

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea magistrale

## **Calibrazione degli estensimetri per la caratterizzazione di provini polimerici prodotti in FDM**



Relatore

Prof. Salvatore Brischetto

Co-relatore

Ing. Roberto Torre

Candidato

Mohammed Maataoui

Anno Accademico 2019/2020



*Ad Amalia,  
per il sostegno e il supporto  
in tutti questi anni.*



## ***Sommario***

La seguente tesi si propone di calibrare gli estensimetri utilizzati nella caratterizzazione sperimentale di provini polimerici prodotti tramite la tecnologia di stampa 3D Fused Deposition Modelling (FDM), mediante la costruzione di un modello di calibrazione agli elementi finiti con l'ausilio del codice MSC Nastran, che verrà sperimentalmente validato attraverso delle prove di trazione in determinate condizioni.

La presenza degli estensimetri può provocare degli effetti più o meno marcati sui risultati espressi tramite le curve  $\sigma$ - $\epsilon$ . Ciò è causato dalla mancata corrispondenza tra la rigidità dell'estensimetro e quella del provino, che induce un effetto di rinforzo che porta alla riduzione della deformazione nella zona attorno all'estensimetro, portando quest'ultimo a misurare delle deformazioni più basse, e di conseguenza considerare dei moduli elastici più elevati di quello che sono.

Si vuole quindi determinare un coefficiente di correzione per determinare l'entità dell'effetto di rinforzo causato dall'estensimetro quando viene usato per materiali con bassa rigidità come i polimeri, per evitare stime errate delle deformazioni e del modulo elastico, elaborando un nuovo modello per la correzione a posteriori di tali effetti sui risultati delle prove di caratterizzazione condotte in laboratorio.

Per questo studio si è preso spunto dall'articolo pubblicato da S. Zike - L.P. Mikkelsen nell'ottobre 2013 [1], nel quale tra i vari effetti più o meno importanti che potrebbero influenzare la misurazione, viene evidenziato l'effetto di rinforzo dovuto alla diversa rigidità tra provino ed estensimetro.

# ***Indice***

<b><i>Introduzione</i></b>	<b>9</b>
<b><i>1 Fabbricazione additiva</i></b>	<b>11</b>
<b><i>1.1 Metodologie di fabbricazione additiva</i></b>	<b>11</b>
<b><i>1.1.1 Fabbricazione additiva con materiale in polvere</i></b>	<b>12</b>
<b><i>1.1.2 Fabbricazione additiva con materiale liquido</i></b>	<b>15</b>
<b><i>1.1.3 Fabbricazione additiva con materiale solido</i></b>	<b>15</b>
<b><i>2 Estensimetri</i></b>	<b>20</b>
<b><i>2.1 Tipologie di estensimetri</i></b>	<b>20</b>
<b><i>2.2 Funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza</i></b>	<b>21</b>
<b><i>2.3 Il fattore di taratura</i></b>	<b>23</b>
<b><i>2.3.1 Influenza della temperatura sulla misurazione</i></b>	<b>24</b>
<b><i>2.3.2 Influenza della sensibilità trasversale</i></b>	<b>26</b>
<b><i>2.4 Forma e caratteristiche degli estensimetri elettrici a resistenza</i></b>	<b>28</b>
<b><i>2.4.1 Forma, geometria e dimensione degli estensimetri</i></b>	<b>28</b>
<b><i>2.4.2 Materiali e valori tipici delle resistenze degli estensimetri</i></b>	<b>29</b>
<b><i>2.4.3 Modalità di incollaggio degli estensimetri</i></b>	<b>31</b>
<b><i>2.5 Ponte di Wheatstone</i></b>	<b>33</b>
<b><i>2.5.1 Tipologie di collegamenti</i></b>	<b>35</b>
<b><i>3 Effetto di rinforzo</i></b>	<b>38</b>
<b><i>3.1 Nature dell'effetto di rinforzo</i></b>	<b>38</b>
<b><i>3.2 Effetto di rinforzo globale e locale</i></b>	<b>39</b>
<b><i>3.3 Coefficiente correttivo</i></b>	<b>40</b>
<b><i>4 Prova di trazione</i></b>	<b>42</b>
<b><i>4.1 Scelta del campione di prova</i></b>	<b>42</b>

<i>4.2 Descrizione della prova</i>	43
<i>4.3 Diagramma tensione-deformazione</i>	46
<b>5 Modello agli elementi finiti dell'effetto di rinforzo</b>	49
<i>5.1 MSC Nastran e MSC Patran</i>	49
<i>5.2 Scelte adottate per la modellizzazione</i>	51
<i>5.2.1 Geometrie</i>	51
<i>5.2.2 Assunzioni e vincoli</i>	52
<i>5.3 Modello 2D</i>	58
<i>5.3.1 Influenza del modulo elastico del campione e dell'estensimetro</i>	59
<i>5.3.2 Influenza della geometria dell'estensimetro</i>	63
<i>5.3.3 Influenza della geometria del campione</i>	65
<i>5.4 Modello 3D</i>	68
<i>5.4.1 Influenza del modulo elastico del campione e dell'estensimetro</i>	68
<i>5.4.2 Influenza della geometria dell'estensimetro</i>	70
<i>5.4.3 Influenza della geometria del campione</i>	73
<i>5.5 Modello 3D con due estensimetri</i>	76
<b>6 Analisi dei dati sperimentale</b>	79
<i>6.1 Strumentazione</i>	79
<i>6.2 Digitale Image Correlation</i>	84
<i>6.3 Impostazione delle prove di trazione</i>	85
<i>6.3.1 Analisi dimensionale dei provini</i>	86
<i>6.3.2 Impostazione del test</i>	87
<i>6.4 Risultati</i>	89
<i>6.4.1 Risultati DIC per provini senza estensimetro</i>	89
<i>6.4.2 Risultati provini con estensimetro</i>	91

<i>6.4.2.1 Risultati della DIC</i>	<i>91</i>
<i>6.4.2.2 Risultati dell'estensimetro</i>	<i>94</i>
<i>6.5 Definizione del coefficiente correttivo</i>	<i>97</i>
<i>6.5.1 Validazione dei modelli FEM</i>	<i>97</i>
<i>Conclusioni e sviluppi futuri</i>	<i>99</i>
<i>Lista delle figure</i>	<i>101</i>
<i>Lista delle Tabelle</i>	<i>104</i>
<i>Bibliografia</i>	<i>105</i>

## *Introduzione*

In tantissimi campi si ha la necessità di utilizzare dei sensori per la definizione delle deformazioni, uno di questi è l'estensimetro a resistenza elettrica. Nel presente elaborato si andrà ad analizzare l'attendibilità delle misurazioni che vengono eseguite da tali sensori, soprattutto nella trattazione dei materiali a basso modulo. Come già anticipato nel sommario, si vuole analizzare in particolare l'eventuale presenza di effetti di rinforzo, dovuti all'applicazione di questi sensori su materiali a basso modulo.

In quanto le prove sperimentale verranno eseguite su dei provini prodotti mediante la tecnologia di fabbricazione additiva FDM, l'inizio dell'elaborato sarà dedicato a dare una panoramica sul mondo della fabbricazione additiva. Si procederà poi ad analizzare in maniera dettagliata il tipo di sensore che si intende utilizzare, vale a dire l'estensimetro a resistenza elettrica.

Si andrà poi riportare un resoconto sullo stato dell'arte riguardante l'effetto di rinforzo, specificando come viene definito e quantificato tale effetto e di conseguenza il modo in cui verrà considerato nel proseguo della tesi. Prima di procedere con una analisi numerica e sperimentale dell'effetto di rinforzo, in quanto si vogliono condurre delle prove di trazione per la determinazione della sua presenza, per poi andare a quantificare l'entità di tale effetto mediante un coefficiente correttivo, si andrà a definire come viene condotta tale prove, specificando le varie scelte adottate per la conduzione della prova oggetto di questo elaborato.

Il punto successivo sarà quello di definire dei modelli agli elementi finiti 2D e 3D con l'ausilio del codice di calcolo MSC Nastran per definire la possibile esistenza dell'effetto di rinforzo. Si andrà poi ad analizzare in dettaglio come il suddetto effetto possa essere influenzato al variare di alcuni parametri, come il modulo di Young del materiale considerato, geometria del campione di prova, quella dell'estensimetro e il suo modulo.

Infine verranno riportati ed analizzati i vari dati ottenuti dalle prove sperimentali, con i quali si andrà in primo luogo a definire la possibile esistenza dell'effetto di rinforzo, per poi procedere sfruttando tali informazioni per la verifica della validità

dei modelli agli elementi finiti, considerando come condizioni di validazione quelli in cui verranno condotte le prove di trazioni.

## ***1 Fabbricazione additiva***

La fabbricazione additiva (FA) o stampa 3D è stata concepita nella metà degli anni '80 per diminuire i tempi di realizzazione dei prototipi, e per diversi anni è stata chiamata con il nome di “Prototipazione Rapida” e consiste nell'unione di uno strato sopra l'altro per realizzare oggetti sulla base dei dati relativi a un modello computerizzato tridimensionale, a differenza della tecnologia tradizionale che consiste in una produzione sottrattiva. Si possono utilizzare diversi tipi di materiali, da polimeri e prodotti organici a ceramiche e metalli.

La FA ha avuto poi un interesse sempre più crescente negli ultimi trenta anni, con una maturazione della tecnologia certificata dal passaggio dalla prototipazione rapida dei componenti alla produzione di parti di alto valore. Rispetto alla produzione tradizionale la stampa 3D porta diversi vantaggi, tra i quali la riduzione del materiale impiegato, una diminuzione dei costi di manodopera e sprechi, tempi di produzione più rapidi oltre alla possibilità di creare geometrie con complessità illimitata. Nonostante un ampio utilizzo della stampa 3D per lo sviluppo di materiali e strutture con configurazioni geometriche complesse, l'applicazione di tale metodo di produzione per realizzare componenti con funzionalità sofisticate e multiple è solo agli inizi [2]. I limiti di questa tecnologia sono dati da volumi di lavoro contenuti, dimensioni dei pezzi dipendenti dal volume della macchina, velocità di costruzione bassa, inoltre ogni macchina può lavorare solo con un numero definito di materiali [3].

### ***1.1 Metodologie di fabbricazione additiva***

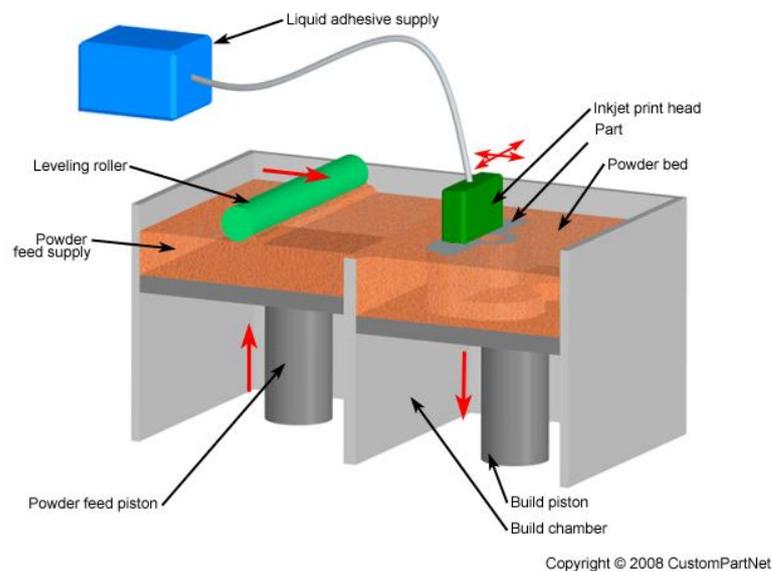
L'utilizzo delle tecniche di fabbricazione additiva è condizionato dalla disponibilità del modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD tridimensionale. Lo standard universale nella FA per i modelli matematici è il formato STL (Standard Triangulation Language), che consiste nel convertire il modello CAD 3D di tipo solido in un modello tipo “Shell” nel quale viene approssimata la superficie interna ed esterna del componente con una serie di triangoli di diverse dimensioni, in base alla risoluzione desiderata e in funzione della complessità geometrica. Esistono diverse tecniche di FA che possono essere

suddivise in base a come si presenta il materiale che si intende usare, che può presentarsi come: polvere, liquido o solido.

### ***1.1.1 Fabbricazione additiva con materiale in polvere***

Si hanno svariate tipologie di FA in polvere tra cui:

- ***3 Dimensional Printing (3DP)***: sviluppato e brevettato dal Prof. E. Sachs del MIT di Boston, uno schema del funzionale di questa tecnologia è riportato di seguito:



*Figura 1: Schema funzionamento stampante con tecnologia 3DP [4].*

In figura 1 si ha il meccanismo di funzionamento di una stampante 3DP, che consiste nel depositare selettivamente un collante su uno strato per cementare il materiale polverizzato sul posto grazie a una reazione chimica o termica. A solidificazione avvenuta una testina a rullo applica un altro strato di polvere. Questa tecnologia non necessita di supporti, dato che la polvere funge da base e alla fine del processo bisogna liberare il componente dalla polvere in eccesso. Con la 3DP si possono produrre anche prodotti colorati, proiettando della colla colorata. Questo tipo di FA permette l'utilizzo di diversi tipi di materiale: metalli, polimero e ceramica.

- ***Laser Sintering Selective (SLS)***: anche in questo caso viene steso un sottile strato di polvere che può essere di materiale termoplastico, metallico o

silicee. A differenza del 3DP però si fa uso di un laser per sinterizzare il materiale usato per la produzione del componente, viene fatto poi abbassare il piano di costruzione della quantità voluta per poi stendere lo strato successivo. Uno schema funzionale viene di seguito riportato:

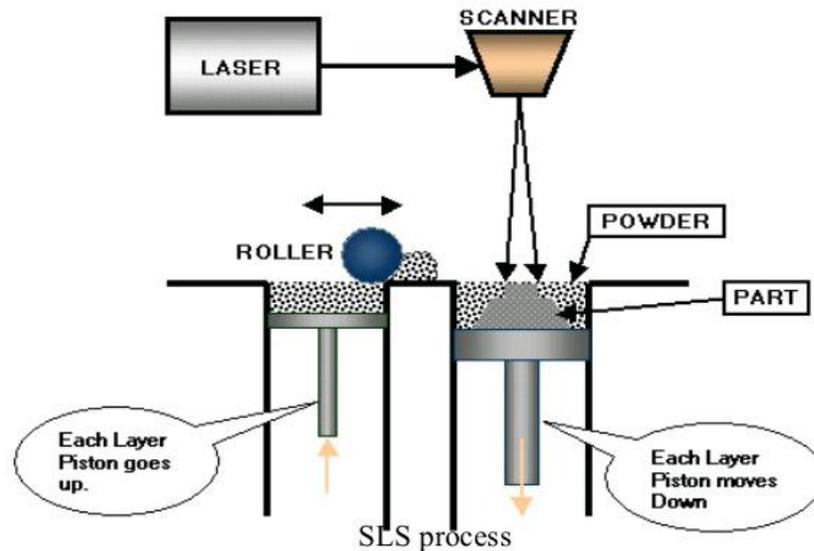


Figura 2: Schema funzionamento stampante con tecnologia SLS [5].

Anche questa tecnica di FA non prevede dei supporti dato che la polvere non sinterizzata va a ricoprire tale ruolo, sostenendo gli strati superiori. Come per il caso precedente bisogna liberare dalla polvere in eccesso il componente alla fine del processo. In caso vengano usati materiali metallici è necessario effettuare un trattamento termico per l'eliminazione delle tensioni interne indotte dal processo di costruzione.

- **Electron Beam Melting (EBM):** si parte sempre da uno strato di polvere che questa volta deve essere preriscaldato a una temperatura compresa tra 800-900°C, è una tecnica di FA che può fondere polveri metalliche ad alto punto di fusione come il titanio. La sorgente di energia di tale processo deriva da un fascio di elettroni emessi da un filamento riscaldato a  $T > 2500^\circ\text{C}$ . Gli elettroni sono poi accelerati attraverso l'anodo fino alla metà della velocità della luce, si hanno in seguito due campi magnetici, dove uno porta il fascio nel punto focale e l'altro controlla la deviazione del fascio, quando gli elettroni colpiscono la polvere, l'energia cinetica viene trasformata in calore che fonde la polvere. Si opera sottovuoto nella camera di lavoro in modo da

prevenire la formazione di ossidi metallici nelle polveri. Nella figura seguente viene riportato lo schema funzionale:

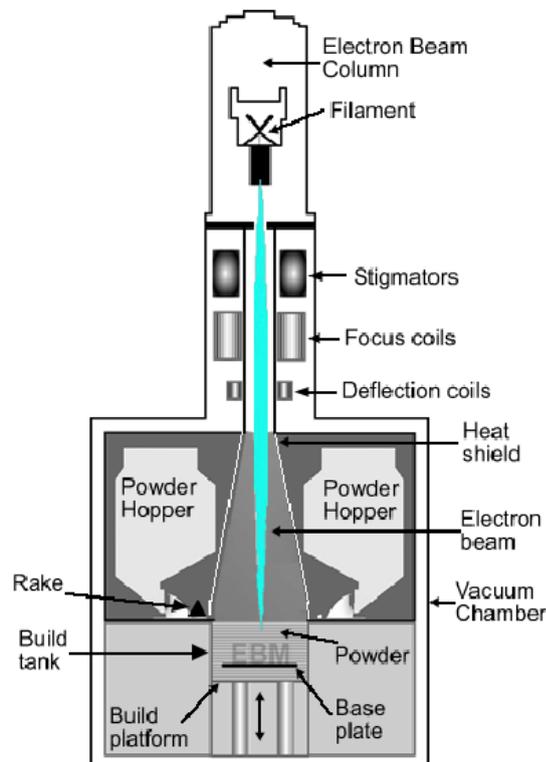


Figura 3: Schema funzionamento stampante con tecnologia EBM [6].

Si riescono ad ottenere oggetti assimilabili a quelli prodotti con la microfusione. Questo tipo di FA è adatta per la produzione di protesi biomediche in polvere di titanio.

- **Laser Deposition:** con questa tecnica si va a depositare della polvere attraverso ugelli e fusione tramite sorgente laser, teoricamente è possibile produrre componenti in multi-materiale ed è possibile realizzare la lega finale in macchina. Non si hanno limiti sulle dimensioni dato che la deposizione e fusione sono localizzate, ma si hanno limiti sulle geometrie realizzabili. Per evitare ossidazioni bisogna usare un gas di copertura e per poter assicurare la qualità metallurgica dello strato depositato è necessario un sofisticato controllo del processo. A processo ultimato il componente necessita di una finitura alle macchine utensili [3]. Uno schema di funzionamento si riporta nella figura seguente:

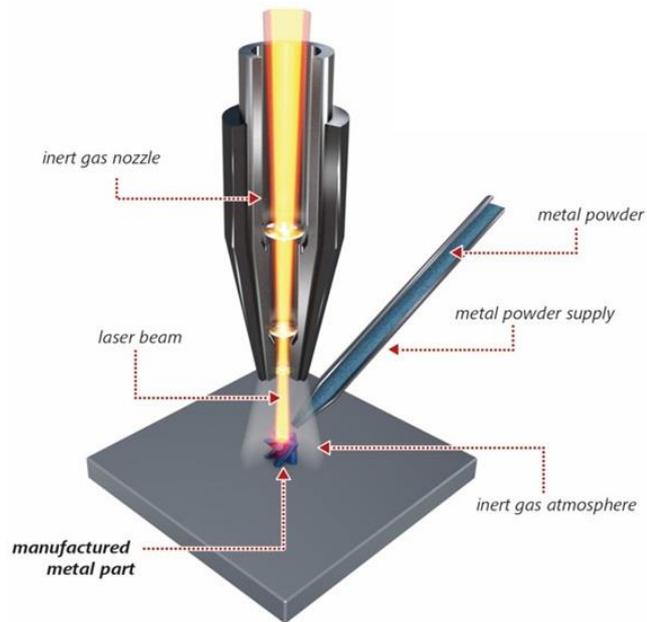


Figura 4: Schema funzionamento stampante con tecnologia laser deposition [7].

### 1.1.2 Fabbricazione additiva con materiale liquido

Anche in questo caso il mercato offre diverse scelte tra i quali:

- **Stereolitografia SLA (StereoLithography Apparatus):** è stata la prima tecnica di prototipazione rapida ad essere messa a punto, viene riportato di seguito uno schema riassuntivo del suo funzionamento:

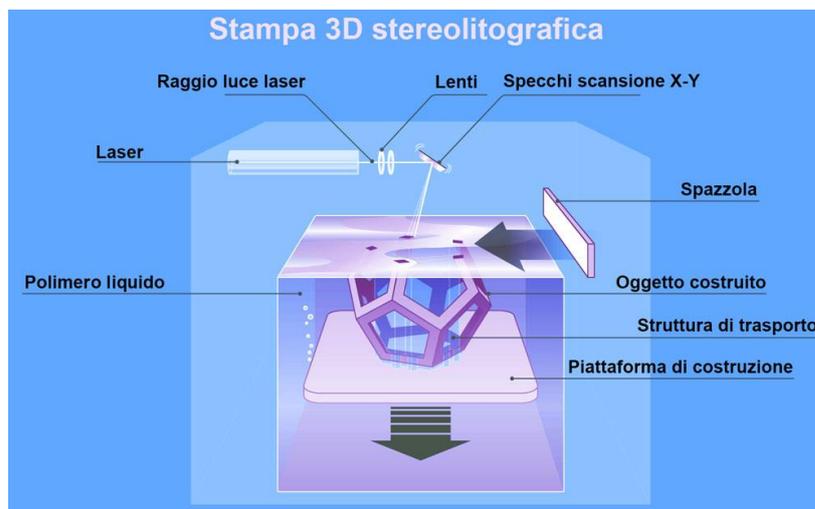


Figura 5: Schema funzionamento stampante con tecnologia SLA [8].

Come si può vedere in figura 5, viene utilizzato un laser per polimerizzare una resina polimerica sciolta e inserita in una vasca, realizzando uno strato

alla volta e permettendo così di costruire il componente. Una volta che lo strato viene indurito, una base lo fa scendere di un livello, per poter realizzare quello successivo. I supporti sono nello stesso materiale del pezzo e vanno rimossi meccanicamente.

- **Polyjet:** è un processo che consiste nella deposizione di uno strato liquido e la sua contemporanea solidificazione, come per il caso precedente a strato indurito il piano si abbassa della quantità desiderata per poter ripetere di nuovo il procedimento. Lo schema di funzionamento è di seguito riportato:

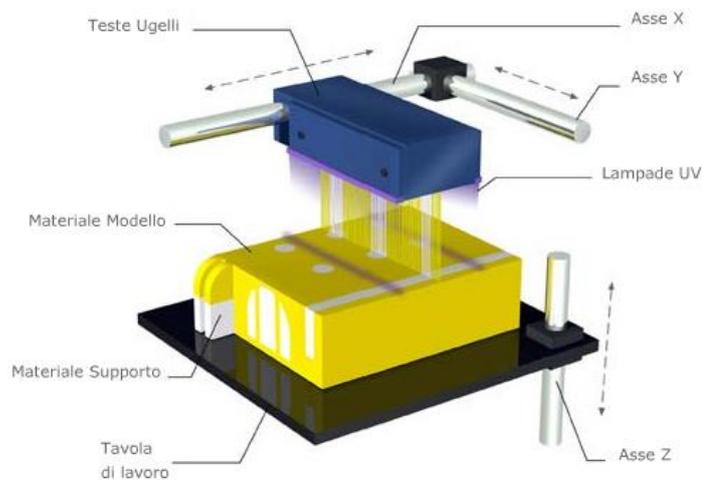


Figura 6: Schema funzionamento stampante con tecnologia Polyjet [9].

Vengono usati liquidi di fotopolimeri sensibili ai raggi ultra violetti (UV) e la solidificazione avviene grazie a due lampade UV collocate ai lati della testina. Quest'ultima ha il compito di depositare il materiale. In questo tipo di FA pezzo e supporto sono realizzati in differenti fotopolimeri, con quello di supporto solubile in soluzione acquosa.

- **Digital Light Processing (DLP):** è identico al caso precedente, con delle piccole differenze: l'origine dei raggi UV, che in questo caso sono emessi da un proiettore, e il fatto che il componente e il supporto sono dello stesso materiale, il che porta alla necessità di una rimozione meccanica. Lo schema di funzionamento è il seguente:

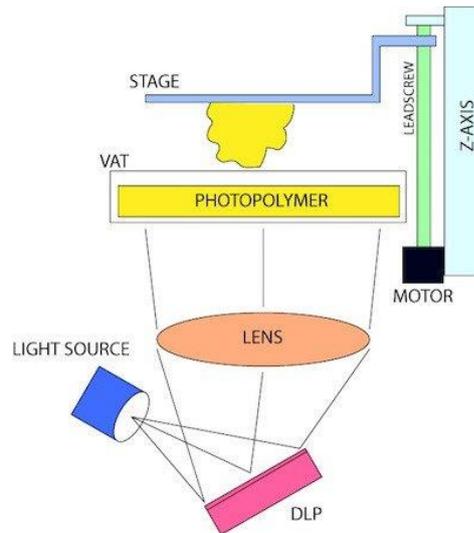


Figura 7: Schema funzionamento stampante con tecnologia DLP [10].

- **Drop on Demand (DOD):** anche questo meccanismo di FA si basa sulla polimerizzazione del liquido, che viene depositato sotto forma di microgocce che vengono polimerizzati tramite raggi UV. Viene riportato anche questa volta uno schema funzionale:

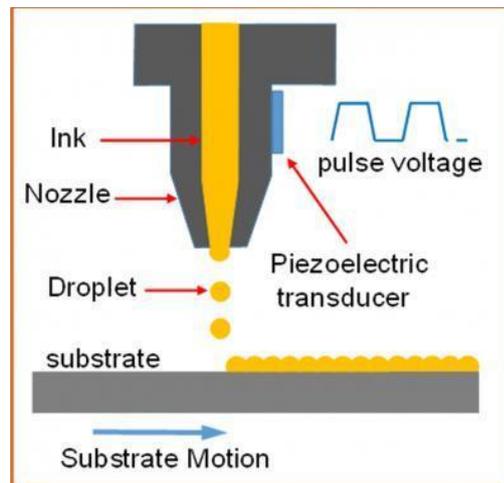


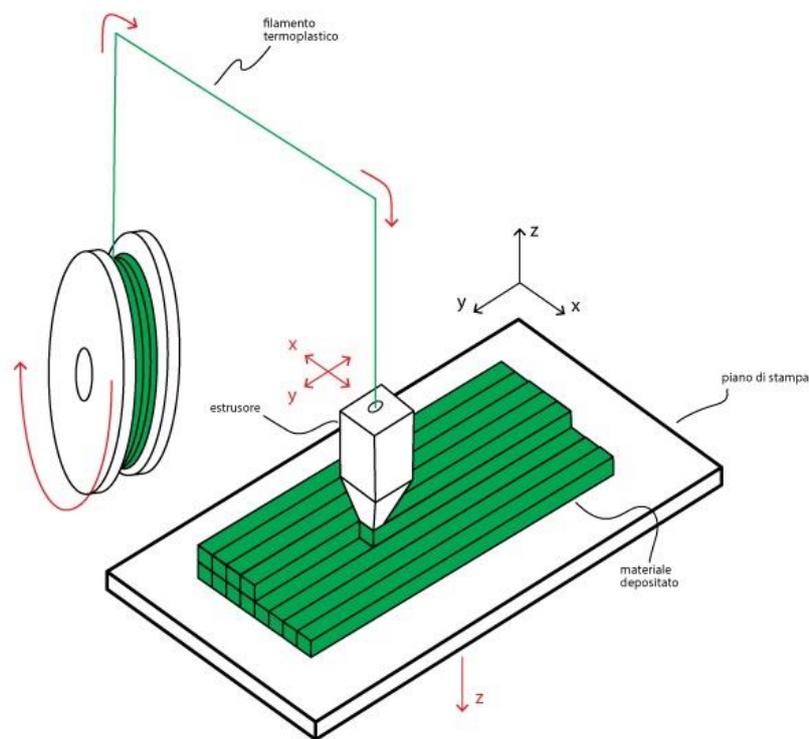
Figura 8: Schema funzionamento stampante con tecnologia DOD [11].

In questo caso la costruzione del componente e del supporto avviene mediante getti di due materiali diversi e a conclusione di ogni strato si ha una fase di fresatura dello stesso. Come per il Polyjet i supporti sono solubili in soluzione acquosa. [3].

### ***1.1.3 Fabbricazione additiva con materiale solido***

La FA con materiale solido è incentrata sulla tecnologia FDM, la stessa usata per la produzione dei provini oggetto di questa tesi, è basata sulla deposizione mediante estrusione e comunemente usata per modellazione, prototipazione e produzione. È una tecnologia sviluppata alla fine degli anni '80 da S. Scott Crump ed è stata poi messa sul mercato negli anni '90 dal marchio Stratasys, posseduto dallo stesso sviluppatore.

Nella figura seguente si riporta uno schema del funzionamento di una stampante che usa la tecnologia FDM:



*Figura 9 Schema funzionamento stampante con tecnologia FDM [12].*

Come si può vedere in figura 1 in una stampante in FDM un filamento di materiale di stampa termoplastico viene fuso attraverso un ugello di estrusione della stampante e depositato riga per riga fino alla conclusione dello strato, e successivamente ulteriore strato per strato fino alla completa fabbricazione del componente desiderato [13].

Le caratteristiche meccaniche dei materiali stampati in FDM sono fortemente condizionate da diverse variabili, come la temperatura dell'ugello e della piattaforma, la velocità e l'orientamento della stampa, l'altezza della deposizione dello strato, l'angolo di trama, il modello di riempimento e così via [14], [15].

