

Data l'elevata mole di particolarità nel grafico; per rendere la trattazione più chiara e precisa, si è diviso il campo delle x in due sottoinsiemi uno che va dal frame 0 al frame 320 e l'altro che va dal frame 320 al 520.

Analisi frame prima del 320



Oltre ai quattro punti indicati sul grafico, un'altra zona nella quale si ha un comportamento inusuale del provino, ovvero tra i frame 236 – 245.

Questa zona non è visibile nel grafico riportato sopra, ma invece è individuabile nel grafico tensione – deformazione:

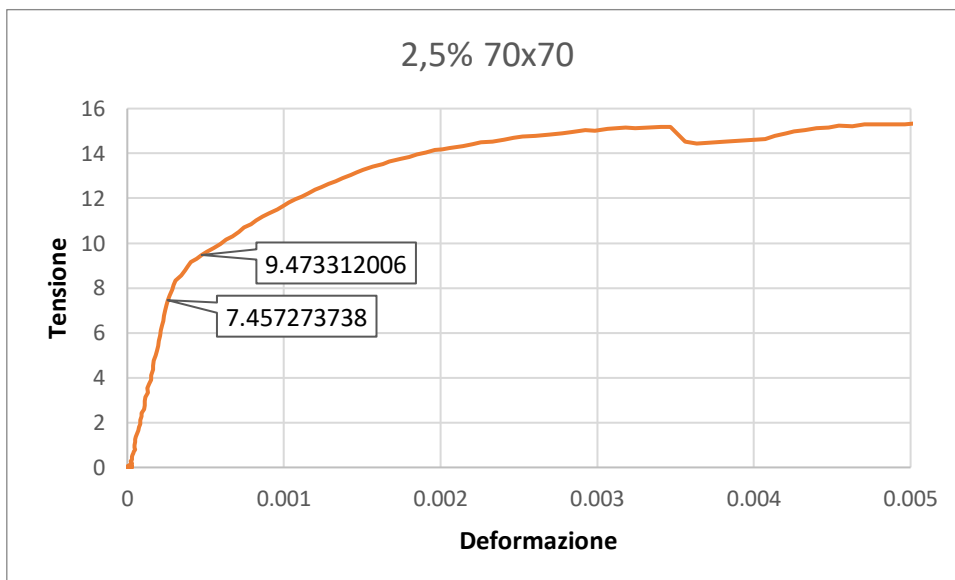
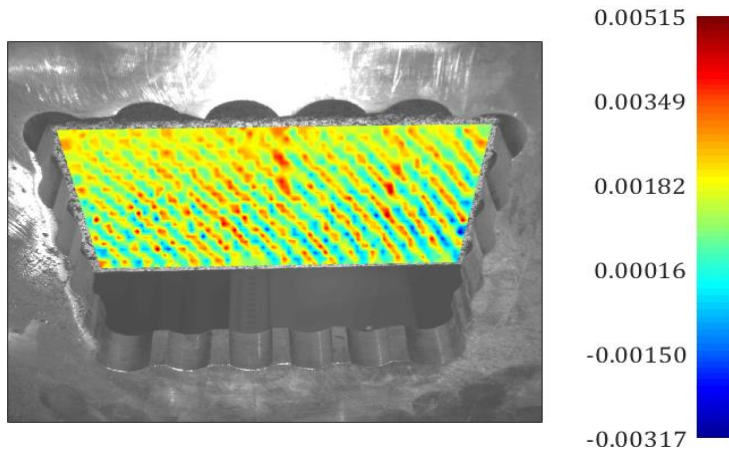


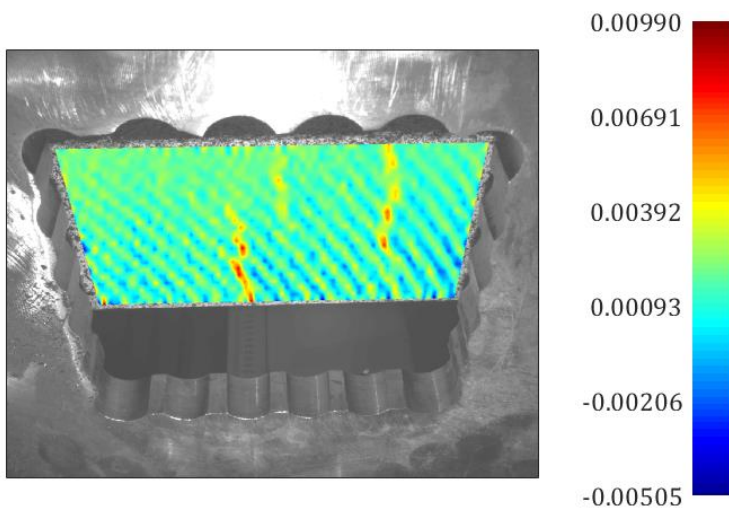
Figura 13: tensione - deformazione 25_testB

Infatti, come si vede, si nota un cambiamento di pendenza della curva nella zona i cui valori limite sono riportati sul grafico e rappresentato i valori di tensione nei frame 235 – 245.

Si riportano di seguito le immagini prese durante la prova per semplicità di lettura:



Frame 236



frame 240

Studiando le immagini derivanti da questi frame, infatti, si può vedere come già da questo istante si sono cominciate a formare delle cricche causa quindi del cambiamento di pendenza.

La completa apertura delle stesse la si avrà proprio al frame 245

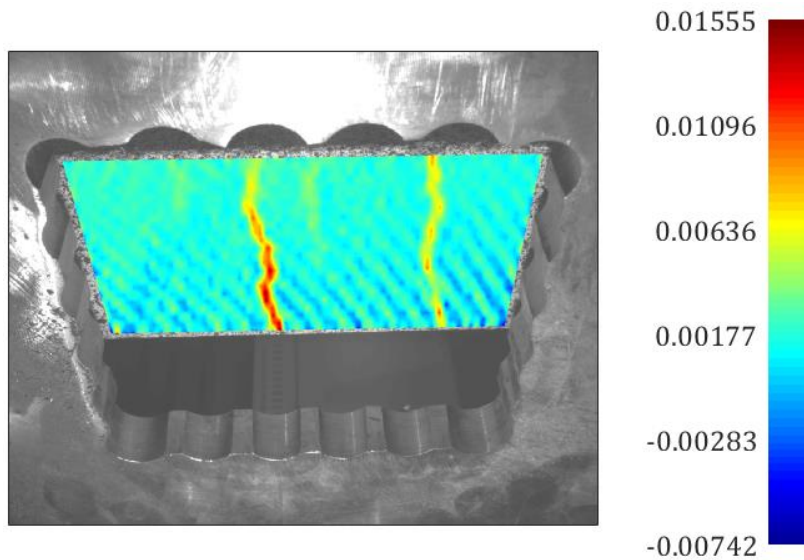


Figura 14: Frame 245

Da notare che nonostante la loro formazione, la pendenza della curva continua ad essere positiva, questo grazie alla presenza di una maggiore quantità di fibre che permettono al materiale di comportarsi con più duttilità.

Andiamo adesso ad analizzare invece i frame presenti sul grafico:

- Frame 299 – 301

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 298 | 0,596534 | 21684,77 | 0,003404 | 15,17302 |
| 299 | 0,60786 | 21694,49 | 0,003469 | 15,17982 |
| 300 | 0,624141 | 20746,23 | 0,003562 | 14,51631 |
| 301 | 0,63679 | 20653,47 | 0,003634 | 14,45141 |
| 302 | 0,668489 | 20757,7 | 0,003815 | 14,52434 |

Qui si ha un punto angoloso della curva, dove la tensione cala improvvisamente

- Frame 302 – 303

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 301 | 0,63679 | 20653,47 | 0,003634 | 14,45141 |
| 302 | 0,668489 | 20757,7 | 0,003815 | 14,52434 |

| | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| 303 | 0,713495 | 20926,96 | 0,004072 | 14,64277 |
| 304 | 0,724572 | 21125,26 | 0,004135 | 14,78153 |

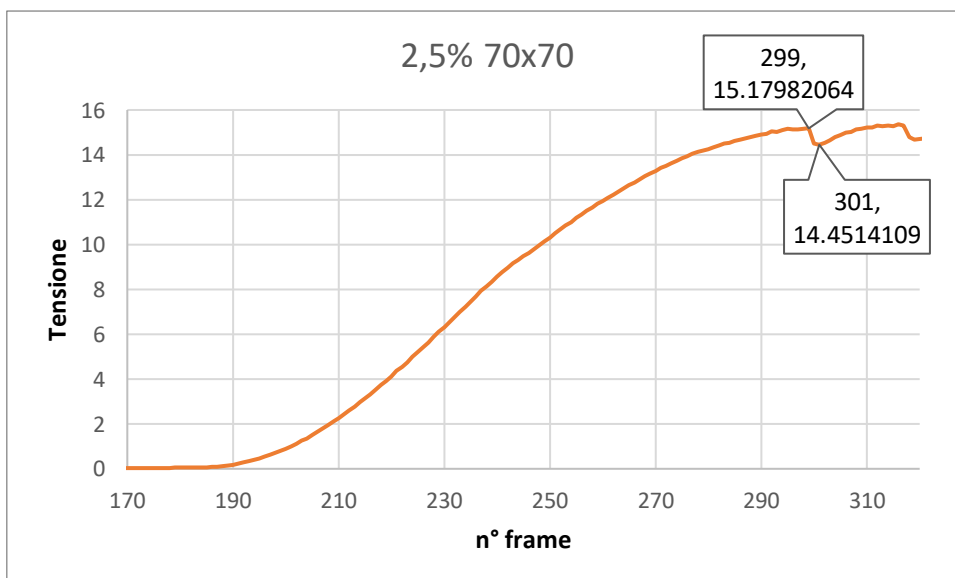
In questi frame non si vede una diminuzione della tensione ma un'irregolarità nella curva

- Frame 312 – 319

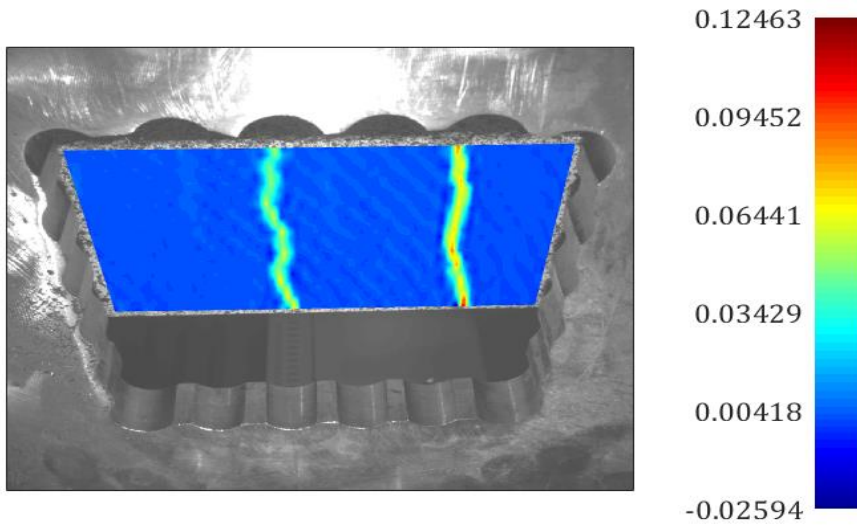
| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 312 | 0,824918 | 21854,3 | 0,004707 | 15,29164 |
| 313 | 0,838557 | 21848,38 | 0,004785 | 15,2875 |
| 314 | 0,855423 | 21876,61 | 0,004881 | 15,30725 |
| 315 | 0,86983 | 21852,19 | 0,004964 | 15,29016 |
| 316 | 0,887723 | 21955,98 | 0,005066 | 15,36278 |
| 317 | 0,903122 | 21869,19 | 0,005154 | 15,30206 |
| 318 | 0,916458 | 21139,95 | 0,00523 | 14,7918 |
| 319 | 0,935697 | 20967,63 | 0,00534 | 14,67123 |

Anche qui si osserva un punto angoloso del grafico, dove la tensione cala in maniera improvvisa.

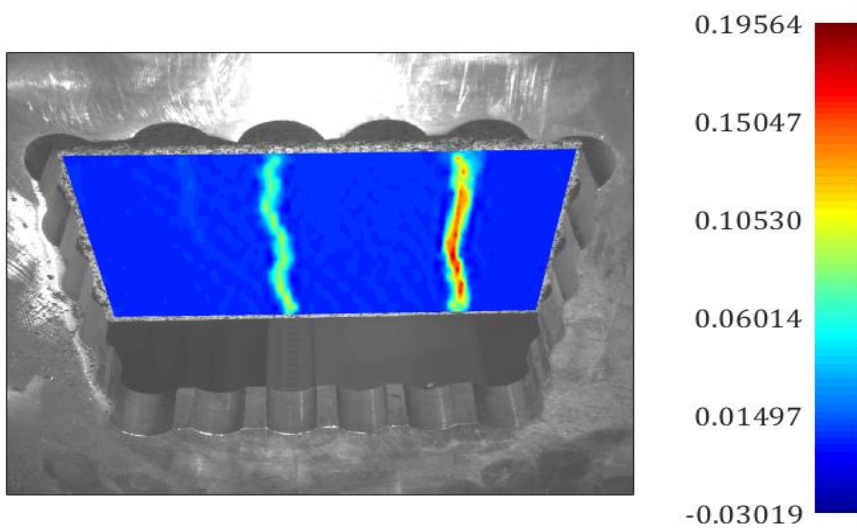
Frame 299 – 301



In questi frame si ha un salto della tensione che crea un punto di discontinuità abbastanza evidente, cerchiamo di individuarne il motivo.



Frame 299



frame 301

Contrariamente a quanto si poteva pensare questa fluttuazione non è dovuta alla formazione di una nuova cricca, bensì all'inasprimento di quella già formatasi nel frame 245.

Frame 302 – 303

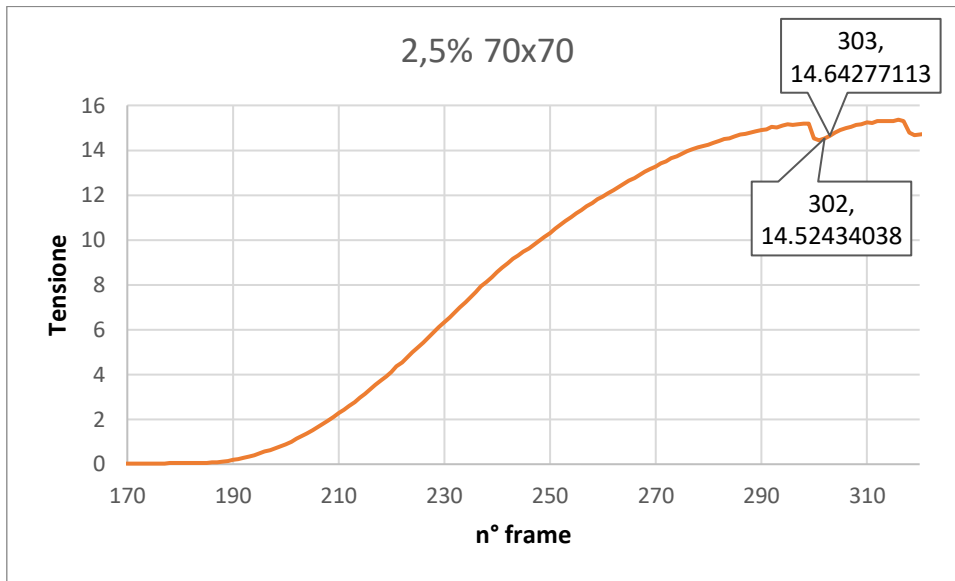
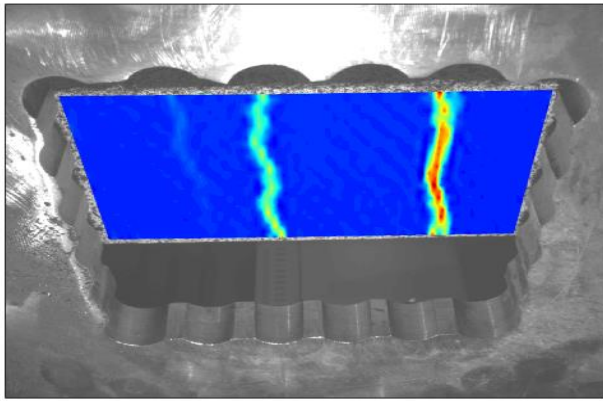


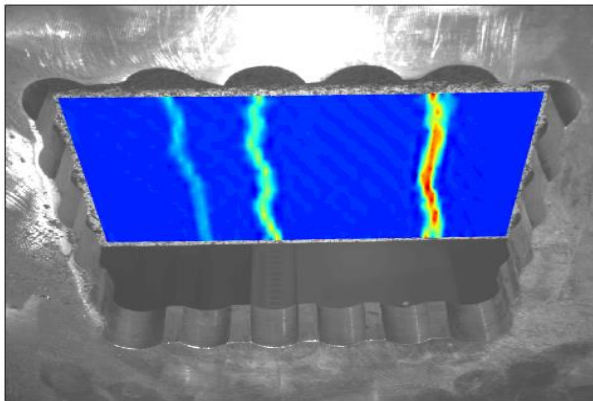
Figura 15: Grafico con indicati i frame 302 - 303

In questi frame non si ha una diminuzione della forza o della tensione; infatti, è stato difficile trovare la formazione del difetto ma dopo un'attenta analisi delle suddette immagini, si è notato l'inizio della formazione di una cricca sulla parte di sinistra del provino; la quale cricca finirà di propagarsi nel provino nei frame 312-319, come vedremo poi.

Alleghiamo qui di seguito le immagini del fenomeno, cosicché anche i lettori possano vederlo.

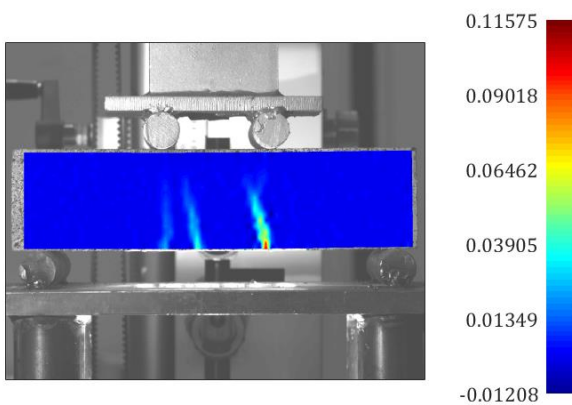


frame 302

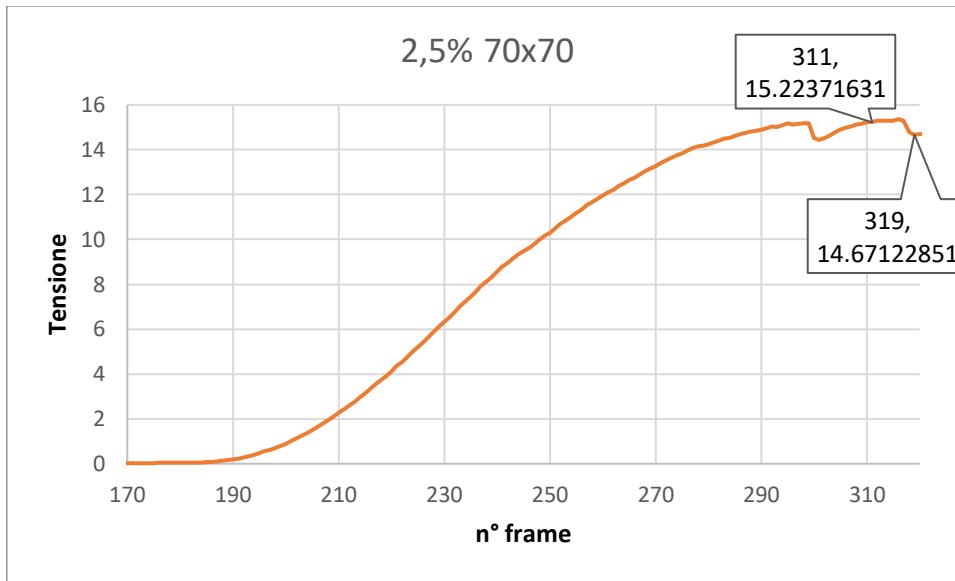


frame 303

Questa cricca diventa visibile solo al frame 303 nella telecamera frontale



Frame 312 - 319



In questi frame si osserva un calo vero e proprio della forza e della tensione, esso è dovuto dalla propagazione della fessura analizzata nei frame precedenti; la quale propagazione ha fatto iniziare la corsa discendente della curva, compromettendo in maniera irreversibile le proprietà meccaniche del provino.

Si allega qui sotto la “storia” della suddetta così da far vedere in maniera diretta di cosa stiamo parlando.

