



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA

**Studio di una resina flessibile stampata in 3D in
condizione equibiassiale mediante l'utilizzo di un bulge
test idraulico**

**Study of a flexible 3D printed resin in equibiaxial
condition using a hydraulic bulge test**

Relatore:

Prof. Ing. Marco Sasso

Correlatore:

Ing. Mattia Coccia

Candidato:

Gianmaria Simoncini

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

1. Introduzione.....	5
2. Polimeri.....	8
2.1. Resine fotosensibili	10
3. Iperelasticità.....	12
3.1. Modello Neo-Hookean.....	14
3.2. Modello Mooney-Rivlin.....	15
3.3. Modello di Yeoh	15
3.4. Modelli polinomiali in I_1 e I_2	16
3.5. Modello di Ogden	17
4. Additive manufacturing.....	18
4.1. Tecnologie di additive manufacturing.....	20
4.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)	20
4.1.2. Stereolitografia (SLA)	22
4.1.3. Digital Light Processing (DLP).....	24
4.1.4. Selective Layer Sintering (SLS)	25
4.1.5. Three - Dimensional Printing (3DP).....	26
4.1.6. Polyjet Technology.....	27
4.1.7. Laminated Object Manufacturing (LOM)	27
5. Prove di caratterizzazione meccanica	29
5.1. Prova di trazione	29
5.2. Prova di trazione planare	34
5.3. Prova biassiale – Bulge test.....	35
6. Digital Image Correlation	37
7. Stato dell'arte.....	40

8. Caso studio sperimentale	42
8.1. Resina.....	42
8.2. Processo di stampa e post-cura	44
8.3. Prove sperimentali di caratterizzazione meccanica	46
8.3.1. Prova di trazione.....	47
8.3.2. Prove di trazione planare.....	52
8.3.3. Prove biassiali bulge test.....	56
8.4. Fitting curve sperimentali mediante ABAQUS.....	60
8.5. Simulazione agli elementi finiti del bulge test.....	64
9. Conclusioni e sviluppi futuri	74
Bibliografia	76
Sitografia	78

Indice delle tabelle

Tabella 1: Proprietà delle tecnologie di stampa 3D	28
Tabella 2: Caratteristiche tecniche resina.....	43
Tabella 3: Proprietà stampante 3D Phrozen Transform	45
Tabella 4: Impostazioni di stampa	45
Tabella 5: Impostazione delle prove di trazione	48
Tabella 6: Parametri caratteristici per le varie prove.....	52
Tabella 7: Impostazione delle prove di trazione planare	54
Tabella 8: Parametri delle prove biassiali di bulge test.....	58
Tabella 9: Risultati del fitting.....	64

Indice delle figure

Figura 1: Risultati ottenibili da diverse prove di caratterizzazione meccanica.....	6
Figura 2: Rappresentazione dei fotopolimeri	10

Figura 3: curva tensione – deformazione di un materiale iperelastico	12
Figura 4: Flusso dei processi per la produzione additiva	19
Figura 5: Processo di stampaggio FDM.....	21
Figura 6: Processo di stampaggio SLA.....	23
Figura 7: Processo di stampaggio DLP	25
Figura 8: Processo di stampaggio SLS	26
Figura 9: Provino per prova di trazione	30
Figura 10: Macchina di trazione	30
Figura 11: Fasi principali della prova di trazione.....	32
Figura 12: Esempi di comportamento a trazione dei polimeri.....	32
Figura 13: Schematizzazione del bulge test	35
Figura 14: Schema della strumentazione per il bulge test.....	36
Figura 15: Individuazione dell'area di riferimento e del subset.....	38
Figura 16: Primacreator Value Flex UV Resin.....	42
Figura 17: Stampante 3D Phrozen Transform Resin	44
Figura 18: Forno di post-cura	46
Figura 19: Matrice di calibrazione delle telecamere.....	46
Figura 20: Speckle sui provini	47
Figura 21: Provini per la prova di trazione.....	47
Figura 22: Prova di trazione.....	49
Figura 23: Coppie di foto acquisite dalle due telecamere.....	49
Figura 24: curve tensione – deformazione vere della prova di trazione	51
Figura 25: Provini per la prova di trazione planare.....	52
Figura 26: Prova di trazione planare.....	53
Figura 27: Curve di tensione - deformazione vere per le prove di pure-shear.....	56
Figura 28: Provino posizionato sulle flange per le prove biassiali di bulge test	57
Figura 29: Macchina per il bulge test.....	57
Figura 30: Curva tensione – deformazione vere delle prove biassiali di bulge test	60
Figura 31: Fitting per il materiale curato 1.5 ore	62
Figura 32: Fitting per il materiale curato 1.5 ore senza esposizione ai raggi UV.....	63
Figura 33: Fitting per il materiale curato 5 ore	64
Figura 34: Vista isometrica e sezione della flangia	65

Figura 35: Vista isometrica del quarto di provino.....	66
Figura 36: Assegnazione proprietà del materiale	66
Figura 37: Definizione vincoli di simmetria per il piano normale all'asse X	68
Figura 38: Definizione vincoli di simmetria per il piano normale all'asse Z.....	69
Figura 39: Imposizione dei vincoli per simulare la bullonatura tra le flange.....	69
Figura 40: Inserimento della pressione agente sulla superficie inferiore	70
Figura 41: Spostamenti fuori dal piano della prova sperimentale	71
Figura 42: Spostamenti fuori dal piano della simulazione	71
Figura 43: Deformazioni lungo l'asse principale nella prova sperimentale.....	73
Figura 44: Deformazioni lungo l'asse principale nella simulazione.....	73

1. Introduzione

Le resine sono materiali applicati in una vasta gamma di settori industriali, dalle costruzioni alle applicazioni biomediche, grazie alle loro proprietà e versatilità di utilizzo. La diffusione sempre più ampia di tali materiali ha incrementato l'interesse verso lo studio delle loro proprietà meccaniche, eseguendo prove sperimentali per definire i modelli costitutivi che ne possano descrivere il comportamento.

Una delle applicazioni di maggiore interesse è l'utilizzo delle resine per le tecniche di manifattura additiva, anche nota come stampa 3D.

I processi di stampa 3D sono oggi sempre più utilizzati, in alternativa alle tecniche tradizionali, specialmente nell'ambito della prototipazione del prodotto, poiché permettono di ottenere oggetti personalizzabili, velocemente realizzabili a partire dal design di progetto e aventi anche geometrie complesse. Grazie alla stampa 3D, infatti, il processo di realizzazione dei prodotti non è più limitato alla fase finale di produzione su larga scala, ma viene integrato nella fase di prototipazione e rifinitura del design di progetto.

Tra i materiali più utilizzati per la costruzione di elementi tramite il processo di manifattura additiva vi sono i materiali polimerici quali le resine e, in particolar modo, le resine fotosensibili. Le resine sono il risultato di miscele di elementi che vengono addizionati in proporzioni differenti in modo da ottenere le prestazioni qualitative e meccaniche desiderate.

Poiché le proprietà dei materiali dipendono da numerosi fattori, quali la composizione della miscela, la tecnologia utilizzata per il processo di stampa, gli eventuali post-processamenti, i periodi e le intensità di esposizione a determinate temperature o a raggi UV, la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali viene di norma effettuata tramite prove sperimentali.

Tra le prove più utilizzate vi sono le prove uniassiali di trazione, che però non sono sufficienti da sole a determinare in maniera accurata le caratteristiche dei materiali, specialmente in caso di impieghi che prevedono l'applicazione di carichi biassiali. In queste situazioni, è necessario effettuare ulteriori prove, quali quelle di tensione biassiale o bulge test. A supporto delle prove sperimentali, le tecniche basate sulla correlazione numerica di immagini digitali (Digital Image Correlation – DIC) sono sempre più ampiamente utilizzate come metodi per la misura

di campi di deformazione, anche grazie alla notevole evoluzione dei sistemi digitali di acquisizione di immagine, dei software di correlazione ed elaborazione. I risultati ottenuti dalle macchine di prova e dalle immagini acquisite vengono elaborati per ricavare curve di tensione – deformazione, per descrivere il comportamento meccanico dei materiali testati. A titolo di esempio, in Figura 1 vengono riportati i risultati, espressi mediante le relazioni tensione – deformazione, delle prove di trazione, trazione planare e bulge test, eseguite per la caratterizzazione di un materiale polimerico.

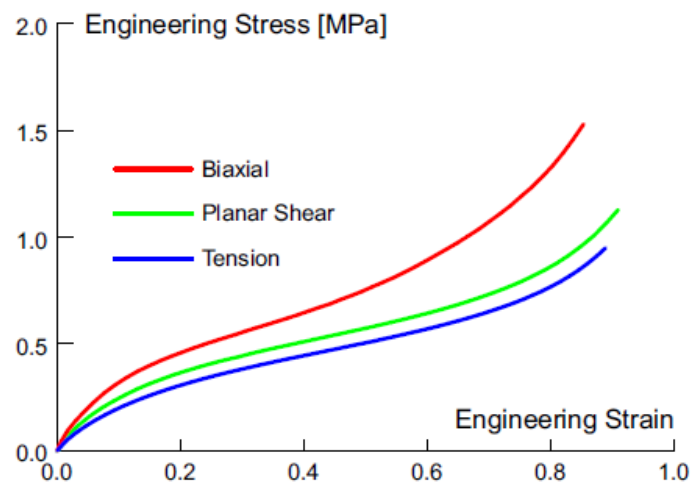


Figura 1: Risultati ottenibili da diverse prove di caratterizzazione meccanica

Per la definizione delle proprietà meccaniche dei materiali polimerici quali le resine, in genere si assume l'ipotesi di comportamento iperelastico, che prevede ampie deformazioni e non linearità della relazione tra tensioni e deformazioni corrispondenti.

In letteratura esistono numerosi modelli per descrivere il comportamento iperelastico. I risultati ottenuti dalle prove sperimentali vengono elaborati ed integrati per trovare delle corrispondenze con i modelli. Tramite tale processo di *fitting*, vengono individuati i modelli che meglio si adattano a definire il comportamento dei materiali e i parametri che li descrivono. Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo di software sempre più precisi, il processo di fitting viene eseguito tramite il supporto di software di calcolo agli elementi finiti.

La diffusione dei software di calcolo ha permesso inoltre lo sviluppo di modelli per la simulazione dei comportamenti meccanici dei materiali che, una volta validati, possono essere utilizzati per ulteriori analisi ed elaborazioni, a supporto della progettazione.

Nel presente lavoro, è stato analizzato il comportamento meccanico di una resina flessibile stampata in 3D in condizione equibiassiale. In primo luogo, sono stati stampati dei provini mediante la tecnologia di manifattura additiva di tipo DLP. Sono state effettuate prove sperimentali di trazione, trazione planare e bulge test idraulico. Sono state determinate quindi delle curve di tensione – deformazione sperimentali, confrontate mediante l’analisi di fitting con i modelli di letteratura per individuare i modelli costitutivi più adatti ed i relativi parametri. In secondo luogo, è stata eseguita una modellazione tramite software di calcolo a elementi finiti per simulare il comportamento del materiale a partire dalle caratteristiche ottenute dalle prove sperimentali.

2. Polimeri

Un polimero è un materiale in cui la sua microstruttura è composta da elementi con scale di lunghezza differenti. A livello molecolare, gli atomi sono organizzati in unità di monomeri e sono uniti tra di loro attraverso dei legami di tipo covalente. Queste unità di monomeri sono a loro volta connesse in strutture a catena più lunghe. Le diverse macromolecole, spesso chiamate molecole a catena, si possono disporre in una rete di strutture attraverso collegamenti incrociati o intrecci, e interagiscono tra loro tramite forze deboli di van der Waals. Gli atomi della struttura polimerica sono tenuti assieme da legami covalenti, contraddistinti dalla caratteristica di avere atomi che condividono tra loro elettroni e quindi risulta essere un legame molto forte e con una ridotta mobilità degli elettroni. Per questo motivo i polimeri sono tipicamente dei cattivi conduttori di calore ed elettricità. I legami deboli tra le molecole fanno sì che i polimeri siano caratterizzati da proprietà meccaniche quali la bassa rigidità ed elevata duttilità [1].

I polimeri possono essere classificati in diversi gruppi secondo diverse caratteristiche, per via dell'ampia varietà degli stessi e dei loro comportamenti.

Un approccio comune è quello di distinguerli in polimeri naturali e polimeri sintetici. I polimeri naturali, chiamati anche biopolimeri, includono una vasta selezione di materiali, come la cellulosa o l'amido, che sono costituiti da polisaccaridi, o le proteine, che sono formate da aminoacidi. Altri esempi di biopolimeri sono: il DNA, l'RNA, i peptidi, gli enzimi, la pelle, i capelli, la seta e la chitina. I polimeri sintetici includono i tecnopolimeri come il polipropilene (PP), il polietilene (PE) e la gomma nitrilica.

Un altro utile metodo per classificare i polimeri è la classificazione in base alla struttura molecolare, dividendoli in elastomerici, termoindurenti e termoplastici.

Gli elastomeri sono polimeri che possono essere tirati facilmente per diverse volte dalla loro lunghezza iniziale e ritornano rapidamente alle loro dimensioni originali una volta rilasciato il carico applicato. Gli elastomeri possono essere sia termoplastici che termoindurenti, hanno una struttura reticolare, ma hanno una bassa densità di reticolazione. Le catene polimeriche hanno comunque un certo grado di libertà, ma sono impediti i movimenti relativi tra le stesse dai legami crociati.

La classe dei polimeri termoindurenti consiste in polimeri irreversibili, in grado di creare legami chimici lungo le tre direzioni attraverso il processo di polimerizzazione, anche detto cura o cross-linking. Il processo di polimerizzazione può essere realizzato mediante radiazioni specifiche, come calore, radiazioni ultraviolette e catalizzatori, o agenti polimerizzanti. Solitamente, lo sviluppo del processo di polimerizzazione porta il polimero da uno stato liquido - viscoso ad uno solido. Durante il processo di cura, i legami covalenti permettono alle singole catene di polimeri di connettersi per formare un reticolo. La catena polimerica reticolata, che definisce l'architettura molecolare, conferisce una struttura forte e rigida al materiale, aumentandone così la resistenza e fornendo elevate prestazioni meccaniche. Le caratteristiche dei polimeri termoindurenti ne consentono diverse applicazioni, come quelle per rivestimenti, per adesivi o per apparecchiature elettriche. La maggior parte delle applicazioni, comunque, sono da ricercare nell'utilizzo di tali polimeri come matrice per materiali compositi, rinforzati sia con fibre di carbonio che di vetro; utilizzati ad esempio, nelle attrezzature sportive, nell'industria dell'automotive e nell'industria aerospaziale.

La classe di polimeri termoplastici include i polimeri reversibili, definiti come materiali che possono essere fusi attraverso il calore, per poi ritornare allo stato solido dopo essere stati raffreddati. Il processo reversibile di passaggio tra diversi stati fisici avviene grazie al fatto che, in termini di struttura molecolare, i polimeri termoplastici non subiscono un processo di polimerizzazione e, di conseguenza, è possibile identificare e poi separare ogni singola catena polimerica dalle altre.

I polimeri termoplastici possono essere divisi in ulteriori due sottoclassi, in funzione della disposizione delle catene molecolari, i polimeri amorfi e i polimeri semi cristallini. In particolare, un polimero termoplastico viene definito semi cristallino quando le catene molecolari esibiscono una struttura organizzata e rigidamente impacchettata, tale da garantire proprietà di elevata robustezza e di resistenza chimica. Al contrario, un polimero termoplastico amorfo presenta catene molecolari più complesse, le quali sono incrociate tra loro e orientate in modo casuale. Queste specifiche strutture ne influenzano le proprietà meccaniche, come l'elevata resistenza agli urti, il comportamento fragile e la ridotta durata a fatica.

Entrambe le suddette sottoclassi sono rappresentative di materiali polimerici riutilizzabili e riciclabili. Insieme con la presenza di legami deboli e la capacità di raggiungere facilmente la

temperatura di fusione, queste proprietà rendono la classe dei polimeri termoplastici adatta per diversi processi, sia allo stato ammorbidito dal calore, come ad esempio nella termoformatura, sia allo stato liquido, permettendo quindi di essere modellati in un'ampia gamma di forme, come avviene nei processi di stampaggio a estrusione o iniezione. Tuttavia, molti polimeri termoplastici non sono in grado di sostenere temperature elevate.

2.1. Resine fotosensibili

I fotopolimeri, o resine fotosensibili, sono una particolare classe di polimeri composti da miscele di oligomeri, monomeri, fotoiniziatori, additivi epossidici e acrilici. In particolare, i fotoiniziatori, per effetto dell'esposizione alle radiazioni, si decompongono in elementi reattivi come cationi, anioni o radicali liberi, che attivano, sui gruppi funzionali contenuti negli oligomeri, un processo definito di polimerizzazione. Quando i fotopolimeri, infatti, subiscono la polimerizzazione, gli oligomeri vengono reticolati a seguito dell'esposizione alla luce, formando quello che viene definito un polimero reticolare, costituito da una rete di polimeri termoindurenti. In Figura 2 viene mostrato uno schema nella quale vengono rappresentati i principali componenti di un fotopolimero e il suo processo di polimerizzazione.

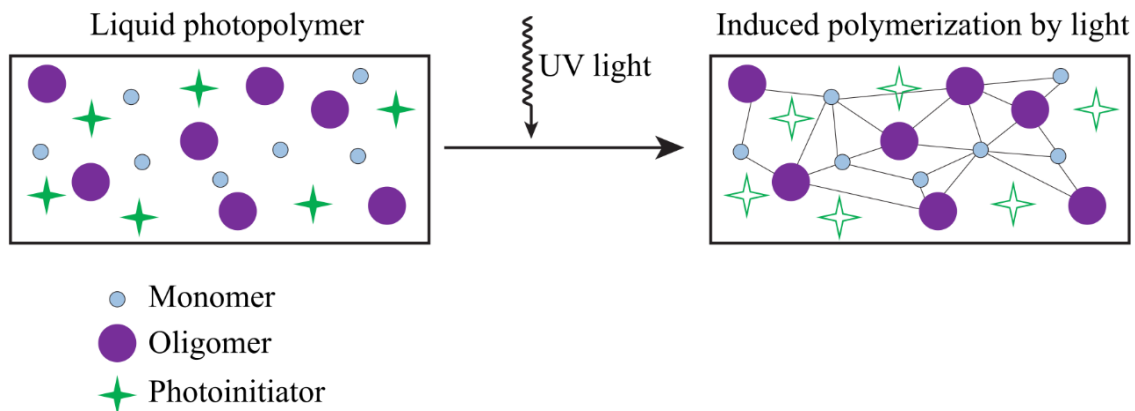


Figura 2: Rappresentazione dei fotopolimeri

Le resine fotosensibili hanno la capacità di cambiare le proprie proprietà quando vengono esposte alla luce, in genere nel range dello spettro elettromagnetico compreso tra il visibile e l'ultravioletto. Tali variazioni possono essere di natura strutturale, come l'indurimento. Le variazioni nelle caratteristiche strutturali delle resine fotosensibili possono essere causate da molecole cromofore sensibili alla luce e al colore, contenute negli elementi polimerici, o tramite l'aggiunta di additivi fotosensibili.

Le resine fotosensibili possono essere prodotte utilizzando particolari miscele di monomeri e oligomeri multifunzionali, in funzione delle proprietà fisiche e meccaniche da raggiungere.

Le resine fotosensibili vengono utilizzate nei processi di prototipazione rapida, come la stampa 3D, per creare degli oggetti, polimerizzando la resina strato per strato. Come evidenziato da Yang et al. (2019) [2], le informazioni riguardo alle proprietà meccaniche di resine fotosensibili utilizzate in alcuni processi di stampa 3D, come ad esempio la Stereolitografia, sono limitate nella ricerca di letteratura tecnico-scientifica. Pertanto, la loro classificazione e caratterizzazione è ancora in fase di studio. Diversi tipologie di resine sono attualmente disponibili in commercio, contraddistinte da specifiche caratteristiche, quali la curabilità, il modulo elastico, la resistenza alla trazione, la tenacità o la viscosità. La composizione e le proprietà della resina, insieme ai parametri di progetto, sono fattori determinanti che influenzano il grado di cura necessario per ottenere oggetti con determinate caratteristiche, come riportato da Salmoria et al. (2005) [3]. Le proprietà della resina, infatti, come la bassa viscosità, l'alto valore della *heat deflection temperature* (HDT), la notevole flessibilità, la tolleranza all'umidità, la bassa curvatura e la risposta alla polimerizzazione sono aspetti fondamentali nei processi di stampa 3D [4].

3. Iperelasticità

L'iperelasticità è un modello costitutivo utilizzato per la descrizione dei materiali polimerici [5]. Tale modello infatti risulta essere spesso facilmente applicabile per descrivere i meccanismi che regolano il comportamento deformativo dei polimeri. In tal senso, il modello iperelastico viene utilizzato anche per descrivere i materiali simili alla gomma.

Il comportamento iperelastico è in genere caratterizzato da elevate deformazioni e da una relazione tra tensione e deformazione non lineare, come graficato in Figura 3.

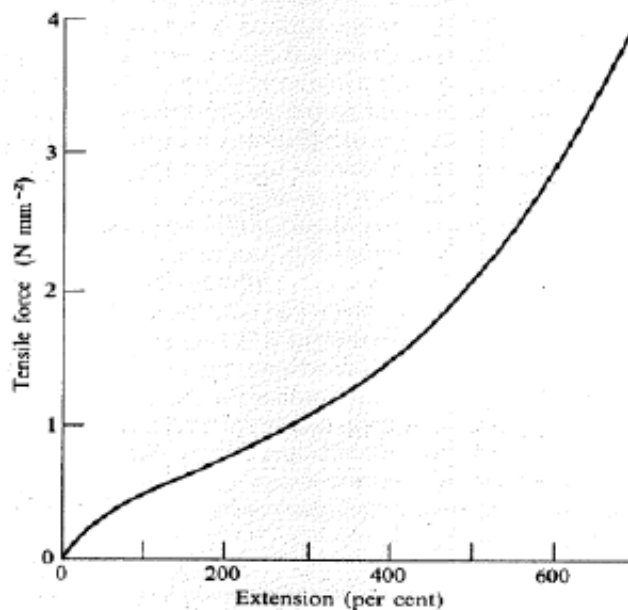


Figura 3: curva tensione – deformazione di un materiale iperelastico

Nei materiali elastici e iperelastici lo stato di sollecitazione è funzione soltanto dello stato di deformazione rispetto alla configurazione nella quale si sta analizzando il materiale e non rispetto alla configurazione di riferimento del materiale stesso [6]. Pertanto, un materiale può essere definito di tipo iperelastico se esiste un funzionale $\phi(E)$ del tensore delle deformazioni, il cui gradiente è pari al tensore delle sollecitazioni, secondo la relazione:

$$S = \frac{\partial \phi(E)}{\partial E} = \nabla \phi$$

Dove:

- S è il tensore delle deformazioni;
- E è il tensore delle sollecitazioni;
- $\phi(E)$ è il funzionale del tensore delle sollecitazioni.