I polimeri termoplastici, con buone proprietà di processo come bassa temperatura di fusione e buone fluidità, attualmente disponibili e utilizzati come materie prime per il processo FDM sono limitati come l'acido polilattico (PLA), acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS) e poliammide (PA) [2].

In quanto materiale verde biodegradabile, il PLA dall'inizio della sua commercializzazione nel 2002, ha ricevuto notevoli attenzioni nella ricerca sui biopolimeri grazie alla sua eccellente biocompatibilità e sostenibilità, il che ha portato i ricercatori a cercare di esplorare le sue potenziali applicazioni [13].

Rispetto ai materiali di ingegneria tradizionali, come metalli e compositi rinforzati con fibre, il PLA presenta proprietà meccaniche inferiori. Un modo per ovviare a questo problema è l'aggiunta di particelle funzionali nei filamenti polimerici [16].

La tecnologia FDM offre la possibilità di stampare con materiali diversi utilizzando più ugelli. Le limitazioni di questo processo includono: debole legame interfacciale [15], elevata porosità [17] e diversità dei materiali limitata.

## 2 Estensimetri

Nel presente capitolo si vuole analizzare il principio di funzionamento degli estensimetri, andando poi ad esaminare più in dettaglio quelli elettrici a resistenza oggetto di questo elaborato, evidenziando i vari fattori che maggiormente le influenzano.

### 2.1 Tipologie di estensimetri

Gli estensimetri (Straingauges) sono dei sensori utilizzati per la valutazione della deformazione media  $\varepsilon$  nell'intorno di un punto di un componente meccanico soggetto a forze esterne. Esistono numerose aree di ricerca e industriali in cui gli estensimetri vengono usate per misurare, direttamente e indirettamente, quantità fisiche come deformazione, pressione, coppia, accelerazione, spostamento e forza [18]. Le principali categorie di estensimetri sono i seguenti:

- *Estensimetri elettrici a resistenza:* gli stessi usati per le prove meccaniche oggetto di questo elaborato, si basano sulla variazione di resistenza in un conduttore sottoposto a deformazione. Possono essere realizzati con filo metallico o fotoincisi, sono anche i più comuni. Verranno poi approfonditi più avanti.
- *Estensimetri a semiconduttore:* costituiti di silicio drogato, sono consigliati per casi dove si hanno micro deformazioni, dato che hanno una sensibilità più elevata rispetto agli estensimetri metallici. Questa elevata sensibilità è dimostrata dall'alto valore del fattore di taratura ( $k \cong 200$ ) grazie all'effetto piezoresistivo [19]. Sono però più costosi, maggiormente sensibili alle variazioni di temperatura e più fragili degli estensimetri metallici [18].
- *Estensimetri capacitivi:* funzionano misurando la capacità tra due o più conduttori elettrici posizionati su un substrato adeguatamente isolato. Quindi al variare della distanza, varia la capacità e dunque la tensione ai lati del condensatore, rilevando così una misura. Gli estensimetri capacitivi godono di diversi vantaggi rispetto a quelli resistivi, come un fattore di taratura più elevato e quindi maggior sensibilità, miglior immunità al

rumore e capacità di funzionare bene ad alta temperatura [20]. Gli svantaggi sono un sistema di acquisizione dati più complesso e la non linearità.

- *Estensimetri piezoelettrici*: costituiti da materiali per lo più composti da ceramiche policristalline contenenti piccoli dipoli con momenti ordinati in maniera casuale, tramite un forte campo elettrico, in fase di costruzione, vengono orientati. In presenza di un campo elettrico o a seguito di una sollecitazione meccanica la struttura interna viene modificata, portando ad una deformazione fisica del materiale e causando uno squilibrio all'interno delle cariche, che porta alla formazione di un dipolo elettrico. Grazie a questa peculiarità è possibile ottenere una misurazione.
- *Estensimetri fotoelastici*: usati soprattutto nell'ambito di misurazioni a fatica perché offrono il vantaggio di poter visualizzare direttamente sul componente le tensioni a cui è sottoposto il componente in questione. Il loro funzionamento consiste nel sottoporre un materiale fotoelastico ad una luce polarizzata, che una volta deformato compaiono delle frange colorate.

Per ottenere misurazioni precise, la scelta della tipologia di estensimetro da utilizzare deve essere fatta considerando diversi fattori come la sensibilità desiderata, punto di applicazione, ambiente di lavoro e così di seguito.

Essendo oggetto di studio di questo elaborato, si procederà ad analizzare più in dettaglio gli estensimetri elettrici a resistenza.

## ***2.2 Funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza***

Questi estensimetri sono composti da una griglia di metallo laminato che viene incollato su materiale polimerico che funge da supporto. Una volta incollato l'estensimetro sulla superficie di una struttura sotto carico, le deformazioni di quest'ultima vengono trasmesse alla griglia dell'estensimetro, causando una variazione di resistenza elettrica proporzionale alla deformazione. Si riporta di seguito uno schema di un estensimetro elettrico:

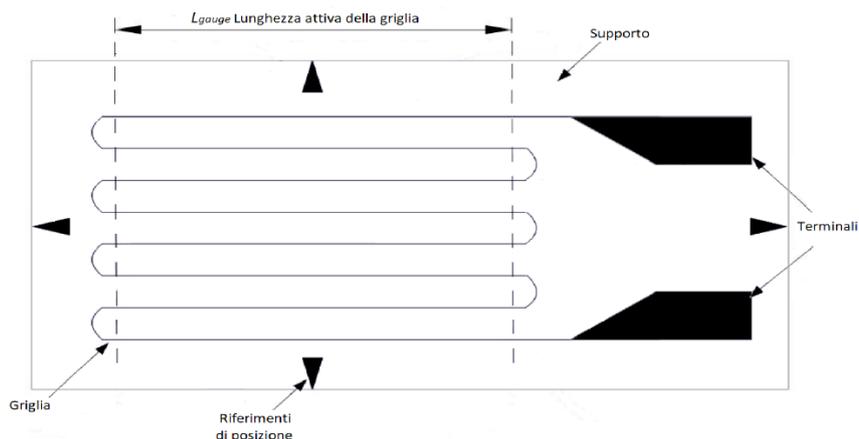


Figura 10: Schema di un estensimetro elettrico.

Sperimentalmente si può osservare che nel caso di un conduttore sottoposto a trazione, si ha che la resistenza elettrica cresce in modo proporzionale alla forza applicata. Bisogna sottolineare poi che in caso di una deformazione non elevata, si ha una relazione lineare e reversibile tra la variazione di resistenza e deformazione.

Si procede adesso a descrivere quanto detto in maniera teorica. Si inizia ricordando che la resistenza elettrica di un conduttore può essere scritta come:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

Dove  $\rho$  in  $[\Omega m]$  è la resistività del conduttore,  $L$   $[m]$  lunghezza del conduttore e  $A$   $[m^2]$  la sua sezione trasversale. Nel caso di un conduttore con sezione circolare si ha:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.2)$$

Con  $D$  diametro del conduttore. A questo punto differenziando e dividendo per  $R$  la (2.1) si ottiene:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.3)$$

Dove il secondo termine a destra dell'equazione può essere scritto come:

$$\frac{dL}{L} = \epsilon_l \quad (2.4)$$

Con  $\epsilon_l$  si indica la deformazione longitudinale. Per quanto riguarda il terzo termine a destra della (2.3), si va a considerare la (2.2), differenziando quest'ultima si ottiene:

$$dA = 2\pi D \frac{dD}{4}$$

Moltiplicando per D a destra si ha:

$$dA = 2\pi \frac{D^2}{4} \frac{dD}{D} = 2A \frac{dD}{D}$$

Che può essere scritta come:

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = 2\epsilon_t \quad (2.5)$$

Dove  $\epsilon_t$  è la deformazione trasversale. Ipotizzando un conduttore sottoposto ad uno stato di tensione monoassiale lungo la direzione longitudinale con un materiale isotropo, allora si ha la seguente relazione tra la deformazione trasversale  $\epsilon_t$  e quella longitudinale  $\epsilon_l$ :

$$\epsilon_t = -\nu\epsilon_l \quad (2.6)$$

Dove  $\nu$  è il coefficiente di Poisson del materiale. A questo punto sostituendo la (2.5) nella (2.6), poi quest'ultima insieme alla (2.4) nella (2.3) si ottiene:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\epsilon_l$$

Si può scrivere quindi che:

$$dR = \left[ \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\epsilon_l \right] R \quad (2.7)$$

Dalla (2.7) si osserva che la variazione di resistenza è legata a due fattori, la deformazione  $\epsilon_l$  e la variazione di resistività relativa  $d\rho/\rho$ . Considerando però che quest'ultima dipende anch'essa da  $\epsilon_l$ , si ha che la variazione di resistenza è legata in modo diretto alla deformazione longitudinale.

### ***2.3 Il fattore di taratura***

Il fattore di taratura (K) detto anche guadagno statico dell'estensimetro o Gauge factor in inglese, è il parametro principale per un estensimetro e indica la sua sensibilità. Tale fattore è definito come il rapporto tra la variazione di resistenza relativa  $dR/R$  e la deformazione longitudinale  $\epsilon_l$  per un estensimetro soggetto ad uno stato di tensione monoassiale:

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon_l} = \frac{d\rho/\rho + (1+2\nu)\epsilon_l}{\epsilon_l} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_l} + (1 + 2\nu) \quad (2.8)$$

Un valore tipico per estensimetri metallici è  $K \cong 2$ , che è una media determinata sperimentalmente dai produttori con un certo grado di confidenza, normalmente con tolleranze dell'1-2%.

### ***2.3.1 Influenza della temperatura sulla misurazione***

Il fattore di taratura K per un estensimetro viene determinato ad una data temperatura di riferimento, quindi un utilizzo a diverse temperature o una variazione di quest'ultima durante le misurazioni rispetto a quella di riferimento, vanno ad influenzare e comportano degli errori per quanto riguarda la relazione che lega la variazione di resistività relativa  $d\rho/\rho$  alla deformazione e conseguentemente al fattore di taratura nominale K. Gli effetti di temperatura vanno ad influenzare anche il valore della resistenza del conduttore con cui viene realizzata la griglia estensimetrica, un altro fattore da tenere in considerazione è la diversa dilatazione termica tra il materiale in analisi e il materiale dell'estensimetro, il che genera una deformazione apparente, in aggiunta a ciò un altro fattore che può influenzare la risposta in temperatura di un estensimetro è la variazione di resistenza elettrica dei cavi di collegamento.

In base alle considerazioni appena fatte, prima di effettuare delle misurazioni bisogna tenere conto sia del valore della temperatura che la variazione della stessa durante la misurazione. Invece ad elevati valori di temperatura ci sono altri fattori da considerare come quantità di tempo che può resistere l'incollaggi e quali sono i possibili effetti sulla bontà della misurazione, quando entrano in gioco i processi di conversione nella lega che forma la griglia di misurazione dell'estensimetro ed infine il comportamento dei cablaggi. Si possono limitare gli errori dovuti alla temperatura utilizzando estensimetri auto-compensanti e/o utilizzando sistemi opportuni di compensazione esterna [21].

Si procede adesso ad analizzare più indettaglio i vari fattori sopra citati in maniera teorica:

➤ ***Influenza della temperatura sul fattore di taratura K***

Il fattore di taratura K viene corretto con l'ausilio del coefficiente di temperatura  $\beta_K$  che consente il calcolo del fattore di taratura  $K_T$  alla temperatura T di esecuzione della prova. Con una variazione  $\Delta T$  rispetto a quella di riferimento si ha:

$$K_T = K(1 + \beta_K \Delta T) \quad (2.9)$$

➤ ***Variazione della resistenza relativa della griglia estensimetrica con la temperatura***

In questo caso la correzione viene fatta mediante il coefficiente di temperatura del materiale della griglia  $\beta$ :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = \beta \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

➤ ***Dilatazione termica differenziale tra estensimetro e materiale***

Come già spiegato in precedenza questo fenomeno produce una deformazione apparente, dato che una variazione di temperatura  $\Delta T$  provoca una deformazione  $\alpha_m \Delta T$  del materiale, mentre l'estensimetro a pari variazione di temperatura si dilaterrebbe di  $\alpha_e \Delta T$  se fosse libero di farlo, ma dato che è incollato alla struttura subisce la stessa dilatazione. Di conseguenza si ha una dilatazione termica differenziale tra estensimetro e materiale pari a:

$$\epsilon_\alpha = (\alpha_m - \alpha_e) \Delta T \quad (2.11)$$

Si va adesso a considerare l'espressione (2.8) con l'aggiunto delle tre correzioni sopra riportate e andando a ricavare la variazione della resistenza relativa  $\Delta R/R$ :

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \epsilon_l + K_T (\alpha_m - \alpha_e) \Delta T + \beta \Delta T \quad (2.12)$$

Da quest'ultima si va a ricavare la deformazione reale dovuto solo ai carichi applicati:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta R/R}{K_T} - \frac{[K_T(\alpha_m - \alpha_e) + \beta] \Delta T}{K_T} \quad (2.13)$$

A questo punto si procede a moltiplicare e dividere il secondo membro dell'espressione sopra riportata per  $K$ , in più all'interno della parentesi si somma e si sottrae la quantità  $K(\alpha_m - \alpha_e)$  ottenendo così:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta R/R}{K} \frac{K}{K_T} - \frac{[K_T(\alpha_m - \alpha_e) + \beta]\Delta T}{K} \frac{K}{K_T} - \frac{(K - K_T)(\alpha_m - \alpha_e)\Delta T}{K} \frac{K}{K_T} \quad (2.14)$$

Dove l'ultimo termine a secondo membro è trascurabile rispetto agli altri due, si ha quindi che l'espressione della deformazione può essere scritta come segue:

$$\epsilon_l = \epsilon^* \frac{K}{K_T} - \epsilon_{\Delta T} \frac{K}{K_T} = (\epsilon^* - \epsilon_{\Delta T}) \frac{K}{K_T} \quad (2.15)$$

Con

$$\epsilon^* = \frac{\Delta R/R}{K}$$

$$\epsilon_{\Delta T} = \frac{[K_T(\alpha_m - \alpha_e) + \beta]\Delta T}{K}$$

Dove  $\epsilon^*$  è la deformazione misurata senza tenere conto dell'effetto della temperatura,  $\epsilon_{\Delta T}$  è la deformazione indotta dalla variazione di temperatura  $\Delta T$ , mentre  $\epsilon_l$  è la deformazione reale in direzione longitudinale.

Per evitare errori derivanti da effetti termici è buona norma impiegare una griglia di materiale poco sensibile alla temperatura con  $\beta$  e  $\beta_K$  molto bassi e aventi coefficiente di dilatazione con un valore il più vicino possibile a quello del pezzo considerato. Un altro modo per aggirare il problema della temperatura elevata è l'utilizzo di un estensimetro compensatore che viene collegato con quello di misura a mezzo ponte. In commercio sono disponibili attualmente degli estensimetri autocompensanti che garantiscono degli errori dovuti alla variazione di temperatura  $\Delta T$  inferiori all'1-2% [21].

### ***2.3.2 Influenza della sensibilità trasversale***

Negli estensimetri a filo la sensibilità trasversale è dovuta essenzialmente alla geometria della griglia [22], fino ad ora si è considerato uno stato di tensione piano e monoassiale, ma in genere si ha a che fare con uno stato di tensione piano ma biassiale. Tutto ciò è dovuto al fatto che nella zona dove l'estensimetro ha i raccordi è presente sia una deformazione longitudinale che trasversale, quindi la variazione

di resistenza è somma di due contributi. Si presenta dunque il problema di stimare l'errore quando si considera il fattore di taratura  $K$  per determinare uno stato di tensione monoassiale.

Tenendo presente uno stato di tensione biassiale e definendo come deformazione longitudinale  $\epsilon_l$  e deformazione trasversale  $\epsilon_t$  si ha la seguente relazione che lega la variazione di resistenza relativa  $\Delta R/R$  alla deformazione:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_l \epsilon_l + K_t \epsilon_t \quad (2.16)$$

Con

$$K_l = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_l}$$

$$K_t = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_t}$$

Dove  $K_l$  è il fattore di taratura longitudinale con la deformazione trasversale  $\epsilon_t$  che viene considerata nulla, mentre  $K_t$  è il fattore di taratura trasversale dove  $\epsilon_l$  è nulla.

Si vuole a questo punto determinare la sensibilità trasversale che viene indicata con  $S_t$  ed è data dal rapporto tra i due fattori di taratura trasversale e longitudinale:

$$S_t = \frac{K_t}{K_l} \quad (2.17)$$

Sostituendo poi quest'ultima nella (2.16) si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_l \epsilon_l \left( 1 + S_t \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \right) = K_l \epsilon_l (1 - \nu S_t) \quad (2.18)$$

Dove  $\nu = -(\epsilon_t/\epsilon_l)$  ed è il coefficiente di Poisson del materiale con il quale viene realizzato l'estensimetro. Procedendo adesso a dividere quest'ultima espressione per la deformazione longitudinale si ottiene il fattore di taratura che tiene conto della sensibilità trasversale dell'estensimetro:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_l} = K_l (1 - \nu S_t) \quad (2.19)$$

Generalmente gli errori dovuti alla sensibilità trasversale hanno un valore basso, che è pienamente accettabile in una prova sperimentale.

## 2.4 Forma e caratteristiche degli estensimetri elettrici a resistenza

### 2.4.1 Forma, geometria e dimensione degli estensimetri

A seconda del tipo di sollecitazione a cui è sottoposta la struttura in esame e in base al punto di applicazione, sono disponibili estensimetri con diverse forme e dimensioni, nella figura seguenti [21] sono riportati alcuni:

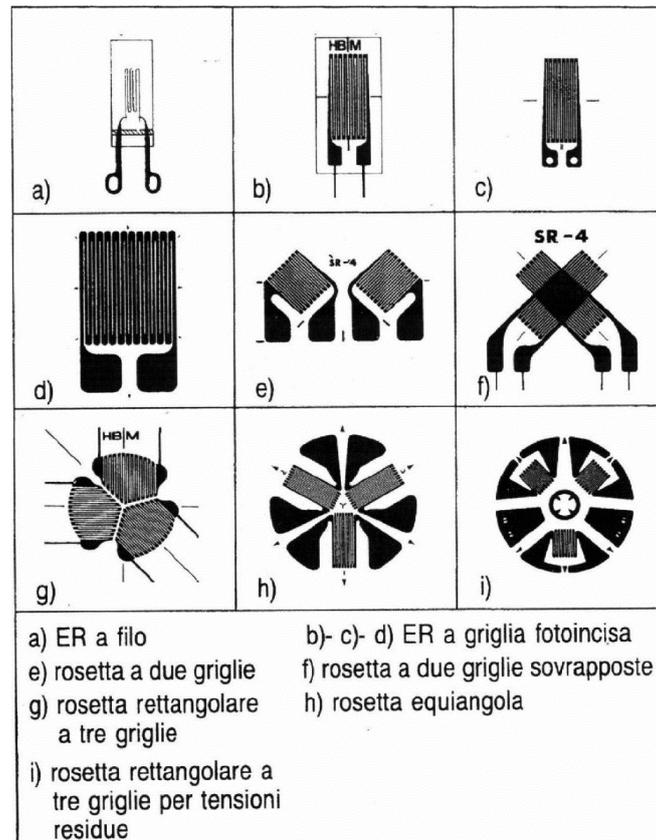


Figura 11: Tipologie di estensimetri.

Questo numero elevato di tipologie di estensimetri, sono pensati per far fronte alle diverse esigenze applicative. Ad esempio il tipo di campo di deformazione ha una influenza decisiva sulla scelta del tipo di estensimetro. In caso di un campo di deformazione omogeneo, ossia quando si ha un oggetto sufficientemente grande rispetto all'estensimetro, si possono usare estensimetri con lunghezza di griglia di 3-6 mm [21]. In caso invece di un campo di deformazione non omogeneo, che può essere causato dal tipo di materiale che si vuole analizzare, si possono utilizzare

estensimetri con una lunghezza elevata, così da poter ottenere una media delle condizioni di deformazione lungo l'estensimetro. Se si ha a che fare invece con condizioni di deformazione dinamica, la scelta della lunghezza della griglia dipende se le deformazioni sono impulsive o ad alta frequenza.

In commercio esistono anche estensimetri multipli e catene di estensimetri, di seguito si sono riportati alcune tipologie di questi:

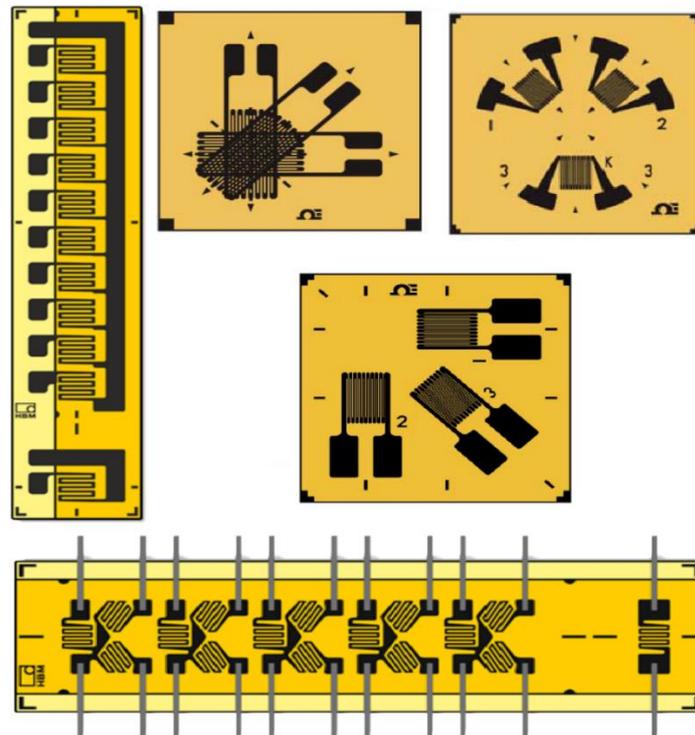


Figura 12: Estensimetri multipli ed a catene.

Questi tipi di estensimetri offrono diversi vantaggi nei casi in cui si ha la necessità di avere più estensimetri disposti in base a determinati criteri, come un metodo di incollaggio veloce inoltre viene assicurata un'accuratezza alta tra l'orientamento e la distanza fra gli estensimetri.

#### ***2.4.2 Materiali e valori tipici delle resistenze degli estensimetri***

Le caratteristiche di funzionamento di un estensimetro dipendono principalmente dalla lega usata per la griglia. Alcune delle leghe maggiormente utilizzate sono:

- *Lega costantana*: è la più anziana, ma ancora oggi quella più utilizzata grazie alla sua buona sensibilità alla deformazione. Inoltre ha una sensibilità sufficientemente alta da poter ottenere comunque valori di resistenza grandi anche con griglie molto piccole, in più possiede un coefficiente di temperatura non eccessivo. Un'altra caratteristica della costantana è buona vita a fatica, in aggiunta possiede anche una buona capacità di allungamento. Bisogna però sottolineare che la costantana per temperature superiori a 65°C evidenzia una deriva continua. Un pregio della costantana è la possibilità di poter essere trattata per l'autocompensazione termica. Nel caso in cui si vogliono misurare deformazioni uguali o superiori al 5%, la costantana più utilizzata è quella trattata che può raggiungere allungamenti del 20% o più per lunghezze di griglia uguali o superiori a 3 mm. In caso però di cicli con grandi deformazioni si ha una variazione della resistenza ad ogni ciclo, il che comporta uno zero non stabile. Un altro problema della costantana trattata si ha per la tendenza di rompersi in presenza di deformazioni ripetute, il che la rende non adatta per l'impiego in caso di deformazioni cicliche [23].
- *Lega isoelastica*: viene usata per misure esclusivamente dinamiche dato che ha una vita a fatica superiore a quella della lega in costantana, inoltre ha un fattore di taratura migliore che porta ad avere un rapporto segnale-rumore migliore. Le problematiche che presenta questa lega sono: deriva dello zero, una risposta non lineare alla deformazione e in più non permette l'autocompensazione termica.
- *Lega Karma*: gode di una buona vita a fatica con un'eccellente stabilità. In più è ottima per misurazioni di deformazioni statiche per periodi di tempo lunghi con un range di temperature da -260°C a 260°C. Può anche essere utilizzata per temperature fino a 400°C se viene incapsulata. La lega di karma offre anche una curva termica più piatta, consentendo così delle correzioni di uscita termica più precise. Inoltre offre la possibilità di essere trattato per l'autocompensazione termica.

Nella tabella seguente si riportano la composizione e il fattore di taratura delle leghe sopra citate:

Lega	Composizione	Fattore di taratura
Costantana	45% Ni, 55% Cu	2.0
Isoelastica	36% Ni, 8% Cr, 0,5% Mo, 55,5% Fe	3.5
Karma	74% Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe	2.4

*Tabella 1: Le principali leghe usate per le griglie degli estensimetri.*

L'estensimetro oltre alla griglia è composto anche da un supporto che ha il compito di svolgere diverse funzioni come proteggere e isolare la griglia elettricamente, trasmettere le deformazioni dal provino alla griglia ed in più fornisce anche una superficie per incollare l'estensimetro al provino. Per la scelta del supporto bisogna valutare soprattutto le condizioni ambientali nei quali va ad operare l'estensimetro. Di norma il supporto è realizzato in resina che può essere: poliammidica, epossidica con fibre di vetro, fenolica con fibre di vetro ecc, con un range di temperatura di utilizzo variabile che va per alcuni da un minimo di -270°C ad un massimo di 330°C. Ci sono anche altri materiali con cui viene prodotto il supporto come quelli ceramici che permettono temperature massime di 750°C. Per certe applicazioni si possono anche utilizzare materiali metallici per realizzare i supporti.

Per quanto riguarda le resistenze degli estensimetri, in commercio sono disponibili in versioni da 120, 350, 700 e 1000 Ohm. Per la maggior parte delle applicazioni il valore predominante è 120 Ω. Quelli a 350 Ω sono più costosi e vengono usati nei casi in cui si vuole diminuire la generazione di calore, ridurre l'effetto dei cavi e affinare il rapporto segnale-rumore.

Il valore ottimale della resistenza non si può scegliere a priori, ma si possono valutare alcuni fattori per la scelta come il carico elettrico consentito dall'estensimetro, la compatibilità dell'apparecchio di misurazione da collegare inoltre bisogna valutare anche l'influenza che ha il cablaggio tra estensimetro e apparecchio di misurazione.

### ***2.4.3 Modalità di incollaggio degli estensimetri***

Per ottenere una misurazione di buona qualità, l'incollaggio di un estensimetro è una variabile di considerevole importanza. Dovendo quest'ultimo e il provino subire la stessa deformazione, un incollaggio non ottimale porterebbe ad ottenere

delle misurazioni erronee. Un aspetto importante nella procedura di incollaggio è la quantità di colla utilizzata, in quanto una poca quantità porterebbe ad avere un'adesione non ottimale tra provino e estensimetro, ma neanche una quantità abbondante è l'ideale perché produrrebbe uno strato elastico che porta l'estensimetro a deformarsi in modo diverso rispetto al provino, finendo così per variare apparentemente il fattore di taratura K. Un altro problema dovuto all'eccessiva quantità di colla è quello di creare difficoltà nel dissipare calore da parte della griglia.

Una procedura di applicazione di un estensimetro ormai ben sperimentata che comprende anche le diverse fasi di preparazione della superficie è la seguente:

- *Preparazione della superficie:* questa procedura comprende diverse fasi, si inizia con lo sgrassaggio rimuovendo olii, grassi, contaminanti chimici e residui chimici solubili [21]. Si procede poi con il carteggio per togliere eventuali ruggine, vernici, ossidi, ecc, quest'operazione può essere fatta in diversi modi in base alle condizioni superficiali in cui ci si imbatte. Prima della pulizia finale si ha la fase di tracciatura per poter orientare l'estensimetro, per fare ciò si devono tracciare due linee incrociate e perpendicolari nel punto dove si desidera effettuare la misurazione, con una delle due linee orientata lungo la direzione della misura. Per la tracciatura si devono usare strumenti che non scalfiscono la superficie. Si giunge a questo punto alla pulizia finale, dove viene applicato il condizionatore ripetutamente strofinando con diverse garze finché uno di queste non risulti del tutto pulito. Infine si ha la fase di neutralizzazione che consiste nel riportare l'alcalinità superficiale tra i PH 7 e 7,5, valori ottimali per i diversi collanti e gli estensimetri. La neutralizzazione viene effettuata usando un'abbondante quantità di neutralizzatore su l'intera superficie trattata in precedenza. Si asciuga poi il tutto la superficie in maniera ripetuta con delle garze.
- *Incollaggio:* una volta scelta la colla adatta, si procede a incollare l'estensimetro su una striscia di nastro adesivo trasparente, posizionando poi il tutto sul provino in maniera che le linee di riferimento presenti sull'estensimetro e quelli tracciati sul provino siano allineati. Per applicare

la colla si solleva il nastro adesivo con l'estensimetro da un lato e si applica la colla per poi riposizionare subito il nastro adesivo sul provino applicando una pressione per qualche minuto per avere un buon incollaggio. Infine bisogna rimuovere il nastro adesivo sollevandolo e trascinandolo parallelamente al provino, facendo attenzione a non staccare l'estensimetro.

- *Cablaggio*: in questa fase vengono saldati i fili ai terminali dell'estensimetro e poi si collegano al circuito di condizionamento. Come ultimo passaggio si applica una protezione idonea per proteggere l'estensimetro.

La procedura appena descritta per l'applicazione degli estensimetri è una semplice guida, a seconda del tipo di estensimetro viene prevista da ogni produttore una determinata procedura di applicazione.

## 2.5 Ponte di Wheatstone

Il circuito riportato in figura 9 e detto ponte di Wheatstone, viene utilizzato per amplificare le piccole variazioni di resistenza dovute alla deformazione dell'estensimetro rendendoli così leggibili.