Figura 16; frame312

frame318

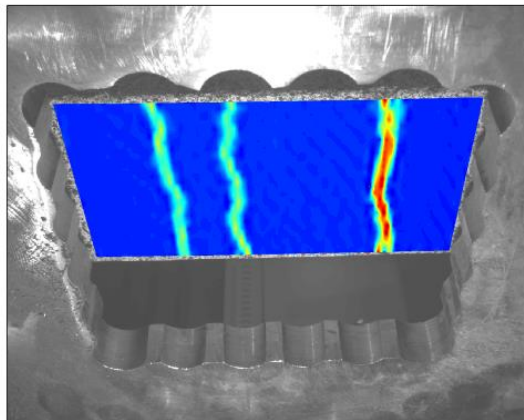
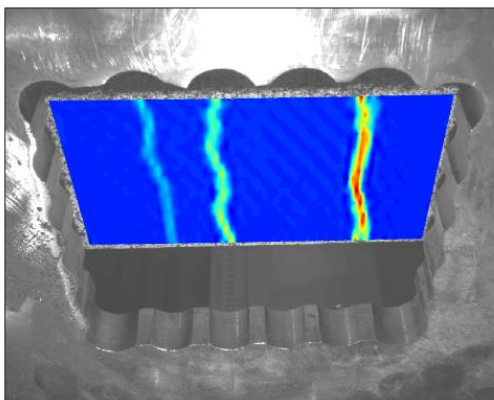
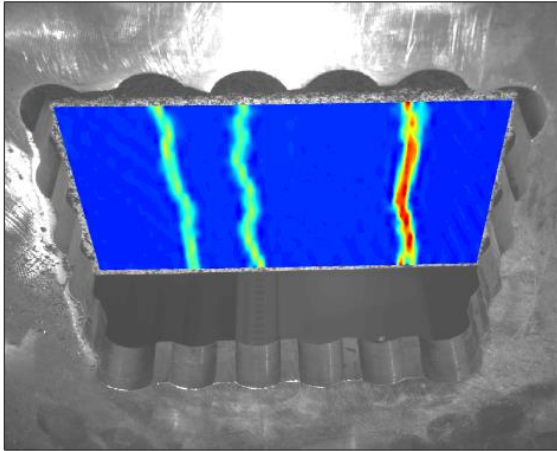
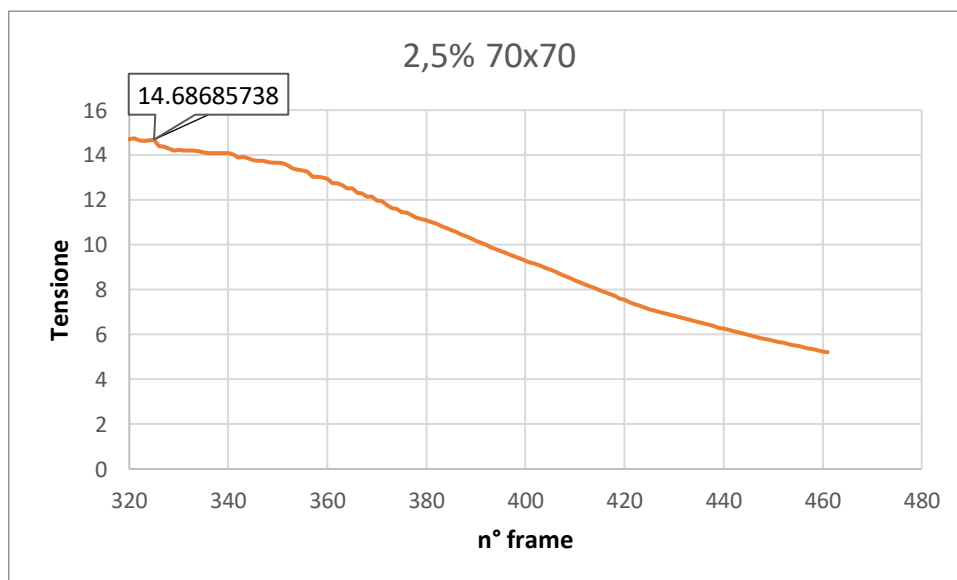


Figura 17; 25_testA frame 319



Si è così così completata la discussione dei punti di interesse prima del frame 320.

Analisi dopo frame 320:



Dopo il frame 320, si ha un solo punto di interesse, ovvero:

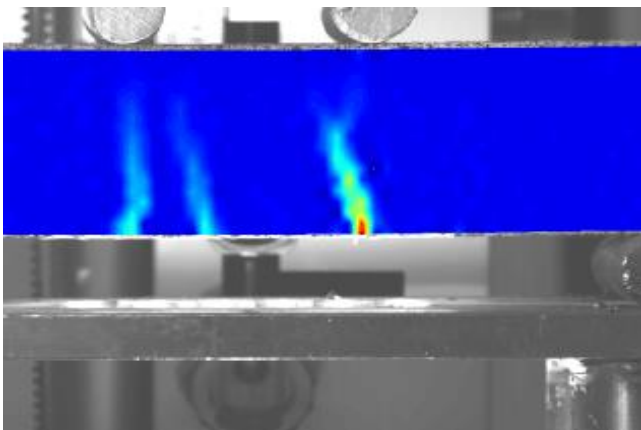
- Frame 325 – 327

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 324 | 1,045262 | 20933,58 | 0,005965 | 14,6474 |
| 325 | 1,071404 | 20989,97 | 0,006114 | 14,68686 |
| 326 | 1,087666 | 20571,95 | 0,006207 | 14,39436 |

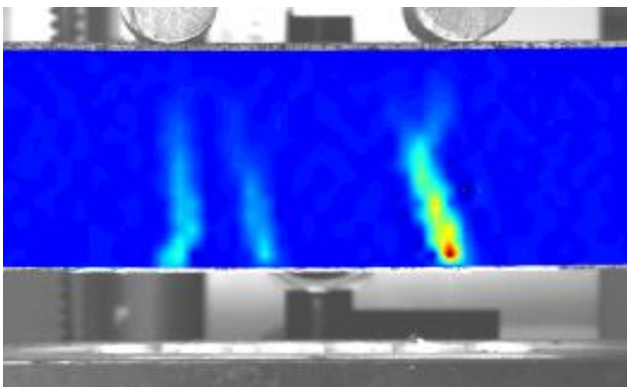
In questo punto si nota un calo della tensione dopo una leggera risalita.

Non si creerà un vero e proprio caso di studio per questo punto in quanto la causa di tale comportamento è dovuta all'inasprimento delle cricche già presenti nel provino e non dalla formazione di un'altra di esse.

Infatti andando ad analizzare le immagini prese di fronte al provino, si può notare come la cricca più grande si propaga all'interno dello stesso.



frame 325 cricche



frame 327 cricche

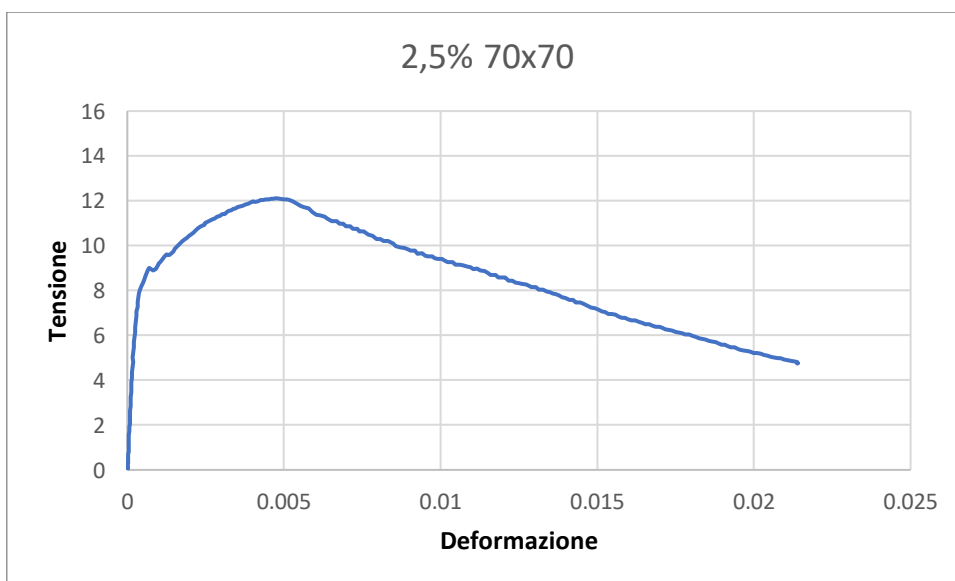
Dove si vede che la parte rossa dell'immagine, rappresentante il pixel con più "spostamento" rispetto all'immagine precedente, si è spostata verso l'interno del provino ad indicare che la cricca ha scavato in profondità su di esso.

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 315 | 0,86983 | 21852,19 | 0,004964 | 15,29016 |
| 316 | 0,887723 | 21955,98 | 0,005066 | 15,36278 |
| 317 | 0,903122 | 21869,19 | 0,005154 | 15,30206 |

Quindi infine possiamo indicare il valore di massima tensione e massima forza sopportabile dal provino:

- MaxForza : 21955,98 N
- MaxTensione : 15,36278 MPa

25_testB



Anche in questo provino si ha il 2,5% di cemento rinforzato come il caso precedente.

Solo che in questa prova il grafico presenta meno fluttuazioni, e l'andamento della curva presenta un massimo sia per la tensione che per la forza al frame 171.

Come per i casi precedenti andiamo a prendere il grafico che mette in relazione il n° di frame e la tensione, così facendo risulterà più facile trovare i vari punti nei quali abbiamo fluttuazioni della tensione o della deformazione.

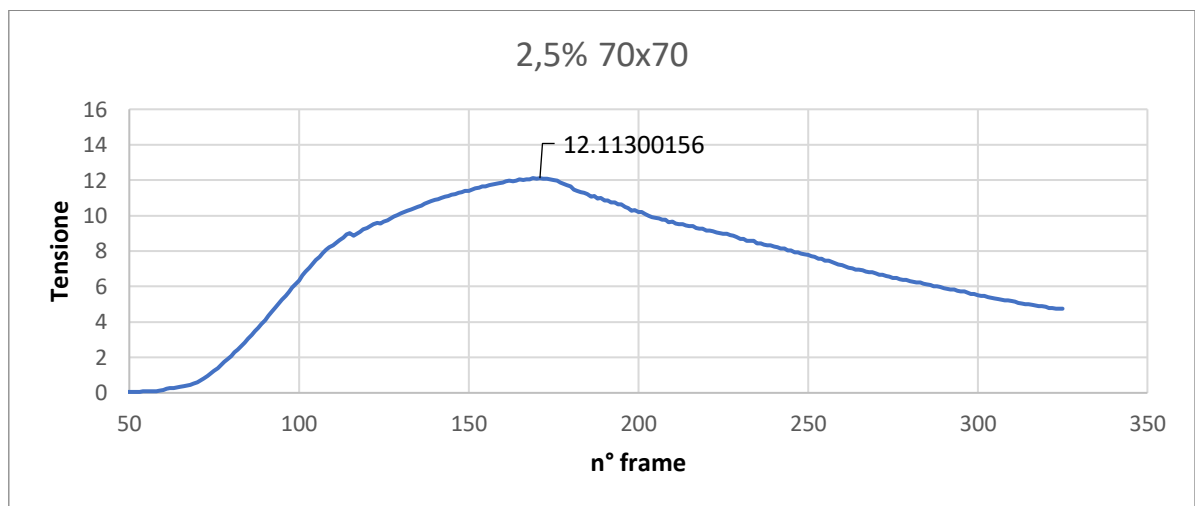


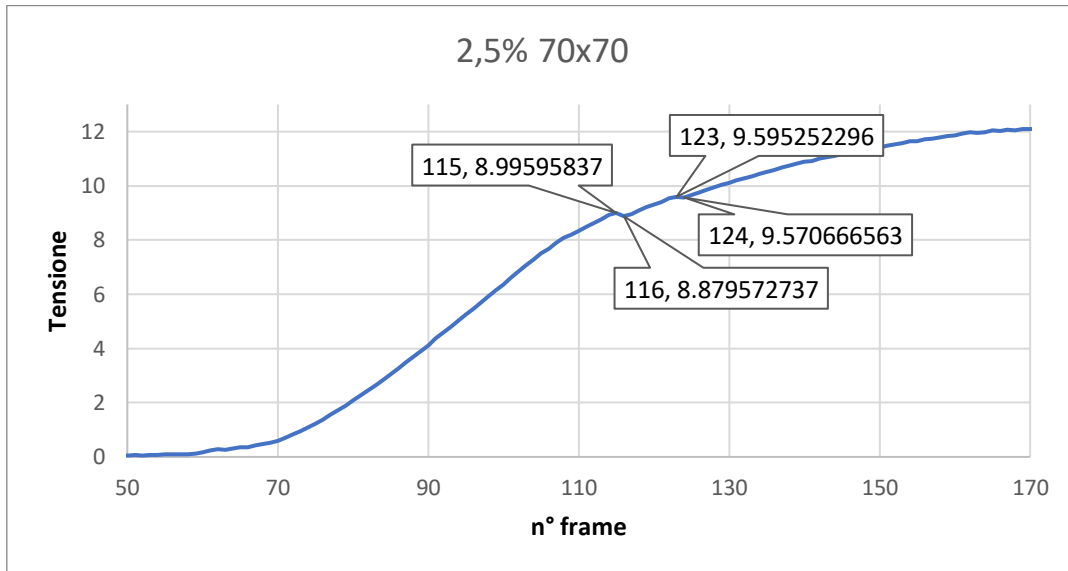
Figura 18: grafico n°frame – tensione

Questa volta, sempre per semplificare il lavoro, si divida il dominio della variabile ‘n° di frame’ in due gruppi divisi tra loro nel punto di massimo assoluto della curva, punto situato al frame 171, come si vede dai dati del grafico:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 170 | 0,817182 | 17274,97 | 0,004663 | 12,08744 |
| 171 | 0,833025 | 17311,5 | 0,004754 | 12,113 |
| 172 | 0,852479 | 17283,19 | 0,004865 | 12,09319 |

Dopo tale frame non si hanno particolari punti di interesse, per cui per evidenziare quelli presenti prima andremo a riportare i grafici della prova con il dominio ristretto come indicato sopra.

Analisi Prima del frame 171



I punti di interesse prima del massimo assoluto li abbiamo ai frame:

- Frame 102 – 107

Qui non si ha un calo della tensione, ma abbiamo un cambio di pendenza della curva

- Frame 115 – 116

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 114 | 0,11564 | 12759,11 | 0,00066 | 8,927655 |
| 115 | 0,123774 | 12856,72 | 0,000706 | 8,995958 |
| 116 | 0,142448 | 12690,39 | 0,000813 | 8,879573 |
| 117 | 0,158028 | 12811,06 | 0,000902 | 8,964004 |

Qui si vede un calo della tensione proprio tra i due frame

- Frame 123 – 124

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 122 | 0,208166 | 13626,08 | 0,001188 | 9,534283 |
| 123 | 0,219406 | 13713,21 | 0,001252 | 9,595252 |
| 124 | 0,234013 | 13678,08 | 0,001335 | 9,570667 |
| 125 | 0,247475 | 13796,25 | 0,001412 | 9,653352 |

Qui anche si ha una fluttuazione della tensione

- Frame 169 – 172

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 168 | 0,789731 | 17232,32 | 0,004507 | 12,0576 |
| 169 | 0,805313 | 17298,41 | 0,004596 | 12,10384 |
| 170 | 0,817182 | 17274,97 | 0,004663 | 12,08744 |
| 171 | 0,833025 | 17311,5 | 0,004754 | 12,113 |
| 172 | 0,852479 | 17283,19 | 0,004865 | 12,09319 |
| 173 | 0,875015 | 17253,79 | 0,004993 | 12,07262 |

In questi frame invece si ha l'inversione della pendenza della curva con il massimo assoluto della stessa.

Frame 98 – 107

In questo punto si ha un cambiamento di pendenza della curva tensione-deformazione.

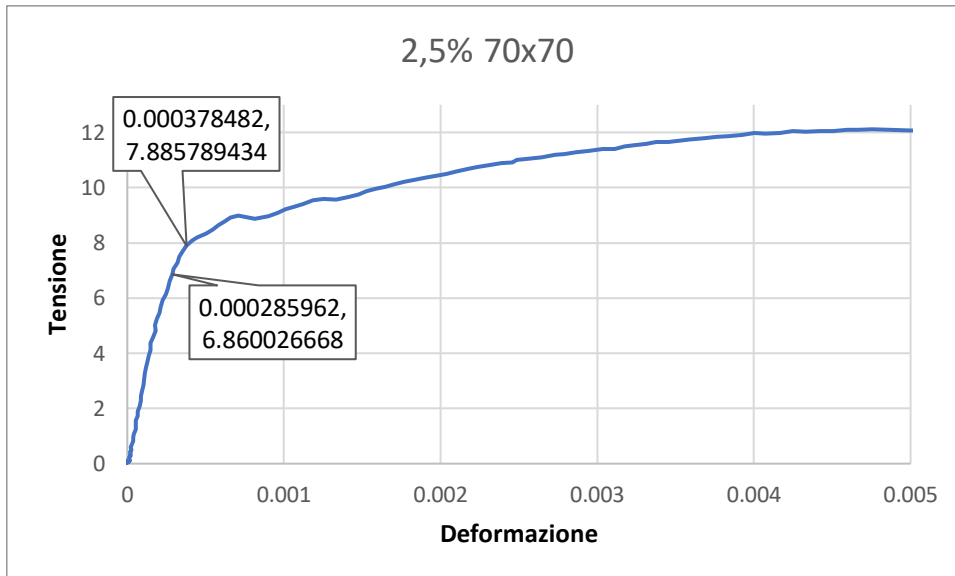
Come si vedrà dalle immagini, tale cambiamento di pendenza è dovuto all'inizio della formazione di alcune cricche.

Tale fenomeno è visibile grazie alle foto prese dalla parte inferiore del provino.

Infatti, esse non sono visibili dalla parte frontale del provino, ma solo, inizialmente, nella parte inferiore.

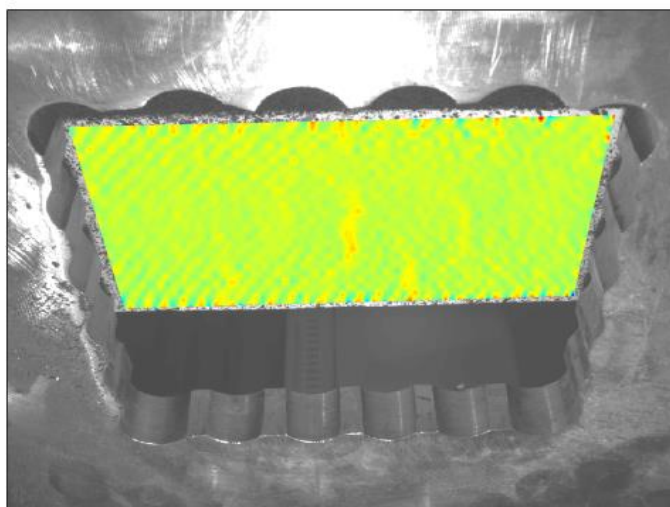
Non si è riportato tale punto nel grafico ad inizio paragrafo perché non visibile.

Infatti, per permettere una migliore visione della zona presa in esame si è preso il grafico rappresentante l'andamento della tensione in funzione della deformazione e si è ristretto il dominio delle deformazioni al massimo di 0.005.

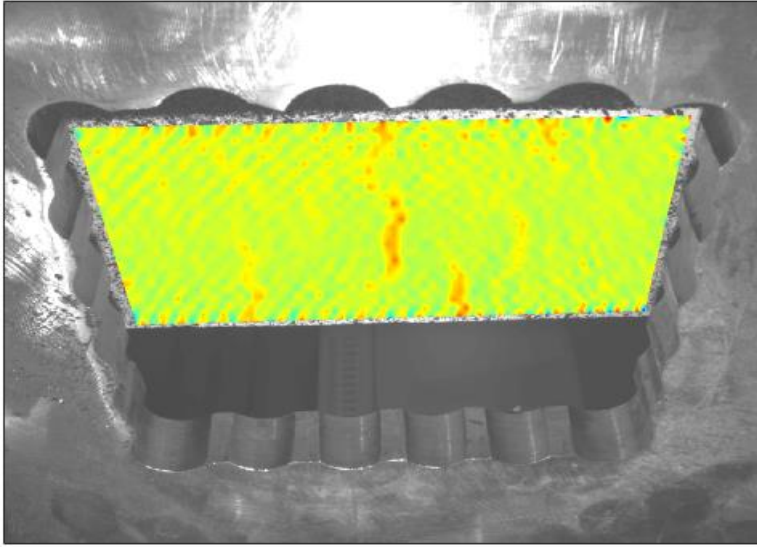


Come si vede la curva cambia pendenza in maniera netta.