I materiali iperelastici possono essere ulteriormente suddivisi in base alla variazione volumetrica, in comprimibili e incomprimibili. In particolare, se dal passaggio dalla configurazione iniziale a quella deformata il materiale presenta una variazione volumetrica, allora si definisce comprimibile, altrimenti incomprimibile.

Il modello iperelastico può essere descritto dal punto di vista della deformazione micromeccanica del materiale (*Invariant Based*). I modelli su base invariante sono nati con l'obiettivo di rappresentare le classi di materiali con comportamento fortemente non lineare. Tali modelli prendono origine dalla legge di Hooke, adattata per grandi deformazioni applicate a volumi finiti di materiale.

Il modello iperelastico può essere espresso attraverso una funzione densità di energia di deformazione W che, per i materiali isotropi e incomprimibili, viene in genere definita in funzione degli allungamenti lungo le tre direzioni principali λ_i [7].

$$W = W(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3)$$

Le tensioni σ possono essere quindi calcolate a partire dalla funzione W e dagli allungamenti, secondo la formula:

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad i = 1,2,3$$

Per i materiali incomprimibili, essendo $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$, viene a mancare la dipendenza da λ_3 della funzione densità di energia di deformazione, ottenendo quindi:

$$W = W(\lambda_1; \lambda_2) = W(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_1^{-1} \lambda_2^{-1})$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1}$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2}$$

Poiché gli stati di tensione sono caratterizzati da diverse componenti, spesso vengono utilizzate delle singole quantità scalari per descrivere il tensore delle tensioni. Vengono pertanto definiti gli invarianti I del tensore di deformazione, espressi come:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Si specifica che, nel caso di materiali incomprimibili, $I_3 = 1$

Il comportamento iperelastico è stato descritto attraverso diversi modelli, ognuno dei quali esplicita in maniera differente la funzione densità di energia di deformazione W [8].

Di seguito vengono riportati i modelli iperelastici più utilizzati.

3.1. Modello Neo-Hookean

Il modello iperelastico Neo-Hookean (NH) è basato su due parametri del materiale: il modulo di taglio μ e il modulo di comprimibilità κ . Il modello NH è in genere utilizzato per descrivere materiali solidi incomprimibili e gommosi, per i quali il modulo di comprimibilità ha un'influenza trascurabile. È uno dei modelli più semplici per i materiali iperelastici e richiede esperimenti meno impegnativi per determinarne i coefficienti. Tale modello, pertanto, fornisce una descrizione approssimata dei materiali reali, rimanendo comunque sufficientemente adeguato alla descrizione delle proprietà di alcuni materiali plastici o gommosi.

Per i materiali incomprimibili, quindi, la funzione densità di energia di deformazione W può essere descritta secondo il modello NH come:

$$W(I_1; J) = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) + \frac{\kappa}{2}(J - 1)^2$$

Dove J è il determinante Jacobiano del gradiente di deformazione F e I_1 il primo invariante di deformazione.

Dato che la relazione tra W e $(J - 1)$ è di tipo quadratico, la tensione risulta essere lineare rispetto a $(J - 1)$.

Si evidenzia che l'equazione di W è lineare rispetto all'invariante I_1 e, pertanto, potrebbe non fornire una risposta adeguata al comportamento di alcuni elastomeri caratterizzati da elevate deformazioni non lineari. Si sottolinea inoltre che non viene esplicitata nessuna relazione di dipendenza dal secondo invariante I_2 , che potrebbe causare una sottostima delle tensioni in caso di carichi principalmente biassiali.

Secondo il modello NH per i materiali incomprimibili, le tensioni, rispettivamente per gli stati di deformazione monoassiale, planare e biassiale, sono:

$$\sigma_{monoassiale} = \mu \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right)$$

$$\sigma_{planare} = \mu \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$\sigma_{biassiale} = \mu \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right)$$

3.2. Modello Mooney-Rivlin

Il modello di Mooney-Rivlin (MR) è un'estensione di quello di NH, che include la dipendenza esplicita dell'invariante I_2 con l'obiettivo di migliorarne l'accuratezza.

La funzione densità di energia di deformazione W può essere descritta secondo il modello MR come:

$$W(C_{10}; C_{01}; \kappa) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_1 - 3) + \frac{\kappa}{2}(J - 1)^2$$

Dove C_{10} e C_{01} sono i coefficienti che dipendono dal materiale.

Questo modello risulta essere più adatto a descrivere il comportamento dei materiali elastomerici e dei tessuti biologici [9]. La presenza del termine C_{01} , tuttavia, può rendere il modello instabile per definite deformazioni con diverse condizioni di carico.

Secondo il modello MR per i materiali incomprimibili, le tensioni, rispettivamente per gli stati di deformazione monoassiale, planare e biassiale, sono:

$$\sigma_{monoassiale} = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left[C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda} \right]$$

$$\sigma_{planare} = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) [C_{10} + C_{01}]$$

$$\sigma_{biassiale} = 2C_{10} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) + 2C_{01} \left(\lambda^4 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

3.3. Modello di Yeoh

Il modello di Yeoh è caratterizzato da una dipendenza polinomiale del terzo ordine con l'invariante I_1 , mentre non prevede una dipendenza con I_2 .

La funzione densità di energia di deformazione W può essere descritta secondo il modello di Yeoh come:

$$W(C_{10}; C_{20}; C_{30}; \kappa) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{\kappa}{2}(J - 1)^2$$

L'aumento di ordine di dipendenza di W dall'invariante I_1 permette una migliore accuratezza rispetto al modello Neo-Hookean e una maggiore stabilità rispetto a quello di Mooney-Rivlin. Per molti materiali elastomerici, infatti, la dipendenza da I_1 è più forte rispetto a quella da I_2 , per cui quest'ultima risulta essere più difficilmente determinabile sperimentalmente.

Secondo il modello di Yeoh per i materiali incomprimibili, le tensioni, rispettivamente per gli stati di deformazione monoassiale, planare e biassiale, sono:

$$\sigma_{monoassiale} = 2[C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right)$$

$$\sigma_{planare} = 2[C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$\sigma_{biassiale} = 2[C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right)$$

3.4. Modelli polinomiali in I_1 e I_2

I modelli precedenti possono essere generalizzati attraverso funzioni polinomiali in I_1 e I_2 . La funzione densità di energia di deformazione W secondo i modelli polinomiali in I_1 e I_2 può essere descritta come segue:

$$W(C_{ij}; D_i) = \sum_{i,j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i}$$

Dove C_{ij} e D_i sono parametri del materiale.

Tale definizione di W è generalizzata e include i modelli NH, MR di Yeoh, ma d'altra parte rende difficile la determinazione dei parametri che forniscano una predizione accurata e robusta in caso di carichi multiassiali. Pertanto, questa rappresentazione parametrica non è comunemente utilizzata, al contrario dei precedenti modelli caratterizzati da un numero fissato di parametri.

3.5. Modello di Ogden

Il modello di Ogden è caratterizzato da una forma più generalizzata della funzione densità di energia di deformazione, che viene espressa in funzione degli allungamenti λ_i lungo le direzioni principali. La funzione densità di energia di deformazione W secondo il modello di Ogden può essere descritta come segue:

$$W(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} ((\lambda_1)^{\alpha_i} + (\lambda_2)^{\alpha_i} + (\lambda_3)^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$$

Tale formulazione generalizzata permette da un lato la possibilità di descrivere una vasta gamma di materiali conservativi e isotropi, ma richiede notevoli sforzi nell'identificazione sperimentale dei parametri. L'incorretta selezione di un appropriato set di parametri, pertanto, potrebbe rendere tale modello non stabile nella predizione degli stati di deformazione.

Secondo il modello di Ogden per i materiali incomprimibili, le tensioni, rispettivamente per gli stati di deformazione monoassiale, planare e biassiale, sono:

$$\sigma_{monoassiale} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[\lambda^{\alpha_i} - \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right)^{\alpha_i} \right]$$

$$\sigma_{planare} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[\lambda^{\alpha_i} - \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{\alpha_i} \right]$$

$$\sigma_{biassiale} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[\lambda^{\alpha_i} - \left(\frac{1}{\lambda^2} \right)^{\alpha_i} \right]$$

4. Additive manufacturing

L'additive manufacturing, anche nota come stampa 3D, è una tecnica di fabbricazione che permette di realizzare un'ampia gamma di strutture e geometrie complesse, partendo da un modello CAD [10].

La tecnica di additive manufacturing è stata sviluppata oltre 30 anni fa, grazie alla contemporanea diffusione dell'utilizzo di software per il disegno assistito, *computer-aided design* (CAD). L'ente americano American Society for Testing and Materials (ASTM) International, che si occupa dello sviluppo e della diffusione di standard internazionalmente riconosciuti, ha definito l'additive manufacturing come "un processo di unione di materiali per realizzare oggetti a partire da modelli 3D, tipicamente strato per strato, in opposizione alle metodologie di manifattura per sottrazione di materiale" [11].

Il processo consiste nello stampaggio di strati successivi di materiali che vengono disposti uno sopra l'altro.

La tecnica principale per la produzione additiva ha inizio partendo da un modello 3D CAD dell'oggetto da realizzare che, in seguito, deve essere convertito in un file costituito da superfici, come ad esempio nel formato *standard tessellation language* STL. Nel file STL, infatti, le superfici che formano il solido 3D vengono discretizzate attraverso l'utilizzo di una serie di triangoli. All'interno del file sono contenute le coordinate X, Y e Z per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo, con un vettore che descrivere l'orientazione della normale alla superficie. Il formato STL presenta diversi vantaggi il maggiore dei quali è la sua semplicità, in quanto risulta molto facile da generare e da processare. D'altronde, a suo sfavore, questa tipologia di formato presenta una geometria approssimata e una struttura dati che, pur risultando semplice, può presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte. Solitamente, i produttori di stampanti 3D forniscono il proprio software *Slicer*, che suddivide il modello del file STL in singoli strati. Il file che contiene i singoli strati suddivisi viene, in seguito, inviato alla stampante. La macchina AM stampa quindi progressivamente uno strato di materiale sopra l'altro, realizzando infine un oggetto tridimensionale. Dopo la fase di stampaggio, possono seguire diversi processi di post-produzione, come la post-cura, la ricottura, la verniciatura o la rimozione dei supporti.

Nella Figura 4 viene rappresentata la classica procedura per la realizzazione di parti attraverso l'additive manufacturing.

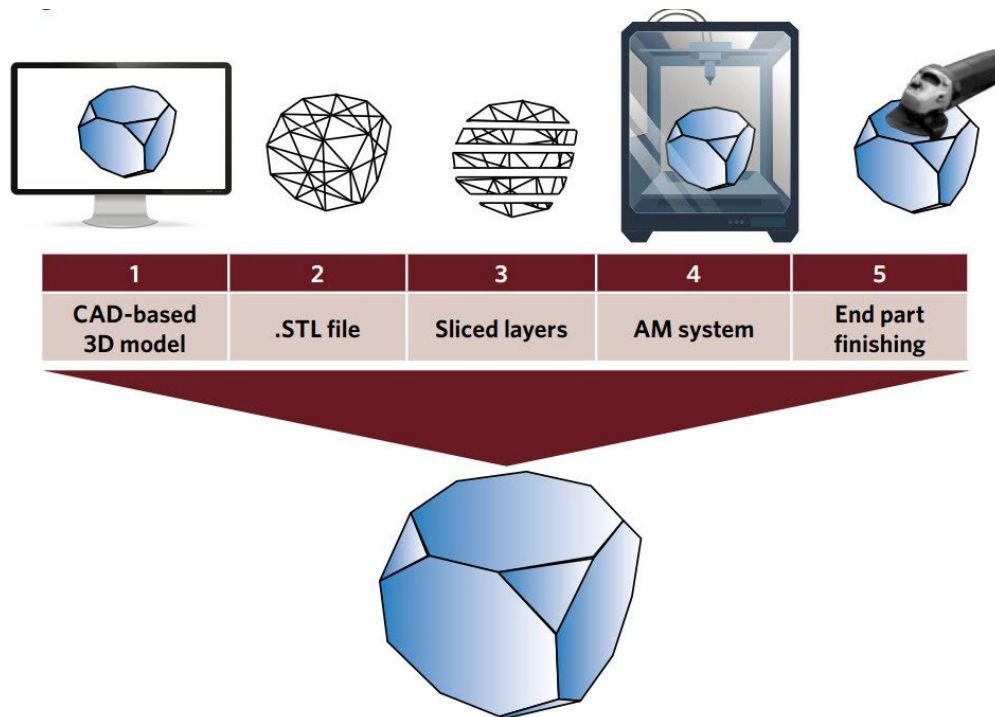


Figura 4: Flusso dei processi per la produzione additiva

L'appropriata implementazione delle tecnologie di additive manufacturing può aiutare a risparmiare tempo e costi di produzione, abbreviando il ciclo di sviluppo del prodotto e migliorando la capacità e la complessità della produzione. Grazie alla tecnica di produzione unica, l'additive manufacturing è stata adottata in diversi settori come quello aerospaziale, quello automobilistico, quello alimentare e quello medico. Le principali applicazioni di additive manufacturing includono la prototipazione rapida, l'attrezzaggio rapido e la produzione rapida [2].

I vantaggi principali dell'additive manufacturing rispetto ai metodi tradizionali di produzione possono essere riassunti in tre punti principali:

- *Complessità nel design dei componenti realizzabili*: la produzione additiva consente la creazione di geometrie complesse mantenendo comunque dimensioni precise, che risultano essere invece di difficile realizzazione con i metodi tradizionali.

- *Speed to market*: i sistemi di produzione additiva possono fabbricare prodotti con un attrezzaggio delle macchine ridotto, con risparmi in termini di tempo sia durante il design sia per lo sviluppo del prodotto, agevolando la produzione su richiesta.
- *Riduzione degli scarti*: la produzione additiva permette di utilizzare in genere un'inferiore quantità di materiale durante la fabbricazione dei prodotti, riducendo significativamente scarti e rifiuti durante la produzione.

D'altra parte, gli svantaggi dell'additive manufacturing rispetto ai metodi tradizionali di produzione sono da ritrovarsi principalmente in:

- *Produzione di massa*: i metodi tradizionali di produzione sono più adatti per un alto volume di produzione, per i quali i costi fissi per la configurazione e l'attrezzaggio delle macchine possono essere ammortizzati su di un numero maggiore di prodotti. La produzione additiva è generalmente più competitiva limitatamente a lotti di basso – medio volume.
- *Scelta dei materiali*: la scelta sui materiali utilizzabili per la produzione additiva è piuttosto ridotta rispetto all'ampia possibilità che si ha a disposizione per i metodi di produzione tradizionale.
- *Possibilità di produzione di parti di grandi dimensioni*: I metodi di lavorazione tradizionali sono più adatti alla realizzazione di parti aventi grandi dimensioni. I sistemi di additive manufacturing sono invece ancora vincolati dalle dimensioni limitate delle macchine.

4.1. Tecnologie di additive manufacturing

Di seguito vengono descritte le principali tipologie di tecnologie di additive manufacturing sviluppate e disponibili sul mercato.

4.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)

La modellazione a deposizione fusa è una tecnologia di produzione additiva brevettata da Scott S. Crump, co-fondatore della Stratasys Inc., nel 1989. Tale tecnologia è particolarmente diffusa tra le stampanti di livello domestico per la realizzazione di manufatti attraverso compositi polimerici [12].

Questa tecnica di produzione additiva è basata sull'estrusione e prevede che il materiale estruso venga depositato su una piattaforma, andando successivamente a creare uno strato bidimensionale sopra l'altro, realizzando così un oggetto tridimensionale.

La FDM è una tecnica di estrusione che prevede l'utilizzo di bobine di filamenti termoplastici, come il policarbonato (PC), l'acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), l'acido polilattico (PLA) o, polimeri termoplastici con più alte temperature di fusione come il PEEK (polietere etere chetone). Le bobine possono avere diametri variabili e, durante il processo di stampa, vengono fuse ed estruse attraverso un ugello riscaldato.

Sulla piattaforma viene stampato il polimero semi-liquido che solidifica istantaneamente. I limiti principali per la FDM sono da ritrovarsi proprio nel suo processo di fusione del materiale e nell'utilizzo esclusivo di polimeri termoplastici. In primo luogo, il filamento durante il processo di alimentazione e di successiva fusione si trova ad essere sottoposto a stress di natura meccanica e termica, perciò, deve essere fabbricato con un'elevata qualità. Il filamento deve resistere a queste sollecitazioni, prima e dopo la fusione, per poter mantenere una buona qualità di stampa.

Di seguito, in Figura 5, viene riportato uno schema che mostra il processo di stampaggio di oggetti per una stampante FDM.

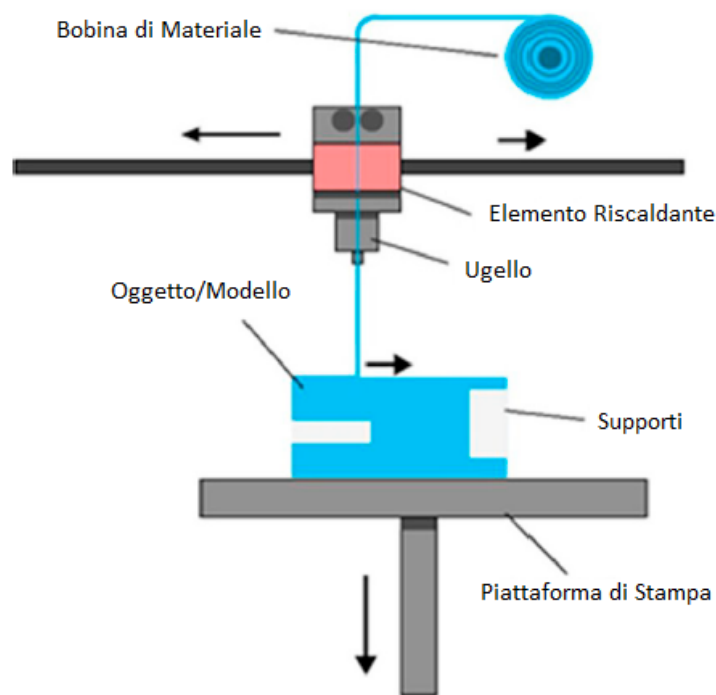


Figura 5: Processo di stampaggio FDM

Nel caso di geometrie complesse, può essere necessario realizzare delle strutture di supporto. Tra i principali vantaggi, la FDM è una tecnologia per stampanti 3D a basso costo ed è capace di avere elevate velocità di stampa in confronto alle altre.

4.1.2. Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia è stata una delle prime tecniche di additive manufacturing ad essere stata sviluppata. Fu applicata per la prima volta da Charles Hull nel 1986 e successivamente sviluppata da Jacobs e 3D Systems [13].

La stereolitografia permette di utilizzare come materiale per il processo di stampa una resina fotosensibile, solitamente epossidica o acrilica. Questa, sfruttando il processo della fotopolimerizzazione, viene esposta a radiazioni ultraviolette (UV) aventi specifiche lunghezze d'onda e solidifica in diversi strati, realizzando così l'oggetto solido.

Solitamente in una stampante SLA è presente una piattaforma che, prima di iniziare il processo stampa, viene immersa in una vasca contenente la resina, fino ad una profondità che varia da 0.05 mm a 0.15 mm. Tale profondità iniziale determina l'effettiva altezza di ogni strato. Nella stampante SLA è presente un dispositivo che emette un laser UV che viene riflesso attraverso uno specchio sulla superficie del polimero liquido. Il fascio laser percorre l'intera sezione trasversale del modello, facendola polimerizzare. La piattaforma si sposta progressivamente verso il basso, fino a raggiungere una predefinita profondità. Dopo di che, il ciclo di stampa ricomincia, andando a costruire la parte strato per strato, fino alla completa realizzazione dell'oggetto.

Di seguito, in Figura 6, viene riportato uno schema che mostra il processo di stampaggio di oggetti per una stampante SLA.

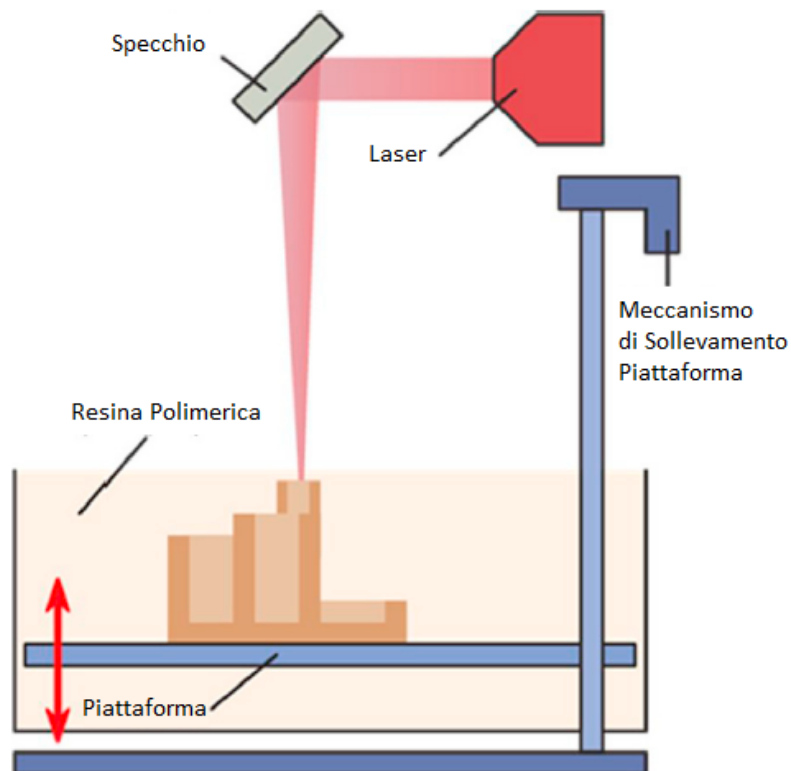


Figura 6: Processo di stampaggio SLA

La composizione della resina può essere combinata con foto-iniziatori e componenti assorbitori di raggi UV, in modo tale da regolare il grado della polimerizzazione. Questo è uno dei fattori che determinano la qualità del prodotto finito, insieme alla potenza del laser, alla velocità di scansione e il tempo di esposizione agli UV.

Tra i principali vantaggi della tecnologia SLA vi è l'alta risoluzione di stampa, che dipende dal numero di fotoni applicati. Generalmente i fotoni vengono emessi per attivare la polimerizzazione in un determinato punto. È possibile raggiungere una risoluzione più alta di $100\ \mu\text{m}$ come effetto della polimerizzazione localizzata. Per via dell'alta risoluzione di stampa si possono realizzare oggetti complessi attraverso questo tipo di stampanti. Inoltre, dato che la tecnologia SLA non prevede l'utilizzo di ugelli, non si verificano problemi causati dall'intasamento. Tuttavia, l'elevato costo per l'attrezzaggio di un impianto di additive manufacturing basato sulla tecnologia SLA ha reso questa tipologia di tecnologia proibitiva per la maggior parte delle industrie manifatturiere [14].