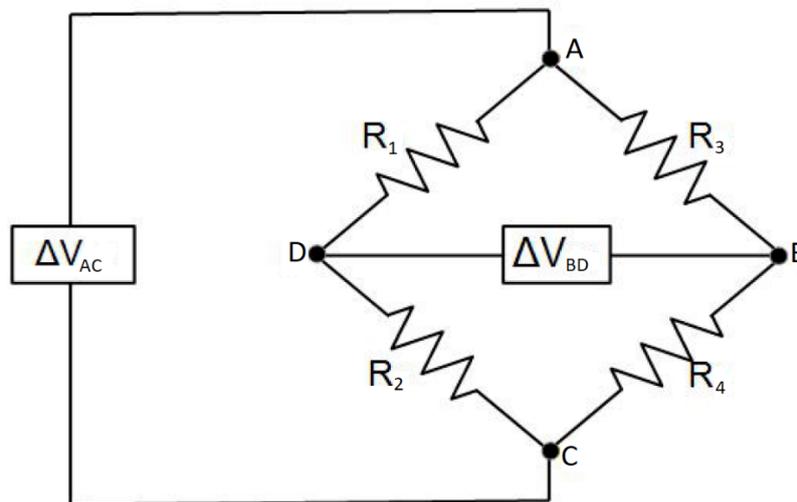


Figura 13: Ponte di Wheatstone.

Il ponte è alimentato con una tensione  $\Delta V_{AC}$  costante agente sulla diagonale AC. Si ha poi l'altra diagonale CD che è quella di misura, nel quale si va a rilevare lo sbilanciamento del circuito ricavando la tensione  $\Delta V_{BD}$  come segue:

$$\Delta V_{BD} = \Delta V_{AC} \left( \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \right) \quad (2.20)$$

Per avere equilibrio la tensione  $\Delta V_{BD}$  deve essere nulla:

$$\Delta V_{BD} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} = 0 \quad \rightarrow \quad R_3 R_2 = R_4 R_1$$

Si ha quindi:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} = Q \quad (2.21)$$

Che non è altro che un rapporto di resistenze sui due rami che fissa anche la condizione di equilibrio. Come si può notare tale condizione non può essere disturbata da possibili instabilità nell'alimentazione e questo è uno dei vantaggi nell'utilizzare il ponte di Wheatstone.

Si vuole adesso definire quando si ha la massima sensibilità del ponte, per fare ciò si parte dall'equazione (2.20) dove si va a sostituire ad ogni  $R_i$ :

$$R_i = R_{i,0} + \Delta R_i \quad (2.22)$$

Si arriva così a ottenere:

$$\Delta V_{BD} = \Delta V_{AC} \left( \frac{R_{2,0} + \Delta R_2}{R_{1,0} + \Delta R_1 + R_{2,0} + \Delta R_2} - \frac{R_{4,0} + \Delta R_4}{R_{3,0} + \Delta R_3 + R_{4,0} + \Delta R_4} \right) \quad (2.23)$$

Moltiplicando e dividendo il primo termine tra parentesi per  $(R_{2,0} - \Delta R_2 + R_{1,0} - \Delta R_1)$  e il secondo per  $(R_{4,0} - \Delta R_4 + R_{3,0} - \Delta R_3)$ , dopo alcuni passaggi e trascurando i termini di ordine inferiore si ricava:

$$\Delta V_{BD} = \Delta V_{AC} \left[ \frac{R_{2,0}}{R_{2,0} + R_{1,0}} - \frac{R_{2,0} R_{1,0}}{(R_{2,0} + R_{1,0})^2} \left( \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - \frac{R_{4,0}}{R_{3,0} + R_{4,0}} + \frac{R_{3,0} R_{4,0}}{(R_{3,0} + R_{4,0})^2} \left( \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \right] \quad (2.24)$$

In caso di equilibrio considerando la (2.21) si ottiene:

$$\Delta V_{BD} = \Delta V_{AC} \frac{Q}{(Q+1)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} + \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \quad (2.25)$$

Per ottenere il massimo sbilanciamento di tensione  $\Delta V_{BD}$  e quindi la massima sensibilità bisogna avere  $Q = 1$ . Poi dalla formulazione (2.8) del fattore di taratura si ricava:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon$$

Considerando quest'ultima espressione e  $Q = 1$  la (2.25) diventa:

$$\Delta V_{BD} = \frac{\Delta V_{AC}}{4} K(\epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_2 - \epsilon_1) = \frac{\Delta V_{AC}}{4} K\epsilon_T \quad (2.26)$$

Con

$$\epsilon_T = \epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad (2.27)$$

Questo dimostra che lo sbilanciamento di tensione  $\Delta V_{BD}$  del ponte di Wheatstone a parità di  $\Delta V_{AC}$  e  $K$  è proporzionale alle deformazioni delle resistenze. Ancora più interessante da notare è il fatto che le deformazioni relative ad estensimetri collocati su lati vicini si sottraggono, al contrario quelli opposti si sommano. Questa proprietà permette varie combinazioni con cui si possono sia incrementare il segnale di misurazione sia compensare eventuali deformazioni spurie.

### 2.5.1 Tipologie di collegamenti

In base alle necessità i quattro lati del ponte possono essere occupati da estensimetri o resistenze di completamento. Si hanno le seguenti modalità di collegamento:

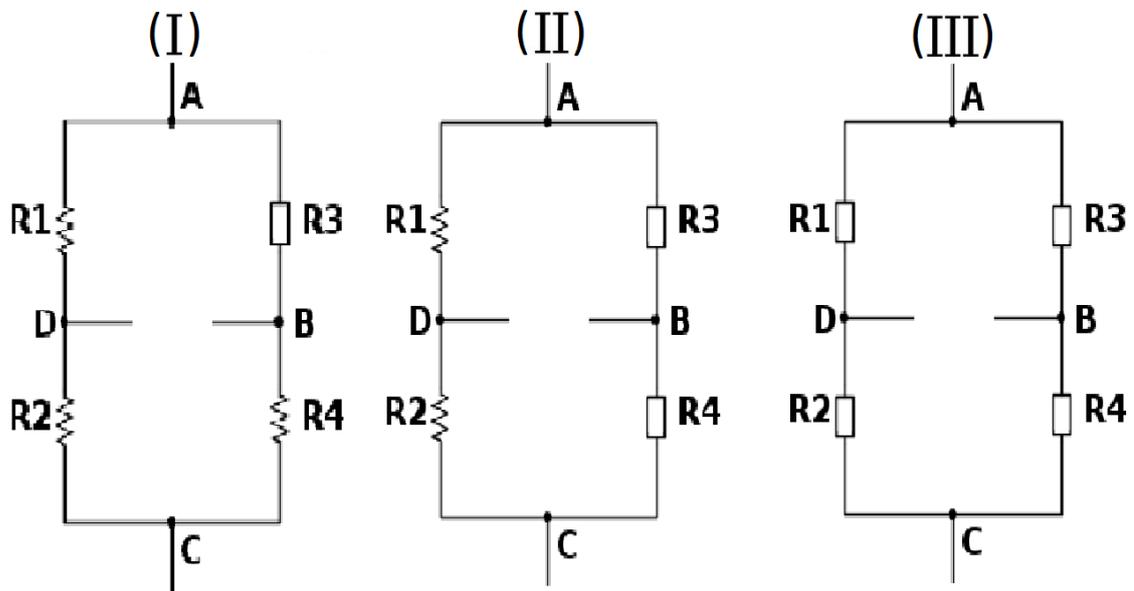


Figura 14: Ponte di Whratstone con collegamenti I) a quarto di ponte, II) a mezzo ponte, III) a ponte intero.

- *Collegamento a quarto di ponte:* come si vede nello schema di figura 10, in un lato si collega un estensimetro che avrà quindi una resistenza variabile, mentre gli altri lati sono occupati da resistenze con valore costante. In questo tipo di collegamento si ha che la deformazione totale è data da:

$$\epsilon_T = \epsilon_3 \quad (2.28)$$

Questo tipo di collegamento è adatto solo quando gli estensimetri sono autocompensati, così da evitare la contaminazione da deformazioni causati dalla temperatura. A livello di impiego è consigliato in caso di prove dinamiche e quelli ad alta e bassa temperatura.

- *Collegamento a mezzo ponte:* in questo caso si collegano due estensimetri come mostrato in figura 10. La deformazione totale questa volta è data da:

$$\epsilon_T = \epsilon_3 - \epsilon_4 \quad (2.29)$$

Nella configurazione di figura 14 il secondo estensimetro si usa per compensare la deformazione termica apparente, ma come già spiegato in precedenza si può sfruttare il collegamento a mezzo ponte anche per rafforzare il segnale mettendo il secondo estensimetro al posto della resistenza  $R_2$ .

- *Collegamento a ponte intero:* questa volta si mettono estensimetri in tutti i quattro i lati. La deformazione totale in questo caso sarà data da:

$$\epsilon_T = \epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad (2.30)$$

Con tale configurazione si ha sia la compensazione termica che l'amplificazione del segnale.

Nell'analisi dei tre tipi di collegamenti sopra citati non si è tenuto conto degli errori dovuti alla resistenza dei cavi che vengono usati per collegare estensimetri e centralina, questi cavi sono suscettibili a mutamenti termici che potrebbero provocare delle variazioni di resistenza fonte di deformazioni apparenti. Si possono eliminare questi disturbi con l'utilizzo di schemi di collegamento adatti come viene mostrato nella figura seguente:

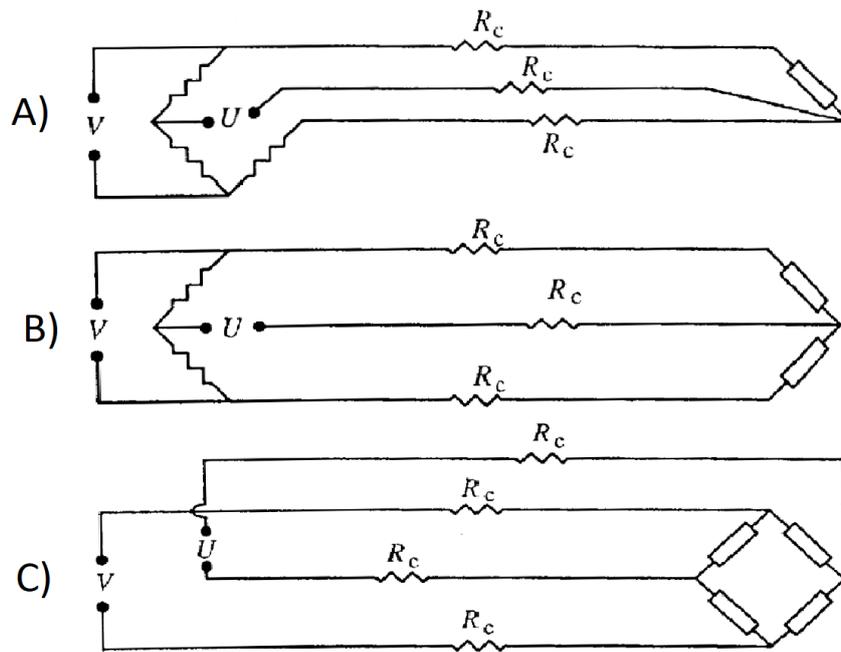


Figura 15: Tipologie di collegamento: A) quarto di ponte a tre fili, B) mezzo ponte a tre fili, C) ponte intero a quattro fili [21].

Come si vede in figura per i due casi a quarto e a mezzo ponte si utilizza un collegamento detto a tre fili, eliminando così i disturbi dovuti alle deformazioni apparente in quanto sui due lati adiacenti ciascuno dei due cavi viene collegato in serie. Mentre il terzo cavo viene sfruttato per leggere lo squilibrio del ponte e dato che in esso non circola corrente non introduce errori.

Per la configurazione a ponte intero viene consigliato l'uso di un collegamento detto a quattro fili come mostrato in figura 15, anche se questa oltre ad eliminare i disturbi dovuti alla presenza delle deformazioni apparenti indotti dei cavi va anche ad attenuare il segnale di misurazione, perciò viene raccomandato l'utilizzo di cavi i più corti possibile.

### ***3 Effetto di rinforzo***

Dato che lo scopo del seguente elaborato è quello di una calibrazione degli estensimetri a causa dell'effetto di rinforzo che questi esercitano sui campioni sui quali vengono applicati, in questo capitolo si vuole quindi dare una panoramica sull'effetto di rinforzo dovuto al loro utilizzo. Si andrà poi a spiegare in che modo viene determinato il coefficiente correttivo per determinare l'entità dell'effetto di rinforzo.

#### ***3.1 Nature dell'effetto di rinforzo***

L'effetto di rinforzo è stato studiato dallo sviluppo iniziale della tecnica dell'estensimetro su sottili campioni metallici [24] o su campioni di plastica in tensione [25], [26]. Uno dei primi che ha studiato questo effetto è stato Stehlin [25], che ha modellato le distorsioni di sollecitazione e deformazione nel campione con estensimetro e adesivo. Di seguito Beatty e Chewning [26] hanno condotto analisi numeriche per determinare l'influenza di parametri geometrici dell'estensimetro come spessore e lunghezza. Basandosi sulle deduzioni di Beatty e Chewning, Ajovalist et al. [27] hanno fornito una migliore espressione matematica per la correzione del fattore di taratura, rispetto a quella ottenuta con metodi convenzionali. I vari studi sopra citati, si sono concentrati sulla stima dell'effetto di rinforzo locale. Swan [28] invece ha dedotto un'espressione approssimativa per prevedere l'effetto di rinforzo globale.

Generalmente gli estensimetri sono calibrati per campioni in acciaio con una sezione rilevante, in questo caso l'effetto di rinforzo dell'estensimetro sul campo di deformazione è trascurabile, poiché il modulo medio di Young dell'estensimetro  $E_{sg}$  e il suo spessore  $t_{sg}$  sono rispettivamente  $7000 \leq E_{sg} \leq 20000 \text{ MPa}$  e  $0.025 \leq t_{sg} \leq 0.075 \text{ mm}$ , quest'ultimo molto inferiori rispetto al campione considerato [29], [27]. L'effetto di rinforzo è molto significativo quando si va a considerare un estensimetro installato su materiali con basso modulo e/o su campioni con una sezione trasversale molto piccola.

Ci sono diversi parametri che vanno ad influenzare l'effetto di rinforzo in maniera più o meno importanti, come:

- Il modulo elastico del campione e dell'estensimetro
- Geometria dell'estensimetro
- Geometria del campione

Quando si andrà a modellizzare l'effetto di rinforzo, tutti questi fattori verranno analizzati dettagliatamente, sia sotto forma di grafici che tramite delle immagini che mostreranno l'influenza di tali parametri. Tali fattori vanno a determinare se l'effetto di rinforzo è globale o locale. Ciò dipende prevalentemente dallo spessore del campione che si sta considerando.

Un effetto di rinforzo globale causato dall'estensimetro, significa che il campo di deformazione dell'intera sezione dell'elemento considerato viene alterato da tale fenomeno. Di norma la natura dell'effetto è subordinata allo spessore del campione, se quest'ultimo è sottile allora si avrà a che fare con un effetto di rinforzo globale, altrimenti questo fenomeno sarà localizzato alla zona intorno all'estensimetro. In generale sia per quanto riguarda l'effetto di rinforzo globale che locale gli spessori limiti o critici che segnano il passaggio da un caso all'altro dipendono dal modulo elastico del campione.

### ***3.2 Effetto di rinforzo globale e locale***

Come già anticipato, in letteratura esistono due tipi di effetto di rinforzo che possono essere divisi come segue:

- a) *Effetto di rinforzo globale*: si verifica quando la sezione del campione è sottile e il contributo dell'estensimetro a supportare i carichi non è trascurabile, ovvero l'estensimetro influenza il campo di deformazione dell'intera sezione del campione. Per quanto riguarda una formulazione analitica dell'effetto di rinforzo globale si ha quella proposta da Swan [28] per la determinazione di un coefficiente correttivo, dove si va a considerare un estensimetro installato su un campione di prova isotropico semi-infinito avente la stessa larghezza dell'estensimetro e sottoposto ad una tensione uniassiale, con tali ipotesi si ottiene:

$$C_{swan} = 1 + \frac{2E_{sg}t_{sg}}{E_{spec}t_{spec}} \quad (3.1)$$

Con  $E_{sg}$  e  $t_{sg}$  che sono rispettivamente modulo elastico e spessore dell'estensimetro. Dove  $E_{sg}$  è tratto secondo la teoria di Ajovalist et al [30], spalmando la rigidezza e considerandola costante lungo l'estensimetro.

b) Effetto di rinforzo locale: si verifica quando l'estensimetro è installato su un campione con grande spessore in caso di materiale con basso modulo, ma al crescere del modulo lo spessore può essere ridotta; in questo caso il campo di deformazione viene modificato solo vicino alla zona in cui è installato l'estensimetro. Anche in questo caso per una formulazione analitica dell'effetto di rinforzo locale, si ha dallo studio dell'effetto di rinforzo locale di Ajovalasit e Zuccarello [27], considerando sempre le stesse ipotesi precedentemente citati per l'effetto globale, si ottiene la seguente formulazione:

$$C_{Ajovalasit} = \frac{\epsilon_{ave}}{\epsilon_{sg}} = 1 + \frac{E_{sg}^*}{E_{spec}} \quad (3.2)$$

Con  $E_{sg}^*$  modulo ridotto di Young dell'estensimetro e fornisce la sensibilità dell'estensimetro all'effetto di rinforzo, tenendo conto dei vari fattori che lo influenzano, come spessore e lunghezza complessiva dell'estensimetro oltre alla sola lunghezza della griglia metallica ( $L_{gauge}$ ). Inoltre si tiene conto anche di come il carico viene trasmesso dal campione all'estensimetro, considerando la teoria della giunzione di due materiali [31] che dimostra che la trasmissione del carico tra due materiali uniti si verifica attraverso le sollecitazioni di taglio all'interfaccia, che sono fortemente localizzati vicino alle due estremità dell'interfaccia e sono stati approssimati con una funzione esponenziale. In tale modello si è trascurato l'effetto dello strato adesivo, secondo i risultati di Beatty e Chewning [32].

### **3.3 Coefficiente correttivo**

L'accuratezza delle misurazioni fatte dall'estensimetro dipende dalla quantità dell'effetto di rinforzo, che come già anticipato dipende da diversi fattori che lo vanno ad influenzare. Per poter determinare l'entità di tale effetto si ha quindi la necessità di determinare un coefficiente correttivo, che si può considerare come segue:

$$C = \frac{E_{sg}}{E_{rif}} \quad (3.3)$$

Dove  $E_{sg}$  è il modulo di Young ottenuto considerando le deformazioni misurate dall'estensimetro, mentre  $E_{rif}$  il modulo effettivo del campione di riferimento. Considerando la legge di Hooke nel caso monodimensionale si ha che:

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.4)$$

Dove  $\sigma$  è la tensione applicata e  $\epsilon$  è la deformazione. Quindi il coefficiente correttivo può essere ricavato anche come segue:

$$C = \frac{\sigma/\epsilon_{sg}}{\sigma/\epsilon_{rif}} = \frac{\epsilon_{rif}}{\epsilon_{sg}} \quad (3.5)$$

Dove  $\epsilon_{sg}$  è la deformazione misurata dall'estensimetro e la deformazione effettiva subita dal campione di riferimento.

## ***4 Prova di trazione***

Dato che il presente elaborato si propone di determinare un coefficiente correttivo per la calibrazione degli estensimetri, con validazione tramite delle prove di trazione per una determinata condizione applicativa, si vuole procedere adesso a dare una panoramica sulla procedura che viene adottata nell'esecuzione di tale prova, andando a specificare la geometria dei provini che viene adottata per eseguire la prova oggetto di questo elaborato.

### ***4.1 Scelta del campione di prova***

Prima di poter procedere con la prova di trazione, bisogna determinare prima in base al materiale scelto le dimensioni del campione più adatti, in modo da garantire per la suddetta prova l'uniformità e la possibilità di essere confrontabile, normalmente tali dimensioni sono standardizzate da norme come quelle ISO (International Organization for Standardization) o ASTM (American Society for Testing and Materials).

Nel presente elaborato per la produzione dei campioni di prova, viene usata la tecnologia di stampa FDM usando come materiale il PLA (acido polilattico), nelle indicazioni della normativa ASTM D638 [33] per i materiali polimerici non si fa riferimento a materiali prodotti tramite tecnologia FDM, in quanto la conoscenza delle proprietà meccaniche del materiale non è sufficiente per garantire quelle di un pezzo finito ottenuto tramite FDM, le proprietà effettive di quest'ultimo devono essere determinate sperimentalmente in funzione dei parametri di stampa [34]. Quindi per la scelta della geometria da adottare, si è fatto riferimento allo studio condotto da S. Brischetto, R. Torre, C. G. Ferro e P. Maggiore [35] presentato nella International Conference on Composite Structures del settembre 2018. Dove in questo studio si è fatto un parallelismo tra i materiali compositi a matrice polimerica e quelli stampati in PLA usando la tecnologia FDM, scegliendo la geometria iniziale per i campioni in PLA basandosi sulle linee guida della normativa ASTM D3039 riguardante le prove standard per le proprietà di trazione dei materiali compositi a matrice polimerica. Le prove eseguite con le suddette geometrie hanno mostrato una rottura dei provini nell'intorno degli afferraggi della macchina di

prova, zona questa non accettabile per questo genere di prova; questo fenomeno è causata dalla concentrazione degli sforzi in queste zone, per ovviare a questa problematica si è deciso di aggiungere dei tabs (figura 16) ai provini in modo da avere una trasmissione di sforzo dalla macchina di prova al provino il più possibile uniforme, e di conseguenza una rottura in una zona accettabile del campione di prova. Per determinare le dimensioni ottimali dei tabs si sono fatte una serie di prove sperimentali, scoprendo che tali dimensioni variano in base alla direzione considerata per fare la prova di trazione. Nella figura seguente si riporta uno schema dell'insieme provino tabs con le varie misure da determinare:

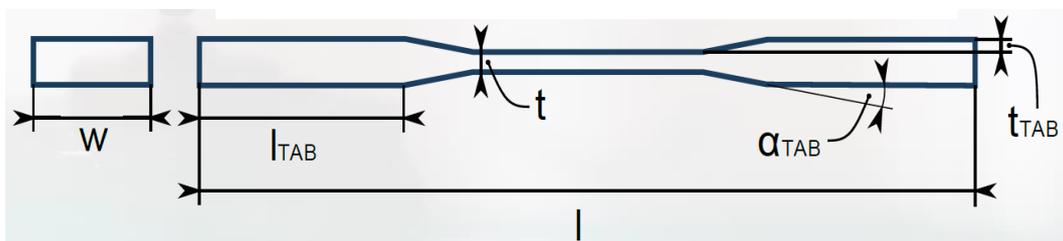


Figura 16: Schema del complesso provino Tabs [35].

Dove  $w$ ,  $l$  e  $t$  sono rispettivamente larghezza, lunghezze e spessore del provino, mentre le dimensioni caratteristiche dei tabs sono la lunghezza  $l_{TAB}$ , lo spessore  $t_{TAB}$  e l'angolo  $\alpha_{TAB}$ , per quanto riguarda lo spessore lo si assume pari a quello del campione. Nelle due tabelle seguente si riportano le dimensioni adottate:

$w$	$l$	$t$
25 mm	185 mm	3 mm

Tabella 2: Dimensioni del provino.

$l_{TAB}$	$t_{TAB}$	$\alpha_{TAB}$
50 mm	2 mm	5 deg

Tabella 3: Dimensioni dei Tabs.

## 4.2 Descrizione della prova

La prova di trazione viene eseguita per la determinazione di diverse caratteristiche meccaniche del materiale in esame, come la tensione di snervamento e di rottura, il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, l'allungamento percentuale e altro ancora. In base ai dati che vengono raccolti da tale prova si può giungere a

determinati conclusioni sullo stato del materiale, in modo da poterle poi usare in fase di progettazione di eventuali componenti.

La prova di trazione consiste nel sottoporre l'opportuno campione ad una forza unidirezionale in modo crescente fino a giungere a rottura, andando a misurare man mano la forza applicata e la deformazione. Una volta definita la geometria del campione, si procede tramite gli afferraggi a collegarlo dai bordi che di norma sono più robusti alla macchina di prova, uno schema dell'insieme viene riportato di seguito:

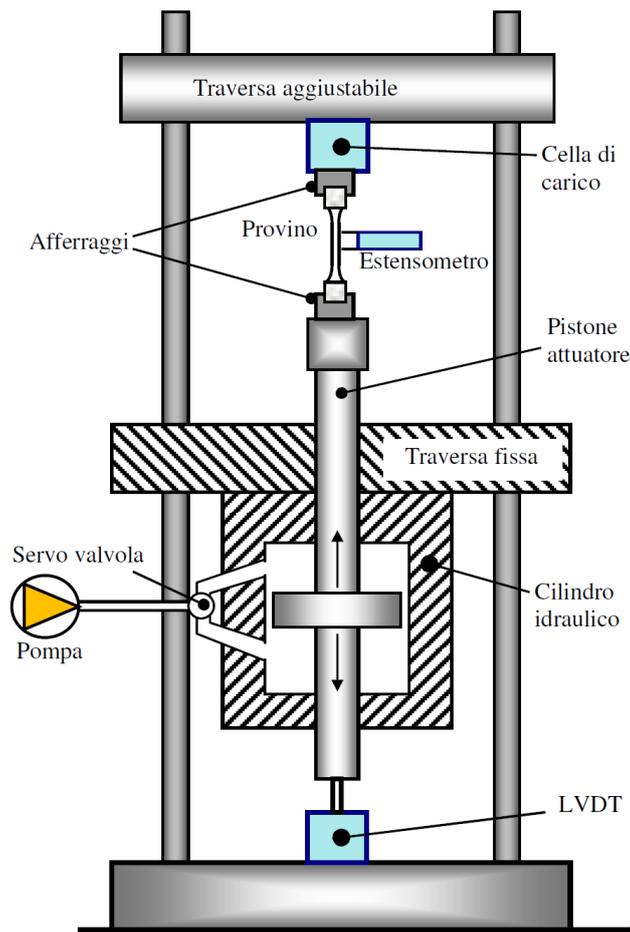


Figura 17: Schema macchina di prova servoidraulica [36].

Come si vede dallo schema i due afferraggi sono collegati a due traverse, quella in basso fissa e l'altra in alto mobile, quest'ultima movendosi trasmette il carico al campione di prova. Nel corso della prova la forza applicata viene misurata grazie alla cella di carico, mentre lo spostamento della traversa mobile viene misurato grazie al LVDT (Linear Variable Differential Transformer) [36]. Altri modi per

effettuare le misurazioni sono l'estensometro che misura l'allungamento in una determinata zona del provino, oppure come verrà fatto in questo elaborato si può usare un estensimetro per misurare direttamente la deformazione.

I dati così ottenuti vengono riportati sul diagramma tensione-deformazione ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), dove la tensione viene calcolata come segue:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Con P carico applicato e A area della sezione trasversale del provino, dove quest'ultima è normalmente variabile nella parte centrale per una configurazione classica di un provino ad osso di cane:

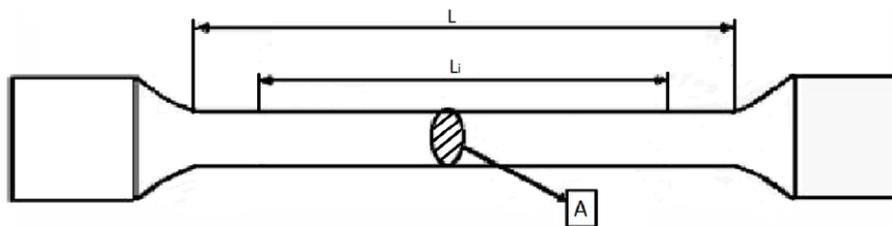


Figura 18: Schema di una classica geometria ad osso di cane di un provino.

Quindi l'andamento del tratto centrale porta ad avere una tensione non costante lungo L. La normativa definisce la lunghezza utile  $L_i$  come il tratto del provino in cui con buona approssimazione è verificata l'ipotesi di una tensione uniformemente distribuita e normale alla sezione trasversale. Da considerare ancora è che l'area iniziale A del provino varia durante la prova restringendosi, quindi la tensione  $\sigma$  calcolata non è quella effettiva, convenzionalmente però si considera sempre l'area iniziale.

Per quanto riguarda la deformazione il calcolo viene fatto come segue:

$$\epsilon = \frac{L^* - L_i}{L_i} = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (4.2)$$

Dove  $L^*$  è la lunghezza che ha il tratto  $L_i$  sotto carico e varia al crescere di quest'ultimo. Dalla (4.2) si può vedere che la deformazione è adimensionale ed è data dal rapporto tra la variazione della lunghezza  $\Delta L$  e la lunghezza utile  $L_i$ .

### ***4.3 Diagramma tensione-deformazione***

Prima di vedere i possibili andamenti di un diagramma ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) che si possono ottenere dalla prova di trazione, utile definire il comportamento che può avere un materiale sottoposto ad una tensione:

- Lineare: questo tipo di andamento si ha solitamente quando viene applicata una tensione non troppo elevata, in questo caso si ha una proporzionalità diretta tra tensione e deformazione.
- Elastico: è un comportamento per cui un materiale che si deforma a causa di una tensione applicata, al cessare di quest'ultima la deformazione si annulla.
- Plastico: è un comportamento che si ha quando al cessare del carico applicato la deformazione che si ottiene non è nulla, tale deformazione prende il nome di deformazione residua o plastica.