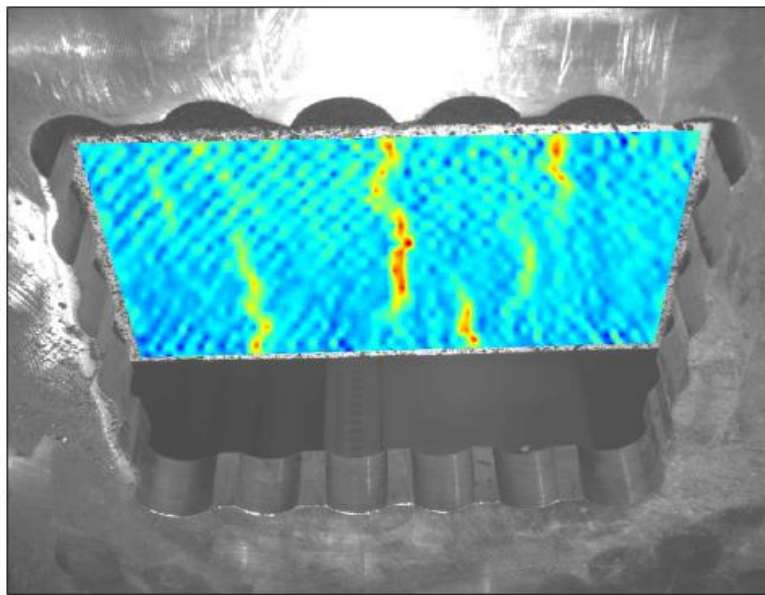
Qui di seguito si riportano le immagini prese in quei frame che rappresentano la “storia” delle cricche causanti tale fenomeno.



frame 98

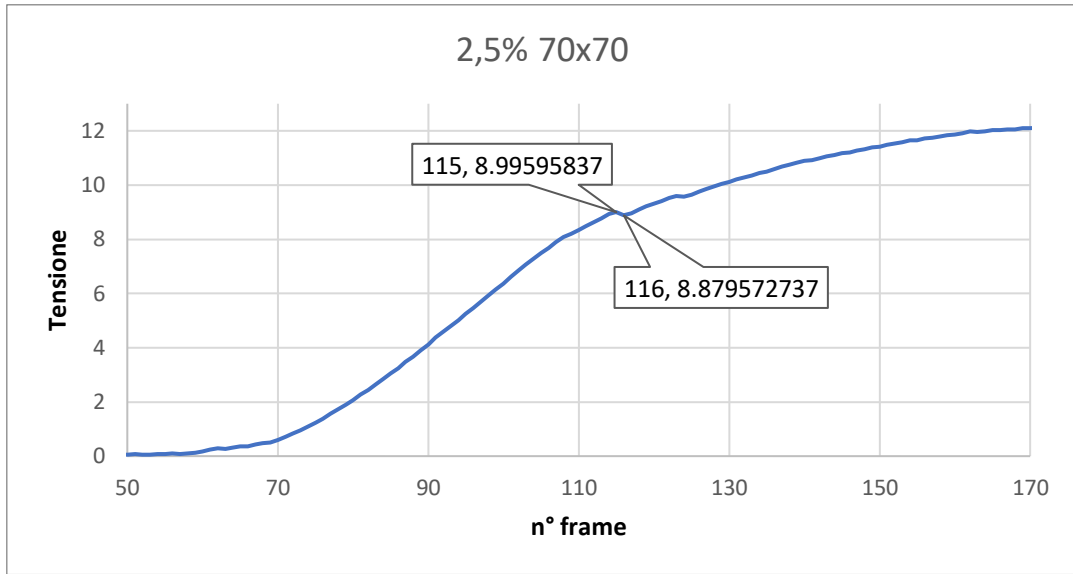


frame 102

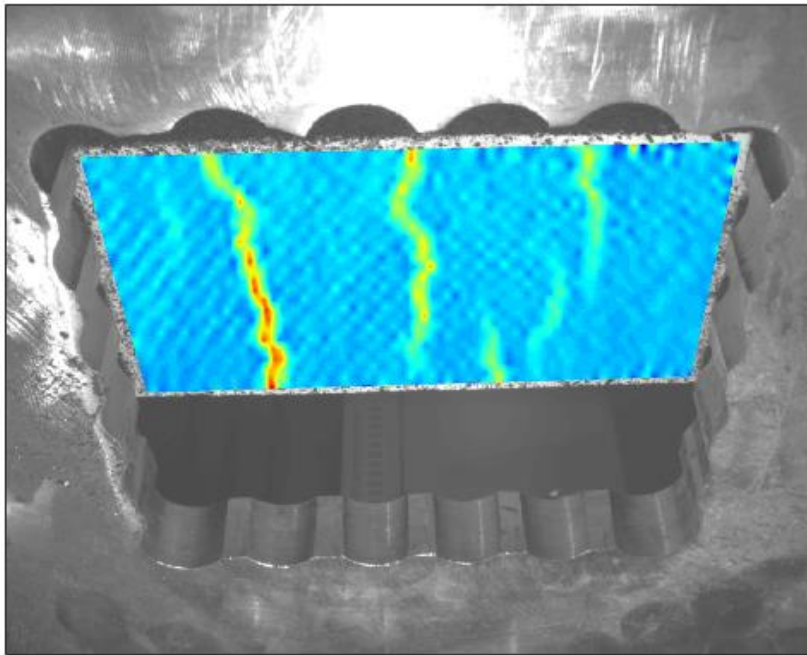


framme 107

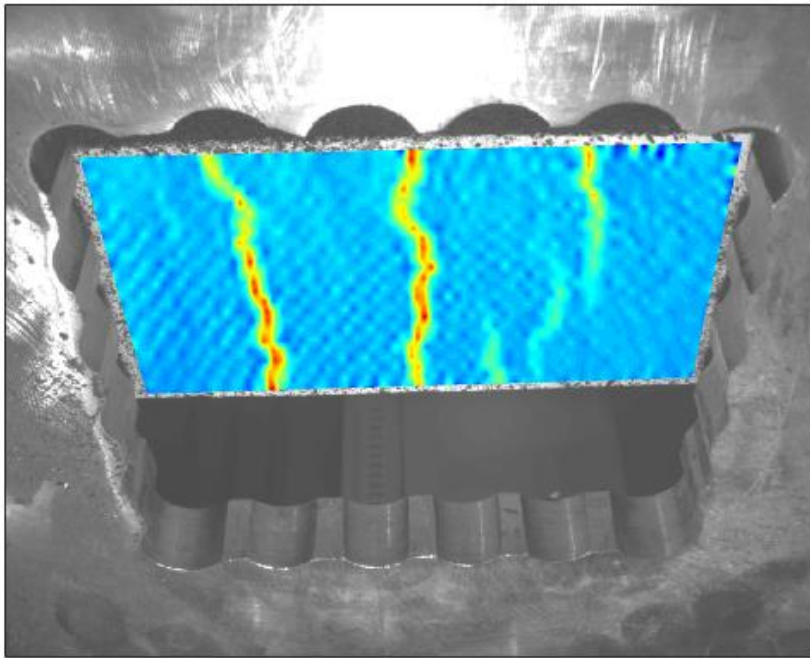
Frame 115 – 116



In questi frame si ha una fluttuazione della tensione dovuta alla propagazione delle cricche createsi nei frame precedenti:



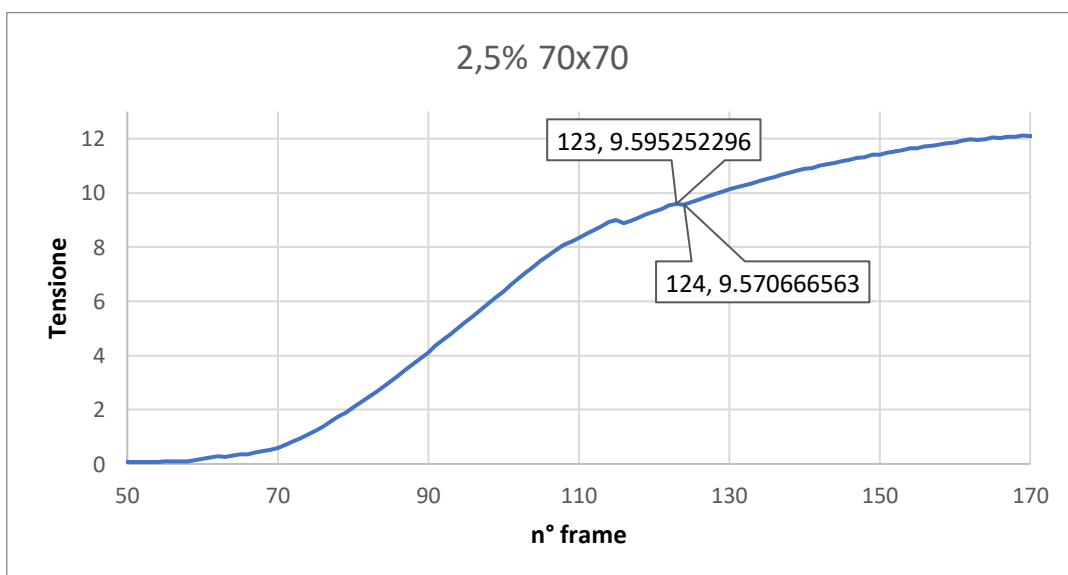
frame115



frame 116

In particolare, si può vedere come tra le due immagini avviene l'apertura della fessura centrale e di quella di destra nella parte in alto, le quali hanno creato la fluttuazione sopra citata.

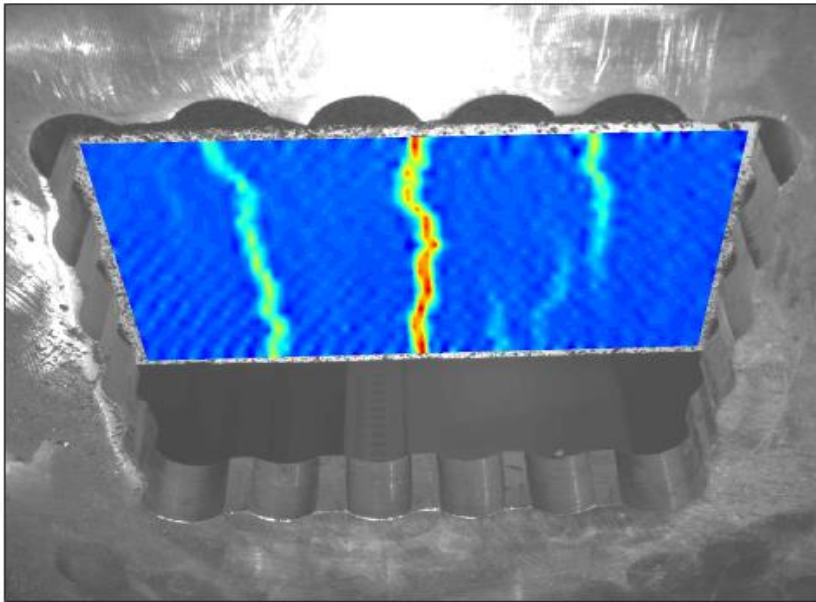
Frame 123 – 124



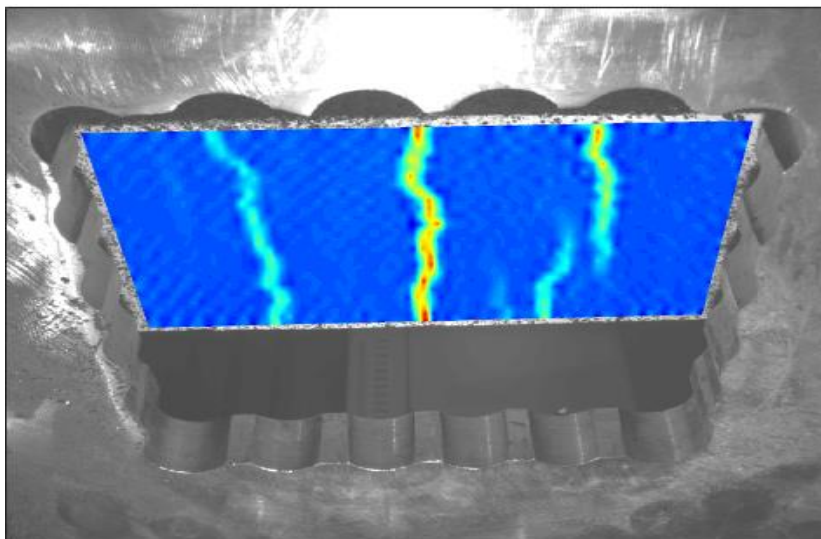
In questi frame non si ha l'apertura di altre cricche, ma l'inasprimento di quelle già esistenti.

Infatti, andando ad analizzare le immagini sotto il provino, si può notare che tra il frame 120 e il 125, la cricca di destra si colora di rosso.

Ovvero essa si insinua più in profondità nel provino.

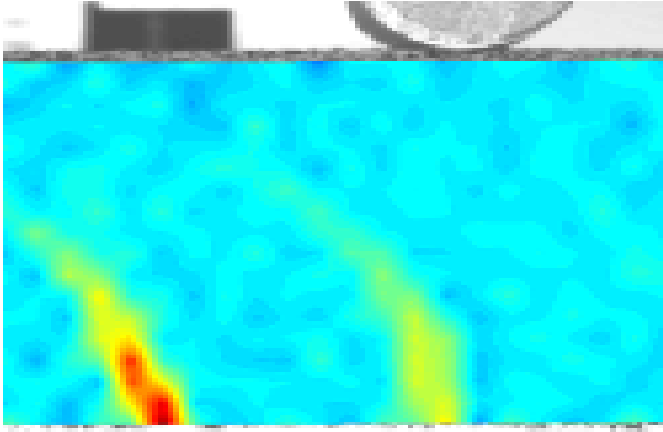


Frame 123

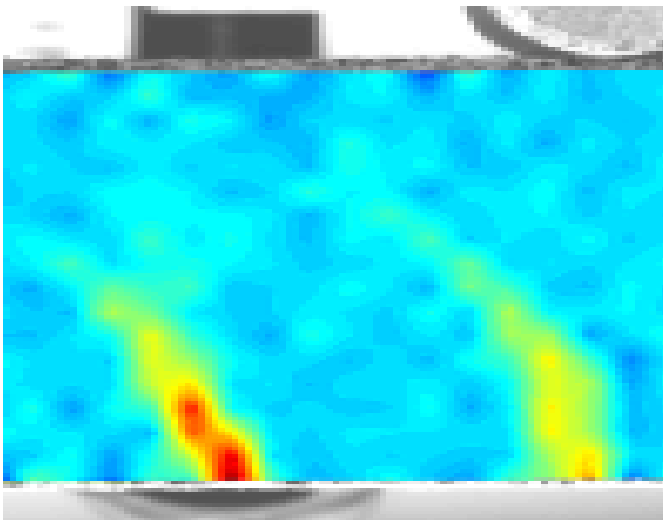


Frame 124

Fenomeno visibile anche nelle immagini prese nella parte frontale del provino.

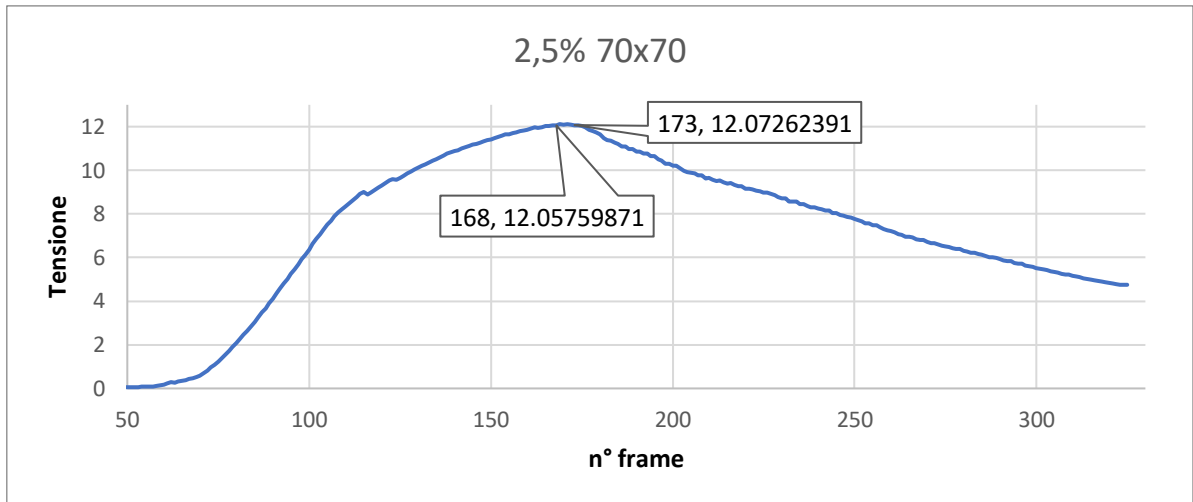


Frame 123 front cricca destra



frame 124 front cricca destra

Si vada ad analizzare adesso la zona riguardante il massimo assoluto della curva;
ovvero i frame che vanno dal 168 al 173.



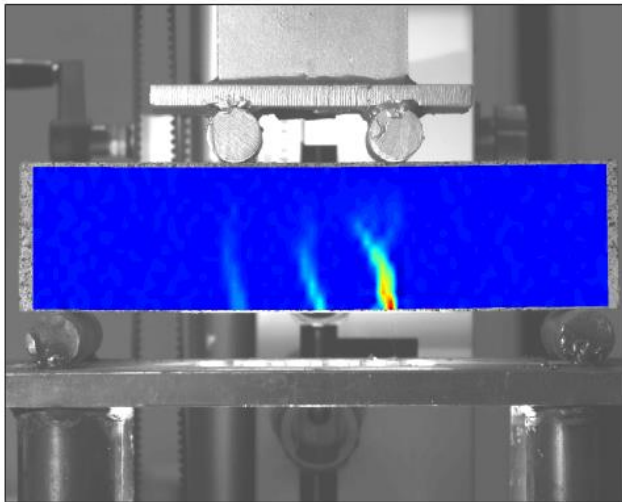
Si riportano qui di seguito i dati riguardanti il punto di massimo al frame 171:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 170 | 0,817182 | 17274,97 | 0,004663 | 12,08744 |
| 171 | 0,833025 | 17311,5 | 0,004754 | 12,113 |
| 172 | 0,852479 | 17283,19 | 0,004865 | 12,09319 |

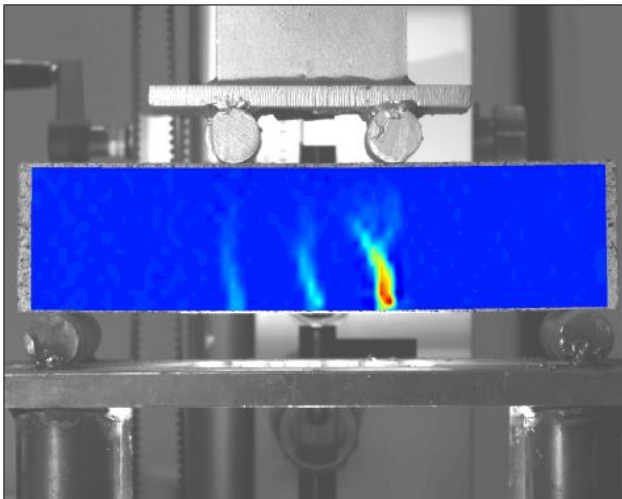
Analisi frame 171

Non si hanno a disposizione le immagini prese da sotto il provino, in quanto il programma ha terminato la sua elaborazione al frame 168, per cui si prenderanno solo le immagini scattate frontalmente al provino.

Osservando tali foto, si vede che il cambiamento di pendenza della curva è dovuto al propagarsi delle cricche precedentemente createsi all'interno del materiale, il fenomeno non è per cui attribuibile direttamente alla loro formazione.



Frame 168 front



frame 172 front

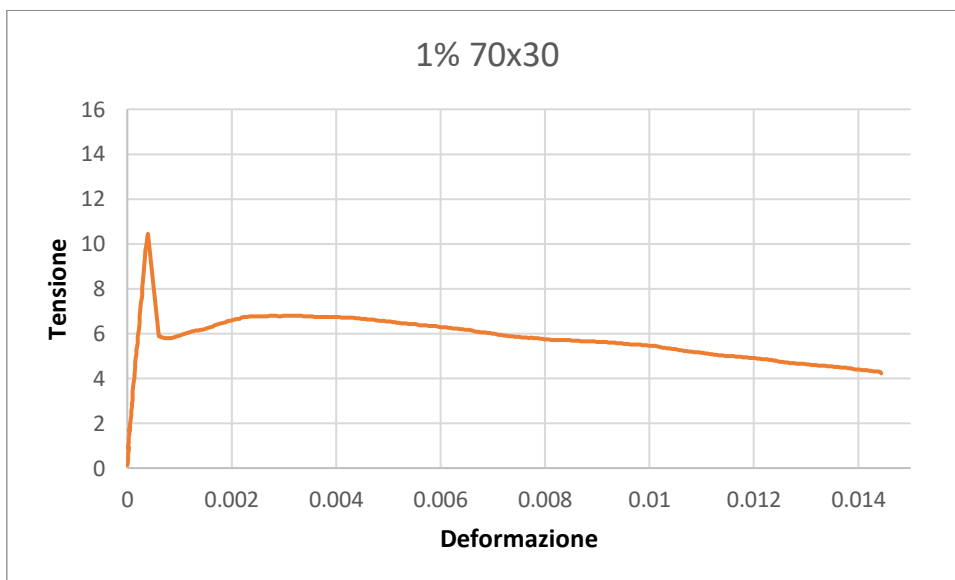
Contrariamente a quanto si poteva pensare, non è la fessura più grande che continua la sua propagazione, ma è l'ultima delle cricche che si è formata a propagarsi compromettendo in maniera irreversibile le caratteristiche meccaniche del materiale in prova.

Quindi dalle prove si è potuto stabilire la massima tensione e la massima forza a cui si può sottoporre il materiale composito, prima della sua rottura.

- MaxForza: 17311,5 N
- MaxTensione: 12,113 Mpa

1_30TestC

Qui non si analizzerà il grafico che mette in relazione il n° di frame con la tensione perché i punti sono pochi e ben visibili nel grafico normale.



