

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe LM-33

TESI DI LAUREA

in Modelli fisico-matematici per l'ingegneria industriale

ANALISI DELLA CORRELAZIONE TRA I PARAMETRI DI
PROCESSO E LE PRESTAZIONI DEI MATERIALI
POLIMERICI OTTENUTI TRAMITE FUSED DEPOSITION
MODELING

CANDIDATO
Mhervin Leonelli

RELATORE
Prof. Leonardo Seccia
CORRELATORI
Ing. Sara Bagassi
Ing. Francesca Lucchi

Anno Accademico 2013/2014
Sessione III

A quelle due splendide persone
che chiamo mamma e papà.

INDICE

Introduzione	pag. 3
Capitolo 1	
La Prototipazione Rapida.....	pag. 5
Capitolo 2	
Il comportamento meccanico dei materiali.....	pag. 21
Capitolo 3	
I polimeri.....	pag. 37
Capitolo 4	
Normative di riferimento.....	pag. 56
Capitolo 5	
Il metodo DOE.....	pag. 76
Capitolo 6	
Prove sperimentali.....	pag. 86
Capitolo 7	
Discussione dei risultati.....	pag. 122
Capitolo 8	
Conclusioni.....	pag. 137
Bibliografia	pag. 138
Ringraziamenti	pag. 139

INTRODUZIONE

Nella storia tecnologica dell'umanità, con cadenza costante, si è assistito a rivoluzioni che hanno spinto il genere umano a nuovi livelli di consapevolezza decretando il perpetrarsi di quella lenta ma inesorabile evoluzione che chiamiamo progresso. Prima la scoperta del fuoco, poi la ruota arrivando all'invenzione della macchina a vapore nell'epoca moderna e del motore a combustione interna o del transistor in quella contemporanea.

Citando un famoso editoriale della rivista "The Economist" del 10 febbraio 2011:

“La stampa tridimensionale rende economico creare singoli oggetti tanto quanto crearne migliaia e quindi mina le economie di scala. Essa potrebbe avere sul mondo un impatto così profondo come lo ebbe l'avvento della fabbrica... è impossibile prevedere l'impatto a lungo termine della stampa 3D. Ma la tecnologia sta arrivando, ed è probabile che sovverta ogni campo che tocchi.”

Dunque, il caposaldo su cui ruota il concetto stesso di società industrializzata è in questo ambito messo in discussione dalla possibilità di creare ciò che desideriamo in maniera autonoma e veloce, riducendo in modo consistente la filiera produttiva nell'accezione in cui siamo abituati a conoscerla.

Così facendo, il Rapid Prototyping ,inteso come branca tecnologica in cui la stampa 3D è nata e si è consolidata, evolve nel concetto di Additive Manufacturing. Prerogativa fondamentale di questa applicazione è la produzione di particolari per sovrapposizione di strati successivi, quindi per addizione di materiale fuso.

La prima domanda che è lecito farsi in questo caso è se i particolari prodotti in questo modo abbiano caratteristiche meccaniche tali da renderli adatti ad usi strutturali. Per quanto riguarda le tecnologie come la SLS (Selective Laser Sintering), che utilizzano polveri metalliche come materiale di costruzione del modello, la risposta sarà sicuramente affermativa. Per citare un esempio su tutti, la General Electric, ovvero la più grande multinazionale al mondo, è in procinto di utilizzare queste tecniche con lo scopo di produrre componenti per jet.

Tuttavia, negli ultimi decenni, i polimeri hanno costituito e costituiscono tutt'ora il più diffuso materiale da costruzione sia per beni di consumo sia per particolari meccanici leggeri. Il quesito che ci si pone è quindi se sia lecito o meno utilizzare i polimeri stampati in Rapid Prototyping\Additive Manufacturing per scopi e applicazioni strutturali.

Dunque in questo elaborato, ci si propone di realizzare una caratterizzazione delle proprietà a trazione e compressione di provini, realizzati secondo le vigenti normative ASTM\ISO, costruiti tramite una macchina di prototipazione rapida che opera mediante FDM (Fused Deposition Modeling), nello specifico una Stratasys Fortus mc 250.

Per chiarezza e completezza saranno dunque presentate le principali tecnologie di cui ci si è avvalso nella redazione di questa tesi. Verrà inoltre dedicato spazio per illustrare i concetti alla base e le potenzialità dell'Additive Manufacturing, che come già detto, è il pilastro su cui poggia l'universo della prototipazione rapida.

Capitolo1

LA PROTOTIPAZIONE RAPIDA

La Prototipazione Rapida (RP, Rapid Prototyping) è una tecnologia che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'ausilio di utensili per asportazione, di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su un sistema CAD tridimensionale. La tecnica alla base di questo processo è detta "additiva" (*additive manufacturing*) in quanto il modello viene costruito per aggiunta di strati successivi (*layer by layer*) utilizzando macchine rapide ed estremamente automatizzate. Tutto ciò si contrappone alla realizzazione CNC, la quale invece usa tecniche "sottrattive" che prevedono l'asportazione di materiale per giungere al particolare finito.

Gli scopi di questa pratica sono:

- la realizzazione di un oggetto reale di cui valutarne le caratteristiche funzionali;
- la realizzazione di un prototipo per la verifica dei flussi in ambito aerodinamico;
- la realizzazione di un master per creare stampi dell'oggetto
- la realizzazione di un oggetto "di stile" per verificare il design del particolare

Dunque si può materializzare un progetto industriale in tempi estremamente ridotti e soprattutto senza dover affrontare gli elevati costi e rischi della realizzazione di un prototipo vero e proprio. L'evoluzione continua delle stampanti 3D, che sono le protagoniste in questo ambito, ha permesso la realizzazione di prototipi morfologicamente complessi in una vasta gamma di materiali, tra cui l'ABS.

CENNI STORICI

L'esigenza di generare un prototipo non è diventata necessità solo nelle moderne aziende, ma ha radici lontane che affondano nell'antichità, quando ci si poteva affidare solo a

carta, attrezzi da disegno o legno per realizzare un prototipo con lo scopo di valutare l'evoluzione di un progetto in corso d'opera.

Se allora la figura del modellista era interpretata da artigiani, oggi giorno questo ruolo mal si sposa con le esigenze della competizione globale, di diminuzione dei costi e dei tempi di realizzazione.

Se quindi, in uno scenario globale e competitivo, un aumento dei costi di sviluppo è mal tollerabile, sicuramente non è accettabile un ritardo per l'immissione sul mercato di un dato prodotto.

Dunque, per quanto detto, sono stati messi a punto processi con l'obiettivo di ridurre sia i costi di realizzazione che i tempi di costruzione del prototipo stesso: il Rapid Prototyping o RP.

Lo sviluppo di queste prime macchine è dovuto a Charles W. Hull che originariamente realizzò una macchina di tipo SLA-1 (Stereo Litographic Apparatus). Successivamente gli studi sono avanzati così da giungere alle generazioni di macchine successive quali LOM (Laminated Object Manufacturing) , FDM (Fused Deposition Modeling), LENS (Laser Engineered Net Shaping).

E' cambiato inoltre lo scenario d' impiego, poiché lo sviluppo di queste macchine non è più affidato alla collaborazione con grosse aziende di settore, ma soprattutto alle piccole e medie imprese, imputabile alla sensibile diminuzione dei costi di queste tecnologie.



Fig. 1.1: Charles W. Hull con una delle stampanti 3D da lui sviluppate

FASI DEL RAPID PROTOTYPING

La prototipazione rapida si può paragonare all'operazione di stampa di un testo, solo un po' più complicata. In dettaglio le fasi che portano alla realizzazione del prototipo sono:

- disegno del modello CAD o rilievo tramite Ingegneria Inversa della geometria del componente,

- progettazione del prototipo,
- preparazione della mesh¹ (creazione del file STL),
- pianificazione della lavorazione,
- costruzione del prototipo,
- operazioni di post-lavorazione,

Il modello può essere disegnato al CAD tramite programmi dedicati (Solidworks, Solidedge, Creo, ecc..), oppure può venire acquisita la geometria tramite tecniche di Reverse Engineering. Si realizza poi un file con estensione .STL (*Standard Triangulation Language*) mediante apposite utility di esportazione, ponendo attenzione a non danneggiare il file stesso. Si ha dunque una “meshatura” (tassellazione) che viene salvata in un file ASCII o binario. Questo file, composto da un reticolo di triangoli più o meno fitto, rappresenta il modello discretizzato dell’elemento continuo che verrà poi sezionato con piani paralleli (slicing), in funzione dell’orientamento in macchina.

In questa fase va posta particolare cura ed attenzione alla chiusura e alla connessione di tutte le superfici, le quali risultano meglio approssimate in maniera direttamente proporzionale al numero di triangoli che vengono generati.

La scelta dell’orientamento del modello stabilisce la direzione di crescita del pezzo, inoltre la generazione di supporti serve per sostenere le eventuali parti a sbalzo del particolare. Come detto in precedenza si esegue poi lo slicing, cioè la generazione di sezioni costituite da una serie di piani ortogonali alla direzione di accrescimento, che andranno poi a costituire il pezzo. Una volta che la macchina ha terminato la sua azione, vanno di solito eseguite una serie di operazioni manuali di rifinitura il cui scopo è togliere l’oggetto stampato dalla macchina e liberarlo dal supporto o dal materiale in eccesso ed eventualmente operare azioni

di finitura, come nel caso della tecnica “Polyjet” dove si ricorre a un’idropulitrice per rimuovere il liquido di supporto.

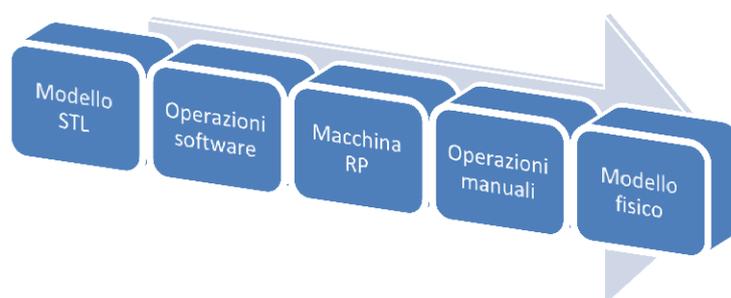


Fig. 1.3 : schema concettuale del processo RP

¹ Si definisce mesh una collezione di vertici e spigoli che racchiude la superficie esterna di un corpo in grafica 3D

LE TECNICHE RP

Dalla prima prototipatrice, basata sulla tecnica SLA-1 si sono sviluppate molte altre tecnologie la cui differenza sostanziale consiste nell'avere oggetti con caratteristiche meccaniche e strutturali sempre più vicine alla produzione di serie. Sono poi diversi i materiali con cui si può produrre: gesso, polimeri, polveri metalliche.

Dunque le differenti declinazioni del Rapid Prototyping possono essere suddivise a seconda del materiale che viene utilizzato, ecco le principali:

- **SLA (Stereo Litographic Apparatus)**

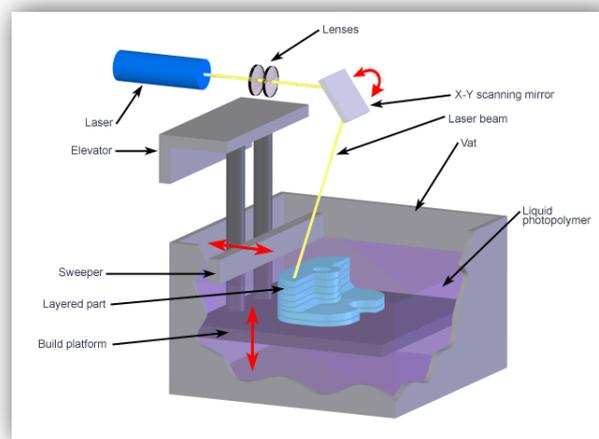


Fig. 1.4: esempio di stampante stereolitografica

Come già menzionato è stata la prima tecnica messa a punto e risale agli anni 80; il primo brevetto depositato da Hull è del 1986. Si basa sulla polimerizzazione di un liquido per effetto di un laser. Nella prima fase si predispongono il posizionamento finale del pezzo da realizzare su workstation ed si generano eventuali supporti.

Successivamente, il laser focalizzato sul piano di lavoro mediante sistemi ottici, polimerizza la prima sezione del prototipo. Dopodiché il piano di lavoro si abbassa e il procedimento prosegue per lo strato successivo. Per ridurre il tempo di costruzione il laser polimerizza solo i contorni esterni delle superfici e le collega con una struttura a nido d'ape. Infine il pezzo è esposto a raggi UV mediante i quali viene completata la polimerizzazione. Una volta terminato il processo, il prototipo può essere ulteriormente rifinito o verniciato.

Al di là delle normali applicazioni di RP è inoltre usata in maniera diffusa nel campo dell'imaging medico, dove a partire da immagini TAC o RMN è possibile realizzare in tempi brevi modelli di protesi, parti di ossa, tumori e altre parti anatomiche su cui il chirurgo può preparare l'intervento.



Fig. 1.5: esempio di teschio decorativo ottenuto con macchina SLA

- **POLYJET**

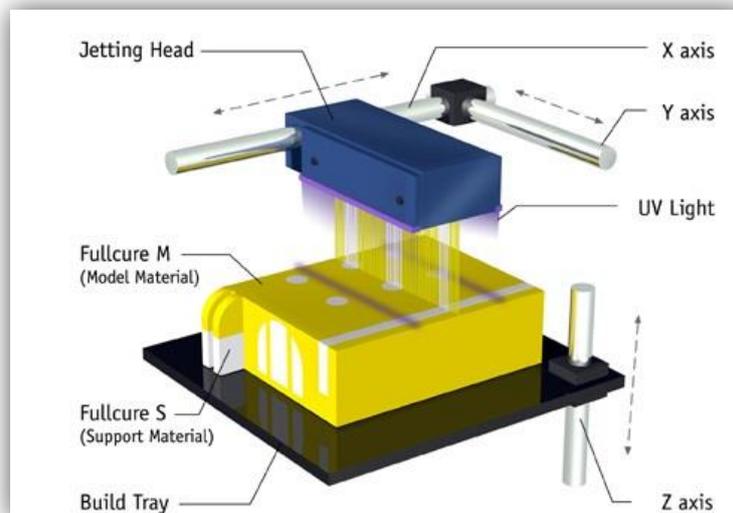


Fig. 1.6: sistema di prototipazione Polyjet

Il processo pratico si basa sulla deposizione di strati liquidi di fotopolimeri sensibili ai raggi ultravioletti coadiuvati quasi contemporaneamente da lampade UV che provvedono al loro indurimento. Più precisamente, una serie di pompe trasportano due resine, il modello ed il supporto, dalle cartucce ai serbatoi della testina che

provvede a depositare le resine in modo appropriato. Deposito il layer, le lampade UV solidali con la testina lo induriscono. A questo punto il piano si abbassa della quantità necessaria e il procedimento si ripete. Questa tecnica permette di ottenere superfici con ottima rugosità e risoluzioni molto spinte.

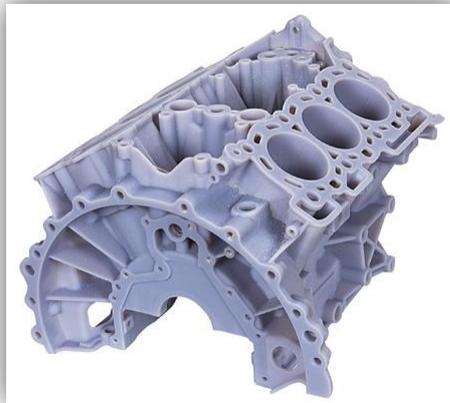


Fig. 1.7: modello di termica di motore a combustione ottenuto con stampa Polyjet

- **SELECTIVE LASER SINTERING**

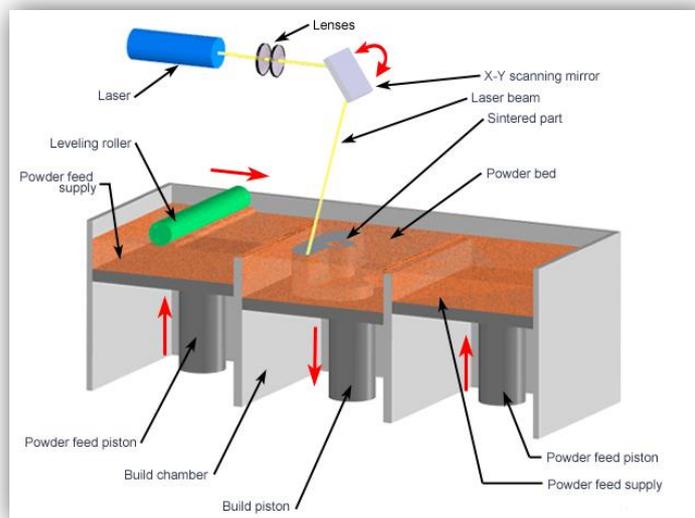


Fig. 1.8: principi di funzionamento SLS

La sinterizzazione laser selettiva fu inventata a metà degli anni 80 e utilizza polveri termoplastiche, metalliche o silicee, sinterizzate tramite l'uso di un laser. Inizialmente si stende un sottile strato di polvere con un apposito apparato su una piattaforma, ed un rullo pressa questo strato di partenza. Successivamente il laser provvede alla sinterizzazione dove necessario. La piattaforma si abbassa e il procedimento si ripete. Il vantaggio principale è che si possono utilizzare diversi tipi di polveri per realizzare prototipi dalle differenti proprietà meccaniche e inoltre non c'è bisogno di provvedere ai

supporti dato che la polvere non sinterizzata sostiene i piani superiori. Alla fine del processo il pezzo deve essere liberato dalla polvere in eccesso, e viene generalmente sottoposto ad un trattamento meccanico e termico per migliorarne le caratteristiche. La densità dei particolari ottenuti con questa tecnologia è vicina al 100% e il processo si presta anche ad essere industrializzato.



Fig. 1.9: architettura ottenuta con la tecnica di prototipazione SLS

- **ELECTRON BEAM MELTING**

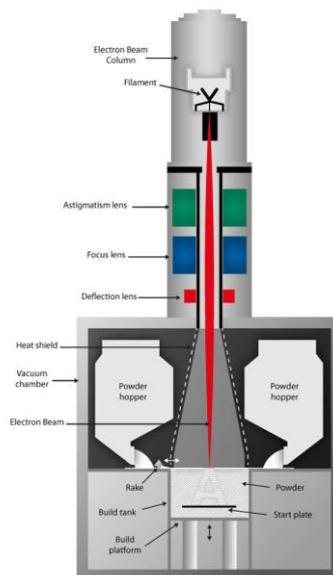


Fig. 1.10: schema di funzionamento EBM

E' nient'altro che la fusione completa e selettiva, tramite l'utilizzo di un fascio di elettroni, di particelle metalliche che in questo modo realizzano la sezione del prototipo. La polvere è stata precedentemente depositata su un piano di lavoro che presenta atmosfera inerte in modo da evitare la formazione di ossidi dannosi. Il fascio elettronico, potendo concentrare una potenza di spot superiore rispetto al laser, consente l'utilizzo di materiali altofondenti come il titanio. Molto spesso questa

tecnologia viene usata per la produzione di protesi biomediche per l'appunto in titanio, difficilmente realizzabili in altri modi, causa l'elevata temperatura di fusione dei metalli impiegati.



Fig. 1.11: sfera di titanio ottenuta tramite EBM

- **FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)**



Fig. 1.12: la prototipatrice Stratasys Fortus 250 mc presente nel V-lab della facoltà

Questa tecnologia fu sviluppata da Scott Crump alla fine degli anni 80 e commercializzata a partire dal 1990. L'acronimo FDM è un marchio registrato a nome della Stratasys, ad oggi una delle maggiori produttrici di stampanti 3D FDM.

Il procedimento prevede che fili o barrette di materiali differenti vengano scaldati poco sopra la temperatura di fusione e depositati da una testina, simile a quella di una stampante a getto di inchiostro, in grado di muoversi sugli assi x e y, mentre il moto sull'asse z è dato dal moto verso il basso della base di lavoro. Il processo è completamente automatizzato come anche la generazione (quando serve) di supporti. Dato che il materiale ha temperatura poco superiore a quella di fusione, solidifica immediatamente a contatto con la tavola porta pezzo (tray) generando il particolare precedentemente modellato.

Una volta depositata la prima sezione la base si muove verticalmente consentendo la costruzione progressiva del prototipo. Quest'ultimo può essere realizzato con varie opzioni di riempimento a seconda del risultato che si è intenzionati ad ottenere, le quali spaziano dal pezzo pieno all'utilizzo di una struttura "cava" a nido d'ape.

Oltre ad alla rimozione dei supporti, di solito, non sono necessarie altre operazioni di finitura.

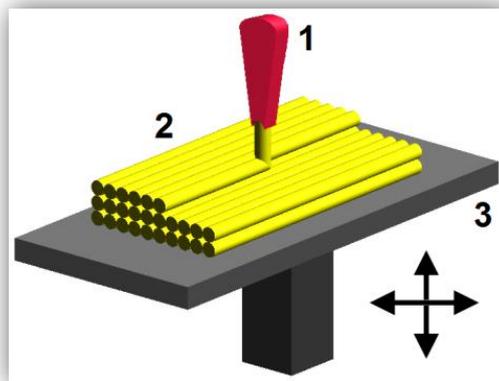


Fig. 1.13: schema di deposizione del materiale per una stampante FDM



Fig. 1.14: particolari ottenuti con la tecnica FDM

- **LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)**

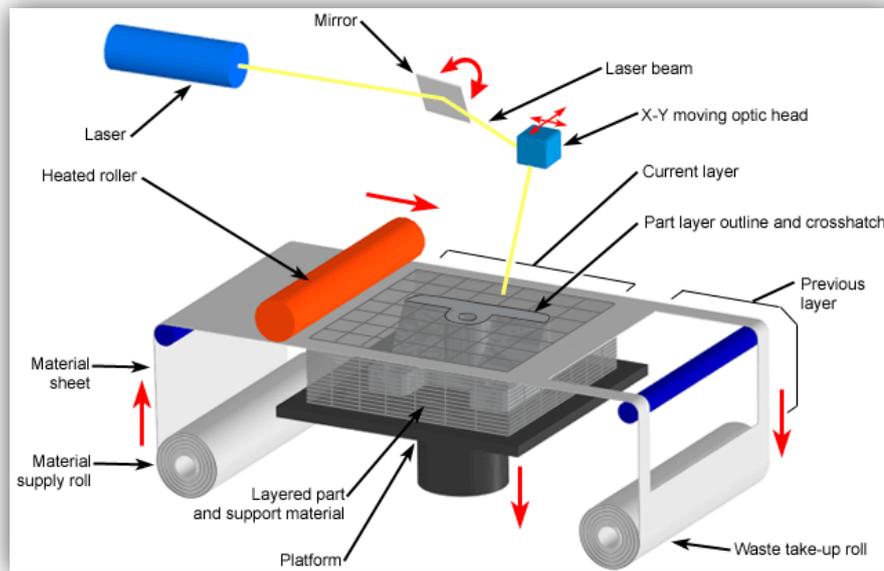


Fig. 1.15: stampante 3D LOM

Questa tecnologia è stata sviluppata in California dalla Helisis, e commercializzata a partire da 1991. In questo caso il prototipo viene costruito tramite il progressivo incollaggio di fogli di carta sovrapposti sui quali viene ricavata la sezione del pezzo in costruzione con taglio meccanico o laser. Il supporto è costituito dalla carta in eccesso e il post trattamento è molto delicato, in quanto bisogna estrarre il materiale che avanza con attrezzi tipici per la lavorazione del legno. Avendo un aspetto simile al compensato sono poi necessari una finitura con carta abrasiva, per evitare il rischio di distacco degli strati, ed un trattamento di impermeabilizzazione per prevenire l'assorbimento di umidità. Lo spessore dei layer tipicamente varia tra 0.002 e 0.020 pollici.



Fig. 1.16: carter di un motore a scoppio prototipato con tecnologia LOM

- **STAMPA 3D**



Fig. 1.17: macchina di ultima generazione per stampe 3D

Nasce da una tecnologia sviluppata al M.I.T. (*Massachusetts Institute of Technology*) di Boston e prevede l'impiego di cartucce che spruzzano un collante, simili a quelle per la stampa a getto di inchiostro, unendo strati successivi di polvere che viene utilizzata per la realizzazione del prototipo. Strato dopo strato la cartuccia deposita il collante solo in corrispondenza della relativa sezione fino al completamento del prototipo sulla tavola di lavoro. Ovviamente la polvere utilizzata serve anche da supporto al modello stesso che nella fase finale subisce processi di infiltrazione in modo da consolidarne le caratteristiche meccaniche.



Fig. 1.18: soles di scarpe realizzate con stampa 3D

- **LASER ENGINEERED NET SHAPING (LENS)**

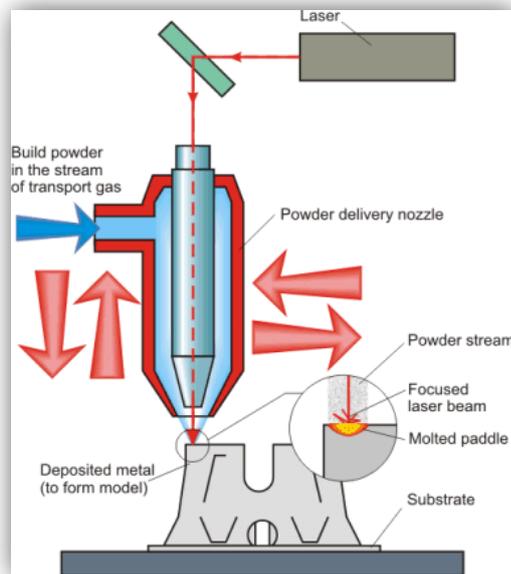


Fig. 1.19: principio di funzionamento LENS

Processo di formatura con cui si ottengono componenti metallici depositando fili o polvere i quali vengono ridotti in poltiglia e fusi dall'azione di un laser ad alta potenza sulla superficie di un substrato metallico preventivamente depositato su una piattaforma. Si riescono ad ottenere particolari a piena densità con caratteristiche meccaniche comparabili a quelle dei pezzi prodotti con procedimento standard.

I settori dove questa tecnologia meglio si colloca sono: difesa, aerospazio e biomedicale.



Fig. 1.20: osso mandibolare ottenuto tramite tecnologia LENS

ADDITIVE MANUFACTURING

Come già precedentemente anticipato, questa tecnologia si pone agli antipodi rispetto alla classica lavorazione CNC per asportazione di truciolo in quanto prevede la costruzione del particolare strato per strato, aggiungendo dunque in maniera sequenziale materiale di costruzione.

Denominatore comune è l'utilizzo di un personal computer, un software di modellazione 3D, una macchina di prototipazione e un materiale stratificabile. Una volta prodotto un primo disegno CAD, gli strumenti di Additive Manufacturing "leggono" il modello matematico dal file e successivamente lo costruiscono strato per strato in maniera sequenziale utilizzando, come visto, materie liquide, polveri, materiale in fogli o altro.

Se fino a poco tempo fa questa tecnologia era associata solamente al Rapid Prototyping e focalizzata alla produzione di modelli in pre-serie, oggi sta trovando applicazione produttive vere e proprie in settori come l'aerospazio, il settore dentale, degli impianti medico, automotive e prodotti per il settore della moda.

I vantaggi di questo procedimento sono molteplici:

- produrre piccoli lotti in tempi estremamente ridotti ed a costi sostenibili
- creare prodotti estremamente customizzati e per usi speciali in tempi estremamente contenuti
- per visualizzare strumenti in costruzione
- per migliorare l'apporto di materiale in punti nevralgici

Uno degli scopi futuri di questo approccio sarà quello di produrre macchine in grado di assemblare macchine stesse ma anche di trovare il modo per replicare i tessuti umani e quindi ricostruire organi. Cosa ancora oggi impossibile.

Nell'immediato avvenire però, ci possono essere comunque interessanti sviluppi e per ciò il motivo che sta alla base di questa tesi è quello di studiare la correlazione metodo di deposizione\specifiche di deposizione\proprietà meccaniche in modo da poter rendere la progettazione e la produzione di particolari in ABS per usi strutturali più precisa e pertinente agli scopi assegnati. L'ABS è infatti un materiale di facile lavorazione (basso fondente, malleabile e discretamente tenace) ma essendo un polimero è caratterizzato da un certo grado di ortotropia e da tensioni di rottura a trazione e compressione scarse se confrontare con quelle di materiali ferrosi, titanio o leghe di alluminio. Inoltre queste caratteristiche cambiano in maniera considerevole, a seconda di come vengono svolti i test ma anche del metodo usato per produrre i provini.

Ci sono invece alcuni materiali dalle migliori caratteristiche meccaniche, come il titanio, che hanno già subito notevoli test in ambito *Additive Manufacturing* con risultati a dir poco eclatanti.

CASO DI STUDIO

Meno di un anno fa il colosso inglese del *Rapid Prototyping*\Additive Manufacturing “Renishaw plc” ha presentato un innovativo progetto di telaio per mountainbike interamente realizzato per additive manufacturing con le macchine da loro prodotte realizzato completamente in titanio.

Analizziamo il telaio di partenza:



Fig. 1.21: telaio di partenza in alluminio saldato

Costruito in lega di alluminio 6082 T6 saldato a mano presenta il classico schema di sospensione monopivot con forcellone oscillante realizzato in elementi fusi e saldati. Si possono notare inoltre i generosi scarichi di materiale ricavati a CNC nella zona del canotto di sterzo per alleggerire la struttura e anche le possenti saldature. In questa configurazione il telaio nudo (senza ammortizzatore) ha un peso di 2100 g. Tramite l’ottimizzazione topologica del progetto permessa dalla costruzione layer su layer è stato possibile costruire un telaio in lega di titanio del peso di solo 1400 g, con un

risparmio in termini di peso del 33%. Nessun altro telaio sul mercato ha un peso comparabile. Tutto questo è stato possibile grazie ad una serie di vantaggi applicabili a questo caso pratico come:

- iterazioni rapide; flessibilità nell'apportare migliorie alla progettazione fino al momento della produzione
- capacità di realizzare forme risultanti da ottimizzazioni topologiche
- massima personalizzazione e adattabilità, per lavorare singoli prodotti su misura con la stessa semplicità delle produzioni in lotti

I principali vantaggi costruttivi si possono riassumere in una grande facilità nella costruzione di strutture cave, di forme complesse con opportuni rinforzi e nella facilità con cui si possono eseguire personalizzazioni o finiture di precisione.

La lega di titanio utilizzata ha una densità di oltre il 99,7% con un carico di rottura di oltre 900 MPa.

Per quanto riguarda invece l'ottimizzazione topologica (dalla parola greca "*tópos*" che indica il luogo) il software utilizzato per determinare la collocazione ideale del materiale, fa uso di passi iterativi e analisi degli elementi finiti. Il materiale è rimosso virtualmente dai punti sottoposti a tensioni minori fino a sviluppare un design ottimizzato per reggere il carico. Il risultato è un modello leggero (grazie al volume ridotto) e al contempo resistente. La sfida storica nella produzione di queste forme molto complesse ora può essere superata dalla produzione additiva che permette di realizzare modelli fisici in 3D.

Ecco il telaio in titanio ottenuto per additive manufacturing:



Fig. 1.22: telaio costruito tramite Additive Manufacturing

Il telaio è stato scomposto in varie macroaree realizzate dalla Renishaw unite poi tramite un sistema di incastri ed adesivi che sono stati sviluppati con la collaborazione dell'azienda tedesca 3M.

Un altro aspetto da non sottovalutare di questa tecnologia è costituito dal minore investimento che una piccola azienda dovrebbe sostenere per comprare macchine di questo tipo, le quali offrono oltretutto un'efficienza energetica e ambientale di gran lunga superiore alle tradizionali tecnologie.

Capitolo 2

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEI MATERIALI

In questo capitolo si vogliono riportare le caratteristiche salienti dei materiali utilizzati in ambito meccanico “classico” (leghe ferrose, leghe leggere), in modo da caratterizzarli ed estendere successivamente quanto visto ai polimeri ortotropi (in particolare l’ABS) che saranno oggetto approfondito di questo studio.

IL COMPORTAMENTO STATICO DEI MATERIALI

La sollecitazione statica dei materiali prevede l’applicazione di un carico costante per una sola volta. Questa può avvenire in campo elastico, ovvero al di sotto della tensione di snervamento del materiale, oppure in campo plastico, cioè nell’intervallo di tensioni tra quella di snervamento e quella di rottura.

In generale una *tensione* è il rapporto tra una forza (derivante dal carico applicato) ed una superficie, considerando grandezze infinitesime:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Se invece parliamo in via generica, per un sistema continuo:

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

Dunque la tensione σ si misura in $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$ ovvero in MPa (MegaPascal).

La tensione quindi è un parametro utile per misurare l'entità delle azioni interne (sforzo normale, di trazione o compressione, o taglio) che agiscono sul materiale. In generale le tensioni si distinguono in due tipi:

- **TENSIONE NORMALE**

Questa agisce in maniera perpendicolare alla superficie dell'elemento materiale e viene indicata con la lettera σ accompagnata da un pedice che ne indica l'orientamento in direzione di uno degli assi x , y , z ; su ciascuna faccia dell'elemento agisce una sola tensione normale, che può essere costante o variare punto per punto, come nel caso della flessione. Vigge infine una convenzione per cui, le tensioni normali, che producono trazione nella direzione in cui agiscono, vengono prese positive. Quelle invece che determinano compressione nella direzione di azione sono negative.

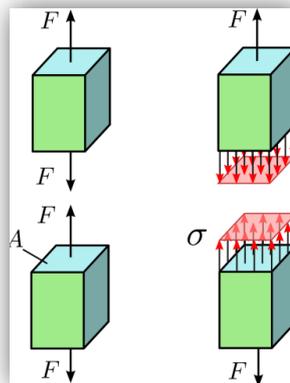


Fig. 2.1: esempio di tensione normale derivante da sforzo di trazione

- **TENSIONI TANGENZIALI**

In questo caso le tensioni agiscono parallelamente alla superficie dell'elemento materiale e si indicano con la lettera τ accompagnata da due pedici: il primo indica la direzione a cui è perpendicolare il piano su cui agiscono, il secondo indica la direzione di orientamento. Ad esempio τ_{yx} indica un tensione tangenziale giacente su un piano perpendicolare a y e diretta come x .