4.1.3. Digital Light Processing (DLP)

La DLP è una tecnologia di polimerizzazione in vasca simile alla SLA, nella quale però un proiettore, posto al di sotto della vasca, proietta l'intera immagine della sezione dell'oggetto da realizzare su di una piattaforma immersa nella resina contenuta all'interno della vasca. Il proiettore fa polimerizzare contemporaneamente l'intera sezione dell'oggetto da realizzare. Dato che la vasca che contiene la resina fotosensibile si trova sopra il proiettore, è necessario che essa sia realizzata con materiale trasparente, per permettere il passaggio dell'immagine proiettata e, quindi, la polimerizzazione della resina. Una volta che lo strato viene polimerizzato, la piattaforma si muove verso l'alto per permettere la realizzazione dello strato successivo sopra a quello precedentemente realizzato. Il processo si ripete fino a che l'intero oggetto non è completato.

La risoluzione delle stampanti SLA viene definita dalle dimensioni del punto creato dal laser. La risoluzione della stampante DLP è determinata dalla risoluzione del proiettore e dalla dimensione dei pixel con cui proiettano le immagini.

Dato che ogni strato viene esposto nello stesso momento all'intera immagine proiettata, le stampanti a DLP impiegano minor tempo per il processo di stampa, rispetto a quelle a SLA, che invece devono scannerizzare con il laser punto per punto la sezione da stampare.

Tra i vantaggi principali, quindi, vi è la possibilità di stampare contemporaneamente più oggetti, specialmente in caso di elementi di grandi dimensioni, compatti e con pochi dettagli. Per quanto riguarda la stampa di oggetti aventi dettagli più piccoli, è però necessario integrare un obiettivo di proiezione che concentri la luce su determinate aree della piattaforma di stampa per mantenere la qualità desiderata della risoluzione di stampa [12].

Di seguito, in Figura 7, viene riportato uno schema che mostra il processo di stampaggio di oggetti per una stampante DLP.

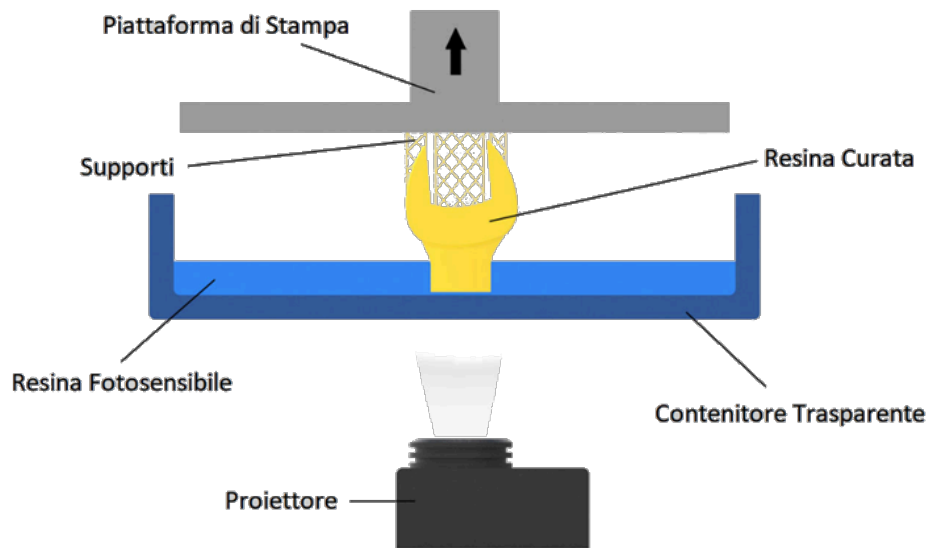


Figura 7: Processo di stampaggio DLP

4.1.4. Selective Laser Sintering (SLS)

La sinterizzazione laser selettiva (SLS) è una tipologia di tecnologia per additive manufacturing che sfrutta la fusione a letto di polvere. In tale processo, un letto di polveri metalliche o polimeriche viene colpito parzialmente (sinterizzato) o completamente (fuso) da una fonte di calore direzionale ad elevata potenza, come un laser, lasciando uno strato solidificato di polvere fusa. L'apparecchiatura di una stampante SLS è costituita da una camera che contiene la riserva di polvere e una camera in cui avviene lo stampaggio della parte. Entrambe le camere vengono inizialmente riscaldate fino ad una temperatura leggermente inferiore a quella di fusione del materiale. Successivamente, nella camera di stampaggio, viene emesso un laser ad alta potenza sulla superficie di polvere preriscaldata, che sinterizza la sezione da realizzare. La camera di stampa si sposta verso il basso fino ad una profondità predefinita, corrispondente allo spessore dei singoli strati dell'oggetto da realizzare. Nello stesso momento la camera con la riserva di polvere si sposta verso l'alto, esponendo parte della polvere al di sopra dell'ultimo strato stampato. Un tamburo livellatore spinge la polvere esposta verso la camera di stampa andando a riempire il vuoto lasciato dall'abbassamento della camera di stampa. Alla fine del processo di stampa l'oggetto solidificato, contenuto all'interno della camera di stampa, è completamente ricoperto da uno strato esterno di polvere in eccesso. Questo viene infine rimosso in modo da ottenere l'oggetto finito.

Di seguito, in Figura 8, viene riportato uno schema che mostra il processo di stampaggio di oggetti per una stampante SLS.

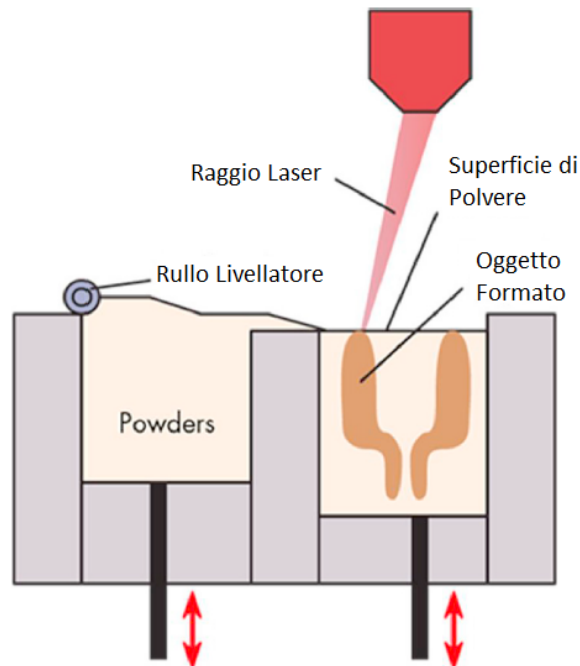


Figura 8: Processo di stampaggio SLS

Esistono numerosi fattori che influenzano la qualità finale dell'oggetto realizzato attraverso una stampante con tecnologia SLS, i principali dei quali sono: la dimensione delle particelle di polvere, la potenza del laser, il volume di stampa e la velocità di stampa.

Uno dei principali vantaggi delle stampanti SLS è che queste non hanno bisogno di supporti strutturali, poiché la polvere che ricopre l'oggetto durante il processo funge a tale scopo. Questo permette di realizzare oggetti dalla geometria complessa con facilità.

Tra i principali svantaggi, le stampanti SLS possono utilizzare solamente polimeri termoplastici come il policaprolattone (PCL) e il polilattato (PLA), oltre alla ceramica e ai metalli. La finitura superficiale ottenibile con una stampante SLS è in genere poco rifinita. Inoltre, le stampanti SLS presentano un elevato costo di gestione, in quanto richiedono un ampio utilizzo di fonti di calore ad elevata potenza, come laser o raggi ad elettroni.

4.1.5. Three - Dimensional Printing (3DP)

La tecnologia stampaggio tridimensionale (3DP) è una tecnologia di fusione a letto di polveri per additive manufacturing sviluppata al Massachusetts Institute of Technology. Nelle stampanti 3DP un materiale legante liquido viene depositato tramite un getto sopra il letto di

polvere che funge da substrato per legare insieme le particelle di polvere e creare uno strato bidimensionale. Un ulteriore strato di polvere viene fatto successivamente depositare sopra allo strato precedentemente realizzato. Lo strato precedentemente stampato viene spostato verso il basso tramite un meccanismo di abbassamento. Il processo viene quindi ripetuto fino a che l'intero oggetto viene realizzato.

Tra i fattori che determinano la qualità del prodotto finale vi sono: le dimensioni delle particelle di polvere, la viscosità del legante, la velocità di deposizione del legante e la sua interazione con la polvere.

Uno dei principali svantaggi di tale tecnologia consiste nella scarsa finitura superficiale, nell'elevata porosità dei prodotti finali e nei limiti riguardo ai volumi di stampa. Tra i vantaggi vi sono il basso costo di installazione e la possibilità utilizzare diverse tipologie di materiali.

4.1.6. Polyjet Technology

La tecnologia Polyjet può essere considerata un'evoluzione della stampa ad inchiostro, poiché è caratterizzata da ugelli che spruzzano piccole goccioline di fotopolimeri o altri materiali liquidi. Le gocce vengono curate istantaneamente da una fonte di radiazione ultravioletta, e creano uno strato ultrasottile sulla piattaforma di stampa.

Tra gli svantaggi, in caso di realizzazione di geometrie complesse, sono necessari dei supporti che poi devono essere rimossi manualmente.

Tra i principali vantaggi si evidenzia la non necessità di processi di post cura. Inoltre, questa tecnologia è caratterizzata da un'alta risoluzione ed è in grado di stampare utilizzando diverse tipologie di materiali.

4.1.7. Laminated Object Manufacturing (LOM)

La produzione di oggetti laminati è una tecnica di prototipazione rapida e manifattura additiva ampiamente diffusa nell'industria. Durante il processo di stampaggio, dei fogli di materiale termo-attivo vengono dapprima stesi ed in seguito laminati su di un substrato attraverso un rullo riscaldato. Un laser taglia il foglio, andando a tracciare il perimetro della sezione dell'oggetto da realizzare, mentre il materiale in eccesso viene trasportato via da un altro rullo. In seguito, la piattaforma si abbassa per la laminazione dello strato successivo, reiterando il processo di stampa fino a che l'oggetto non viene realizzato.

Tra i vantaggi, la tecnica LOM non necessita di supporti, poiché gli oggetti realizzati si sostengono da soli. Inoltre, possono essere realizzate geometrie complesse e sporgenti.

Gli oggetti realizzati tramite tecnologia LOM sono caratterizzati da finiture superficiali grossolane e la loro risoluzione dipende dallo spessore dei fogli utilizzati e dalla pressione di adesione esercitata.

Di seguito in Tabella 1 vengono riassunte le caratteristiche delle principali tecnologie di stampa 3D analizzate.

Tabella 1: Proprietà delle tecnologie di stampa 3D

Tecnologia	Processo	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
<i>Stereolitografia</i>	Polimerizzazione in vasca	Fotopolimeri liquidi, compositi	Geometrie complesse; parti dettagliate; buona finitura superficiale	Bisogno di processi di post cura; necessità di strutture di supporto
<i>Digital light processing</i>	Polimerizzazione in vasca	Fotopolimeri	Produzione simultanea; geometrie complesse; alta precisione	Spessori ridotti; scelta dei materiali utilizzabili limitata
<i>Fused deposition modeling</i>	Estrusione di materiale	Polimeri termoplastici	Parti resistenti; geometrie complesse	Finiture superficiali scarse; lunghi tempi di produzione
<i>Selective laser sintering</i>	Fusione a letto di polveri	Carta, plastica, metalli, vetro, ceramiche, compositi	Nessuna struttura di supporto; elevata resistenza al calore; velocità di produzione	Accuratezza dipendente dalla granulometria della polvere; finiture superficiali scarse
<i>Laminated object manufacturing</i>	Fusione a letto di polvere	Carta, plastica, laminati metallici, ceramiche, compositi	Basso costo; materiali non tossici; velocità di produzione	Parti non omogenee

5. Prove di caratterizzazione meccanica

I materiali gommosi sono in genere caratterizzati da ampie deformazioni e una relazione tensione – deformazione fortemente non lineare. La caratterizzazione meccanica di tali materiali viene in genere studiata mediante l'utilizzo di prove sperimentali per definire dei modelli costitutivi che ne descrivano il particolare comportamento.

Per i materiali iperelastici, per ottenere i parametri caratteristici del comportamento meccanico che descrivono la funzione densità di energia di deformazione W , è necessario eseguire, oltre alla prova di trazione, altre tipologie di prove, quali la prova di trazione planare e la prova biassiale di bulge test, in modo tale da poter effettuare un fitting delle curve sperimentali migliore con i diversi modelli iperelastici.

L'importanza di test multipli (non equivalenti) per la modellazione dei materiali non può essere sottovalutata. A seconda delle modalità di deformazione della struttura, possono essere necessari anche i dati della tensione equibiassiale o del taglio planare. Le prove volumetriche devono essere previste per i materiali comprimibili sottoposti a grandi deformazioni, ad esempio le schiume.

Di seguito vengono descritte le principali prove sperimentali per la caratterizzazione meccanica dei materiali assimilabili alla gomma.

5.1. Prova di trazione

La prova di trazione è una tra le prove di caratterizzazione dei materiali più comuni e consiste nel sottoporre il provino del materiale da testare ad uno stato di tensione monoassiale. Il provino del materiale viene sottoposto ad un carico di trazione, applicato con una determinata velocità d'incremento fino a provocarne la rottura, allo scopo di determinare la curva di tensione - deformazione caratteristica del materiale in esame.

Il provino è caratterizzato da diversi elementi, come mostrato in Figura 9: la lunghezza L_c della parte centrale calibrata; la lunghezza iniziale L_0 , che rappresenta la parte centrale a sezione ridotta del provino nella quale si ha uno stato di deformazione uniforme e in cui avviene la rottura del provino stesso; la larghezza e l'altezza della sezione rettangolare della parte centrale; le teste di serraggio (1), aventi forma e dimensioni tali da poter essere afferrate dalle ganasce della macchina; i raccordi ad archi di cerchio tra la parte calibrata e le teste, necessari

per evitare fenomeni di concentrazione degli sforzi, che influirebbero sui risultati della prova; la lunghezza totale del provino L_t .

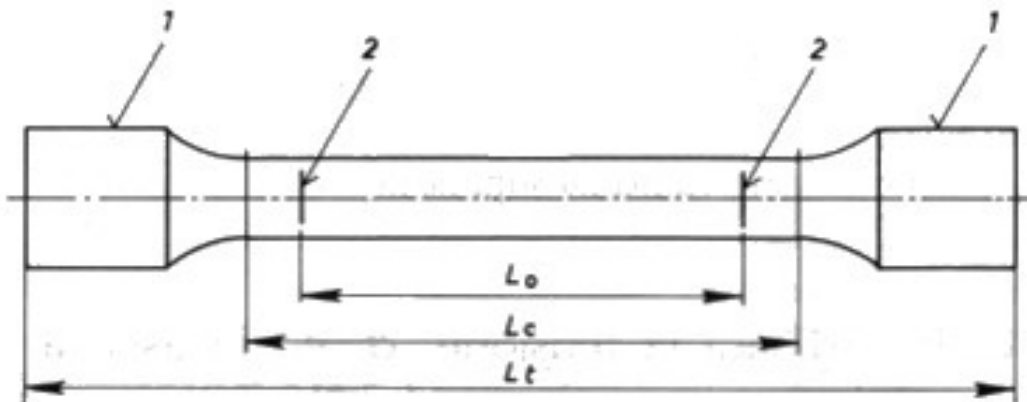


Figura 9: Provino per prova di trazione

I macchinari per la prova di trazione sono costituiti da un'incastellatura, dal dispositivo per l'applicazione del carico, dagli organi per il fissaggio del provino o dell'elemento e dagli strumenti per la misura della forza. In particolare, come mostrato in Figura 10, la macchina per la prova di trazione è caratterizzata da una traversa mobile e da una fissa. Tra le due vi è posizionata la cella di carico, tramite la quale si ottiene la misurazione delle forze. Sulle traverse sono sistemati gli afferraggi, necessari per fissare il provino del materiale da testare alla macchina.



Figura 10: Macchina di trazione

Le prove di trazione possono essere condotte:

- *Controllo di spostamento*: le prove sono condotte imponendo che la traversa mobile della macchina si muova con velocità $\frac{dh}{dt}$ costante, dove h rappresenta lo spostamento della traversa mobile;
- *Controllo di deformazione*: si impone che la deformazione ε applicata cresca con velocità $\frac{d\varepsilon}{dt}$ costante;
- *Controllo di carico*: in alternativa si può imporre che il carico F cresca con velocità $\frac{dF}{dt}$ costante.

Il primo caso di prove eseguite tramite controllo di spostamento è in genere quello più frequente e la velocità di spostamento della traversa o del pistone è spesso imposta da normative o regolamenti standard.

Dai risultati di tale prova possono essere determinati parametri caratteristici, come il carico unitario di snervamento, il carico unitario di rottura e l'allungamento percentuale a rottura. La prova di trazione è una prova distruttiva, in quanto provoca la distruzione del provino su cui si effettua.

In generale, la curva caratteristica ottenuta per un provino sottile di materiale duttile può essere convenzionalmente suddivisa in una serie di fasi caratterizzanti, come mostrato in Figura 11:

- *Tratto elastico*: è la prima fase lineare nel grafico tensione – deformazione, avente inclinazione pari al modulo di Young. In tale fase la deformazione è di tipo reversibile;
- *Hardening (o incrudimento)*: rappresenta l'aumento del limite di plasticità con l'evoluzione monotona delle deformazioni plastiche;
- *Necking diffusivo*: introduzione di una deformazione trasversale che porta a una riduzione della sezione resistente del provino;
- *Necking locale (o strizione)*: tale fase avviene quando la deformazione si concentra in un punto specifico della sezione resistente del provino e, in genere, anticipa la rottura;
- *Rottura*: Tale fase ha inizio con l'apparizione della prima cricca non passante sul tratto utile, fino alla separazione di due superfici di rottura. Se la rottura non avviene all'interno del tratto calibrato la prova non viene validata come da normativa.

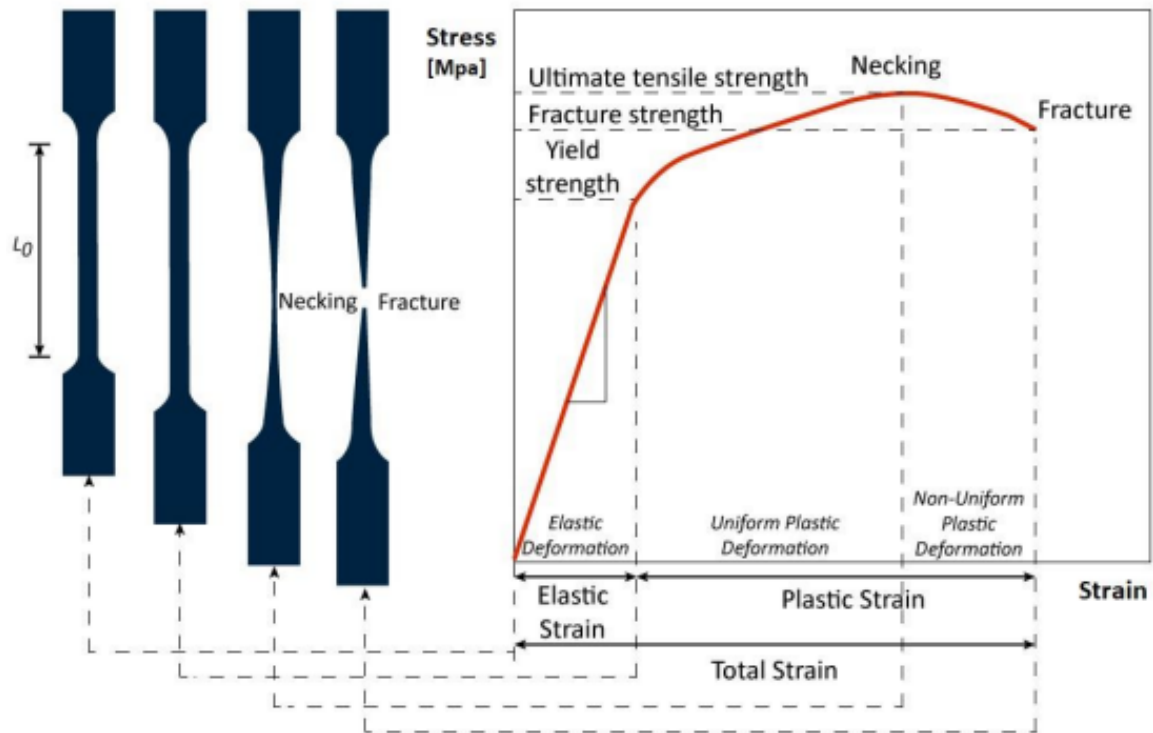


Figura 11: Fasi principali della prova di trazione

In modo più specifico, per quanto riguarda il comportamento meccanico che possono assumere i materiali polimerici, si possono osservare diversi andamenti, in funzione del grado di duttilità del materiale.

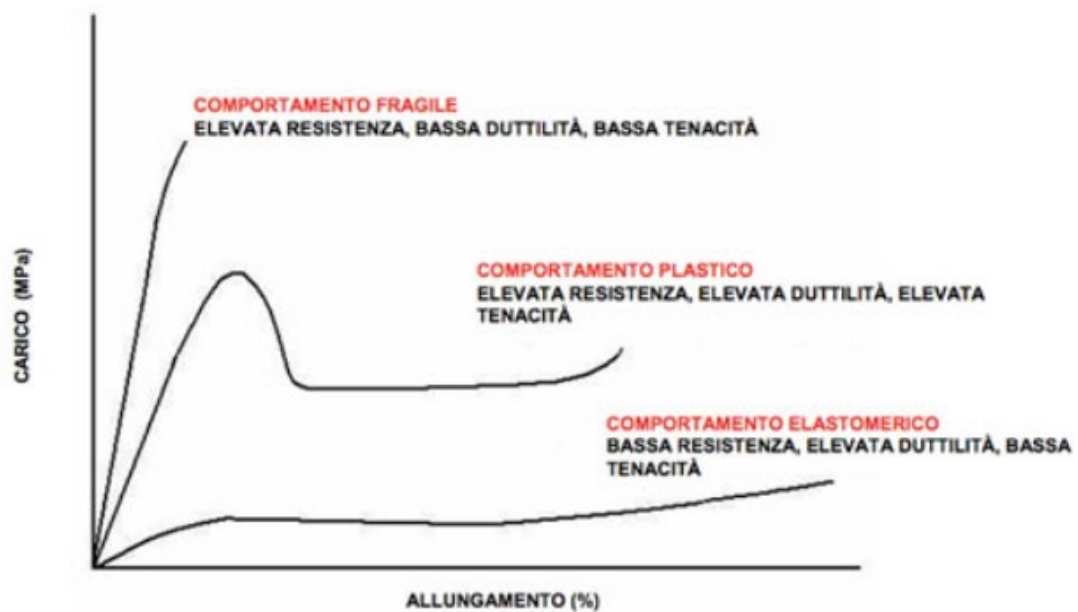


Figura 12: Esempi di comportamento a trazione dei polimeri

Dalla Figura 12 si può osservare che i polimeri caratterizzati da un comportamento duttile presentano generalmente un tratto elastico, seguito da un punto di snervamento, superato quale il materiale inizia a deformarsi plasticamente.