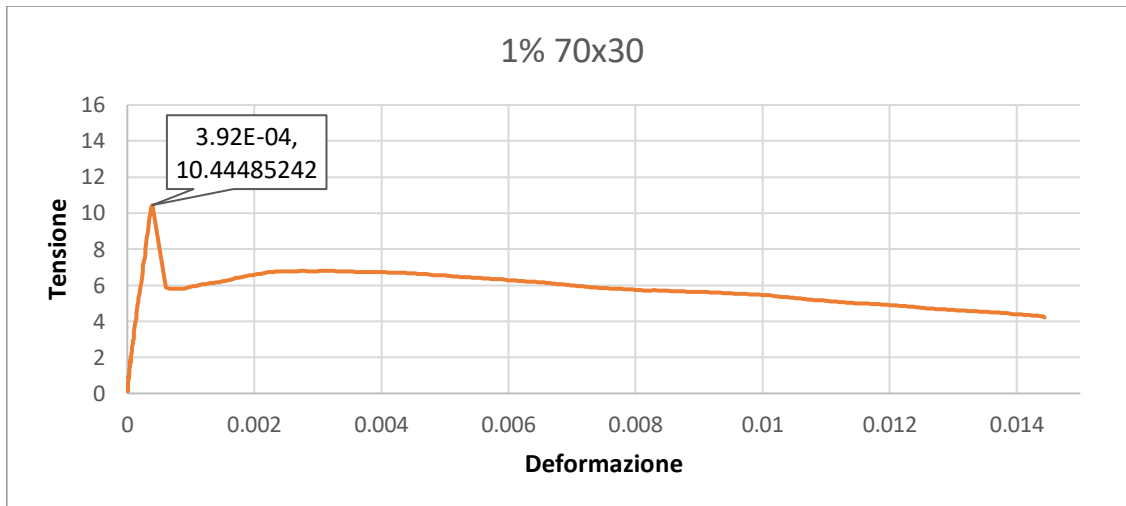
Questo provino presenta l'1% di cemento rinforzato e come ci si aspetta il suo comportamento è simile ai precedenti (1_testA,1_testB).

Infatti se si va ad analizzare il diagramma rappresentante l'andamento della tensione e della deformazione, si può notare una netta variazione di pendenza in corrispondenza del punto di massimo della curva stessa e cioè il punto con coordinate:

3,92E-04

10,44485

Figura 19; andamento di tensione-deformazione per 1_30_testC



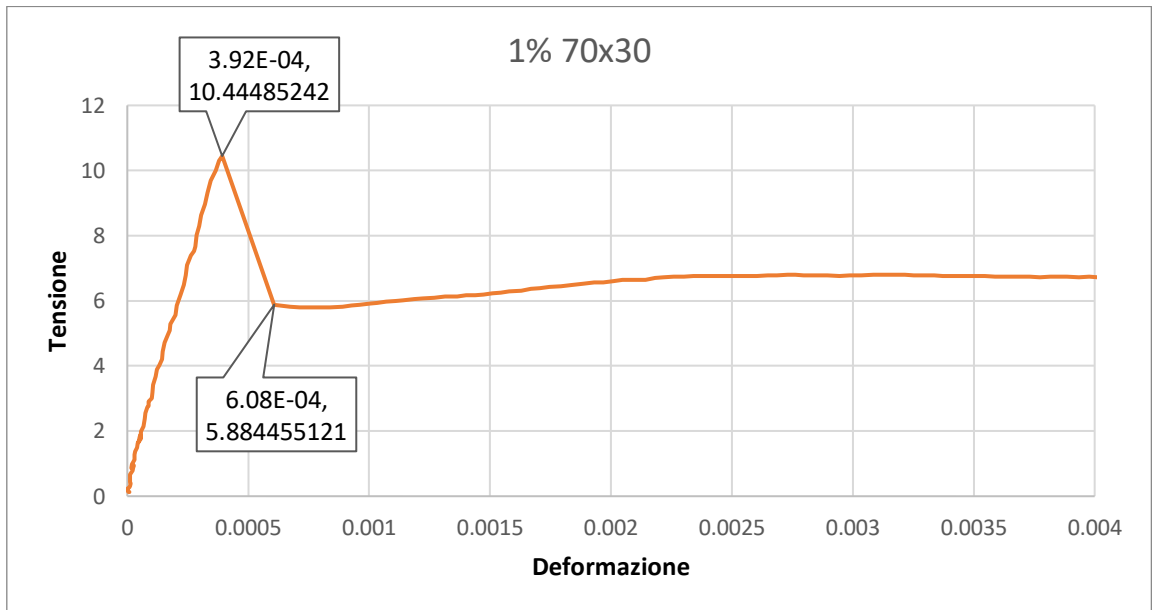
Andando poi a cercare tale punto nella tabella dei dati, si vede che esso corrisponde al frame 107, infatti i dati riportano:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 107 | 0,151272 | 3,14E+03 | 3,92E-04 | 10,44485 |
| 108 | 0,234366 | 1,77E+03 | 6,08E-04 | 5,884455 |

Dove si vede come la tensione dopo la rottura del provino quasi si dimezzi.

In questa prova non si hanno punti di interesse prima del punto di massimo assoluto della curva, per cui si va ad analizzare direttamente lui insieme a quello di massimo relativo.

Frame 107 – 108

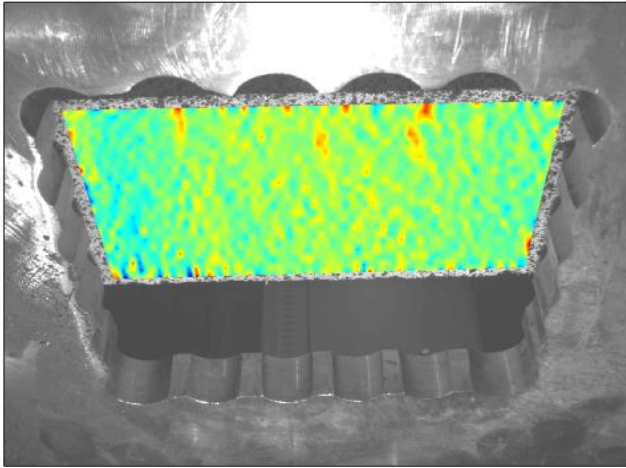


Come si vede la tensione del provino ha un vero e proprio crollo in questi frame.

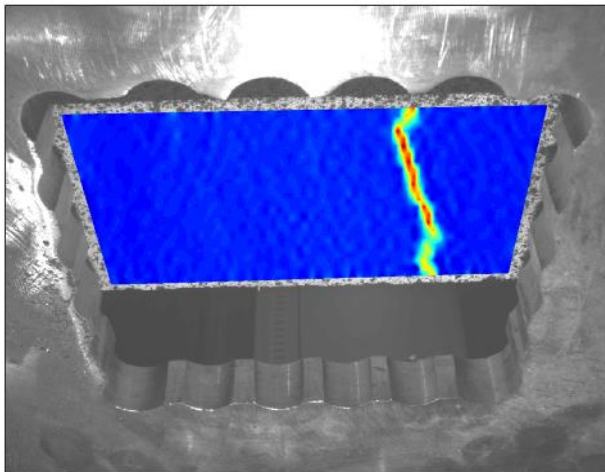
La causa di tale comportamento è attribuibile alla formazione della cricca visibile nella parte inferiore del provino.

Siccome poi in questo provino la percentuale di fibra è l'1%, si ha un comportamento fragile del materiale; il che giustifica l'andamento del grafico.

Come già fatto, si riportano qui di seguito le immagini dei frame sopracitati così da far vedere la formazione della cricca.



Frame 107



Frame 108

Si analizzi adesso invece la zona dove si trova il massimo relativo; cioè i frame che vanno dal 164 al 170.

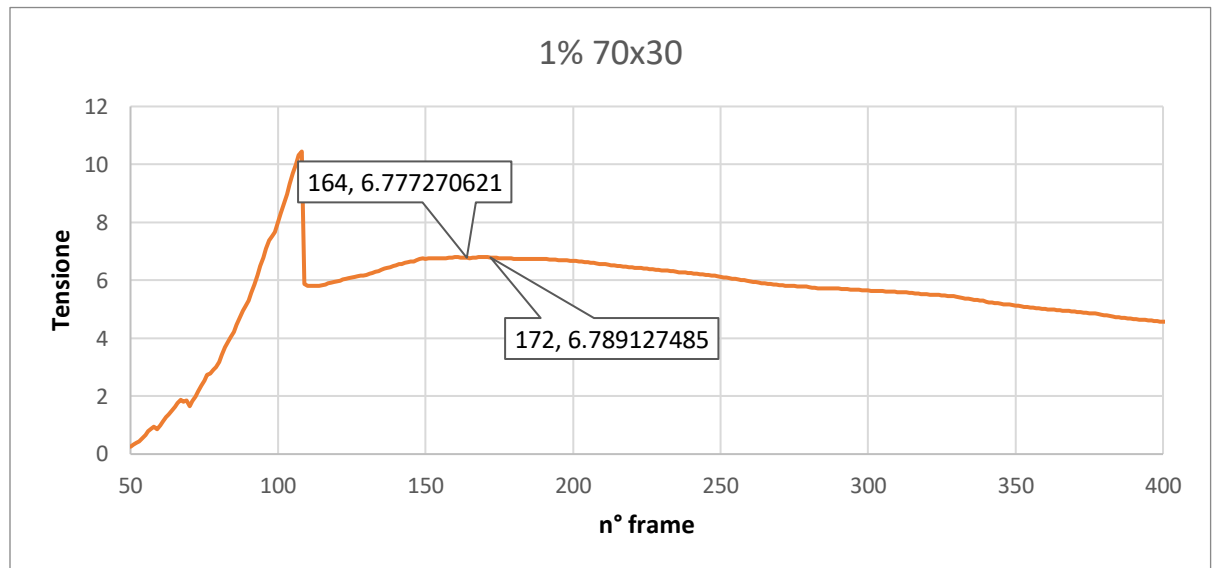
Infatti, dopo la rottura, contrariamente a quello che si poteva pensare, la curva non continua la sua fase di decrescita, ma anzi essa, per un periodo, continua ad avere un coefficiente angolare positivo che fa aumentare il valore della tensione.

Tale comportamento è attribuibile alla percentuale di fibra nel provino che seppur molto ridotta, influisce sulle proprietà meccaniche dello stesso.

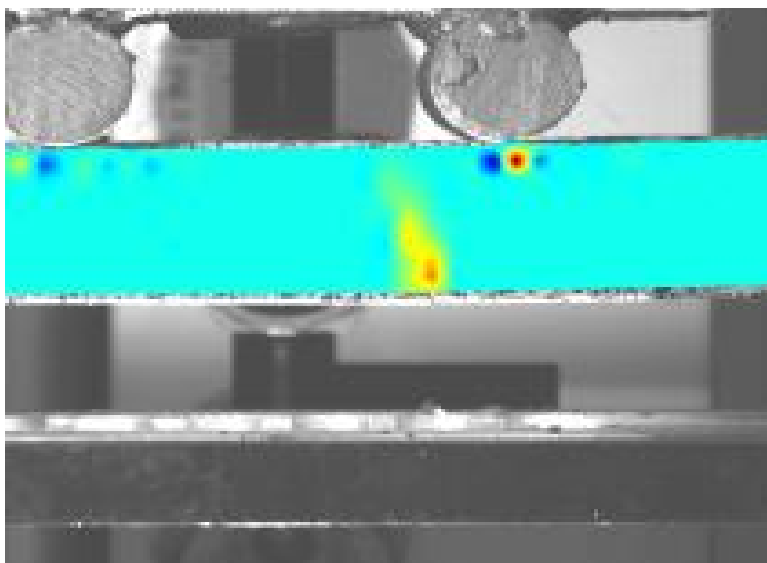
Analisi Frame 164 – 170

Dopo il punto di massimo relativo della curva, essa inizia la fase decrescente in maniera irreversibile fino alla fine dei frame.

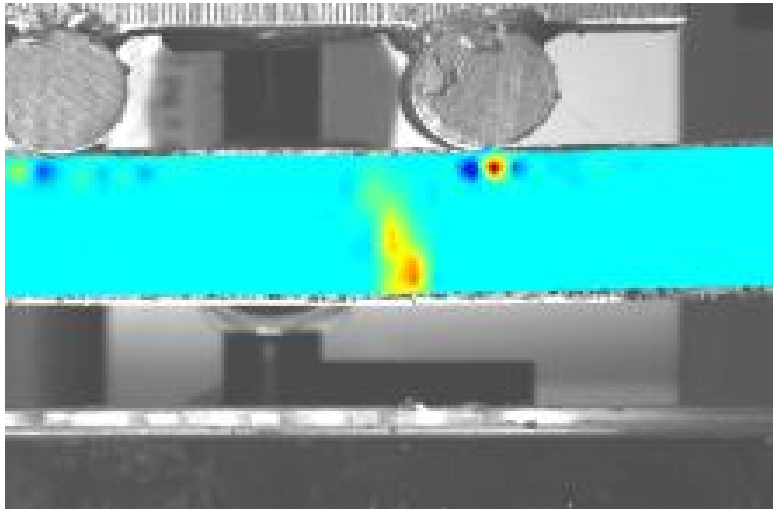
Si procede ora con la ricerca del perché di tale comportamento.



Andando a prendere le foto di tali frame, si può vedere come la cricca formatasi in precedenza, in corrispondenza di questi frame abbia “scavato” nel provino ed abbia quindi compromesso le proprietà meccaniche del materiale.



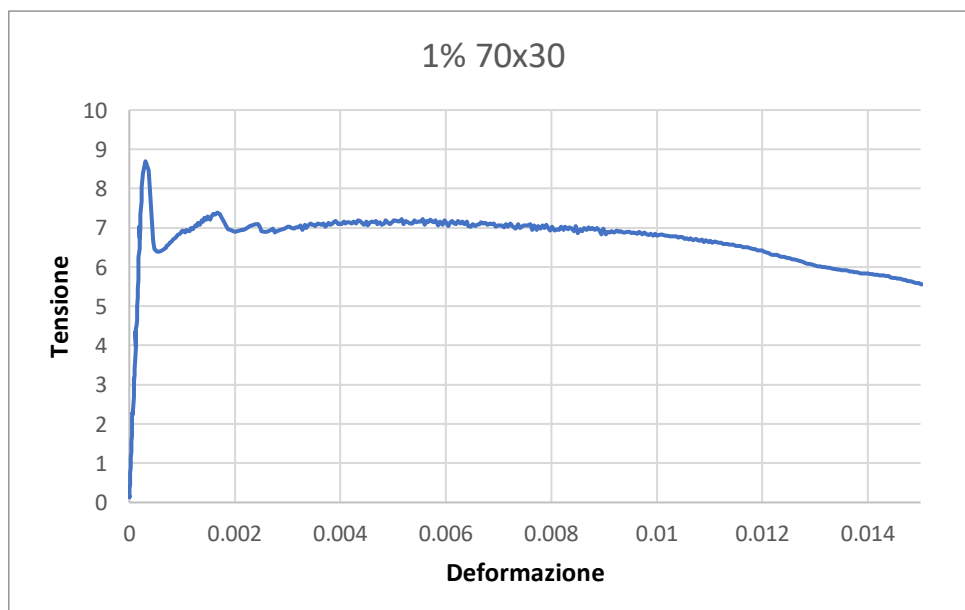
Frame 164



Frame 172

Infatti, la zona colorata di rosso in corrispondenza della cricca è aumentata da un'immagine all'altra; questo sta ad indicare che la fessura si è aggravata compromettendo in maniera definitiva il provino.

1_30TestD

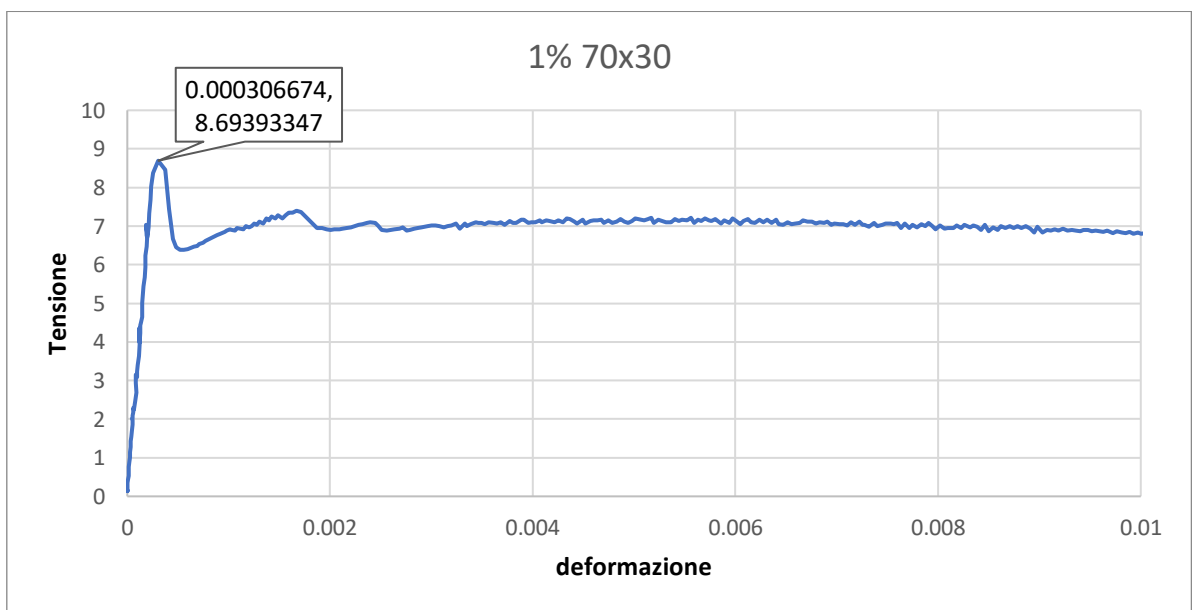


Dall'analisi del grafico che relaziona deformazione e tensione si può vedere come nel punto corrispondente all'immagine 99 si ha il massimo della tensione e quindi l'inversione della curva stessa.

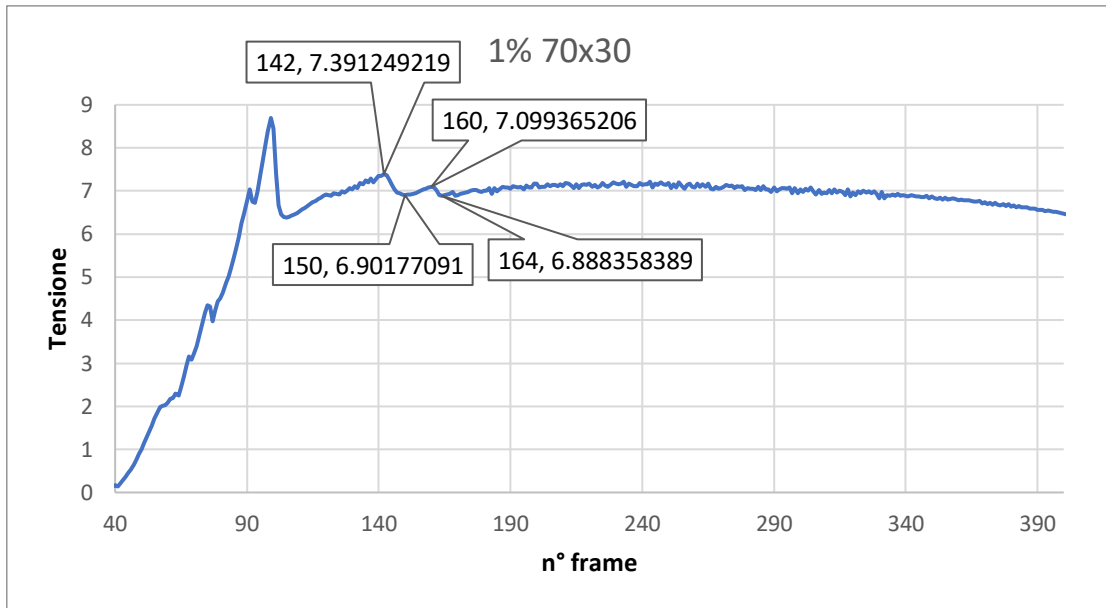
Infatti, osservando i dati tabulati della prova, si vede che:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 98 | 0,103569 | 2199,443 | 0,000253 | 8,37883 |
| 99 | 0,125396 | 2282,158 | 0,000307 | 8,693933 |
| 100 | 0,152273 | 2219,243 | 0,000372 | 8,454257 |

Si ha il massimo della tensione proprio al frame 99.