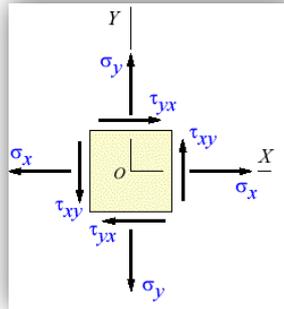


Fig. 2.2: distribuzione delle τ in una trave con sezione quadrata

LE DEFORMAZIONI

Ogni corpo soggetto ad una sollecitazione si deforma in proporzione all'intensità dello sforzo applicato, alla natura del materiale e ad altre condizioni fisiche. In generale una deformazione elastica è una deformazione che scompare al cessare della sollecitazione, altrimenti si ha una deformazione plastica o permanente. Vi sono poi materiali che hanno praticamente solo deformazione plastica e materiali che sono elastici fino ad un certo valore della sollecitazione, dopo il quale si ha plasticità fino alla rottura. In generale, le deformazioni si possono pensare come accorciamenti, allungamenti o scorrimenti.

$$\text{Deformazione} = \frac{\text{variazione di lunghezza}}{\text{lunghezza iniziale provino}} = \frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon$$

Dato che, come si può vedere, le deformazioni sono rapporti tra lunghezze, queste sono adimensionali, ovvero numeri puri. Di solito si usa un pedice indicante la direzione in cui ha luogo la deformazione.

Per convenzione le deformazioni sono positive quando si riferiscono ad un allungamento, negative quando si riferiscono ad un accorciamento. Sono legate ovviamente alle tensioni normali.

PROVA DI TRAZIONE STATICA

La prova di trazione statica è una prova di caratterizzazione dei materiali che consiste nel sottoporre un provino di dimensioni standard (secondo le normative ASTM\ISO) di un materiale in esame ad un carico F monoassiale inizialmente nullo che viene incrementato fino ad un valore massimo che determina la rottura del materiale.

La prova di trazione serve a determinare diverse caratteristiche del materiale in esame, tra cui la *resistenza meccanica* (R_m), il *modulo di Young* o modulo di elasticità (E), il *carico unitario di snervamento* (Y_S , yield strength), *l'allungamento percentuale* ($A\%$, elongation), la *strizione percentuale* ($Z\%$, reduction of area) e la si usa soprattutto per materiali metallici e polimerici.

Il provino viene fissato tra due morsetti in posizione verticale (in modo tale che la forza di gravità non influisca sulla prova). I morsetti stringono il provino nella zona larga, detta zona di afferraggio. Una ganaschia comincia a spostarsi a velocità costante, impostata via software; successivamente comincia a nascere uno stato di sforzo nel materiale e si genera una forza crescente, opposta alla direzione della traversa (crosshead) della macchina. Si impone lo stop alla macchina quando il provino si rompe, oppure quando la traversa si è spostata di una distanza prefissata. Sulla macchina è presente una cella di carico che misura, istante per istante, la forza applicata al provino, sul quale inoltre possono essere applicati estensimetri o estensometri, che ne misurano l'allungamento.

Grazie a questi dispositivi si possono ottenere registrazioni periodiche dei valori di carico e allungamento relativo, attraverso cui si può pervenire ad un diagramma tensione-deformazione.

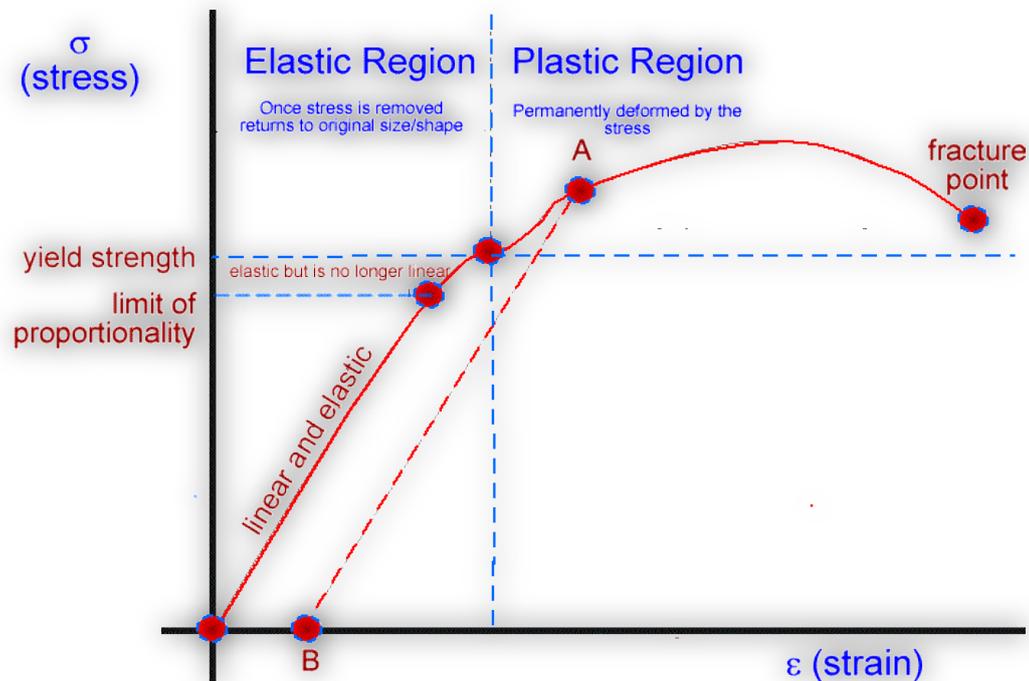


Fig. 2.3: diagramma tensione-deformazione

Notare che questi diagrammi sono ottenuti convenzionalmente dai corrispondenti grafici Carico-Allungamento rilevati nella prova, dividendo il carico applicato istante per istante per l'area della sezione trasversale iniziale del provino e dividendo la variazione di lunghezza della zona calibrata del provino per la sua lunghezza iniziale. Tutto ciò è lecito definendo una *tensione nominale*, ovvero il rapporto tra carico applicato P e area della sezione iniziale S_0 , senza tenere conto delle riduzioni

$$\sigma_n = \frac{P}{S_0}$$

Ovvero il rapporto tra carico applicato P e area della sezione iniziale S_0 del provino, senza tenere conto delle riduzioni che occorreranno durante la prova. Dato che per i materiali metallici in particolare vale il principio di *costanza del volume* durante la deformazione, allora si avrà che se la lunghezza del provino aumenta, la sua sezione dovrà diminuire. Nel tratto elastico, ovvero per piccole deformazioni, la diminuzione di sezione è trascurabile e coincide con la *tensione reale*, definita come:

$$\textit{tensione reale} = \frac{\textit{carico}}{\textit{sezione effettiva}} ;$$

quando ci spostiamo in ambito plastico e quindi le deformazioni cominciano a diventare ingenti, la forbice tra le due aumenta. Come si vedrà in seguito, questa affermazione è tanto più vera per quei materiali che presentano una forte *strizione* come gli acciai dolci.



Fig. 2.4: macchina per prove di trazione statica

Durante la prova, di solito, i materiali passano attraverso queste fasi:

- *comportamento elastico*: corrisponde alla prima fase di deformazione del materiale; le deformazioni che avvengono durante questa fase sono reversibili, per cui se in questa fase si riporta a zero il carico non si hanno deformazioni permanenti del provino, cioè viene ripristinata la sua lunghezza iniziale. In questa fase gli allungamenti sono direttamente proporzionali ai carichi (per cui nel diagramma sforzo-deformazione è rappresentata da un tratto rettilineo) e il rapporto è pari ad una costante che viene detta modulo di Young. In questo tratto è valida la legge di Hooke cioè $F = k\delta$ (k coefficiente elastico, delta allungamento), che applicata al caso specifico si traduce in $\sigma = E\varepsilon$, ovverosia tensione uguale al prodotto tra Modulo Elastico E e deformazione epsilon (ε).
- Continuando la prova di trazione, si ha un comportamento non più lineare: questa fase è detta di *snervamento* e corrisponde ad una caduta della resistenza del materiale dovuta alla formazione di microcricche all'interno dello stesso. Lo snervamento corrisponde alla parte iniziale del tratto plastico e si riscontra in corrispondenza dell'omonima tensione.
- *Comportamento plastico*: a questo punto le deformazioni diventano plastiche cioè permanenti; ciò significa che azzerando il carico durante questa fase si hanno deformazioni residue associate al contributo di deformazione plastica, per cui il provino avrà una lunghezza maggiore rispetto all'inizio della prova.

Continuando la prova, per una gran parte dei materiali di interesse ingegneristico, si assiste ad una diminuzione localizzata della sezione del provino: *la strizione*.

Questa caratterizza la parte discendente del diagramma sforzo-deformazione.

In questo caso, dato che l'area della corrispondente sezione è molto minore di quella iniziale, la tensione reale di rottura è notevolmente superiore a quella calcolata normalmente.

- Successivamente a ciò avviene la *rottura* del provino, che cede in corrispondenza della sua massima sollecitazione supportabile: il *carico di rottura*.

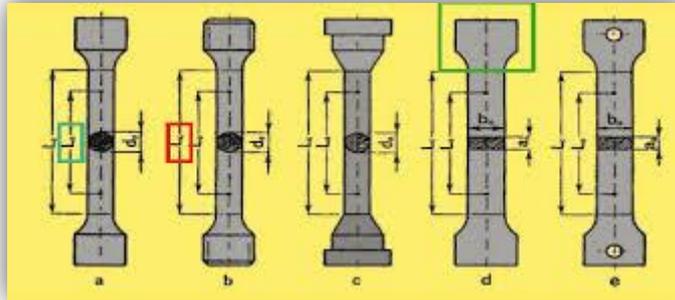


Fig. 2.5: varie tipologie di provini per prova di trazione statica

PROVA DI COMPRESSIONE STATICA



Fig. 2.6: macchina per la prova di compressione statica

Per molte leghe ferrose e metalliche in generale, il comportamento a compressione nella zona lineare-elastica è molto simile a quello a trazione, con ovviamente tensioni di segno opposto. In particolare, questo accade per i materiali che presentano un evidente strizione. Entrando però in campo plastico i due comportamenti tendono a discostarsi dato che, in questo caso, con l'avanzare della prova la sezione resistente aumenta invece che

diminuire. Dunque, genericamente parlando, il carico di rottura a compressione tende ad essere più elevato di quello a trazione. La criticità di questa prova è data dall'accorgimento che nella realtà è raro che si possa realizzare la compressione perfettamente centrata. Infatti gli errori esecutivi sono fattori che producono come risultato la presenza di un'eccentricità del carico e quindi l'insorgere di una sollecitazione di flessione che va a sommarsi allo sforzo normale la quale può "viziare" il risultato della prova. Per evitare ciò vanno usati particolari accorgimenti, come la valutazione del rapporto di snellezza del provino e il calcolo della lunghezza di inflessione media per evitare cedimenti da carico di punta con conseguente *buckling*.

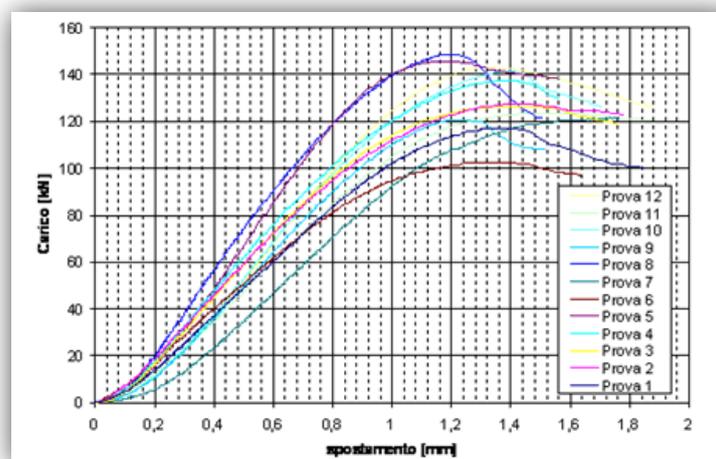


Fig. 2.7: grafico Carico-Spostamento di prova a compressione

MODELLI DI COMPORTAMENTO ELASTO-PLASTICO DEI MATERIALI

Si è riportato che, fino al limite di snervamento il legame lineare tra tensione e deformazione è descritto dalla Legge di Hooke. Quando questa cessa di valere, e quindi si entra nell'ambito plastico, è necessario trovare un metodo alternativo per descrivere il comportamento del materiale con l'avanzare della sollecitazione ad esso applicata.

Questo compito può essere adempito con prove sperimentali relative ad ogni materiale considerato, ma la complessità matematica delle equazioni derivanti da ciò e la scarsa praticità di questo metodo, lo rendono poco attuabile.

E' quindi necessario descrivere il comportamento elasto-plastico dei materiali con modelli semplificati, che approssimino la curva " $\sigma - \varepsilon$ " con relazioni semplici, queste sono chiamate equazioni costitutive del materiale. I modelli che possono essere adottati sono:

- ❖ Materiale perfettamente elasto-plastico
- ❖ Materiale rigido-plastico
- ❖ Materiale con incrudimento plastico lineare
- ❖ Materiale con incrudimento esponenziale
- ❖ Modello di Ramberg-Osgood

MATERIALE PERFETTAMENTE ELASTO-PLASTICO

E' questa la schematizzazione più semplice e più utilizzata per la quale, al di sotto della tensione di snervamento il comportamento è lineare elastico (legge di Hooke) e al di sopra della tensione di snervamento la tensione è costante e pari per l'appunto a quella di snervamento σ_{sn} fino a rottura. Nel modello elasto-plastico proposto si ammette inoltre che, come avviene per le deformazioni elastiche, le deformazioni plastiche siano istantanee, cioè siano assenti fenomeni viscosi di ritardo tra le deformazioni plastiche e le azioni che le hanno determinate.

Si noti che questa semplificazione trascura l'*effetto Bauschinger*, ovverosia il fenomeno di isteresi plasticizzante dei materiali duttili, che porta ad avere un incrudimento di tipo cinematico. Inoltre non ne limita la deformazione plastica. Per queste ragioni è adatto a materiali che hanno una zona plastica estesa, come gli acciai a basso tenore di carbonio non trattati termicamente.

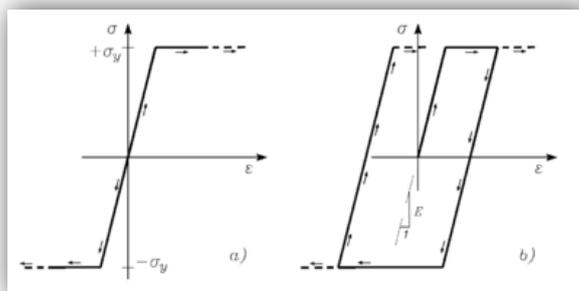


Fig. 2.8: modello di comportamento perfettamente elasto-plastico

MODELLO RIGIDO PLASTICO

Questo modello è utilizzato raramente, soprattutto per materiali che presentano deformazioni elastiche trascurabili, ma deformazioni plastiche molto elevate, quindi in questo caso, dato che si trascura la parte elastica, il modulo di Young sarà fissato pari a $E=\infty$, mentre la tensione sarà: $\sigma = \sigma_{sn}$.

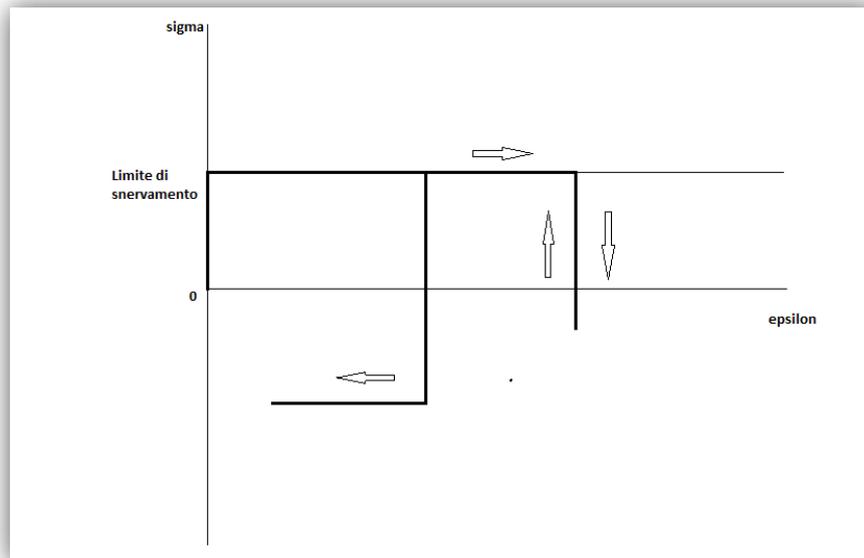


Fig. 2.9: modello con incrudimento plastico lineare

MODELLO CON INCRUDIMENTO PLASTICO LINEARE

In questo modello, come si evince dal nome, il tratto plastico oltre la σ_{sn} è descritto da una funzione lineare, simile al comportamento elastico, ma con pendenza inferiore. Dunque per $\sigma < \sigma_{sn}$ vale la legge di Hooke, mentre quando si supera questo limite, la proporzionalità tra tensione e deformazione può essere trovata con un'equazione lineare del tipo: $\sigma = B + E'\epsilon$, con il coefficiente B che si determina imponendo la condizione di continuità nel punto A di snervamento. E' è invece chiamato modulo di incrudimento, con valori compresi tra 0 e $E/10$. Se $E' = 0$ si ha il modello perfettamente elasto-plastico, per $E = \infty$ ed $E' = 0$ si ha il modello rigido-plastico. Questo modello è utile nello studio degli acciai bonificati.

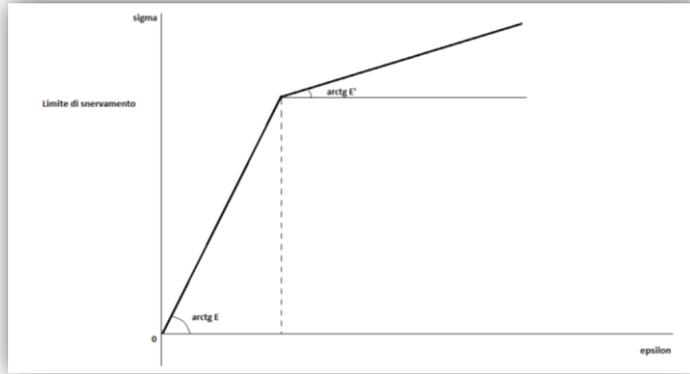


Fig. 2.10: modello di materiale con incrudimento plastico lineare

MODELLO CON INCRUDIMENTO ESPONENZIALE

L'unica differenza con lo schema precedente è che in questo caso l'incrudimento relativo alla zona plastica ha carattere esponenziale, infatti può essere descritto come:

$$\sigma = H' \varepsilon^{n_1}$$

Con H' coefficiente di resistenza e n_1 esponente di incrudimento alla deformazione.

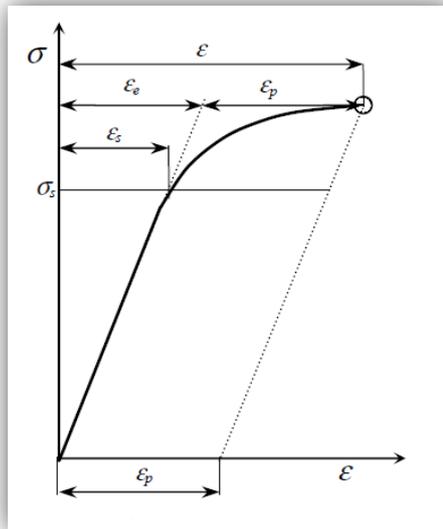


Fig. 2.11: modello con incrudimento esponenziale

MODELLO DI RAMBERG-OSGOOD

La relazione esistente tra tensioni e deformazioni in campo plastico può anche essere descritta dalla legge di Ramberg-Osgood, proposta nel 1943:

$$\sigma = H \varepsilon_p^n$$

Nella quale si ha:

- H = costante del materiale che coincide con σ per $\varepsilon_p^n=1$
- σ = è la tensione nella corrispondente direzione
- ε_p = è la deformazione plastica
- n = è l'esponente di incrudimento del materiale, tipicamente uguale a 0,02 o 0,03

esplicitando rispetto alla deformazione plastica:

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/n}$$

I risultati di questo modello e di quello a incrudimento esponenziale sono molto simili quando le deformazioni sono elevate e la componente plastica è predominante.

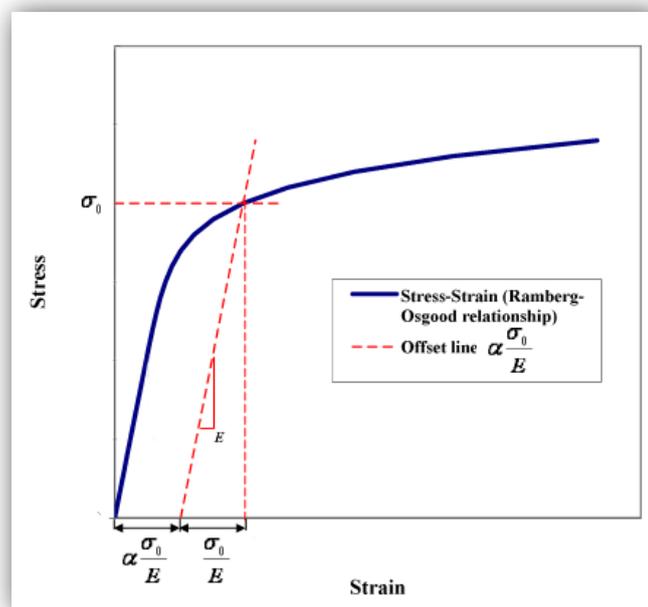


Fig. 2.12: modello di Ramberg-Osgood

Verranno ora introdotte alcune caratteristiche che servono a distinguere in maniera qualitativa il comportamento sia dei materiali metallici che di quelli polimerici:

Tenacità: si definisce tenace un materiale che è in grado di assorbire un elevato quantitativo di energia di deformazione (sia in ambito elastico che plastico) prima di giungere a rottura.

In questo caso è sempre importante distinguere tra materiali in grado di assorbire molta energia elastica senza subire deformazioni permanenti e quelli in grado di assorbire essenzialmente energia plastica, con ingenti deformazioni irreversibili. Viene definita operativamente come l'area sottesa al grafico tensione\deformazione.

La scarsa tenacità di un materiale può quindi portare a rottura di tipo fragile.

Materiali molto tenaci sono ad esempio gli acciai a basso tenore di carbonio o le leghe di alluminio.

Fragilità: peculiarità di quei materiali che riescono ad assorbire solo una piccola parte di energia di deformazione prima di rompersi, di conseguenza sono in genere fragili quei materiali che non sono in grado di deformarsi plasticamente.

Ne consegue che la rottura avviene in campo totalmente elastico, comportando notevoli rischi a livello ingegneristico e progettuale dato che il materiale cede senza "preavviso".

Un lampante esempio di materiale fragile è il vetro.

Duttilità: è la capacità di un materiale di deformarsi plasticamente sotto sforzo prima di giungere a rottura, perciò a volte viene indicata anche come la capacità del materiale di essere filato. I metalli costituiscono la categoria di materiali a migliore duttilità, tra i più duttili si annoverano: oro, ferro rame e alluminio.

Malleabilità: proprietà tecnologica che indica la capacità di un materiale di essere facilmente deformabile e riducibile in strati laminiformi

sottili, cioè la capacità di essere sottoposto a laminazione senza affliggerne le proprietà meccaniche.

Il metallo più malleabile è l'oro, seguito dall'alluminio.

Resilienza: è la capacità di un materiale di assorbire energia di deformazione elastica, essa è inversamente proporzionale al modulo di Young E.

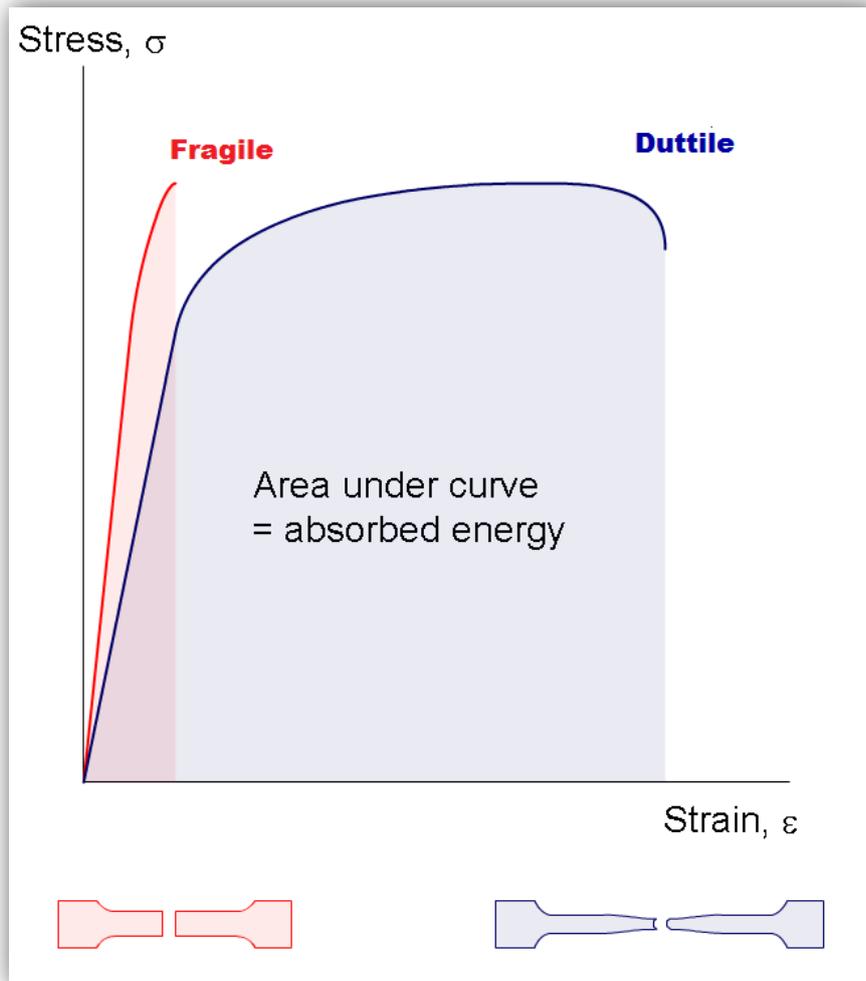


Fig. 2.13: confronto fra rottura fragile e duttile

L'ORTOTROPIA DEI MATERIALI

Dopo aver elencato i principali elementi che entrano in gioco durante la caratterizzazione dei materiali ed averne in parte suddiviso il comportamento in modelli, risulta ora utile descriverne una peculiarità fisica che affligge in maniera assai rilevante qualsiasi tipo di materiale considerato, ovvero l'*omogeneità* o *eterogeneità* fisica. Possiamo infatti suddividere i materiali in tre macro famiglie:

- *Materiali isotropi*: materiali le cui caratteristiche fisiche e meccaniche sono indipendenti dalla direzione in cui le si considera.
- *Materiali anisotropi*: al contrario di quelli precedenti, possiedono caratteristiche fisiche o meccaniche che dipendono dalla direzione in cui le si considera.
- *Materiali ortotropi*: sono materiali che hanno tre duplici assi rotazionali di simmetria e pertanto le proprietà del materiale sono differenti lungo ogni asse.

Focalizzandoci sull'ortotropia, si può dire che un materiale può essere sia ortotropo che eterogeneo, infatti può avere proprietà ortotrope che variano da punto a punto all'interno di un suo volume. Questo suggerisce in definitiva che l'ortotropia è una proprietà puntuale dell'oggetto considerato e non del particolare preso come un insieme.

Un esempio di materiale ortotropo è il legno dove si possono definire tre assi ortogonali dove le proprietà meccaniche sono differenti: la direzione longitudinale, quella radiale e quella circonferenziale. Se considero un sistema di coordinate polari invece che cartesiano allora si parla di *ortotropia polare*.

Un altro esempio di materiale ortotropo può essere considerato un metallo laminato a formare un foglio, in questo caso le proprietà nella direzione di laminatura saranno differenti da quelle nelle altre due direzioni per la struttura anisotropa che si forma durante la lavorazione.

Esistono poi, all'interno della famiglia dei materiali ortotropi quelli trasversalmente isotropi, ovvero con infiniti piani di simmetria attorno ad uno degli assi materiali. Con riferimento alle costanti ingegneristiche del materiale ortotropo, l'isotropia trasversale implica l'equivalenza delle proprietà nelle due direzioni principali del materiale, perpendicolari alla direzione di rinforzo per materiali compositi, y e z.

Il legame costitutivo ortotropo presenta lo stesso tipo di relazioni tra sforzo e deformazione del legame anisotropo e lo si può rappresentare considerando che la matrice di cedevolezza è identica per entrambi i casi.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

Fig. 2.14: matrice di cedevolezza per materiali ortotropi

Dunque la differenza con i materiali isotropi, consiste unicamente nelle diverse proprietà riscontrabili nelle differenti direzioni.

I piani di simmetria presenti nei materiali ortotropi consentono di definire un sistema di assi riferimento perpendicolari ai piani di simmetria stessi, che sono definiti *direzioni principali* del materiale o *assi materiale* o *assi lamina*.

Nonostante quanto detto, la legge costitutiva ortotropa prevede un ben determinato comportamento in prove uniassiali caratterizzate dall'applicazione di una sola componente di sforzo non nulla al materiale. Tuttavia per la definizione stessa di ortotropia si avrà che se si considerano i coefficienti di Poisson, ovvero gli opposti dei rapporti fra la deformazione nella direzione di applicazione del carico e le contrazioni trasversali, questi saranno tutti diversi tra loro, cosa che non accade per un materiale isotropo.

Dunque, perché i polimeri e quindi l'ABS sono ortotropi? La risposta è ovviamente da ricercarsi nella struttura del materiale stesso, il quale presenta legami molto resistenti in una certa direzione (quella della catena principale) e invece legami molto più blandi per i gruppi laterali (con resistenza di alcuni ordini di grandezza inferiore). Oltretutto, anche la percentuale di polimerizzazione contribuisce a rendere le caratteristiche del materiale più o meno costanti lungo i 3 assi ed allo stesso modo un ruolo importante giocano anche il grado di impacchettamento e di ramificazione delle catene polimeriche.

Capitolo3

I POLIMERI

Polimero è una parola che deriva dal greco “poli-meròs” e indica un insieme di macromolecole, cioè molecole dall’elevato peso molecolare. Queste costituiscono una famiglia eterogenea composta da elementi con un gran numero di gruppi molecolari (*monomeri*) uguali (*omopolimeri*) oppure diversi (*copolimeri*), uniti dalla ripetizione dello stesso legame covalente. Oltre a ciò è possibile miscelare polimeri e copolimeri diversi per ottenere leghe polimeriche dette *blends*.

Pronunciando “polimero”, la prima cosa che viene in mente sono i prodotti sintetici ricavati dalla raffinazione del petrolio come: materie plastiche, gomme sintetiche e fibre tessili. In realtà ce ne sono molti altri, infatti anche le molecole che compongono i sistemi viventi come proteine, acidi nucleici e polisaccaridi sono polimeri. Nell’ambito industriale i materiali polimerici sono tutti basati sull’atomo di carbonio, che presenta 4 elettroni nel guscio esterno e una spiccata propensione a formare legami covalenti. Il carbonio può cristallizzare in due distinte forme:

- Cubica a facce centrate, tipica del diamante
- Esagonale compatta, tipica della grafite

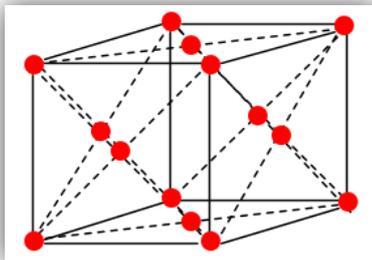


Fig. 3.1: struttura Cubica Facce Centrate

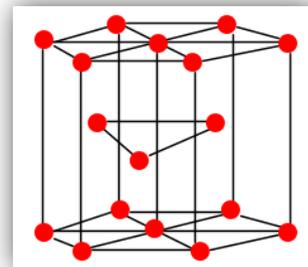


Fig. 3.2: struttura Esagonale Compatta

Dunque, come detto in precedenza, i polimeri sono realizzati da catene più o meno lunghe con un numero variabile di monomeri che spazia da alcune unità a parecchie migliaia. Le catene possono avere un grado più o meno elevato di allineamento oppure essere intrecciate e, a seconda della configurazione, cambiano sia il comportamento meccanico

che la densità. Il processo di formazione di un polimero è detto *polimerizzazione* o *reticolazione* e prevede la formazione dei vari legami tra i monomeri, questi si dividono in due categorie: covalenti, tra i vari atomi di carbonio e di Van der Waals tra le catene che si ripiegano su se stesse. I primi sono detti “legami forti”, mentre i secondi sono “legami deboli”, facili da rompere.

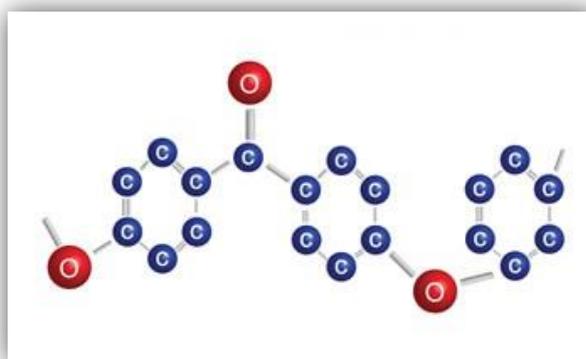


Fig. 3.3: struttura semicristallina del polietereetereterechetone PEEK

Due parametri molto importanti per la comprensione delle caratteristiche di questi materiali sono il *grado di polimerizzazione*, cioè il numero di monomeri che formano una catena e il *Peso Molecolare* (PM), cioè la somma dei pesi atomici di tutti gli atomi di cui la molecola polimerica è costituita. Questi sono pertanto indici della lunghezza e in generale delle dimensioni della catena polimerica.