Nel caso di un comportamento di tipo elastico e lineare del materiale, si ha che il legame tra la tensione applicata e la deformazione è dato dalla legge di Hooke:

$$\sigma = E\epsilon \quad (4.3)$$

Dove E è detto modulo di Young o elastico del materiale. Essendo  $\epsilon$  adimensionale, allora sia la tensione  $\sigma$  che E hanno le stesse dimensioni e sono misurati in N/mm<sup>2</sup> o MPa.

Si procede adesso ad analizzare brevemente i due andamenti più comune che può assumere la curva tensione-deformazione:

#### *Curva di Tipo 1*

Nel grafico seguente si riporta l'andamento classico che assume un materiale che presenta il fenomeno di snervamento:

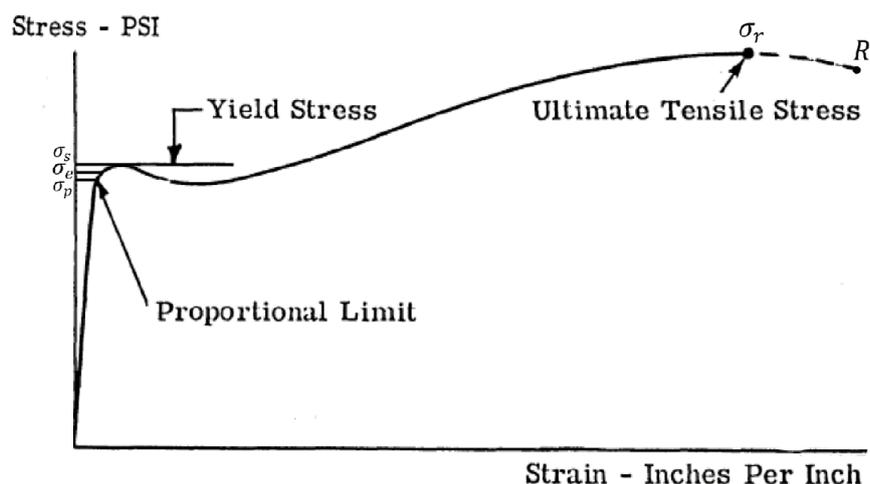


Figura 19: Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  per un materiale che presenta il fenomeno di snervamento [37].

Nel grafico di figura 19 si ha un andamento iniziale lineare di tensione e deformazione fino alla tensione di proporzionalità  $\sigma_p$ , quindi in questo tratto viene seguita la legge di Hooke e le due linee di carico e scarico sono coincidenti, dove al cessare della tensione applicata la deformazione viene recuperato con un ritorno allo stato iniziale. Fino a  $\sigma_e$  detta tensione limite di elasticità del materiale si ha che la linea di scarico continua a coincidere con quella di carico, ma in questo tratto non vale più la proporzionalità tra  $\sigma$  e  $\epsilon$ . Di norma  $\sigma_e$  ha un valore il 5% maggiore di  $\sigma_p$ . Incrementando ulteriormente la tensione si arriva a quella di snervamento  $\sigma_s$ , a questa tensione anche se la si mantiene costante senza un aumento aggiunto la deformazione cresce, ciò è dovuto al fenomeno dello snervamento che è associato all'aggiustamento dei piani cristallini del materiale. Aumentando ancora la tensione si arriva al punto R in cui si ha la rottura del campione di prova. Dal grafico di figura 19 si può notare che il punto di rottura R è apparentemente ad una tensione inferiore rispetto a quella massima  $\sigma_R$ , ma la tensione che viene riportata sul grafico  $\sigma$ - $\epsilon$  è riferita come già anticipato al rapporto tra il carico applicato P e la sezione trasversale del provino che viene considerata costante in questo grafico, in realtà l'area varia durante la prova e diminuisce di molto poco prima della rottura, quindi a parità di carico P e con una area più piccolo la tensione reale è maggiore di quella riportata.

### Curva di tipo 2

Si riporta nel grafico seguente il classico andamento per un materiale che non presenta il fenomeno di snervamento:

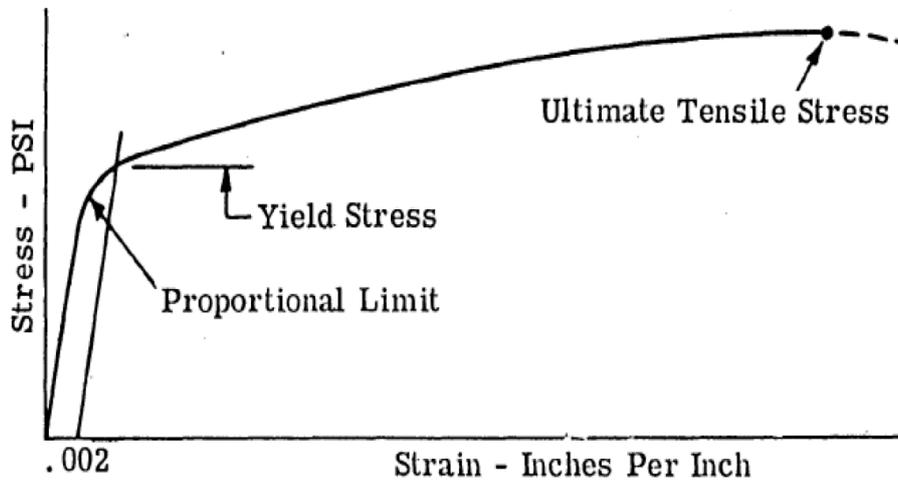


Figura 20: Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  per un materiale che non presenta il fenomeno di snervamento [37].

Fino alla tensione di proporzionalità l'andamento della curva di figura 20 è analogo a quello della curva di figura 19, quindi rimangono valide le considerazioni riportati precedentemente. Dato che per un materiale che ha un andamento come quello riportato in figura 20 non è presente il fenomeno dello snervamento, si assume convenzionalmente come tensione di snervamento  $\sigma_s$  un valore che produce una deformazione plastica dello 0,2% nel provino e viene determinato come riportato in figura 20, partendo da una deformazione dello 0,002 e seguendo parallelamente il tratto lineare fino ad incrociare la curva  $\sigma$ - $\epsilon$ . Per valori superiori a  $\sigma_s$  così determinato, valgono le stesse considerazioni del caso mostrato in figura 19.

## ***5 Modello agli elementi finiti dell'effetto di rinforzo***

Nel presente capitolo si andrà a modellizzare una prova di trazione per un campione di prova con un estensimetro che sarà applicato sempre al centro del provino, in modo da verificare la presenza dell'effetto di rinforzo, per poi andare a quantificare la sua entità con il coefficiente correttivo, parametro questo già introdotto nel capitolo 3. Per realizzare quanto detto si farà uso del codice di calcolo agli elementi finiti MSC Nastran, andando a realizzare un modello 2D e uno 3D specificando le varie scelte adottate. Per ciascun modello si andrà a vedere le possibili variazioni di intensità dell'effetto di rinforzo al variare di alcuni parametri: il modulo di Young del campione di prova e dell'estensimetro, la geometria dell'estensimetro e quella del campione. Infine si andrà a considerare un modello 3D con due estensimetri applicati parallelamente, considerando un estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab. lo stesso usato per le prove sperimentali, in modo da verificare la possibilità di adottare tale configurazione per le prove in laboratorio.

### ***5.1 MSC Nastran e MSC Patran***

#### ***MSC Nastran***

È uno dei codici di calcolo per l'analisi agli elementi finiti più diffuso al mondo; in origine è stato sviluppato per la NASA (National Aeronautics and Space Administration) alla fine degli anni '60 con l'obiettivo di migliorare l'analisi strutturale in ambito aeronautico e spaziale.

Tramite il codice MSC Nastran si ha la possibilità di effettuare diversi tipi di analisi come [38]:

- Analisi statica lineare e non lineare
- Analisi dinamiche in ambito lineare e non lineare
- Analisi a fatica
- Analisi termiche in campo lineare e non lineare
- Analisi di stabilità strutturale lineare e non lineare
- Analisi di ottimizzazione strutturale dimensionale e di forma

Per effettuare tale analisi bisogna fornire a MSC Nastran dei dati ordinati secondo un determinato criterio di sintassi, creando così un modello matematico. Per la creazione del modello vengono utilizzati software di PRE-PROCESSING come MSC Patran. In pratica le informazioni di cui ha bisogno MSC Nastran sono [38]:

- Coordinate della struttura
- Unità di misura desiderata
- Geometria della struttura
- Caratteristiche del materiale
- Vincoli
- Carichi
- Tipo di analisi da effettuare
- Risultati desiderati

Queste informazioni vengono forniti come già detto in precedenza, seguendo la sintassi richiesta dal codice di calcolo.

### MSC Patran

Come già anticipato MSC Patran è un software di PRE-PROCESSING che ha il compito di preparare il modello matematico e i file da fornire al codice di calcolo. Inoltre serve anche per il POST-PROCESSING, in pratica viene utilizzato anche per l'analisi e la visualizzazione dei risultati che vengono ricavati dal codice di calcolo. MSC Patran viene utilizzato principalmente con MSC Nastran, ma può essere utilizzato anche con altri solutori come: Marc, Abaqus, LS-DYNA, ANSYS e Pam-Crash [39].

MSC Patran dà anche la possibilità di utilizzare alcune funzionalità CAD (Computer Aided Drawing) così da poter apportare modifiche alla geometria che viene usata per la creazione del modello matematico [38].

Viene di seguito riportata l'interfaccia di lavoro di Patran:

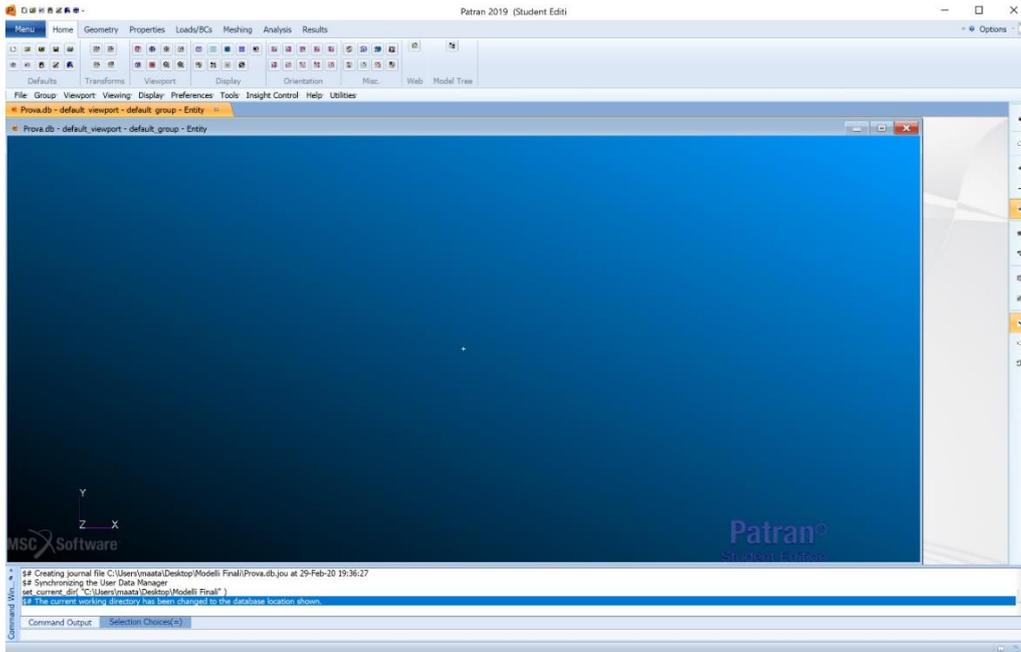


Figura 21: Interfaccia Patran.

## 5.2 Scelte adottate per la modellizzazione

### 5.2.1 Geometrie

#### Provino

Per quanto riguarda la geometria del provino, le scelte adottate sono state fatte basandosi sullo studio riportato in [35] come già stato anticipato nel paragrafo 4.1, considerando quindi un insieme di provino e tabs incollati. Dove per quest'ultimi si vanno a considerare come caratteristiche dimensionali standard per i vari modelli quelli riportati nelle tabelle 2 e 3.

Le caratteristiche dimensionali dei tabs saranno le stesse per tutti i casi che si andranno ad analizzare nel proseguo, mentre quelle relative al provino verranno variate per studiare una possibile relazione fra effetto di rinforzo e geometria del provino.

#### Tabs

Per quanto riguarda la geometria dell'estensimetro si adottano i seguenti valori geometrici:

Lunghezza	Larghezza	Spessore
9,5mm	5mm	0,05

Tabella 4: Dimensione estensimetro.

I valori riportati nella tabella 4 rappresentano la geometria dell'estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab., lo stesso adottato nelle prove sperimentali. Anche in questo caso le caratteristiche geometriche dell'estensimetro verranno variati, in modo da analizzare una possibile relazione con l'effetto di rinforzo.

### 5.2.2 Assunzioni e vincoli

Per la creazione del modello matematico di cui ha bisogno il codice di calcolo Nastran, si è fatto uso del software MSC Patran, in quest'ultimo si devono fare diverse scelte per creare il modello. Si riportano di seguito le varie scelte adottate per la creazione dei modelli:

#### Vincoli:

Nel descrivere i vari vincoli si andrà a considerare come:

- Direzione 1: associata alla coordinata X e lungo il quale viene esercitata la forza di trazione.
- Direzione 2: associata alla coordinata Y, perpendicolare a X lungo lo spessore del provino
- Direzione 3: associata alla coordinata Z, perpendicolare a X e Y lungo la larghezza del provino

Si riportato di seguito i vari vincoli adottati:

- Translations <T1 T2 T3> = <0, ,0>: con  $T1 = 0$  si vanno a bloccare gli spostamenti lungo X e con  $T3 = 0$  quelli lungo Z. Con questo vincolo si vuole simulare l'azione esercitata dall'afferraggio collegato alla traversa fissi della macchina di prova in corrispondenza dei nodi dell'interfaccia con i tabs.
- Translations <T1 T2 T3> = < , ,0>: in questo caso si va a bloccare solo la traslazione lungo Z. Con questo vincolo si va a simulare l'azione dell'afferraggio collegato alla traversa mobile, vincolando lo spostamento

lungo Z e lasciando libero il movimento della traversa lungo x, direzione questa della prova di trazione. Viene applicato in corrispondenza dei nodi dell'interfaccia afferraggio-tabs.

- Translations  $\langle T1 \ T2 \ T3 \rangle = \langle \ , \ \mathbf{0} \ , \ \rangle$ : questa volta si va a bloccare lo spostamento lungo Y. Questo vincolo viene applicato in corrispondenza di entrambi gli afferraggi nei nodi che stanno esattamente a metà spessore. Con questo vincolo si vuole ottenere l'allineamento del provino durante la simulazione della prova di trazione rispetto al piano XZ.
- Translations  $\langle T1 \ T2 \ T3 \rangle = \langle \mathbf{X} \ , \ \ , \ \rangle$ : in questo caso si va ad imporre un spostamento lungo la direzione della prova di trazione. Con questo vincolo si vuole simulare lo spostamento imposto al provino da parte dell'afferraggio collegato alla traversa mobile. Quindi viene applicato in corrispondenza dei nodi dell'interfaccia afferraggio-tabs. Si ha la possibilità anche di applicare una forza in questi nodi per simulare la prova di trazione, ma si è scelto di applicare uno spostamento in modo da visualizzare meglio come potrebbe varia l'effetto di rinforzo al variare dei parametri precedentemente citati
- Force  $\langle F1 \ F2 \ F3 \rangle = \langle \mathbf{0} \ , \ F_N \ , \ \mathbf{0} \rangle$  e Force  $\langle F1 \ F2 \ F3 \rangle = \langle \mathbf{0} \ , \ -F_N \ , \ \mathbf{0} \rangle$ : vincoli questi validi solo per il modello 2D con i quali si vanno ad applicare due forze lungo Y nei due versi. Questi vincoli vengono applicati in corrispondenza dei due afferraggi collegati alla traversa fissa e mobile all'interfaccia con i tabs. Andando a simulare la pressione esercitata dagli afferraggi su quest'ultimi. La scelta di applicare una forza è dovuta al fatto che nel modello 2D non si ha un piano in modo da poter applicare una pressione, in quanto la geometria del campione di prova viene schematizzato considerando la sezione piccola come si può vedere in figura 23, quindi si hanno a disposizione dei nodi che permettono l'applicazione solo di una forza.

Dato che per le prove sperimentale si farà uso di una macchina a trazione con degli afferraggi manuali, si andrà a stimare il valore di  $F_N$  in base allo schema seguente:

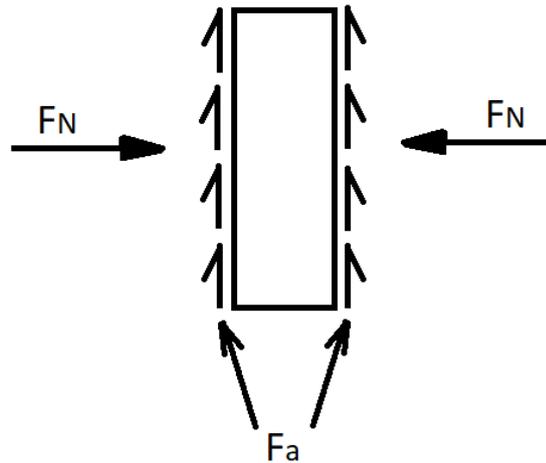


Figura 22: Schema forza d'attrito.

Dove  $F_a$  è la forza d'attrito, che nel caso in esame deve essere equivalente alla reazione vincolare lungo la direzione di trazione, andando a considerare la massima forza di trazione applicabile.  $F_N$  invece è la forza normale cercata e viene ricavata considerando la formula dell'attrito radente:

$$F_a = \mu * F_N \quad (5.1)$$

Dove  $\mu$  è il coefficiente di attrito radente. Da quest'ultima espressione si va a ricavare la forza  $F_N$  da applicare che viene poi divisa per il numero di nodi dell'interfaccia tabs-afferraggi, facendo ovviamente attenzione al lato in cui si trovano e quindi al segno di  $F_N$ .

- Pressione: nel caso 3D si può invece applicare una pressione, si segue lo stesso ragionamento del caso 2D per ricavare la forza  $F_N$  per poi andare a dividere per l'area sottoposta alla pressione.

### Mesh

Nella creazione dei nodi si è cercato di avere un infittimento maggiore nella zona in corrispondenza del quale si andrà a collocare l'estensimetro, in modo da visualizzare in maniera chiara l'effetto di quest'ultimo. Si è scelto di usare la stessa mesh sia per il modello con che quello senza estensimetro, in modo da poter fare un confronto, dove si potrà visualizzare solo l'effetto dovuto alla presenza dell'estensimetro, evitando così eventuali disturbi dovuti alla mesh. Si riportano di seguito le scelte fatte per realizzare la mesh per i due modelli 2D e 3D:

- Modello 2D:
  - Elem Shap: Quad
  - Mesher: IsoMesh
  - Topology: Quad4

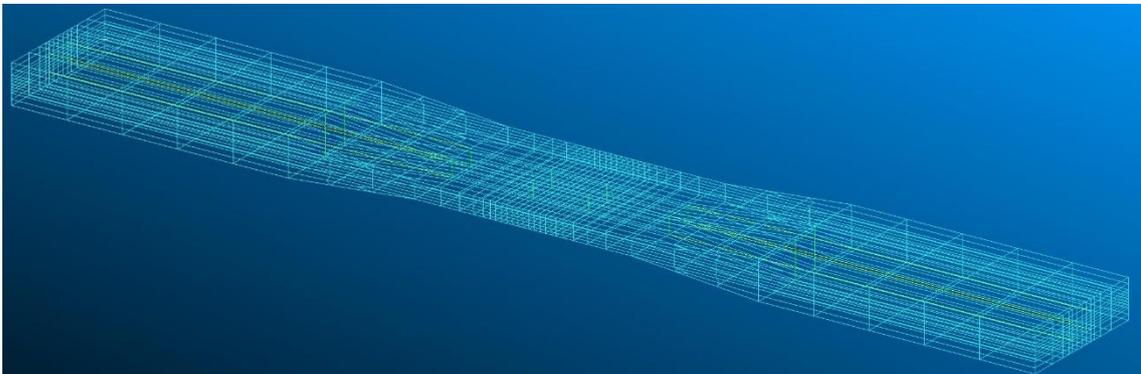
Ottenendo il seguente risultato considerando come caratteristiche dimensionali quelli riportati in tabella 2 e 3:



*Figura 23: Mesh modello 2D.*

- Modello 3D:
  - Elem Shap: Hex
  - Mesher: IsoMesh
  - Topology: Hex8

Ottenendo la seguente mesh considerando sempre le caratteristiche dimensionali di tabella 2 e 3:



*Figura 24: Mesh modello 3D.*

### Estensimetro

Per le prove sperimentali che verranno analizzate più in dettaglio nel capitolo 6 si utilizzeranno degli estensimetri di tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab. consigliati per materiali a basso modulo, per la creazione del modello ci si è basati su quello già usato nello studio condotto da Ajovalasit, A. e Zuccarello, B. [40], dove si va a considerare un modulo elastico

spalmato lungo l'estensimetro. Per definire il modulo elastico da utilizzare, non avendo trovato nessuna indicazione di tale valore, si è cercato di valutare il volume occupato dalla costantana fotoincisa nel supporto in PLA, per poi andare a stimare il modulo utilizzando la regola della miscela:

$$E_{sg} = \frac{V_{cost}}{V_T} * E_{cost} + \frac{V_{PI}}{V_T} * E_{PI} \quad (5.2)$$

Dove  $V_{cost}$  è il volume della costantana,  $E_{cost}$  il suo modulo con un valore di 180 GPa [1], mentre  $V_{PI}$  è il volume del supporto in poliimmide (PI) che ha come modulo  $E_{PI} = 3,1GPa$  [1], invece  $V_T$  è il volume totale dell'estensimetro che ha come valore  $2,375 \text{ mm}^3$  andando a considerare le dimensioni riportati nella tabella 4.

Si procede adesso ad illustrare in dettaglio la procedura adottata nel calcolo del volume della costantana  $V_{cost}$ , dove si è considerato l'estensimetro diviso in quattro tratti con stessa larghezza e spessore, si riporta di seguito uno schema illustrativo:

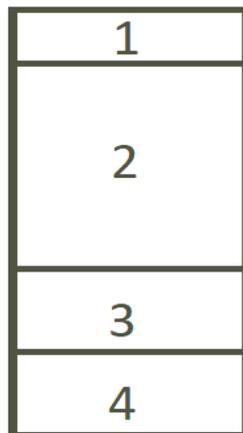


Figura 25: Schematizzazione dell'estensimetro in 4 tratti.

Si procederà adesso riportare le caratteristiche di ogni tratto andando a stimare il volume di costantana che contengono:

- Tratto 1: la lunghezza stimata di questo tratto è di 1 mm e rappresenta la parte sopra la griglia attiva che non contiene costantana. Si considera dunque un volume di costantana nel primo tratto pari a:

$$V_1 = 0$$

- Tratto 2: la lunghezza stimata di questo tratto è di 5 mm e rappresenta sia la parte contenente la griglia attiva sia le due zone dei raccordi sopra e sotto

la griglia. Per quanto riguarda i fili della griglia in costantana fotoincisi, si è considerato con diametro  $20 \mu m$ , valore questo ottenuto andando a fare una media di quelli indicati nel libro di A. Ajovalasit riportato con il riferimento bibliografico [22]. Con questo diametro si ottiene il valore della sezione come segue:

$$A_2 = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

Considerando poi un numero di fili pari a 20 e una lunghezza per ciascuno filo di 5 mm, si ha un volume di costantana nel secondo tratto pari a:

$$V_2 = 20 * 5 * A_2 = 0,0315 \text{ mm}^3$$

- Tratto 3: la lunghezza stimata di questo tratto è di 1,75 mm, in questo parte sono presenti i 2 fili che portano il segnale dall'estensimetro alla centralina. Essendo leggermente più spessi di quelli della griglia, considerando sempre il riferimento [22] si è considerato come diametro il limite superiore indicato, pari a  $25 \mu m$ . In modo analogo a quanto fatto per il tratto 2, si ricava il valore della sezione del filo poi si moltiplica per lunghezza e numero dei fili ottenendo un volume di costantana nel terzo tratto pari a:

$$V_3 = 2 * 1,75 * A_3 = 0,0017 \text{ mm}^3$$

- Tratto 4: la lunghezza stimata di questo tratto è di 1,75 mm, in questa estremità si ha la possibilità di misurare direttamente i fili che fuori escono dall'estensimetro, con l'ausilio di un calibro digitale elettronico si è ricavato un diametro di 0,14 mm. Come fatto in precedenza, considerando 2 fili in questo tratto si ha che il volume di costantana in questo tratto è pari a:

$$V_4 = 2 * 1,75 * A_4 = 0,0539 \text{ mm}^3$$

Sommando il volume di costantana ottenuto nei vari tratti si ha che  $V_{cost}$  è pari a:

$$V_{cost} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0,0871 \text{ mm}^3$$

Che è rispetto al volume totale dell'estensimetro è pari in percentuale a:

$$\text{percentuale di costantana} = \frac{V_{cost}}{V_t} * 100 \cong 3,67\%$$

Con l'ausilio a questo punto dell'equazione (5.2) si può ricavare una stima del modulo elastico dell'estensimetro che è pari a:

$$E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$$

### Incollaggi

Sia per quanto riguarda l'incollaggio estensimetro provino che quello riguardanti tabs provino, si andrà ad adottare un modello semplificato, considerando un perfetto incollaggio, senza tenere conto delle modalità con i quale vengono trasmesse le tensioni.

Per quanto riguarda la geometria dei tabs, questa è stata testata solo per un materiale come il PLA stampato in FDM, ma si andrà a considerare sempre come geometria del campione di prova quella di provino e tabs, anche quando si andrà a variare il modulo elastico, consci del fatto che per moduli e materiali diversi la geometria ottimale di una eventuale prova potrebbe essere diversa.

### **5.3 Modello 2D**

Il modello 2D è stato modellato considerando la sezione piccola del provino come si può vedere in figura 23. Dove per la definizione della mesh si è condotto uno studio preliminare, andando ad infittire il numero dei nodi nella zona di applicazione dell'estensimetro, fino ad ottenere una convergenza monotona e senza oscillazioni nei risultati. Per dare forma al modello 2D è stato inserito uno spessore con un valore pari a quello della larghezza del provino negli elementi shell. Il difetto di questo modello è che considera l'estensimetro spalmato su tutta la larghezza del provino.

Si procederà adesso ad analizzare come potrebbe variare l'entità dell'effetto di rinforzo al variare dei seguenti parametri:

- Il modulo elastico del campione e dell'estensimetro
- Geometria dell'estensimetro
- Geometria del campione

Considerando come parametro rappresentativo dell'effetto di rinforzo il coefficiente correttivo già determinato nel capitolo 3 come segue:

$$C = \frac{E_{sg}}{E_{rif}} = \frac{\sigma/\epsilon_{sg}}{\sigma/\epsilon_{rif}} = \frac{\epsilon_{rif}}{\epsilon_{sg}}$$

Dove  $E_{rif}$  e  $E_{sg}$  sono rispettivamente modulo elastico del campione di riferimento e dell'estensimetro, mentre  $\epsilon_{rif}$  e  $\epsilon_{sg}$  sono rispettivamente le loro deformazioni. Dove  $\epsilon_{rif}$  viene ricavata considerando un nodo qualsiasi esattamente al centro del provino, dato che tutti i nodi hanno lo stesso valore, mentre per quanto riguarda  $\epsilon_{sg}$  viene ricavato come media delle deformazioni dei nodi che rappresentano l'estensimetro, in quanto come sarà mostrato successivamente, la deformazione assume valori differenti man mano che ci si sposta sulla superficie dell'estensimetro.

### ***5.3.1 Influenza del modulo elastico del campione e dell'estensimetro***

Si procederà adesso a ricavare il coefficiente correttivo al variare del modulo elastico del campione andando a vedere come varia l'effetto di rinforzo con tale parametro. Per questa analisi si va a considerare come geometria del provino e dell'estensimetro quella illustrata nel sottoparagrafo (5.2.1). Invece per quanto riguarda i valori del modulo elastico dell'estensimetro da adottare, si vanno a considerare dei moduli elastici compresi nell'intervallo  $7000 \leq E_{sg} \leq 20000 \text{ MPa}$  ricavato dallo studio riportato con il riferimento bibliografico [27] che determina i limiti del modulo che può assumere un estensimetro. Si andranno a considerare i quattro valori qui riportati:

Modello	A	b	c	d
Modulo elastico	7000 MPa	9592 MPa	15000 MPa	20000 MPa

*Tabella 5 Moduli elastici da adottare per gli estensimetri.*

Dove il modulo elastico b pari a 9592 MPa è quello stimato precedentemente per l'estensimetro di tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab.

Prima di andare a vedere l'effetto di rinforzo dal punto di vista numerico con l'ausilio del coefficiente correttivo, si riportano di seguito delle figure in modo da potere visualizzare come varia il suddetto effetto a diversi moduli elastici dell'estensimetro, considerando un modulo elastico fisso di 3030 MPa per quanto riguarda il provino, modulo questo che corrisponde a quello ricavato dalle prove

sperimentali, che verrà analizzato più in dettaglio nel capitolo 6. Si riporta di seguito l'andamento delle deformazioni lungo il provino:

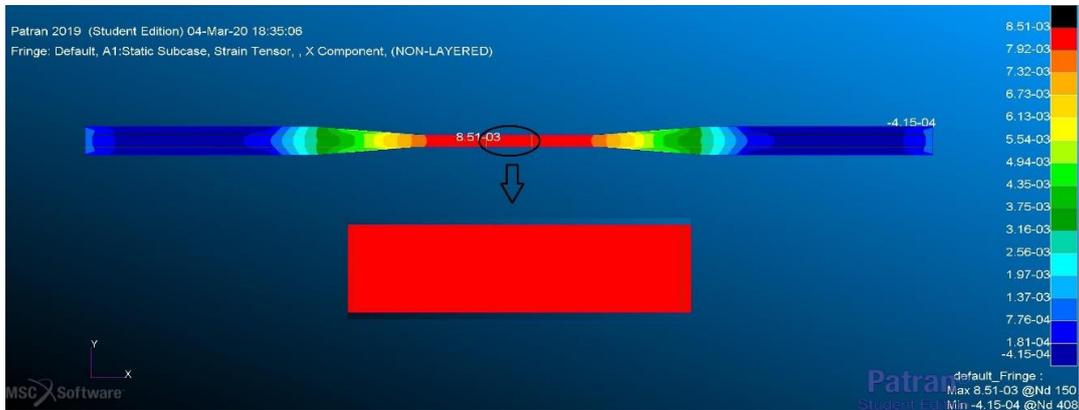


Figura 26: Andamento delle deformazioni per un campione di prova senza estensimetro.