Come fatto per le altre prove, si va a riportare il grafico che lega il numero di frame con la tensione per rappresentare meglio in frame di interesse e renderne l'analisi più ordinata:



Oltre al massimo assoluto si notano altri punti di interesse dopo di esso, si procede con la loro elencazione:

- Frame 142 – 150

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 140 | 0,651296 | 1930,055 | 0,001593 | 7,352591 |
| 141 | 0,667166 | 1927,175 | 0,001632 | 7,341621 |
| 142 | 0,682007 | 1940,203 | 0,001668 | 7,391249 |
| 143 | 0,700971 | 1931,375 | 0,001714 | 7,35762 |
| 144 | 0,716204 | 1905,099 | 0,001752 | 7,257518 |
| 145 | 0,736023 | 1874,437 | 0,0018 | 7,140714 |
| 146 | 0,752116 | 1847,769 | 0,001839 | 7,039119 |
| 147 | 0,765838 | 1826,522 | 0,001873 | 6,958179 |
| 148 | 0,784946 | 1822,399 | 0,00192 | 6,942471 |
| 149 | 0,803459 | 1815,166 | 0,001965 | 6,914917 |
| 150 | 0,818486 | 1811,715 | 0,002002 | 6,901771 |

In questi frame si ha una fluttuazione della tensione e della forza che crea un punto di massimo relativo per la curva

- Frame 160 – 164

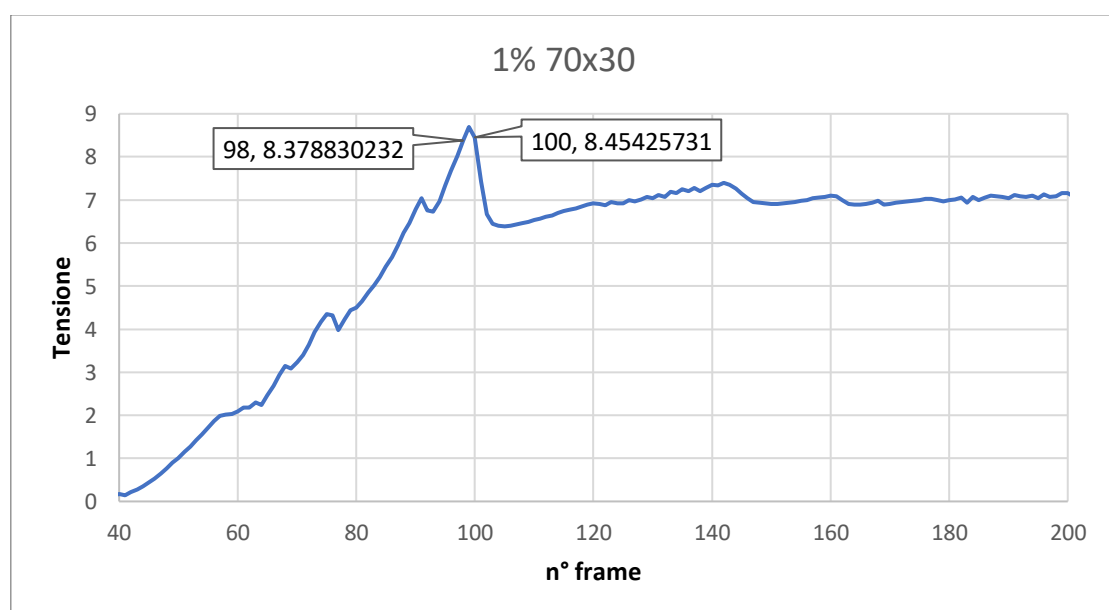
| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 158 | 0,947813 | 1851,447 | 0,002318 | 7,053131 |
| 159 | 0,965713 | 1857,609 | 0,002362 | 7,076605 |
| 160 | 0,97931 | 1863,583 | 0,002395 | 7,099365 |
| 161 | 1,000179 | 1860,076 | 0,002446 | 7,086003 |
| 162 | 1,014235 | 1838,051 | 0,00248 | 7,0021 |
| 163 | 1,025939 | 1812,842 | 0,002509 | 6,906063 |
| 164 | 1,047431 | 1808,194 | 0,002562 | 6,888358 |

Si avrebbero anche dei punti di discontinuità prima del massimo assoluto della curva, ma dall'analisi delle immagini non si è riusciti a risalire alle cause di tali fluttuazioni.

Si ipotizza esse possano essere attribuite alla formazione di delle cricche in prossimità degli appoggi oppure a degli spostamenti microscopici o interni al materiale, come il distacco della matrice cementizia dalle barre di rinforzo, cause non rilevabili quindi con la tecnica DIC.

Per tale motivo si tratteranno nel dettaglio solo i punti riportati qui sopra.

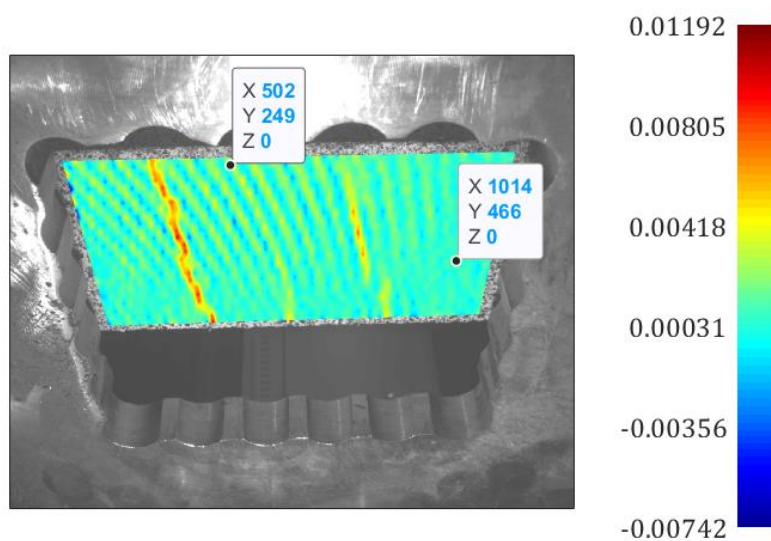
Analisi frame 98 – 100



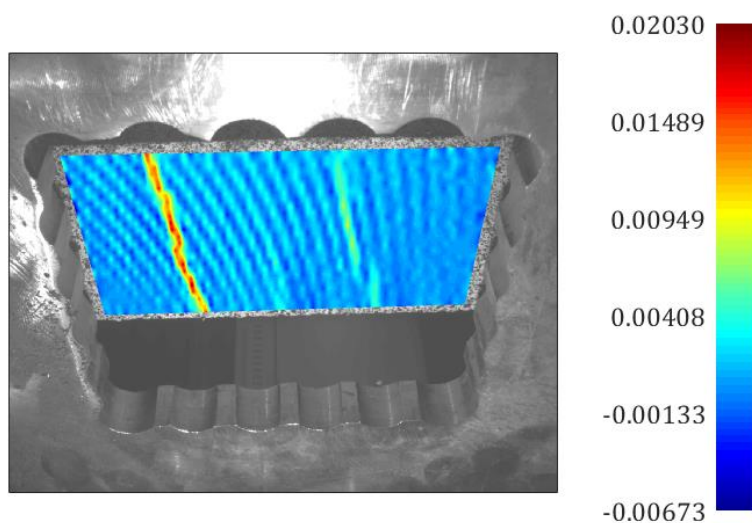
Questi frame corrispondono alla posizione del massimo assoluto nel grafico.

Per cui, vista la grande variazione della tensione e la completa inversione di pendenza della curva, ci si aspetta la formazione o quantomeno l'allargamento di una cricca nella parte sottostante al provino.

Con tali ipotesi si è andati ad analizzare le immagini e si è visto che effettivamente tra i frame 98 e 100 abbiamo la formazione di una cricca visibile grazie alle foto prese da sotto il provino.



Frame 99

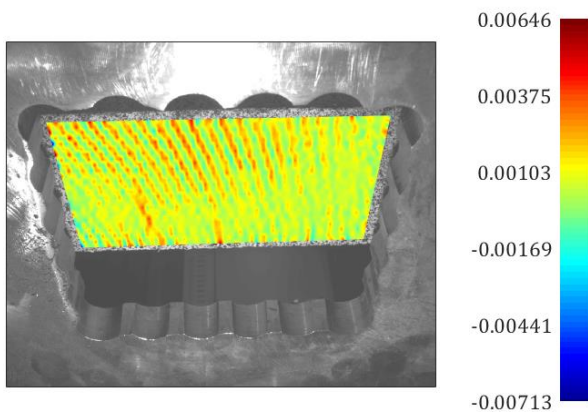


Frame 100

Infatti dalla visione dei risultati si vede la presenza di già due fessure nel provino, ma solo una di esse si consolida in esso; infatti nel frame 100 si può vedere come il livello della deformazione diminuisca uniformemente sulla faccia del provino (passa dal colore cristallo al blu, rappresentante un livello di deformazione più bassa) mentre la cricca rimane di colore rosso.

La formazione della cricca vera e propria invece la si trova tra il frame 98 ed il frame 99.

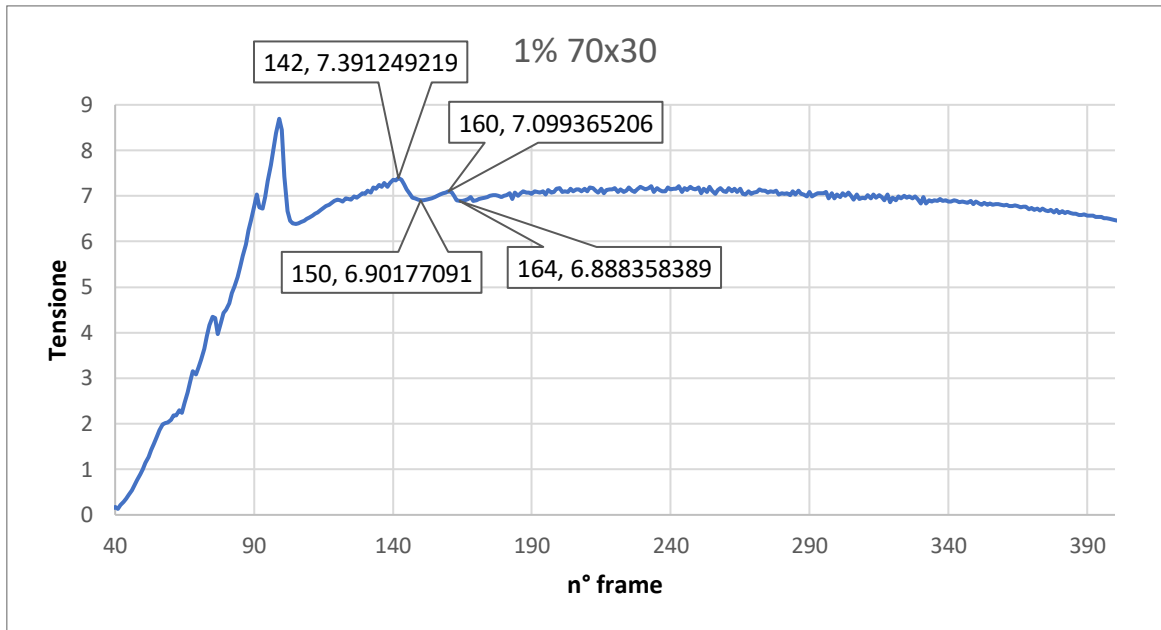
frame 98 sotto



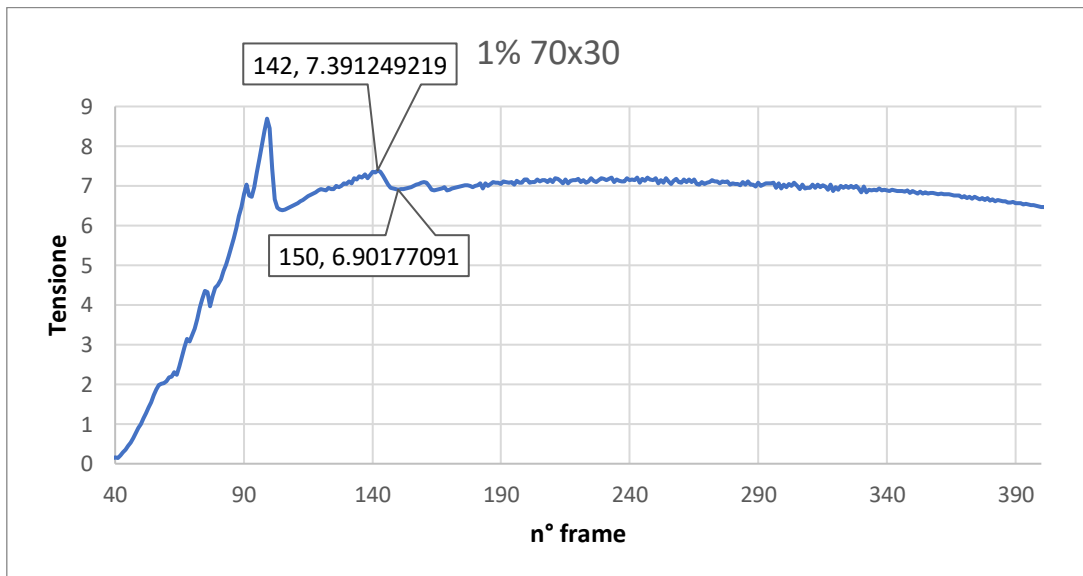
Si può già cominciare a vedere la formazione delle stesse, però, siccome ancora in formazione, esse non vanno ancora ad intaccare la resistenza del materiale.

Si va adesso ad analizzare i punti dopo il massimo assoluto elencati prima.

Data la scarsa presenza di fibre nel materiale, non ci si aspetta la multi-fessurazione del provino, ma bensì un inasprimento di quelle già formate.

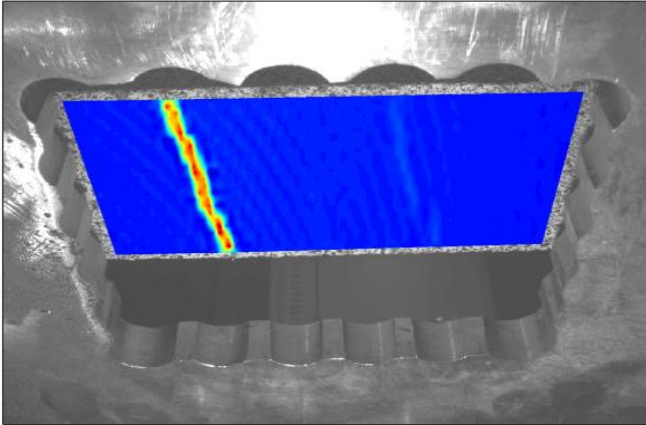


Frame 142 – 150



Come già accennato in precedenza, si ha una fluttuazione della tensione in questa zona; la causa di tale fenomeno, contrariamente a quanto si era ipotizzato, è la formazione di una nuova cricca a destra di quella già formata.

Figura 20: Frame 140

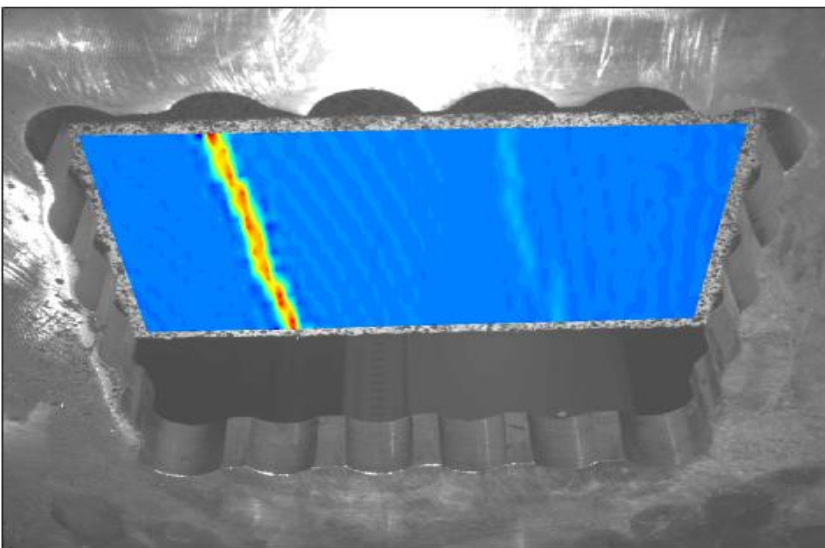


Tale cricca è già visibile al frame 140, ma la sua completa formazione la si ha tra i frame 142 – 150.

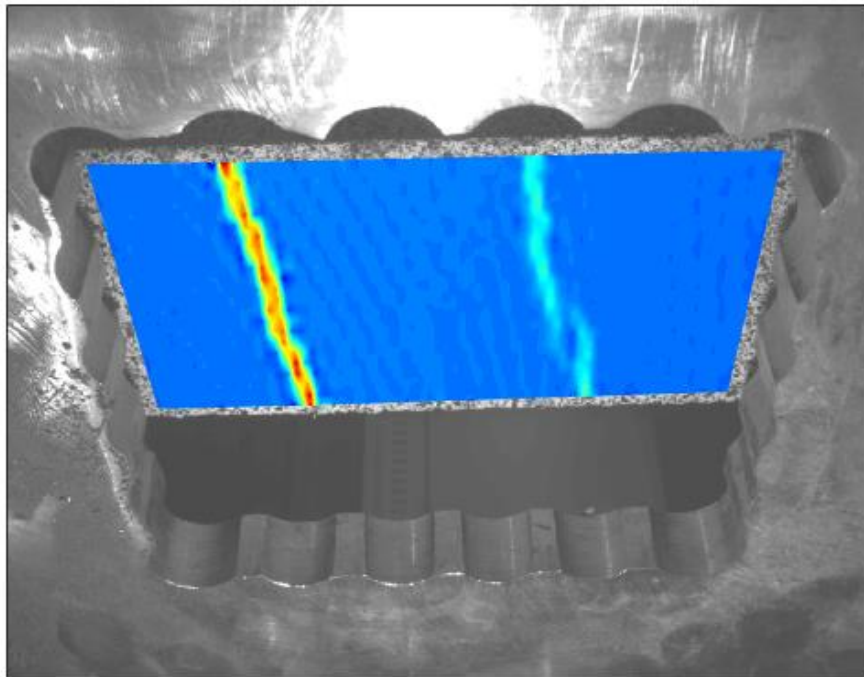
Infatti, le coordinate corrispondenti all'immagine 142 rappresentano un punto di massimo relativo per la tensione pari a

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 142 | 0,682007 | 1940,203 | 0,001668 | 7,391249 |

Questo sta a significare che dopo la formazione della seconda fessura, il materiale è quasi completamente compromesso.



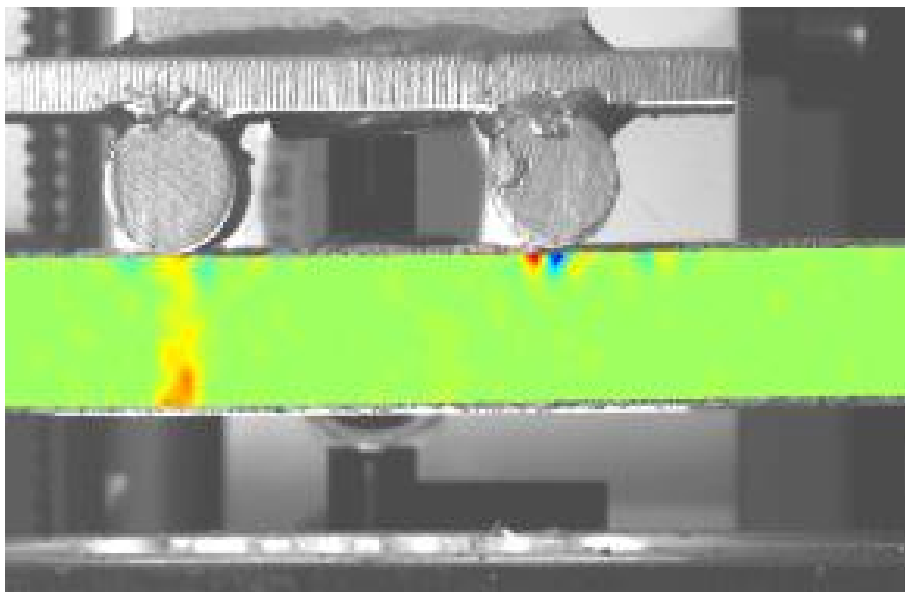
Frame 142



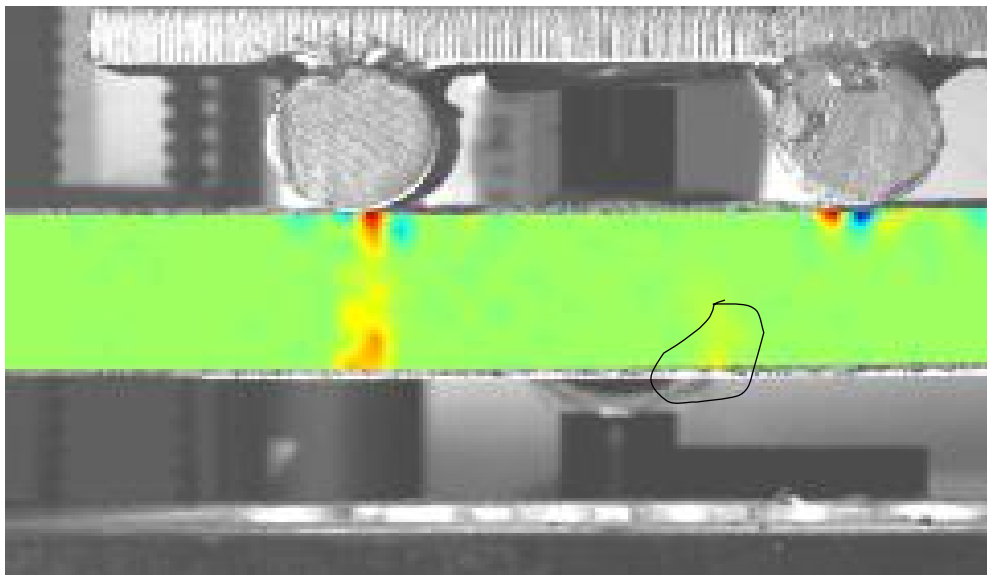
Frame 150

Da notare inoltre che la seconda fessura è visibile dalle immagini frontali solo al frame 150, e che si ha la creazione di una cricca all'altezza dell'appoggio di sinistra.

Stando ad indicare la fessurazione del provino per la sua intera larghezza.