Le catene che origineranno la macromolecola possono essere arrangiate in vari modi :

- *Struttura lineare*: una lunga catena priva di ramificazioni, come accade per gli acrilici, le poliammidi, i polietileni e il cloruro di polivinile e in generale per i polimeri termoplastici. In questo caso infatti l'unità ripetitiva può formare due soli legami.

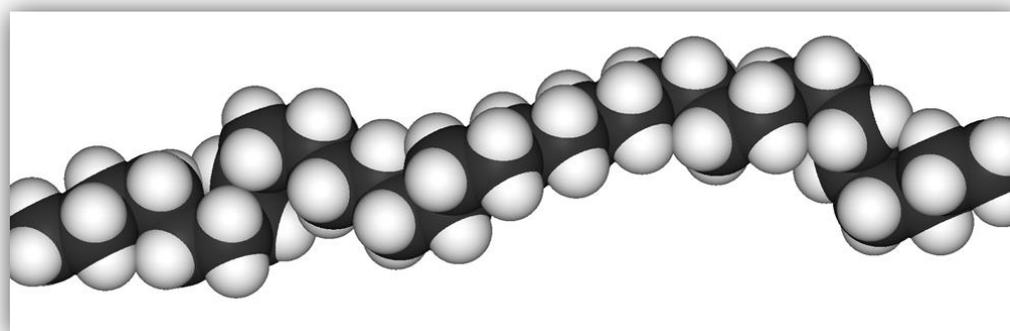


Fig. 3.4: struttura lineare di polietilene ad alta densità (HDPE)

- *Struttura ramificata*: dalla catena centrale si dipartono alcuni gruppi laterali, come accade per il polietilene a bassa densità, che ha questa caratteristica proprio perché a causa delle ramificazioni, le varie catene non riescono a ripiegarsi su se stesse generando un calo di massa per unità di volume. In questo caso, sono dunque presenti unità costitutive in grado di formare 3 o più legami, ma le molecole restano distinte le une dalle altre.

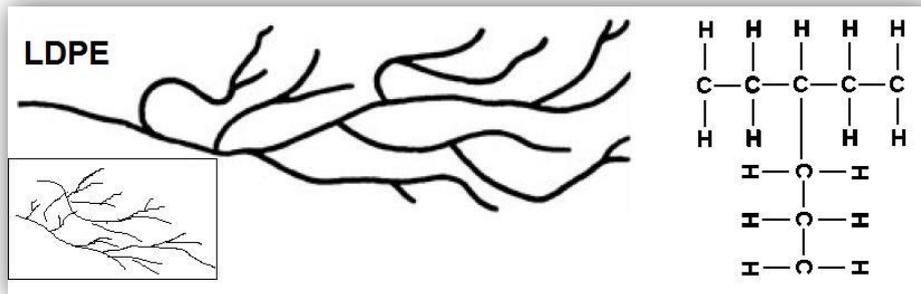


Fig. 3.5: struttura ramificata di polietilene a bassa densità (LDPE)

- *Struttura reticolata*: tipica dei polimeri termoindurenti come le resine epossidiche e gli elastomeri, viene in quest'ultimo caso ottenuta con il processo di vulcanizzazione. Se la reticolazione diviene molto elevata possono avere luogo *strutture a rete* vere e proprie, in cui non si riescono più a distinguere le diverse catene polimeriche.

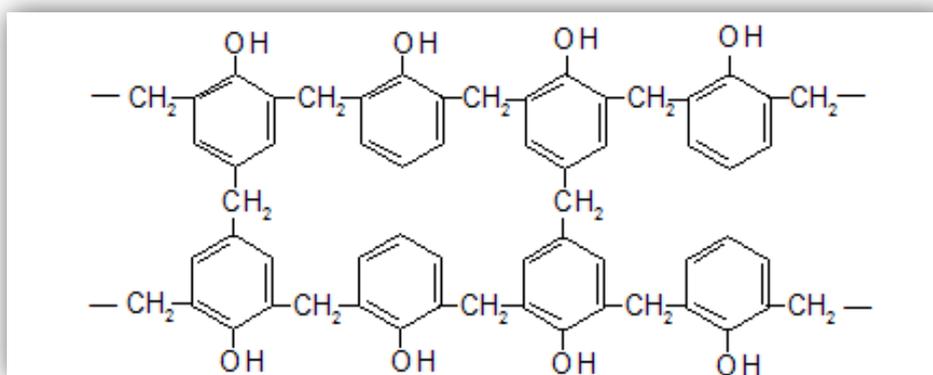


Fig. 3.6: struttura reticolata della Bachelite

Alla luce di ciò, si può comprendere quante possibili combinazioni di polimeri esistano data la disponibilità di molte tipologie diverse di monomeri e polimeri con caratteristiche

proprie. Questi presentano caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche molto diversificate e generalmente molto diverse da quelle presentate dai materiali ceramici o metallici. Sono infatti caratterizzati da valori di resistenza, rigidezza meccanica, resistenza a creep e stabilità dimensionale molto inferiori rispetto a quelli di altre classi di materiali strutturali ma le loro doti di leggerezza, deformabilità, tenacità ed economicità li rendono materiali preziosi e insostituibili in molte applicazioni.

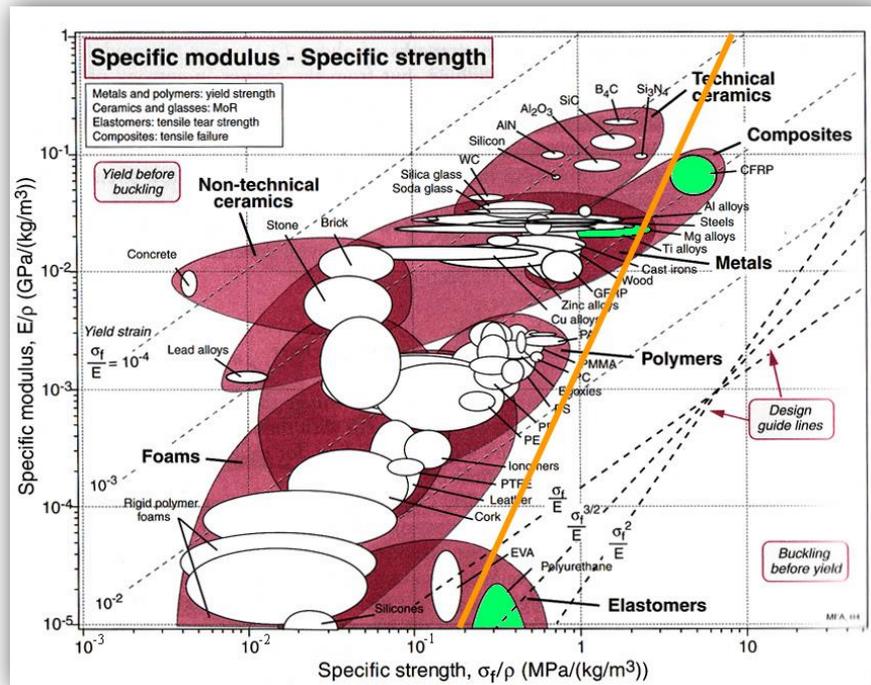


Fig. 3.7: diagramma di Ashby Resistenza Specifica/Modulo Specifico dei vari materiali tra cui i polimeri

Con riferimento alle proprietà derivanti dalla conformazione strutturale delle molecole e dal loro comportamento nei confronti di variazioni termiche possiamo distinguere i materiali plastici in:

- **TERMOPLASTICI:** dopo l'indurimento seguito alla polimerizzazione presentano una diminuzione di viscosità all'aumentare della temperatura fino a giungere allo stato fluido per temperature prossime a quella di fusione ma tutto ciò accade in modo reversibile. Questo permette di riciclare il polimero all'occorrenza. Possono avere struttura lineare o ramificata.

- **TERMOINDURENTI:** si presentano in forma liquida prima della polimerizzazione, ma una volta che questa è avvenuta non possono essere riportati allo stato fluido. Infatti se riscaldati sopra certe temperature il materiale va incontro ad un degrado irreversibile. In questo caso la struttura è sempre reticolata.<
- **ELASTOMERI:** possono essere sia termoplastici che termoindurenti e hanno la capacità di assorbire grosse deformazioni elastiche ritornando poi alle dimensioni iniziali.
- Un'ultima classificazione è legata alla regolarità strutturale e divide i polimeri in *amorfi* e *semicristallini*.

Gli amorfi hanno una struttura complessa che non consente alcuna aggregazione cristallina e risulta presente un'unica fase amorfa, costituita da molecole casualmente aggrovigliate, che non rispettano alcuna regolarità spaziale, se non quella imposta da angoli e distanze di legame. Se in condizioni di bassa temperatura le molecole risultano “congelate” in uno stato vetroso, con possibilità di movimento e riconformazione estremamente ridotta, al di sopra della *temperatura di transizione vetrosa* T_g , l'aumento di distanza tra le molecole e la possibilità di rotazione dei legami permette un certo grado di riconfigurazione.

In corrispondenza della T_g si ha una rapida variazione di tutte le proprietà fisiche e meccaniche: il polimero ha un crollo della sua rigidità subendo un rammollimento tale da consentirne la lavorabilità, a patto che non vi sia stata una precedente reticolazione. Alcuni materiali amorfi sono ad esempio il Polivinilcloruro (PVC), il Polimetilmetacrilato (PMMA, ovvero il plexiglass), il policarbonato (PC) e il polistirene (PS).

Nei semicristallini la struttura molecolare è relativamente ordinata, e consente alle diverse catene di assemblarsi in modo regolare secondo una conformazione cristallina, non diversa da quanto avviene per materiali ceramici e metallici. La fase cristallina rappresenta però solo una frazione del totale e quindi tra le regioni cristalline saranno sempre presenti molecole, o gruppi di molecole, aggregati in una fase amorfa. Questi polimeri quindi sono caratterizzati sia da una fase amorfa, a cui corrisponde una temperatura di transizione vetrosa, che da una fase cristallina.

La presenza di una struttura ordinata, cioè cristallina, limita fortemente la possibilità di riconformazione e la mobilità delle molecole ma conferisce in generale rigidezza, resistenza, stabilità dimensionale, ridotta permeabilità a gas e liquidi e stabilità termica.

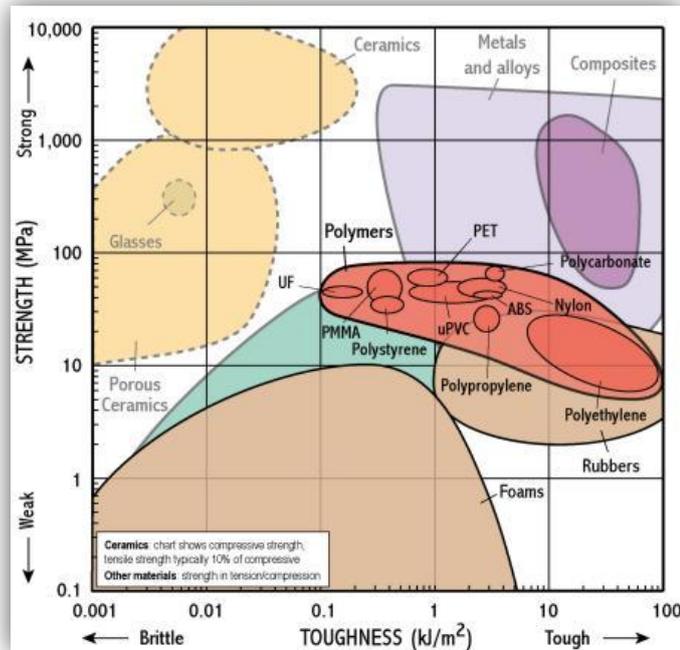


Fig. 3.8: diagramma di Ashby con tenacità in ascissa e tensione sopportabile in ordinata

La fase cristallina è caratterizzata da una propria temperatura di fusione, detta T_m , al di sopra della quale lo scorrimento tra le molecole è possibile e il polimero diventa un fluido viscoso. Dunque, volendo lavorare uno di questi materiali allo stato fuso, dobbiamo superare T_m . Polimeri semicristallini sono per esempio il Polietilene (PE), le poliammidi (NYLON), il polietilene tereftalato (PET) e il polietereeterechetone (PEEK).

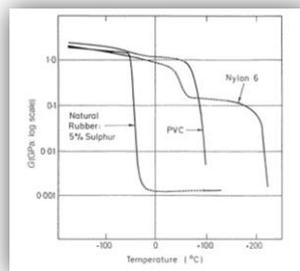


Fig. 3.9: andamento del modulo elastico in funzione della temperatura per alcuni polimeri.

LE REAZIONI DI FORMAZIONE DEI POLIMERI

La formazione dei polimeri può avvenire per sintesi a partire da monomeri oppure per modifica di polimeri pre-esistenti secondo reazioni e meccanismi molto diversi. Alcuni tra i polimeri più comuni come il polietilene, il polipropilene, il PVC, il polistirene vengono sintetizzati mediante reazione di *poliaddizione*. In questo caso i monomeri di partenza sono caratterizzati dalla presenza di doppi legami, detti insaturi, tra gli atomi di carbonio; la rottura di uno dei due legami rende disponibile *radicali liberi* (cioè elettroni) per formare legami con altri monomeri che genereranno poi il polimero, sovente in presenza di un catalizzatore il quale serve ad accelerare le reazioni tra le molecole. Dato che ciascun monomero è bifunzionale, cioè può formare solamente altri due legami con i monomeri, il polimero che si forma risulta lineare.

L'avvio della reazione richiede l'utilizzo di iniziatori capaci di generare facilmente radicali liberi reattivi e una volta che questa è partita, procede rapidamente per addizione di monomeri a ciascun terminale della catena fino a che le molecole disponibili per la reazione si sono esaurite.

Una diversa reazione chiamata *policondensazione* produce polimeri come il PET, i diversi tipi di nylon, i polimeri poliuretanic, il policarbonato. In questo caso sono richiesti almeno due tipi di monomeri reattivi e produce piccole molecole come reazione di sottoprodotto.

Durante la reazione i monomeri possono interagire tra loro, generando nuove catene, oppure condensare su catene già formate, allungandole.

Anche in questo caso la reazione di polimerizzazione termina con l'esaurimento dei monomeri disponibili.

Oltre che per formazione e propagazione di radicali (*polimerizzazione radicalica*), reazioni di polimerizzazione possono avvenire con meccanismi che coinvolgono la formazione di ioni (*polimerizzazione ionica*); anche in questo caso i polimeri sono prodotti a lunga catena. Se nelle regioni di addizione o condensazione sono presenti monomeri con funzionalità superiore a due, si arriva alla formazione di strutture molecolari non lineari, ramificate o reticolate, che quindi presentano caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche profondamente diverse.

Strutture ramificate possono anche essere generate dall'unione di molecole preformate in punti di ramificazione o reticolazione (*crosslinks*).

Una volta avvenuta la reazione ed ottenuto il polimero, questo può essere affetto da degrado in conseguenza dell'esposizione ad alcuni agenti naturali come elevate temperature, alle quali nessun polimero può resistere (oltre i 500 °C), raggi UV e la presenza di un ambiente ricco di ossigeno. Tutto ciò provoca normalmente la rottura delle catene polimeriche, riduzione del peso molecolare, trasudazioni, riduzione di resistenza e deformabilità. Si possono inoltre avere delle polimerizzazioni incontrollate che portano all'infragilimento del polimero. Basti solo pensare a quando si espone un elastomero al sole per lungo tempo, il calore fa progredire la reazione di polimerizzazione e quindi diminuisce la capacità elastica del materiale, a causa dei maggiori legami forti che si creano.

RELAZIONI TRA STRUTTURA MOLECOLARE E COMPORTAMENTO MACROSCOPICO

Nei polimeri termoplastici, lineari o ramificati, a temperatura sufficientemente alta, l'elevata possibilità di rotazione dei legami nella catena e la conseguente riconfigurazione permettono alle diverse molecole di scorrere tra loro. Tutto ciò si ottiene dunque superando la T_g nei materiali amorfi mentre nei semicristallini bisogna eccedere la T_m . La lunghezza delle catene polimeriche rende la viscosità del liquido molto elevata, tanto più elevato è il peso molecolare.

Negli *amorfi*, quando la temperatura approssima T_g , la viscosità è molto elevata e l'applicazione di un carico comporta sia la variazione della conformazione che lo scorrimento delle molecole.

Togliendo la sollecitazione, le catene polimeriche possono tornare alla configurazione originale raggomitolata con recupero elastico di parte della deformazione, mentre lo scorrimento comporta una deformazione viscosa irreversibile, dunque il materiale ha un comportamento viscoelastico.

Nei polimeri a più alto peso molecolare, la resistenza allo scorrimento viscoso e la presenza di una forte componente elastica permettono elevate estensioni, spesso reversibili, in un range che va anche oltre la T_g : in questo caso si parla di

comportamento elastomerico. Importanti sono anche il tempo e la velocità di deformazione: più sono lente e mantenute nel tempo più sarà difficile il recupero elastico. Se si raffredda il polimero fluido sotto la temperatura di transizione vetrosa ottengo il “congelamento” delle catene con conseguente aumento del modulo elastico, della fragilità ma con la riduzione delle possibilità di scorrimento viscoso.

Nei polimeri *semicristallini*, la cristallizzazione avviene a seguito del ripiegamento delle molecole su se stesse e si generano arrangiamenti composti da lamelle che possono contenere anche centinaia di atomi. Insieme di lamelle formano i cosiddetti *sferuliti* le cui dimensioni sono influenzate dalla velocità e dalle condizioni di raffreddamento. Sia tra le lamelle che tra gli sferuliti è rilevabile la presenza di molecole amorfiche. Ciò è dovuto al fatto che nessun polimero semicristallino riesce a cristallizzare completamente, ma può raggiungere percentuali del 95-97%.

La possibilità di cristallizzazione è favorita da un lento raffreddamento in prossimità della T_m o il mantenimento ad una temperatura di poco inferiore a questa per un certo lasso di tempo.

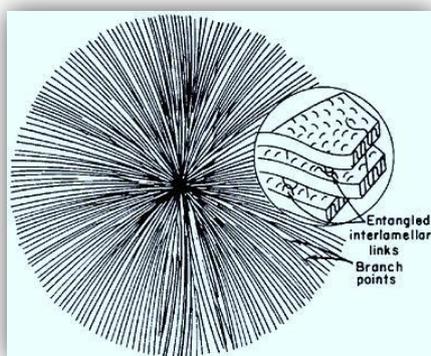


Fig. 3.10: arrangiamento delle lamelle in uno sferulite

La presenza di una fase cristallina rigida, stabile fino alla T_m , riduce la possibilità di scorrimento viscoso e aumenta elasticità e rigidità, soprattutto al di sopra della transizione vetrosa.

Per quanto riguarda l'andamento del modulo elastico di polimeri termoplastici amorfici e semicristallini in funzione della temperatura, per i primi il superamento della T_g comporta una drastica riduzione di E , che varia da qualche GPa a pochi MPa. Per i secondi invece, il modulo elastico risulta elevato anche al di sopra della T_g tanto è

maggiore la frazione cristallina e solo al raggiungimento di T_m avviene il completo rammollimento del materiale.

I fattori predominanti a livello strutturale per le proprietà dei polimeri sono raggruppabili in tre categorie:

- *Lunghezza delle catene polimeriche*: genericamente, più sono lunghe più la resistenza meccanica è elevata, come l'allungamento a rottura e la resistenza a creep, data la maggiore difficoltà di scorrimento.
- *Tipo di legami nella catena*: il tipo di unità monomeriche presenti influenza il legame tra le catene e la capacità delle molecole di ruotare, riconformarsi o scorrere a seguito di una sollecitazione.
- *Interazioni tra molecole*: atomi o gruppi laterali voluminosi (ad es. anello benzenico) rendono più difficili i moti di riconformazione delle catene, aumentandone la resistenza, la rigidità e le temperature caratteristiche (T_g , T_m). L'aggiunta di particolari molecole come il cloro (Cl) introduce legami idrogeno intermolecolari che rendono propenso la molecola ad assumere forma amorfa.

Dato che l'ABS (acrilonitrile butadiene stirene) fa parte delle categoria dei polimeri *termoplastici* verranno ora trattate le principali caratteristiche di questi materiali.

PROPRIETA' DEI MATERIALI POLIMERICI TERMPLASTICI

I materiali polimerici termoindurenti, come detto, possono avere struttura lineare o ramificata e sono passibili di rammollimento una volta portati al di sopra della temperatura di transizione vetrosa T_g . Il loro comportamento è descritto da prove meccaniche simili a quelle usate ad esempio per i materiali metallici o ceramici, attraverso le quali definire parametri come il modulo elastico, il carico di rottura o quello di snervamento. Dato il materiale però, questo risulta influenzato da variazioni di condizioni ambientali estremamente limitate, come temperatura ed umidità, ma

anche, in ambito sperimentale, dalla velocità di applicazione del carico sul provino, infatti un polimero, che si presenta tenace se sottoposto ad una lenta deformazione, potrà risultare invece fragile quando sollecitato rapidamente.

Possiamo avere diversi tipi di comportamento, agli estremi abbiamo: materiali che si mantengono elastici fino alla rottura e cedono con deformazioni limitate oppure materiali che dopo un tratto elastico presentano una vasta zona plastica con snervamento. Questo corrisponde ad uno scorrimento e ad una orientazione delle catene molecolari con deformazione che avviene a volume costante a meno di fenomeni di cristallizzazione sotto carico.

In alcuni polimeri, che vengono impiegati sopra T_g , il tratto elastico può essere estremamente ridotto o addirittura assente e quindi anche piccole sollecitazioni determinano scorrimento plastico del polimero.

Nei polimeri termoplastici con comportamento duttile, specialmente semicristallini, lo snervamento è localizzato in un punto in cui la sezione si riduce (*strizione*) e in cui la deformazione è massima. Dato che in questo caso il ri-arrangiamento delle catene determina un aumento di resistenza locale per il quale la zona di strizione si estende progressivamente con il procedere dall'allungamento.

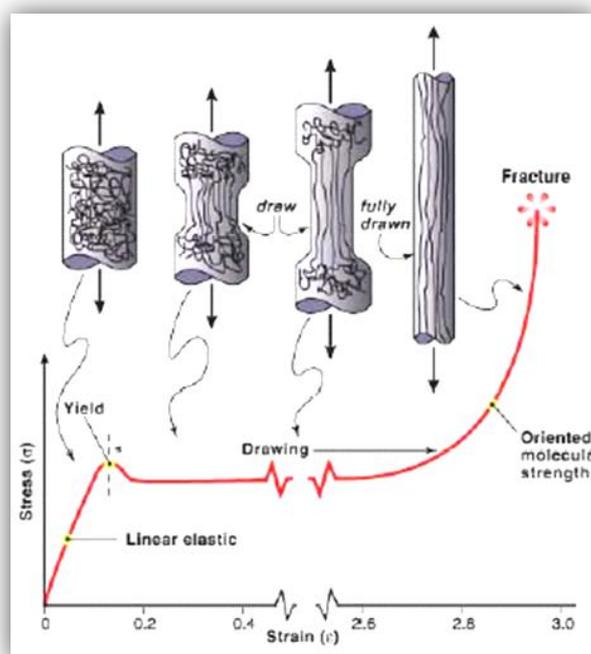


Fig. 3.11: avanzamento del fenomeno di strizione in un polimero termoplastico duttile

Ovviamente i valori caratteristici di E, tensione di snervamento e rottura dei polimeri sono generalmente di molto inferiori a quelli dei materiali metallici o ceramici così come sono diversi i meccanismi di deformazione che non sono legati né allo scorrimento dei piani cristallini né al movimento delle dislocazioni. Infatti le deformazioni plastiche e il cedimento sono connessi allo scorrimento tra le varie molecole o parti di esse.

La deformazione può quindi avvenire con due diverse modalità: lo *scorrimento a taglio* (shear yielding) e il *crazing*.

La prima permette elevate deformazioni plastiche e causa deformazioni della struttura con tempi di recupero molto lunghi che non possono considerarsi permanenti. Lo scorrimento è localizzato in una zona del materiale dove si vengono a formare bande di taglio con conseguente strizione.

Le bande di taglio possono anche estendersi in volume provocando un grosso assorbimento di energia di deformazione e tenacità.

Dal criterio generale di Von Mises viene derivato il limite di cedimento per deformazione plastica a taglio, il quale prende come indicatore il superamento di un determinato limite di energia di deformazione, oltre il quale il materiale cede:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} \geq \tau_0$$

σ indica gli sforzi principali, mentre τ_0 è lo sforzo di snervamento a taglio. Si può facilmente vedere che quando lo sforzo a primo membro (tensione ottaedrale) supera il secondo si è nella condizione di pericolo. Nel caso di materiali metallici cristallini gli sforzi normali ai piani di scorrimento a taglio non modificano più di tanto il criterio di resistenza ma ciò non è vero per i polimeri, dove si possono avere variazioni di densità e di distanza intermolecolare con effetti significativi sulla resistenza, dato che viene favorito lo scorrimento delle catene di monomeri. Il raggiungimento di una condizione critica avviene quando:

$$\tau_{oct} \geq \tau_0 - \mu\sigma_m$$

Con σ_m sforzo normale e μ coefficiente di attrito interno che dipende dal materiale come τ_0 . μ indica come la variazione di densità influenzi la mobilità molecolare. Notare che a scampo di variazioni di cristallinità la deformazione a taglio avviene a volume costante.

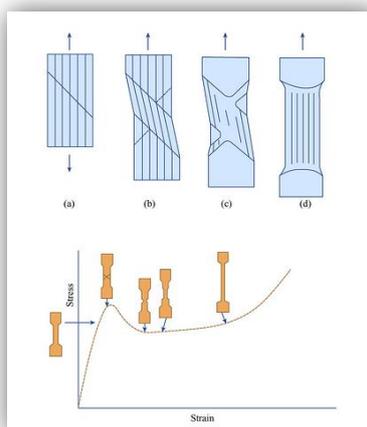


Fig. 3.12: evoluzione delle bande di taglio in un provino sottoposto a trazione

Molti materiali polimerici vetrosi hanno un meccanismo di cedimento che viene detto *crazing*. Questo termine deriva da *craze*, cioè “screpolatura” e viene associato a materiali di tipo fragile, con deformazione totale molto limitata.

Il *craze* è di per sé un fenomeno di deformazione plastica ma con connotati di forte localizzazione. A differenza di una vera cricca, nel *craze* le fibrille di polimero stirato e orientato collegano le facce di apertura, tali fibrille consentono di sostenere carichi anche di parecchi MPa ma tra di esse si trova dello spazio vuoto, dunque la formazione di *craze* è associata ad un aumento di volume.

Pochi *craze* possono dare origine ad una cricca, dunque il comportamento macroscopico del materiale risulta generalmente di tipo fragile, con deformazioni locali molto accentuate in proporzione a quelle globali.

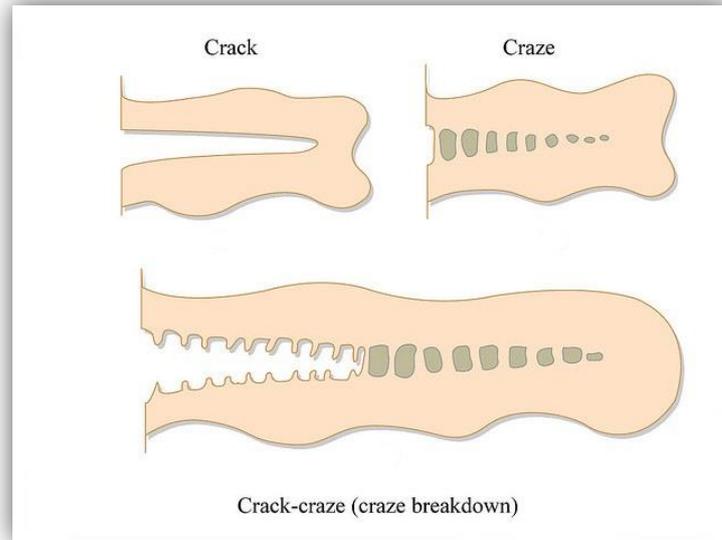


Fig. 3.13: confronto fra cricca e craze

L'equazione che descrive il cedimento nel caso di crazing è:

$$\sigma_b = |\sigma_1 - \sigma_2| \geq A(T) + \frac{B(T)}{I_1}$$

con $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ invariante primo, espresso come somma degli sforzi principali, A e B costanti del materiale dipendenti dalla temperatura.

Il modo in cui un polimero si deforma o si snerva dipendono dal bilancio di diversi fattori come:

- Energia di barriera: l'energia necessaria per mettere in moto le catene di polimeri
- La presenza di difetti localizzati: inclusioni, vuoti e microcricche generano stati tensionali caratteristici
- Ambiente molecolare

Esistono quindi materiali che hanno tendenza a formare shear yielding ed altri invece che tendono a cedere per colpa del crazing, le diverse situazioni di sforzo favoriscono l'uno o l'altro meccanismo.

Lo shear yielding non comportando deformazioni volumetriche è favorito da stati di sforzo uni o multi assiali, che però non inducono stati di trazione pluriassiali come la pressione idrostatica.

Il crazing invece comporta un aumento di volume, dato che si generano dei vuoti, dunque è favorito da stati di tensione pluriassiale come accade ad esempio all'apice di una cricca.

Il cedimento per taglio può avvenire anche per compressione invece la formazione di craze richiede necessariamente stati di trazione, infatti quest'ultimo è addirittura sfavorito dagli sforzi compressivi ma trova utili alleati nei solventi come oli lubrificanti o combustibili e nell'invecchiamento ambientale.

Ovviamente la trasformazione di uno o più craze in cricca determina la rottura del materiale in maniera fragile, ma nella realtà i meccanismi presentati possono coesistere e interagire tra loro, infatti la presenza di craze può attivare la formazione di bande di taglio, o viceversa con meccanismi di cedimento combinati che, permettendo maggiore assorbimento di energia di deformazione, migliorano tenacità e duttilità.

Pertanto si può sfruttare la formazione dei craze e la loro propagazione per migliorare la tenacità del polimero e ciò sta appunto alla base del processo di *tenacizzazione* dei polimeri fragili mediante l'aggiunta di gomme.

Anche bande di scorrimento diffuse possono essere attivate dalla presenza di particelle elastomeriche, sebbene il loro effetto sia solitamente simultaneo a quello del crazing. Polimeri che presentano la combinazione di questi due fenomeni sono l'ABS e il PVC.

CARATTERISTICHE FISICHE DEI POLIMERI

TERMOPLASTICI

I polimeri trovano spazio in molteplici applicazioni, ciò è suggerito dalle loro qualità chimico-fisiche, termiche, ottiche ed elettriche che dipendono sia dalla molecola in sé che dalla sua struttura morfologica. Questi sono caratterizzati da densità piuttosto basse, inferiori o poco superiori a quella dell'acqua. Nei polimeri semicristallini, la densità è un indice della cristallinità dato che la fase cristallina, più compatta, presenta densità superiore alla quella amorfa. Salvo alcune rare eccezioni, i polimeri sono cattivi

conduttori di elettricità e calore con coefficienti di conducibilità inferiori di alcuni ordini di grandezza rispetto ai metalli. Dove si richiede conducibilità elettrica vengono aggiunte cariche conduttive come grafite o particelle metalliche.

I polimeri amorfi allo stato naturale sono di solito trasparenti, oppure con leggere colorazioni, ma la presenza di fase cristallina rende il materiale traslucido oppure opaco a seconda del grado di cristallinità.

Bassa densità e ridotta cristallinità (a volte assente) spiegano l'elevata diffusività dei gas attraverso i polimeri. Infatti la diffusione di piccole molecole tra le catene polimeriche è resa possibile dall'elevata distanza intermolecolare e dalla fase amorfa che presenta sempre un certo grado di disordine. Quindi si ha che gas, solventi e umidità possono portare a rigonfiamenti, ossidazioni e degradazioni con crollo delle caratteristiche meccaniche e fisiche del polimero oltre che a problemi di stabilità dimensionale.

La quantità di elemento diffondente che può entrare e attraversare un setto polimerico dipende sia dalla sua velocità di diffusione e dalla sua solubilità nel polimero e viene espressa mediante il coefficiente di permeabilità P :

$$P = D \cdot S$$

Si esprime come prodotto tra solubilità S e diffusività D , che sono entrambe più elevate nella fase amorfa.

Dati i problemi sopra citati, raramente si utilizzano i polimeri allo stato puro, vengono quindi aggiunti additivi di diverso tipo per facilitare i processi prodotti e per migliorarne le caratteristiche meccaniche, chimiche e fisiche. Gli additivi comunemente impiegati sono *cariche* o riempitivi (filler), plasticizzanti, stabilizzanti, antiossidanti, coloranti e ritardanti di fiamma. Le cariche sono costituite da fibre corte o particelle di vetro, talco, nerofumo, sabbia, calcare, barite, farina di legno e altro. Lo scopo è quello di aumentare rigidità, resistenza all'usura, stabilità termica e dimensionale oltre che ridurre i costi.

L'inserimento di filler rigidi però, se da un lato aiuta a migliorare le doti di resistenza meccanica d'altro canto va a diminuire la tenacità e la lavorabilità del particolare. Gli stabilizzanti e gli antiossidanti hanno funzioni simili ma con effetti su scale e tempi diversi. I primi riducono la degradazione del materiale ad alta temperatura mentre i secondi rallentano la degradazione ambientale nel tempo riducendo l'effetto dei raggi

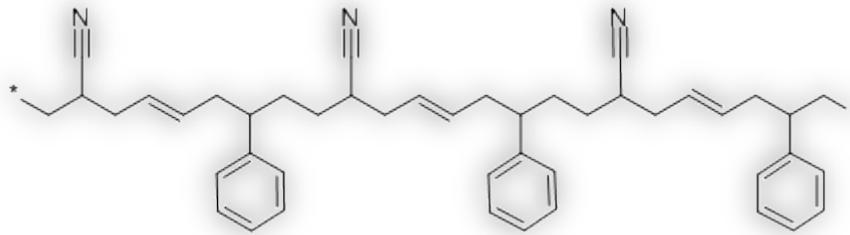


Fig. 3.15: struttura dell'ABS

Ogni singolo componente dell'ABS fornisce delle caratteristiche utili e peculiari al polimero. L'acrilonitrile incrementa la resistenza termica e la tenacità, il butadiene fornisce resistenza all'urto e il mantenimento delle proprietà a basso modulo, lo stirene favorisce lucentezza superficiale, rigidità e facilità di lavorazione.