Un'ulteriore classe di polimeri, tra cui le gomme e gli elastomeri, è invece caratterizzata da grandi allungamenti.

Al contrario, i materiali fragili non presentano la fase di comportamento plastico, poiché giungono direttamente a rottura dopo la fase elastica.

Alcuni polimeri possono non presentare il tratto di deformazione elastica. Per essi non viene definito il modulo di Young, ma viene calcolato il modulo secante, ossia il valore della pendenza della retta passante per l'origine ed un punto della curva carico – allungamento.

Per le prove di trazione, si definiscono la tensione ingegneristica σ e la deformazione ingegneristica ε , che fanno riferimento alle dimensioni originali del provino, l_0 e A_0 , prima di essere sottoposto alla prova.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Dove F è la forza applicata dalla macchina e l_f la lunghezza finale raggiunta dal provino. Tuttavia, tali relazioni restano valide per piccole deformazioni, ossia in campo elastico. Al variare della lunghezza, infatti, la deformazione si accumula. Pertanto, è possibile definire un incremento di deformazione $d\varepsilon$ in corrispondenza dell'allungamento dl . Tale deformazione viene definita *logaritmica* o *deformazione vera*.

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l_0}$$

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_0}$$

La misura delle deformazioni può avvenire secondo due modalità principali: mediante l'utilizzo di un estensimetro oppure tramite uno strumento di misura ottico.

L'estensimetro meccanico a contatto restituisce la misura della deformazione media sul tratto utile del provino, senza considerare lo stato tensionale locale presente in ogni punto del provino. L'estensimetro è costituito da due coltelli disposti su un'incastellatura, a una distanza di misura che rappresenta la base di misura dello strumento. Lo spostamento del coltello mobile rispetto a quello fisso determina l'allungamento del provino. Un trasduttore di misura converte lo spostamento tra i coltelli in un segnale di tensione amplificato. L'efficacia dell'acquisizione termina una volta che il materiale arriva nella zona di snervamento.

Nel caso di stati di deformazione non uniforme, per i quali non è possibile trascurare lo stato tensionale locale presente in ogni punto del provino, in alternativa all'estensimetro meccanico si utilizza la tecnologia della Digital Image Correlation (DIC). Questa consiste nell'utilizzo di un video estensimetro, che permette l'identificazione di tutti i valori ed un'analisi "point by point" del campo delle deformazioni. Sostituendo l'estensimetro meccanico con uno strumento di misura ottico, infatti, si possono ottenere le deformazioni vere (o reali) di ogni punto della superficie del provino. Con uno strumento di misura ottico è quindi possibile definire la curva tensione vera – deformazione vera.

5.2. Prova di trazione planare

La prova di trazione planare, definita anche *pure shear*, è un particolare tipo di prova di trazione utilizzata principalmente per testare materiali polimerici [15].

Per tali test è necessario che le dimensioni dei provini siano caratterizzate da un rapporto tra l'altezza e la larghezza di almeno 1/10.

La necessità di mantenere tali proporzioni nel provino deriva dall'obiettivo di impostare una prova nella quale il provino venga perfettamente vincolato nella direzione trasversale alla direzione di tiro, in modo tale che tutto l'assottigliamento del provino di lunghezza L avvenga lungo la direzione dello spessore t .

In particolare, si ottiene:

- Stato di deformazione: $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = \lambda = L/L_0$; $\lambda_3 = t/t_0$
- Stato di tensione: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma$; $\sigma_3 = 0$

Dove la direzione 1 è la direzione lungo l'asse di tiro, la direzione 2 è quella trasversale all'asse di tiro e planare al provino, mentre la 3 è lungo lo spessore del provino.

Dato che i materiali per i quali solitamente si effettua questa tipologia di prova possono essere considerati pressoché incompressibili, durante la prova sul provino si crea uno stato di tensione planare diretto lungo la direzione inclinata di un angolo di 45° rispetto alla direzione di tiro [16]. Inoltre, per tale assunzione, poiché si considera che il volume resti invariato, la misura dello spessore t può essere trascurata.

5.3. Prova biassiale – Bulge test

La prova del bulge test è uno dei primi metodi utilizzati da Treloar e Rivlin per la caratterizzazione e la determinazione delle costanti per i modelli analitici dei materiali gommosi.

La prova consiste nell'applicare una pressione idrostatica su di un provino discoidale vincolato lungo il perimetro, come mostrato nello schema di Figura 13. Il processo è costituito da una stiratura biassiale pura, priva di attrito. La configurazione assialsimmetrica della prova permette di ottenere uno stato di tensione e deformazione equibiassiale nella parte centrale del provino senza l'utilizzo di sistemi di carico. Il limite di espansione è rappresentato dalla massima altezza raggiunta prima della rottura. Questa prova permette di ottenere curve di trazione reali per carichi biassiali senza l'influenza dell'attrito [17].

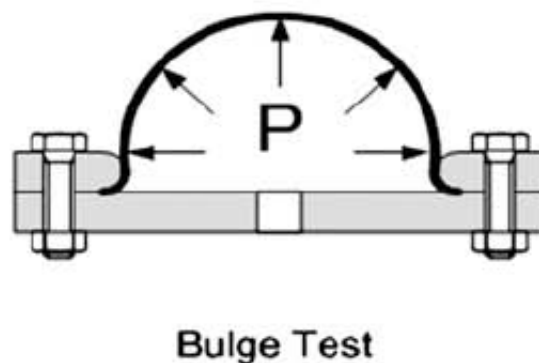


Figura 13: Schematizzazione del bulge test

L'attrezzatura necessaria per la realizzazione del bulge test è piuttosto semplice ed è costituita principalmente da: una flangia inferiore con un foro centrale necessario ad introdurre il liquido, generalmente acqua, in pressione; una flangia forata superiore con un diametro interno sufficientemente grande da lasciare che il provino si espanda evitando qualsiasi effetto di bordo; una pompa idraulica per mandare in pressione il liquido; una tubazione che

mandi il liquido dalla pompa alla flangia inferiore ed un trasduttore di pressione. In Figura 14 è possibile osservare uno schema della macchina per il bulge test.

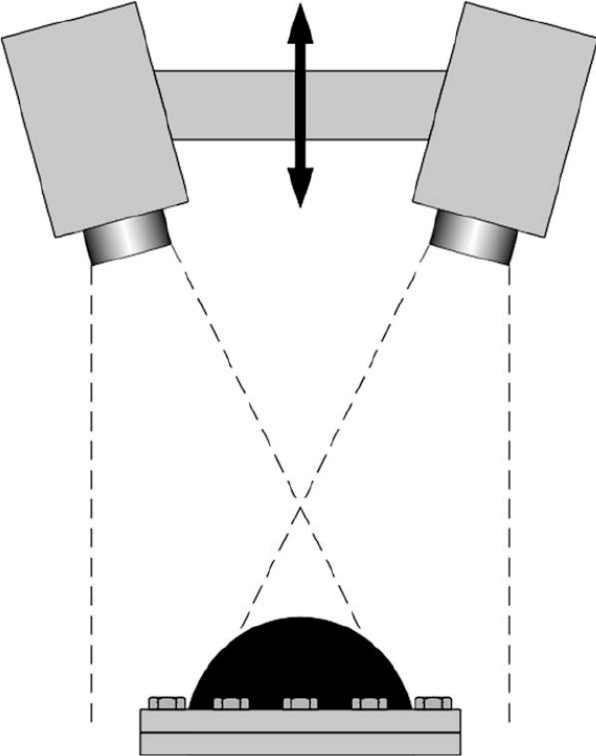


Figura 14: Schema della strumentazione per il bulge test

6. Digital Image Correlation

Le tecniche basate sulla correlazione numerica di immagini digitali sono sempre più ampiamente utilizzate come metodi sperimentali per la misura di campi di deformazione, anche grazie alla notevole evoluzione dei sistemi digitali di acquisizione di immagine e dei software di correlazione ed elaborazione, che consentono di raggiungere risoluzioni di misura delle deformazioni dell'ordine del centesimo di pixel.

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica per la misurazione ottica del campo di deformazioni senza contatto.

La DIC si sviluppa a partire dai primi anni '80 e si basa sull'utilizzo di una o più telecamere, come nel caso della misura 3D, per riprendere una serie di immagini riguardanti la superficie di un componente meccanico soggetto a deformazioni.

Il principio di base della DIC è quello di confrontare a due a due le immagini di un elemento prima e durante la deformazione.

Nella tecnica DIC l'immagine di riferimento e quella deformata vengono suddivise in sotto-immagini, denominate *subset* e costituite da celle di indagine, in genere da 10 x 10 fino a 40 x 40 pixel. Ogni *subset* dell'immagine di riferimento viene quindi confrontato con la corrispondente sotto-immagine della superficie del provino deformato. Più in dettaglio, per eseguire l'analisi DIC viene identificata manualmente sull'immagine di riferimento un'area di interesse (AOI), che viene divisa in una griglia virtuale uniformemente spaziata (Figura 15). Gli spostamenti vengono calcolati su ogni punto della griglia virtuale per ottenere il completo campo delle deformazioni. Il *subset* viene utilizzato per misurare la posizione del suo punto centrale sull'immagine di riferimento (prima della deformazione), confrontandola con quella sull'immagine deformata.

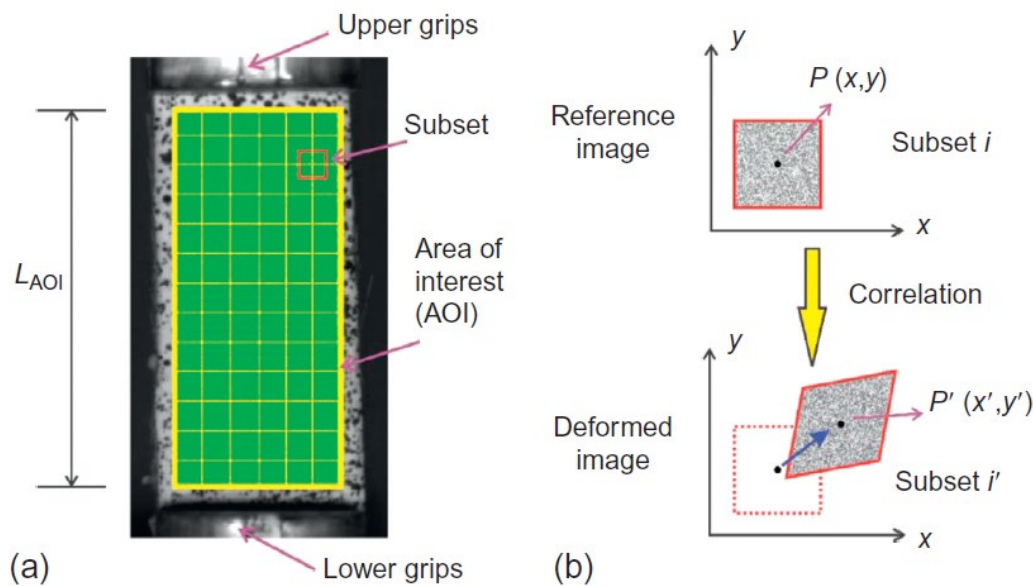


Figura 15: Individuazione dell'area di riferimento e del subset

Per far sì che il software dedicato all'analisi DIC riesca ad eseguire la correlazione, sulla superficie del componente vengono applicati dei pattern di contrasto alla superficie del provino. In particolare, si realizza uno *speckle*, costituito da una distribuzione casuale di punti. Per realizzare lo speckle, solitamente viene spruzzata prima della vernice bianca di fondo e successivamente si realizza il pattern con vernice nera, in modo tale da massimizzare il contrasto.

Il tracciamento della posizione dei centri dei vari subsets viene eseguito utilizzando particolari funzioni di correlazione come la correlazione incrociata (Cross-Correlation - CC) o la correlazione incrociata normalizzata (Normalized Cross-Correlation - NCC).

Successivamente il campo di deformazione può essere ottenuto andando a derivare il campo degli spostamenti [10].

I software di calcolo per l'analisi dei subset possono utilizzare correlazioni bidimensionali. In questo caso, la matrice di cross-correlazione bidimensionale H tra due immagini digitali, che vengono associate a due matrici X e Y , può essere definita come:

$$H(i, j) = \sum_{m=0}^{M_1} \sum_{n=0}^{N_1-1} X(m, n) Y(m - i, n - j)$$

Dove:

$i = -(M_1 - 1), \dots, 0, 1, \dots, (M_2 - 1);$

$j = -(N_1 - 1), \dots, 0, 1, \dots, (N_2 - 1);$

M_1 è il numero di righe della matrice X ;

N_1 è il numero di colonne della matrice X ;

M_2 è il numero di righe della matrice Y ;

N_2 è il numero di colonne della matrice Y .

All'interno di tale matrice di correlazione, si può individuare un valore massimo, localizzato in un punto (i, j) , che definisce lo spostamento di un subset tra le due immagini considerate. Reiterando tale operazione per la serie di immagini successive acquisite, si ottiene il campo di deformazione [20].

La correlazione di immagini digitali fornisce le deformazioni nominali o ingegneristiche, che vengono poi riportate in deformazioni vere. Dato che le misure di deformazioni locali ottenute con la DIC sono riferite a lunghezze infinitesime tra punti materiali contigui, è possibile convertire le deformazioni ingegneristiche, $\varepsilon_{ingegneristica}$ (*nominal strain*), in deformazioni vere, ε_{vera} (*true strain*), tramite l'equazione:

$$\varepsilon_{vera} = \ln (1 + \varepsilon_{ingegneristica})$$

Sono disponibili sistemi 3D digitali che consentono la misurazione dinamica del campo tridimensionale degli spostamenti e la successiva analisi delle deformazioni.

I sistemi DIC possono operare su varie scale, dalla micro (1 μm) alla macro (10 m), e sono adatti alla misurazione di campi di deformazioni anche su grandi strutture [19].

7. Stato dell'arte

La stampa 3D è una tecnica di *additive manufacturing* che trova vasti campi di applicazione, poiché consente la costruzione di strutture geometriche tridimensionali complesse. Il progresso tecnologico nella progettazione dei macchinari per la realizzazione dei prototipi e lo sviluppo di software di calcolo sempre più performanti hanno incrementato notevolmente l'interesse verso tale applicazione. Inoltre, la produzione e la commercializzazione di materiali polimerici e resine sintetiche ha agevolato notevolmente l'utilizzo di tale tecnica per la produzione di oggetti di varia natura, dall'ambito dell'edilizia a quello delle applicazioni biomediche.

L'evoluzione della stampa 3D ha trasformato i processi produttivi e logistici. Il progresso tecnologico ha comportato una riduzione dei costi delle attrezzature, agevolando di fatto lo sviluppo e la diffusione di tale tecnica. I processi di stampa 3D si sono diffusi in particolar modo per la realizzazione di ridotte quantità prodotti personalizzati a costi relativamente vantaggiosi, in special modo nell'ambito biomedico, dove c'è la necessità di adattare i prodotti alle necessità del paziente.

Tra i principali vantaggi si sottolinea la libertà di progettazione in diverse forme e scale; la riduzione del *time to market*, ossia il tempo che intercorre tra le fasi dell'ideazione fino alla commercializzazione di un prodotto; la flessibilità nella possibilità di costruire oggetti di diversa forma e natura con lo stesso macchinario; la riduzione dei costi di produzione e di trasporto e la riduzione degli scarti di produzione.

Tuttavia, si evidenziano anche dei limiti, tra cui la scarsa produttività e la qualità ancora scarsa del prodotto finito. Tra le principali criticità si sottolinea in particolare l'incertezza e la variabilità nella caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei prodotti finiti, dovute, oltre che alla qualità di stampa, anche alle caratteristiche dei processi di consolidamento del pezzo.

I parametri costruttivi, le proprietà meccaniche, la composizione e la fotosensibilità della resina sono fattori determinanti per la polimerizzazione dei prodotti finiti.

Nella letteratura tecnico-scientifica di settore, gli studi di ricerca sulle proprietà meccaniche dei materiali fabbricati tramite tecniche di *additive manufacturing* si basano principalmente su approcci sperimentali o basati su modelli di simulazione, e, pertanto, non possono essere utilizzati direttamente per la stima o la previsione delle proprietà meccaniche di un prodotto.

Dalle ricerche tecnico-scientifiche risulta inoltre che le proprietà meccaniche dei prodotti possono essere influenzate da diversi parametri, come le variazioni ambientali, i tempi di post-cura, le variazioni delle caratteristiche delle resine utilizzate, l'orientamento della direzione di stampa e il grado di solidificazione raggiunto dai diversi strati che compongono l'oggetto stampato (Dulieu-Barton e Fulton, 2000; Chockalingam et al., 2006; Quintana et al., 2010). Inoltre, le informazioni relative alle proprietà meccaniche delle resine liquide fotosensibili utilizzate nel processo di produzione additiva sono tutt'oggi limitate.

Considerando tali evidenze, si è ritenuto di interesse realizzare uno studio per l'analisi sperimentale di una resina fotosensibile, determinandone le caratteristiche meccaniche, sia tramite prove sperimentali, sia mediante l'utilizzo di modelli di simulazione. Nei capitoli successivi vengono descritte le analisi sperimentali effettuate su provini costruiti mediante l'utilizzo di una resina fotosensibile e le successive elaborazioni mediante software agli elementi finiti per la verifica e la validazione dei risultati ottenuti.

8. Caso studio sperimentale

Per il caso studio in esame, è stata effettuata l'analisi sperimentale del comportamento meccanico di una resina fotosensibile. Per tale materiale è stato inizialmente ipotizzato un comportamento iperelastico, caratterizzato da ampie deformazioni e da relazioni tra tensioni e deformazioni non lineari. Si è cercato quindi di individuare il modello iperelastico che meglio si adattasse alla risposta del materiale.

Le prove sperimentali di caratterizzazione sono state eseguite all'interno del Laboratorio di Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.

8.1. Resina

La resina utilizzata per la caratterizzazione meccanica dei provini è una resina fotosensibile commerciale, sviluppata dall'azienda 3D Prima Printer Nordic AB. Il prodotto PRIMACREATOR VALUE FLEX UV RESIN è disponibile in commercio in flaconi da 1000 ml (Figura 16).



Figura 16: Primacreator Value Flex UV Resin

Le principali applicazioni sono individuate nella stampa 3D, in particolare per la produzione di oggetti che necessitano un livello di dettaglio particolareggiato, ma che devono comunque garantire una determinata resistenza meccanica. La resina può essere curata sia tramite la luce solare, sia mediante processi UV in una camera di cura. In particolare, la casa produttrice fornisce come indicativa una frequenza dei raggi UV compresa tra 395 e 405 nm.

Una volta curato, l'oggetto è flessibile ed è caratterizzato da un ridotto restringimento. Le caratteristiche tecniche dichiarate dalla casa produttrice sono sintetizzate in Tabella 2. In particolare, viene riportata una durezza di 65 – 75 D della scala di Shore e un allungamento alla rottura pari al 130%. La resina in oggetto può essere utilizzata anche nelle stampanti DLP a bassa potenza. Viene inoltre specificato un tempo di cura degli strati durante il processo stampa tra i 4 e i 12 secondi per strato. I tempi di post-cura, invece, possono essere ridotti fino a 2 – 5 minuti, in caso di utilizzo di raggi UV. Per quanto riguarda i casi di post-cura tramite luce solare, invece, si considerano 10 – 20 minuti, raggiungendo fino a 60 minuti in caso di raggi solari schermati da cielo coperto.

Tabella 2: Caratteristiche tecniche resina

Parametro	Valore
Modulo a flessione	1.882 - 2.385 MPa
Resistenza alla flessione	40-70 MPa
Temperatura di deformazione a caldo	80 °C
Espansione termica	95E-6
Ritiro volumetrico	3.72 - 4.24 %
Ritiro lineare	1.05 - 1.35 %
Resistenza alla trazione	30 - 52 MPa
Modulo elastico	1.779 - 2.385 MPa
Allungamento a rottura	130 %
Durezza (Shore D)	65 – 75 D
Temperatura di transizione vetrosa	100 °C
Densità	1.05 - 1.25 g/cm ³
Resistenza agli urti	41-48 J/m
Viscosità	150-300 MPa·s
Tempi di cura	4 - 12s per strati di spessore 0.05 mm 40 - 60 s per gli strati inferiori

Dopo il processo di stampaggio, per la pulizia dell'attrezzatura e del provino è necessario rimuovere la resina non polimerizzata in eccesso attraverso l'utilizzo di Alcohol Isopropilico (IPA).

8.2. Processo di stampa e post-cura

Con la resina in esame sono stati costruiti dei provini, mediante la tecnica di stampa 3D, utilizzando una stampante di tipo Digital Light Processing (DLP), modello Phrozen Transform Resin 3D Printer, (Figura 17).

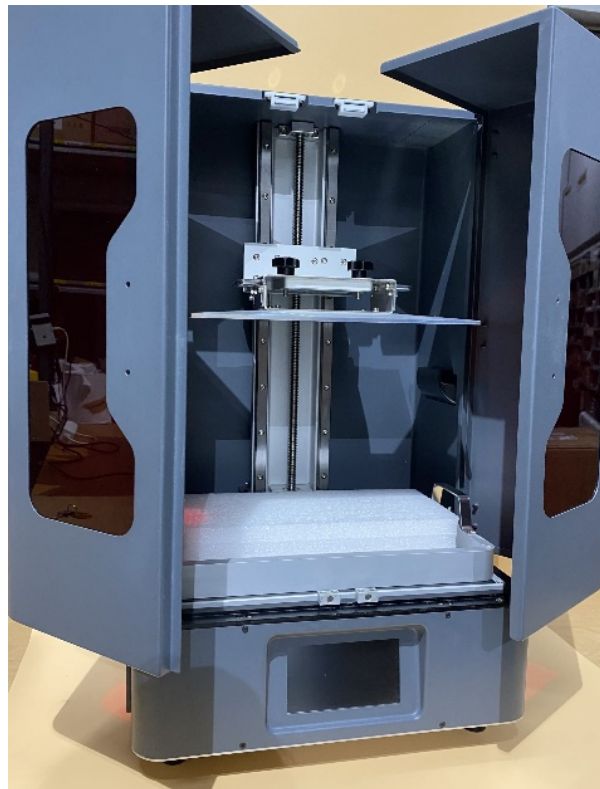


Figura 17: Stampante 3D Phrozen Transform Resin

Il processo di stampa è stato eseguito all'interno del Laboratorio Pesante del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.

La stampante è composta da un proiettore principale LCD 4K da 13.3" e due proiettori secondari da 5.5" che consentono di stampare modelli di dimensioni fino a 40 cm di altezza. In Tabella 3 vengono riassunte le caratteristiche tecniche fornite dalla ditta produttrice. Il processo di DLP utilizzato dalla stampante sfrutta uno schermo di proiezione digitale che

proietta sulla resina liquida, per ogni strato, l'immagine dell'intera sezione dell'oggetto da realizzare.