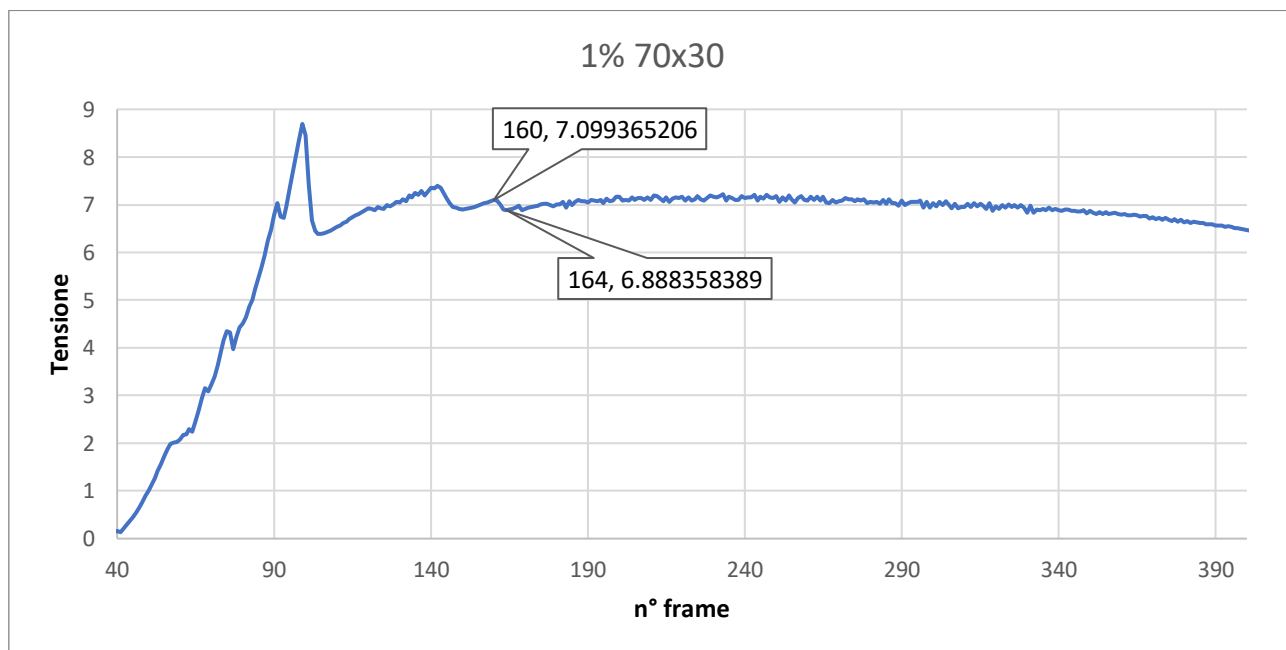


Frame 142 front

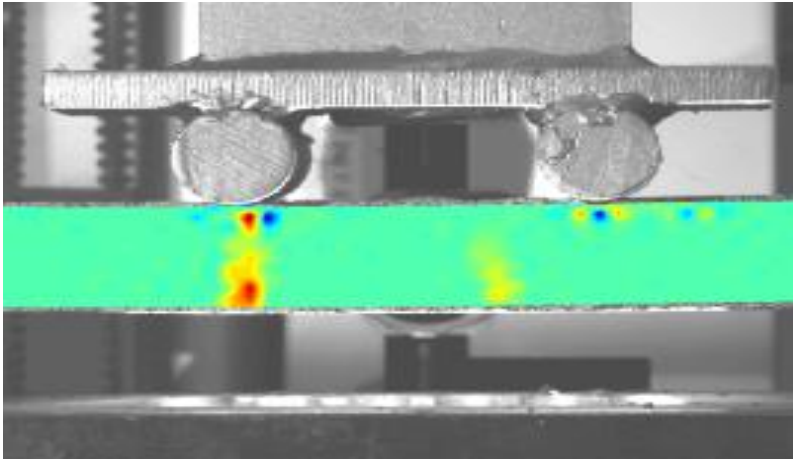


Frame 150

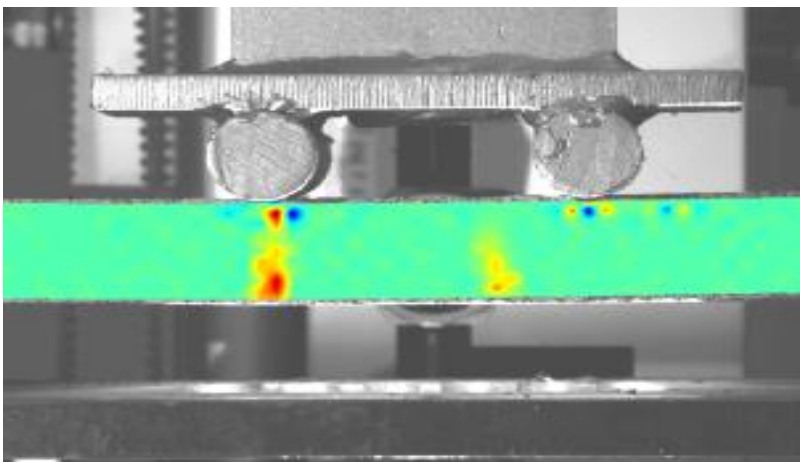
Frame 160 – 164



Anche qui si ha una fluttuazione della tensione, questa volta però essa non è dovuta alla formazione di una nuova cricca, ma bensì dall'inasprimento di quelle già esistenti



Frame 160



Frame 164

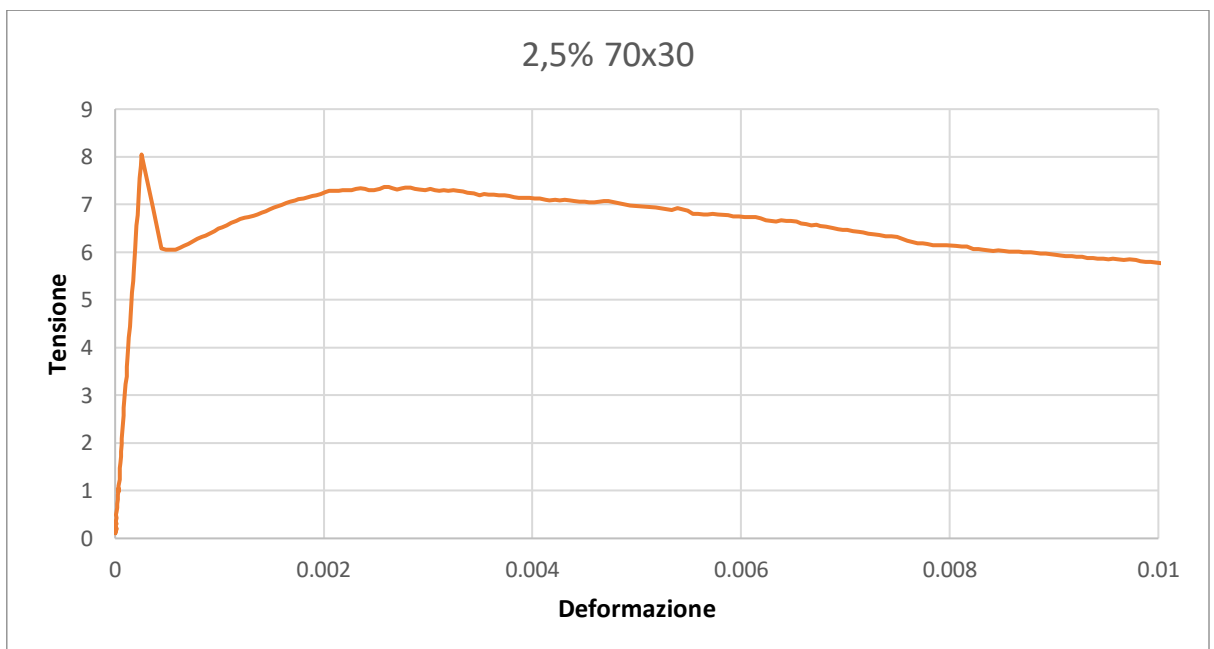
Infatti, nelle immagini si vede che la zona della cricca di destra colorata di rosso aumenta, questo perché il programma da un'immagine all'altra ha registrato una deformazione concentrata in quella zona.

Dopo l'inasprimento della seconda fessura, si ha la fase discendente della curva, il che indica la perdita completa da parte del materiale delle sue proprietà meccaniche.

Quindi per questo provino dalle prove sono risultati i valori massimi di tensione e forza pari a:

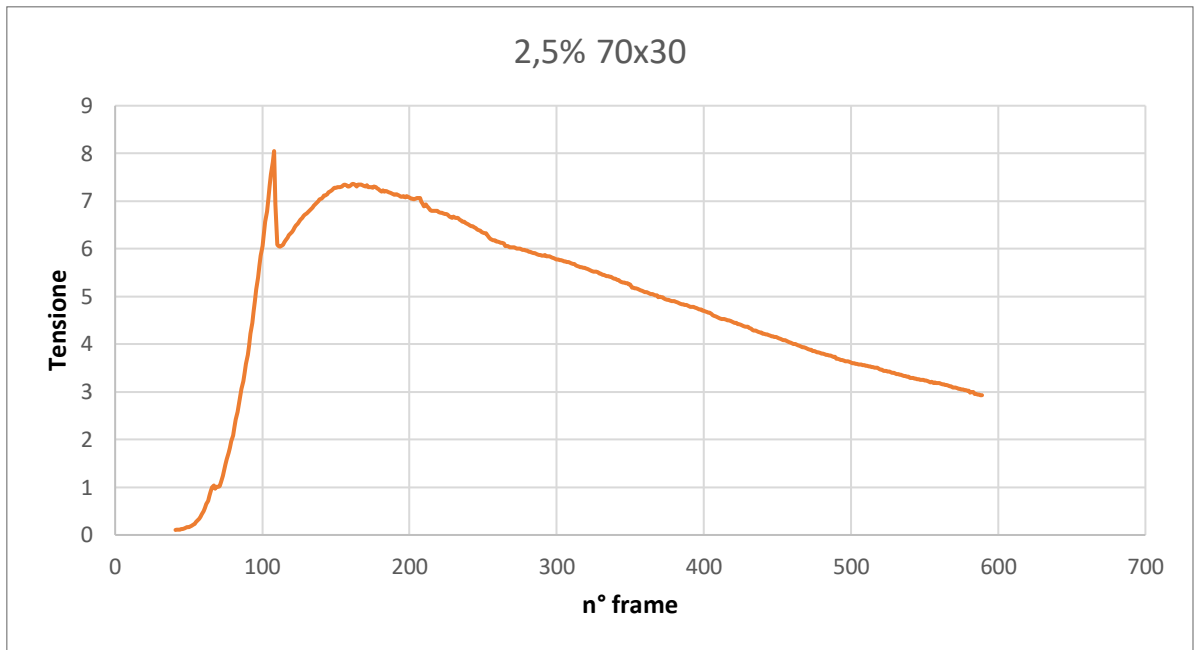
- MaxForza: 2282,158 N
- MaxTensione: 8,39 MPa

25_30_TestC



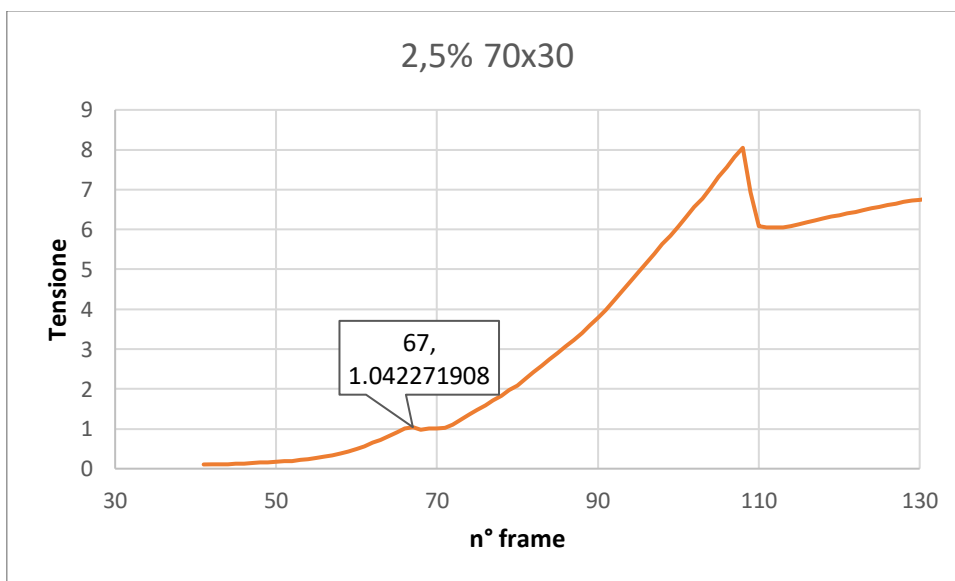
Come fatto per i provini in precedenza, si prenda il grafico rappresentante l'andamento della tensione in funzione del numero d'immagine, per una migliore analisi dei fenomeni agenti sul provino durante l'esperimento

Figura 21: andamento tensione - n°immagine



Come si può vedere dal grafico avviene una fluttuazione prima del massimo assoluto della curva nei frame 67 – 68

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 67 | 0,010652 | 341,1595 | 2,91E-05 | 1,042272 |
| 68 | 0,011039 | 318,3537 | 3,01E-05 | 0,972598 |



Ma dalle immagini prese sul provino, non si è riusciti a capire il perché di tale fenomeno; bisogna inoltre dire che in questa fase i livelli di tensione e deformazione sono troppo bassi per mettere in crisi il materiale, per cui la trattazione di quella parte risulta superflua e quindi non avverrà in questo testo.

Si preferisce invece cominciare con l'elencare le zone di interesse, di cui invece approfondiremo la trattazione come fatto fino ad ora:

- Frame 108 – 110

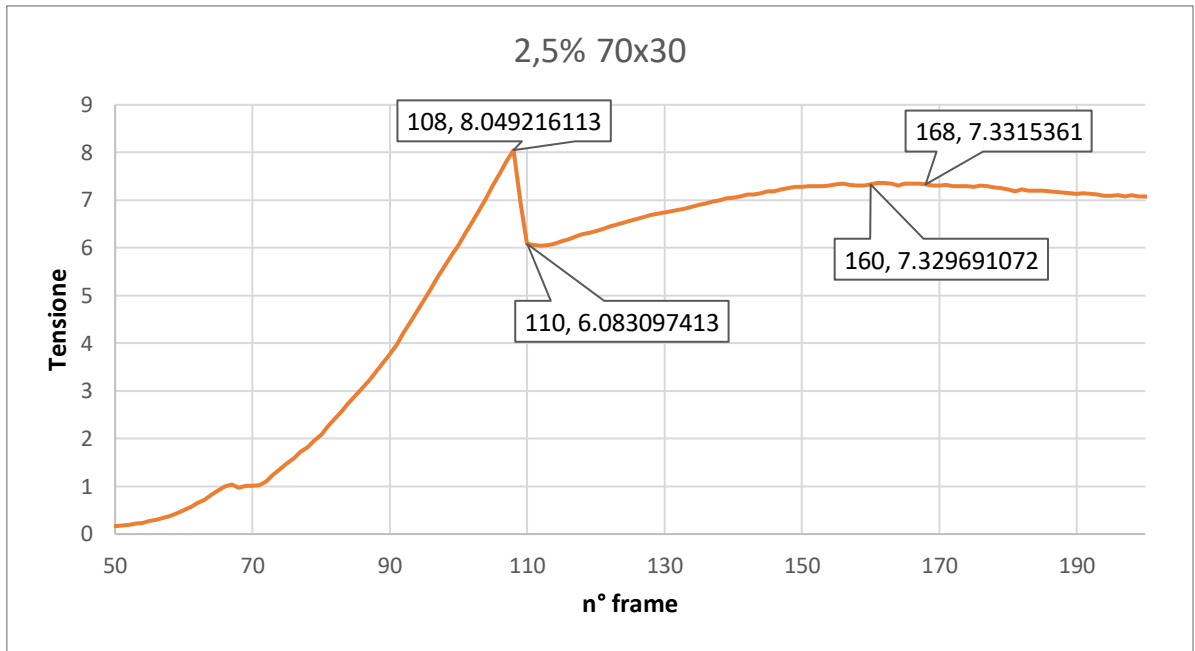
| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 107 | 0,089976 | 2556,846 | 0,000246 | 7,811386 |
| 108 | 0,092374 | 2634,693 | 0,000252 | 8,049216 |
| 109 | 0,134017 | 2268,083 | 0,000366 | 6,92919 |
| 110 | 0,161431 | 1991,137 | 0,000441 | 6,083097 |
| 111 | 0,177136 | 1982,6 | 0,000484 | 6,057017 |

In questi frame si ha il massimo assoluto della curva

- Frame 160 – 168

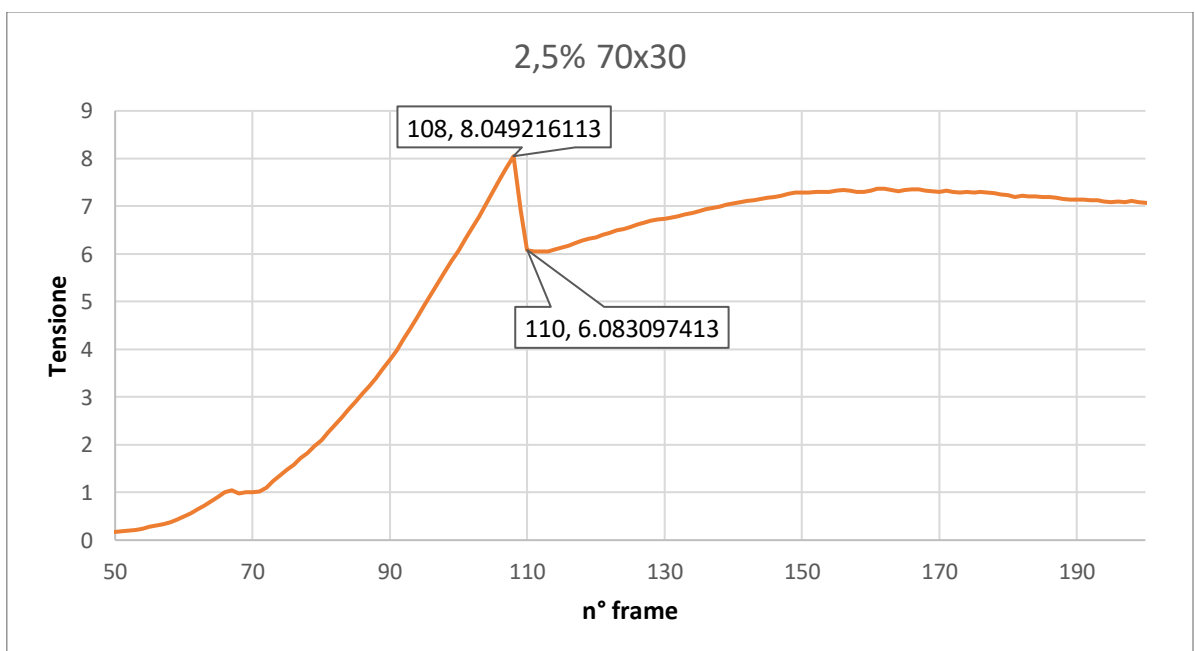
| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 159 | 0,909483 | 2390,458 | 0,002484 | 7,303058 |
| 160 | 0,928761 | 2399,176 | 0,002536 | 7,329691 |
| 161 | 0,943925 | 2409,898 | 0,002578 | 7,362448 |
| 162 | 0,960697 | 2410,658 | 0,002624 | 7,364769 |
| 163 | 0,974277 | 2403,994 | 0,002661 | 7,344412 |
| 164 | 0,989492 | 2393,605 | 0,002702 | 7,31267 |
| 165 | 1,006689 | 2404,18 | 0,002749 | 7,344978 |

Qui invece si ha il punto di massimo relativo della curva



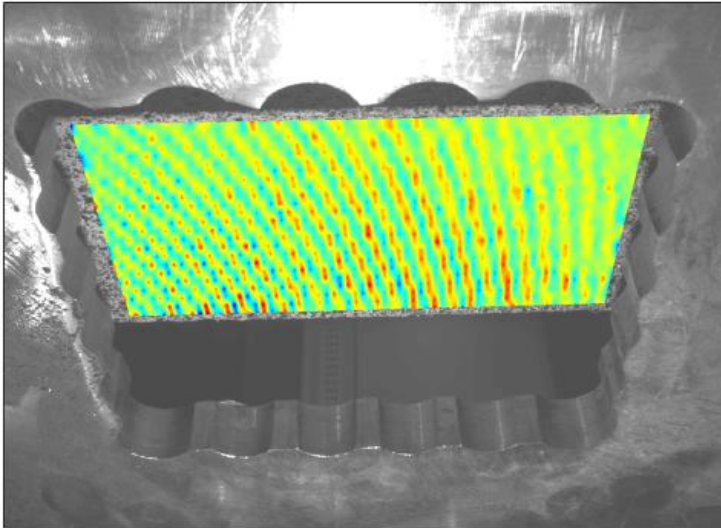
Frame 108 – 110

In questa zona avviene l'abbattimento della tensione del materiale con un aumento della deformazione, questo fenomeno è causato, come prognosticabile, dal propagarsi di una fessura nel provino che crea una discontinuità sulla superficie e quindi una diminuzione delle fibre dello stesso che contribuiscono alla resistenza sotto carico facendo diminuire le sue proprietà meccaniche.

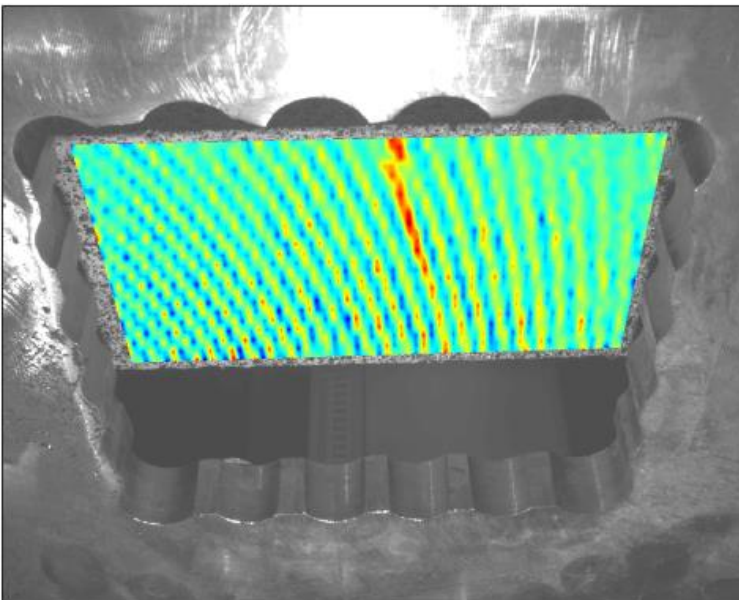


Andando ad analizzare i frame si vede che la cricca di cui abbiamo parlato non si forma tra le immagini 108-109 ma bensì essa si propaga in due stati; ovvero prima tra i frame 108-109 e poi tra 109 – 110.