La resistenza all'urto delle resine in ABS aumenta all'aumentare del contenuto percentuale di gomma che fa nel contempo diminuire la resistenza a trazione e la temperatura di distorsione al calore.

La struttura dell'ABS non è quella di un copolimero casuale, infatti può essere considerato come miscela di copolimero vetroso (stirene-acrilonitrile) e di uno gommoso come il butadiene. La migliore resistenza all'urto però non si ottiene dalla semplice miscelazione di questi monomeri ma innestando una matrice di copolimero acrilonitrile\stirene in un dominio gommoso di butadiene in modo da generare una struttura bifasica. Le proporzioni sono:

- Dal 15% al 35% circa di acrilonitrile
- Dal 5% al 30% circa di butadiene
- Dal 40% al 60% circa di stirene

Il range termico di utilizzo varia da -20°C a 80°C ed ovviamente le caratteristiche meccaniche variano in questo campo anche di quote considerevoli. Questo polimero non presenta particolari pericoli per gli esseri umani, ma durante il riscaldamento all'interno della stampante 3D si possono sprigionare fumi di acrilonitrile che è ritenuto essere cancerogeno.

Per quanto concerne i principali usi, con l'ABS si costruiscono tubi per edifici, repliche di armi da fuoco per soft air, giocattoli come il famosi mattoncini lego, piccolo arredo per la casa, pannelli isolanti, parti di auto e motoveicoli, macchine da ufficio e case per

computer. Di seguito si riportano le principali caratteristiche meccaniche dell'ABS plus e il tipo di prove con cui sono state ottenute, per layer di 0,125mm:

Proprietà meccanica	Metodo di test	Unità metriche
Resistenza a trazione	ASTM D638	36 MPa
Modulo elastico	ASTM D638	2,27 GPa
Allungamento a trazione	ASTM D638	4%

Come si può notare, le principali caratteristiche relative a proprietà di uso comune durante la progettazione strutturale sono determinate con la normativa ASTM D638. Questa normativa però si riferisce a provini ottenuti per formatura, fusi, ricavati da barra con operazioni di taglio oppure da tubi. Quindi non concerne al caso specifico e non tiene conto di tutti i fattori che interessano invece la costruzione di un provino tramite l'utilizzo di una macchina 3D. In questo contesto, il mio lavoro di tesi si occuperà per l'appunto di determinare, in maniera più accurata possibile, queste proprietà (e le relative a compressione) in modo da possedere una caratterizzazione più precisa da utilizzarsi anche in casi di *Additive Manufacturing*, quindi per particolari a scopo strutturale.



Fig. 3.16: ABS in grani, pronto per essere utilizzato

Capitolo 4

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Partendo dal presupposto che non esiste una specifica normativa che preveda un protocollo di prova per campioni realizzati in polimero con procedura Rapid Prototyping per Fused Deposition Modeling, si sono analizzate le normative ASTM e ISO più utili allo scopo, sia per quanto riguarda le prove a trazione che per quelle a compressione. Verranno ora schematicamente esposte le linee guida per ogni normativa e gli elementi rilevanti utili allo svolgimento dei test.

NORMATIVA ASTM D638

Si riferisce al metodo di test standard per ricavare le proprietà a trazione di materie plastiche rinforzate o non rinforzate con provini standard a “osso di cane” sotto definite condizioni di pretrattamento, temperatura, umidità e velocità di test.

Tale metodo è utilizzabile per materiali fino a 14 mm di spessore e dunque i pezzi più grandi devono essere ridotti tramite lavorazione. Questo metodo include inoltre la possibilità di determinare il rapporto di Poisson (ν) alla temperatura ambiente.

E' equivalente alla normativa ISO 527-1 anche se quest'ultima riporta con più precisione le fasi di pretrattamento dei provini. Notare che per rendere i test comparabili in caso di prove multiple, i provini vanno presi con lo stesso spessore.

I dati ottenuti seguendo la procedura indicata sono a tutti gli effetti rilevanti e possono essere propriamente usati in applicazioni ingegneristiche.

La lista dei possibili materiali oggetto di questa prova è indicata nelle normative ASTM D4000. Dato che le proprietà di tensione possono variare significativamente a seconda della preparazione dei provini, della velocità di test e delle condizioni climatiche nell'ambiente di prova si ha che un ruolo fondamentale è giocato dal controllo e dal pretrattamento dei campioni. Infatti se si eseguono test di natura comparativa si deve essere certi che tutti i provini vengano preparati allo stesso modo per non includere ulteriori variabili. Inoltre visto che le caratteristiche meccaniche in output, come già

ricordato, sono legate a doppio filo con l'ambiente di prova, i valori ottenuti non saranno considerati validi per applicazioni riguardanti condizioni atmosferiche molto diverse o scale "carico-tempo" molto distanti da quelle di prova. Ne consegue che nessuna stima del limite di utilizzo può essere fatta per qualsiasi materia plastica nel caso di condizioni dissimili da quelle del futuro impiego.

APPARATO DI PROVA

La macchina di prova per i test possiede velocità costante di movimento della traversa mobile e comprende, tra gli altri particolari:

- *Membro fisso*: possiede uno degli afferraggi per il provino, è privo di moto
- *Membro mobile*: dotato di moto e del secondo afferraggio
- *Afferraggi*: servono per vincolare il provino tra il membro mobile e quello fisso
- *Meccanismo di guida*: serve per impartire al membro mobile un moto uniforme, a velocità controllata e regolabile
- *Indicatore di carico*: mostra il carico di trazione totale sviluppato tra gli afferraggi, la precisione richiesta è $\pm 1\%$ o migliore.
- *Indicatore di estensione della traversa*: indica la separazione tra gli afferraggi e deve avere una precisione del $\pm 10\%$ o migliore, deve inoltre essere privo di inerzia.
- *Estensometri*: usati per determinare la distanza tra due punti designati all'interno della distanza calibrata dei provini in test.



Fig. 4.1: gamma di macchine per prove di trazione/compressione

Occorre poi fare una precisazione sugli afferraggi che possono essere di due tipi:

1. **AUTOALLINEANTI**: sono connessi ai membri mobile e fisso della macchina test in maniera tale che si muovano liberamente in allineamento non appena viene applicato un qualsiasi carico, in modo che l'asse del provino coinciderà perfettamente con la direzione di carico di trazione. Il buon allineamento consente infatti di evitare lo scivolamento dagli afferraggi.
2. **FISSI**: sono rigidamente connessi ai membri fisso e mobile della macchina test; quando si usa questo tipo di afferraggio bisogna fare molta attenzione affinché il provino sia ben posizionato e bloccato in modo da allineare l'asse lungo con la direzione di tiro per scongiurare movimenti rotazionali.

Vanno poi fatte alcune precisazioni sulle misure ottenute:

- *Misura del modulo di elasticità*: si deve usare un estensimetro con un massimo di errore di 0,0002 mm/mm che registri continuamente e automaticamente le misure.
- *Misure per basse estensioni*: per l'allungamento a rottura e misure di basse estensioni, ovvero meno del 20% della lunghezza iniziale possono essere usati gli stessi estensimetri, che devono essere almeno di classe C, ovvero con un errore minore di $\pm 1\%$.
- *Misure per elevate estensioni*: per allungamenti superiori al 20% misure con errori non più grandi del $\pm 10\%$ sono accettabili.

PROVINI

Possiamo fare dapprima una suddivisione in provini per *plastiche rigide e semirigide* e *plastiche non rigide*.

Nel primo caso si usano provini di tipo I per materiali con spessore di 7 mm o meno. Il provino tipo II può essere usato quando il materiale non rompe nella sezione stretta come quello precedente. Il provino di tipo V si usa invece quando solo una parte limitata di materiale ha spessore di 4 mm o meno oppure quando molti provini devono essere sottoposti a test in spazi limitati. Il tipo IV deve

essere usato quando sono richiesti paragoni diretti tra materiali in differenti casi di rigidità. Il tipo III deve essere usato per tutti i materiali con spessori superiori a 7 mm ma inferiori a 14.

Nel secondo caso, ovvero plastiche non rigide, uso il provino IV per spessori fino a 4 mm, il tipo III va usato per tutti i materiali con uno spessore più grande di 7 mm ma non più di 14 mm.

I provini costruiti devono essere conformi a questa rappresentazione:

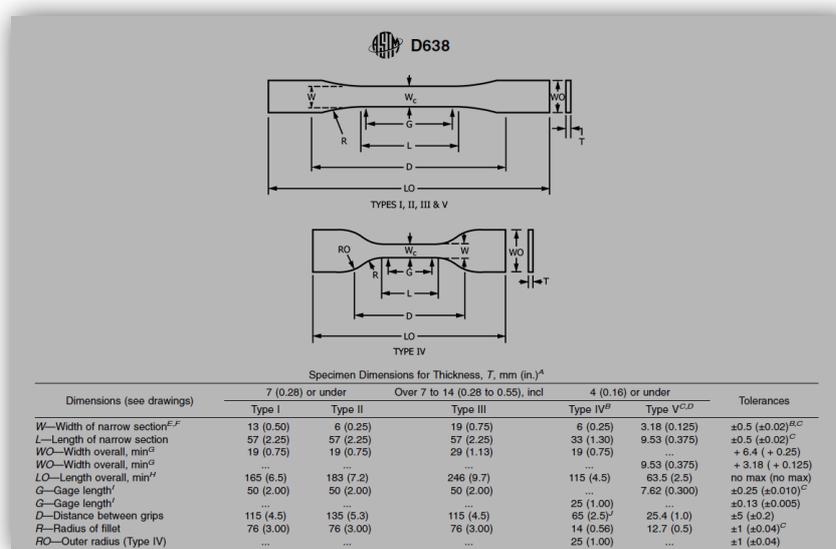


Fig. 4.2: rappresentazione dei provini standard

PREPARAZIONE

I provini devono essere preparati con operazioni di lavorazione a macchina oppure tramite tranciatura da materiale in fogli, piatti o forme simili ma anche per formatura. Tutte le superfici devono essere libere da imperfezioni e graffi, i segni lasciati da lavorazioni grossolane devono essere rimossi con cura, con una lima fine o abrasivo poi levigate con carta abrasiva nella direzione dell'asse in cui sarà applicato il carico. Tutte le bave devono essere rimosse dai provini fusi facendo attenzione a non danneggiare le superfici e a non commettere errori durante le lavorazioni meccaniche. Evitare, per i provini tipo I, valori superiori a quanto riportato in figura, negli afferraggi:

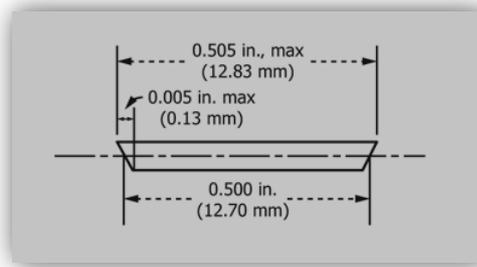


Figura 4.3: valori critici di sottotaglio

Nel momento in cui risultasse necessario porre dei segni di riferimento sul provino si deve usare un inchiostro che non danneggi il materiale. In caso di materiali isotropi testare almeno 5 provini per campione. Quando si testano materiali con sospetta anisotropia vanno preparati 2 set di provini di cui uno con l'asse lungo parallelo e l'altro con l'asse lungo perpendicolare alla direzione di anisotropia stimata, quindi almeno 10 provini. I provini che si rompono per evidenti carenze realizzative vanno scartati e la prova ripetuta, a meno che queste non siano parte del processo sperimentale.

VELOCITA' DI TEST

Definita come il tasso relativo di moto tra gli afferraggi durante il test, come riferimento può essere presa la velocità dell'afferraggio mobile. Si sceglie in base alla seguente tabella:

Classification ^b	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^c Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in·min)	
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1	
		50 (2) ± 10 %	1	
	IV	500 (20) ± 10 %	10	
		5 (0.2) ± 25 %	0.15	
	V	50 (2) ± 10 %	1.5	
		500 (20) ± 10 %	15	
		1 (0.05) ± 25 %	0.1	
		10 (0.5) ± 25 %	1	
	Nonrigid	III	100 (5) ± 25 %	10
			50 (2) ± 10 %	1
IV		500 (20) ± 10 %	10	
		50 (2) ± 10 %	1.5	
		500 (20) ± 10 %	15	

^a Select the lowest speed that produces rupture in ½ to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).
^b See Terminology D883 for definitions.
^c The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

Fig. 4.4: velocità di prova

Se la velocità non è determinata scegliere la più bassa velocità tra quelle in tabella per il relativo provino che porta a rottura in un intervallo di prova tra il minuto e i 5 minuti.

TRATTAMENTO DEI PROVINI

Condizionare i provini per i test in accordo con la normativa, sotto riportata, **D618** a meno di altre specifiche ASTM pertinenti per il materiale; temperatura e umidità devono essere in accordo con la sezione specifica dell'omonima normativa. I test devono essere condotti alla stessa temperatura e umidità di trattamento con tolleranze in accordo alla sezione preposta dell'omonimo documento.

PROCEDURA

Misurare lo spessore e la profondità di ogni provino piatto con un'approssimazione di 0,025 mm usando il metodo di test applicabile **D5947** al centro del provino stesso ed entro 5 mm dalla fine della lunghezza calibrata.

Mettere il provino negli afferraggi della macchina test, avendo cura di allineare l'asse lungo del provino e l'afferraggio con una linea immaginaria che unisce i punti di ancoraggio degli afferraggi della macchina di prova. La distanza da usare tra la fine delle superfici di afferraggio in caso di provini piatti è indicata in figura precedentemente riportata recante i tipi e le caratteristiche salienti dei provini passibili di utilizzo.

Di estrema importanza è prevenire lo scivolamento degli afferraggi, serrandoli uniformemente senza compromettere l'integrità strutturale del campione esaminato.

Si deve successivamente attaccare l'estensometro che deve essere preferibilmente di classe B2 o superiore. Si setta poi la velocità della macchina al rateo richiesto e si avvia la prova. Verranno quindi registrate, durante lo svolgimento del test, la curva carico\deformazione del provino, quella

carico\estensione al punto di strizione e il diagramma carico\deformazione a rottura.

CALCOLI

Un primo artefatto da considerare è la “regione di punta” (*toe region*) ovvero la regione AC nell’immagine sottostante che non corrisponde a proprietà del materiale ma è dovuta all’allineamento non perfetto o alla disposizione del provino. Questo errore va dunque compensato, a meno che non si possa dimostrare con certezza la dipendenza di questo dal materiale, per ottenere i corretti valori di prova. Si può presentare sia per prove di trazione che per quelle di compressione.

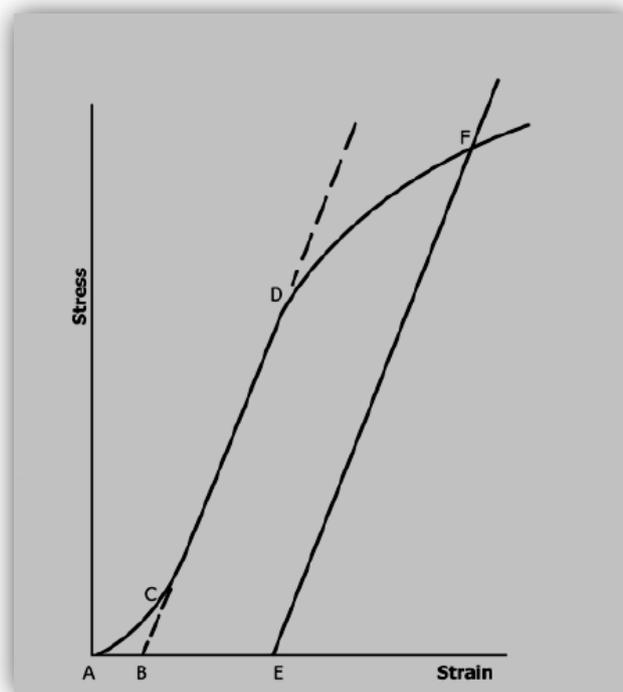


Fig. 4.5: grafico tensione-deformazione dove con AC è indicata la toe region

Vediamo ora come calcolare le proprietà più importanti:

- *Resistenza a trazione*: per ottenerla si divide il massimo carico in Newton per l’area media di *cross section* nella lunghezza calibrata del provino espressa in metri quadri. Il risultato va espresso in Pascal e

riportato con 3 cifre significative. Se è presente un carico a rottura o snervamento minore del massimo è auspicabile calcolare allo stesso modo il corrispondente stress a trazione di rottura o snervamento e riportarlo con 3 cifre significative.

- *Allungamento percentuale*: è la variazione tra la lunghezza calibrata rispetto a quella iniziale del provino in deformato, espressa come percentuale. Si calcola con l'utilizzo di estensimetri. I valori ottenuti sono da ritenersi rilevanti per scopi ingegneristici, se sono presenti deformazioni non uniformi come il *necking* all'interno della lunghezza calibrata, vengono riportati i valori nominali di sforzo che hanno solo scopo qualitativo.
- *Allungamento percentuale a strizione*: si calcola leggendo la deformazione al punto di strizione del provino, si divide per la lunghezza calibrata del provino e si moltiplica per 100.
- *Allungamento percentuale a rottura*: si calcola leggendo la deformazione al punto di rottura del provino, si divide poi per la lunghezza calibrata iniziale del provino indeformato poi si moltiplica per 100.
- *Deformazione nominale*: è la variazione nella distanza tra gli afferraggi rispetto alla posizione originale, espresso in percentuale.
- *Deformazione nominale a rottura*: si calcola leggendo l'allungamento al punto di rottura e dividendolo per la distanza di separazione originale degli afferraggi moltiplicandola poi per 100.
- *Modulo di elasticità*: calcolarlo estendendo la iniziale porzione lineare della curva carico\allungamento e dividendo la differenza di tensione corrispondente a ogni segmento di sezione di questa linea per la corrispondente differenza di deformazione. Tutti i valori di modulo elastico devono essere computati usando la sezione media di partenza sulla misura calibrata del provino. Il risultato va espresso in Pascal e riportato con 3 cifre significative.
- *Modulo secante*: alla designata deformazione, questo può essere calcolato dividendo la tensione nominale corrispondente per la deformazione designata. I valori del modulo elastico sono preferibili e

vanno sempre calcolati quando possibile. Tuttavia il modulo secante va calcolato per tutti quei materiali dove la proporzionalità elastica lineare non è evidente.

Per ogni serie di test calcolare poi la media aritmetica di tutti i valori ottenuti e riportarla come valore medio per la particolare proprietà in questione.

Va inoltre calcolata la deviazione standard (stimata) come segue, riportandola con 2 cifre significative:

$$s = \sqrt{(\sum x^2 - nX^2)/(n - 1)}$$

Con s deviazione standard stimata, x valore della singola osservazione, n numero di osservazioni e X media aritmetica del set di provini osservato.

Vanno poi riportati:

- Identificazione completa del materiale testato
- Metodo di preparazione dei provini
- Tipo di provini e dimensioni
- Procedura di trattamento usata
- Condizioni atmosferiche della camera di prova
- Numero di provini
- Velocità di test
- Tipo di estensometri
- Resistenza a trazione (snervamento o rottura), media e deviazione standard
- Tensione di trazione (snervamento o rottura), media e deviazione standard
- Percentuale di allungamento a strizione o rottura, valore medio e deviazione standard
- Modulo di elasticità o secante, media e deviazione standard
- Se misurato, il modulo di Poisson, valore medio, deviazione standard
- Data del test

NORMATIVA ASTM D695

Questo metodo di test serve per determinare le proprietà a compressione delle plastiche rigide, sia rinforzate che non. Vengono usati provini di forma standard e tale procedura è applicabile per un modulo elastico a compressione di 41,370 MPa.

TERMINOLOGIA

- *Spostamento a compressione (deformation)*: la perdita di lunghezza prodotta nella lunghezza calibrata del provino da un carico di compressione. Viene espresso in unità di lunghezza.
- *Deformazione a compressione (strain)*: il rapporto tra la lunghezza calibrata del provino dopo il test e quella di partenza. È un rapporto adimensionale.
- *Resistenza a compressione*: il massimo stress a compressione(nominale) che il provino può reggere quando è sottoposto al test, può essere o meno lo stress nominale riportato dal provino al momento della rottura.
- *Resistenza a compressione a rottura*: la tensione di compressione nominale sopportata al momento della rottura del provino se il provino rompe di schianto.
- *Tensione di compressione (nominale)*: il carico di compressione per unità di superficie del provino all'interno della lunghezza calibrata, sopportato dal provino in ogni momento. Viene espresso come una forza per unità di area.
- *Diagramma a compressione (tensione\deformazione)*: diagramma nel quale i valori di tensione di compressione sono rappresentati come ordinate mentre i valori di deformazione come ascisse.
- *Punto di snervamento a compressione*: il primo punto sul diagramma tensione\deformazione al quale un incremento di deformazione giunge senza aumento di sforzo.
- *Resistenza a snervamento (di compressione)*: di solito la tensione al punto di snervamento.

- *Carico di rottura*: la massima forza di compressione applicata al provino, sotto le condizioni di test che produce un grado di rottura designato.
- *Modulo di elasticità*: il rapporto fra tensione nominale e corrispondente deformazione preso sotto il limite di proporzionalità del materiale, viene espresso in forza per unità di area.
- *Rapporto di snellezza*: il rapporto di lunghezza tra una colonna di sezione resistente rispetto al suo minimo raggio di inerzia. Per i provini a sezione rettangolare uniforme, il raggio di inerzia è 0,289 volte la più piccola dimensione di sezione trasversale. Per provini di sezione resistente uniforme e circolare il raggio di inerzia è 0,250 volte il diametro.

Questi test a compressione forniscono informazioni utili sulle proprietà del materiale plastico quando sono impiegate in condizioni che approssimino quelle dei test. Nel caso in cui le applicazioni future del materiale siano assai diverse dallo svolgimento della prova vanno eseguiti ulteriori accertamenti relativi a resilienza, scorrimento (*creep*) e fatica.

Le proprietà indagate includono modulo di elasticità, tensione a snervamento, deformazione oltre il punto di snervamento e resistenza a compressione (a meno che il materiale si appiattisca ma non si rompa).

I materiali che hanno basso grado di malleabilità (ovvero la capacità di essere facilmente deformabile e riducibile in lamine sottili) esibiscono spesso un punto di strizione. In questa ipotesi la resistenza a compressione è arbitraria e dipende dal grado di distorsione che viene considerato come indicante la completa rottura del materiale. Esistono infatti materiali plastici che continuano a deformarsi in compressione finché non si sia prodotto un disco piano, con sforzo nominale in costante aumento, senza nessuna evidente rottura. Nel caso in cui il materiale rompa invece di schianto, ciò significa che la resistenza a compressione ha un valore esattamente definito.

APPARATO DI PROVA

La macchina è molto simile a quella per le prove di trazione visto che idealmente basta invertire la direzione di moto della traversa mobile per passare da trazione a compressione sul materiale. Saranno comunque riportati gli elementi principali dell'apparecchiatura di prova:

- *Meccanismo di guida*: un meccanismo che impartisce alla traversa mobile un moto uniforme e a velocità controllata e regolabile.
- *Indicatore di carico*: dispositivo indicante il carico, capace di mostrare il carico complessivo totale portato dal provino in test senza ritardi di inerzia allo specificato rateo di test e indicante il carico con una precisione del $\pm 1\%$ del massimo valore raggiunto nel test.
- *Compressometro*: uno strumento utile per determinare la distanza utile tra due punti fissi sul provino in test in ogni momento della prova. E' auspicabile che questo strumento registri automaticamente la distanza (o ogni sua variazione) come funzione del carico sul provino in test. Lo strumento deve essere privo di ritardo di inerzia allo specificato rateo di carico e con requisiti conformi alla classe di estensometri B2.
- *Strumento di compressione*: serve per applicare il carico al provino in test, deve avere requisiti di caricamento assiale entro 1:1000.
- *Micrometri*: con tolleranza 0,01 mm per misurare larghezza, spessore e lunghezza del provino.



Fig. 4.6: compressometro analogico con doppia scala di misura

PROVINI

I provini possono essere ottenuti con lavorazioni a macchina da materiali in fogli, in piatti, bacchette, tubi o forme simili oppure possono essere preparati per formatura a compressione o iniezione, non si fa cenno a nessun tipo di tecnica FDM. Tutte le lavorazioni devono essere volte alla realizzazione di una superficie più liscia possibile. Grande cura va inoltre posta alla lavorazione delle estremità affinché oltre che lisce siano anche parallele e con un errore di perpendicolarità di al massimo 0,025 mm rispetto all'asse lungo.

Il provino standard deve essere nella forma di un cilindro retto o di un prisma la cui lunghezza sia due volte la sua larghezza o diametro. Le misure preferite sono 12,7x12,7x25,4 mm per il provino prismatico o 12,7 mm di diametro per 25,4 mm di altezza per quello cilindrico. Dove sono desiderati il modulo elastico e la deviazione snervamento\deformazione il provino deve essere di dimensioni tali che il rapporto di snellezza sia da 11 a 16:1. In questo caso le taglie di provino preferite sono 12,7x12,7x50,8 mm per il prisma o 12,7x50,8 mm per il cilindro.

Quando si testano materiali che sono ritenuti anisotropi, anche in questo caso devono essere preparati 2 set di provini che abbiano il loro asse lungo

in direzione rispettivamente parallela e perpendicolare alla direzione di sospetta anisotropia.

TRATTAMENTO DEI PROVINI

Trattare il provino in accordo con la norma ASTM D618 a meno di ulteriori specifiche ASTM. Il tempo di trattamento riportato è da considerarsi come minimo. Condizioni di temperatura e umidità devono essere in accordo con la normativa già specificata a meno di ulteriori richieste. Lo stesso vale per l'ambiente in cui la prova si svolge, il quale non deve essere dissimile da quello in cui il materiale si troverà ad operare.

NUMERO DEI PROVINI

In caso di materiale isotropo testare almeno 5 provini per ogni campione; per materiali con sospetta anisotropia testare almeno 10 provini, ovvero, 5 paralleli e 5 perpendicolari all'asse principale di anisotropia. I provini che rompono per difetti evidenti devono essere scartati e la prova ripetuta a meno che il difetto non costituisca una variabile il cui effetto è di interesse.

PROCEDURA

Misurare la larghezza e la profondità del provino approssimando a 0,01 mm in diversi punti della sua lunghezza. Calcolare e registrare il minimo valore dell'area di *cross section*.

Piazzare il provino in test tra le superfici dello strumento di compressione, avendo cura di allineare l'asse del provino con quello degli afferraggi, assicurarsi che le facce degli afferraggi siano parallele alle superfici del provino. Piazzare i provini sottili nella struttura di supporto in modo che siano centrati e serrarli energicamente.

Se sono richieste solo resistenza a compressione o resistenza a snervamento a compressione oppure entrambe procedere come segue:

- Impostare la velocità a 1,3 mm/min e azionare la macchina
- Registrare il massimo carico portato dal provino durante il test (di solito il carico al momento della rottura)

Se sono di interesse anche dati relativi all'andamento tensione\deformazione, procedere come segue:

- Attaccare il compressometro
- Impostare la velocità di controllo a 1,3 mm\min e azionare la macchina
- Registrare i carichi e i rispettivi sforzi a compressione ad appropriati intervalli, oppure, se la macchina registra automaticamente, memorizzare la curva tensione\deformazione completa.
- Dopo che è stato raggiunto il punto di snervamento si può aumentare la velocità della macchina da 5 a 6 mm\min fino a rottura del provino, può essere fatto solo con un materiale abbastanza duttile e con una macchina dalla risposta abbastanza rapida.

CALCOLI

Ecco i principali risultati da calcolare:

- *Resistenza a compressione*: calcolarla dividendo il massimo carico di compressione portato dal provino durante il test per la minima sezione resistente di partenza. Esprimere il risultato in MPa e riportare 3 cifre significative.
- *Resistenza a snervamento a compressione*: calcolarla dividendo il carico portato dal provino al punto di snervamento per la minima sezione resistente di origine del provino, esprimere il risultato in MPa e 3 cifre significative.

- *Modulo di elasticità*: calcolare il modulo di elasticità disegnando una tangente alla posizione lineare iniziale della curva tensione\deformazione, selezionare tutti i punti su questa porzione di linea dritta e dividere lo stress a compressione trovato in questo punto per la deformazione corrispondente, misurare da dove la tangente interseca l'asse di deformazione, esprimere il risultato in GPa e riportarlo con 3 cifre significative.

Per ogni serie di test calcolare una media con 3 cifre significative di tutti i valori ottenuti e riportati come valore medio per la particolare proprietà in questione.

Va inoltre calcolata anche la deviazione standard come segue:

$$s = \sqrt{(\sum x^2 - nX^2)/(n - 1)}$$

Con s deviazione standard stimata, x valore della singola osservazione, n numero di osservazioni e X media aritmetica del set di provini osservato.

Vanno riportati:

- Identificazione completa del materiale testato
- Metodo di preparazione dei provini
- Tipo di provini e dimensioni
- Procedura di trattamento usata
- Condizioni atmosferiche della camera di prova
- Numero di provini
- Velocità di test
- Resistenza a compressione, valore medio e deviazione standard
- Resistenza a snervamento a compressione, valore medio e deviazione standard
- Modulo di elasticità, valore medio e deviazione standard
- Data del test

PRECISIONE ED ERRORI

Ripetibilità: due test ottenuti da un laboratorio devono essere giudicati non equivalenti se differiscono per più di “r” per quel materiale. “r” è l’intervallo che rappresenta la differenza critica tra due risultati di test per lo stesso materiale, ottenuto dallo stesso operatore usando la stessa attrezzatura, lo stesso giorno nello stesso laboratorio.

Riproducibilità: due test ottenuti dallo stesso laboratorio devono essere giudicati non equivalenti se differiscono per più del valore “R” per quel materiale. “R” è l’intervallo che rappresenta la differenza critica tra due test per lo stesso materiale, ottenuti da differenti operatori usando diversi equipaggiamenti in diversi laboratori.

NORMATIVA ASTM D618

Le proprietà fisiche delle plastiche sono largamente influenzate dalla temperatura e dall’umidità relativa. Per far sì che i test ottenuti da differenti laboratori siano affidabili è necessario standardizzare le condizioni di umidità e temperatura, sia prima che dopo il test. Per alcuni materiali possono essere richieste prescrizioni speciali.

TERMINOLOGIA\USO

- *Temperatura ambiente*: varia tra i 20 e i 30 gradi Celsius.
- *Atmosfera standard di laboratorio*: atmosfera avente temperatura di 23° C con il 50% di umidità relativa.

Il trattamento dei provini è di solito condotto per:

- Portare il materiale all’equilibrio con le condizioni normali o medie dell’ambiente

- Per ottenere risultati riproducibili senza riguardo della precedente storia di esposizione
- Per esporre il materiale a condizioni che corrisponderanno a quelle di uso.

Le procedure di trattamento prescritte sono designate per ottenere risultati riproducibili ma in dipendenza da spessore, tipo di materiale e storia precedente è possibile che ci possano volere 20-100 giorni o più per assicurare un equilibrio sostanziale sotto le normali condizioni di umidità e temperatura.

Numero e tipo di provini devono essere costruiti seguendo le norme ASTM per quella specifica prova su quel determinato materiale.

ATMOSFERA DI TRATTAMENTO

Quando i dati devono essere ottenuti per scopi comparativi o a una temperatura specifica, selezionare la temperatura di test e la tolleranza ad essa associata nella tabella sottostante:

Test Temperatures, °C (°F) ^A	Tolerance, plus or minus, °C (°F)
-70 (-94)	2.0 (3.6)
-55 (-67)	2.0 (3.6)
-40 (-40)	2.0 (3.6)
-25 (-13)	2.0 (3.6)
0 (32)	2.0 (3.6)
23 (73) ^B	2.0 (3.6)
35 (95)	2.0 (3.6)
50 (122)	2.0 (3.6)
70 (158)	2.0 (3.6)
90 (194)	2.0 (3.6)
105 (221)	2.0 (3.6)
120 (248)	2.0 (3.6)
130 (266)	2.0 (3.6)
155 (311)	2.0 (3.6)
180 (356)	2.0 (3.6)
200 (392)	3.0 (5.4)
225 (437)	3.0 (5.4)
250 (482)	3.0 (5.4)
275 (527)	3.0 (5.4)
300 (572)	3.0 (5.4)
325 (617)	4.0 (7.2)
350 (662)	5.0 (9.0)
400 (752)	6.0 (10.8)
450 (842)	8.0 (14.4)
500 (932)	10.0 (18.0)
600 (1112)	12.0 (21.6)

Fig. 4.7: tabella delle tolleranze di temperatura

Se sono richieste tolleranze di ± 1 °C queste vanno specificate. Nel nostro caso la tolleranza è fissata in ± 2 °C. Misure di temperatura e umidità devono essere fatte il più possibile vicino al centro della stanza, per quest'ultima la tolleranza risulta essere del $\pm 10\%$.

Per ogni provino in test vanno specificate la durata del trattamento, un numero indicante la temperatura di trattamento in gradi C e un altro che riporti l'umidità relativa.

I numeri devono essere separati da tratti obliqui. "Des" sta ad indicare una essiccazione ottenuta tramite cloruro di calcio. Temperature e umidità relativa devono essere in accordo con le tolleranze riportate se non specificato diversamente.

Troveremo dunque tabulato, per esempio: 96/35/90 cioè 96 h di trattamento a 35°C con il 90% di umidità relativa.