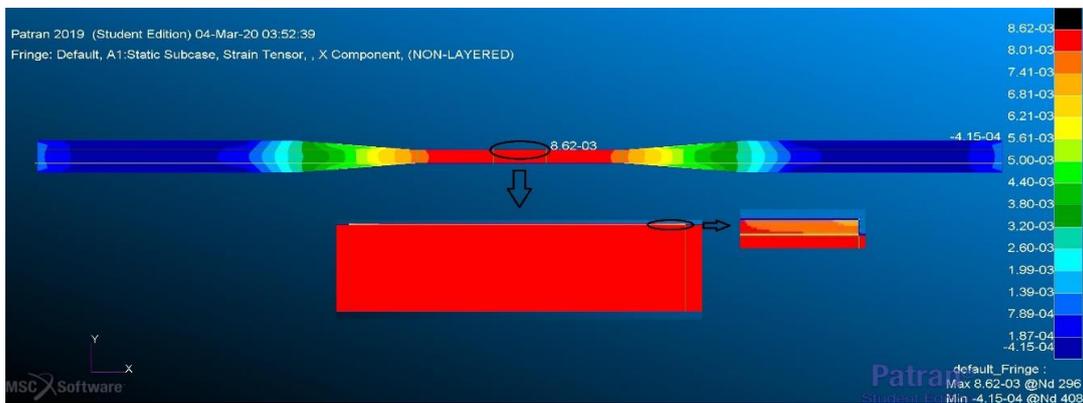


Figura 27: Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 7000 MPa.

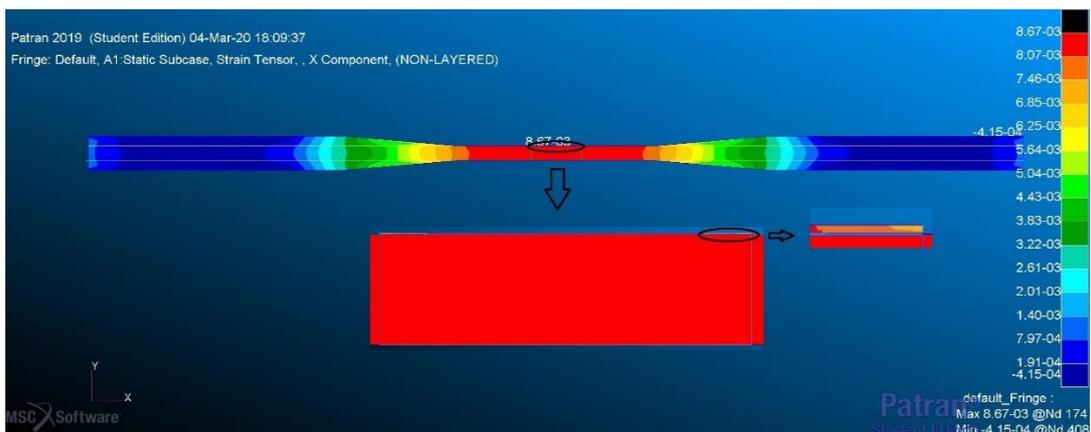


Figura 28: Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 9787 MPa.

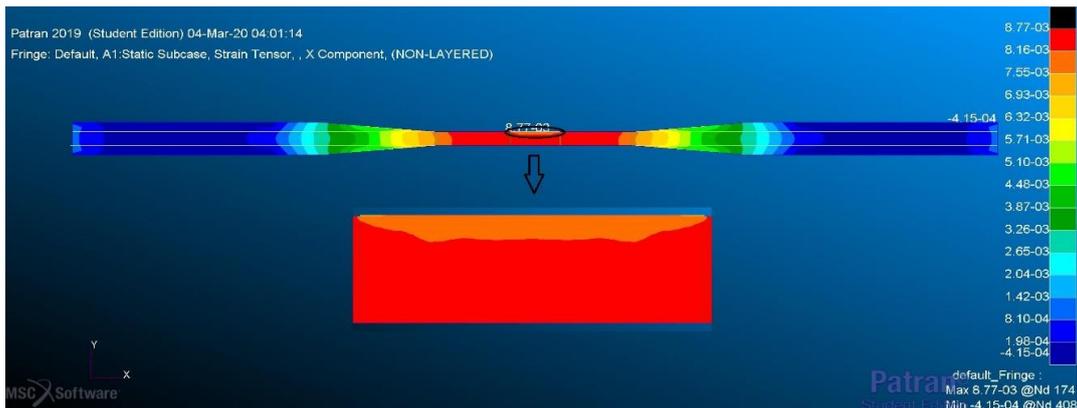


Figura 29: Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 15000 MPa.

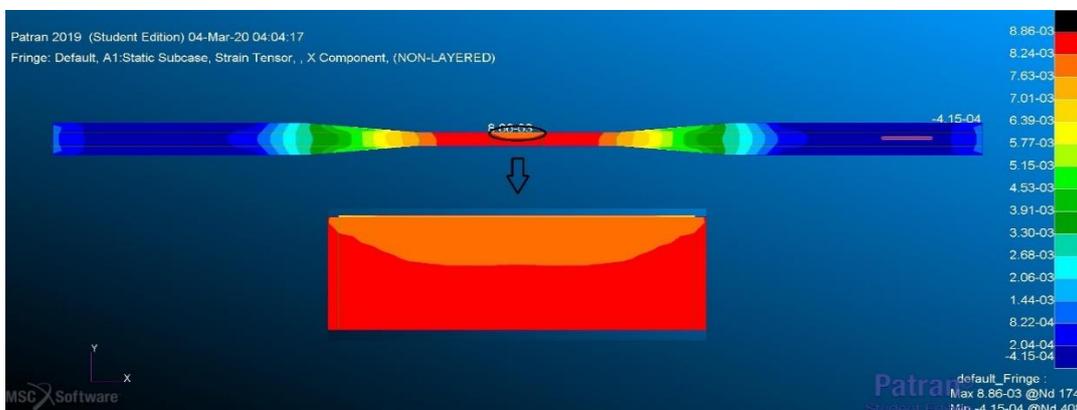


Figura 30: Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 20000 MPa.

La finalità dell'estensimetro è quella di misurare le deformazioni in una determinata zona, per quanto riguarda una misurazione reale questo compito viene eseguito dalla lunghezza attiva della griglia  $L_{gauge}$ , mentre per quanto riguarda il modello in esame si assume come misurazione della deformazione la media dei nodi che rappresentano la geometria dell'estensimetro. Basandosi su quanto appena detto, per non avere nessun effetto di rinforzo l'estensimetro deve restituire a parità di carico applicato gli stessi valori di deformazioni che si possono vedere in figura 26. Dalle figure sopra riportati si può notare come già per un estensimetro con un modulo elastico di 7000MPa (fig.27), si ha una deformazione minore nei nodi che lo rappresentano, dove la differenza maggiore si può notare ai bordi dell'estensimetro. Si può poi vedere come nei casi successivi che al crescere del modulo elastico dell'estensimetro, la ragione interessata dall'effetto di rinforzo cresce; da notare però come anche per un modulo di 20000MPa l'estensimetro non

va comunque ad influenzare l'intera sezione, questo è dovuto al fatto che la combinazione dei valori dello spessore del provino e il suo modulo elastico, lo portano ad essere soggetto al massimo ad un effetto di rinforzo locale. Dato che in questo elaborato si vuole determinare un coefficiente correttivo dell'effetto locale, tale conclusione va a favore della geometria e del materiale adottato per la realizzazione delle prove sperimentali. Verrà poi analizzato più in dettaglio l'influenza dello spessore nel tipo di effetto di rinforzo che si ottiene.

Di seguito viene riportato l'andamento del coefficiente correttivo per il modello 2D al variare del modulo elastico del provino, andando a considerare i diversi moduli degli estensimetri precedentemente definiti:

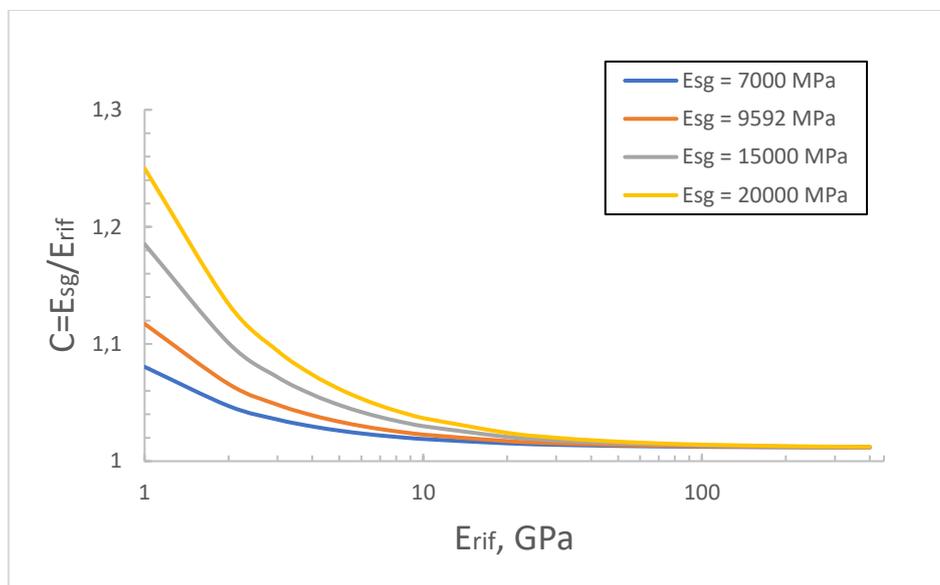


Figura 31: Risultati modello 2D, andamento del coefficiente correttivo  $C$  al variare di  $E_{rif}$  e  $E_{sg}$ .

Come si può vedere dal grafico di figura 31 sopra riportato, a parità di modulo elastico dell'estensimetro, il coefficiente correttivo decresce all'aumentare del modulo del campione considerato. Da notare anche come a parità di quest'ultimo, il coefficiente di correzione cresce in maniera sensibile, per un campione da 1 GPa di modulo e un estensimetro da 7 GPa si ha un coefficiente di circa 1,081 con un errore del 8,1%, valore questo che cresce fino al 25% per un estensimetro con un modulo di 20 GPa.

Nel caso dell'estensimetro da 7 GPa si ha che l'errore scende sotto il 2% per campioni con un modulo di 10 GPa, per valori più alti l'errore decresce ulteriormente. Per un modulo di 100 GPa non si hanno quasi più errori. Si ha lo stesso andamento decrescente anche negli altri casi; per gli estensimetri da 9,592 GPa, 15 GPa e 20 GPa si hanno rispettivamente errori del 2,24%, 3% e 3,7% per campioni con modulo 10 GPa, mentre per moduli intorno a 100 e 200 GPa non si hanno quasi più errori.

### ***5.3.2 Influenza della geometria dell'estensimetro***

I due parametri da considerare per valutare l'impatto della geometria dell'estensimetro sulle sue misurazioni e quindi sull'effetto di rinforzo sono spessore e lunghezza della griglia attiva. Ma dato che lo spessore ha un valore trascurabile rispetto a quello del provino, come dimostra lo studio riportato con il riferimento bibliografico [1] non ha praticamente influenza sull'effetto di rinforzo; rimane quindi da analizzare l'effetto della lunghezza della griglia, ma dato che nel seguente elaborato si sta considerando il modulo elastico dell'estensimetro spalmato su tutta lunghezza di quest'ultimo, si andrà quindi ad analizzare l'effetto della lunghezza dell'estensimetro. Per questa analisi si è considerato come geometria del campione quella standard data dai valori riportati nelle tabelle 2 e 3 riguardanti provino e tab, invece per l'estensimetro si è considerato come modulo quello stimato per il tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F per tutti i valori di lunghezza, ottenendo il seguente andamento del coefficiente correttivo al variare della lunghezza dell'estensimetro e del modulo di riferimento:

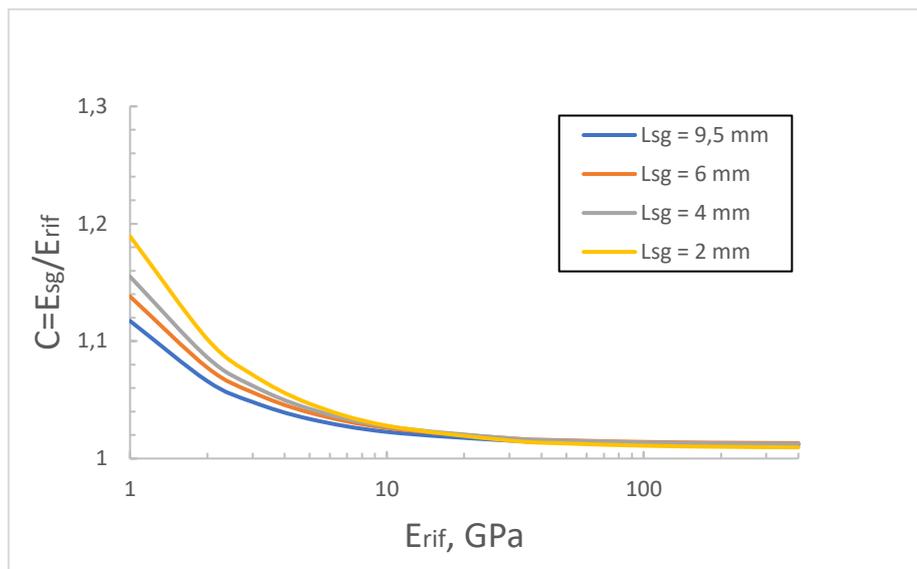


Figura 32: Risultati modello 2D al variare della lunghezza dell'estensimetro.

Come si può vedere dal grafico di figura 32, al crescere della lunghezza dell'estensimetro  $L_{sg}$  e a parità di modulo elastico di riferimento, il coefficiente correttivo decresce significativamente. Andando a considerare un modulo di riferimento del provino di 1 GPa, si ha per una lunghezza dell'estensimetro di 2 mm un coefficiente correttivo di 1.19, il che significa un errore del 19%, mentre si ha poi una riduzione progressiva dell'errore al crescere della lunghezza dell'estensimetro, fino a raggiungere un valore del 11,5% per una  $L_{sg}=9,5$  mm. Questo fenomeno è dovuto agli effetti di bordo, dove all'estremità si registrano deformazioni inferiori rispetto alla parte centrale, che ha valori più vicini alle deformazioni effettivi. Quindi tale effetto viene percepito maggiormente dagli estensimetri con una lunghezza ridotta, dove la parte centrale è più corta, e i valori delle deformazioni nelle estremità hanno un peso maggior nella media dell'indicatore. Quindi al crescere della lunghezza dell'estensimetro si hanno sempre più misurazioni poco influenzati dagli effetti di bordo. Ma nel caso si desidera una misurazione puntuale, una lunghezza eccessiva dell'estensimetro non è consigliata, dato che il principio di funzionamento dell'estensimetro prevede una mediazione dei valori delle deformazioni nella zona ricoperta dalla griglia sensibile. Per visualizzare meglio questo effetto di bordo, si riporta di seguito un grafico con l'andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro per varie lunghezze di

quest'ultimo, considerando sempre le stesse geometrie e modulo elastico dell'estensimetro, e un modulo di riferimento del provino di 3030 MPa:

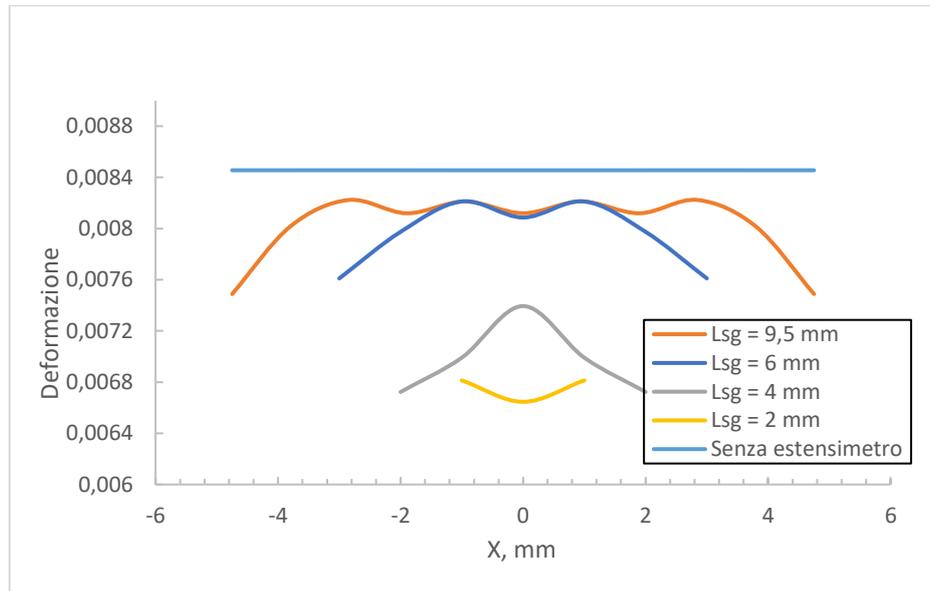


Figura 33: Risultati modello 2D, andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro al variare di  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$  e  $E_{rif} = 3030 \text{ MPa}$ .

Dal grafico si può notare quanto detto prima, che le deformazioni minori si hanno alle estremità dell'estensimetro e che vanno a stabilizzarsi nella zona centrale, con valori più vicini rispetto a quelli del caso senza estensimetro. Si ha però un caso anomalo, quello con una lunghezza dell'estensimetro pari a 2mm, dove i valori delle deformazioni sono più elevati ai bordi, quest'anomalia può essere causata dal fatto che un estensimetro così corto non ha abbastanza spazio per permettere alle deformazioni di stabilizzarsi nella parte centrale, ma si può notare comunque che per tale lunghezza la differenza di deformazione rispetto al caso senza estensimetro è la più elevata, il che porta un errore maggiore come già visto prima.

### 5.3.3 Influenza della geometria del campione

Si vuole adesso andare a vedere l'influenza della geometria sull'effetto di rinforzo, andando a considerare due parametri che sono larghezza e spessore del campione in quanto la lunghezza non ha effetto sulle deformazioni. Per quanto riguarda la larghezza, nel modello 2D non viene considerato, lo stesso si farà quando si andrà a considerare il modello 3D, in quanto avendo come oggetto di studio in questo elaborato l'effetto locale e considerando che il rapporto tra larghezza del campione

di riferimento e quella dell'estensimetro è 5, valore questo superiore a 3 indicato come limite per considerare l'effetto della larghezza trascurabile da Ajovalasit e Zuccarello nello studio riportato con il riferimento bibliografico [27]. Rimane quindi da considerare l'influenza della variazione dello spessore sull'effetto di rinforzo. Si andrà a considerare come larghezza e lunghezza del campione di prova quelli riportati in tabella 2, e come estensimetro GFLAB-3-350-70-1LJCT-F con un modulo stimato di 9592 MPa e geometria pari a quella riportata nella tabella 4. Si riporta quindi di seguito l'andamento del coefficiente correttivo del modello 2D al variare dello spessore e del modulo elastico del campione di riferimento:

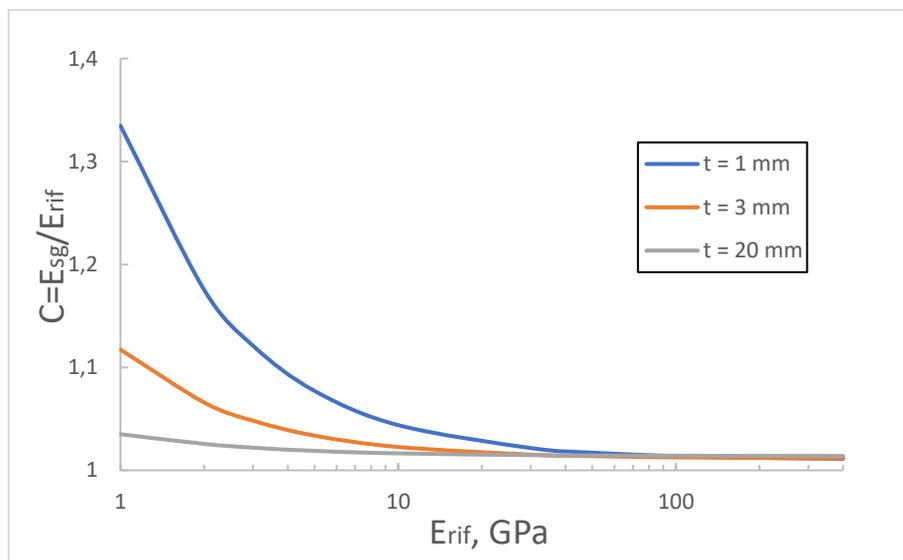


Figura 34: Risultati modello 2D, al variare dello spessore del campione per un estensimetro con  $L_{sg} = 9,5$  mm e  $E_{sg} = 9592$  MPa.

Dal grafico in figura 26 si può osservare come a parità di modulo dei campioni di riferimento, al diminuire del loro spessore l'effetto di rinforzo e quindi il coefficiente correttivo crescono in una maniera considerevole, denotando una elevata sensibilità allo spessore del campione, soprattutto per i campioni con basso modulo. Dai risultati ottenuti, per un campione di spessore 20 mm e modulo pari a 1 GPa si ha un coefficiente di correzione pari a 1,035 con un errore del 3,5%, valore questo che aumenta fino al 33,5% per un campione con uno spessore di 1 mm. L'influenza dello spessore sulle misurazioni dell'estensimetro è rilevante anche per campioni con modulo più elevato. Ad esempio per un campione con modulo 10

GPa e uno spessore di 1 mm, si ha un coefficiente correttivo pari a 1,044 con un errore quindi del 4,4%.

Nella figura seguente si riporta una visualizzazione del fenomeno tramite MSC Patran per un campione con modulo di 1 GPa al variare dello spessore e a parità di forza applicata:

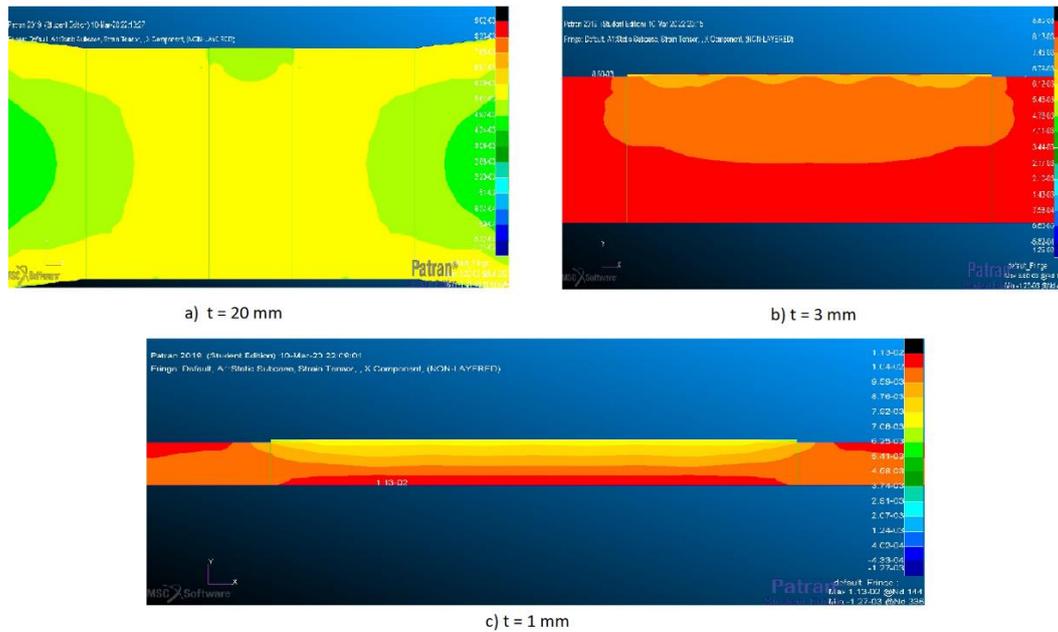


Figura 35: Modello 2D, andamento delle deformazioni al variare dello spessore.

Come si può vedere l'effetto di rinforzo dovuto all'estensimetro varia notevolmente con lo spessore, nel caso (a) con uno spessore di 20 mm è limitato ad una piccola zona in proporzione alle dimensioni del campione, nel caso (b) con uno spessore di 3 mm lo zona interessata dall'effetto di rinforzo e già più della metà dello spessore del campione, infine andando a considerare il caso (c) con uno spessore di 1 mm l'effetto coinvolge l'intera sezione e non è più limitato solo alla zona sotto l'estensimetro, ma va ad influenzare le parti adiacenti, il che significa che in questo caso non si può più parlare di un effetto di rinforzo locale, ma si è in presenza di un effetto globale. Questo sta a dimostrare che anche nel caso di estensimetri consigliati per materiali a basso modulo, se si utilizzano provino con uno spessore troppo basso l'effetto di rinforzo diventa molto rilevante.

## 5.4 Modello 3D

In modo analogo a quanto fatto per il modello 2D, anche per il 3D la definizione della mesh ottimale è stata realizzata conducendo uno studio preliminare, dove si è andati ad infittire il numero dei nodi in corrispondenza della zona di applicazione dell'estensimetro, fino ad ottenere una convergenza monotona e senza oscillazioni nei risultati.

Seguendo quanto fatto nel paragrafo (5.3), si procede adesso allo stesso modo a vedere il comportamento dell'effetto di rinforzo al variare dei vari parametri, analizzando l'andamento del coefficiente correttivo.

### 5.4.1 Influenza del modulo elastico del campione e dell'estensimetro

Anche per l'analisi 3D si va a considerare come geometria di provino e estensimetro quelli riportati nelle tabelle 2,3 e 4. Per quanto riguarda i moduli elastici dell'estensimetro si vanno sempre ad utilizzare quelli riportati nella tabella 5. Si ottiene così il seguente andamento del coefficiente correttivo:

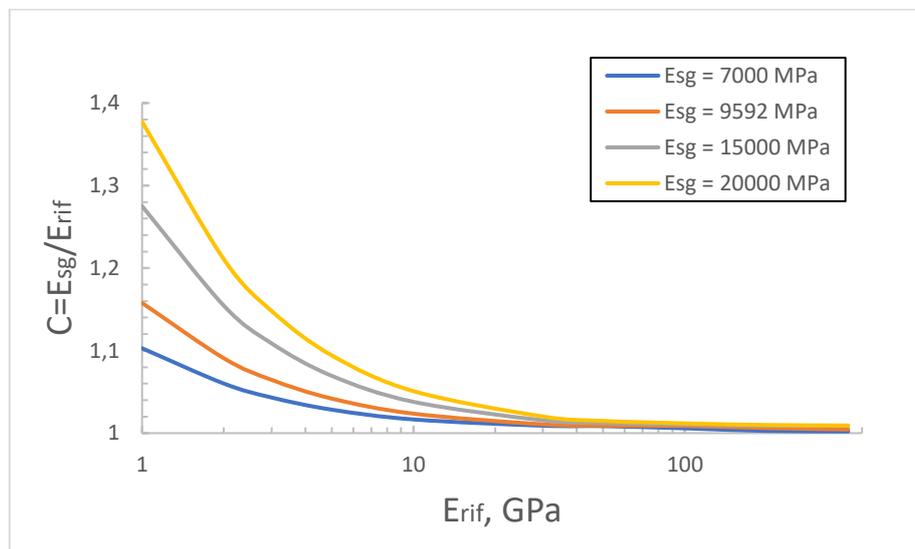


Figura 36: Risultati modello 3D, andamento del coefficiente correttivo  $C$  al variare di  $E_{rif}$  e  $E_{sg}$ .

Come si vede nel grafico di figura 36, si ha un andamento analogo a quanto visto per il modello 2D, dove a parità di modulo elastico di riferimento del campione, si

hanno coefficiente correttivi più elevati al crescere del modulo dell'estensimetro. Si ha anche che il coefficiente correttivo decresce al crescere del modulo del riferimento. Si riporta di seguito un grafico in modo da poter fare un confronto tra i due modelli 2D e 3D:

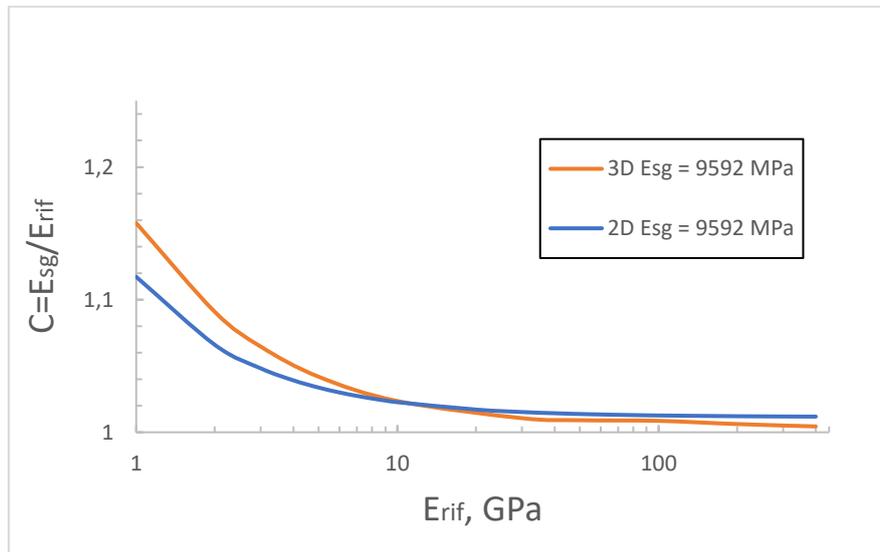


Figura 37: Confronto tra i risultati del modello 2D e 3D dell'andamento di  $C$  a parità di  $E_{sg}$ .