Tabella 3: Proprietà stampante 3D Phrozen Transform

Caratteristiche	Valore
Proiettori	Pannelli LCD 4K da 13.3" e doppi da 5.5"
Risoluzione di stampa XY (13.3")	76 μ m
Risoluzione di stampa XY (doppia 5.5")	47 μ m
Velocità massima di stampa	40 mm/ora
Asse Z	40 cm
Dimensioni stampante	14.9 x 13.7 x 24 pollici
Volume di stampa	11.5 x 6.5 x 15.75 pollici

La geometria dei provini, precedentemente realizzata su software CAD, è stata esportata in formato STL, successivamente importata nel software *slicer* Chitubox, in modo da poter regolare le impostazioni di stampa. In particolare, per ogni provino sono state settate le stesse impostazioni, riassunte in Tabella 4.

Tabella 4: Impostazioni di stampa

Parametro	Valore
Spessore strati	0.05 mm
Numero strati inferiori	2
Tempo di esposizione	10 s
Tempo di esposizione strati inferiori	40 s
Light-off delay	8 s
Light-off delay strati inferiori	8 s
Distanza di sollevamento piatto di stampa	5 mm/min
Velocità di sollevamento piatto di stampa	30 mm/min

Una volta realizzati i provini, gli oggetti stampati hanno subito un processo di post-cura all'interno di un fornello a temperatura costante e a raggi UV (Figura 18).



Figura 18: Forno di post-cura

8.3. Prove sperimentali di caratterizzazione meccanica

Per la determinazione delle proprietà della resina fotosensibile sono state eseguite delle prove sperimentali di caratterizzazione meccanica. In particolare, sono state eseguite prove di trazione monoassiale, prove di trazione planare e prove biassiali di bulge test.

Per la misura delle deformazioni è stata utilizzata la tecnica di Digital Image Correlation, impiegando una coppia di telecamere per la determinazione delle deformazioni avvenute durante l'esecuzione delle prove. Le telecamere sono state calibrate prima di ogni tipologia di prova. Una volta fissate le camere, sono state eseguite delle serie di fotografie ad una scheda caratterizzata da una matrice di punti, mossa secondo diverse angolazioni (Figura 19).

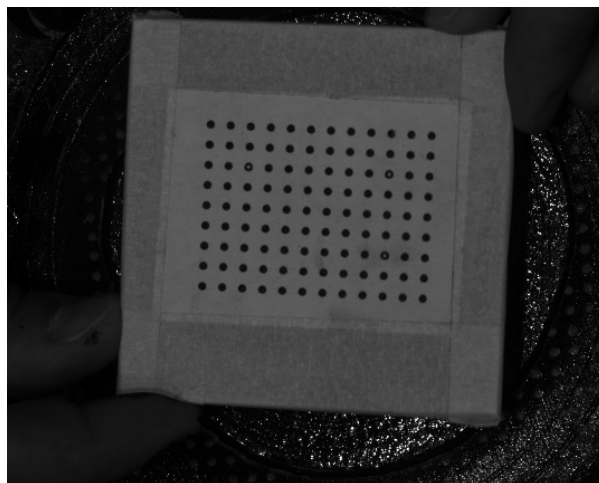


Figura 19: Matrice di calibrazione delle telecamere

Le diverse foto acquisite sono state inserite nel programma Match ID, ottenendo un file con estensione .calib utilizzato come file di calibrazione delle telecamere per il calcolo delle deformazioni all'interno del software.

Per poter misurare le deformazioni con la tecnica DIC, è stato applicato un pattern di vernice, definito speckle, sulla superficie superiore dei provini, inquadrata dalle telecamere. In primo luogo, è stata applicata una strato sottile di vernice bianca, sul quale sono state successivamente fatte depositare delle goccioline di vernice nera, vaporizzate tramite spray. In Figura 20 si può osservare un provino (A) dopo l'applicazione dello speckle.



Figura 20: Speckle sui provini

8.3.1. Prova di trazione

Per l'esecuzione delle prove di trazione, sono stati realizzati 7 provini a forma *dumbbell*, come mostrato in Figura 21.

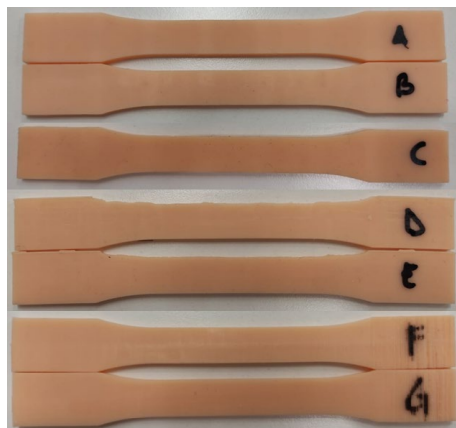


Figura 21: Provini per la prova di trazione

I provini sono caratterizzati dimensionalmente da uno spessore di circa 3 mm, una lunghezza del tratto utile di 75 mm ed un'altezza di 13 mm. La temperatura di post-cura per tutti i provini è stata impostata a 50 °C. La velocità della traversa della macchina di trazione è stata posta pari a 2 mm/min.

La Tabella 5 sintetizza le impostazioni delle prove di trazione per i diversi provini.

Tabella 5: Impostazione delle prove di trazione

Nome	Direzione di stampa	Durata post-cura [ore]
Test A	Z	1.5
Test B	Z	5
Test C*	Z	1.5
Test D	Y	1.5
Test E	Y	5
Test F	X	1.5
Test G	X	5

*: Test C effettuato senza esposizione ai raggi UV durante la post-cura

Sono state considerate le 3 diverse direzioni di stampa, rispettivamente impostando come asse X l'asse lungo la direzione di tiro del provino, come asse Y la direzione trasversale a quella di tiro e come asse Z la direzione dello spessore del provino. Si evidenzia che, per ogni direzione di stampa, sono stati effettuati due provini, uno con durata della post-cura pari a 1.5 ore e uno a durata di 5 ore. Inoltre, è stata realizzata una prova su di un provino (Test C), per il quale il processo di post-cura è stato effettuato coprendo il provino con nastro adesivo nero, in modo tale da schermarlo dai raggi UV. Tale ulteriore test è stato effettuato per valutare gli effetti dell'esposizione alle radiazioni ultraviolette durante la post-cura sulle caratteristiche meccaniche della resina.

Dalla cella di carico collegata alla macchina di trazione (Figura 22), si sono ottenute le forze esercitate dalla macchina per tutta la durata delle prove, insieme ai relativi tempi di acquisizione.



Figura 22: Prova di trazione

Inoltre, dalle telecamere si sono ottenute le coppie di foto, come mostrato in Figura 23, ai diversi tempi di acquisizione.

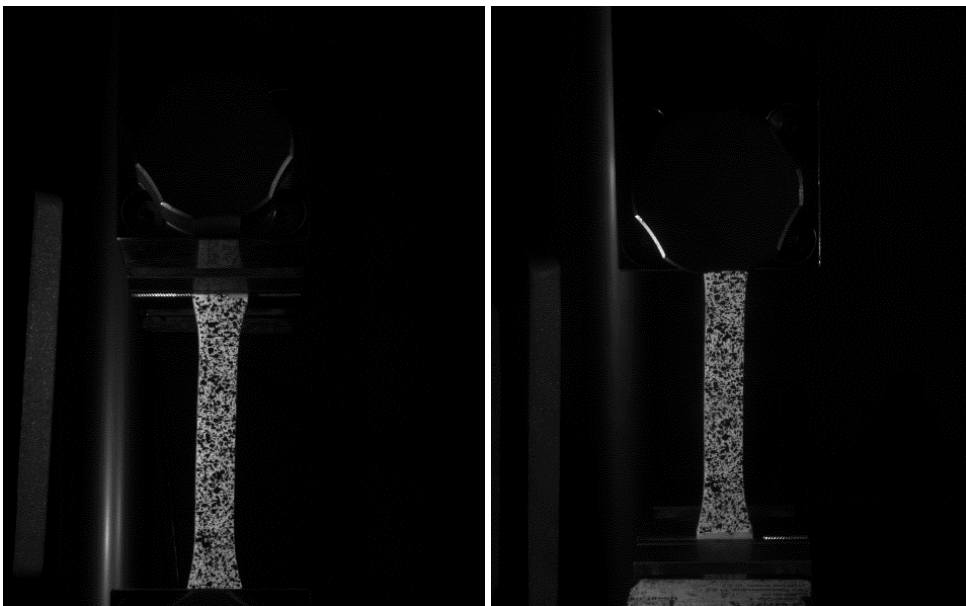


Figura 23: Coppie di foto acquisite dalle due telecamere

Le foto sono state successivamente elaborate tramite il software Match ID per l'analisi DIC. In particolare, la zona di interesse sullo speckle per l'analisi è stata individuata definendo un subset caratterizzato da una dimensione di 23 e da una distanza tra i centri dei subset, definita come *step-size*, di 3. Sono state ottenute quindi le deformazioni e gli spostamenti dei subset e, di conseguenza, le deformazioni dei provini a diversi istanti di tempo.

Infine, le forze risultanti dalla cella di carico sono state elaborate insieme alle deformazioni ottenute dall'analisi DIC, per ottenere le curve di tensione – deformazione delle diverse prove.

I file grezzi dei valori delle forze e dei tempi di acquisizione delle immagini sono stati elaborati, insieme ai risultati delle deformazioni calcolate dal programma MatchID, nel software di calcolo numerico MatLab, per estrapolare le curve di tensione – deformazione.

Dalle prove sperimentali sono stati inizialmente ottenuti, rispettivamente, i valori delle tensioni rispetto ai tempi di acquisizione da parte della cella di carico e gli andamenti delle deformazioni rispetto ai tempi di acquisizione delle immagini. I tempi di acquisizione risultano essere infatti diversi, poiché i primi dipendono dall'avviamento dalla macchina di trazione, mentre i secondi dall'avviamento del software di acquisizione delle immagini delle telecamere. In primo luogo, quindi, gli andamenti delle forze rispetto ai tempi di acquisizione della cella di carico sono stati interpolati con quelli delle deformazioni rispetto ai tempi di acquisizione delle immagini, in modo tale da poter sincronizzare le tensioni con le rispettive deformazioni.

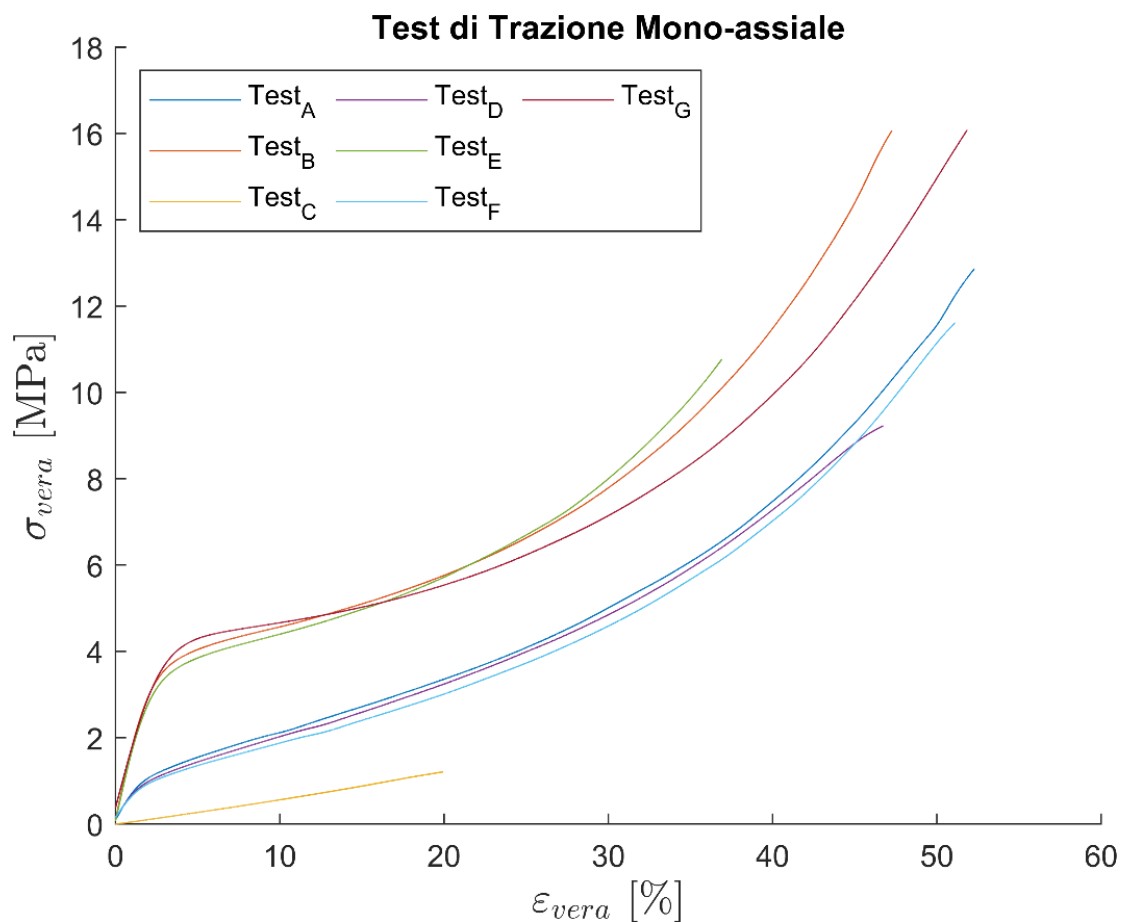


Figura 24: curve tensione – deformazione vere della prova di trazione

In Figura 24 vengono riportati gli andamenti delle curve di tensione – deformazione ottenute dalle prove di trazione sui provini sperimentali. L'andamento non lineare di tali curve supporta l'ipotesi di iperelasticità del materiale. Si osserva che le curve i provini che hanno subito una maggiore durata della post-cura (Test B, Test E, Test G) sono caratterizzate da valori di tensione maggiore a parità di deformazione. Si osserva anche che la direzione di stampa non influenza significativamente il comportamento meccanico dei materiali. Da ciò si desume che la resina può considerarsi come un materiale isotropo. In ultimo si osserva che il Test C è caratterizzato da valori di tensione nettamente inferiore rispetto ai provini curati con UV. Da ciò si desume che la radiazione ultravioletta influenza notevolmente l'effetto della post-cura sulle caratteristiche dei materiali.

Si riportano di seguito in Tabella 6 i parametri caratteristici del materiale per le varie prove ottenuti dal test di trazione monoassiale. Si osserva che il coefficiente di Poisson assume valori attorno a 0.5, caratteristico dei materiali gommosi incomprimibili.

Tabella 6: Parametri caratteristici per le varie prove

Test	Modulo di Young E [MPa]	Coefficiente di Poisson ν	σ_{ing} rottura [MPa]	ϵ_{ing} rottura [mm/mm]
Test A	67	0.49	7.6	0.68
Test B	137	0.5	10	0.6
Test C	4.3	0.48	0.98	0.22
Test D	93	0.48	5.8	0.6
Test E	125	0.5	7.5	0.44
Test F	110	0.49	6.9	0.67
Test G	105	0.5	9.5	0.68

8.3.2. Prove di trazione planare

Le prove di trazione planare o *pure shear* sono state impostate per ottenere uno stato di deformazione sul provino caratterizzato da uno stato di deformazione nullo e uno stato di tensione non nullo lungo l'asse trasversale all'asse di tiro.

I provini sono stati realizzati considerando una larghezza di almeno 10 volte la lunghezza nella direzione di tiro, come visibile in Figura 25. Questo particolare rapporto geometrico, infatti, fa sì che si verifichino le condizioni richieste per la prova di trazione planare, come riportato nella letteratura tecnico-scientifica di settore [21].



Figura 25: Provini per la prova di trazione planare

Essendo la larghezza degli afferraggi della macchina pari a 50 mm, per poter mantenere le proporzioni geometriche necessarie all'esecuzione della prova in condizioni biassiali e ottenere allo stesso tempo un'altezza dei provini tale da garantire la ripresa delle telecamere, è stato necessario applicare delle flange alle estremità dei provini. In questa maniera è stato possibile estendere la larghezza dei provini fino a 100 mm ed ottenere così un'altezza utile di 10 mm, mantenendo la proporzione 1:10. Sui provini sono state quindi incollate delle flange con colla strutturale, per poterli adattare agli afferraggi della macchina di trazione precedentemente utilizzata (Figura 26).

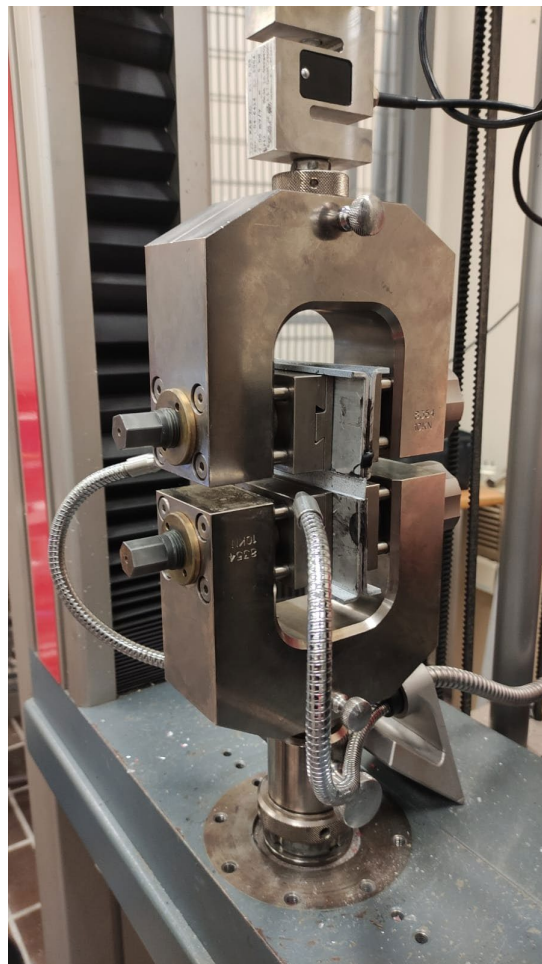


Figura 26: Prova di trazione planare

Come riportato in Tabella 7, sono stati realizzati 3 diversi provini. Dato che dai risultati delle prove di trazione è emerso che la direzione di stampa non influenza le caratteristiche meccaniche della resina, i 3 provini sono stati realizzati tutti seguendo un'unica direzione di stampa. Si sottolinea che la temperatura di post-cura è stata impostata pari a 50 °C per tutti i provini e che la velocità della prova è stata posta pari a 2 mm/min.

Tabella 7: Impostazione delle prove di trazione planare

Nome	Lunghezza tratto utile [mm]	Altezza tratto utile [mm]	Spessore tratto utile [mm]	Durata post cura [ore]
Test A	100.27	10	1.20	1.5
Test B	100.20	10	1.10	5
Test C*	100.42	10	1.15	1.5

*: Test C effettuato senza esposizione ai raggi UV durante la post-cura

Si evidenzia che, per il provino Test C, il processo di post-cura è stato effettuato coprendo il provino con nastro adesivo nero, in modo tale da schermare i raggi UV.

In modo analogo a quanto effettuato per la prova di trazione, sono state posizionate la cella di carico e le telecamere per la determinazione, rispettivamente, delle forze e delle deformazioni subite dai provini. Allo stesso modo si è proceduto alla fase di acquisizione delle immagini necessarie alla calibrazione delle telecamere posizionate di fronte alla macchina.

Si specifica che, durante la fase dell'analisi DIC, il software non è riuscito a generare il file necessario per la calibrazione delle due telecamere, altrimenti ottenuto dall'analisi delle foto in parallelo della matrice di riferimento. Pertanto, si è proceduto con una tecnica di calibrazione manuale. In questa maniera si è effettuata un'analisi DIC 2D, sfruttando solo le immagini di una delle due telecamere. Non è stato quindi possibile misurare gli spostamenti e le relative deformazioni al di fuori del piano. Tuttavia, visto che la geometria della prova di trazione è principalmente planare, le deformazioni al di fuori del piano possono essere trascurate.

È stata quindi misurata la distanza tra due punti noti del provino; tale distanza è stata riportata successivamente nell'immagine acquisita dalla telecamera; è stato misurato il numero di pixel contenuti tra i corrispettivi punti nella foto; tale valore è stato infine correlato con quello della distanza misurata, ottenendo così la calibrazione della telecamera.

Come precedentemente eseguito per le prove di trazione, le foto sono state successivamente elaborate tramite il software Match ID per l'analisi DIC. In particolare, la zona di interesse sullo speckle per l'analisi è stata individuata definendo un subset caratterizzato da una dimensione di 23 e da una distanza tra i centri dei subset, noto come *step-size*, di 3. Sono state ottenute

quindi le deformazioni e gli spostamenti dei subset e, di conseguenza, le deformazioni dei provini a diversi istanti di tempo.

Infine, le forze risultanti dalla cella di carico sono state elaborate insieme alle deformazioni ottenute dall'analisi DIC, per ottenere le curve di tensione – deformazione delle diverse prove, come mostrato in Figura 27.

In modo analogo a quanto precedentemente descritto per l'elaborazione dei dati ottenuti dalle prove di trazione, infatti, i file grezzi dei valori delle forze e dei tempi di acquisizione delle immagini sono stati elaborati, insieme ai risultati delle deformazioni calcolate dal programma MatchID, nel software di calcolo numerico MatLab, per estrapolare le curve di tensione – deformazione.

Dai dati di input sono stati inizialmente ottenuti, rispettivamente, i valori delle tensioni rispetto ai tempi di acquisizione da parte della cella di carico e gli andamenti delle deformazioni rispetto ai tempi di acquisizione delle immagini. I tempi di acquisizione risultano essere infatti non coincidenti, poiché i primi dipendono dall'avviamento dalla macchina di trazione, mentre i secondi dall'avviamento del software di acquisizione delle immagini delle telecamere. In primo luogo, quindi, gli andamenti delle forze rispetto ai tempi di acquisizione della cella di carico sono stati interpolati con quelli delle deformazioni rispetto ai tempi di acquisizione delle immagini, in modo tale da poter sincronizzare le tensioni con le rispettive deformazioni.