PROCEDURE STANDARD PER IL TRATTAMENTO PRE-TEST/TEST

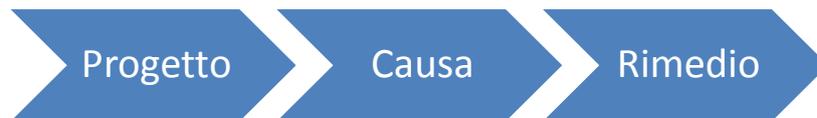
- *Procedura A* : trattamento 40/23/50 per provini di 7 mm o inferiori oppure 88/23/50 per provini oltre i 7 mm di spessore. Garantire una buona aerazione ai provini su tutti i lati. Tale procedura è soddisfacente e la più raccomandata se non sono presenti altre specifiche.
- *Procedura B* : trattamento 48/50 + Des, i provini vanno prima trattati in apposito forno poi rimossi per essere essiccati con cloruro di calcio per un periodo di almeno 5 h per provini con massimo 7 mm di spessore e 15 h per provini con più di 7 mm di spessore. Molto usata per alcune tipologie di materiali termoindurenti.
- *Procedura C* : trattare 96/35/90 per prove in cui vi è una grande dipendenza da parametri ambientali.

Come già scritto, a meno di specificazioni particolari i materiali devono essere provati nelle stesse condizioni ambientali di trattamento.

Far passare al massimo mezzora tra la fine del trattamento e l'inizio dei test, nel caso di materiali coperti da specifiche ASTM fare riferimento allo standard per determinare le procedure di trattamento che devono essere usate, in generale la scelta migliore è quella che da i risultati più riproducibili.

IL METODO D.O.E (Design Of Experiment)

Il DOE è un metodo di progettazione che si basa su un processo mirato di pianificazione degli esperimenti che hanno il preciso scopo di fare chiarezza su un procedimento sperimentale o industriale. La sequenza logica che ne sta alla base si può esplicitare come:



Dunque l'obiettivo dello studio è quello della ricerca, nella fase di progettazione concettuale, dei valori ottimali delle variabili che influenzano il sistema. Tali valori sono detti *parametri di controllo*.

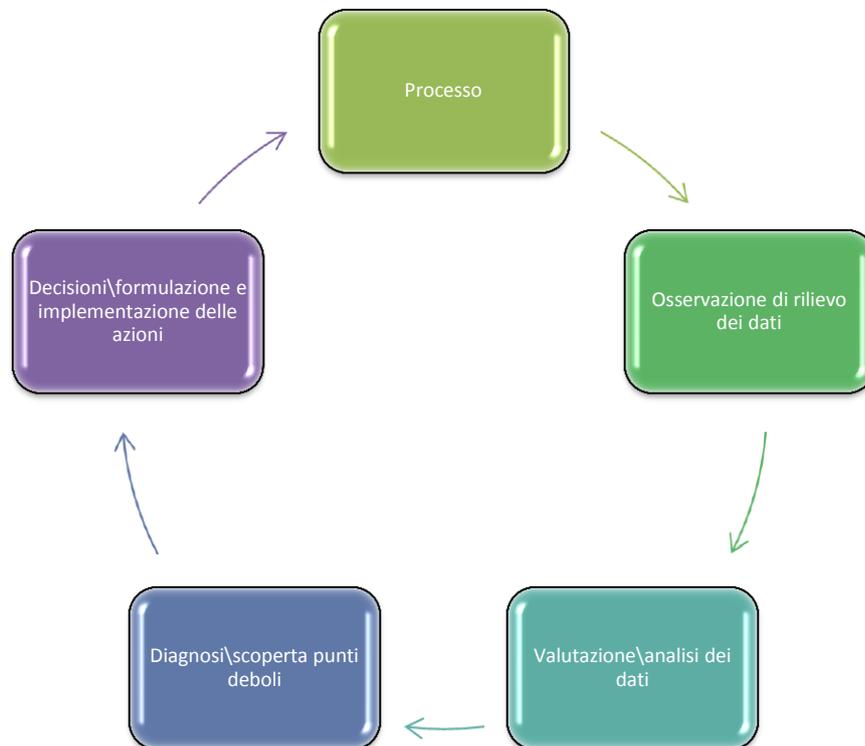


Fig. 1.1: schema di processo del metodo DOE

La combinazione ottimale di questi parametri ottimizzerà il risultato in termini di prestazioni, affidabilità e riduzione dei costi. I capisaldi di questa teoria sono da un lato la *sperimentazione* e dall'altro il ruolo della *prova*, intesa come test. La sperimentazione ha il compito di verificare quale variabile abbia effetto sulla risposta del sistema e i valori ottimali, la prova invece ha il compito di indagare se il processo risponde alle attese in condizioni operative.

Per quanto concerne il progetto dei parametri, esso serve per scoprire le relazioni di causa-effetto tra le variabili di ingresso e quelle di uscita cercando l'operatività funzionale del sistema, il quale deve svolgere il suo ruolo anche in presenza di *variabili di disturbo* non sempre prevedibili e controllabili.

La procedura che si utilizza è:

- Verifica della risposta del sistema, ovvero la variabile o le variabili dipendenti in uscita (*risultato*) e si individuano quelle in ingresso (*fattori*) che hanno influenza.
- Pianificazione di un congruo numero di prove definendo il numero degli stati dei fattori in corrispondenza dei quali si vuole determinare il valore della risposta del sistema

Parlando in maniera generale se per esempio possiedo un solo fattore e n livelli, eseguirò n prove. Con invece n fattori e 2 livelli avrò 2^n prove, per n fattori e 3 livelli saranno 3^n prove e così via.

Come si può ben capire questo modo di procedere da adito, per un elevato numero di fattori o di livelli, ad una rilevante quantità di prove che mal si sposa con le linee guida del Rapid Prototyping e, in generale, del moderno mondo industriale. Si cercherà quindi di minimizzare il numero di prove non escludendo che i migliori risultati ottenibili si realizzino per valori diversi da quelli posti agli estremi. E' poi possibile, con fattori di tipo quantitativo, interpolare con un modello matematico la loro risposta anche in punti del dominio diversi da quelli sperimentati.

Analizziamo ora la fase dell'*esperimento* che viene inteso come una interpretazione statistica della realtà composta da diverse fasi:

- Analisi delle variabili dei dati
- Test di significatività

- Calcolo degli effetti dei fattori
- Analisi delle eventuale interazione degli effetti
- Varianza degli effetti
- Sviluppo di un eventuale modello matematico empirico come risposta
- Piani fattoriali frazionari per ridurre il numero di prove limitando il più possibile le perdite di informazioni.

Se poi definisco “m” come il numero di ripetizioni delle prove questo consente la stima dell’errore sperimentale e la riduzione della variabilità dovuta ad esso. Infatti definisco variazione standard per la media delle prove ripetute:

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$$

Con al numeratore la deviazione standard o scarto quadratico medio e al denominatore la radice del numero di ripetizioni delle prove.

Oltre alla variazione standard per la media delle prove ripetute è importante valutare la *significatività dei fattori* che intervengono nel processo. La variabilità totale è definita come somma di due termini: la variabilità dei risultati dovuti ad effetti dei fattori di controllo (varianza interna) e quella dovuta ai fattori non considerati che sono origine degli errori sperimentali (varianza esterna). Queste due sono rese confrontabili una volta che siano divise per il numero di confronti possibili fra i diversi valori (*Gdl*), che valgono rispettivamente (C-1) per confronti tra le colonne mentre C(R-1)*(R-1) sono i possibili confronti tra i dati in riga in ciascuna colonna e C(R-1) quelli possibili tra tutti i dati di riga. Ottengo così le medie quadratiche.

Giunti a questo punto si potrà procedere all’analisi della varianza, chiamata ANOVA. Questa consiste in un insieme di tecniche statistiche che permettono il confronto fra più gruppi di variabili a livello sia di variabilità interna che tra i gruppi stessi.

Gli strumenti di questa analisi sono:

- **SST** = la somma degli scarti quadratici di tutti singoli valori rispetto alla media generale *m*. Possiamo esprimere questa somma quadrica come:

$$SST = \sum_{J=1}^C \sum_{I=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

- **SSW** = la somma dei quadrati delle differenze all'interno delle colonne. Questo, in sostanza, è l'effetto dell'errore sperimentale, e viene indicato dalla somma quadratica delle differenze tra ciascun valore e la corrispondente media di colonna:

$$SSW = \sum_{J=1}^C \sum_{I=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2$$

- **SSB_c** = la somma dei quadrati delle differenze tra le colonne.

$$SSB = R \sum_{J=1}^C (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2$$

Tra le quali persiste la relazione: $SST = SSW + SSB_C$.

Come detto possiamo confrontare tra loro le medie quadratiche e per fare ciò in maniera più semplice e veloce costruiamo una tabella dell'ANOVA:

CAUSA DI VARIAZIONE	SOMMA DEI QUADRATI	GRADI DI LIBERTA'	MEDIA QUADRATICA	VALORE CALCOLATO DI F
SSB _c tra le colonne	$R \sum_{J=1}^C (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2$	C-1	MSB _c = SSB _c /C-1	MSB _c / MSW
SSW entro colonna (errore)	$\sum_{J=1}^C \sum_{I=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2$	C(R-1)	MSW = SSW/(R-1)C	MSW
TOTALE	$\sum_{J=1}^C \sum_{I=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	RC-1	-	-

Nell'ultima colonna a destra viene calcolato il “*test F*”, detto anche test di **Fischer**, che serve per confrontare due varianze ed è volto infatti a verificare che due popolazioni che seguano entrambe la stessa distribuzione gaussiana abbiano la stessa varianza. Viene presentato come un rapporto tra medie quadratiche che dà la stima dell'influenza sul risultato del processo dei fattori di controllo rispetto a quella dei fattori non presi in considerazione o del tutto casuali (errore sperimentale).

Se il rapporto *F* è maggiore di 1, si può pensare che il fattore sottoposto ad analisi abbia influenzato il risultato. Si può dare supporto statistico a questa affermazione ricordando che il rapporto tra medie quadratiche provenienti da una stessa distribuzione gaussiana, considerata rappresentativa per gli errori sperimentali, è anch'essa una variabile aleatoria che segue la distribuzione di Fischer.

Se per esempio immagino di avere una probabilità del 95 % che il fattore *F* abbia un valore minore di 1, la probabilità che un valore oltre questa soglia appartenga a tale distribuzione è del 5 % circa. Posso quindi concludere che è improbabile che un valore maggiore di 1 soddisfi tale distribuzione e quindi che le due medie quadratiche cioè quella che stabilisce l'effetto dei fattori e quella che deriva dalla ripetizione delle prove, derivino dalla stessa popolazione con la distribuzione tipica dell'errore sperimentale.

Si possono poi in ogni caso commettere degli errori di valutazione, se si ritiene infatti che l'effetto dei fattori non sia significativo, o come si dice, si accetta l'ipotesi di nullità H_0 , si rischia un errore di I tipo, pari almeno al 5%; mentre se si rifiuta l'ipotesi H_0 , e si accetta l'ipotesi alternativa H_1 di efficacia dei fattori, si rischia un errore di II tipo, pari al più al 5%. Si può quindi dire alternativamente che si ha fiducia almeno al 95% di aver preso la decisione giusta.

Consideriamo poi i vari fattori che intervengono all'interno di uno scenario sperimentale e i loro effetti. Si ha interazione tra gli effetti quando si verifica una variazione della risposta rispetto al valore che essa avrebbe se gli effetti agissero singolarmente. In altre parole la risposta è diversa dalla somma delle risposte dovute ai singoli effetti. Introduciamo ora un *modello statistico* per la risposta di un sistema:

$$y_{ijk} = \mu + \rho_i + \tau_i + I_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Con:

μ = media delle medie per campione con un numero teoricamente infinito di dati

τ_j = effetto differenziale associato al j-esimo livello di x

I_{ij} = effetto di interazione

ϵ_{ij} = è una stima dell'errore sperimentale, ovvero è l'errore associato a ciascuna misura

$i = 1 \dots R$ effetto di riga

$j = 1 \dots C$ effetto colonna

$k = 1 \dots n$ repliche

questo modello statistico può tradursi anche in uno costruito in questo modo, operando k ripetizioni delle prove:

$$y_{ijk} = \bar{y}_{...} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{...}) + (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})$$

Il primo termine del secondo membro è la media, il secondo invece esplica l'effetto di riga, il terzo l'effetto di colonna, il quarto invece riassume gli effetti delle interazioni e il quinto è l'errore. Il termine di iterazione esprime l'effetto come costituito dalla differenza tra la media di cella e la media generale, diminuita dell'effetto della variabile di riga e dell'effetto della variabile di colonna. Infatti l'interazione rappresenta l'eccedenza o la diminuzione rispetto agli effetti delle singole variabili.

Partendo da questa equazione con alcune manipolazioni giungiamo alla forma finale:

$$SST = SSB_{\text{righe}} + SSB_{\text{colonne}} + SSI_{R,C} + SSW_{\text{errore}}$$

Per i gradi di libertà (DOF) invece:

$$RC_n - 1 = (R - 1) + (C - 1) + (R - 1)(C - 1) + RC(n - 1)$$

Il terzo termine del secondo membro rappresenta i gradi di libertà ottenuti per effetto dell'interazione.

Definiamo effetto di un fattore la *variazione della risposta* del sistema prodotto da una *variazione dei livelli* del fattore. Ad esempio, se consideriamo un fattore x_1 , il suo

effetto principale può essere pensato come differenza tra la media delle risposte del livello più alto di x_1 meno la media delle risposte al livello più basso di x_1 . Volendo fare un esempio numerico, consideriamo questa tabella:

$X_1 \setminus X_2$	-1	+1	media riga
-1	5 6	8 9	7
media	l=5,5	b=8,5	
+1	10 9	17 18	13,5
media	a=9,5	ab=17,5	
media colonna	7,5	13	Gran media = 10,3

In questo caso abbiamo un esempio fattoriale a 2 livelli dove ogni casella riporta i valori delle 2 prove effettuate e la loro media.

Come visibile in tabella è stato indicato con l il valore ottenuto per la posizione (-1,-1), b il valore ottenuto per (-1,+1), a per (+1,-1) e ab per (+1,+1).

Dunque per quanto detto prima A, cioè l'aumento medio della risposta, è ottenibile come:

$$A = (a + ab)/2 - (l + b)/2 = 13,5 - 7 = 6,5$$

Che espresso sul piano cartesiano:

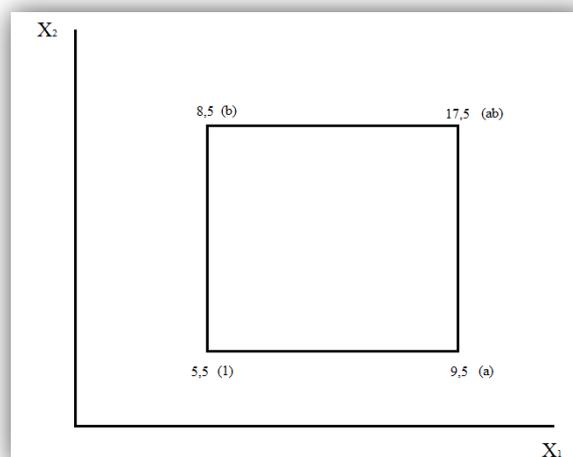


Fig. 5.1: aumento di risposta medio su piano cartesiano

Se ab avesse un valore tale da stare nello stesso piano obliquo di $1,a,b$ non si avrebbe interazione fra i fattori e il valore ab sarebbe di 12,5.

Inoltre poiché l'effetto di X_1 dipende dal livello scelto per X_2 , considerando quello inferiore $A = 9,5 - 6,5 = 4$, mentre per il livello di X_2 superiore $A = 17,5 - 8,5 = 9$. Esiste quindi un effetto di interazione che è appunto la differenza media tra i due effetti di A calcolati per il valore più alto e per il valore più basso di X_2 : $AB = (9 - 4)/2 = 2,5$.

Dunque possiamo concludere che, in generale, quando si riscontra che la differenza nella risposta tra i livelli di un fattore non è la stessa a tutti i livelli dell'altro fattore, si ha interazione tra i fattori. Riassumendo, gli effetti sulla variabile dipendente y sono:

- A , dovuto alla prima variabile indipendente X_1
- B , dovuto alla seconda variabile indipendente X_2
- AB , dovuto all'effetto combinato di entrambe le variabili

Possiamo calcolarli come:

$$A = \frac{a+ab}{2} - \frac{1+b}{2};$$

$$B = \frac{b+ab}{2} - \frac{1+a}{2};$$

$$AB = \frac{ab-b}{2} - \frac{a-1}{2}$$

Si può rendere più diretto e veloce questo metodo di calcolo preparando una tabella organizzata nel modo seguente: valida per $RC = 4$, cioè il numero delle combinazioni di prova e per $n = 2$, ovvero il numero delle ripetizioni.

Nr	I	X_1	X_2	X_1X_2	Yates	y_1	y_2	\bar{y}
1	+	+1	-1	+1	1=	5	6	5,5
2	+	+1	-1	-1	a=	10	9	9,5
3	+	-1	+1	-1	b=	8	9	8,5
4	+	+1	+1	+1	ab=	17	18	17,5
effetti	$b_0 = 10,3$	$A = 6,5$	$B = 5,5$	$AB = 2,5$	-	-	-	$\sum \bar{y}^2 = 499$

Gli effetti di A,B, AB si calcolano moltiplicando i risultati medi di tutte le prove per i valori corrispondenti di colonna e sommando i contributi. Il risultato così ottenuto va diviso per la metà del numero di combinazioni di prova, al fine di ricavare i valori degli effetti.

Una volta calcolati gli effetti, principali e di interazione di tutte le variabili, risulta immediato il riconoscimento della combinazione di prova che da il risultato migliore. Se inoltre le variabili sono quantitative e continue si possono interpolare i risultati utilizzando una funzione bilineare rigata, idonea per i piani fattoriali a due livelli, che nel caso di due fattori è:

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \epsilon$$

I coefficienti sono costituiti dagli effetti calcolati, divisi per 2, per tenere conto del fatto che gli effetti rappresentano l'incremento della variabile in uscita per due unità di variazione: da -1 a 0 e da 0 a +1.

Se si porta b_0 a primo membro e si calcolano le somme quadratiche estese a tutte le ripetizioni della prova $j = 1 \dots n$ e a tutte le combinazioni $i = 1 \dots m = RC$ si ottiene:

$$SS(\text{modello}) - nmb_0^2 = \frac{(nm)A^2}{4} + \frac{(nm)B^2}{4} + \frac{(nm)C^2}{4} +$$

$$\frac{(nm)AB^2}{4} + \frac{(nm)AC^2}{4} + \frac{(nm)BC^2}{4} + \frac{(nm)ABC^2}{4}$$

Se si indicano con:

$$SS(A) = \frac{(nm)A^2}{4}$$

$$SS(B) = \frac{(nm)B^2}{4}$$

$$SS(AB) = \frac{(nm)AB^2}{4}$$

$$SS(\text{modello}) = n \sum y_i^2$$

$$SS(\text{media}) = (nm)b_1^2$$

Da ciò possiamo scrivere per il caso a 2 fattori e 2 livelli:

$$SS(\text{modello}) - SS(\text{media}) = SS(A) + SS(B) + SS(AB)$$

In generale, quindi, per un piano 2^k , dove ognuna delle $m=2^k$ combinazioni di prova è ripetuta n volte, la somma dei quadrati dovuta a ciascun effetto E è data da:

$$SS(E) = (nm) E^2 / 4$$

Con un grado di libertà. Per valutare la correttezza del modello proposto con gli effetti stimati dall'esperimento, è necessario determinare il significato del contributo di ogni effetto nella somma totale dei quadrati di tutti i dati ricavati.

Soltanto gli effetti che danno elevata "variazione" contribuiscono significativamente al modello, mentre quelli con variazione paragonabile a quella dell'errore sperimentale vanno esclusi. La varianza dell'errore può essere stimata come residuo tra $SS(\text{modello})$ e la somma di tutte le altre somme quadratiche, con il relativo grado di libertà.

Si può dunque generare una tabella ANOVA per gli effetti ricordando che m è il numero totale delle prove (pari a RC) e n è il numero delle ripetizioni:

Sorgente di variazione	Somma dei quadrati	Gradi di libertà	Medie quadratiche	Valori calcolati di F
Dovuta ad A	SS(A)	1	MS(A)	$MS(A)/\sigma^2 > C$
Dovuta a B	SS(B)	1	MS(B)	$MS(B)/\sigma^2 > C$
Dovuta ad AB	SS(AB)	1	MS(AB)	$MS(AB)/\sigma^2 > C$
Totale - Media	SS(Tot)–SS(media)	$mn-1=$ $2 \times 2 \times 2 - 1 = 7$		
Residuo dovuto all'errore sperimentale puro	SS Tot- SS(media) – SS(A) – SS(B) – SS(AB)	$7-4=3$	σ^2	

Ciascun valore calcolato di F_{calc} deve essere confrontato con il valore di soglia C per una curva corrispondente a 1 e 4 gradi di libertà.

Capitolo 6

PROVE SPERIMENTALI

In questo capitolo si discuteranno le prove sperimentali condotte per caratterizzare il materiale (ABS plus p430) sia a trazione che a compressione.

Per testare i materiali, come già detto, sono state prese in considerazione le seguenti normative:

- ASTM D638 per prove a trazione;
- ASTM D695 per prove a compressione;
- ASTM D618 per il trattamento e la preparazione dei provini.

L'ASTM è un organismo di normalizzazione statunitense, dunque per completezza sono state analizzate anche le equivalenti normative ISO (Organizzazione internazionale per la normazione) che hanno connotati più "europei":

- ISO 527 per prove a trazione;
- ISO 604 per prove a compressione;
- ISO 291 per il trattamento e la preparazione dei provini.

Successivamente si è proceduto alla scelta dei parametri attraverso i quali caratterizzare i provini da stampare. Ciò non è risultato semplice sia per il grande numero di possibili alternative che per la stima da fare a priori sull'influenza che i vari parametri avrebbero avuto sulle caratteristiche meccaniche. Dunque si presentano di seguito le principali variabili "sensibili", e i possibili livelli, riportando in grassetto quelle effettivamente selezionate:

-SPESSORE DI PASSATA, altezza con cui la prototipatrice deposita il materiale durante ogni passata:

1. **0,1778;**
2. **0,254;**

3. 0,3302.

-METODO DI RIEMPIMENTO, indica il grado di riempimento del particolare:

1. **Solid;**
2. **Sparse, high density;**
3. Sparse, low density;
4. Sparse, double dense.

-ORIENTAMENTO INTERNO, l'orientamento che i vari layer (ovvero gli strati depositati dalla macchina) hanno per ogni passata:

1. **Direzione standard macchina** (incrociati a 45°);
2. **Orientati longitudinalmente** secondo la direzione di sforzo.

-NUMERO DI CONTORNI, il numero dei contorni esterni realizzati in fase di stampa:

1. **Contorno singolo;**
2. **Contorno multiplo.**

Dunque, analizziamo nel dettaglio le variabili presentate. Lo spessore di passata è stato scelto in 0,1778 mm e 0,254 mm perché oltre ad essere i valori più comuni sono quelli che garantiscono una migliore distribuzione del materiale, infatti più lo spessore del layer è piccolo più il particolare avrà un miglior riempimento, sia dal punto di vista volumico che topologico. Oltretutto i layer di ridotte dimensioni diminuiscono o attenuano il cosiddetto “*stairing effect*”, cioè la finitura superficiale “a gradini” originata in raccordi o spigoli obliqui dalla scelta di uno spessore di stratificazione troppo elevato.

Per quanto riguarda la modalità di riempimento si è optato per “Solid” e “Sparse high density”. La prima garantisce il miglior riempimento volumico possibile e dunque il pezzo sarà quasi “pieno” all'interno.

La modalità “Sparse high density” invece minimizza il materiale utilizzato tramite la creazione di un reticolo unidirezionale. In questo modo il pezzo non ha lo stesso riempimento volumico dell'ipotesi precedente ma comunque riesce a mantenere,

secondo il costruttore, una buona solidità ottimizzando di molto la quantità di materiale utilizzata.

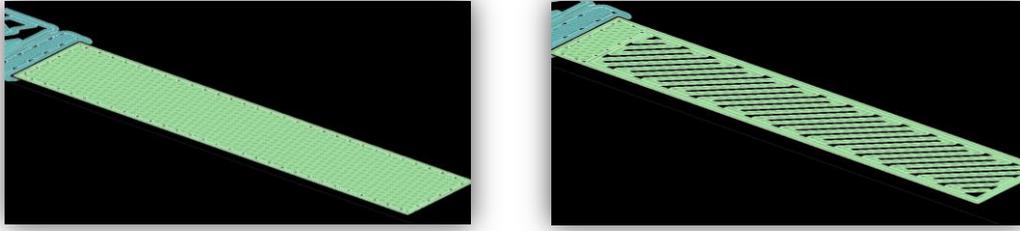


Fig. 6.1: differenza tra riempimento Solid a sinistra e Sparse high density a destra

Come già affrontato in uno dei capitoli precedenti, dato che l'ABS ottenuto con tecniche additive è un materiale ortotropo, ovvero ha differenti caratteristiche meccaniche a seconda della direzione considerata, si è scelta in primis l'orientazione interna propria della macchina per ottenere un provino più denso possibile anche se questo significa un orientamento tra le varie passate a 45° , che mal si sposa con l'isotropia richiesta dalle normative. Tuttavia considerando l'efficienza di riempimento, di disposizione dei reticoli interni e di giunzione tra le varie passate questa opzione è più che giustificata.

In secondo luogo, per sottostare alle richieste delle normative si sono orientate le passate in asse con la direzione di sollecitazione. Se da un lato questo dovrebbe generare più resistenza dato che fibra e sforzo sono paralleli, la macchina trova più difficoltoso realizzare il provino in questo modo e quindi non si ha una perfetta distribuzione di materiale tra passate interne e facce esterne longitudinali.

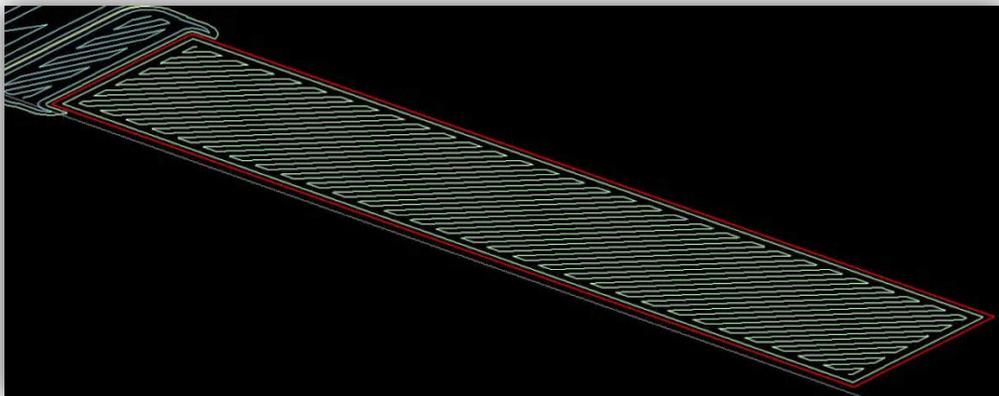


Fig. 6.2: riempimento del particolare come da standard di macchina

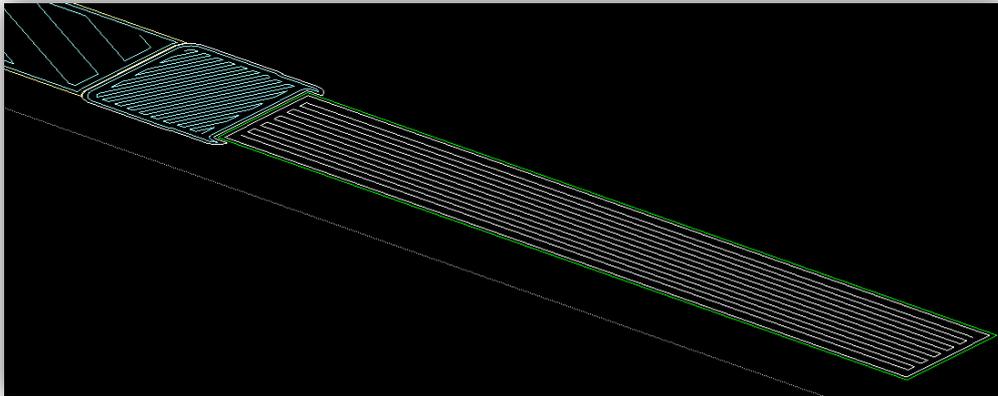


Fig. 6.3: riempimento del particolare con passate longitudinali

Consideriamo infine il numero dei contorni: singolo come da impostazioni standard o più passate. Si è optato per questa variabile in quanto è proprio dalle zone periferiche, sia interne che esterne che si propagano le cricche responsabili del cedimento del provino. Dunque con due contorni si pensa di offrire migliore difesa contro la formazione di fessurazioni a scapito però di una superficie di unione tra parte esterna e core leggermente peggiore.

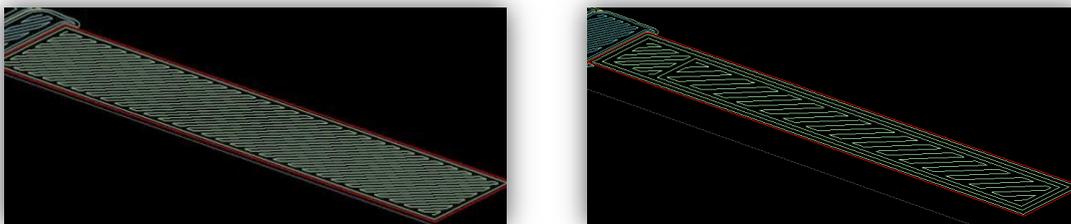


Fig. 6.4: provino ad un contorno a sinistra e provino con due contorni a destra

Dunque di tutti i parametri che la macchina può fornire, ne sono stati scelti quattro che si articolano ciascuno su due livelli; questo vuol dire che i campioni da testare saranno $4^2 = 16$. Per motivi sia di costo che di riduzione dei tempi di prova per ogni combinazione saranno valutati 3 provini al posto dei 5 richiesti dalla normativa.

Il provino utilizzato è quello specificato nella normativa ASTM D638, di tipo I:

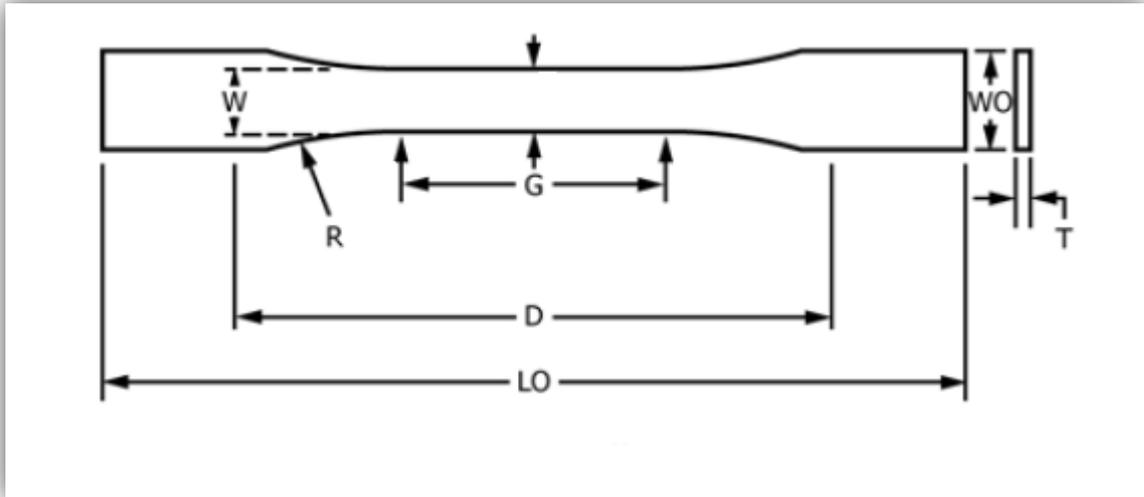


Fig. 6.5: quote provino tipo I

Possiamo notare le seguenti misure caratteristiche:

- LO: lunghezza totale – 165 mm
- D: distanza tra gli afferraggi – 115 mm
- G: lunghezza calibrata – 50 mm
- R: raggio di raccordo – 76 mm
- W: spessore della sezione sottile – 13 mm
- T: spessore – 7 mm
- WO: larghezza totale – 19 mm

Le prove sono state tutte eseguite con una velocità di 6 mm/min.

La sezione resistente misura dunque 7 mm x 13 mm e pertanto avrà un'area di 91 mm², se come indicato dalle specifiche tecniche Stratasys il carico di snervamento a trazione del materiale è 36 MPa, dovremmo ottenere una forza di circa 3,276 kN per portare a snervamento il provino.

Alla luce di ciò verrà usata la cella di carico più piccola tra quelle disponibili, ovvero da 10 kN in modo da ottenere la massima precisione possibile nella rilevazione dei dati.

Ecco una tabella che riassume le prove che verranno effettuate per la caratterizzazione a trazione:

PROVE DI TRAZIONE				
N	Spessore raster	Riempimento interno	Orientazione	N contorni
1)	0,1778	Solid	Macchina	1
2)	0,1778	Solid	Longitudinali	2
3)	0,1778	Solid	Macchina	1
4)	0,1778	Solid	Longitudinali	2
5)	0,1778	Sparse	Macchina	1
6)	0,1778	Sparse	Longitudinali	2
7)	0,1778	Sparse	Macchina	1
8)	0,1778	Sparse	Longitudinali	2
9)	0,254	Solid	Macchina	1
10)	0,254	Solid	Longitudinali	2
11)	0,254	Solid	Macchina	1
12)	0,254	Solid	Longitudinali	2
13)	0,254	Sparse	Macchina	1
14)	0,254	Sparse	Longitudinali	2
15)	0,254	Sparse	Macchina	1
16)	0,254	Sparse	Longitudinali	2

Per quanto riguarda invece le prove di compressione, i parametri presi in considerazione sono stati (vedi livelli riportati in grassetto):

-SPESSORE DI PASSATA :

1. **0,1778;**
2. **0,254;**
3. 0,3302.