Si riportano qui sotto le immagini prese per una migliore comprensione:



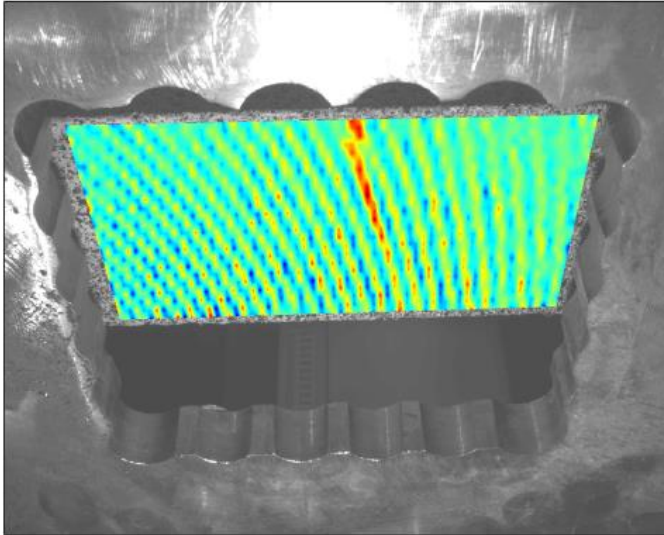
Frame 108



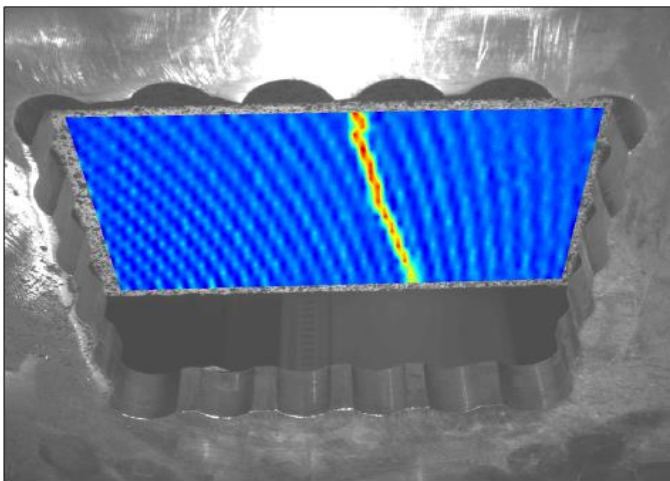
Frame 109

Infatti, come si vede qui si ha l'inizio della propagazione della cricca e non la sua completa formazione.

Cosa che invece avviene nelle due foto successive



Frame 109



Frame 110

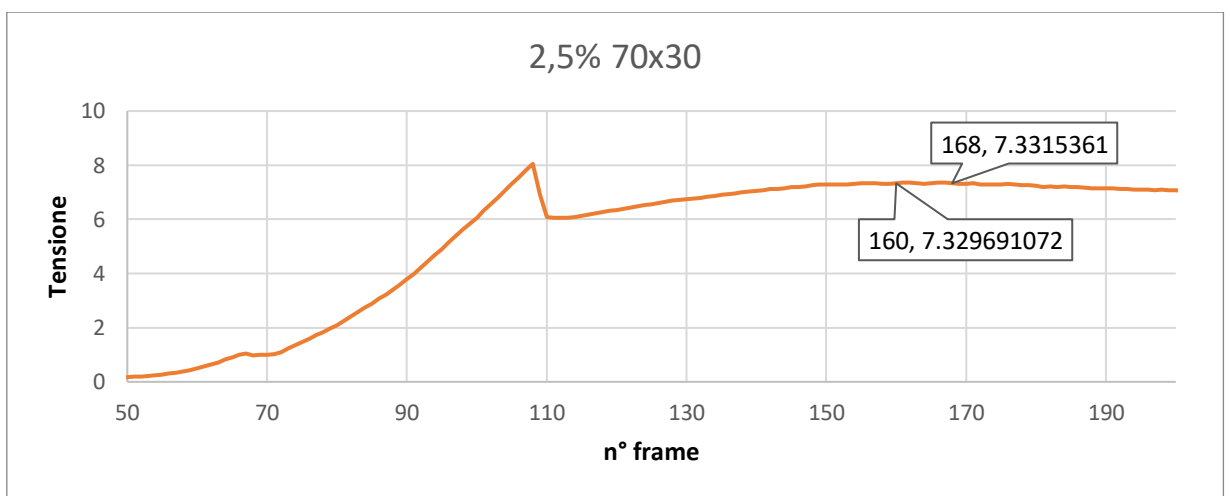
Da notare inoltre come cambia il colore della faccia inferiore del provino nel frame 110, infatti il colore blu indica uno stato di deformazione minore rispetto al precedente ed esso è presente in tutta la base tranne che nella fessura, dove troviamo un rosso acceso.

Questo sta ad indicare una concentrazione delle deformazioni all'interno della fessura e quindi una diminuzione della stessa nel resto della facciata.

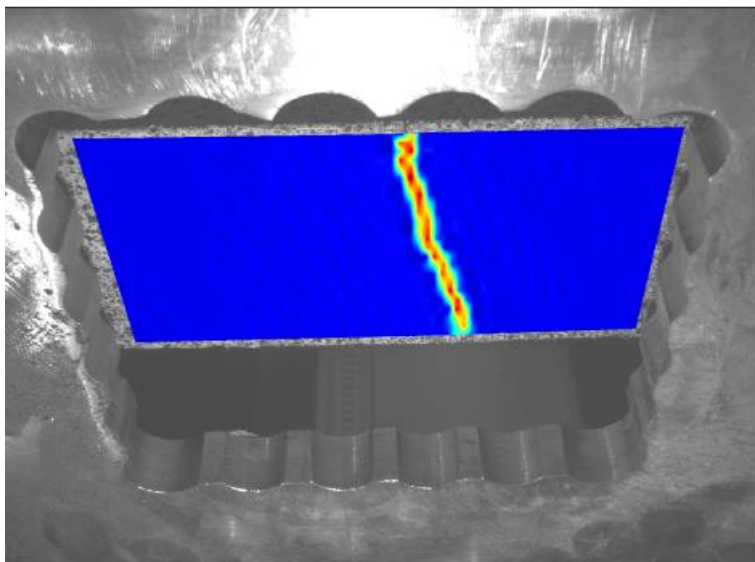
Frame 160 – 168

In questa zona invece si ha la presenza del massimo relativo della curva.

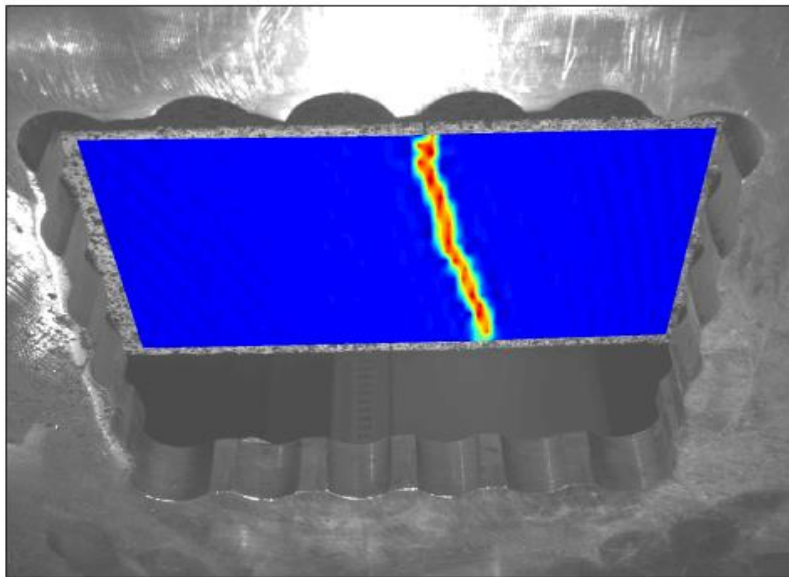
Quindi superata questa zona la curva inizierà la fase calante ed il provino risulterà compromesso:



Si vada adesso ad analizzare i frame per trovare la causa di tale comportamento:



Frame 160

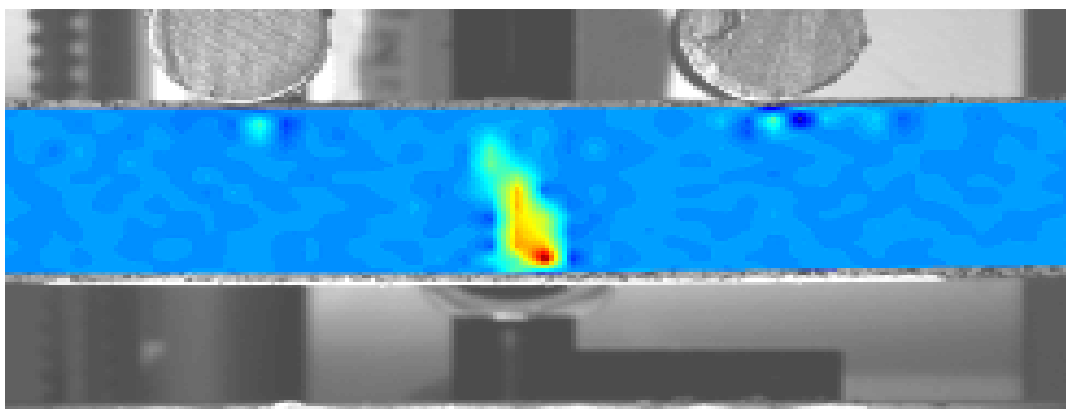


Frame 168

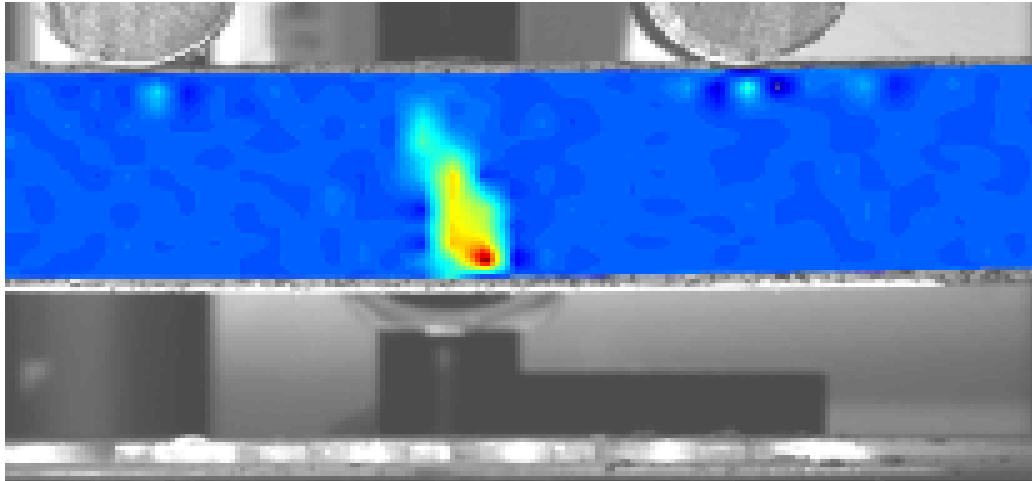
Come si vede la causa è attribuibile all'allargamento della fessura che si era creata nei frame 108 – 110.

Infatti, si vede che essa si allarga leggermente tra le due foto compromettendo così, come abbiamo già detto, il provino.

Questa cosa è osservabile anche dalle immagini frontali del provino che, per completezza, riporteremo qui di seguito.



Frame 160 front



Frame 168 front

Contrariamente alle altre immagini, qui il fenomeno non è vedibile tramite un ingrandimento della zona rossa nella cricca; ma bensì dal cambiamento di colore dell'intera sezione.

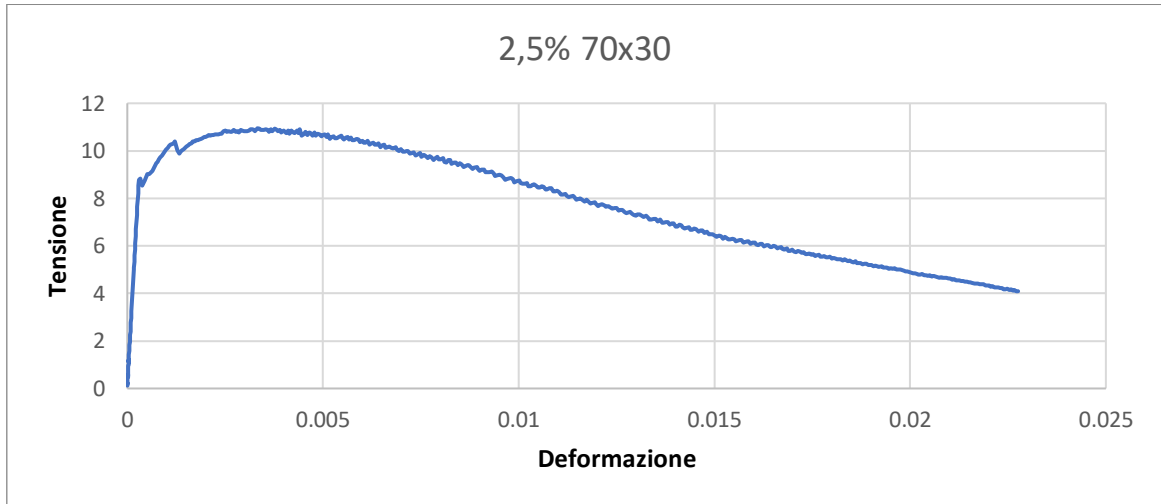
Infatti, essa passa da un colore tendente al celeste ad una sfumatura di blu, questo perché le deformazioni si concentrano tutte sulla discontinuità e quindi il resto della facciata si ritrova in uno stato più basso.

I valori massimi di forza e deformazione del provino trovati dalla prova quindi sono:

- MaxForza : 2634,693 N
- MaxTensione : 8,049216 Mpa

25_30_TestD

Figura 22: andamento deformazione-tensione

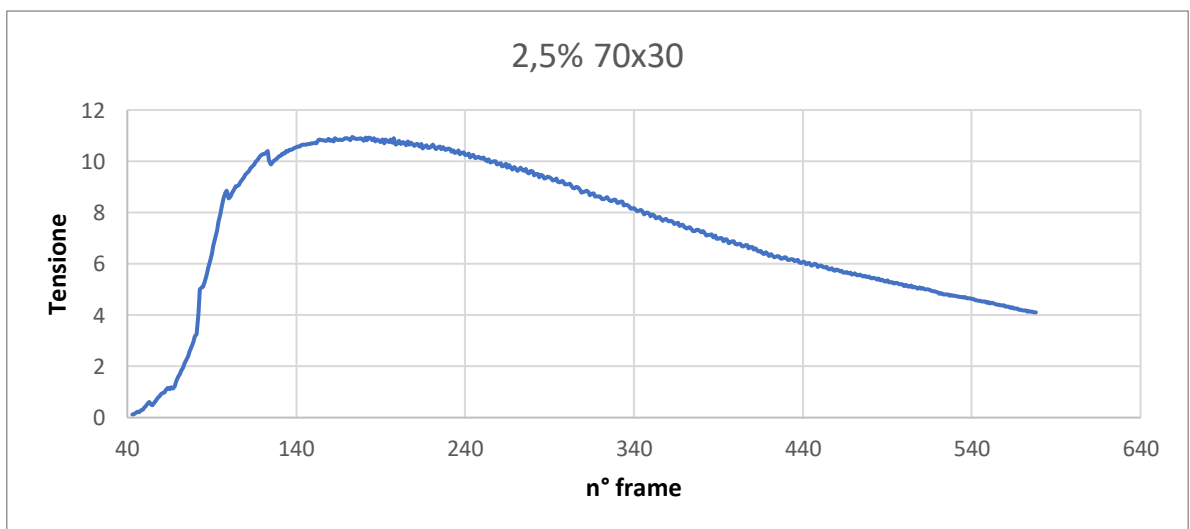


In questo grafico si può notare una particolarità, ovvero che il massimo assoluto della curva, non è il punto angoloso più grande della curva, ma bensì esso si trova dopo quest'ultimo.

Come fatto per i precedenti casi, si procede prendendo il grafico che mette in funzione tensione e numero dell'immagine, permettendo così l'individuazione di tutti i punti.

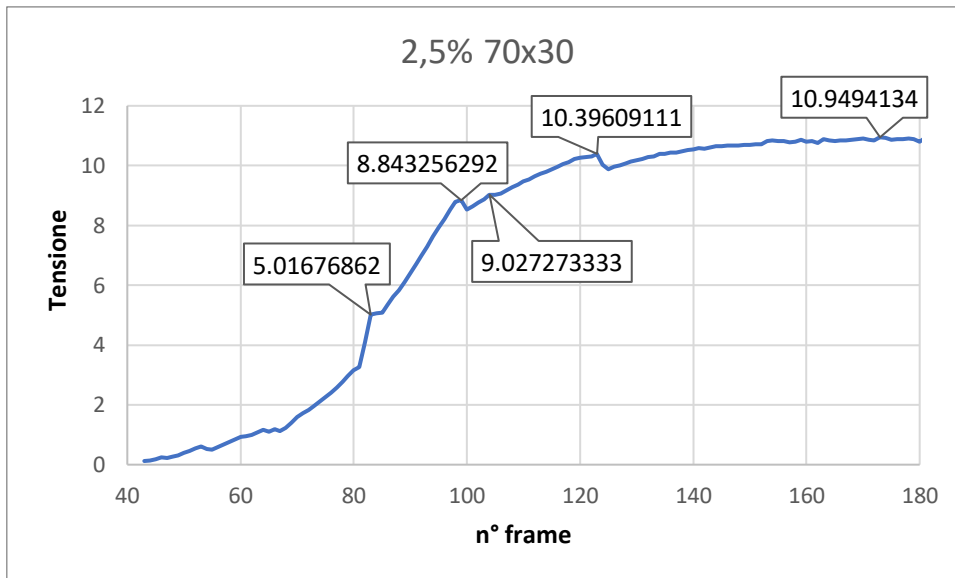
Si è poi anche ristretto il campo in prima e dopo il massimo assoluto.

Figura 23: andamento n°immagine - tensione



Restringendo il campo ai frame 40-180, si mettono in evidenza i vari punti di interesse:

Figura 24: n°immagine - tensione frame 40-180



Si vede che prima del massimo assoluto della curva abbiamo ben tre punti in cui la tensione cala in maniera evidente:

- Frame 82 - 85

Nei quali più che calare, la tensione rimane più o meno costante, infatti andando a guardare i dati del grafico si vede proprio che in quei frame essa riceve un freno alla sua crescita:

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 82 | 0,047761 | 1425,704 | 0,000134 | 4,106808 |
| 83 | 0,058985 | 1741,603 | 0,000166 | 5,016769 |
| 84 | 0,058053 | 1760,016 | 0,000163 | 5,069809 |
| 85 | 0,060573 | 1768,469 | 0,00017 | 5,09416 |

- Frame 98 – 100

In questi due frame invece si ha un vero e proprio calo della tensione del materiale, infatti sempre dopo l'analisi del grafico, si può ben vedere come essa cali

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 98 | 0,106306 | 3047,726 | 0,000299 | 8,779118 |
| 99 | 0,120519 | 3069,992 | 0,000339 | 8,843256 |
| 100 | 0,136938 | 2964,734 | 0,000385 | 8,540056 |
| 101 | 0,146998 | 2996,521 | 0,000413 | 8,631619 |

- Frame 104 – 106

Anche qui si ha un punto angoloso

| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 104 | 0,184423 | 3133,874 | 0,000519 | 9,027273 |
| 105 | 0,200321 | 3131,762 | 0,000563 | 9,021188 |
| 106 | 0,21339 | 3148,708 | 0,0006 | 9,070002 |

- Frame 122 – 125

In questi frame anche, si ha un punto angoloso della curva

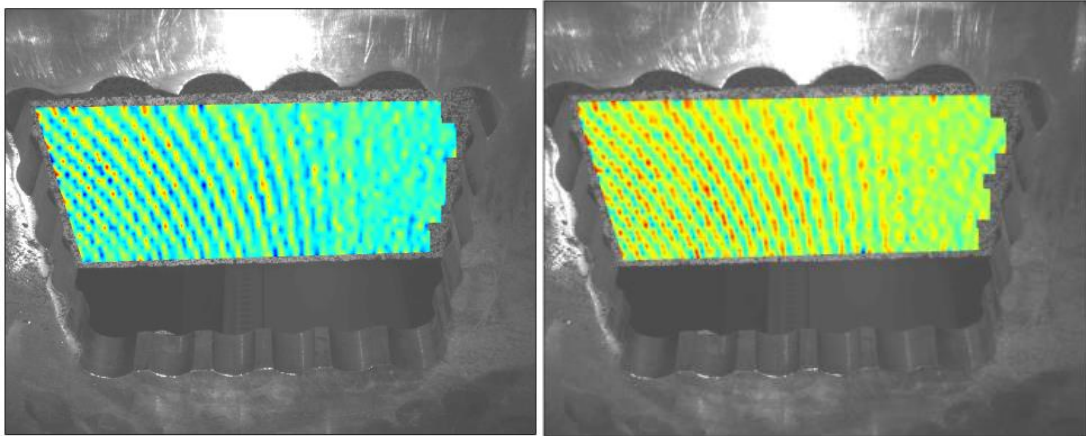
| n°frame | f(mm) | F(N) | ϵ | σ |
|---------|----------|----------|------------|----------|
| 122 | 0,420322 | 3580,642 | 0,001182 | 10,31421 |
| 123 | 0,434038 | 3609,068 | 0,001221 | 10,39609 |
| 124 | 0,45735 | 3478,79 | 0,001286 | 10,02082 |
| 125 | 0,471252 | 3431,345 | 0,001325 | 9,884152 |

Adesso che si è fatto il punto della situazione, si proceda con l'analisi questi frame:

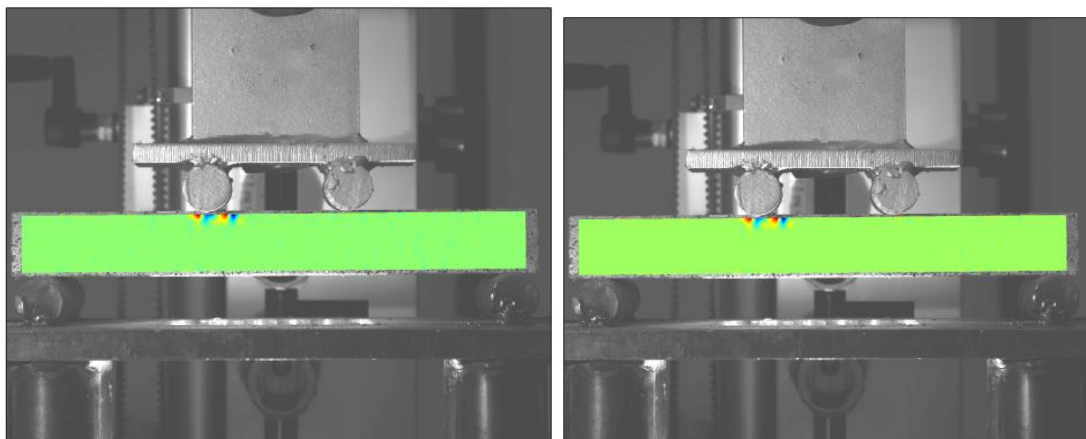
Frame 82 – 85

Dall'analisi delle immagini sotto, non si palesa nessuna evidente causa di tale andamento.