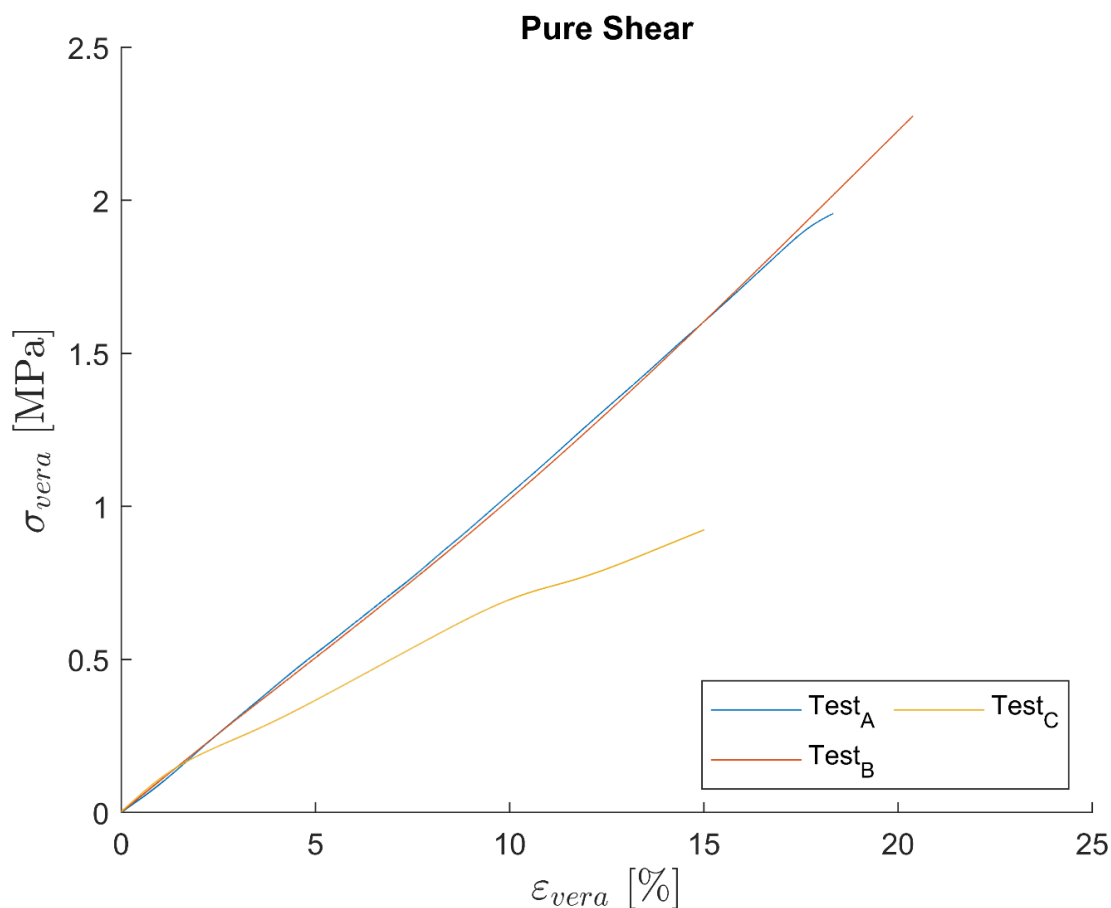


Figura 27: Curve di tensione - deformazione vere per le prove di pure-shear

Dall'andamento delle curve di tensione – deformazione si osserva che, nonostante le diverse condizioni di post-cura imposte, il Test A e il Test B assumono un comportamento simile. Tale risultato può essere dovuto ad un problema di calibrazione o al dimensionamento del provino. Per quanto riguarda il Test C, anche per la prova di trazione planare si osserva l'effetto della post-cura sul comportamento meccanico del materiale.

8.3.3. Prove biassiali bulge test

Le prove biassiali di bulge test sono state effettuate su 5 provini. Per ognuna delle prove effettuate, il provino discoidale è stato inserito all'interno di una piastra metallica forata e vincolato da una flangia superiore imbullonata alla piastra inferiore, come mostrato in Figura 28.



Figura 28: Provino posizionato sulle flange per le prove biassiali di bulge test

La piastra forata metallica inferiore è stata connessa alla condotta idrica che, tramite una pompa elettrica, ha permesso all'acqua di raggiungere la pressione necessaria per gonfiare il provino. In parallelo, un rilevatore di pressione, connesso attraverso un convertitore analogico digitale ad un pc, ha rilevato la pressione raggiunta durante la prova, mentre una coppia di telecamere ha registrato le immagini per l'analisi delle deformazioni.

In Figura 29 viene rappresentata la macchina utilizzata per il bulge test, disponibile presso del Laboratorio di Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.

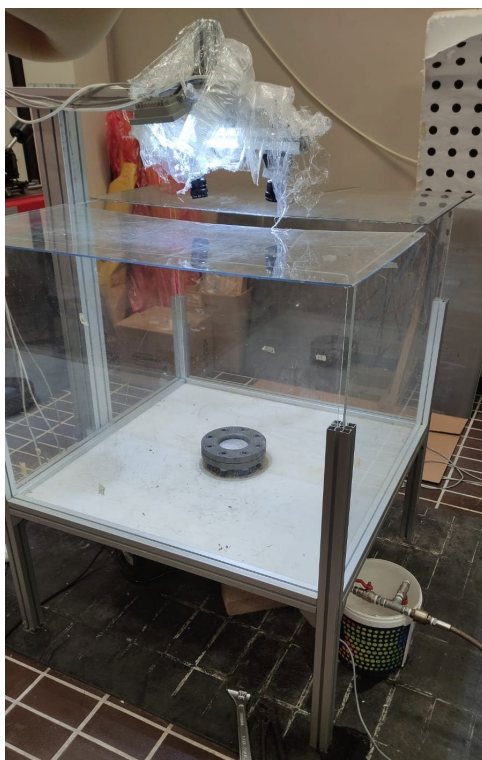


Figura 29: Macchina per il bulge test

In Tabella 8 vengono sintetizzati i principali parametri delle prove effettuate sui provini in esame. In particolare, sono state effettuate 2 prove con un tempo della post cura di 5 ore e 3 prove con un tempo di 1.5 ore.

Gli spessori dei provini sono stati calcolati a partire dalla formula di Mariotte per i recipienti sferici a pareti sottili, per verificare che, con la pressione fornita dalla pompa a disposizione, si potesse giungere fino alla rottura del provino. In particolare, la formula di Mariotte viene espressa mediante l'equazione seguente:

$$\sigma = \frac{Pd}{4s}$$

Dove σ è la tensione raggiunta all'interno del recipiente in pressione, P è la pressione applicata al provino avente diametro d e spessore s .

Nel caso in esame, ipotizzando che il provino assuma la forma emisferica durante la sua deformazione, sono stati considerati come σ la tensione di rottura ottenuta dalle prove di trazione, come P la pressione massima raggiungibile dalla pompa pari a circa 2.5 bar, e come d il diametro interno della flangia, pari a 90 mm, ipotizzando che durante la deformazione il provino si deformasse fino ad assumere la forma di una semi sfera. Si è pertanto ottenuto lo spessore s necessario affinché la prova arrivasse fino a rottura.

Per uno dei provini, il Test X, la prova è stata eseguita applicando al provino una copertura a forma di croce durante la post cura in modo tale da non esporre ai raggi UV la zona coperta.

Tabella 8: Parametri delle prove biassiali di bulge test

Nome	Spessore provini [mm]	Durata post cura [ore]	Temperatura post cura [°C]
Test A	0.6	5	50
Test B	0.6	5	50
Test C	0.8	1.5	50
Test D	0.8	1.5	50
Test X*	1.25	1.5	50

*: effettuato coprendo una parte della superficie per schermarla dai raggi UV durante la post-cura

Anche per le prove sul bulge test, le foto sono state elaborate tramite il software Match ID per l'analisi DIC. In particolare, la zona di interesse sullo speckle per l'analisi è stata individuata definendo un subset caratterizzato da una dimensione di 23 e da una distanza tra i centri dei subset, ossia lo *step-size*, di 3. Sono state ottenute quindi le deformazioni e gli spostamenti dei subset e, di conseguenza, le deformazioni dei provini a diversi istanti di tempo.

In questo caso, oltre ad ottenere i valori delle deformazioni, sono state ricavate anche le curvature del provino sottoposto a pressione idrostatica. Sono stati quindi ottenuti anche i relativi raggi di curvatura, come l'inverso dei rispettivi valori delle curvature, secondo l'equazione:

$$R = \frac{1}{\kappa}$$

I valori delle pressioni sono stati elaborati insieme alle deformazioni e ai valori dei raggi di curvatura nel software di calcolo numerico MatLab, per estrapolare le curve di tensione – deformazione.

Di seguito viene riportato in Figura 30 il grafico rappresentativo delle curve di tensione – deformazione vere relative alle prove biassiali di bulge test.

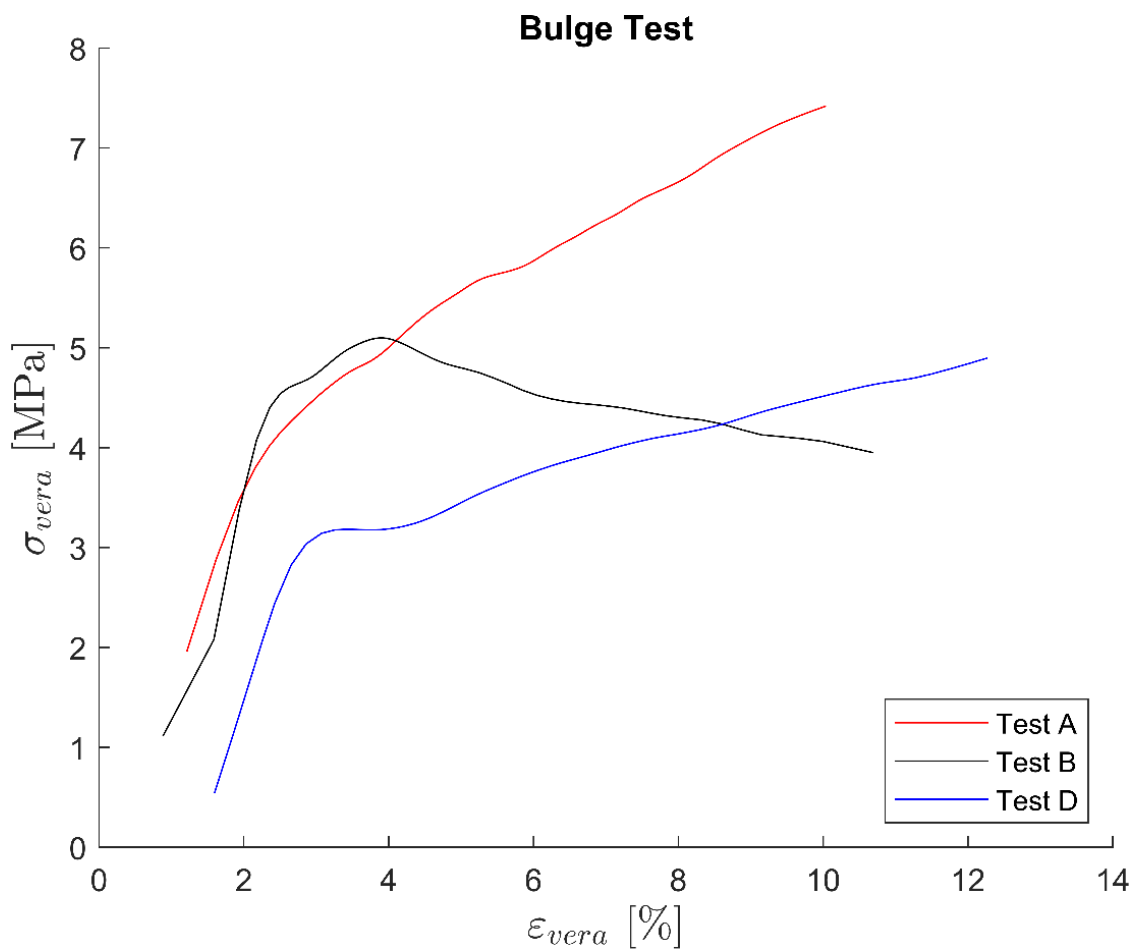


Figura 30: Curva tensione – deformazione vere delle prove biassiali di bulge test

L'andamento non lineare delle relazioni tra le tensioni e le deformazioni conferma l'ipotesi di iperelasticità, in modo analogo a quanto osservato per le curve ottenute dalle precedenti prove di trazione. Osservando i comportamenti dei diversi test, si evidenzia che la curva del Test B si discosta rispetto a quella del Test A nel tratto finale. Tale divergenza potrebbe essere causata da qualche difformità presente sullo speckle del Test B o ad un difetto presente all'interno del provino causato dal processo di stampaggio. Per tale motivo, per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche del materiale, è stata considerata solo la curva del Test A.

Non è stato possibile ricavare la curva di tensione – deformazione del Test C a causa di problemi di acquisizione dei valori di pressione durante l'esecuzione della prova.

8.4. Fitting curve sperimentali mediante Abaqus

Una volta ottenute le curve di tensione – deformazione dalle diverse prove sperimentali, si è proceduto alla fase di fitting delle curve sperimentali con quelle dei modelli iperelastici [22].

Tale processo è stato necessario per identificare il modello che meglio si adattasse agli andamenti osservati sperimentalmente e ad ottenere i parametri necessari alla definizione della funzione densità di energia di deformazione W , da inserire all'interno di un codice agli elementi finiti per la definizione del materiale.

Per tale procedura, si è utilizzato il software di calcolo agli elementi finiti Abaqus/FEA. In tale software, infatti, all'interno dell'*Editor* dei materiali, sotto la categoria dei *Materiali Iperelastici*, è infatti possibile inserire come input le curve di tensione – deformazione delle prove sperimentali, per ognuna delle differenti tipologie di prove eseguite. In particolare, sono state inserite le seguenti curve:

- Curva prova di trazione provino curato per 1.5 ore;
- Curva bulge test provino curato per 1.5 ore;
- Curva prova di trazione provino curato per 1.5 ore senza raggi UV;
- Curva prova di trazione provino curato 5 ore;
- Curva bulge test provino curato per 5 ore.

Tali curve hanno permesso la definizione di tre tipologie di materiali, rispettivamente, un materiale dato dalle curve dei provini curati 1.5 ore, un materiale dal provino curato 1.5 ore senza raggi UV ed un materiale dai provini curati 5 ore.

Attraverso il software è stato possibile realizzare un fitting per ognuna delle tre tipologie di materiali con i modelli iperelastici. Per il materiale caratterizzato dai provini curati 1.5 ore il fitting ha individuato come modello per descrivere la funzione densità di energia di deformazione il modello di Yeoh, avente come parametri caratteristici C_{10} pari a 4.26, C_{20} uguale a -3.56 e C_{30} pari a 5.50.

In Figura 31 è possibile osservare il fitting delle curve delle prove di trazione e di bulge per il materiale curato 1.5 ore.

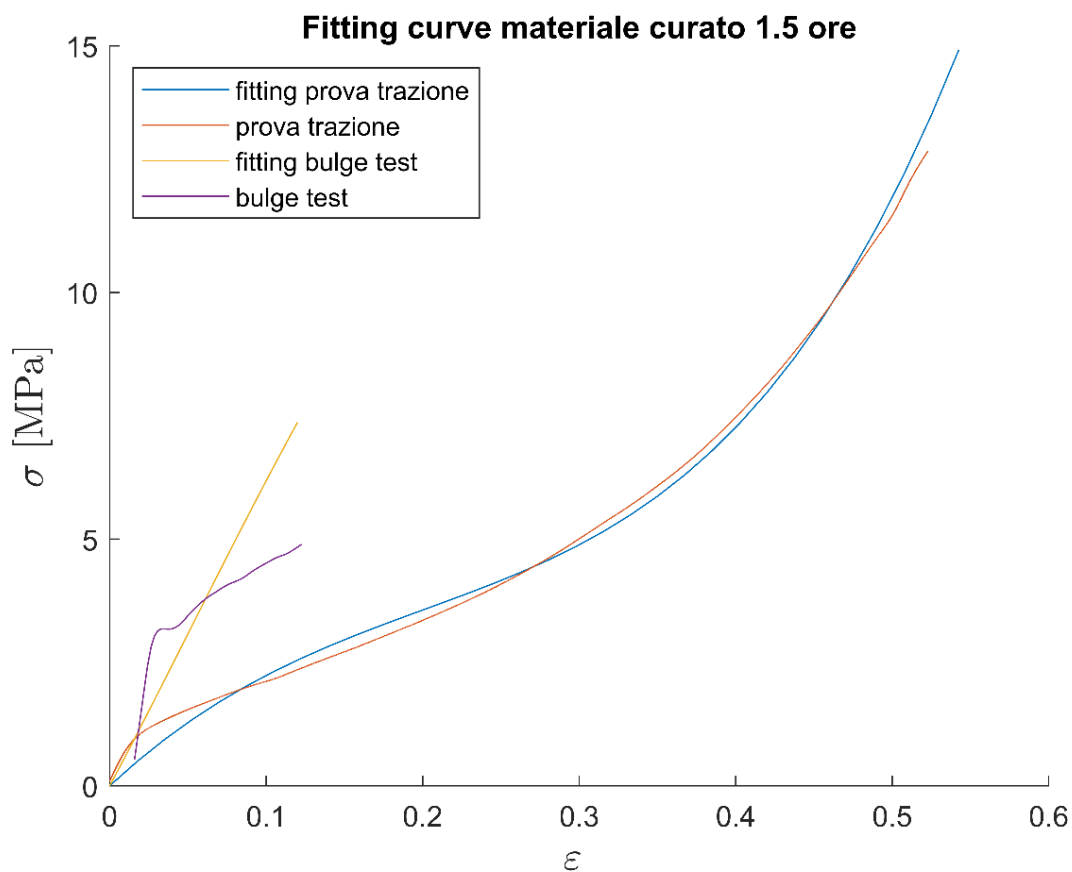


Figura 31: Fitting per il materiale curato 1.5 ore

Per il fitting del materiale ottenuto dai provini curati per 1.5 ore senza esposizione ai raggi UV è stato individuato il modello di Ogden del primo ordine, avente come parametri μ_1 pari a 1.66 e α_1 pari a 7.65.

In Figura 32 è possibile osservare il fitting della curva della prova di trazione per il materiale curato 1.5 ore senza esposizione ai raggi UV durante il processo di post-cura.

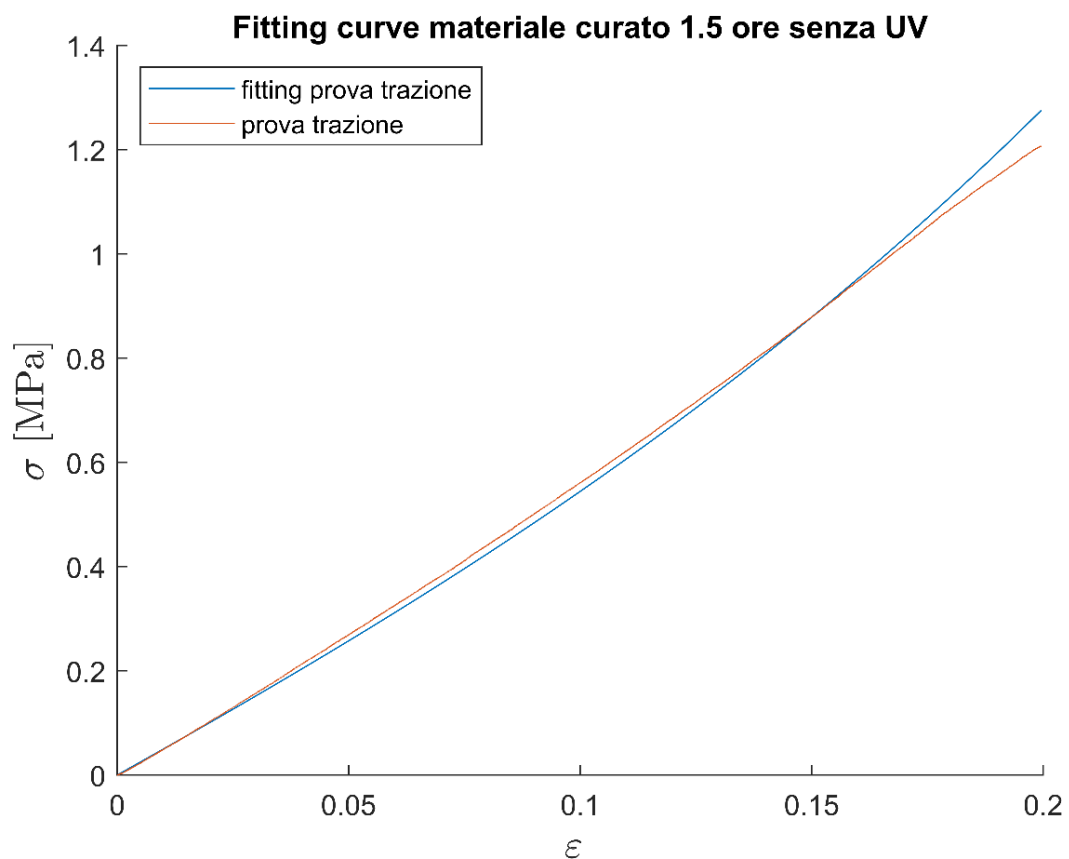


Figura 32: Fitting per il materiale curato 1.5 ore senza esposizione ai raggi UV

Il fitting del terzo materiale, ottenuto dai risultati dei provini curati per 5 ore, ha individuato il modello di Yeoh, avente come parametri C_{10} pari a 8.92, C_{20} uguale a -13.70 e C_{30} pari a 17.18.

In Figura 33 è possibile osservare il fitting delle curve delle prove di trazione e di bulge per il materiale curato 5 ore.

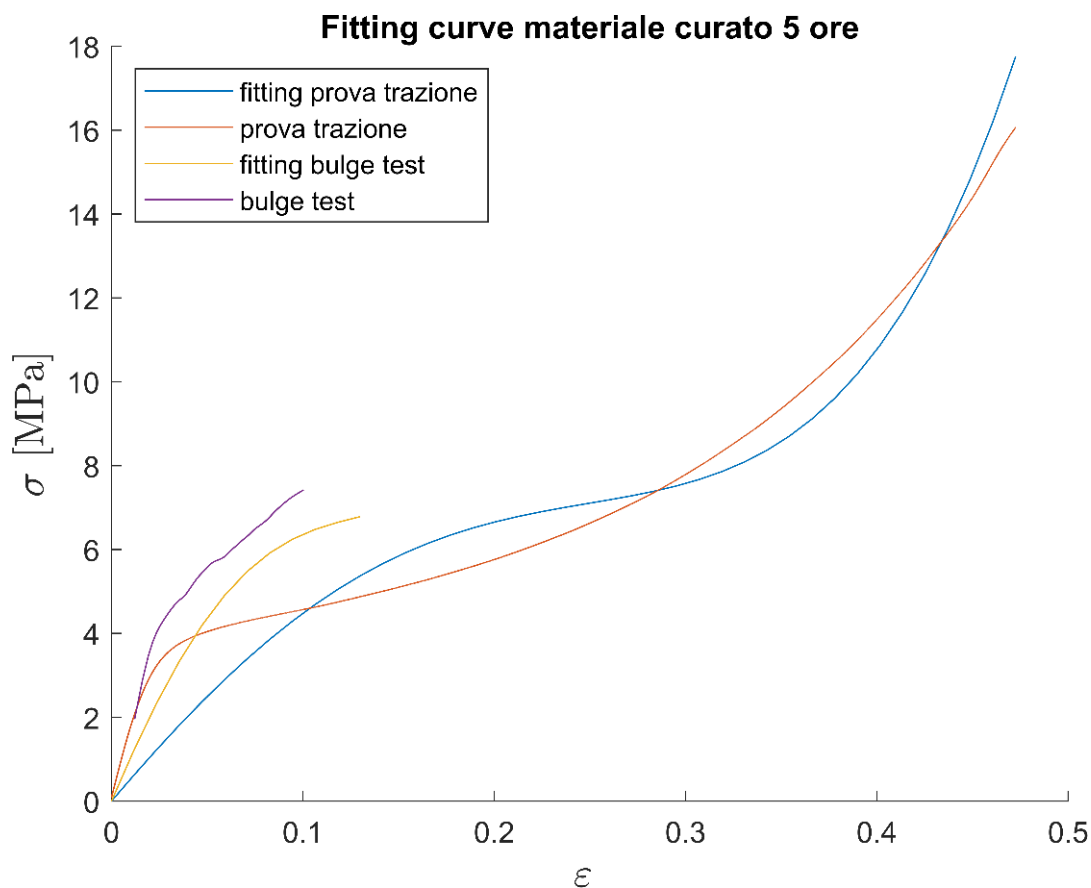


Figura 33: Fitting per il materiale curato 5 ore

I risultati ottenuti sono sintetizzati in Tabella 9.