Nel grafico di figura 37 sopra riportato, viene riportato l'andamento del coefficiente correttivo  $C$  per i due modelli 2D e 3D, considerando l'estensimetro di tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab. con un modulo elastico stimato di 9592 MPa, il tutto a parità di geometria del provino precedentemente citata. Dal grafico si può notare come fino a 10 GPa di modulo di riferimento il coefficiente correttivo del modello 3D ha un valore maggiore rispetto al 2D, mentre per valori più elevati di  $E_{rif}$  succede il contrario, con una tendenza maggiore del modello 3D per elevati moduli a 1 e quindi a misurazioni senza errori da parte dell'estensimetro. Per avere un confronto numerico rispetto ai dati indicati in precedenza per il modello 2D, si riportano nelle due tabelle seguenti i coefficienti correttivi per i due modelli al variare del modulo elastico dell'estensimetro per due valori di modulo di riferimento:

Esg [MPa]	7000	9592	15000	20000
Modello 2D	1,081	1,115	1,185	1,250
Modello 3D	1,103	1,154	1,275	1,377

Tabella 6: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1\text{GPa}$  al variare di  $E_{sg}$ .

Esg [MPa]	7000	9592	15000	20000
Modello 2D	1,019	1,022	1,030	1,037
Modello 3D	1,020	1,024	1,038	1,051

Tabella 7: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10GPa$  al variare di  $E_{sg}$ .

Dai valori dei coefficienti riportati nelle due tabelle, si può notare che le differenze maggiori tra il modello 3D e quello 2D si hanno per  $E_{rif} = 1 GPa$ , ciò è confermato anche dal grafico di figura 29, dove la differenza tra i due modelli si assottiglia al crescere di  $E_{rif}$ . Dalle due tabelle si può notare anche come la differenza tra i due modelli cresce al crescere di  $E_{sg}$ . Da quanto appena visto, si può giungere alla conclusione che la differenza tra i due modelli è tanto maggiore quanto è grande l'effetto di rinforzo, in altre parole, per bassi moduli dei campioni di riferimento e elevati moduli degli estensimetri.

#### **5.4.2 Influenza della geometria dell'estensimetro**

Come già spiegato in precedenza nel sottoparagrafo (5.3.2), nel considerare l'influenza della geometria dell'estensimetro, data la larghezza della geometria del campione che si considera e il limitato effetto dello spessore dell'estensimetro, si andrà a valutare solo l'effetto della griglia attiva, avendo modellato l'estensimetro con un modulo spalmato sull'intera lunghezza, si andrà quindi a vedere come varia l'effetto di rinforzo con la lunghezza dell'estensimetro. Come per il modello 2D l'analisi è stata fatta considerando sempre la stessa geometria del campione di riferimento, per l'estensimetro di tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT con modulo stimato di 9592 MPa, ottenendo il seguente andamento del coefficiente correttivo al variare di  $L_{sg}$ :

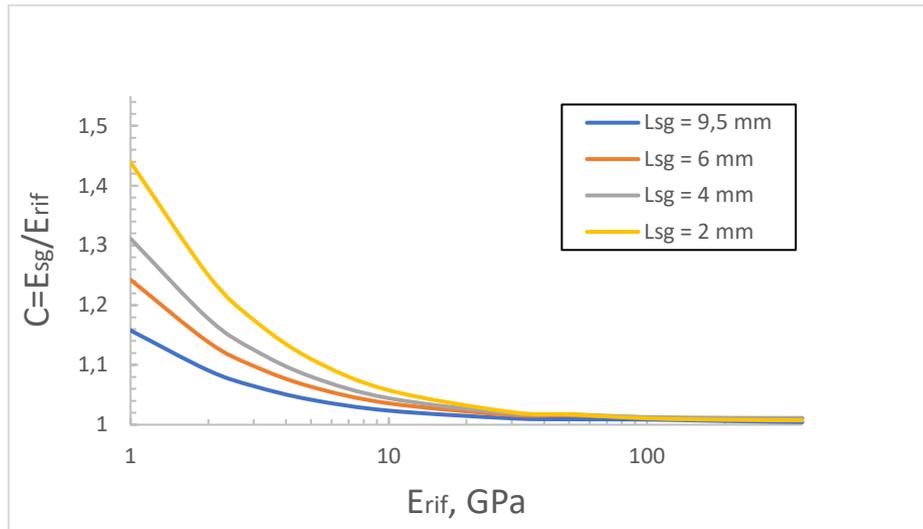


Figura 38: Risultati modello 3D al variare della lunghezza dell'estensimetro.

Si ha anche questa volta come si vedere in figura 38 un andamento analogo a quanto visto per il modello 2D, dove al crescere della lunghezza dell'estensimetro  $L_{sg}$  il coefficiente correttivo diminuisce significativamente a parità di modulo del campione di riferimento. Considerando anche in questo caso due moduli del campione di riferimento, uno da 1 GPa e uno da 10 GPa, si riportano di seguite due tabelle che mostrano come varia il coefficiente correttivo passando dal modello 2D a quello 3D al variare di  $L_{sg}$ :

Lsg [mm]	2	4	6	9,5
Modello 2D	1,189	1,155	1,138	1,115
Modello 3D	1,439	1,311	1,242	1,154

Tabella 8: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1$  GPa al variare di  $L_{sg}$ .

Lsg [mm]	2	4	6	9,5
Modello 2D	1,028	1,027	1,026	1,022
Modello 3D	1,058	1,044	1,036	1,024

Tabella 9: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10$  GPa al variare di  $L_{sg}$ .

Come è visto nel caso dell'influenza dovuta alla variazione dei moduli del campione di riferimento e dell'estensimetro, anche in questo caso la differenza tra i due modelli 2D e 3D è tanto maggiore quanto è grande l'effetto di rinforzo, il che significa, per  $L_{sg}$  bassi e bassi moduli del campione di riferimento. L'effetto di  $L_{sg}$  è dovuto come già spiegato precedentemente agli effetti di bordi che pesano in

maniera rilevante per estensimetri con una lunghezza contenuta. Si riporta di seguito l'andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro al variare di  $L_{sg}$ , considerando sempre gli stessi parametri usati per il grafico di figura 38 con un modulo elastico del campione prefissato di 3030 MPa:

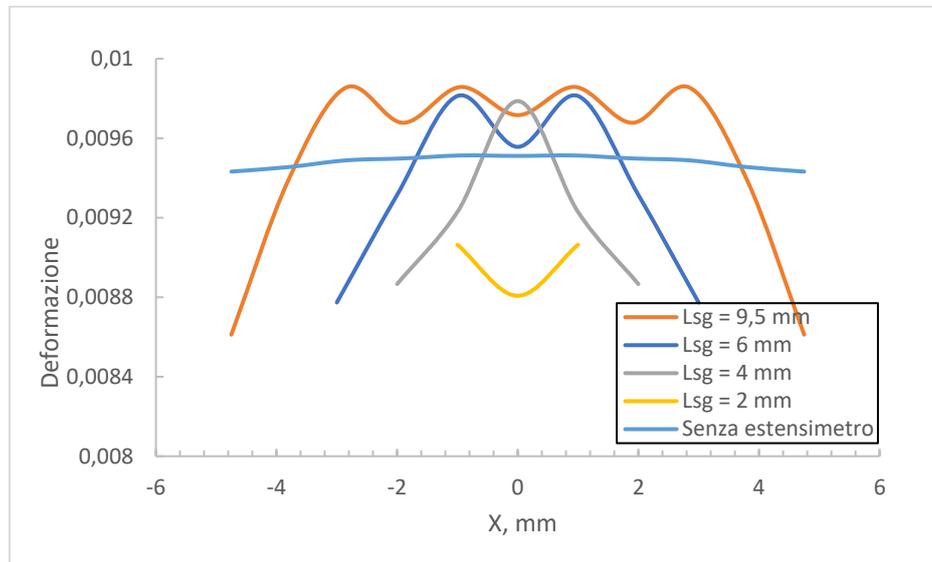


Figura 39: Risultati modello 3D, andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro al variare di  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$  e  $E_{rif} = 3030 \text{ MPa}$ .

Dal grafico di figura 39 si può facilmente notare un andamento simile al caso 2D per i vari valori di  $L_{sg}$ , ad eccezione dell'andamento delle deformazioni del caso senza estensimetro che non è più costante nel modello 3D, in quanto entra in gioco l'effetto della profondità non considerato nel modello 2D. Per visualizzare meglio le differenze tra i due modelli, considerando sempre gli stessi dati usati per i due modelli 2D e 3D, si riporta di seguito un grafico con i soli andamenti dei casi senza estensimetro e quelli con estensimetro per una  $L_{sg} = 9,5 \text{ mm}$ :

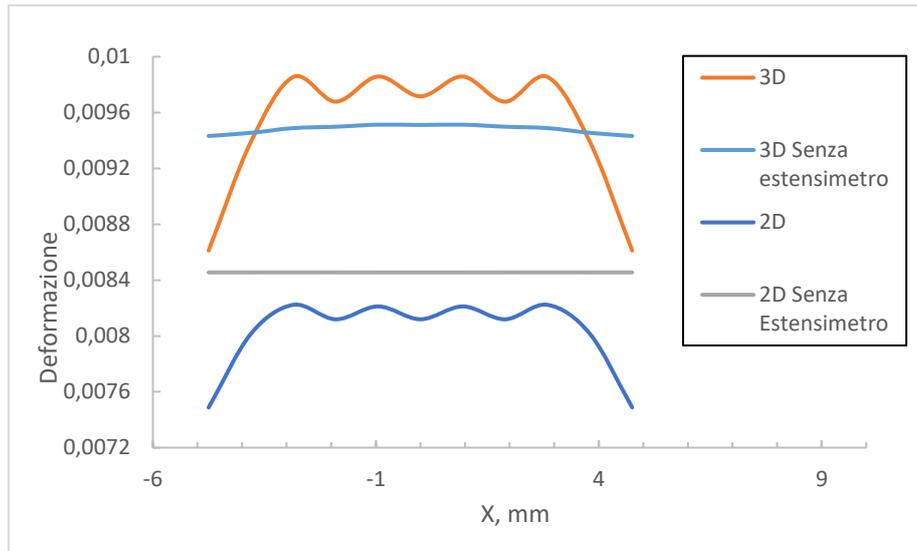


Figura 40: Confronto 2D, 3D dell'andamento delle deformazioni lungo  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$  e  $E_{rif} = 3030 \text{ MPa}$ .

Dall'andamento delle curve in figura 40, la prima cosa che si nota è che le deformazioni lungo l'estensimetro per il modello 2D risultano inferiori a quelli del 3D, a conferma di quanto visto in figura 37 dove per valori di modulo di riferimento inferiori a 10 GPa, il coefficiente correttivo del modello 3D risultava superiore a quello del 2D. Tornando all'andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro in figura 40, si può notare come per il caso 3D i due andamenti con e senza estensimetro sono più vicini, con addirittura valori più alti per le deformazioni rilevate dall'estensimetri nella parte centrale. Da quanto appena detto si può capire ancora meglio la rilevanza dell'effetto dei bordi, dato che una volta che si fa la media delle deformazioni con la parte centrale e quest'ultimi, la deformazione dell'estensimetro risulta inferiore a quella ottenuta senza estensimetro.

### 5.4.3 Influenza della geometria del campione

Come già spiegato nel sottoparagrafo (5.3.3) si va a considerare come parametro geometrico del campione solo lo spessore. Allo stesso modo del modello 2D si considera come larghezza e lunghezza del campione di prova quelli riportati in tabella 2, e come estensimetro GFLAB-3-350-70-1LJCT-F con un modulo stimato di 9592 MPa e geometria pari a quella riportata nella tabella 4. Viene adesso riportato di seguito l'andamento del coefficiente correttivo del modello 3D al variare dello spessore e del modulo elastico del campione di riferimento:

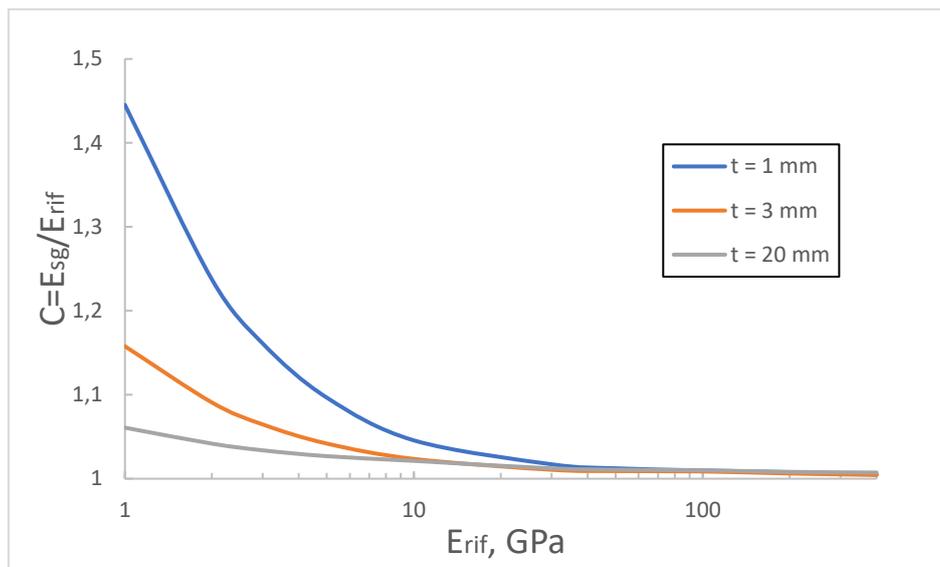


Figura 41: Risultati modello 2D, al variare dello spessore del campione per un estensimetro con  $L_{sg} = 9,5 \text{ mm}$  e  $E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$ .

L'andamento del coefficiente correttivo in figura 41 è analogo a quanto visto per il modello 2D in figura 34. Si ha anche in questo caso a parità di modulo dei campioni di riferimento una grande crescita del coefficiente correttivo al diminuire del loro spessore. Si riportano di seguito due tabelle per il confronto con il modello 2D, considerando due moduli per i campioni di riferimento, 1 GPa e 10 GPa:

Lsg [mm]	1	3	20
Modello 2D	1,335	1,115	1,035
Modello 3D	1,445	1,154	1,061

Tabella 10: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1 \text{ GPa}$  al variare dello spessore del campione  $t$ .

t [mm]	1	3	20
Modello 2D	1,044	1,022	1,017
Modello 3D	1,046	1,024	1,021

Tabella 11: Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10 \text{ GPa}$  al variare dello spessore del campione  $t$ .

Le tabelle 10 e 11 confermano ancora una volta che si ottengono valori più elevati con il modello 3D. Si può notare che anche in questo caso la differenza maggiore tra i due modelli si ha dove l'effetto di rinforzo è più marcato, che in questa circostanza vuole dire per bassi moduli e spessore del campione di riferimento.

Verranno riportati di seguito una serie di figure estrapolati da MSC Patran, in modo da visualizzare meglio come varia l'effetto di rinforzo

con lo spessore. Si va a considerare un estensimetro con  $L_{sg} = 9,5 \text{ mm}$  e  $E_{sg} = 9592 \text{ MPa}$  e un campione di riferimento con modulo  $E_{rif} = 1 \text{ GPa}$ :

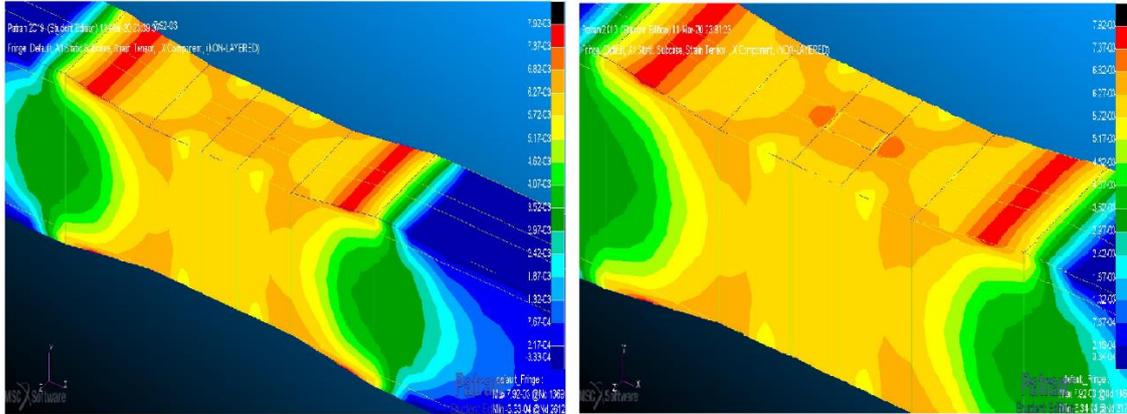


Figura 42: Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 20 \text{ mm}$ , senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.

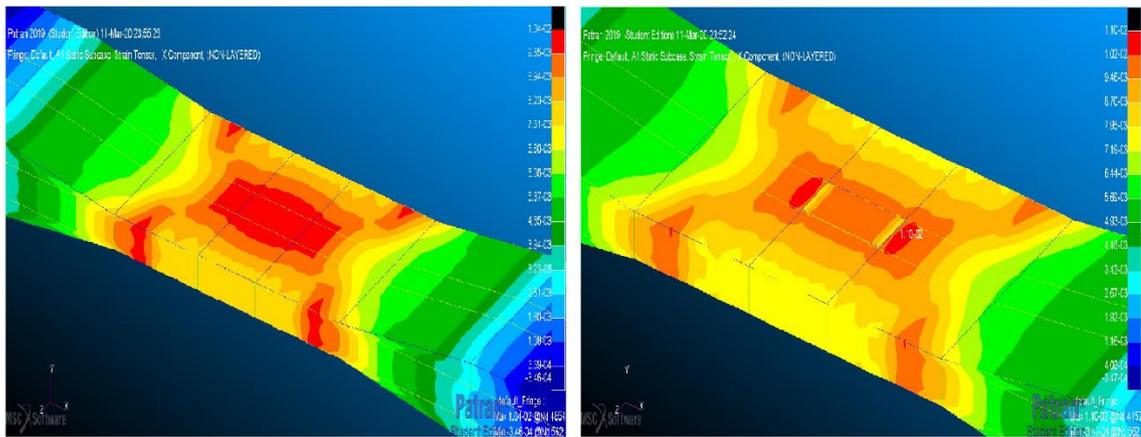


Figura 43: Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 3 \text{ mm}$ , senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.

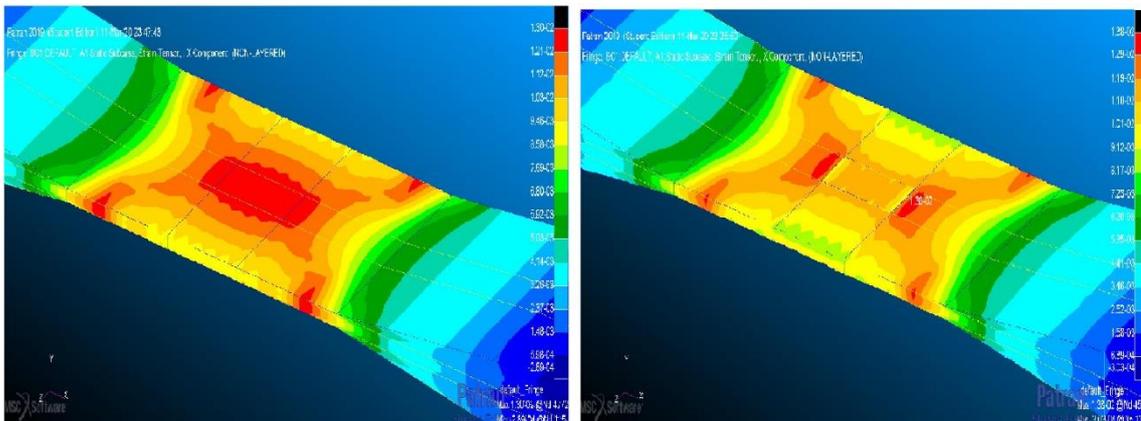


Figura 44: Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 1 \text{ mm}$ , senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.

Come si può vedere nelle figure 42, 43 e 44 confrontando il modello senza e con estensimetro ai vari spessori, si può notare come l'effetto di rinforzo dovuto all'estensimetro cresce al diminuire dello spessore confermando ancora una volta quanto già detto precedentemente.

### **5.5 Modello 3D con due estensimetri**

Questo modello è stato realizzato per verificare se applicando due estensimetri questi si influenzano, in modo da decidere quale configurazione usare per le prove sperimentali. Per ovvie ragioni in questo caso si considera solo il modello 3D, in quanto con quello 2D non si riuscirebbero a rappresentare due estensimetri, non essendo considerata la larghezza nel modello.

L'idea di usare due estensimetri anziché uno, serve per ovviare ad un eventuale disallineamento nell'applicazione dell'estensimetro sul campione di prova, in modo da poter mediare i due dati e mitigare tale errore.

Per quanto riguarda le geometrie del campione di prova e dell'estensimetro, si considerano sempre le dimensioni riportati nelle tabelle 2,3 e 4. Invece come modulo elastico dell'estensimetro si va a considerare in questa analisi solo quello stimato per il tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F, in quanto questo studio ha solo lo scopo di decidere sulla possibilità di adoperare due estensimetri piuttosto che uno. Per il posizionamento degli estensimetri sul campione di prova, si è deciso di incollare ciascuno a 2,5 mm dai bordi lungo la larghezza di 25 mm e sempre al centro per quanto riguarda la lunghezza. Si va riportare adesso nella tabella seguente, un confronto dei valori del coefficiente correttivo tra i due modelli 3D con uno e due estensimetri, andando a considerare diversi valori di modulo elastico del campione di riferimento:

$E_{rif}$ [GPa]	Modello 3D con 1 estensimetro	Modello 3D con 2 estensimetri
1	1,154	1,270
2	1,085	1,145
3	1,060	1,101
4	1,046	1,078
10	1,024	1,036

Tabella 12: Confronto del coefficiente correttivo per i due modelli 3D con 1 e 2 estensimetri.

I dati riportati in tabella 12 dimostrano chiaramente l'effetto di rinforzo aggiuntivo dovuto alla presenza del secondo estensimetro. Si può notare anche che tale effetto diminuisce al crescere del modulo del campione considerato. Dovendo utilizzare un campione di prova in PLA stampato in FDM, dalla letteratura si ha che un provino ottenuto in questa maniera, ha un modulo elastico intorno ai 3 GPa, quindi dai dati riportati in tabella 12 si evince che la scelta corretta è quella di utilizzare un solo estensimetro.

Si riportano le figure seguenti con 1 e 2 estensimetri, in modo da visualizzare meglio come nel caso di due estensimetri questi interagiscono tra di loro, considerando a parità dei parametri precedentemente determinati un modulo elastico del campione di prova di 3030 MPa, che è come già anticipato quello ottenuto dalle prove sperimentali che verranno analizzati più in dettaglio subito dopo nel capitolo 6. Si ha quindi:

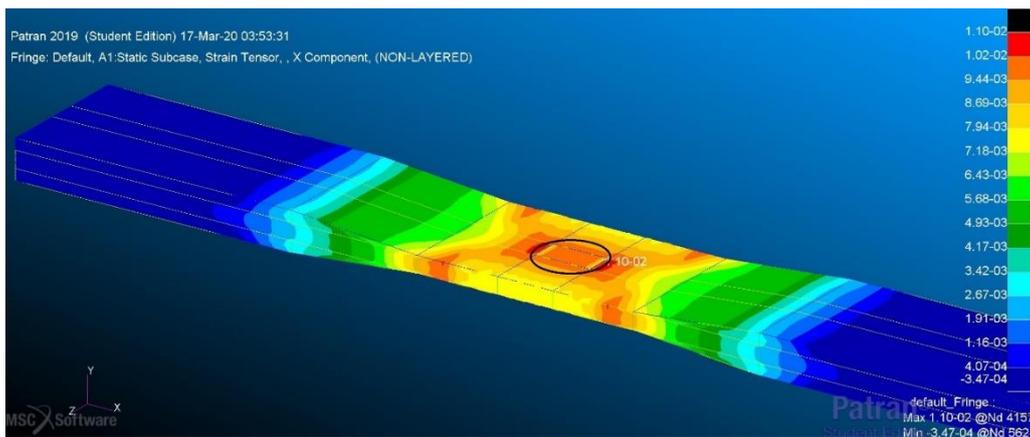


Figura 45: Modello 3D andamento delle deformazioni con 1 estensimetro.

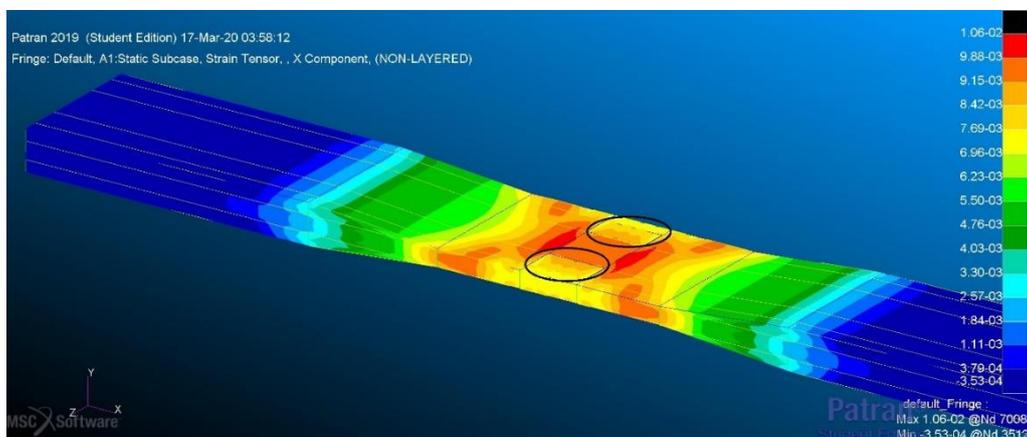


Figura 46: Modello 3D andamento delle deformazioni con 2 estensimetri.

Dalla figura 46 si può notare come nella due zone di applicazione degli estensimetri evidenziati, non si ha un andamento delle deformazioni regolare lungo la larghezza dei due estensimetri, a differenza di quanto si può osservare in figura 45 nel caso di un solo estensimetro. Segno questo dell'influenza che i due estensimetri esercitano l'uno sull'altro.

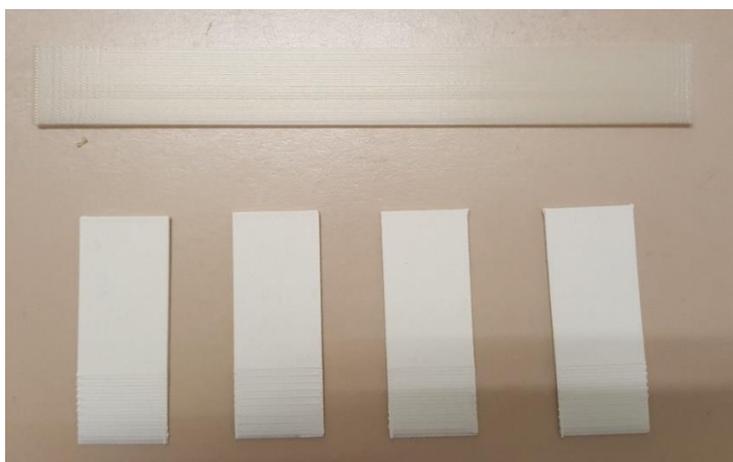
## ***6 Analisi dei dati sperimentale***

In questo capitolo si vuole andare a confermare la presenza dell'effetto di rinforzo, per dei campioni di prova prodotti tramite la tecnologia FDM, quando si utilizza come strumento di misurazione per le deformazioni un estensimetro. Effetto questo precedentemente illustrato nel capitolo 3 e analizzato in maniera dettagliata tramite i modelli FEM nel capitolo 5. Si procederà innanzitutto a dare una panoramica della strumentazione usata per la produzione e la preparazione dei campioni e quella utilizzata per condurre la prova. Si proseguirà poi con una piccola parentesi riguardante la DIC (Digital Image Correlation) che è la tecnica adoperata oltre agli estensimetri per determinare le deformazioni durante le prove di trazione. Si procederà poi a definire l'impostazione delle prove effettuare, per poi andare a definire un modulo elastico per i campioni ottenuti con la tecnologia di stampa FDM. Infine si riporteranno i dati ottenuti da ulteriori prove di trazione per dei campioni con estensimetro applicato, in modo da definire l'effetto di rinforzo.

### ***6.1 Strumentazione***

#### ***Stampanti 3D***

Per la realizzazione di ogni campione di prova come già spiegato in precedenza nel sottoparagrafo (4.1) si ha bisogno di due elementi, il provino con le caratteristiche dimensionali riportati in tabella 2 e i 4 tabs da incollare su ciascun provino con le caratteristiche in tabella 3. Si riporta di seguito un'immagine del provino e dei tabs:



*Figura 47: Provino e i 4 tabs.*

Per la produzione del provino si è utilizzato la stampante 3D Next Generation della Sharebot riportata di seguito:



Figura 48: Stampante Next Generation della Sharebot.