Figura 25: frame 82 - 85



Andando invece a guardare le immagini prese da davanti il provino, si può vedere che esso potrebbe essere causato dall'inasprimento delle cricche presenti in prossimità dell'appoggio di sinistra.

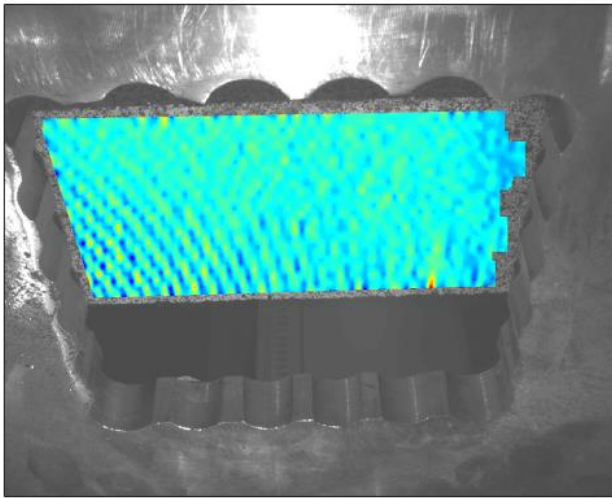


In quanto il valore del colore rosso, rappresentante zone nelle quali lo stato deformativo è maggiore, aumenta, facendo intuire un aumento della deformazione nelle stesse.

Frame 98 – 100

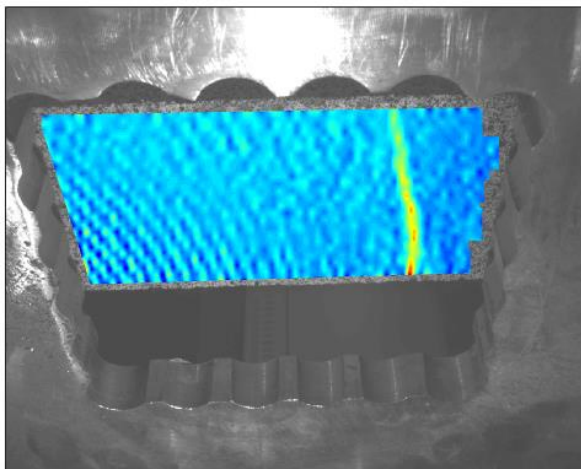
Qui la tensione riceve un vero e proprio calo; la causa di tale fenomeno stavolta è di più facile ricerca, in quanto se si va ad analizzare le immagini prese sotto il provino, si osserva

Figura 26: frame 98



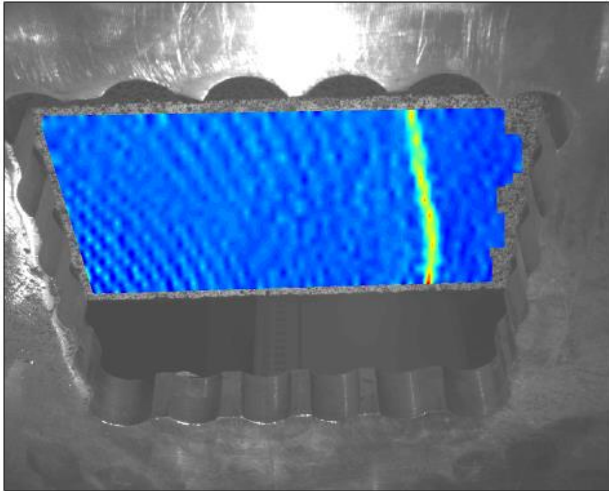
che già dal frame 98 si palesa l'inizio della formazione di una cricca sottostante il provino.

Tale crepa diventa molto più evidente nei due frame successivi, dei quali sotto le immagini.



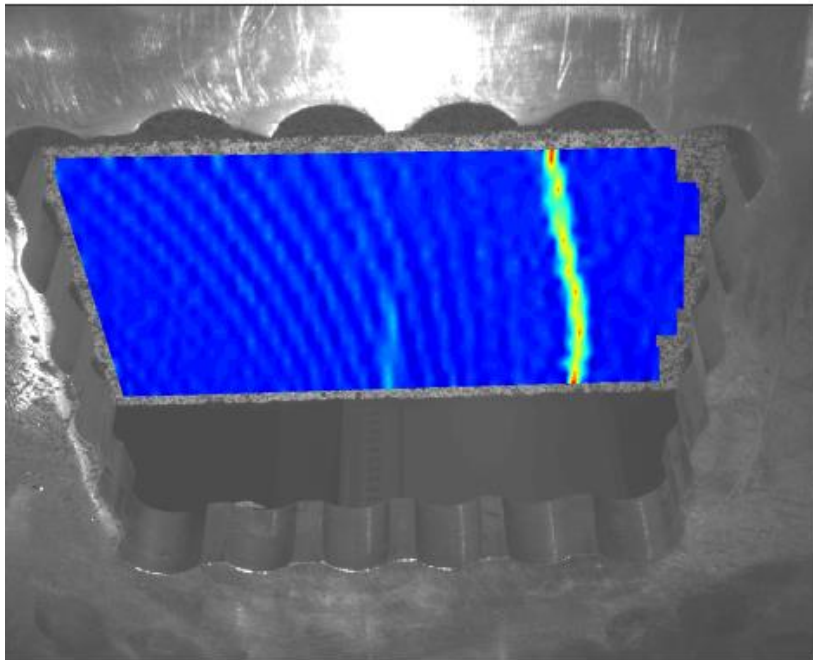
frame 99

frame 100

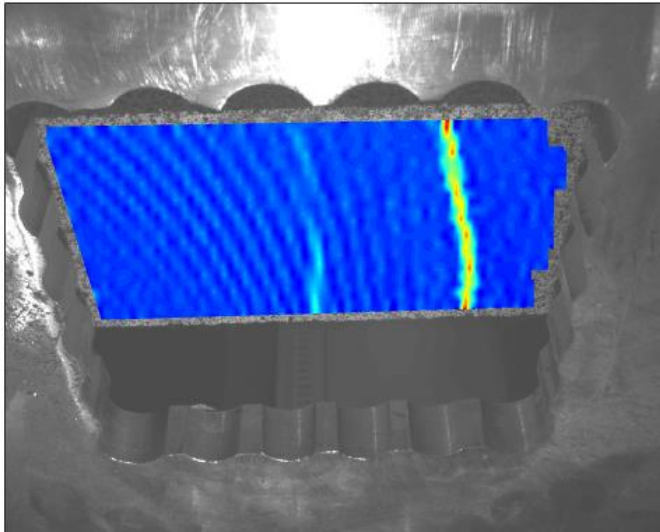


Frame 104 – 106

Anche qui, il piccolo salto della tensione è imputabile alla formazione di una seconda cricca sotto il materiale che seppur non profonda, va a compromettere in parte l'andamento della curva.



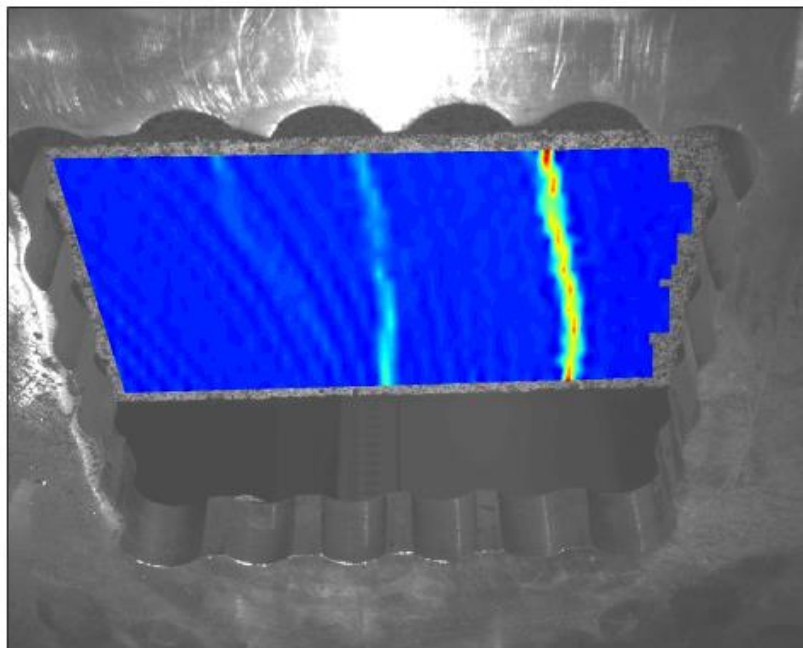
frame 105



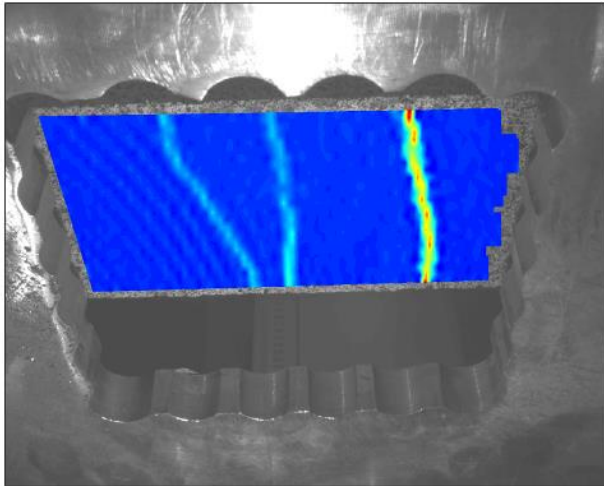
frame 106

Frame 122 – 125

In questo caso, l'abbassamento della resistenza del materiale è dato dall'inasprimento della cricca formatasi nei frame 105 – 106 e dalla formazione di una terza cricca:

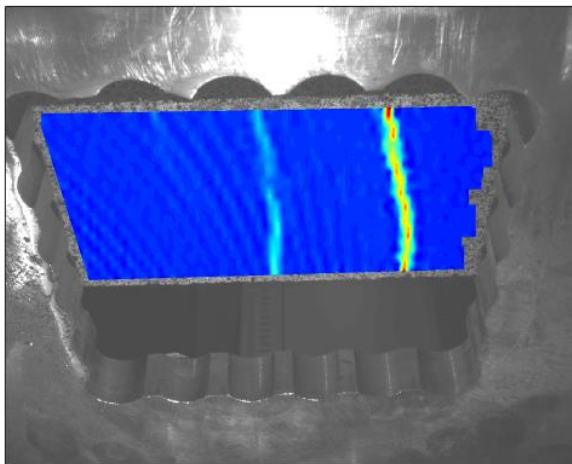


frame 122



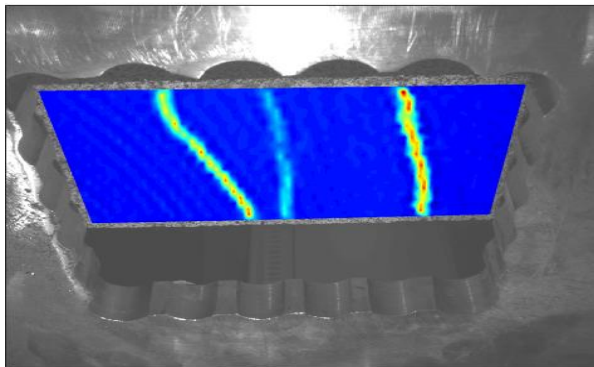
frame 125

Da notare che la terza cricca aveva già cominciato a manifestarsi nel frame 120



Ma i suoi effetti si sono fatti sentire solo qualche frame dopo.

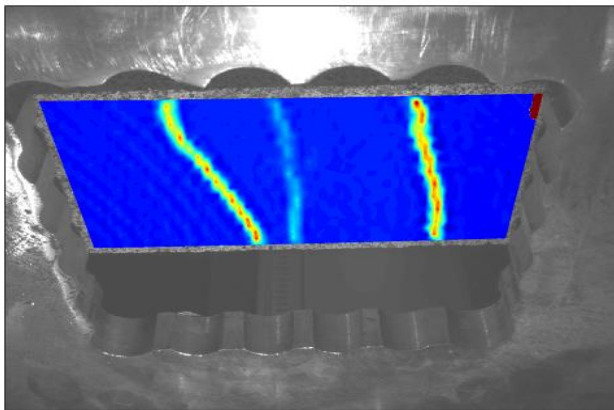
La piena apertura della cricca di sinistra la si trova al frame 140



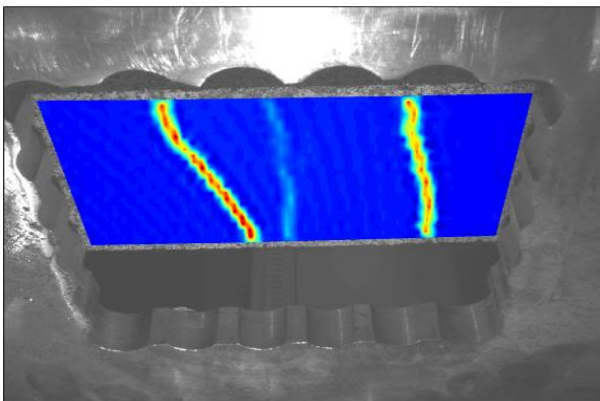
Si procede adesso con l'analisi del punto di massimo assoluto della curva, situato nel frame 173:

Frame 152 – 177

Anche in questo caso, dalle immagini prese dalla parte inferiore del provino, non si nota il perché la curva vada decrescendo in maniera continua.

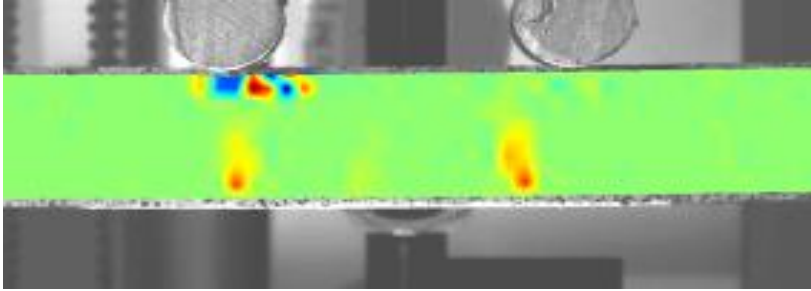


frame 152

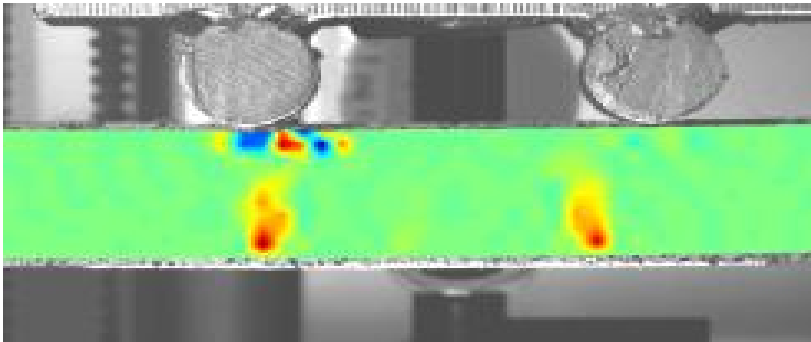


frame 174

Mentre andando ad analizzare le immagini prese dalla parte frontale del provino, si vede che le cricche precedente formatisi hanno 'scavato' nel provino, causando l'irrimediabile perdita di resistenza dello stesso.



Frame 152 front



Frame 174 front

Quindi da questa prova si sono trovati i valori di massima tensione e massima forza applicabile al materiale pari a:

- MaxForza: 3609,068 N
- MaxTensione: 10,39609 MPa

Conclusioni

Dalle prove si è notato come l'utilizzo di tecniche di correlazione digitale di immagini possano risultare più efficienti di altre se utilizzate in determinati contesti, perché permettono di osservare contemporaneamente un'intera superficie del campione preso in esame, dando così una visione d'insieme delle cause di crisi locale del materiale.

Per quanto riguarda il materiale si è visto, come ipotizzato, che le cricche o fessure si sono formate nella zona dei provini dove il momento flettente era maggiore, inoltre grazie all'utilizzo della tecnica DIC è stato possibile vedere come l'aumento della percentuale di fibre nella matrice cementizia aumenti le proprietà meccaniche del materiale composito preso in esame, creando un materiale con proprietà ibride tra quelle della matrice e quelle del rinforzo.

Si è potuto anche osservare come nei provini con il 2,5% di fibre si sia andati incontro alla multi-fessurazione del campione, il quale presentava un comportamento molto più simile a quello dei materiali duttili più che al cemento.

Dai grafici poi si è visto che, sempre nei provini con più fibra, dopo la prima fessurazione si andava incontro ad incrudimento; infatti, il materiale non perdeva la sua tenacità nel resistere all'aumento del carico, ma anzi la pendenza della curva rimaneva positiva.

D'altro canto, si è anche osservato come la percentuale di fibra sia un dato fondamentale per l'aumento delle proprietà meccaniche del materiale composito, infatti nei provini con l'1% di rinforzo, si è notato un comportamento fragile tipico del cemento; indice del fatto che la percentuale di fibra nel composito non era abbastanza da poter incidere sulle sue proprietà meccaniche, mentre nei provini al 2,5% di armatura si è notato un comportamento molto più simile a quello dell'acciaio.

Bibliografia

- [1] I materiali compositi di Gianni Caligiana, Francesco Cesari

- [2] Experimental investigation of Mechanical Properties UHPFRC: Petr Mác, Radoslav Sovják, Tomas Vavrinik

- [3] LA TECNICA DELLA CORRELAZIONE DIGITALE DI IMMAGINI PER IL MONITORAGGIO DI PROVINI DI MURATURA SOTTOPOSTI A PROVE MECCANICHE E. Gabrielli1 , C. Colla2

- [4] UTILIZZO DELLA CORRELAZIONE DIGITALE TRA IMMAGINI SPECKLE PER LA MISURA DI FORMA DI OGGETTI IN MOVIMENTO G.B Broggiato, F.Campana, M.SASSO

- [5] EXPERIMENTAL MECHANICS - Digital Image Correlation - Satoru Yoneyama, Go Murasawa

- [6] Lezioni di MECCANICA STRUTTURALE S.Lenci

- [7] Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing
by Jarosław Górszczyk, Konrad Malicki And Teresa Zyc

- [8] XXVI Convegno nazionale AIAS Gran Hotel Baia Verde 1997

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il mio tutor Marco Sasso ed il professor Ingegnere Chiappini per la pazienza e l'aiuto datomi durante lo svolgimento del mio tirocinio e la compilazione della tesi.

Ringrazio Chiara Bordi per avermi spronato in un momento in cui si vedeva solo il buio pesto, i miei coinquilini per avermi sopportato nei miei alti e bassi durante il mio percorso di laurea ed avermi fatto ridere anche nei giorni più grigi.

Un ringraziamento più profondo va invece ai miei genitori e alle mie sorelle Beatrice e Viviana, per aver continuato a credere in me nonostante i continui problemi che andavo a creare.

Grazie di cuore a tutti.