Tabella 9: Risultati del fitting

Materiale	Caratteristiche provini	Modello	Parametri caratteristici
Materiale 1	Provini curati 1.5 ore	Yeoh	$C_{10} = 4.26$ $C_{20} = -3.56$ $C_{30} = 5.50$
Materiale 2	Provini curati 1.5 ore senza UV	Ogden di primo ordine	$\mu_1 = 1.66$ $\alpha_1 = 7.65$
Materiale 3	Provini curati 5 ore	Yeoh	$C_{10} = 8.92$ $C_{20} = -13.70$ $C_{30} = 17.18$

8.5. Simulazione agli elementi finiti del bulge test

Dai parametri ottenuti dal fitting delle curve sperimentali è stato possibile impostare una simulazione della prova sperimentale del bulge test identificata dalla sigla Test X, test nel quale il provino è stato coperto durante la fase della post cura nella parte centrale con del

nastro adesivo nero per evitare che la parte sottostante venisse irradiata dalle radiazioni ultraviolette.

Per la simulazione è stato utilizzato il software agli elementi finiti Abaqus/FEA [23].

Si sono create due parti all'interno del modello, la prima per simulare la flangia superiore del bulge test e la seconda per simulare il provino. La flangia è stata modellata come una superficie 3D assialsimmetrica analiticamente rigida le cui dimensioni della sezione sono rappresentate nella Figura 34. Tale scelta di modellazione è motivata dal fatto che, in questo modo, non è stato necessario fornire alla flangia nessuna proprietà meccanica del materiale e, inoltre, nella simulazione è sufficiente un unico punto per poterle descrivere. È stato quindi creato un *Reference Point*, che rappresenta il punto nel quale inserire le condizioni al contorno per descriverne comportamento all'interno del modello.

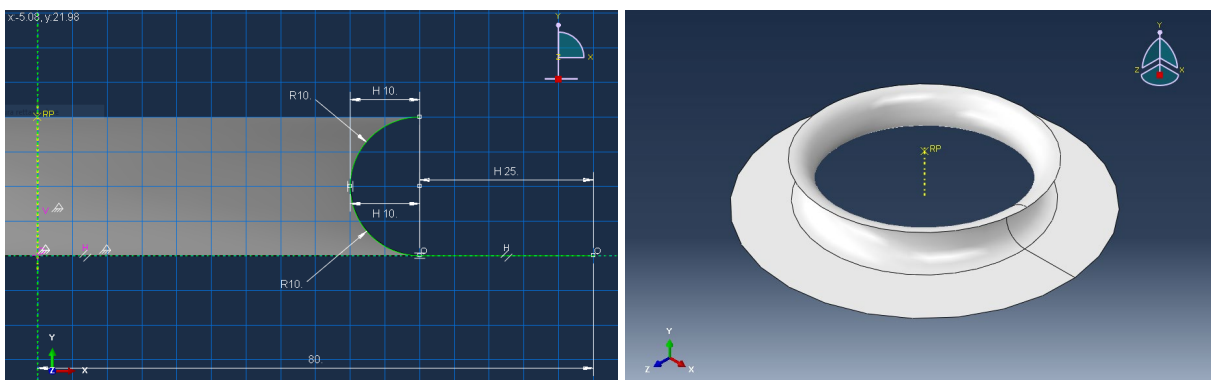


Figura 34: Vista isometrica e sezione della flangia

È stato simulato un quarto del provino reale poiché è stata sfruttata la simmetria del problema in modo da ridurre i tempi di calcolo. Il provino è stato modellato come uno shell di rivoluzione. In seguito, è stato partizionato al centro andando a individuare la zona che nella prova sperimentale era stata coperta dal nastro per evitare l'irradiazione con le radiazioni UV, come si può vedere nella Figura 35.

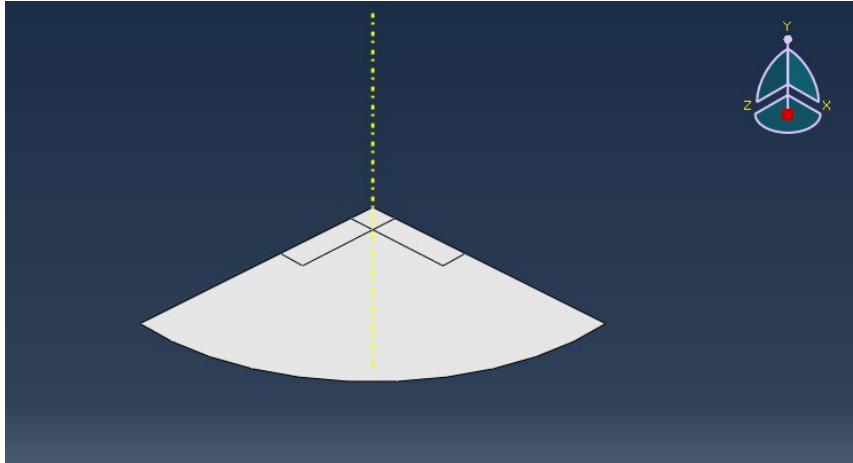


Figura 35: Vista isometrica del quarto di provino

Per la parte non esposta ai raggi UV, evidenziata in rosso in Figura 36, sono state impostate le proprietà ottenute dal fitting con le curve sperimentali descritte come Materiale 2 nella Tabella 9. Per la parte restante del provino, invece, sono state impostate le proprietà del Materiale 1. Una volta definite le proprietà dei due materiali sono state create le due sezioni omogenee all'interno dell'editor per la creazione delle sezioni.

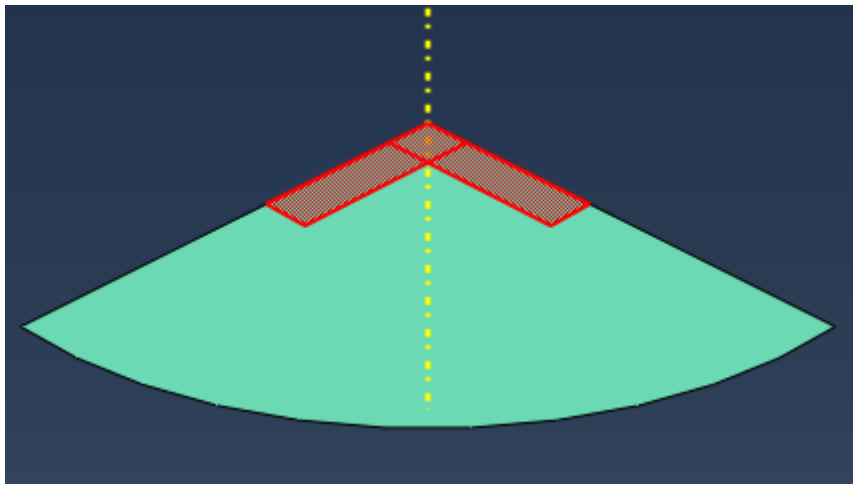


Figura 36: Assegnazione proprietà del materiale

Le sezioni modellate sono state definite mediante la tipologia *shell* omogenea con cinque punti di integrazione lungo lo spessore.

Sull'editor di assegnazione delle sezioni, è stato impostato, mediante lo *shell offset* definito attraverso l'opzione *Middle Surface*, che la superficie del provino disegnata nel CAD coincida con la superficie mediana della sezione.

Lo spessore di ciascuna sezione non è stato quindi modellato, ma è stato assegnato alla relativa superficie come attributo. In particolare, si è impostato uno spessore di 1.25 mm.

Dato che la flangia è stata modellata come una superficie 3D analiticamente rigida, come riportato precedentemente, la sua discretizzazione è rappresentata dalla definizione di un punto di riferimento, chiamato anche *Reference Point*. Sul provino, invece, è stata necessaria la definizione di una mesh. Pertanto, la fase successiva consiste nella discretizzazione del provino attraverso i comandi di meshing presenti all'interno del software. In primo luogo, è stata definita la tipologia di elementi da utilizzare per la modellazione del provino. La scelta è ricaduta su elementi shell quadrangolari a quattro nodi ad integrazione ridotta, che in ABAQUS vengono denominati S4R. Inoltre, si è utilizzato il comando del *Mesh Control* per poter impostare e definire la tecnica di meshing, forzando il programma nel realizzare, dove possibile, una mesh con elementi quadrati regolari utilizzando la tecnica denominata *Structured*, mentre nel resto del modello è stata utilizzata una tecnica denominata *Free*, che lascia la libertà al software di discretizzare la parte nella maniera migliore possibile.

Successivamente, è stata impostata la dimensione degli elementi della mesh, imponendo un valore pari a 0.25 mm.

La fase successiva è stata quella della realizzazione dell'assieme del modello, andando a posizionare le due parti, rispettivamente la flangia e il provino, all'interno del modulo *Assembly* di ABAQUS. In particolare, le due parti sono state posizionate facendo coincidere gli assi di assialsimmetria, mentre la superficie del provino è stata posizionata ad una distanza dalla flangia pari a 0.625 mm, corrispondente alla metà dello spessore della sezione. Tale procedura è stata eseguita per far sì che la superficie della flangia fosse a contatto con la superficie superiore del provino.

In seguito, è stato definito lo step di tipo statico, all'interno di esso si può andare ad operare impostando dei parametri come: la durata dell'incremento iniziale, la durata dell'incremento minimo e di quello massimo.

Per quanto riguarda le interazioni tra le parti, è stato inserito un contatto con un comportamento tangenziale di tipo *Penalty* tra la superficie superiore del provino e la superficie inferiore della flangia, nel quale è stato impostato un coefficiente di attrito pari a 0,8.

La fase successiva nella realizzazione del modello ha previsto l'impostazione delle condizioni al contorno. Tali condizioni sono state impostate nel software all'interno del modulo denominato *Load*. In primo luogo, è stato inserito un vincolo di incastro riferito al *Reference Point* associato alla flangia, attraverso l'imposizione di valori nulli degli spostamenti lungo gli assi e delle rotazioni attorno ad essi. Questo vincolo è stato creato nello step iniziale e si mantiene per tutta la durata della simulazione.

Le altre condizioni al contorno fissate riguardano gli elementi del provino, in particolare sono state fissate le due condizioni di simmetria per i nodi appartenenti agli assi di simmetria del provino come illustrato in Figura 37 e Figura 38.

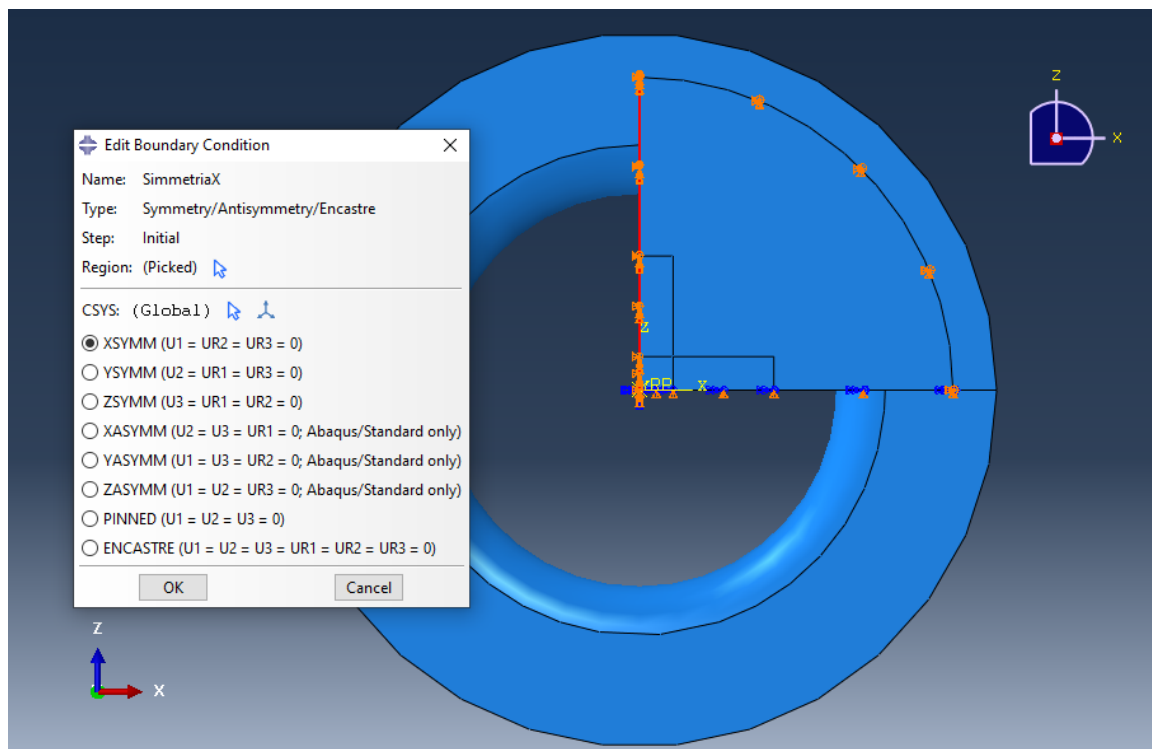


Figura 37: Definizione vincoli di simmetria per il piano normale all'asse X

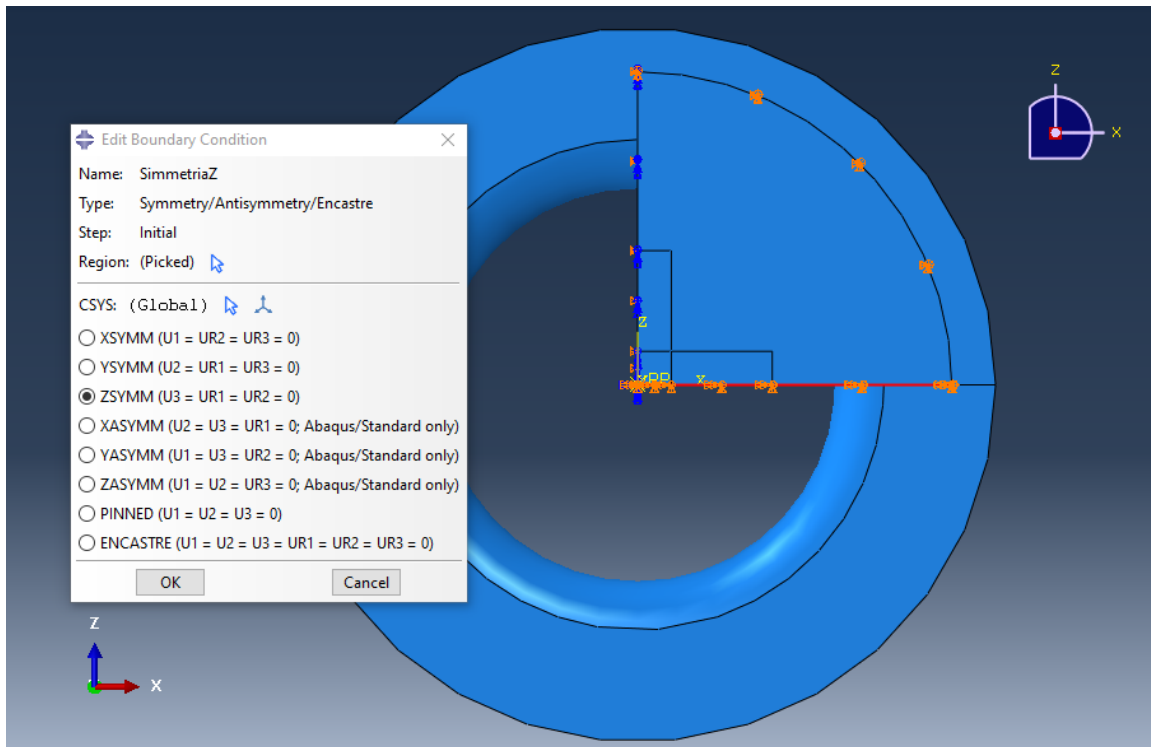


Figura 38: Definizione vincoli di simmetria per il piano normale all'asse Z

Un'ulteriore condizione inserita sugli elementi del provino è rappresentata da un vincolo agli spostamenti per i nodi appartenenti al lato esterno, come mostrato in Figura 39.

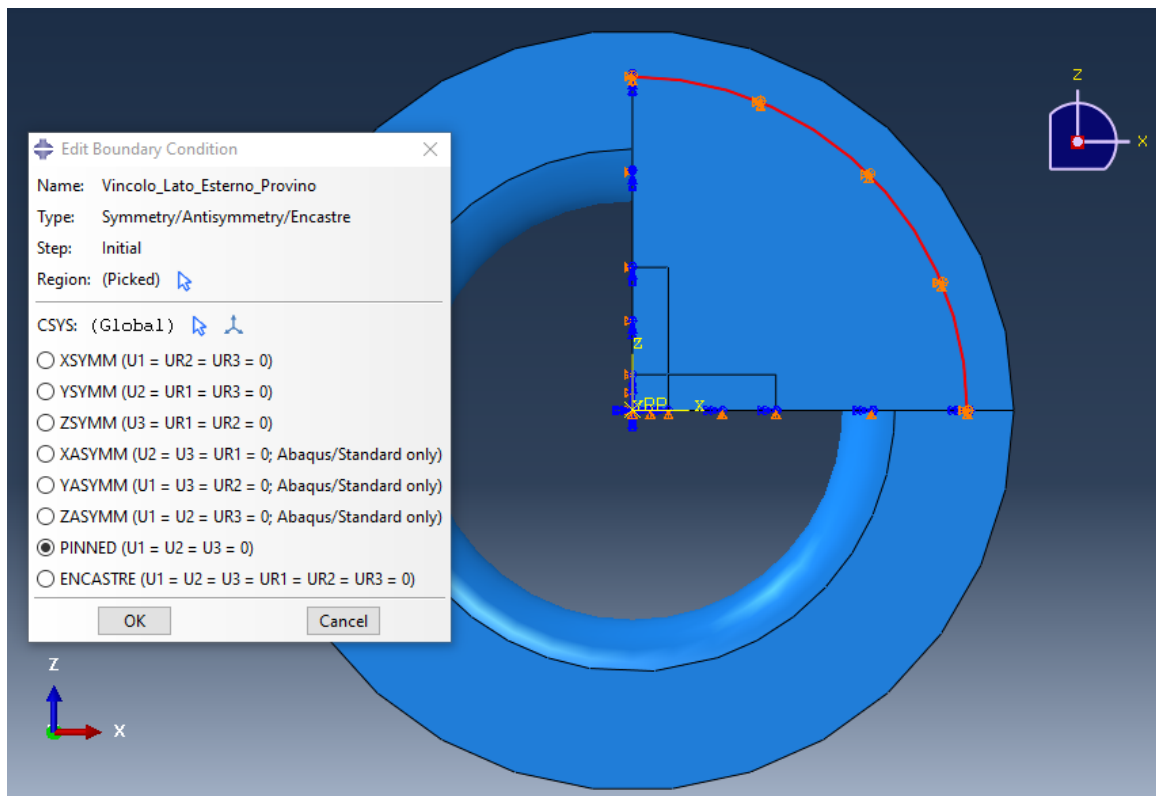


Figura 39: Imposizione dei vincoli per simulare la bullonatura tra le flange

Tale vincolo è stato inserito per simulare il fatto che, durante l'esecuzione materiale della prova, la parte perimetrale esterna del provino è stata tenuta bloccata tra la flangia superiore e quella inferiore, per effetto della bullonatura tra le due. Poiché la flangia inferiore, essendo solamente un elemento secondario di supporto della prova, non è stata inserita all'interno del modello, al suo posto sono stati inseriti i vincoli che simulassero gli effetti ad essa dovuti.

L'ultima fase nella realizzazione del modello è stata quella della definizione dei carichi che agiscono sul provino. In particolare, è stata inserita una pressione agente sulla inferiore del provino pari a quella massima misurata dal rilevatore di pressione durante l'esecuzione della prova sperimentale del Test X. In Figura 40 è graficata l'impostazione di tale pressione sul modello.

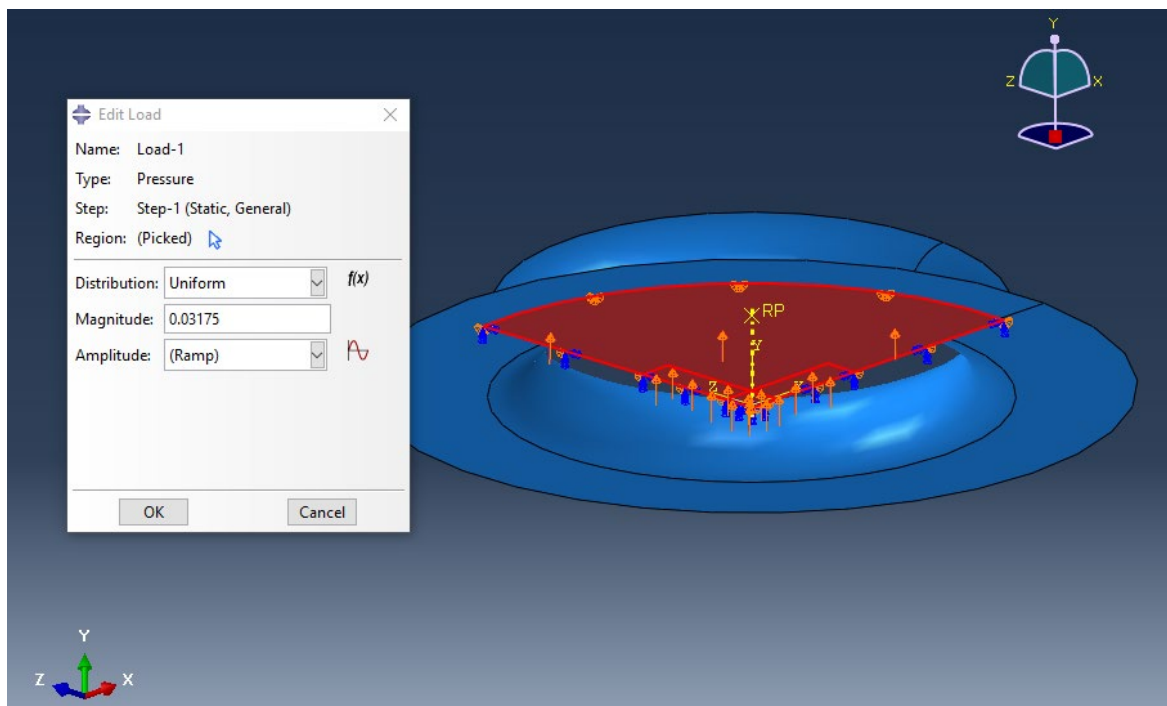


Figura 40: Inserimento della pressione agente sulla superficie inferiore

Infine, una volta impostati tutti i parametri del modello, è stato impostato il file *job* di risoluzione per lanciare la simulazione, all'interno modulo denominato *Jobs*.