Dal manuale della Sharebot Next Generation si riportano di seguito le varie caratteristiche tecniche della stampante:

<b>Modello</b>	<i>Next Generation</i>
<b>Tecnologia di stampa</b>	<i>Fused Deposition Modelling</i>
<b>Volume di stampa mono estrusore</b>	<i>250*200*200mm (+/- 5 mm)</i>
<b>Volume di stampa bi-estrusore</b>	<i>180*200*200 (+/- 5 mm)</i>
<b>Risoluzione di posizionamento teorica X e Y</b>	<i>0,06 mm</i>
<b>Risoluzione di posizionamento Z</b>	<i>0,0025 mm</i>
<b>Diametro foro di estrusione</b>	<i>0.35 mm</i>
<b>Diametro filamento da estrarre</b>	<i>1,75 mm</i>
<b>Temperature ottimali di estrusione PLA</b>	<i>200-230°C</i>
<b>Materiali</b>	ABS, ABS Plus, PLA, Nylon, Poliuretano Termoplastico(TPU), Polistirene, Cristal Flex, PLA Flex, PLA Thermosense, PET
<b>Temperatura massima del piatto</b>	<i>90°C</i>

Tabella 13: Scheda tecnica Next Generation della Sharebot.

Per produrre i tabs invece si è utilizzato la DX della Creatbot qui di seguito riportata:



Figura 49: Stampante DX della Creatbot.

Con le varie caratteristiche riassunti nella tabella seguente:

<b>Modello</b>	<b>DX</b>
<b>Tecnologia di stampa</b>	<i>Fused Deposition Modelling</i>
<b>Volume di costruzione</b>	<i>300*250*300mm</i>
<b>Piattaforma di costruzione</b>	<i>Vetroceramica</i>
<b>Numero ugelli</b>	<i>2</i>
<b>Velocità di stampa</b>	<i>Max 120mm/s</i>
<b>Temperatura di estrusione</b>	<i>Max 350°C</i>
<b>Temperature della piattaforma</b>	<i>Max 120°C</i>
<b>Temperatura della camera</b>	<i>15-32°C</i>
<b>Tipo di file di input</b>	<i>STL, OBJ, Gcode, Amf</i>
<b>Materiali</b>	PLA, ABS, Nylon(PA), Carbon Fiber, TPU, PC, PTEG, PVA, ecc
<b>Diametro del filamento</b>	3,00 mm (1,75mm opzionale)
<b>Precisione della posizione</b>	X/Y: 12,7µm Z: 1,25µm

Tabella 14: Scheda tecnica Stampante DX della Creatbot.

Come materiale si è utilizzato sia per i provini che per i tabs un PLA di colore bianco trasparente, fabbricato dalla Verbatim che si presenta sotto forma di un

rotolo di filamento, con un range di temperatura di stampa di 200-220°C e un diametro di 1,75mm +/-0,02mm.

### Estensimetro

Come già stato riportato in precedenza in varie occasioni nel capitolo 5, l'estensimetro utilizzato durante le prove di trazione è il tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab. riportato nella figura seguente:

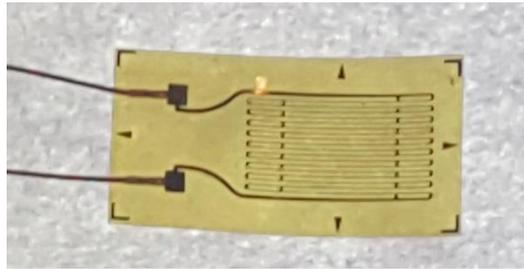


Figura 50: Estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F.

Le caratteristiche dell'estensimetro in figura 42 sono i seguenti:

<b>Modello</b>	GF LAB-3
<b>Lunghezza della griglia attiva</b>	3 mm
<b>Larghezza della griglia attiva</b>	2,9 mm
<b>Lunghezza supporto</b>	9,5 mm
<b>Larghezza supporto</b>	5 mm
<b>Resistenza</b>	350 $\Omega$

Tabella 15: Caratteristiche estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F.

### Adesivi

Per l'incollaggio dei tabs ai provini si è utilizzato il Salda rapido mixer, un adesivo epossidico bicomponente della BOSTIK, che richiede un tempo di polimerizzazione di 1 ora. Ha una buona capacità riempitiva, di resistenza all'umidità e resiste alle temperature da -40°C a +100°C. Mentre per l'incollaggio degli estensimetri ai campioni di prova si è utilizzato Loctite 60 secondi, un adesivo universale monocomponente della Henkel.

Viene riportata nella figura seguente un campione di prova assemblato con l'estensimetro incollato:

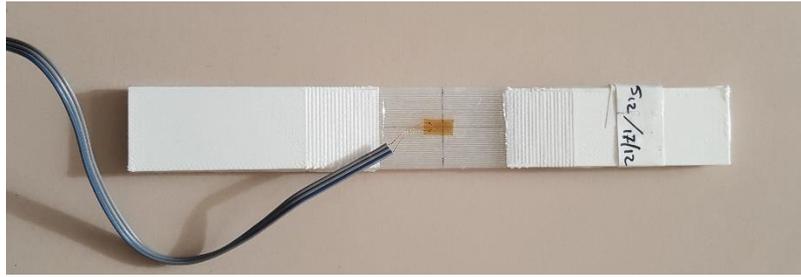


Figura 51: Campione di prova con estensimetro.

### Macchina per la trazione

La macchina di prova adoperata per effettuare le prove di trazione è la *MTS QTest/ 10 Elite Controller* riportata nella figura seguente:



Figura 52: MTS QTest/ 10 Elite Controller.

Nella tabella seguente si riportano alcune caratteristiche della *MTS QTest/ 10 Elite*:

Specifiche	
Software	MTS Testworks
Capacità	10 kN
Corsa della traversa	1016 mm
Larghezza tra le colonne	406 mm
Velocità massima	1016 mm/min
Velocità minima	0,025 mm/min
Velocità di ritorno	1016 mm/min
Capacità alla velocità massima	100%
Precisione della velocità	0,25%
Rigidità telaio	123 kN/mm
Caratteristiche dimensionali	
Altezza	1702 mm
Larghezza	661 mm
Profondità	508 mm
Peso	109 kg

Tabella 16: Caratteristiche tecniche MTS QTest/ 10 Elite Controller.

## 6.2 Digitale Image Correlation

Per determinare le deformazioni a cui sono soggetti i provini durante le prove di trazione, si è utilizzato la tecnica della Digitale Image Correlation (DIC), che consiste nel mettere in correlazione due immagini digitali successive, in maniera da misurare gli spostamenti e le deformazioni. Per realizzare quanto appena detto, vengono tracciate in immagini consecutive diversi riferimenti, che permettono di realizzare delle matrici di punti grazie ai quali utilizzando un algoritmo di correlazione, si ha la possibilità di misurare gli spostamenti e le deformazioni [41]. Ci sono tre tipologie di tecniche DIC:

- DIC-2D: si utilizza quando si ha la necessità di fare misurazioni solo nel piano, quindi necessita dell'utilizzo di una sola videocamera.
- DIC-3D: si utilizza quando bisogna misurare gli spostamenti sia in piano che fuori dal piano e necessita dell'utilizzo di due videocamere.
- DIC-3D volumetrica: si utilizza per effettuare misurazioni all'interno dell'elemento considerato. Ciò viene realizzato all'utilizzo di sistemi tomografici a raggi x [41].

Dato che nel presente elaborato si vuole determinare la presenza dell'effetto di rinforzo, si ha che l'unica grandezza di interesse è la deformazione, da definire nella stessa zona con due tecniche di misurazione, in quanto l'estensimetro è applicato

solo da un lato la tecnica DIC-2D è più che sufficiente. Nel proseguo la tecnica DIC-2D verrà chiamata semplicemente DIC.

La procedura da seguire per determinare le deformazioni con le tecniche DIC consiste in:

1. Preparazione del campione di prova con l'applicazione di uno strato di vernice bianca uniforme, passaggio non necessario per i provini utilizzati in questo elaborato, in quanto come già mostrato in figura 47 sono già di color bianco trasparente; nel caso si applicasse la vernice bianco è necessario attendere la sua asciugatura, per poi applicare tramite uno spray di colore nero una serie di goccioline in modo da creare un motivo casuale sulla superficie del campione e aumentare il contrasto tra il bianco e il nero. Grazie a questa preparazione della superficie dei campioni viene garantita la correlazione tra immagini consecutive e deformazioni in fase di elaborazione dei dati. È consigliabile l'esecuzione della prova subito l'applicazione della vernice, in modo da evitare una volta secca, problemi dovuti alla scrostatura a causa delle deformazioni [41].
2. Registrazione della prova con una videocamera che viene chiamata videoestensimetro in questo processo.
3. Elaborazione dei dati per ottenere dalle immagini gli spostamenti e le deformazioni. In questa fase si utilizzano degli algoritmi di correlazione, con i quali si va ad ottenere un riconoscimento globale di un'immagine con un motivo casuale, che si ottiene grazie alla preparazione della superficie del provino descritta nel punto 1. Analizzando a questo punto la posizione delle goccioline tra due immagini successive si riescono a definire spostamenti e deformazioni.

I dati che verranno riportati nel proseguo di questo elaborato, riferiti all'analisi delle immagini con la tecnica DIC, sono stati estrapolati grazie al co-relatore di questa tesi Ing. Roberto Torre.

### ***6.3 Impostazione delle prove di trazione***

Verranno effettuati due serie di test ciascuna con 10 provini, dove nella prima si utilizzano campioni di prova senza estensimetro per determinare il modulo elastico,

mentre nella seconda serie di test si va a determinare la presenza dell'effetto di rinforzo. Le prove senza estensimetro servono per determinare un modulo elastico con la certezza di non essere influenzato dall'estensimetro. Per entrambi i gruppi di provini verrà utilizzata la tecnica DIC per definire le deformazioni, con l'aggiunta per il secondo gruppo delle deformazioni ottenuti dall'estensimetro in modo da definire l'effetto di rinforzo. Dove per la caratterizzazione dei vari campioni di prova si va a considerare solo il tratto lineare.

### ***6.3.1 Analisi dimensionale dei provini***

Si va adesso ad analizzare i due gruppi di provini per determinare i valori reali delle dimensioni caratteristiche, e valutare la bontà del processo di fabbricazione. Per le misurazioni geometriche delle dimensioni dei campioni si è utilizzato un calibro digitale, ottenendo:

#### *Provini per le prove senza estensimetro*

Nella tabella seguente vengono riportati le dimensioni effettive di larghezza e spessore di ciascuno provino:

<b>n°</b>	<b>Larghezza</b>	<b>Spessore</b>
1	25,14	3,07
2	25,14	3,04
3	25,16	3,01
4	25,10	3,01
5	25,11	3,00
6	25,14	3,05
7	25,15	3,08
8	25,11	3,07
9	25,12	3,04
10	25,08	3,05
<b>Nominale</b>	<b>25</b>	<b>3</b>

*Tabella 17: Dimensioni effettive dei provini del 1° gruppo, con tutti i valori in mm.*

Si sono ottenuti sia per la larghezza che per lo spessore valori leggermente superiori a quello nominale. Dove per la larghezza è stato trovato un valore medio di 25,12 con una deviazione standard di 0,0259, mentre lo spessore aveva un valore medio di 3,04 e una deviazione standard 0,0289.

### Provini per le prove con estensimetro

Le dimensioni effettive di larghezza e spessore di ciascun provino sono riportati nella tabella seguente:

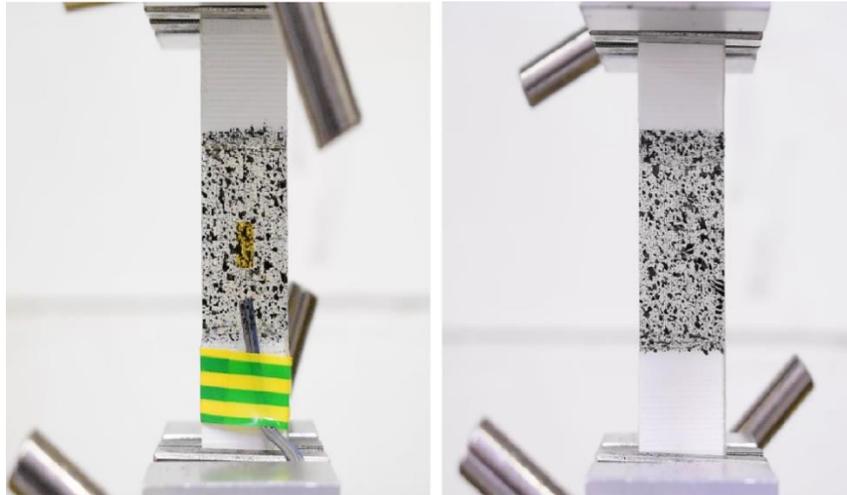
<b>n°</b>	<b>Larghezza</b>	<b>Spessore</b>
1	25,10	3,00
2	25,09	2,95
3	25,12	3,02
4	25,13	2,96
5	25,16	2,99
6	25,05	2,98
7	25,02	3,02
8	25,19	2,98
9	25,15	2,97
10	25,12	3,04
Nominale	25	3

Tabella 28: Dimensioni effettive dei provini del 2° gruppo, con tutti i valori in mm.

In questo caso si è ottenuto un valore medio della larghezza di 25,12 in linea con il primo gruppo di provini, ma con una deviazione standard un po' più alta e pari a 0,066. Invece per quanto riguarda lo spessore, il valore medio è di 2,99 leggermente inferiore a quello nominale, con una deviazione standard di 0,0284.

### **6.3.2 Impostazione del test**

Prima di posizionare i campioni nella macchina di prova, sono stati applicati su ciascuno tramite uno spray di colore nero una serie di goccioline, in modo da creare come già spiegato in precedenza la superficie con motivo casuale e sfruttare la tecnica di misurazione DIC. Si riportano di seguito un campione di prova con e uno senza estensimetro posizionati sulla macchina di prova, dove viene evidenziato il tratto centrale con le goccioline:



*Figura 53: Campioni posizionati sulla macchina di prova, con estensimetro a sinistra e senza a destra.*

Il nastro di color giallo-verde in figura 53 ha come ruolo semplicemente quello di tenere fermi i fili dell'estensimetro. I campioni di prova sono stati posizionati verticalmente in corrispondenza degli afferraggi, con il quale vengono serrati alla macchina di prova in maniera manuale, verificando che il loro asse principale fosse allineato con la direzione di applicazione del carico. Durante la prova viene sottoposto il campione a trazione, dove si è impostato una velocità della traversa mobile costante pari a 5 mm/min. Mediante una videocamera la prova viene registrata in modo da poter estrapolare le deformazioni con la tecnica DIC, procedendo poi a sincronizzare i dati ottenuti in questa maniera con quelli che vengono estratti dal software dedicato MTS TestWorks. Da quest'ultimo viene ricavata la forza applicata all'avanzare della prova, dividendo poi tale forza per l'area della sezione trasversale reale che si ottiene moltiplicando larghezza per spessore reali precedentemente riportati. Per quanto riguarda i provini con estensimetro, la deformazione viene ricavata sia dalla DIC che dall'estensimetro. I dati così ottenuti vengono importati ed elaborati su Excel, ottenendo delle curve sul diagramma sforzo-deformazione in modo da valutare il tratto lineare e definire il modulo elastico cercato. Con i valori così ricavati viene condotto uno studio statistico per definire se seguono una distribuzione normale o meno, in modo da individuare eventuali valori anomali da escludere. Infine si va a valutare valore medio e deviazioni standard per ogni gruppo di dati.

## 6.4 Risultati

Si andrà adesso a riportare i risultati ottenuti per i due gruppi di provini, dove per il primo si hanno solo le deformazioni ottenuti solo con la DIC, mentre per il secondo gruppo si hanno due serie di dati, quelli ricavati tramite la DIC e quelli acquisiti dagli estensimetri. Per tutti i dati si procederà a determinare media e deviazione standard, andando con l'ausilio del software di analisi statistica Minitab anche a verificare per ogni serie di dati se i risultati seguono una distribuzione normale, in modo da individuare eventuali anomalie da escludere.

### 6.4.1 Risultati DIC per provini senza estensimetro

Per determinare il modulo elastico di ciascun provino, bisogna tenere conto solo del tratto lineare iniziale delle curve nel diagramma tensione-deformazione ( $\sigma$ - $\epsilon$ ); in quanto ciascun provino ha un tratto lineare di lunghezza diversa, si sono analizzate tutti le curve in maniera da individuare la curva con il tratto lineare più corto determinandone la deformazione, per poi applicarlo come limite anche alle altre curve. Rendendo così tutti i valori del modulo elastico che si ottengono paragonabili. Viene di seguito riportato il diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  dei dati sperimentali analizzati con la DIC, riguardanti il primo gruppo di provini senza estensimetri applicati:

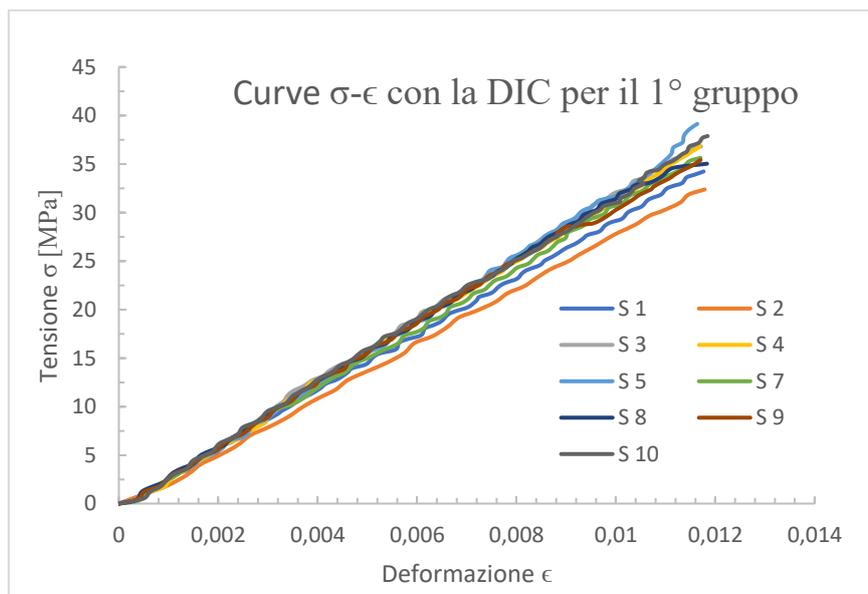


Figura 54: Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini senza estensimetro, dati della DIC.

Dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di figura 54 si può notare la mancanza della curva 6, quest'ultima non è riportata in quanto i dati del provino 6 hanno mostrato un andamento anomalo e discontinuo, il che ha portato a dover escludere tale curva dalla trattazione dei dati.

Vengono riportati adesso i moduli elastici di tutti i provini ricavati grazie al diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di figura 54, dove in base all'equazione della linea di tendenza di ciascuna curva si ottengono i seguenti moduli:

n°	E [MPa]
1	2871,5
2	2734,7
3	3085,8
4	3123,2
5	3167,1
6	\
7	2969,4
8	3147,3
9	3010,9
10	3161

*Tabella 19: Moduli elastici dei provini senza estensimetro ricavati con la DIC.*

Per i valori del modulo elastico riportati in tabelle 19 si è eseguito il test di normalità tramite Minitab, in modo da verificare se si può affermare che tali dati seguono una distribuzione normale. Viene riportata di seguito una figura estrapolata da Minitab con vari grafici, nel quale non avendo dati riguardante il provino 6, il numero 7 è riportato con il 6, l'8 con il 7 e così via:

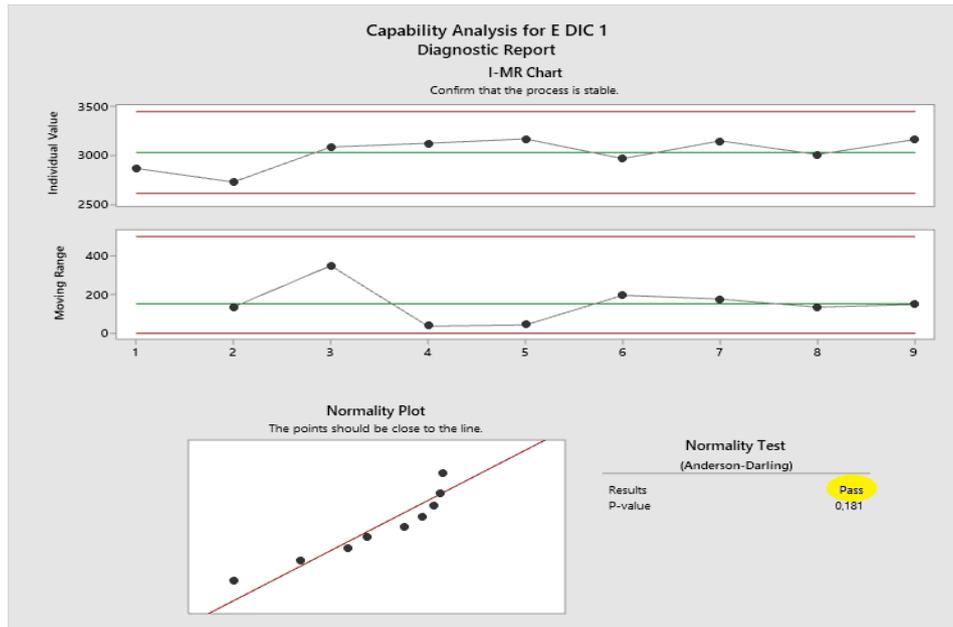


Figura 55: Test di normalità e carta di controllo I-MR dati DIC per provini senza estensimetro.

Come è evidenziato in giallo in figura 55, Minitab ha dato esito positivo per il test di normalità effettuato sui dati della tabella 19. Dalla carta di controllo I-MR per misurazioni individuali, che viene impostata automaticamente da Minitab, si può notare come tutti i dati rientrano nei limiti di controllo anch'essi definiti in modo autonomo dal software di analisi. Il che vuole dire che processo adottato per definire i moduli elastici dei provini era sotto controllo.

Sempre mediante Minitab si sono ricavati modulo elastico medio e deviazione standard riportati di seguito:

$$E_{DIC1} = 3030,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Deviazione standard} = 149,11 \text{ MPa}$$

## 6.4.2 Risultati provini con estensimetro

### 6.4.2.1 Risultati della DIC

Si va adesso ad analizzare il secondo gruppo di provini sui i quali è stato applicato un estensimetro, un esempio è mostrato in figura 51 precedentemente riportata. L'analisi verrà fatta in modo analogo a quanto visto nel sottoparagrafo (6.4.1). Anche in questo caso per la costruzione del diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$ , è stata definita la

deformazione da tenere come riferimento per tutti i provini, considerando quello con il tratto lineare più corto, così da avere moduli elastici paragonabili a parità di deformazione. Si riporta di seguito il diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  del secondo gruppo, con deformazioni ricavati utilizzando la DIC:

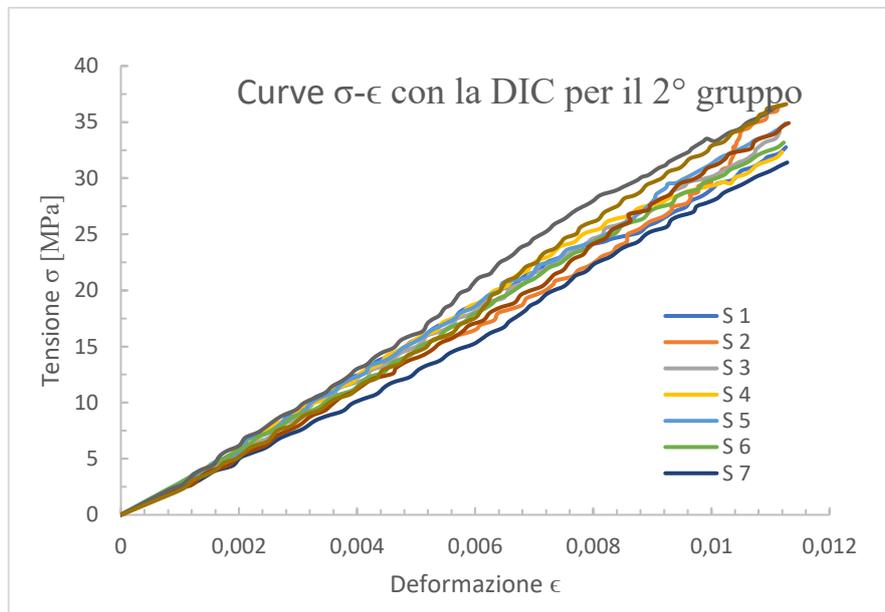


Figura 56: Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini con estensimetro, dati della DIC.

In questo caso nessuno dei risultati ha mostrato delle anomalie. Si procede adesso a riportare i moduli elastici di tutti i provini ricavati dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di figura 56, come precedentemente riportato in base all'equazione della linea di tendenza di ciascuna curva si ottengono i vari moduli scritti di seguito:

n°	E [MPa]
1	2962,9
2	2904,6
3	3041,8
4	2995
5	3121,3
6	2975,9
7	2688,3
8	3021,9
9	3374,4
10	3206,2

Tabella 20: Moduli elastici dei provini con estensimetro ricavati con la DIC.

In modo analogo all'analisi precedente, si va adesso ad eseguire il test di normalità anche per i dati in tabella 20. Si riporta di seguito quanto ottenuto da Minitab:

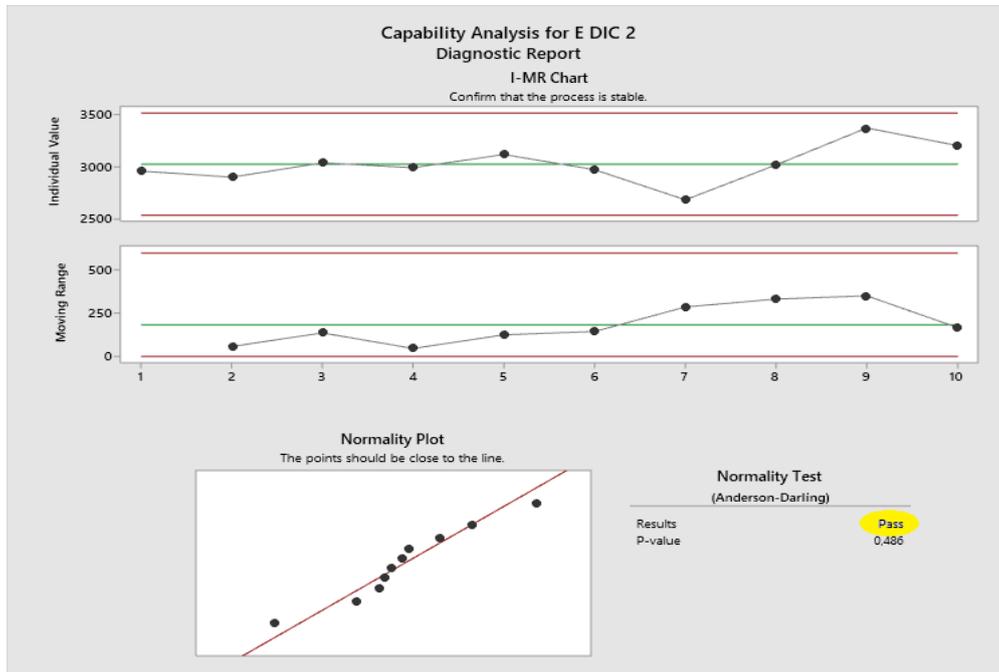


Figura 57: Test di normalità e carta di controllo I-MR dati DIC per provini con estensimetro.

Anche per questa serie di valori del modulo elastico il test di normalità risulta passato, come si vede evidenziato in giallo in figura 57. In modo simile a quanto visto prima, dalle carte di controllo si può concludere che anche in questo caso il processo adottato per definire i moduli elastici dei provini risulta essere stato sotto controllo.

Sono stati poi definiti sempre tramite il software di analisi statistica Minitab il modulo elastico medio e la deviazione standard, che sono riportati di seguito:

$$E_{DIC2} = 3029,2 \text{ MPa}$$

$$\text{Deviazione standard} = 182,37 \text{ MPa}$$

Il valore del modulo elastico appena riportato è in linea con quanto ricavato per il primo gruppo di provini, dove non erano applicati gli estensimetri. In base al valore del modulo elastico medio ricavato e ai modelli FEM visti nel capitolo 5, la presenza dell'estensimetro dovrebbe comportare un effetto di rinforzo locale. In accordo con quanto appena detto il valore del modulo elastico  $E_{DIC2}$  ricavato, non

risente della presenza dell'estensimetro, in quanto la tecnica di misurazione DIC fa una lettura delle deformazioni che comprende l'intera superficie del provino, di conseguenza è pressoché insensibile agli effetti locali dell'estensimetro. Questo risultato dimostra anche come l'effetto globale è praticamente inesistente.

La deviazione standard ottenuta risulta essere più elevata del caso precedente, denotando una maggior dispersione dei dati.