-METODO DI RIEMPIMENTO, indica il grado di riempimento del particolare:

1. **Solid;**
2. **Sparse, high density;**
3. Sparse, low density;

4. Sparse, double dense.

In questo caso i parametri considerati sono in numero minore in quanto la prova di compressione risente meno delle possibili variabili dato che in primis la sezione resistente aumenta durante la prova e dunque è difficile che ad esempio cricche o fessurazioni compromettano la resistenza del provino, in secondo luogo non si va praticamente mai incontro ad una rottura vera e propria ma l'analisi dei dati rivela quando il materiale ha ceduto. Ecco una tabella che mostra il piano di prove:

PROVE DI COMPRESSIONE		
N	Spessore raster	Riempimento interno
1)	0,1778	Solid
2)	0,1778	Sparse
3)	0,254	Solid
4)	0,254	Sparse

Questo tipo di prova presenta numerose difficoltà, la prima è sicuramente quella della scelta di un provino congruo alle attrezzature possedute.

Infatti uno dei maggiori problemi, in questo caso, è il pericolo di cedimento del campione per *carico di punta*, ovvero la rottura di schianto che si ha quando il materiale sottoposto a carico di compressione ha una lunghezza libera di inflessione troppo elevata rispetto al suo raggio d'inerzia e dunque cede poiché la sua struttura risulta instabile e non per raggiunti limiti del materiale. Un indice di possibile cedimento a carico di punta è il *rapporto di snellezza* elevato, che la normativa restringe a 16:1 come valore massimo, definendolo come:

$$\lambda = \frac{L_0}{\rho_{min}}$$

Con L_0 lunghezza libera d'inflessione e ρ_{min} raggio d'inerzia minimo della sezione trasversale.

Quindi con lo scopo di semplificare i test e rendere più veloce la fase di set up dei campioni si è deciso di utilizzare come provino un cubo di spigolo un pollice (25,4 mm).

Esso non risentirà quindi dei problemi di carico di punta, sarà di facile preparazione e potrà essere testato con la cella di carico più grande, quella da 100 kN in modo da ottenere misure più precise possibili. Ecco come si presenta il provino:

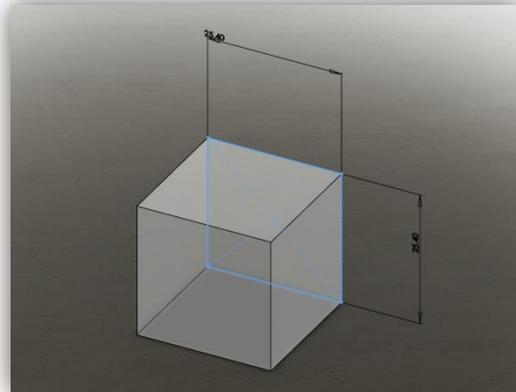


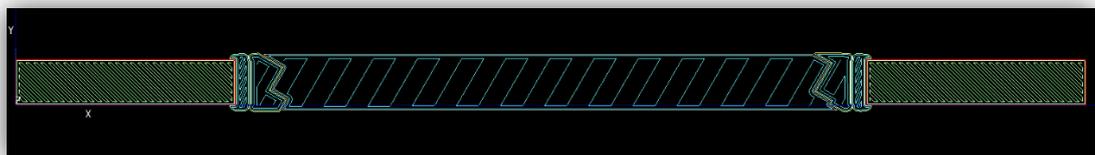
Fig. 6.6: provino a compressione

Esso avrà sezione resistente di $25,4 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm} = 645,16 \text{ mm}^2$, considerando che a seconda delle percentuali di acrilonitrile, butadiene e stirene, della “carica” (ovvero degli additivi introdotti con scopi specifici) e del peso molecolare si passa da resistenze a trazione (snervamento) che variano da 50 a 85 MPa, la forza necessaria per portare il materiale a snervamento oscillerà circa tra i 32,26 e i 54,84 kN.

ANALISI DEI PROVINI

Verranno ora passati in rassegna e analizzati tutti i provini stampati con la macchina, prima quelli a trazione poi a compressione.

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**

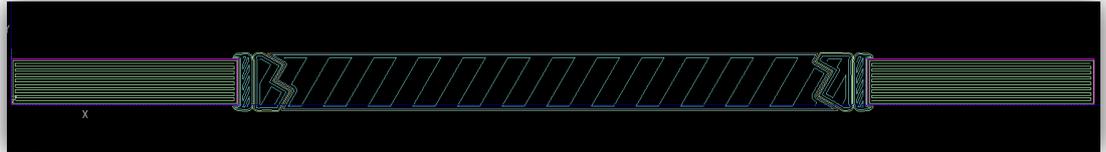


Tempo di costruzione: 2 h 51 minuti

Volume del materiale modello: 20,302 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**

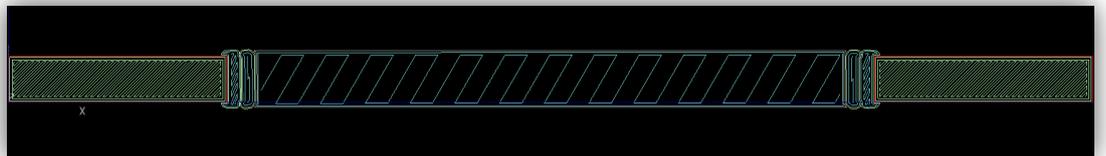


Tempo di costruzione: 1h 24 minuti

Volume del materiale modello: 19,527 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**

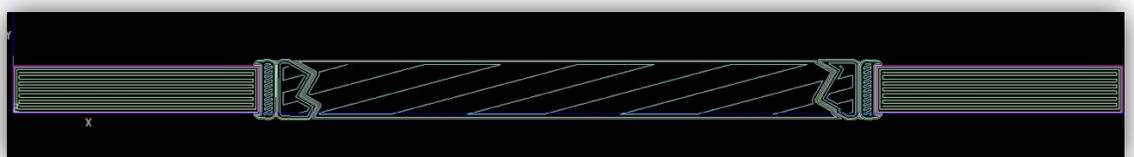


Tempo di costruzione: 2 h 31 minuti

Volume del materiale modello: 16,253 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**

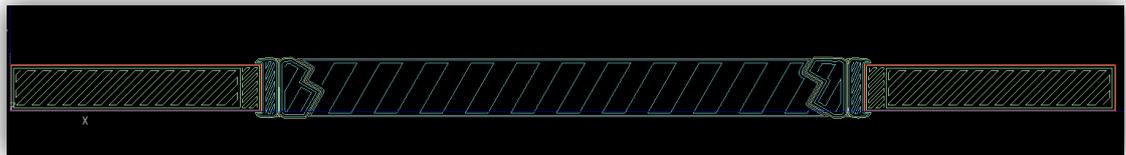


Tempo di costruzione: 1 h 31 minuti

Volume del materiale modello: 19,814 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,840 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**

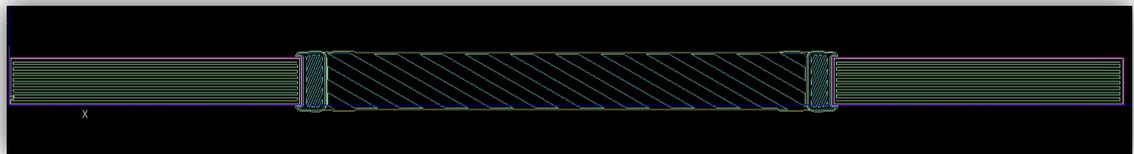


Tempo di costruzione: 2 h 7 minuti

Volume del materiale modello: 15,469 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**



Tempo di costruzione: 1 h 24 minuti

Volume del materiale modello: 19,527 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**

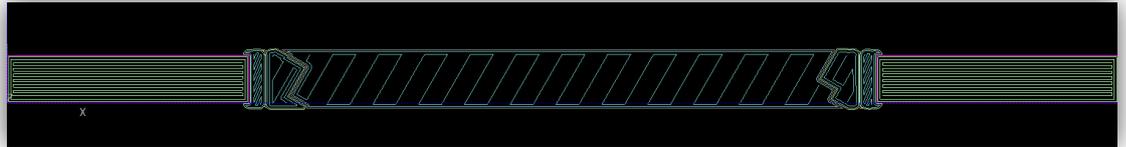


Tempo di costruzione: 2 h 31 minuti

Volume del materiale modello: 16,161 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**



Tempo di costruzione: 1 h 58 minuti

Volume del materiale modello: 15,951 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,858 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**

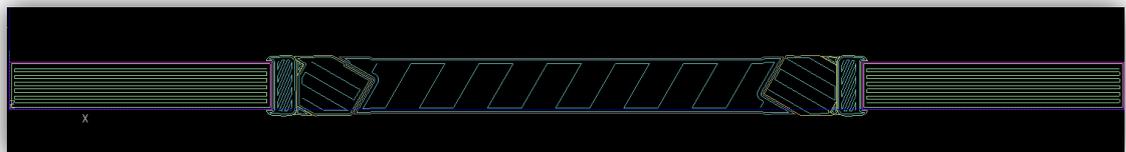


Tempo di costruzione: 1 h 33 minuti

Volume del materiale modello: 20,222 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**

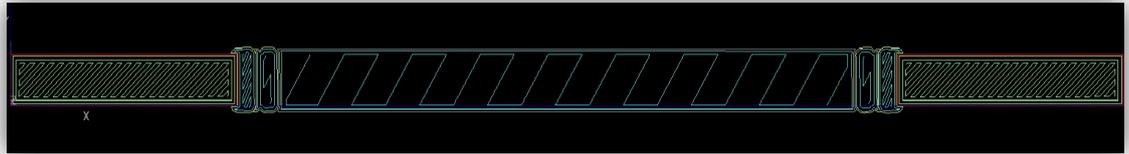


Tempo di costruzione: 49 minuti

Volume del materiale modello: 18,868 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Tempo di costruzione: 1 h 32 minuti

Volume del materiale modello: 20,141 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**

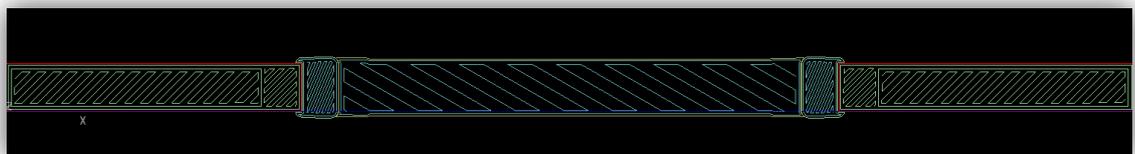


Tempo di costruzione: 55 minuti

Volume del materiale modello: 18,880 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**

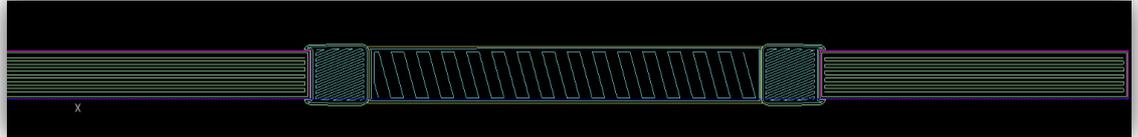


Tempo di costruzione: 1 h 19 minuti

Volume del materiale modello: 16,141 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALI, 1 CONTORNO:**



Tempo di costruzione: 48 minuti

Volume del materiale modello: 18.866 cm³

Volume del materiale di supporto: 2,953 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Tempo di costruzione: 1h 38 minuti

Volume del materiale modello: 20,246 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**

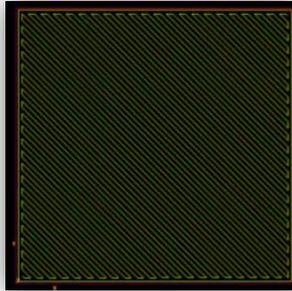


Tempo di costruzione: 54 minuti

Volume del materiale modello: 19,727 cm³

Volume del materiale di supporto: 3,040 cm³

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,1778, SOLID:**

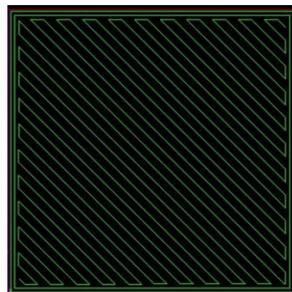


Tempo di costruzione: 1h 28 minuti

Volume del materiale modello: 16,769 cm³

Volume del materiale di supporto: 0,737 cm³

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,1778 SPARSE:**

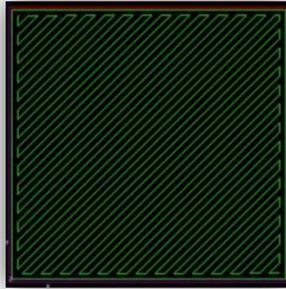


Tempo di costruzione: 1h

Volume del materiale modello: 11,753 cm³

Volume del materiale di supporto: 0,737 cm³

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,254, SOLID:**

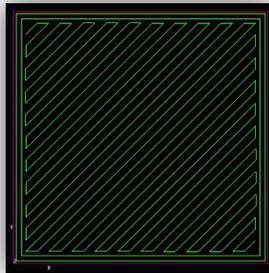


Tempo di costruzione: 41 minuti

Volume del materiale modello: 16,749 cm³

Volume del materiale di supporto: 0,746 cm³

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,254, SPARSE:**



Tempo di costruzione: 38 minuti

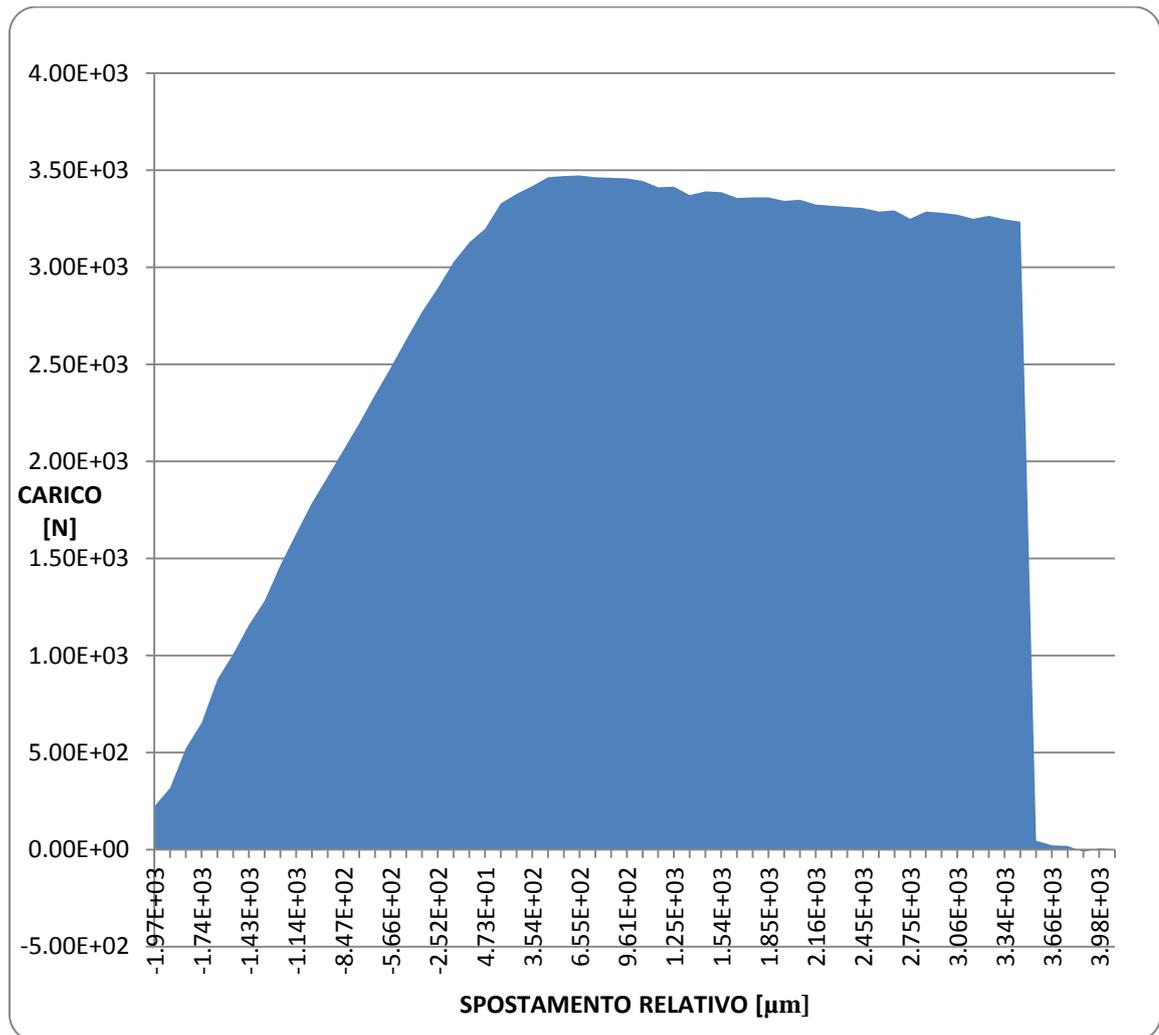
Volume del materiale modello: 12,099 cm³

Volume del materiale di supporto: 0,746 cm³

RISULTATI SPERIMENTALI

Verranno ora presentati i risultati ottenuti per le prove sia di trazione che di compressione. Si ricorda che i provini sono stati testati ad una velocità di **6 mm/min**.

- **PROVINO A TRAZIONE: 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 38,18 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 5,23 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,09 GPa

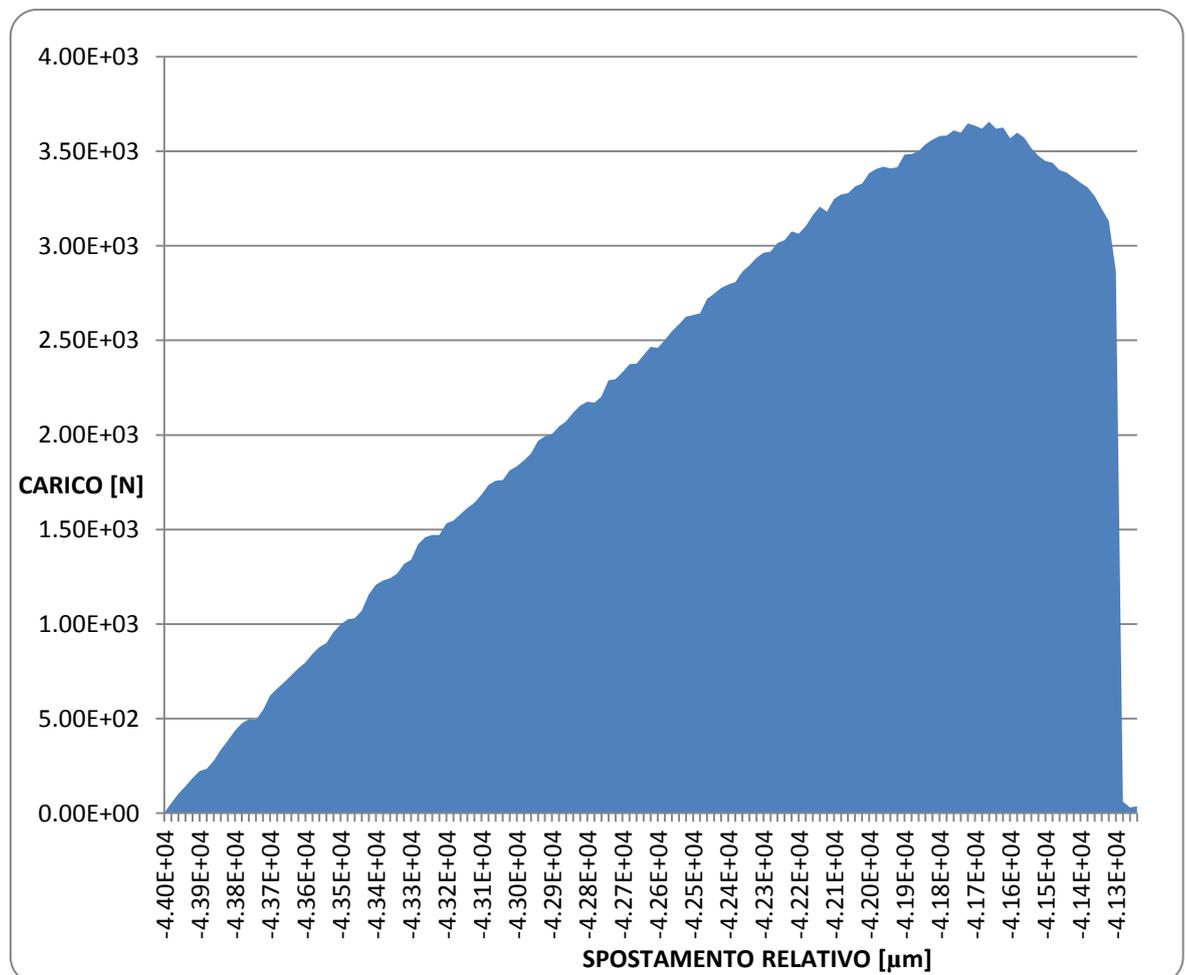
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 36,38 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,32 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,10 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,36 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,68 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,10 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE: 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,17 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,45%

- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,61 GPa

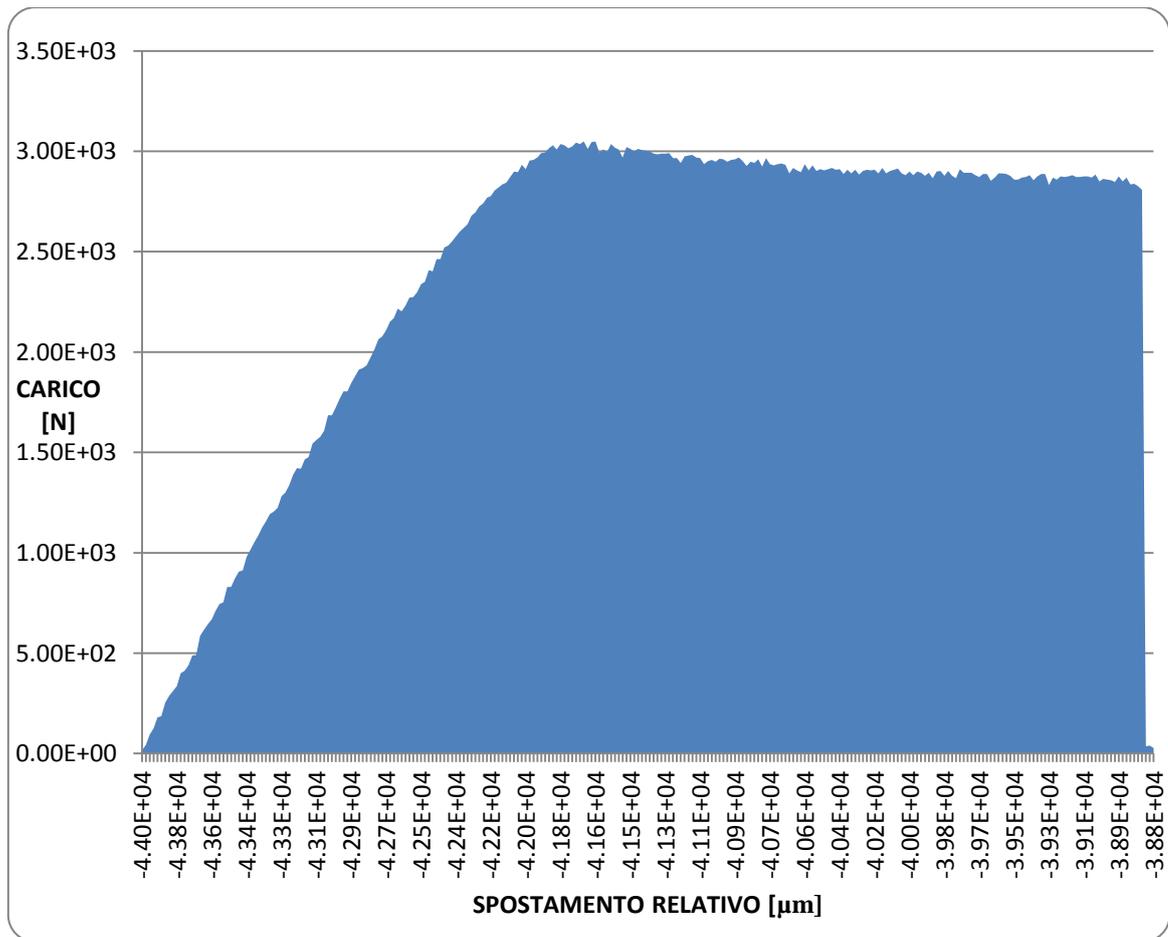
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,08 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,15 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,97 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 39,64 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,37 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,55 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 33,10 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 5,01 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,90 GPa

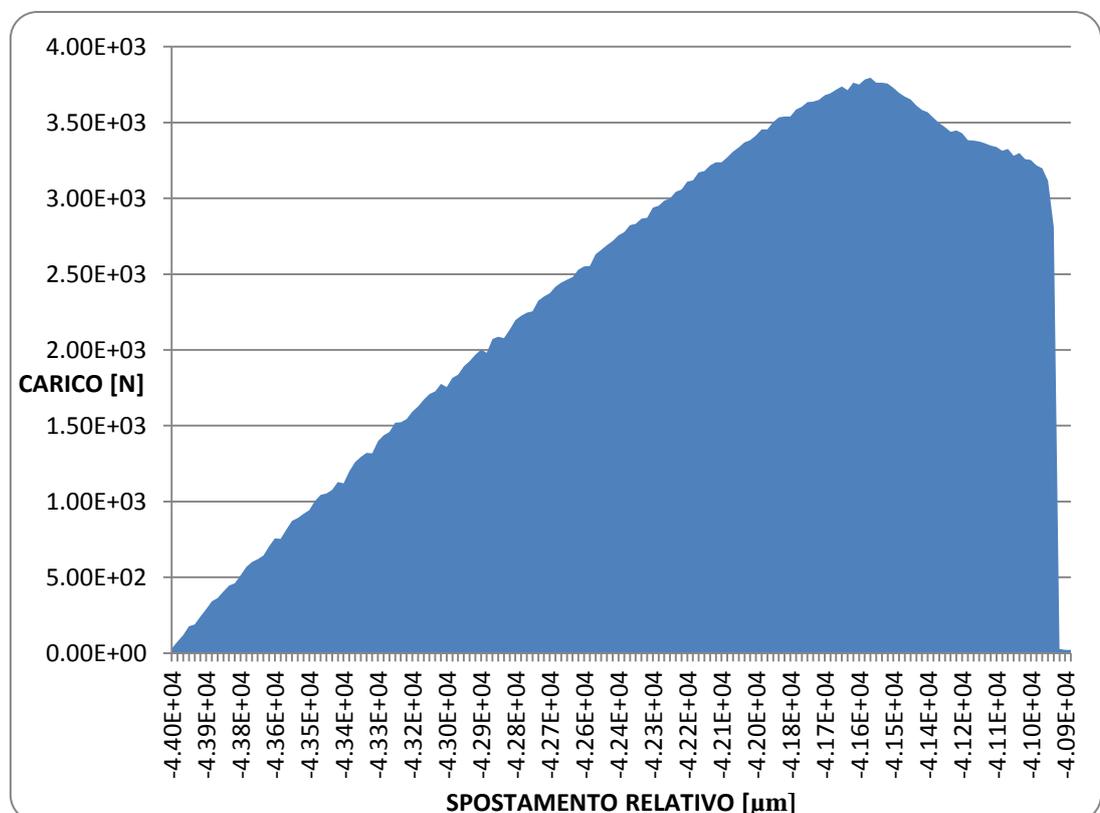
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 33,51 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,59 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,59 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 34,18 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,35%
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,21 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 41,71 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,04 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,31 GPa

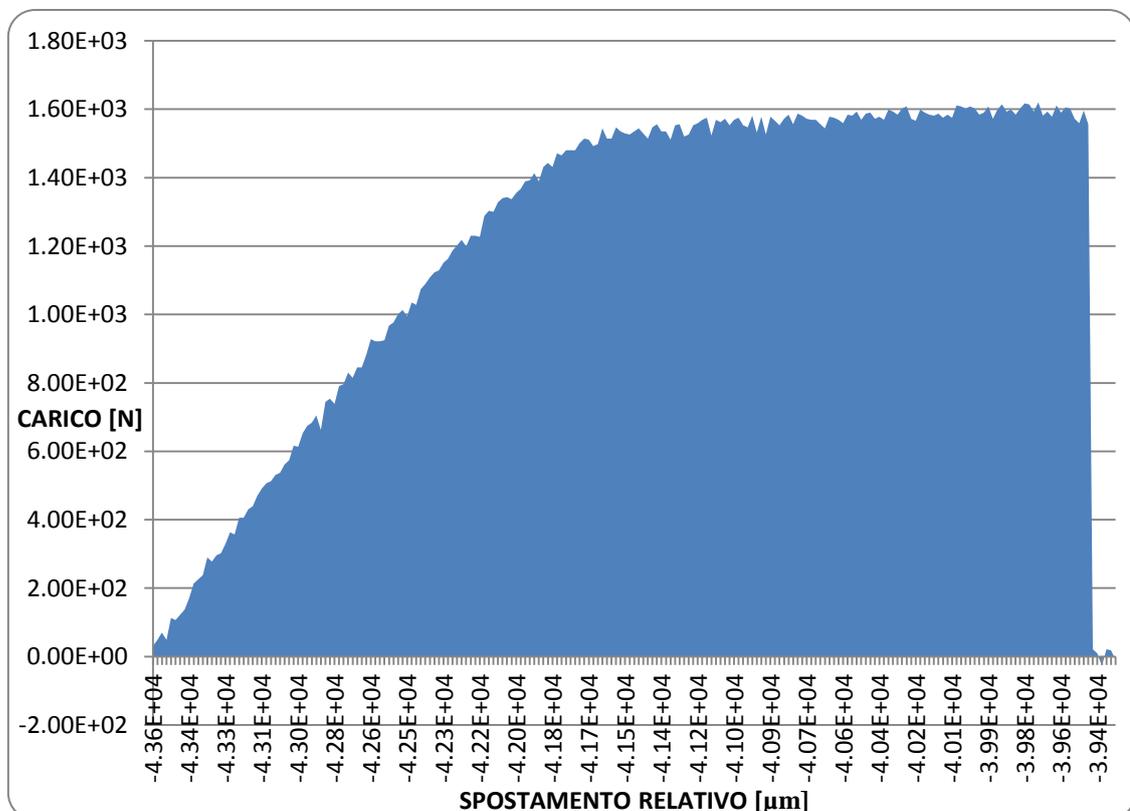
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,58 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,84 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,16 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,01 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,38 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,59 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 17,80 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,92 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 0,9 GPa

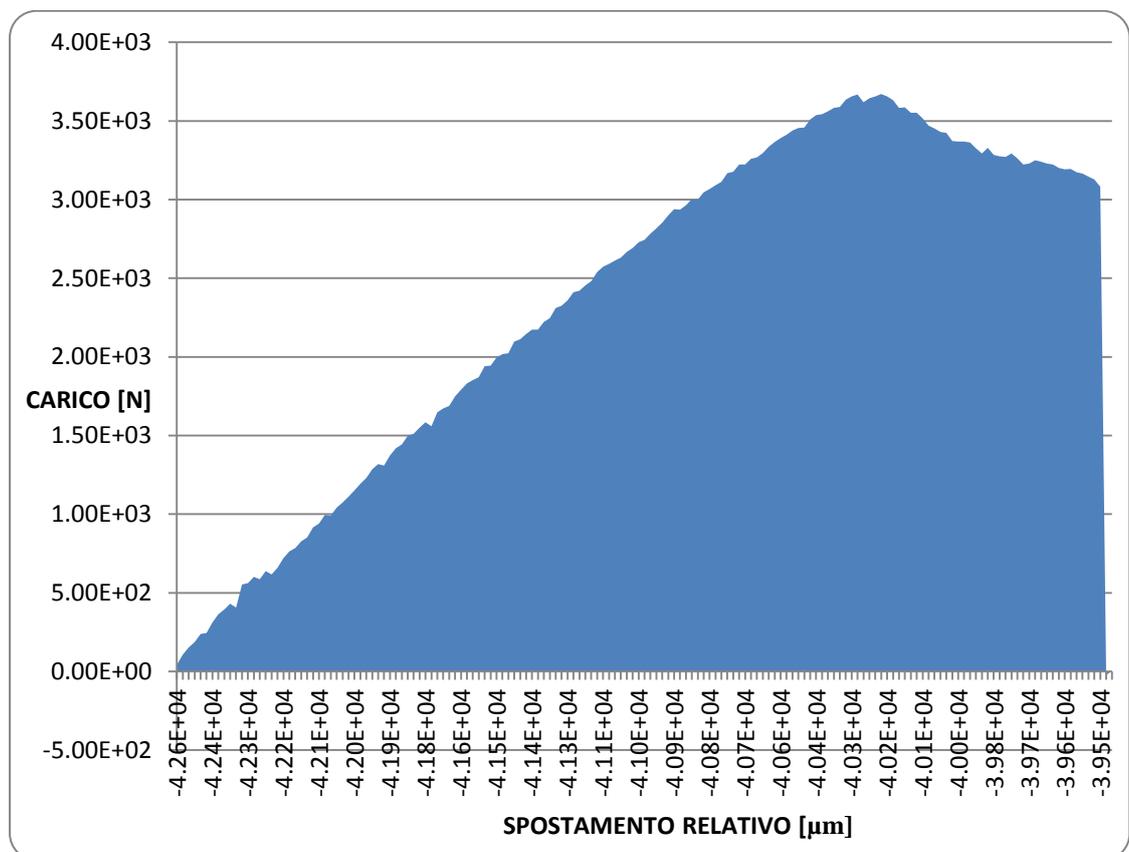
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 17,54 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,38 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,12 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 17,54 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,03 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 0,98 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 43,56 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,90 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,53 GPa