Dal confronto dei risultati ottenuti rispettivamente dalla prova sperimentale, mostrati in Figura 41, e dalla simulazione, in Figura 42, si può osservare che i valori e la distribuzione degli spostamenti al di fuori del piano risultano essere confrontabili.

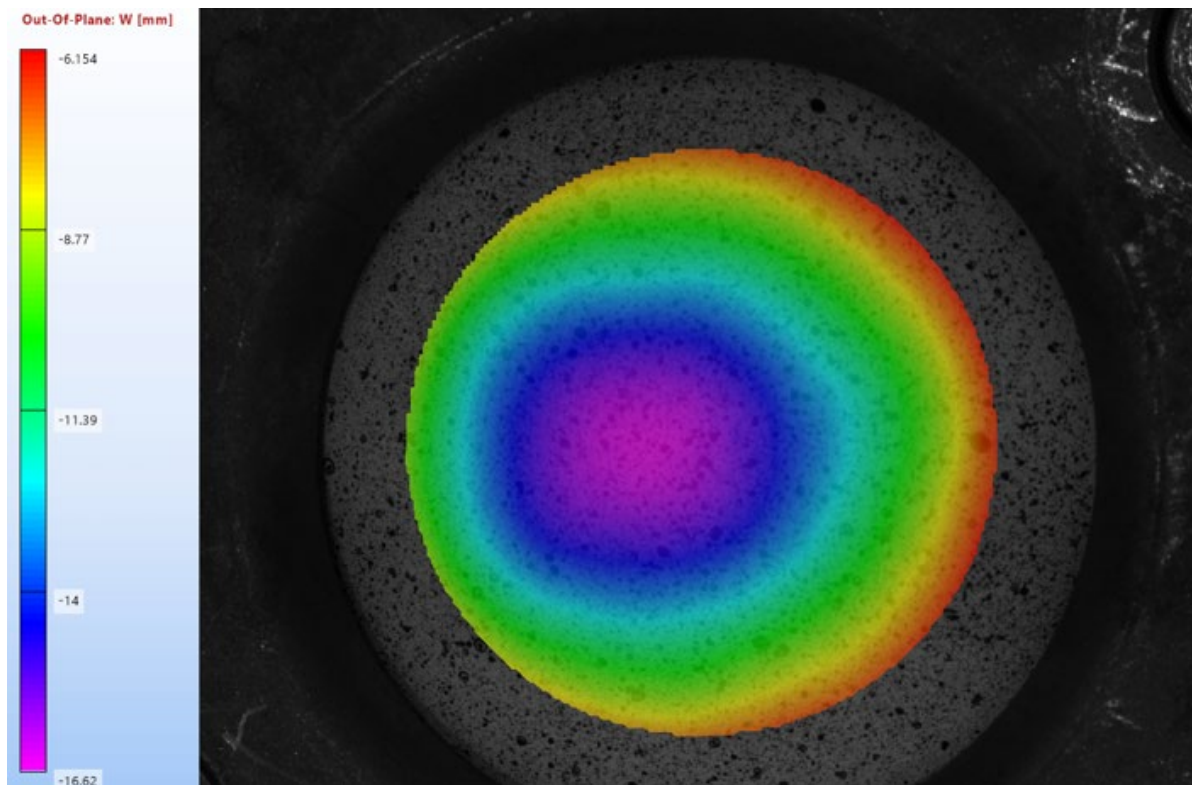


Figura 41: Spostamenti fuori dal piano della prova sperimentale

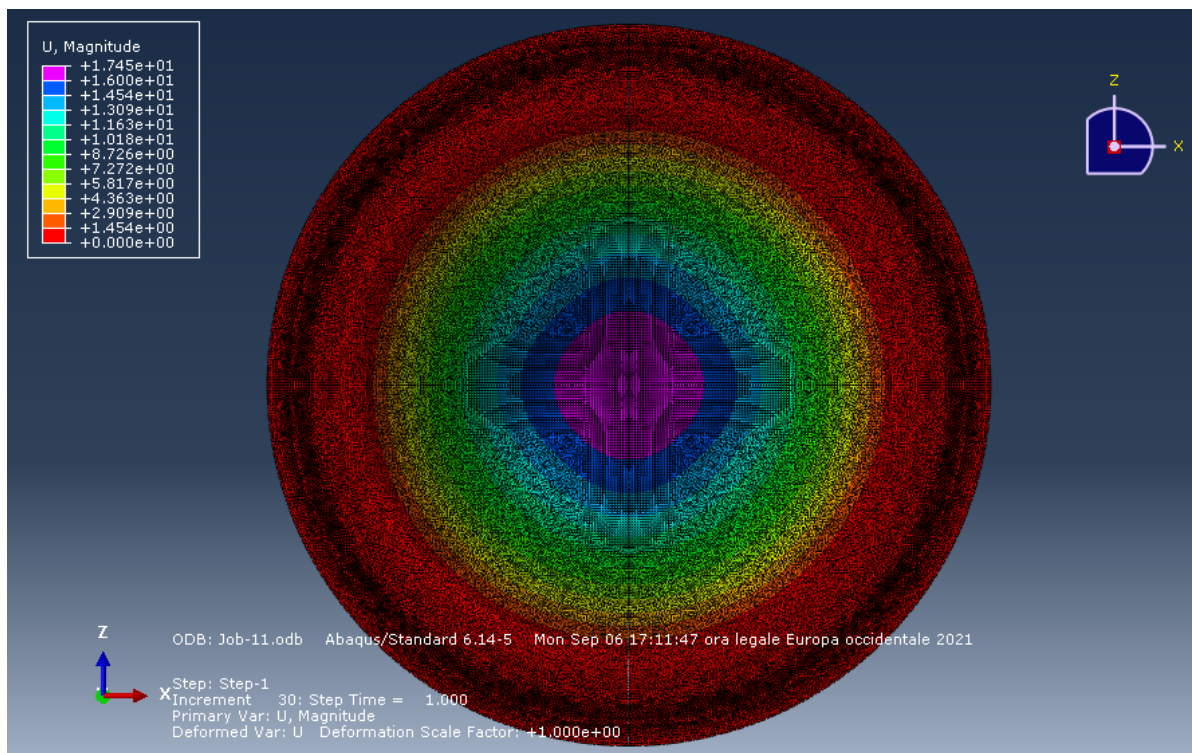


Figura 42: Spostamenti fuori dal piano della simulazione

In particolare, si osserva che il valore massimo degli spostamenti al di fuori del piano nella prova sperimentale risulta essere pari a circa 16.6 mm, mentre nella simulazione è stato ottenuto un valore pari a circa 17 mm.

Inoltre, sono stati confrontati anche le deformazioni lungo una delle due direzioni principali ottenute, rispettivamente, dalla simulazione (Figura 43) e dalla prova sperimentale (Figura 44).

Anche in questo caso si può osservare i risultati ottenuti possono essere confrontabili tra loro, a meno delle differenze dovute dalla semplificazione delle reali condizioni di esercizio nella modellazione. Si può osservare infatti che tali leggere differenze sono concentrate presso la zona coperta rispetto a quella che è stata esposta alle radiazioni UV. Nella modellazione, infatti l'intera zona coperta è stata caratterizzata imponendo le specifiche proprietà ricavate dal fitting delle curve ottenute dalle prove sperimentali, come già riportato precedentemente. Tali parametri sono stati assunti uniformi per tutta l'area selezionata, mentre nella realtà i bordi di copertura e, più in generale, le aree al confine possono essere caratterizzate da un contrasto non così netto rispetto alle zone esposte.

Si evidenzia inoltre che, anche nei risultati ottenuti dalla prova sperimentale si può osservare una differenza nelle deformazioni tra la zona sottoposta a post-cura con esposizione ai raggi UV e la zona coperta.

Anche i risultati dei valori numerici risultano essere confrontabili, ottenendo, rispettivamente, per la prova sperimentale una deformazione massima pari a circa 0.15, mentre per la simulazione si ha un valore di circa 0.18.

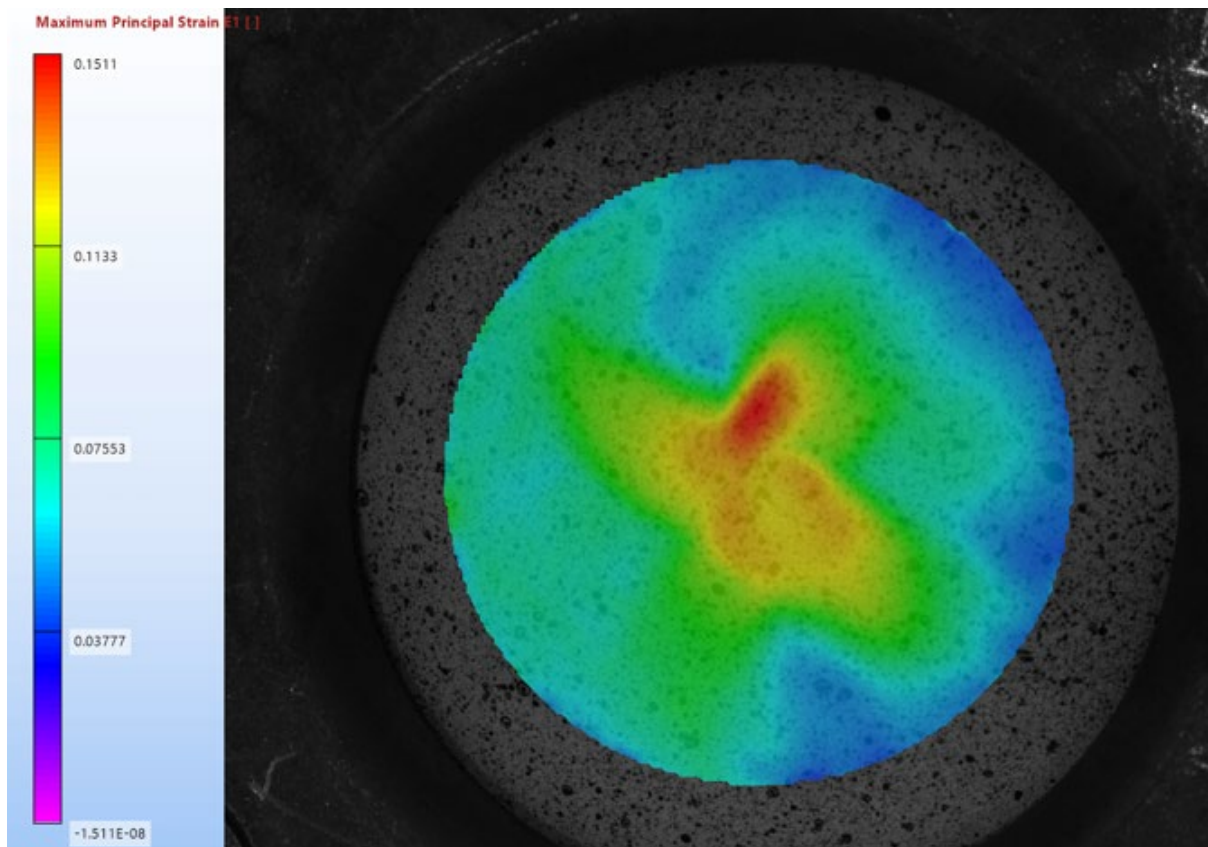


Figura 43: Deformazioni lungo l'asse principale nella prova sperimentale

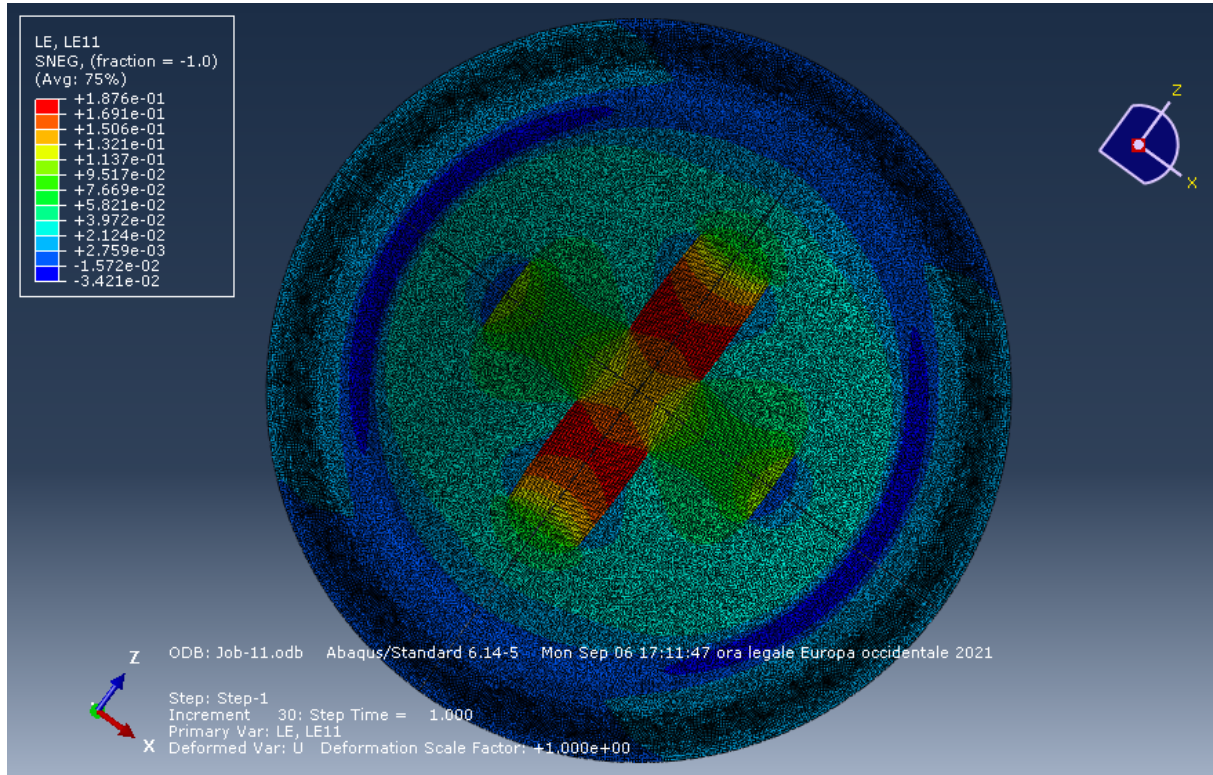


Figura 44: Deformazioni lungo l'asse principale nella simulazione

9. Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente studio è stato analizzato il comportamento meccanico di una resina fotosensibile stampata in 3D in condizioni equibiassiali mediante l'utilizzo di un bulge test idraulico.

La resina in esame è stata utilizzata per stampare dei provini tramite la tecnica di additive manufacturing DLP, che permette di riprodurre geometrie complesse con un elevato livello di precisione, consentendo anche la produzione simultanea di più di un oggetto.

Dalle prove sperimentali di trazione effettuate, è stato possibile verificare che il comportamento assunto dal materiale è di tipo iperelastico. Inoltre, testando provini ricavati tramite differenti tempi di post-cura, si è osservato un incremento delle caratteristiche di resistenza del materiale all'aumentare del tempo di esposizione alla temperatura di progetto e ai raggi UV.

Dal confronto dei risultati ottenuti da provini realizzati seguendo direzioni di stampa differenti, si è osservato un comportamento simile e, pertanto, si è verificata l'ipotesi di isotropia.

Coprendo il materiale per evitare l'assorbimento dei raggi UV, si è osservato che la curva del provino esposto alla sola temperatura presenta, a parità di deformazione, valori di tensione minori rispetto a quelli esposti alla combinazione di temperatura e raggi UV.

Le prove di trazione planari, seppur presentando difficoltà maggiori nella determinazione delle deformazioni, hanno comunque confermato le ipotesi di iperelasticità e isotropia dei materiali. L'attrezzatura necessaria per tipologia di prova, infatti, è risultata poco adattabile rispetto alla geometria dei provini in esame, che dovevano rispettare precise proporzioni nel rapporto lunghezza/larghezza per poter garantire lo stato tensionale e deformativo necessario alla prova.

Anche le prove di bulge test hanno confermato le ipotesi sul comportamento costitutivo del materiale ed hanno inoltre permesso di ricavare la curva che definisce la relazione tra tensione e deformazione nel caso in cui il materiale sia sottoposto ad uno stato tensionale biassiale.

Dalle prove effettuate sono stati definite tre tipologie di materiale, rispettivamente, dai risultati dei provini curati per 1.5 ore, e 1.5 ore senza esposizione ai raggi UV e 5 ore.

Le curve ottenute sperimentalmente sono state analizzate mediante un processo di fitting per individuare i modelli matematici che meglio si adattassero alla descrizione del comportamento costitutivo sperimentale del materiale e ricavarne, di conseguenza, i relativi parametri. Si è osservato che i materiali definiti dai provini curati per 1.5 e 5 ore si adattano al modello di Yeoh, mentre quello desunto dai provini curati senza UV fitta con quello di Ogden del primo ordine.

Le caratteristiche dei materiali così definiti sono state modellate in un software agli elementi finiti. I risultati della simulazione di bulge test effettuata tramite il modello sono risultati essere confrontabili con quelli ottenuti sperimentalmente, sia in termine degli spostamenti massimi al di fuori del piano, risultati rispettivamente pari a 17 mm e 16.6 mm, sia per quanto riguarda le deformazioni massime, rispettivamente pari a 0.18 e 0.15.

Il modello può essere quindi utilizzato per applicazioni future, per effettuare simulazioni utilizzando le caratteristiche dei materiali ottenute. La precisione delle simulazioni del modello potrebbe essere ulteriormente incrementata, effettuando ulteriori prove sperimentali sulla resina in esame e inserendo nel fitting anche le curve ottenute dalle prove di pure shear.

Bibliografia

1. Bergström, J. *Mechanics of Solid Polymers*; 2015; ISBN 9780323266987.
2. Yang, Y.; Li, L.; Zhao, J. Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength and hardness. *Mater. Des.* **2019**, *162*, 418–428, doi:10.1016/j.matdes.2018.12.009.
3. Salmoria, G. V.; Gonzalez, V.J.; Ahrens, C.H.; Soldi, V.; Pires, A.T.N. Stereolithography Somos 7110 photosensitive resin: Study of curing kinetic and thermal degradation. *J. Mater. Process. Technol.* **2005**, *168*, 164–171, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.11.012.
4. Salmoria, G. V.; Klaus, P.; Pires, A.T.N.; Roeder, J.; Soldi, V. Investigations on cure kinetics and thermal degradation of stereolithography Renshape™ 5260 photosensitive resin. *Polym. Test.* **2008**, *27*, 698–704, doi:10.1016/j.polymertesting.2008.05.008.
5. Liljenherte, J.; Upadhyaya, P.; Kumar, S. Hyperelastic strain measurements and constitutive parameters identification of 3D printed soft polymers by image processing. *Addit. Manuf.* **2016**, *11*, 40–48, doi:10.1016/j.addma.2016.03.005.
6. Ogden, R.W. *Non-linear elastic deformations*; Dover Publications Inc., Ed.; Courier Corporation, 1997;
7. Sasso, M.; Palmieri, G.; Chiappini, G.; Amodio, D. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods. *Polym. Test.* **2008**, *27*, 995–1004, doi:10.1016/j.polymertesting.2008.09.001.
8. Bijelonja, I.; Demirdžić, I.; Muzaferija, S. A finite volume method for large strain analysis of incompressible hyperelastic materials. *Int. J. Numer. Methods Eng.* **2005**, *64*, 1594–1609, doi:10.1002/nme.1413.
9. Lenci, S. *Meccanica del Continuo*; 2018;
10. Dizon, J.R.C.; Espera, A.H.; Chen, Q.; Advincula, R.C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Addit. Manuf.* **2018**, *20*, 44–67, doi:10.1016/j.addma.2017.12.002.
11. Vitale, M.; Cotteleer, M.; Holdowsky, J. An Introduction to Additive Manufacturing. *Def. AT&L November-D*.

12. Bhadeshia, H.K.D.H. *Additive manufacturing*; Second Edi.; Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016; Vol. 32;.
13. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* **2018**, *143*, 172–196, doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
14. Vaidyanathan, R. Additive Manufacturing Technologies for Polymers and Composites. *Addit. Manuf.* **2015**, 19–64, doi:10.1201/b18893-3.
15. Palmieri, G.; Chiappini, G.; Sasso, M.; Papalini, S. Hyperelastic materials characterization by planar tension tests and full-field strain measurement. *Soc. Exp. Mech. - SEM Annu. Conf. Expo. Exp. Appl. Mech. 2009* **2009**, *4*, 2232–2238.
16. Dillard, D.A.; Pocius, A.X. The mechanic of adhesion. *Adhes. Sci. Eng.*
17. Lo Savio, F.; La Rosa, G.; Bonfanti, M. A new theoretical-experimental model deriving from the contactless measurement of the thickness of bulge-tested elastomeric samples. *Polym. Test.* **2020**, *87*, 106548, doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106548.
18. Papanicolaou, C.G. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*; 2016; ISBN 9781782424468.
19. Broughton, W. *Assessing the moisture resistance of adhesives for marine environments*; 2012; ISBN 9781845694524.
20. Rossi, G. *Misure meccaniche e termiche. Basi teoriche e principali sensori e strumenti*; Carocci, 2013;
21. Edwards, L.W. Non-linear finite element analysis of embankments. *Eng. Softw.* **1979**, 599–613.
22. Ogden, R.W.; Saccomandi, G.; Sgura, I. Fitting hyperelastic models to experimental data. *Comput. Mech.* **2004**, *34*, 484–502, doi:10.1007/s00466-004-0593-y.
23. Smith, M. *ABAQUS/Standard User's Manual*; Version 6.; Dassault Systèmes Simulia Corp.;

Sitografia

<https://www.3dprima.com/resin/resin-manufacturer/primacreator/primacreator-value-flex-uv-resin-1000-ml-skin/a-24602>; ultimo accesso 02/10/2021.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Photopolymer>; ultimo accesso 03/10/2021.

<https://phrozen3d.com/products/transform-resin-3d-printer-phrozen>; ultimo accesso 02/10/2021.

<https://medium.com/@DAUNow/an-introduction-to-additive-manufacturing-7c468d099f2c>; ultimo accesso 09/10/2021.

<https://www.amse.it/2018/05/30/prova-di-trazione-sui-polimeri-perche-e-così-importante/#:~:text=Le%20propriet%C3%A0%20di%20resistenza%20a%20trazione%20di%20un%20polimero%20vengono,provino%20fino%20alla%20sua%20rottura>; ultimo accesso 09/10/2021.