### 6.4.2.2 Risultati dell'estensimetro

Anche questa volta si procederà seguendo lo stesso schema visto per i due casi precedenti. Dato però che in questo caso si stanno considerando sempre gli stessi provini del secondo gruppo analizzati nel sottoparagrafo (6.4.2.1), e dovendo poi confrontare quest'ultimi con i dati che si otterranno con l'estensimetro, si andrà a considerare come tensione di riferimento per ciascun provino quella che si ricava dal diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di figura 56 a deformazione massima riportata. Quanto appena detto ha lo scopo di verificare la presenza dell'effetto di rinforzo, in quanto a parità di tensione applicata si può verificare se tale effetto è presente, in base alle deformazioni misurate dei due strumenti DIC e estensimetro. Si procede adesso a riportare il diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  considerando le deformazioni ottenuti con l'estensimetro:

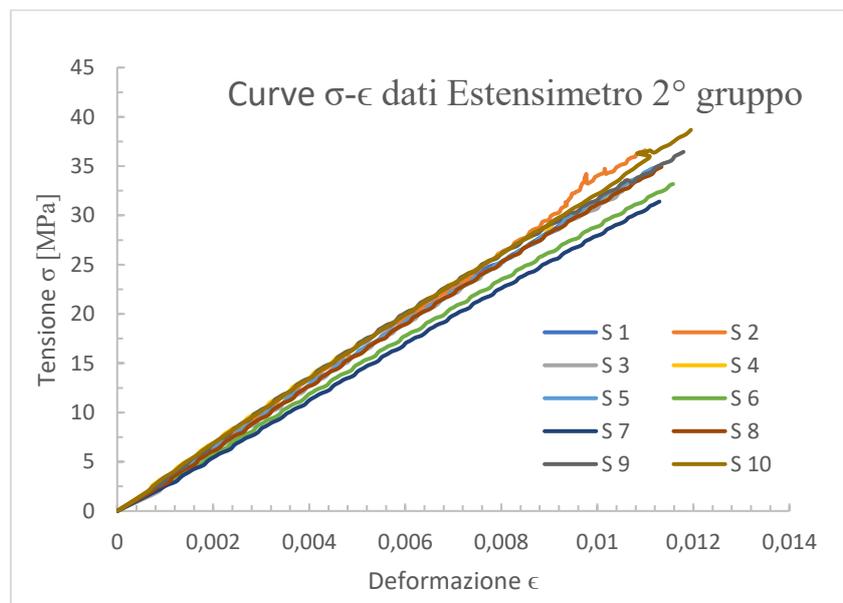


Figura 58: Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini con estensimetro

Anche questa volta i dati non hanno mostrato anomalie. Si riportano nella tabella seguenti i vari moduli elastici riferiti al diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di figura 58, ottenuti in maniera analoga ai due casi precedenti:

n°	E [MPa]
1	3200,5
2	3273,3
3	3131,1
4	3221
5	3150,3
6	2900,9
7	2700,5
8	3097,3
9	3209,4
10	3260,1

Tabella 21: Moduli elastici dei provini con estensimetro ricavati con l'estensimetro.

Si procede adesso ad eseguire il test di normalità dei dati in tabella 21, i risultati sono riportati di seguito:

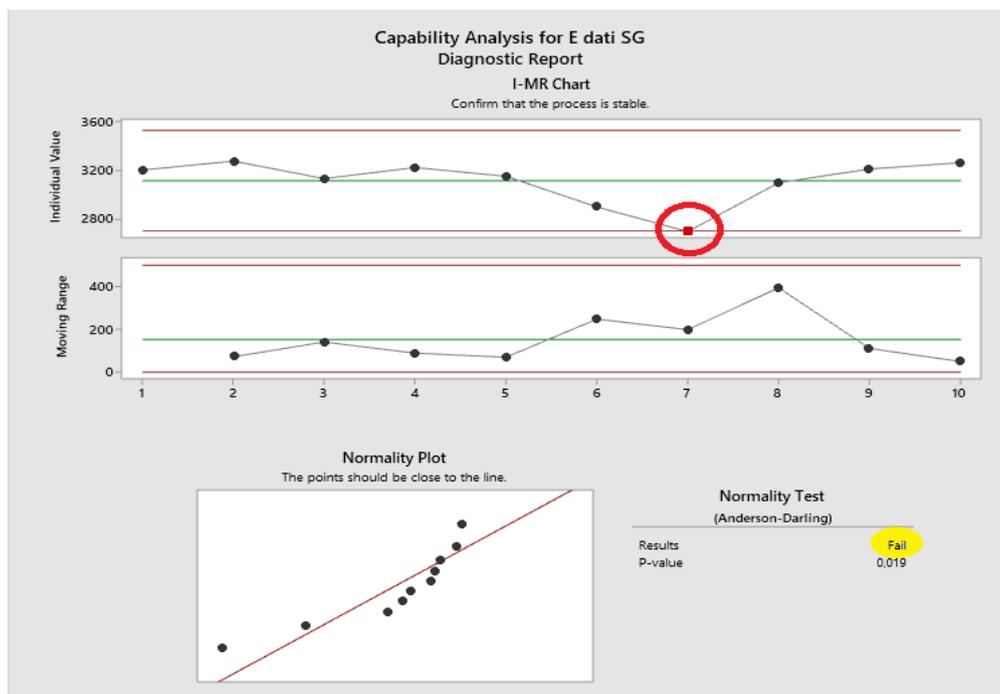


Figura 59: Test di normalità e carta di controllo I-MR per dati ottenuti con estensimetro.

In questo caso il test di normalità è fallito come viene evidenziato in giallo in figura 59. La causa di questo esito negativo è dovuta al valore del modulo elastico del provino numero 7 evidenziato con il cerchio rosso in figura 59, in quanto minore del limite di controllo inferiore imposto da Minitab. Un altro dato indicativo per definire se i dati seguono una distribuzione normale è il P-value riportato anch'esso in figura 59 che risulta essere 0,019, valore questo molto basso a dimostrazione dell'esito negativo di non normalità ottenuto. Dato che l'unico valore del modulo elastico che risulta al di fuori dei limiti di controllo è quello riguardante il provino numero 7, si è deciso di escluderlo dalla definizione del modulo elastico medio. Con i 9 dati rimanenti si condotto un altro test di normalità, dove in questo caso il provino 8 sarà riportato con il numero 7, andando a scalare di un'unità anche per quelli successivi. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

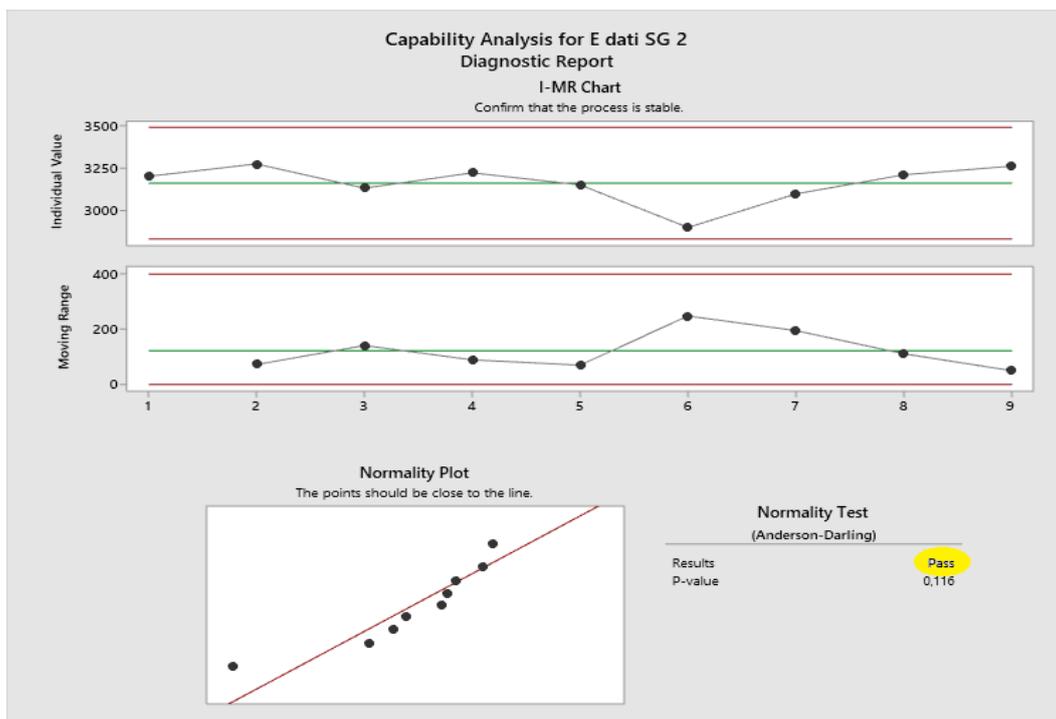


Figura 60: Secondo test di normalità con carta di controllo I-MR per dati ottenuti con estensimetro.

Con l'esclusione del settimo provino il test di normalità risulta passato come si può vedere in figura 60, ciò significa che si può considerare il dato escluso una semplice anomalia circoscritta alla prova condotta per il provino numero 7.

Vengono adesso riportati il modulo elastico medio e la deviazione standard ottenuti:

$$E_{SG} = 3160,4 \text{ MPa}$$

$$\text{Deviazione standard} = 113,28 \text{ MPa}$$

Come era prevedibile dalle considerazioni fatte nel capitolo 5, il modulo elastico medio così ricavato risulta essere maggiore di quello ottenuto considerando le deformazioni ricavati tramite la DIC, a dimostrazione della presenza dell'effetto di rinforzo. Si nota anche una certa differenza tra la deviazione standard ottenuta con i dati dell'estensimetro e quella precedentemente ricavata con quelli della DIC, ciò è stato causato dall'esclusione del provino 7 in quanto se si considera anche il dato di quest'ultimo, la deviazione standard risulta pari a 180,44 MPa valore questo paragonabile al precedente.

## ***6.5 Definizione del coefficiente correttivo***

In base a quanto visto nel capitolo 3 considerando l'espressione 3.3, si ha che il coefficiente correttivo viene definito come segue:

$$C = \frac{E_{SG}}{E_{DIC2}}$$

Da quest'espressione si ricava:

$$C = \frac{3160,4}{3029,2} = 1,0433$$

Questo risultato dimostra da una parte la presenza dell'effetto di rinforzo, dall'altra che nonostante si utilizzi un estensimetro che viene previsto per materiali a basso modulo, l'effetto di rinforzo rimane comunque importante. In quanto in questo caso si è ottenuto un errore medio del 4,33% sulle misurazioni effettuate, considerando un campione in PLA con modulo di Young ricavato sperimentalmente intorno a 3030 MPa.

### ***6.5.1 Validazione dei modelli FEM***

Con il coefficiente correttivo appena ricavato sperimentalmente, si vuole andare a verificare la validità dei modelli utilizzati per gli analizzi riportati nel capitolo 5, considerando come condizioni di validazione quelli delle prove condotte per definire tale coefficiente. Nella tabella 22 viene riportato un confronto tra il

coefficiente ricavato dalle prove sperimentali e i modelli 2D e 3D, dove in quest'ultima se andrà a considerare come modulo del campione quello ricavato sperimentalmente, mentre per l'estensimetro si va a considerare lo stesso usato durante le prove, utilizzando come modulo quello precedentemente stimato nel sottoparagrafo (5.2.2). In base a quanto detto si ottiene:

	Prove sperimentale	Modello 2D	Modello 3D
C	1,0433	1,048	1,059

Tabella 22: Confronto C tra valore sperimentale e modelli FEM.

Dai dati riportati si può affermare che i due modelli realizzati si possono considerare attendibili, considerano materiali e condizioni simili a quelli con cui si sono condotti le prove oggetto di questo elaborato. Dalla tabella 22 si nota subito come il modello 2D ha un valore più vicino a quello sperimentale, nonostante che in questo modello non si tenga conto degli effetti della profondità. Andando a considerare i due rapporti tra C sperimentale e quello dei due modelli si ottiene:

$$Rapporto_{2D} = \frac{1,048}{1,0433} = 1,005$$

$$Rapporto_{3D} = \frac{1,059}{1,0433} = 1,015$$

Da questi due rapporti si può vedere come nel caso 2D la differenza tra il modello e le prove sperimentale è inferiore all'1%, mentre nel caso 3D è comunque sotto il 2%. A dispetto di questi valori non si può comunque affermare che il modello 2D è più attendibile del 3D, in quanto nella realizzazione di entrambi i modelli si sono fatti diversi approssimazione, come spalmare il modulo elastico dell'estensimetro sull'intera lunghezza, considerare tabs e provino come un unico elemento e quindi non tenere conto della modalità con cui viene trasmessa la tensione in presenza della colla; anche il campione di prova e l'estensimetro sono stati considerati come un unico elemento, ignorando così la modalità di trasmissione delle deformazioni attraverso la colla. Alla luce di quanto appena detto e dei dati sopra riportati, si può solo affermare che sia il modello 2D che quello 3D restituiscono valori in linea con le prove sperimentali.

## ***Conclusioni e sviluppi futuri***

Con questo lavoro si è voluto dimostrare e quantificare l'effetto di rinforzo, che viene esercitato sui materiali a basso modulo da parte degli estensimetri elettrici, quando vengono usati per valutare la deformazione media dell'intorno di un punto. Tale scopo è stato raggiunto in primo luogo con dei modelli FEM sia 2D che 3D realizzati tramite il codice di calcolo agli elementi finiti MSC Nastran, dimostrando che l'effetto di rinforzo è presente non solo per materiali a basso modulo, ma lo è anche e in maniera non indifferente anche per moduli fino a 10GPa. Con i modelli FEM si è andati poi a verificare come tale effetto varia al variare di altri parametri, come il modulo elastico dell'estensimetro, la sua geometria e quella del campione di prova. Per quanto riguarda il modulo e la geometria dell'estensimetro, sono stati presi in considerazione tenendo presente che in commercio sono disponibili una moltitudine di estensimetri. Dove in base all'ambiente di utilizzo viene consigliato uno specifico estensimetro piuttosto che un altro, con diversa geometria e materiale costituente quindi modulo elastico. Come già stato detto si è studiata anche l'influenza della geometria sull'effetto di rinforzo, tale parametro è utile se si considera che la normativa consiglia la geometria del campione di prova da adottare in base al materiale considerato. L'effetto di rinforzo è stato poi dimostrato anche sperimentalmente per dei campioni di prova in PLA ottenuti tramite la tecnologia FDM, andando ad utilizzare come estensimetri quelli di tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F della Tokyo Measuring Instruments Lab. consigliati per materiali a basso modulo. Nonostante il tipo di estensimetro scelto fosse adatto per materiali a basso modulo, il che presuppone un basso modulo dell'estensimetro stesso, l'effetto di rinforzo è risultato comunque evidente e non di basso entità registrando un errore del 4,33%. Nel determinare quanto appena detto si è fatto uso della tecnica DIC (Digitale Image Correlation) per la definizione delle deformazioni, questo approccio è risultato molto affidabile e robusto a disturbi come un rinforzo locale dovuto alla presenza dell'estensimetro. Ciò è stato dimostrato dai valori del modulo elastico ottenuti con e senza estensimetro, con un errore quasi pari a zero.

Si è concluso poi il tutto con la validazione dei modelli FEM per le condizioni e la modalità delle prove condotte, dimostrano come i risultati ottenuti con le

simulazioni FEM siano in linea con i dati ricavati dalle prove sperimentali, con un errore inferiore all'1% per il modello 2D e al 2% per quello 3D.

In futuro sarà necessario verificare la validità del modello realizzato mediante altre prove sperimentali, andando a considerare diversi materiali e estensimetri. Per quanto riguarda il modello se potrebbe andare a raffinare maggiormente, in modo da considerare la modalità di trasmissione delle tensioni quando si ha a che fare con due componenti incollati insieme, come tabs-provino e provino-estensimetro. Ancora più utile è la raffinazione della geometria dell'estensimetro, così da considerare gli effetti di rinforzo in maniera più localizzata.

## ***Lista delle figure***

1. *Schema funzionamento stampante con tecnologia 3DP.*
2. *Schema funzionamento stampante con tecnologia SLS.*
3. *Schema funzionamento stampante con tecnologia EBM.*
4. *Schema funzionamento stampante con tecnologia laser deposition.*
5. *Schema funzionamento stampante con tecnologia SLA.*
6. *Schema funzionamento stampante con tecnologia Polyjet.*
7. *Schema funzionamento stampante con tecnologia DLP.*
8. *Schema funzionamento stampante con tecnologia DOD.*
9. *Schema funzionamento stampante con tecnologia FDM.*
10. *Schema di un estensimetro elettrico.*
11. *Tipologie di estensimetri.*
12. *Estensimetri multipli ed a catene.*
13. *Ponte di Wheatstone*
14. *Ponte di Whratstone con collegamenti I) a quarto di ponte, II) a mezzo ponte, III) a ponte intero.*
15. *Tipologie di collegamento: A) quarto di ponte a tre fili, B) mezzo ponte a tre fili, C) ponte intero a quattro fili.*
16. *Schema del complesso provino Tabs.*
17. *Schema macchina di prova servoidraulica.*
18. *Schema di una classica geometria ad osso di cane di un provino.*
19. *Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  per un materiale che presenta il fenomeno di snervamento.*
20. *Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  per un materiale che non presenta il fenomeno di snervamento.*
21. *Interfaccia Patran.*
22. *Schema forza d'attrito.*
23. *Mesh modello 2D.*
24. *Mesh modello 3D.*
25. *Schematizzazione dell'estensimetro in 4 tratti.*
26. *Andamento delle deformazioni per un campione di prova senza estensimetro.*
27. *Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 7000 MPa.*

28. *Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 9787 MPa.*
29. *Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 15000 MPa.*
30. *Andamento delle deformazioni per un estensimetro applicato di modulo 20000 MPa.*
31. *Risultati modello 2D, andamento del coefficiente correttivo C al variare di  $E_{rif}$  e  $E_{sg}$ .*
32. *Risultati modello 2D al variare della lunghezza dell'estensimetro.*
33. *Risultati modello 2D, andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro al variare di  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592$  MPa e  $E_{rif} = 3030$  MPa.*
34. *Risultati modello 2D, al variare dello spessore del campione per un estensimetro con  $L_{sg} = 9,5$  mm e  $E_{sg} = 9592$  MPa.*
35. *Modello 2D, andamento delle deformazioni al variare dello spessore.*
36. *Risultati modello 3D, andamento del coefficiente correttivo C al variare di  $E_{rif}$  e  $E_{sg}$ .*
37. *Confronto tra i risultati del modello 2D e 3D dell'andamento di C a parità di  $E_{sg}$ .*
38. *Risultati modello 3D al variare della lunghezza dell'estensimetro.*
39. *Risultati modello 3D, andamento delle deformazioni lungo l'estensimetro al variare di  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592$  MPa e  $E_{rif} = 3030$  MPa.*
40. *Confronto 2D, 3D dell'andamento delle deformazioni lungo  $L_{sg}$  con  $E_{sg} = 9592$  MPa e  $E_{rif} = 3030$  MPa.*
41. *Risultati modello 2D, al variare dello spessore del campione per un estensimetro con  $L_{sg} = 9,5$  mm e  $E_{sg} = 9592$  MPa.*
42. *Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 20$  mm, senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.*
43. *Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 3$  mm, senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.*
44. *Modello 3D, andamento delle deformazioni con  $t = 1$  mm, senza estensimetro a sinistra e con estensimetro a destra.*

45. *Modello 3D andamento delle deformazioni con 1 estensimetro.*
46. *Modello 3D andamento delle deformazioni con 2 estensimetri.*
47. *Provino e i 4 tabs.*
48. *Stampante Next Generation della Sharebot.*
49. *Stampante DX della Creatbot.*
50. *Estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F.*
51. *Campione di prova con estensimetro.*
52. *MTS QTest/ 10 Elite Controller.*
53. *Campioni posizionati sulla macchina di prova, con estensimetro a sinistra e senza a destra.*
54. *Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini senza estensimetro, dati della DIC.*
55. *Test di normalità e carta di controllo I-MR dati DIC per provini senza estensimetro.*
56. *Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini con estensimetro, dati della DIC.*
57. *Test di normalità e carta di controllo I-MR dati DIC per provini con estensimetro.*
58. *Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  per provini con estensimetro.*
59. *Test di normalità e carta di controllo I-MR per dati ottenuti con estensimetro.*
60. *Secondo test di normalità con carta di controllo I-MR per dati ottenuti con estensimetro.*

## ***Lista delle Tabelle***

1. *Le principali leghe usate per le griglie degli estensimetri.*
2. *Dimensioni del provino.*
3. *Dimensioni dei Tabs.*
4. *Dimensione estensimetro.*
5. *Moduli elastici da adottare per gli estensimetri.*
6. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1\text{GPa}$  al variare di  $E_{sg}$ .*
7. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10\text{GPa}$  al variare di  $E_{sg}$ .*
8. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1\text{GPa}$  al variare di  $L_{sg}$ .*
9. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10\text{GPa}$  al variare di  $L_{sg}$ .*
10. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 1\text{GPa}$  al variare dello spessore del campione  $t$ .*
11. *Coefficiente correttivo per i modelli 2D e 3D con  $E_{rif} = 10\text{GPa}$  al variare dello spessore del campione  $t$ .*
12. *Confronto del coefficiente correttivo per i due modelli 3D con 1 e 2 estensimetri.*
13. *Scheda tecnica Next Generation della Sharebot.*
14. *Scheda tecnica Stampante DX della Creatbot.*
15. *Caratteristiche estensimetro tipo GFLAB-3-350-70-1LJCT-F.*
16. *Caratteristiche tecniche MTS QTest/ 10 Elite Controller.*
17. *Dimensioni effettive dei provini del 1° gruppo, con tutti i valori in mm.*
18. *Dimensioni effettive dei provini del 2° gruppo, con tutti i valori in mm.*
19. *Moduli elastici dei provini senza estensimetro ricavati con la DIC.*
20. *Moduli elastici dei provini con estensimetro ricavati con la DIC.*
21. *Moduli elastici dei provini con estensimetro ricavati con l'estensimetro.*
22. *Confronto  $C$  tra valore sperimentale e modelli FEM.*

## **Bibliografia**

- [1] **Zike, S., Mikkelsen, L.P** - Articolo: *Correction of Gauge Factor for Strain Gauges Used in Polymer Composite Testing. Exp Mech* 54, 393–403 (2014).
- [2] **D.G. Bekas, Y. Hou, Y. Liu, A. Panesar** - Articolo: *3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. Composites Part B: Engineering, Volume 179, 15 December 2019, 107540.*
- [3] **Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker** - Libro: *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Springer-Verlag New York, DOI 10.1007 / 978-1-4939-2113-3, 2° seconda (2015).*
- [4] Schema funzionamento stampante 3 Dimensional Printing, 3D Printing [online], disponibile a: <https://www.custompartnet.com/wu/3d-printing> [accesso 23/03/2020].
- [5] Schema funzionamento stampante SLS, Selective Laser Sintering [online], disponibile a: <https://rapidprototyping3d.com/4-popular-rapid-prototyping-technologies-manufacturing/3iohapjgei/> [accesso 23/03/2020].
- [6] Schema funzionamento stampante EBM, Electron Beam Melting [online], disponibile a: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-an-electron-beam-melting-system\\_fig2\\_269836411](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-an-electron-beam-melting-system_fig2_269836411) [accesso 23/03/2020].
- [7] Schema funzionamento stampante laser deposition, Laser Metal Deposition [online], disponibile a: [https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/laser-metal-deposition/-/journal\\_content/56\\_INSTANCE\\_StdArt/147354/4989390?p\\_p\\_state=pop\\_up&\\_56\\_INSTANCE\\_StdArt\\_page=1&\\_56\\_INSTANCE\\_StdArt\\_viewMode=print](https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/laser-metal-deposition/-/journal_content/56_INSTANCE_StdArt/147354/4989390?p_p_state=pop_up&_56_INSTANCE_StdArt_page=1&_56_INSTANCE_StdArt_viewMode=print) [accesso 23/03/2020].
- [8] Schema funzionamento stampante SLA, Cos'è una stampante 3D e come si può usare [online], disponibile a: <https://tuttoin1.it/cose-una-stampante-3d-e-come-si-puo-usare/> [accesso 24/03/2020].

[9] Schema funzionamento stampante Polyjet, Polyjet [online], disponibile a: <http://www.prototecnicad.it/en/polyjet/> [accesso 24/03/2020].

[10] Schema funzionamento stampante DLP, DLP - Digital Light Processing [online], disponibile a: <http://www.orma-solutions.it/dlp-digital-light-processing/> [accesso 24/03/2020].

[11] Schema funzionamento stampante Drop on Demand, R&D Magazine [online], disponibile a: <https://randdmag.tumblr.com/post/118314187322/the-drop-on-demand-inkjet-printing-is-a-promising> [accesso 24/03/2020].

[12] Schema funzionamento stampante FDM, Tecnologie di stampa 3D - Come funziona una stampante 3D [online], disponibile a: <https://www.stampa3d-forum.it/come-funziona-stampante-3d/> [accesso 24/03/2020].

[13] **Zhaobing Liu, Qian Lei, Shuaiqi Xing** - Articolo: Mechanical characteristics of wood, ceramic metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 8, Issue 5, September–October 2019, Pages 3741-3751.

[14] **Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.Y. Lee, V.L. Tagarielli** - Articolo: Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. *Materials & Design*, Volume 123, 5 June 2017, Pages 154-164.

[15] **John Ryan C. Dizon, Alejandro H. Espera, Qiyi Chen, Rigoberto C. Advincula** - Articolo: Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, Volume 20, March 2018, Pages 44-67.

[16] **L.M. Bollig, P.J. Hilpisch, G.S. Mowry, B.B. Nelson-Cheeseman** - Articolo: 3D printed magnetic polymer composite transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 442, 15 November 2017, Pages 97-101.

[17] **P. Parandoush, D. Lin** - Articolo: A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, Volume 182, 15 December 2017, Pages 36-53.

[18] **C. Fosalau, C Damian, C. Zet** - Articolo: *A high performance strain gage based on the stressimpedance effect in magnetic amorphous wires. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 191, Pages 105-1101, March 2013.*

[19] **J. Fraden** - Libro: *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications Springer-Verlag, New York (1996).*

[20] **Jinggao Li, Jon P. longtin, Szymon Tankeiwicz, Andrew Gouldstone, Sanjay Sampath** - Articolo: *Interdigital capacitive strain gauges fabricated by direct-write thermal spray and ultrafast laser micromachining. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 133, Issue 1, 8 January 2007, Pages 1-88 January 2007, Pages 1-8.*

[21] **Quaresimin and D. Rossi** - Dispense: *Introduzione all'estensimetria applicata alla misura di deformazione e carichi. Università di Padova – Facoltà di ingegneria, dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali.*

[22] **A. Ajvolasit** - Libro: *Analisi sperimentale delle tensioni con gli Estensimetri elettrici a resistenza. Aracne, seconda edizione, aprile 2008.*

[23] **Ing. Franco** - Nota tecnica: *La selezione dell'estensimetro. Criteri, procedure, consigli, Codice Note 04 Luchsinger snc, Curno (BG), 1999.*

[24] **Campbell, W. R. and Medbery, A. F.** - *Performance tests of wire strain gauges: V – error in indicated bending strains in thin sheet metal due to thickness and rigidity of gage. Report TN 1318, NACA, 1947.*

[25] **Dove, R. C.**- Articolo: *Strain measurement errors in materials of low modulus. In Proceedings of ASCE (American Society of Civil Engineering), 1955, Vol. 81 (September), pp. 691/1– 691/8.*

[26] **Clark, A. B. J.** - *Static and dynamic calibration of a photoelastic model material, CR39. In Proceedings of SESA 1956, Vol. XIV (1), pp. 195–204.*

[27] **Ajovalasit A, Zuccarello B** - Articolo: *Local reinforcement effect of a strain gauge installation on low modulus materials. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 40, Issue 7, page(s): 643-653, October 1, 2005.*

[28] **Swan JW** - Articolo: *Resistance strain gauges on thermoplastics. Strain Vol. 9, Issue 2, Pages: 56–59, April 1973.*

[29] **Dally, J.W. and Riley, W. F.** - Libro: *Strain gages In Handbook on experimental mechanics (Ed. A. S. Kobayashi), 1st edition, 1987, Ch. 2, pp. 63–65 (Prentice- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey).*

[30] **Ajovalasit A, D'Acquisto L, Fragapane S, Zuccarello B** - Articolo: *Stiffness and Reinforcement Effect of Electrical Resistance Strain Gauges. Strain, Vol. 43, Issue 4, Pages: 299–305, November 2007.*

[31] **Williams, M. L.** - Articolo: *Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension. Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 19, Issue 4, Pages: 526–528, 1952.*

[32] **Beatty, M. F. and Chewing, S. W.** - Articolo: *Numerical analysis of the reinforcement effect of a strain gage applied to a soft material. International Journal of Engineering Science, Vol. 17, Issue 7, Pages 907-915, 1979.*

[33] **ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International. West Conshohocken, PA, USA (2010).**

[34] **Brischetto S., Torre R., Ferro C.G.** (2020) *Experimental Evaluation of Mechanical Properties and Machine Process in Fused Deposition Modelling Printed Polymeric Elements. In: Di Nicolantonio M., Rossi E., Alexander T. (eds) Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 975. Springer, Cham.*

- [35] **S. Brischetto, R. Torre, C. G. Ferro and P. Maggiore** - Characterization, in analogy with composites embedding unidirectional long fibres, of PLA specimens produced via FDM printing process. In *International Conference on Composite Structures*. Università di Bologna, Italy, September 2018.
- [36] **G. Petrucci** - *Dispense di costruzione di macchine*, Università degli studi di Palermo, Dipartimento dell'innovazione industriale e digitale.
- [37] **Marco Di sciuva** - *Dispense di strutture aeronautiche*, Politecnico di Torino, Dipartimento di ingegneria meccanica e aerospaziale, 2019.
- [38] **Augello Gerlando** - *Libro: Guida rapida per l'uso di MSC.Patran e MSC.Nastran*. Politeko edizioni, 2003.
- [39] *Patran, MSC software [online], disponibile a: <https://www.mssoftware.com/it/product/patran> [accesso 29/03/2020].*
- [40] **Ajovalasit, A. and Zuccarello, B** - *On the reinforcement effect of strain gauges*. In *12<sup>th</sup> International Conference on Experimental mechanics*, Politecnico di Bari, Italy, 29 August-2 September 2004.
- [41] **Luca Di Tulio** - *Rilevamento con metodologia DIC-20 delle proprietà meccaniche di materiali metallici*, Tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica, Politecnico di Torino.