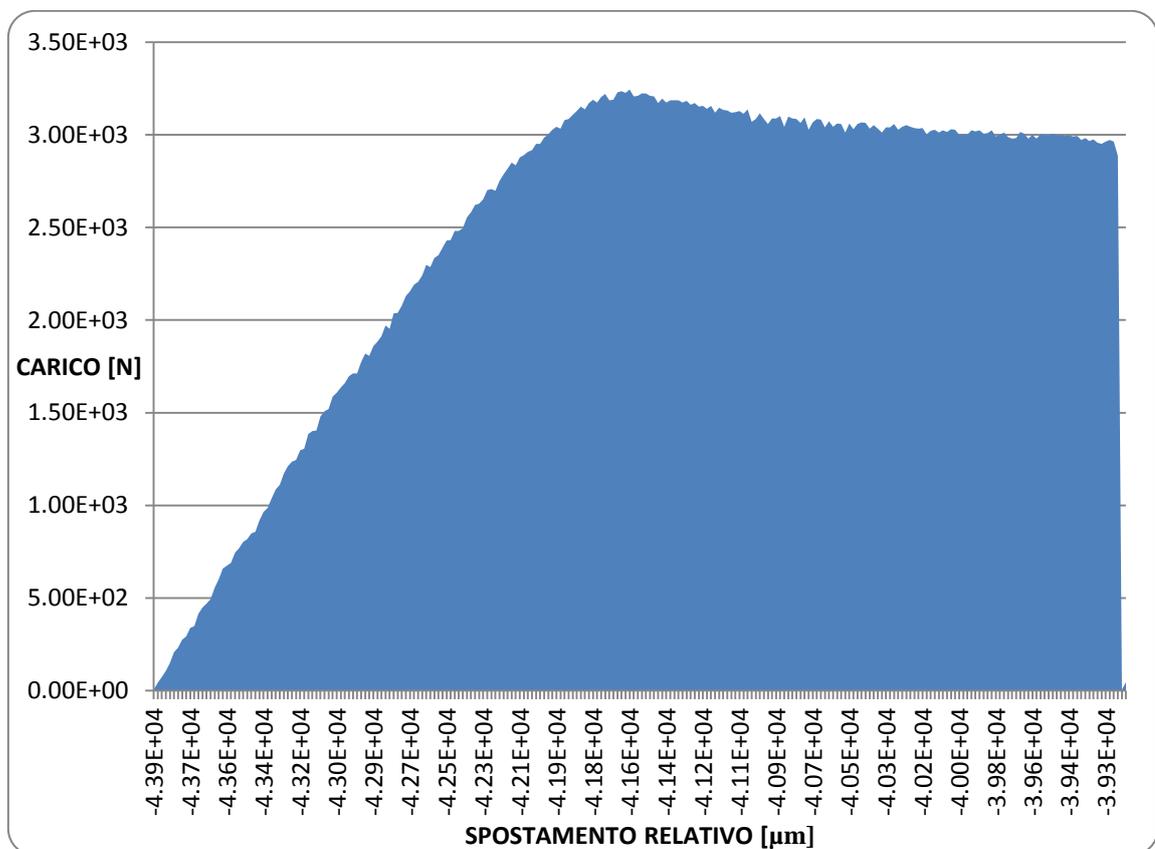
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,34 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,91 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,01 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 38,76 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,21 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,61 GPa

• **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI
MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,65 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,19 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,13 GPa

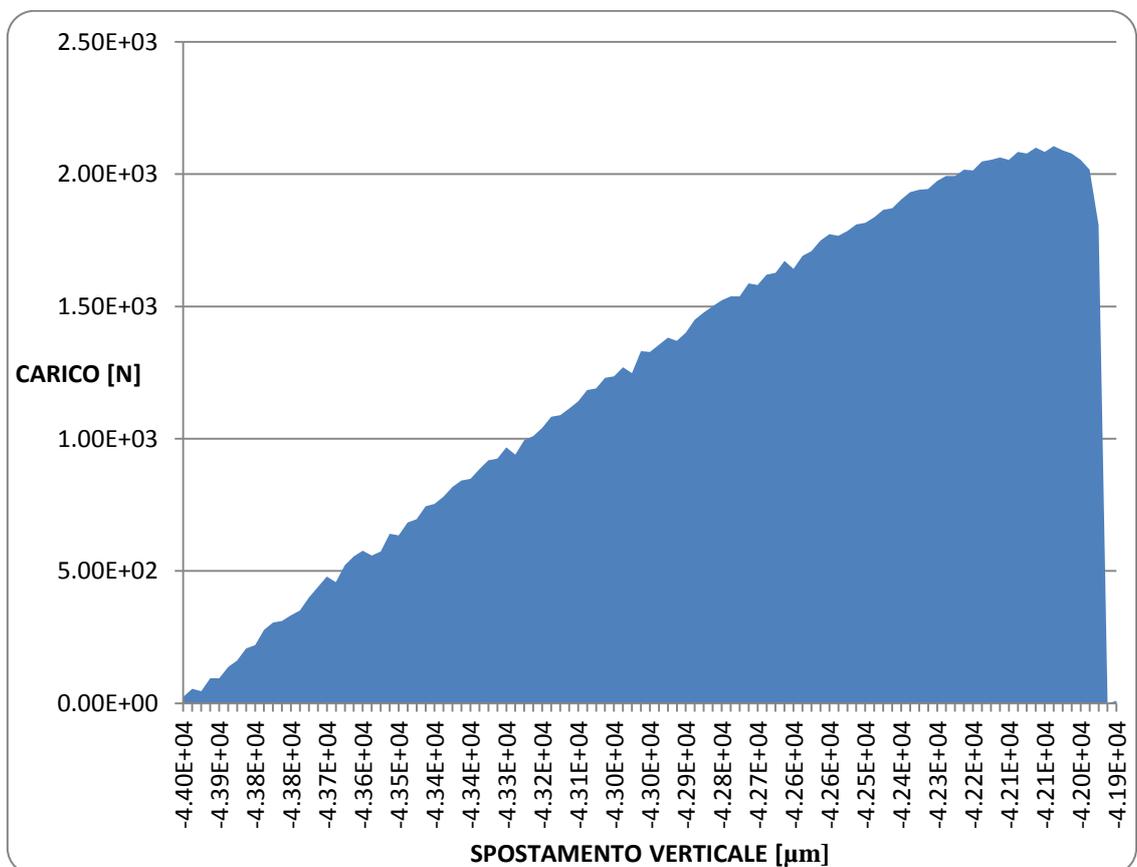
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,24 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,86 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,41 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,32 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,45 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,31 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,1778, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 23,08 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 1,87 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,49 GPa

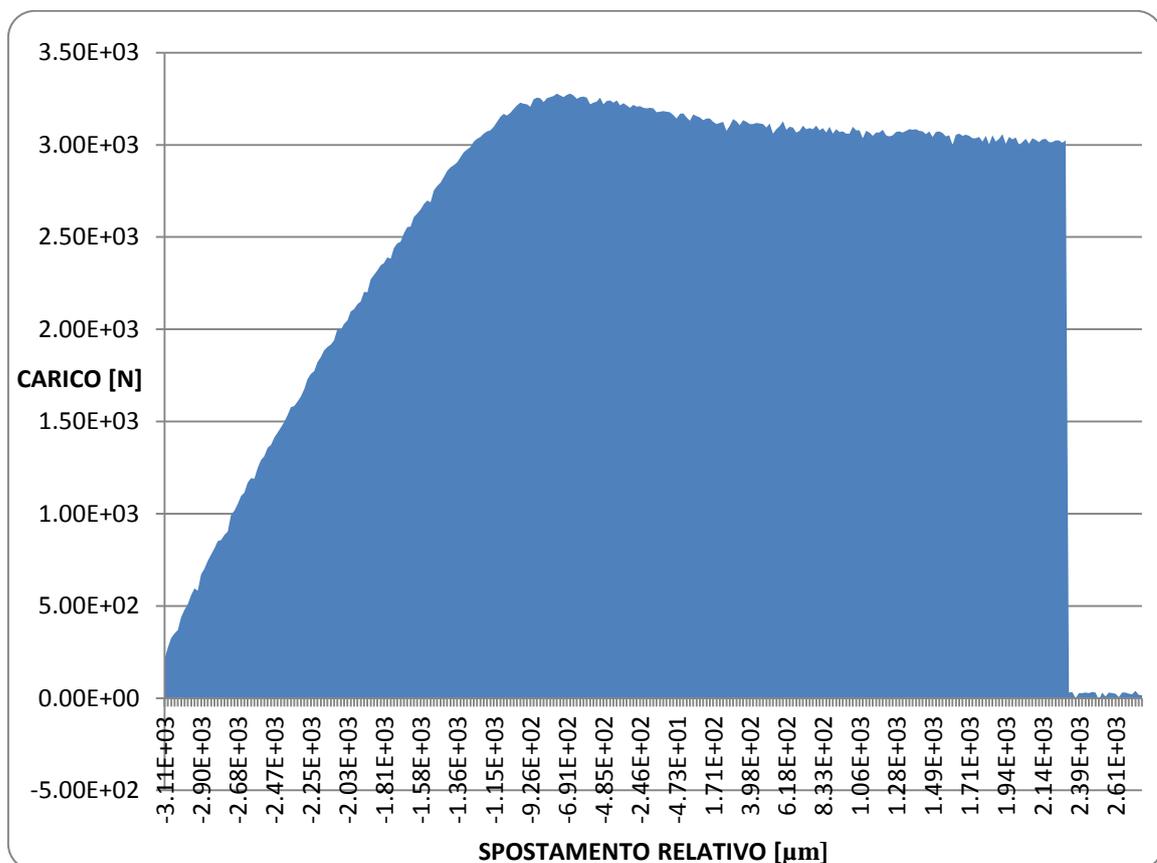
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 23,51 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 1,61 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,92 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 23,21 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,03 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,77 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 36,02 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,72 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,69 GPa

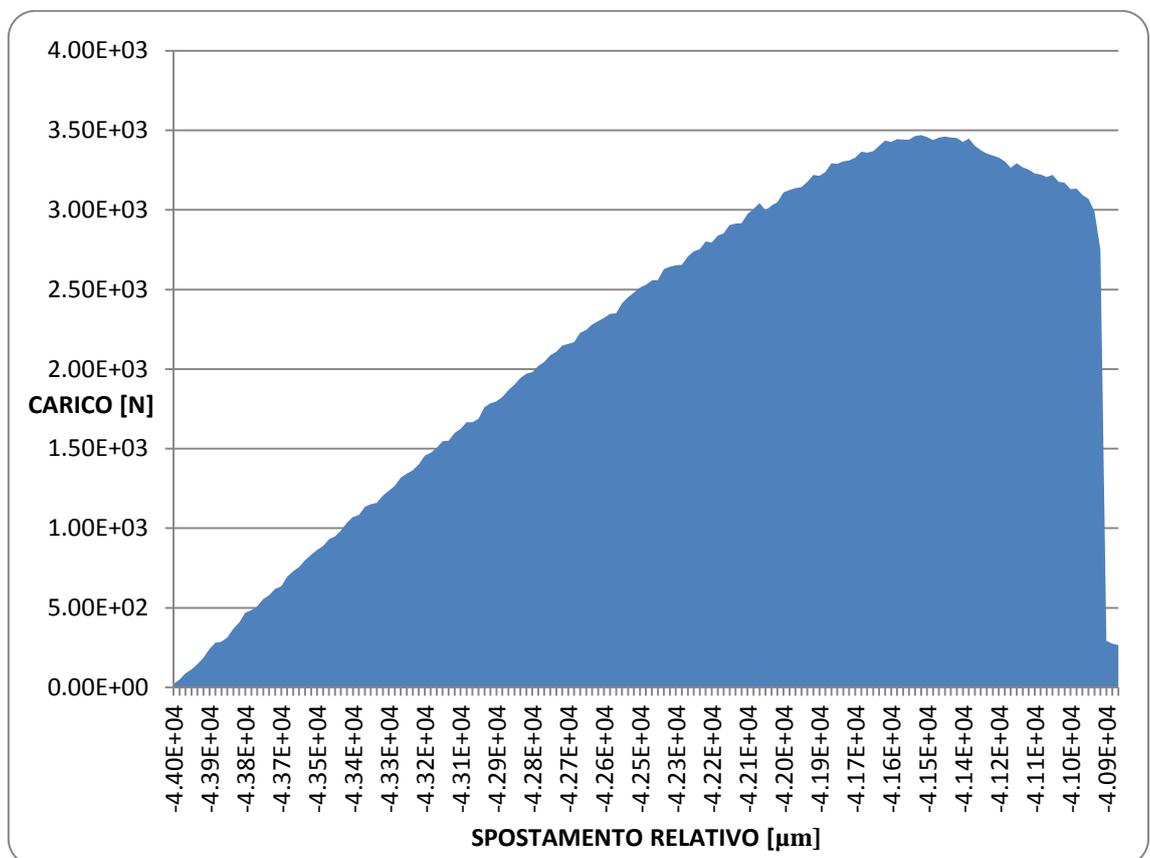
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,94 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,17 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,83 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,81 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,95 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,28 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254 SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 38,13 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,76 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,08 GPa

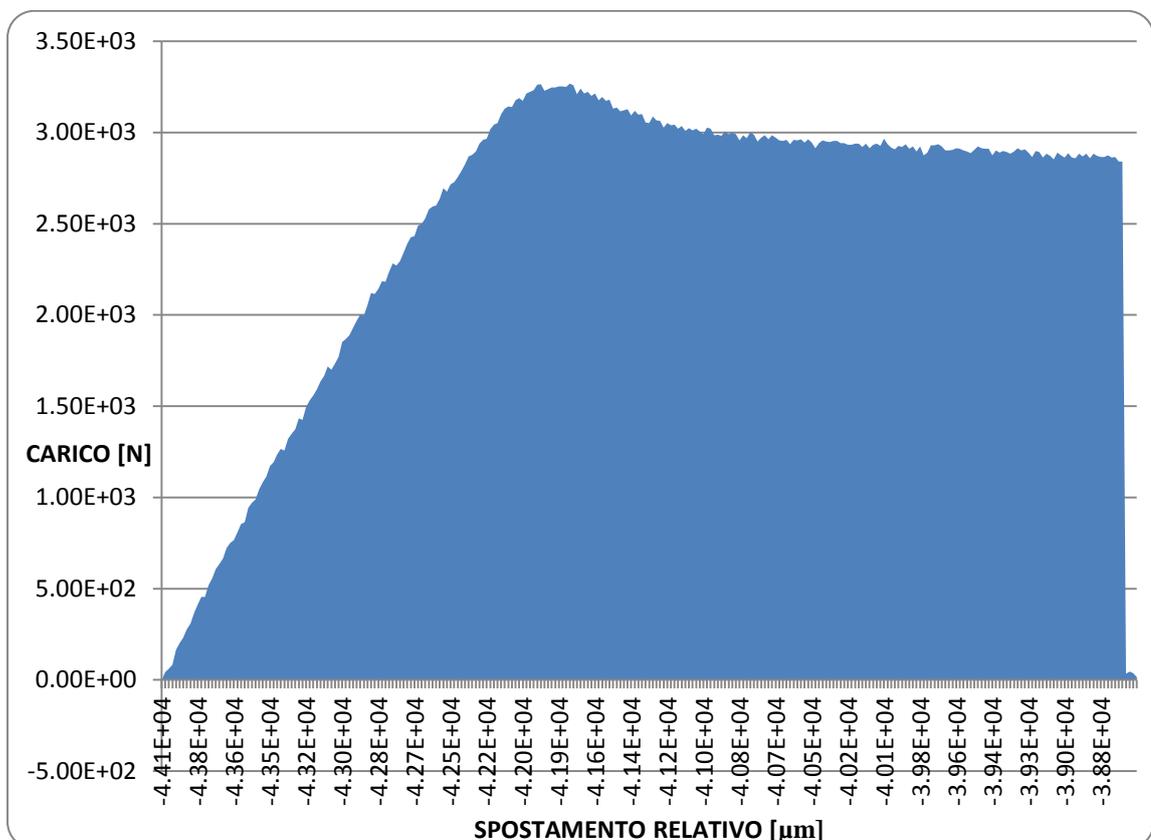
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,32 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 1,95 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,08 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 38,64 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,77 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,30 GPa

• **PROVINO A TRAZIONE, 0,254 SOLID, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,91 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,64 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,39 GPa

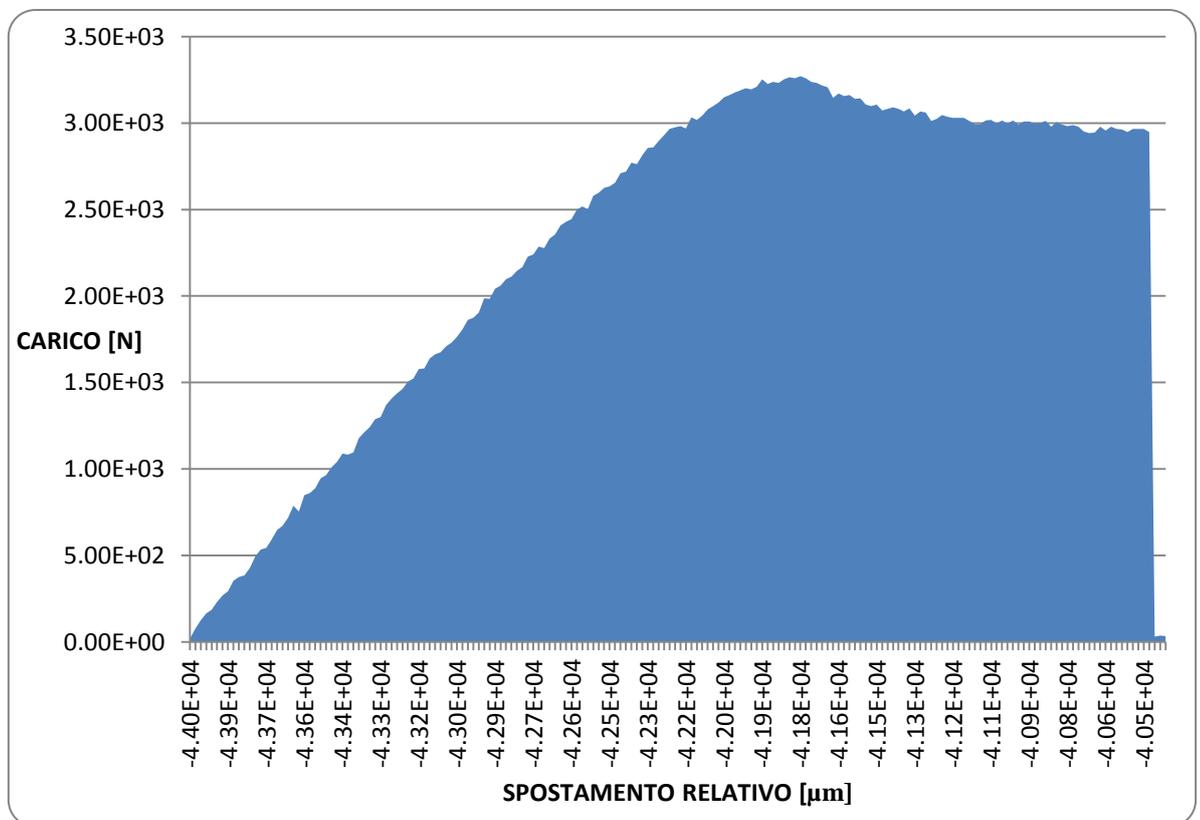
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 36,25 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,89 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,28 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 36,65 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,93 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,18 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254 SOLID, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 35,94 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,14 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,28 GPa

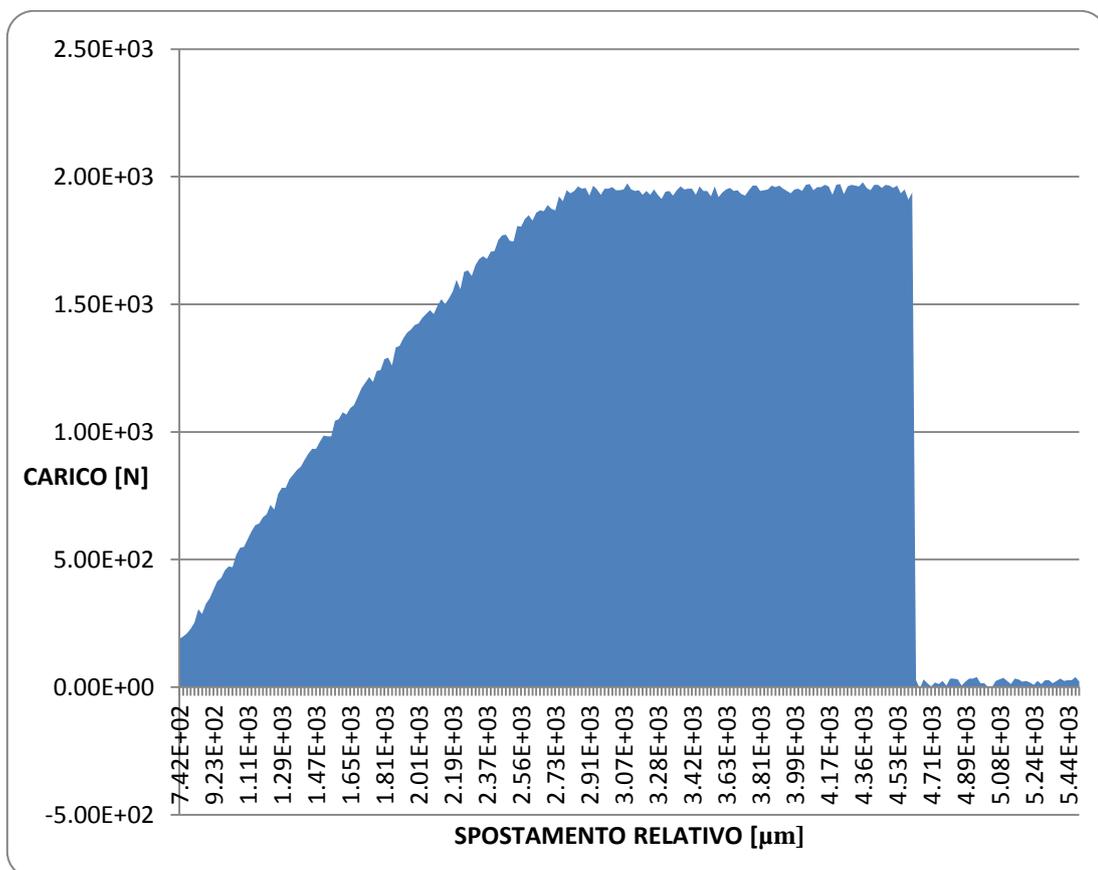
Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 36,48 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,55 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,23 GPa

Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 31,10 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,01%
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,14 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254 SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 21,63 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 4,14 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,32 GPa

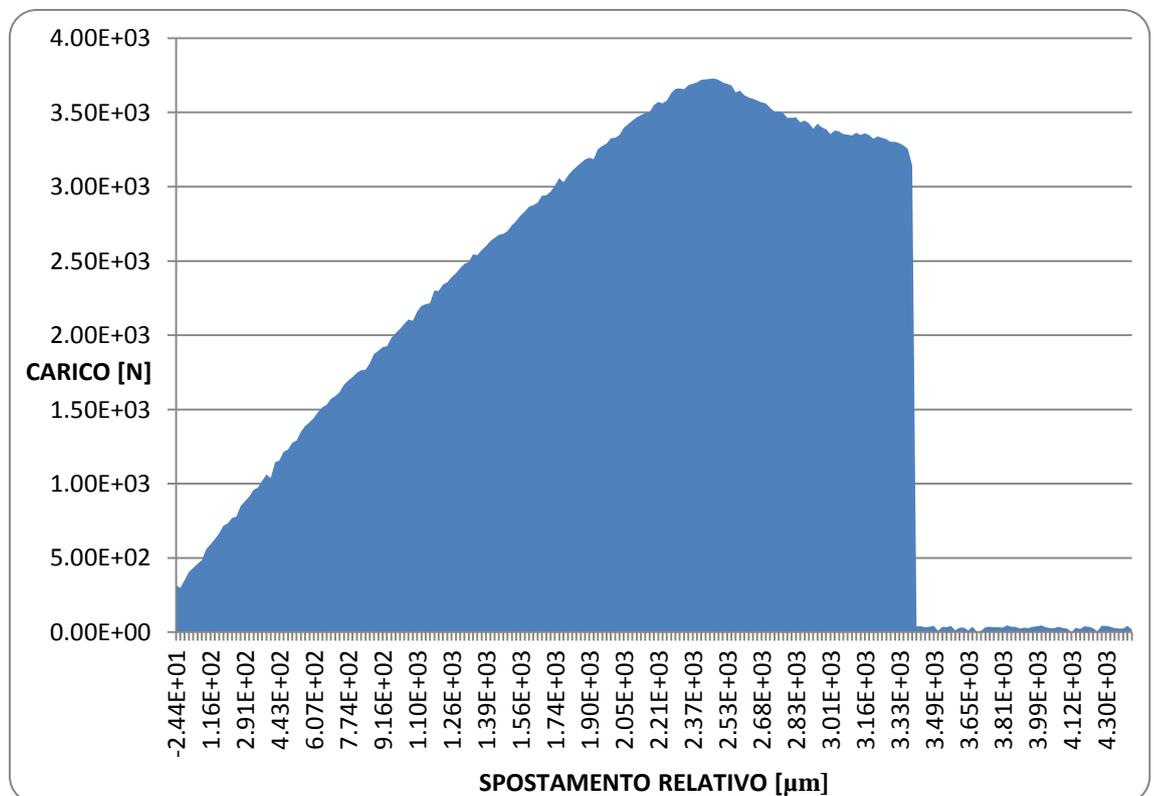
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 21,46 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,10 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,30 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 21,41 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,05 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,34 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 1 CONTORNO:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,97 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,61 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,24 GPa

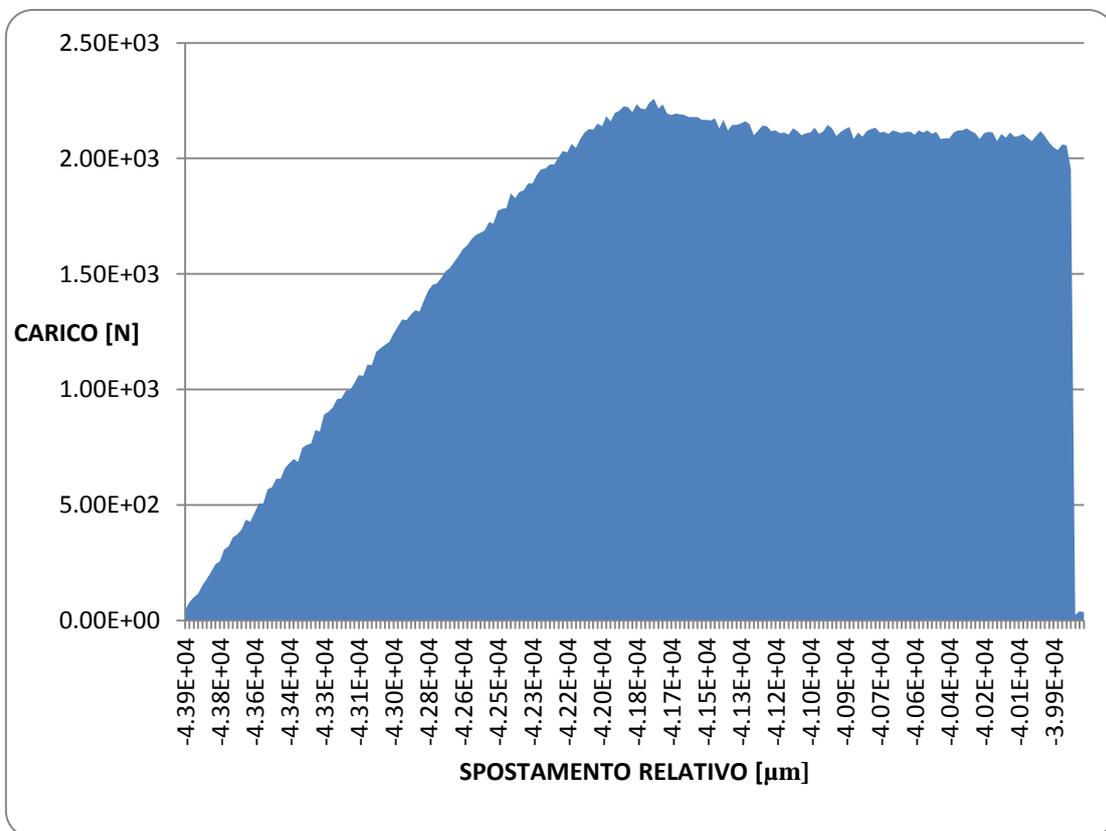
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,78 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,73 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,06 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 40,61 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,56 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 2,04 GPa

- **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI MACCHINA, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 24,81 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,71 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,41 GPa

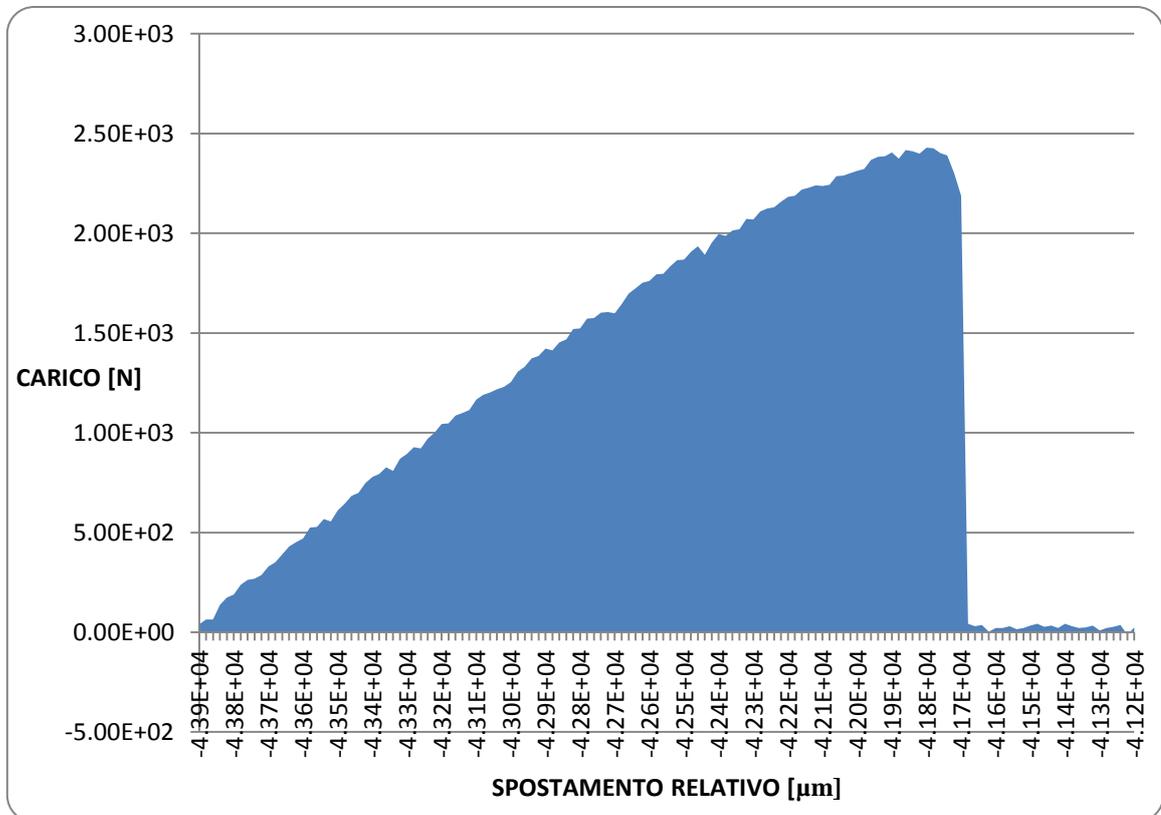
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 24,85 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,89 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,44 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 24,78 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 3,52 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,45 GPa

• **PROVINO A TRAZIONE, 0,254, SPARSE, RASTER ORIENTATI LONGITUDINALMENTE, 2 CONTORNI:**



Provino A:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 26,70 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2%
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,57 GPa

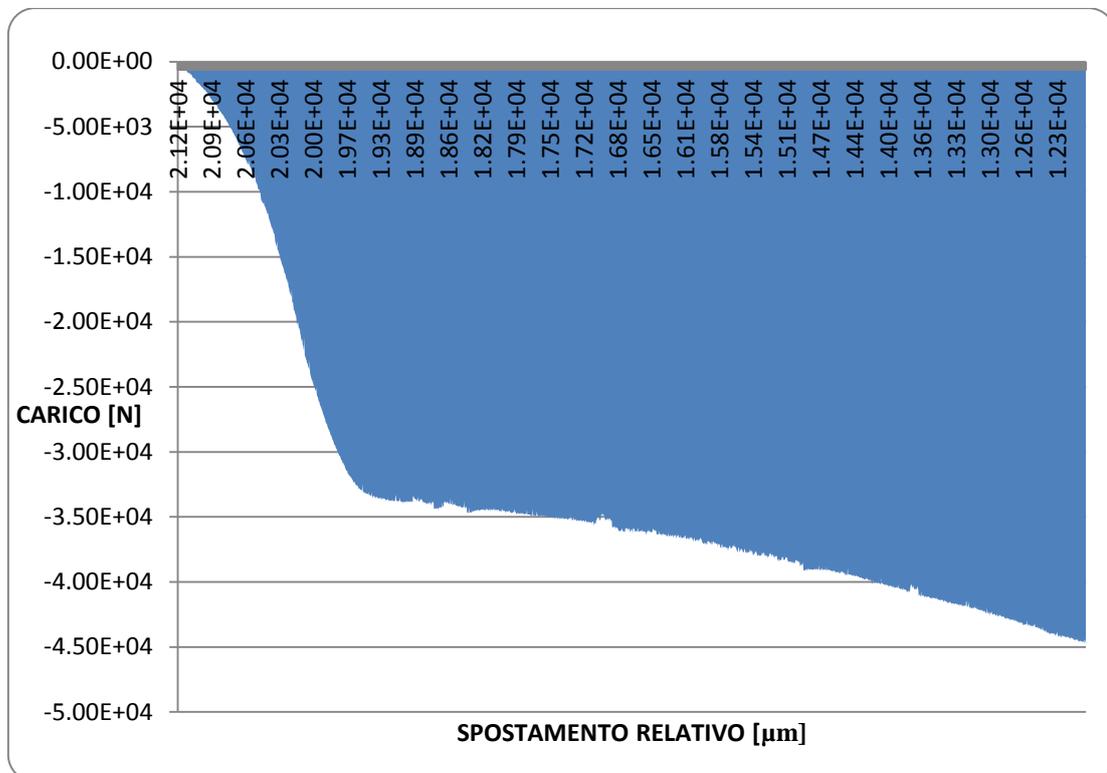
Provino B:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 26,63 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 1,98 %
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,81 GPa

Provino C:

- Tensione di rottura (*ultimate tensile strength*): 26,66 MPa
- Allungamento nominale a rottura (*nominal strain at break*): 2,24%
- Modulo elastico E (*Young modulus*): 1,62 GPa

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,1778 SOLID:**



Provino A:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 49,03 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,99 GPa

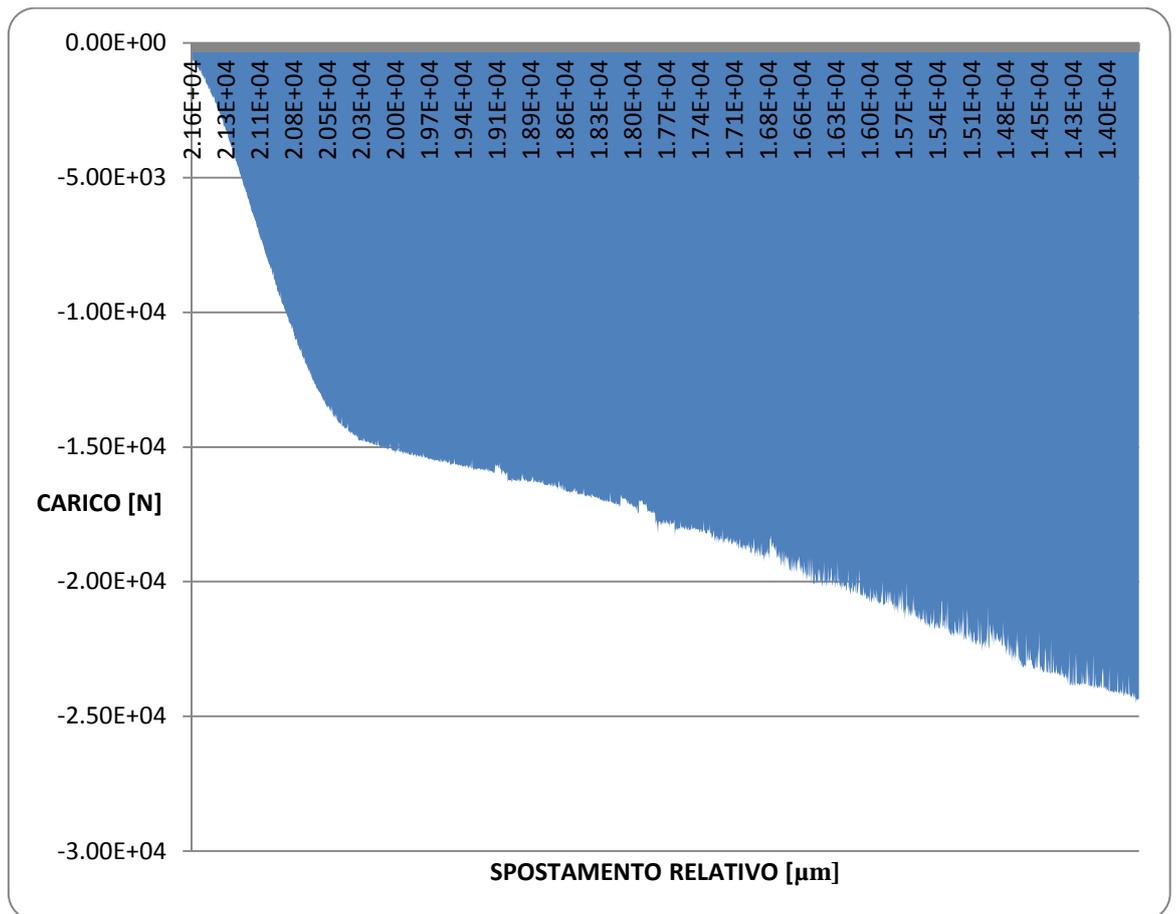
Provino B:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 50,67 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,90 GPa

Provino C:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 52,42 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,85 GPa

- **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,1778 SPARSE:**



Provino A:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 24,77 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,36 GPa

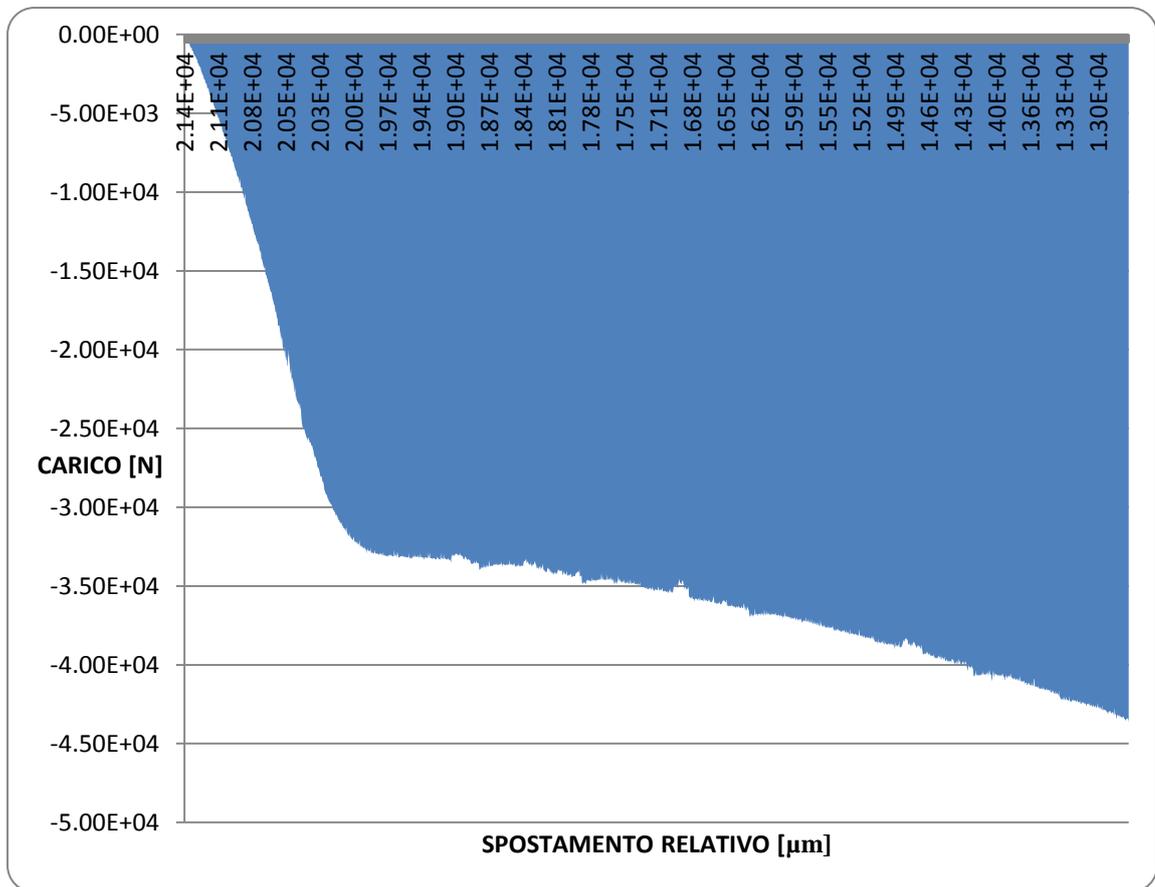
Provino B:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 23,76 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,55 GPa

Provino C:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 23,45 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,55 GPa

• **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,254 SOLID:**



Provino A:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 51,32 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 1,02 GPa

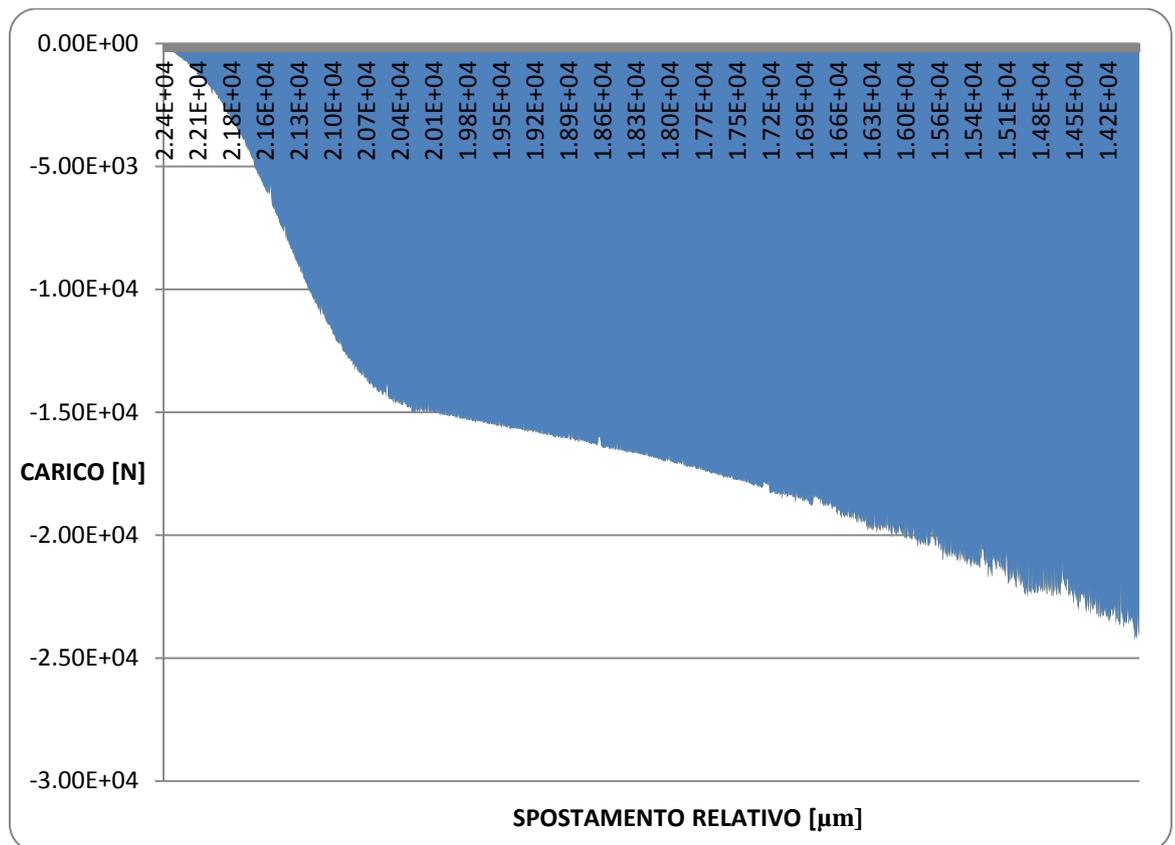
Provino B:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 52,20 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,99 GPa

Provino C:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 51,59 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,98 GPa

• **PROVINO A COMPRESSIONE, 0,254 SPARSE:**



Provino A:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 22,89 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,35 GPa

Provino B:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 23,20 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,53 GPa

Provino C:

- Tensione massima a snervamento (*compressive yield strength*): 23,14 MPa
- Modulo elastico E (*modulus of elasticity*): 0,65 GPa

Capitolo 7

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo verranno analizzati i risultati dei test sui provini precedentemente presentati con l'ausilio del metodo DOE e delle linee guida sui calcoli espresse nelle normative riportate.

Per prima cosa si riassumono in una tabella generale i risultati ottenuti per tutti i campioni testati:

TRAZIONE

TIPO DI PROVINO	Tensione a rottura [MPa]	Allungamento nom. %	Modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno	a) 38,18 b) 36,38 c) 35,36	a) 5,23 b) 4,32 c) 4,68	a) 2,09 b) 2,10 c) 2,10
0,1778 Solid orient. long. 1 contorno	a) 40,17 b) 40,08 c) 39,64	a) 2,45 b) 2,15 c) 2,37	a) 2,61 b) 2,97 c) 2,55
0,1778 Solid orient. macch. 2 contorni	a) 33,10 b) 33,51 c) 34,18	a) 5,01 b) 4,59 c) 4,35	a) 2,90 b) 2,59 c) 2,21
0,1778 Solid orient. long. 2 contorni	a) 41,71 b) 40,58 c) 40,01	a) 3,04 b) 2,84 c) 2,38	a) 2,31 b) 2,16 c) 2,59
0,1778 Sparse orient. macch. 1 contorno	a) 17,80 b) 17,54 c) 17,54	a) 3,92 b) 3,38 c) 3,03	a) 0,9 b) 1,12 c) 0,98
0,1778 Sparse orient. long. 1 contorno	a) 43,56 b) 40,34 c) 38,76	a) 3,90 b) 2,91 c) 2,21	a) 2,53 b) 2,01 c) 2,61
0,1778 Sparse orient. macch. 2 contorni	a) 35,65 b) 35,24 c) 35,32	a) 4,19 b) 4,86 c) 3,45	a) 2,13 b) 2,41 c) 2,31
0,1778 Sparse orient. long. 2 contorni	a) 23,08 b) 23,51 c) 23,21	a) 1,87 b) 1,61 c) 2,03	a) 1,49 b) 1,92 c) 1,77
0,254 Solid orient. macch. 1 contorno	a) 36,02 b) 40,94 c) 35,81	a) 4,72 b) 3,17 c) 3,95	a) 2,68 b) 2,83 c) 2,28
0,254 Solid orient. long. 1 contorno	a) 38,13 b) 35,32 c) 38,64	a) 2,76 b) 1,95 c) 2,77	a) 2,08 b) 2,08 c) 2,30

0,254 Solid orient. macch. 2 contorni	a) 35,91 b) 36,25 c) 36,65	a) 4,64 b) 4,89 c) 4,93	a) 2,39 b) 2,28 c) 2,18
0,254 Solid orient. long. 2 contorni	a) 35,94 b) 36,48 c) 31,10	a) 3,14 b) 3,55 c) 3,01	a) 2,28 b) 2,23 c) 2,14
0,254 Sparse orient. macch. 1 contorno	a) 21,63 b) 21,46 c) 21,41	a) 4,14 b) 3,10 c) 3,05	a) 1,32 b) 1,30 c) 1,34
0,254 Sparse orient. long. 1 contorno	a) 40,97 b) 40,78 c) 40,61	a) 3,61 b) 2,73 c) 2,56	a) 2,24 b) 2,06 c) 2,04
0,254 Sparse orient. macch. 2 contorni	a) 24,81 b) 24,85 c) 24,78	a) 3,71 b) 3,89 c) 3,52	a) 1,41 b) 1,44 c) 1,45
0,254 Sparse orient. long. 2 contorni	a) 26,70 b) 26,63 c) 26,66	a) 2 b) 1,98 c) 2,24	a) 1,57 b) 1,81 c) 1,62

COMPRESSIONE

TIPO DI PROVINO	Tensione massima [MPa]	Modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid	a) 49,03 b) 50,67 c) 52,42	a) 0,99 b) 0,90 c) 0,85
0,1778 Sparse	a) 24,77 b) 23,76 c) 23,45	a) 0,36 b) 0,55 c) 0,55
0,254 Solid	a) 51,32 b) 52,20 c) 51,59	a) 1,02 b) 0,99 c) 0,98
0,254 Sparse	a) 22,89 b) 23,20 c) 23,14	a) 0,35 b) 0,53 c) 0,65

In secondo luogo, nella seguente tabella riporteremo i principali dati costruttivi:

TRAZIONE

TIPO DI PROVINO	Tempo di costruzione	Volume di materiale modello
0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno	2 h 51 minuti	20,302 cm ³
0,1778 Solid orient. long. 1 contorno	1h 24 minuti	19,527 cm ³
0,1778 Solid orient. macch. 2 contorni	2 h 31 minuti	16,253 cm ³
0,1778 Solid orient. long. 2 contorni	1 h 31 minuti	19,814 cm ³
0,1778 Sparse orient. macch. 1 contorno	2 h 7 minuti	15,469 cm ³
0,1778 Sparse orient. long. 1 contorno	1 h 24 minuti	19,527 cm ³
0,1778 Sparse orient.	2 h 31 minuti	16,161 cm ³

macch. 2 contorni		
0,1778 Sparse orient. long. 2 contorni	1 h 58 minuti	15,951 cm ³
0,254 Solid orient. macch. 1 contorno	1 h 33 minuti	20,222 cm ³
0,254 Solid orient. long. 1 contorno	49 minuti	18,868 cm ³
0,254 Solid orient. macch. 2 contorni	1 h 32 minuti	20,141 cm ³
0,254 Solid orient. long. 2 contorni	55 minuti	18,880 cm ³
0,254 Sparse orient. macch. 1 contorno	1 h 19 minuti	16,141 cm ³
0,254 Sparse orient. long. 1 contorno	48 minuti	18.866 cm ³
0,254 Sparse orient. macch. 2 contorni	1h 38 minuti	20,246 cm ³
0,254 Sparse orient. long. 2 contorni	54 minuti	19,727 cm ³

COMPRESSIONE

TIPO DI PROVINO	Tempo di costruzione	Volume di materiale modello
0,1778 Solid	1h 28 minuti	16,769 cm ³
0,1778 Sparse	1h	11,753 cm ³
0,254 Solid	41 minuti	16,749 cm ³
0,254 Sparse	38 minuti	12,099 cm ³

Per prima cosa dobbiamo notare che tra il provino a trazione realizzato impiegando più materiale, “0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno” , e quello realizzato con meno materiale, “0,1778 Sparse orient. macch. 1 contorno” la differenza di volume è notevole.

Per il primo infatti sono stati usati 20,302 cm³ di materiale, per un peso di 21,52 grammi mentre per il secondo 15,469 cm³ per un peso di 16,4 grammi. Percentualmente parlando la differenza è del 23,8%.

In secondo luogo, si tratta di due provini con spessore del raster impostato a 0,1778 mm. Questa opzione garantisce generalmente un miglior riempimento e finitura superficiale ma fa allungare in maniera considerevole i tempi di lavoro macchina. Rispettivamente 2h e 51 minuti per la versione Solid (quindi con il massimo riempimento interno) contro 2h e 7 minuti della versione omologa ma in modalità Sparse High-Density (con riempimento

ottimizzato per consumare meno materiale mantenendo comunque una struttura solida). Dunque la differenza a livello di tempo realizzativo in questo caso è del 25,7%.

Analizzando i provini a compressione vediamo come anche qui le maggiori differenze si registrino per layer di altezza 0,1778 con rispettivamente 16,769 cm³ (17,77 g) per il provino con l'impostazione "Solid" e 11,753 cm³ (12,46 g) per quello impostato "Sparse". Risulta quindi una differenza del 29,9% in termini di materiale utilizzato e del 31,8% per quanto riguarda il tempo di realizzazione.

Analizzando poi i singoli valori dei risultati, anche in questo caso, le caratteristiche meccaniche con modulo più elevato si ottengono per valori di layer impostati a 0,1778 mm, rispettivamente: 43,56 MPa di tensione a snervamento per il provino tipo "0,1778 Sparse orient. long. 1 contorno", 5,23% di allungamento a rottura per quello "0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno", infine un modulo di Young pari a 2,97 GPa per il provino tipo "0,1778 Solid orient. long. 1 contorno".

Per una prima analisi dei risultati, in ottemperanza a quanto richiesto dalle normative ASTM d638/ ASTM d695, si calcolerà per tutti i risultati la deviazione standard usando la formula:

$$s = \sigma = \sqrt{(\sum x^2 - nX^2)/(n - 1)}$$

Con s deviazione standard stimata, x valore della singola osservazione, n numero di osservazioni e X media aritmetica del set di provini osservato.

Facciamo uso di una tabella per riassumere i dati calcolati:

TIPO DI PROVINO	Deviazione standard tensione a rottura [MPa]	Deviazione standard allungamento nom. [%]	Deviazione standard modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno	1,43	0,51	0,065
0,1778 Solid orient. long. 1 contorno	0,28	0,15	0,22
0,1778 Solid orient. macch. 2 contorni	0,54	0,33	0,35

0,1778 Solid orient. long. 2 contorni	0,87	0,34	0,22
0,1778 Sparse orient. macch. 1 contorno	0,15	0,31	1,01
0,1778 Sparse orient. long. 1 contorno	2,44	0,85	0,32
0,1778 Sparse orient. macch. 2 contorni	0,22	0,71	0,14
0,1778 Sparse orient. long. 2 contorni	0,22	0,21	0,22
0,254 Solid orient. macch. 1 contorno	2,90	0,75	0,23
0,254 Solid orient. long. 1 contorno	1,79	0,47	0,12
0,254 Solid orient. macch. 2 contorni	0,37	0,15	0,10
0,254 Solid orient. long. 2 contorni	2,96	0,28	0,07
0,254 Sparse orient. macch. 1 contorno	0,16	0,62	0,02
0,254 Sparse orient. long. 1 contorno	0,92	0,61	0,18
0,254 Sparse orient. macch. 2 contorni	0,03	0,18	0,02
0,254 Sparse orient. long. 2 contorni	0,03	0,14	0,12

TIPO DI PROVINO	Deviazione standard tensione massima [MPa]	Deviazione standard modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid	1,69	0,07
0,1778 Sparse	0,69	0,11
0,254 Solid	0,45	0,02

0,254 Sparse	0,16	0,15
---------------------	------	------

Completato questo primo lavoro di analisi, spostiamo l'attenzione sui parametri richiesti dal metodo DOE. Possiamo, come già detto, definire la deviazione standard per il numero di prove ripetute come:

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$$

Con al numeratore la deviazione standard o scarto quadratico medio e al denominatore la radice del numero di ripetizioni delle prove.

TIPO DI PROVINO	Deviazione standard per il numero di prove, tensione a rottura [MPa]	Deviazione standard per il numero di prove, allungamento nom. [%]	Deviazione standard per il numero di prove, modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid orient. macch. 1 contorno	0,83	0,29	0,037
0,1778 Solid orient. long. 1 contorno	0,16	0,08	0,12
0,1778 Solid orient. macch. 2 contorni	0,31	0,19	0,20
0,1778 Solid orient. long. 2 contorni	0,50	0,19	0,12
0,1778 Sparse orient. macch. 1 contorno	0,08	0,18	0,58
0,1778 Sparse orient. long. 1 contorno	1,41	0,49	0,18
0,1778 Sparse orient. macch. 2 contorni	0,12	0,41	0,08

0,1778 Sparse orient. long. 2 contorni	0,12	0,12	0,12
0,254 Solid orient. macch. 1 contorno	1,67	0,43	0,13
0,254 Solid orient. orient. long. 1 contorno	1,03	0,27	0,07
0,254 Solid orient. macch. 2 contorni	0,21	0,08	0,06
0,254 Solid orient. long. 2 contorni	1,71	0,16	0,04
0,254 Sparse orient. macch. 1 contorno	0,092	0,36	0,011
0,254 Sparse orient. long. 1 contorno	0,53	0,35	0,10
0,254 Sparse orient. macch. 2 contorni	0,02	0,10	0,02
0,254 Sparse orient. long. 2 contorni	0,02	0,08	0,07

TIPO DI PROVINO	Deviazione standard per il numero di prove, tensione massima [MPa]	Deviazione standard per il numero di prove, modulo elastico [GPa]
0,1778 Solid	0,97	0,04
0,1778 Sparse	0,39	0,06
0,254 Solid	0,26	0,01
0,254 Sparse	0,09	0,08

Analizzando le tabelle delle deviazioni standard, sia per quanto riguarda quella “classica” che quella fatta sul numero di prove ripetute possiamo notare valori estremamente contenuti in relazione alle variabili di input considerate, che raramente superano l’unità. Questo indica che la dispersione dei risultati sperimentali rispetto all’indice di posizione, costituito dalla media aritmetica, è estremamente contenuto e dunque i valori di output

hanno una grande omogeneità. Ciò significa che da un lato il materiale provato possiede caratteristiche meccaniche costanti e omogenee e dall'altro che le prove sono state effettuate in modo tale da assicurare una certa ripetibilità dei risultati.

Dopo aver fatto alcune considerazioni sulla deviazione standard e sulla deviazione standard per il numero di prove ripetute, lo studio si sposterà sulle implicazioni iterative tra i vari parametri costruttivi per valutare come variano le performance del materiale in base alle combinazioni nei settaggi della macchina prototipatrice. Tali parametri verranno paragonati utilizzando confronti diretti tramite progetti fattoriali a 2 fattori e 2 livelli per prove ripetute, considerando i fattori in ordine di importanza. Una volta calcolate le medie, sia di riga che di colonna e la corrispondente "gran media" si troverà l'aumento medio della risposta A, che indica la quota di influenza che la prima variabile indipendente ha su quella dipendente, successivamente si procederà in egual maniera con i contributi B (influenza dalla seconda variabile indipendente su quella dipendente) e AB (effetto combinato di entrambe le variabili indipendenti) calcolati come:

$$A = \frac{a+ab}{2} - \frac{1+b}{2};$$

$$B = \frac{b+ab}{2} - \frac{1+a}{2};$$

$$AB = \frac{ab-b}{2} - \frac{a-1}{2}$$

Con 1,a,b, ab che sono definiti in base alla posizione indicata dalle coordinate -1;+1 come:

	X₂	-1	+1
X₁			
	-1	1	b
	+1	a	ab

Tutto ciò ha il preciso scopo di rendere la trattazione statistica dei dati più semplice ed efficiente possibile, evitando di utilizzare piani fattoriali troppo complessi che mal si sposano con i requisiti di utilità e praticità connessi alla creazione di un modello matematico per l'ingegneria.

Vengono ora proposti i piani fattoriali, è da notare che nelle prove a trazione i valori inseriti in queste tabelle si riferiscono a test con i parametri non indicati esplicitamente considerati come impostati di default dalla macchina (riportati sotto la tabella) e analizzati via via in piani successivi. L'unico parametro preso in considerazione per questo studio è la tensione di snervamento, infatti questo costituisce il limite più vincolante per l'utilizzo del materiale.

PROVE A TRAZIONE

Tipo di riempimento	SPARSE	SOLID	Media di riga
Altezza raster	(-1)	(+1)	
0,1778 (-1)	17,80 17,54 17,54	38,18 36,38 35,36	27,13
Media	17,62	36,64	
0,254 (+1)	21,63 21,46 21,41	36,02 40,94 35,81	29,54
Media	21,5	37,59	
Media di colonna	19,56	37,11	Gran Media 28,33

Parametri fissati: orientamento raster macchina, 1 contorno.

Orientamento raster Altezza raster	Macchina a 45° (-1)	Longitudinali a 0° (+1)	Media di riga
0,1778 (-1)	17,80 17,54 17,54	43,56 40,34 38,76	29,25
Media	17,62	40,89	
0,254 (+1)	21,63 21,46 21,41	40,97 40,78 40,61	31,14
Media	21,5	40,79	
Media di colonna	19,56	40,84	Gran Media 30,19

Parametri fissati: riempimento Sparse Hi-Density, 1 contorno.

Numero contorni Altezza raster	1 (-1)	2 (+1)	Media di riga
0,1778 (-1)	17,80 17,54 17,54	33,10 33,51 34,18	25,61
Media	17,62	33,60	

0,254 (+1)	21,63 21,46 21,41	24,81 24,85 24,78	23,15
Media	21,5	24,81	
Media di colonna	19,56	29,20	Gran Media 23,76

Parametri fissati: riempimento Sparse Hi-Density, orientamento raster macchina.

Orientamento raster	Macchina a 45° (-1)	Longitudinali a 0° (+1)	Media di riga
Riempimento			
Sparse Hi-Density (-1)	17,80 17,54 17,54	43,56 40,34 38,76	29,25
Media	17,62	40,89	
Solid (+1)	38,18 36,38 35,36	40,17 40,08 39,64	38,30
Media	36,64	39,96	
Media di colonna	27,13	40,42	Gran Media 33,95

Parametri fissati: altezza raster 0,1778, 1 contorno.

Numero contorni							Media di riga
Riempimento	1 (-1)			2 (+1)			
Sparse Hi-Density (-1)	17,80	17,54	17,54	35,65	35,24	35,32	26,51
Media	17,62			35,40			
Solid (+1)	38,18	36,38	35,36	33,10	33,51	34,18	35,11
Media	36,64			33,59			
Media di colonna	27,13			34,49			Gran Media 30,81

Parametri fissati: altezza raster 0,1778, orientazione raster macchina.

Numero contorni							Media di riga
Orientamento raster	1 (-1)			2 (+1)			
	17,80	17,54	17,54	35,65	35,24	35,32	

Macchina a 45° (-1)			26,51
Media	17,62	35,40	
Longitudinali a 0° (+1)	43,56 40,34 38,76	23,08 23,51 23,21	32,07
Media	40,89	23,26	
Media di colonna	29,25	29,33	Gran Media 29,29

Parametri fissati: altezza raster 0,1778, riempimento Sparse Hi-Density.

PROVE A COMPRESSIONE

Tipo di riempimento	SPARSE (-1)	SOLID (+1)	Media di riga
Altezza raster			
0,1778 (-1)	24,77 23,76 23,45	49,03 50,67 52,42	37,35
Media	23,99	50,71	
0,254 (+1)	22,89 23,20 23,14	51,32 52,20 51,59	37,38
	23,07	51,70	

Media			
Media di colonna	23,53	51,2	Gran Media 37,37

Primo confronto a trazione, altezza raster\riempimento:

- $A = 2,41$
- $B = 17,55$
- $AB = - 1,46$

In questo caso si nota che la variabile in output è fortemente influenzata dalla variabile indipendente “Riempimento” che ha effetto preminente su “Altezza raster”, di quasi un ordine di grandezza. La combinazione delle due genera un effetto negativo, ovvero gli effetti tendono a controbilanciarsi, non producendo effetti desiderabili.

Secondo confronto a trazione, altezza raster\orientamento raster:

- $A = 9,04$
- $B = 21,28$
- $AB = -1,99$

Anche in questo caso la variabile indipendente X_2 , ovvero “orientamento dei raster” ha effetto preminente sull’output rispetto alla variabile indipendente di colonna.

Terzo confronto a trazione, altezza raster\numero contorni:

- $A = - 2,45$
- $B = 9,65$
- $AB = -6,33$

In questo caso si può facilmente vedere come l’unico effetto utile sulla risposta sia dato al sistema dalla variabile indipendente “2 contorni”, in quanto è il solo con aumento medio della risposta positivo.

Quarto confronto a trazione, riempimento\orientamento raster:

- $A= 9,04$
- $B= 13,29$
- $AB= - 9,97$

Da questa tabella emerge che entrambi i fattori influenzano l'output, l'orientamento dei raster "longitudinale" in maniera preponderante però, come del resto era facilmente prevedibile.

Quinto confronto a trazione, riempimento\numero contorni:

- $A= 8,61$
- $B= 7,36$
- $AB= -10,41$

Anche in questo caso, il riempimento e il numero di contorni sono influenti sul risultato finale, al contrario della loro iterazione che invece presenta un valore fortemente negativo.

Confronto a compressione, altezza raster\tipo di riempimento:

- $A= 0,035$
- $B= 27,68$
- $AB= 0,96$

Si nota ovviamente una fortissima preponderanza della variabile "tipo di riempimento" la quale, impostata su "Solid", genera tensioni massime di rottura estremamente elevate. L'altezza dei raster e la combinazione delle due variabili sono pressoché irrilevanti.

Capitolo 8

CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Tirando le somme del lavoro svolto, si può certamente affermare che i risultati trovati in questa tesi sperimentale abbiano pienamente soddisfatto le attese.

Innanzitutto, un primo parametro di giudizio è stato quello di valutare la dispersione dei risultati tramite l'analisi delle deviazioni standard; ciò ha evidenziato come i valori, essendo reciprocamente coerenti, indichino un buon metodo esecutivo e precisione nello svolgimento delle prove. Inoltre anche i valori trovati sono in senso assoluto pertinenti e comparabili sia con quanto ci si attendeva che con i test svolti da altri enti o produttori di polimeri, basati sulle stesse normative.

Lo studio e il confronto eseguiti con il metodo DOE hanno poi sottolineato le interazioni tra i vari parametri costruttivi in relazione ai valori trovati durante i test sperimentali.

Se alcuni risultati erano auspicabili, altri invece sono stati del tutto imprevedibili a conferma di quanto questo studio di caratterizzazione sia stato utile. Non si è ovviamente ricercato il miglior compromesso tra le varie impostazioni dato che le esigenze e gli scopi di utilizzo di una stampante 3D sono molteplici, tuttavia tramite il confronto diretto dei vari parametri in piani fattoriali si sono tracciate le linee guida per ottimizzare le performance di gran parte dei particolari stampabili.

Un interessante sviluppo di questo lavoro potrebbe essere l'analisi di quanto le prestazioni del materiale beneficerebbero della modifica manuale, da parte di un operatore, delle traiettorie macchina. Infatti si potrebbe migliorare la distribuzione dei raster interni in modo da farli aderire al meglio ai contorni, cosa che la macchina di default non fa in tutte le impostazioni considerate, specialmente in modalità Sparse-Hi Density.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Callister W. D., Rethwisch D.G., “Scienza e Ingegneria dei materiali”. Edises, 2012.
- [2] Prof. Vincenzo Dal Re, Dispense del corso di “Comportamento meccanico dei materiali”. AA 2010/2011.
- [3] Prof.ssa Francesca De Crescenzo, Dispense del corso di “Metodi di progetto per l’ingegneria industriale LM”. AA 2012/2013.
- [4] A. Freddi, **Imparare a progettare. “Principi e metodi del progetto concettuale per lo sviluppo della creatività industriale”**. Pitagora editrice Bologna, 2005.
- [5] Sala, Di Landro, “Tecnologie e Materiali aerospaziali”. Politecnico di Milano, 2012.
- [6] Smith W. F., Hashemi J., “Scienza e tecnologia dei materiali”. Mc Graw-Hill editore, 2012.
- [7] www.raeng.org.uk, Royal Academy of Engineering, Additive manufacturing Journal, maggio 2013.
- [8] www.renishaw.it Renishaw plc, 2015.
- [9] O. Belluzzi, “Scienza delle costruzioni”, Zanichelli, 1966.
- [10] J.M Mallon.”Advances in automation for Plastic Injection Moulding” 2001.
- [11] I. Gibson, D. W. Rosen, B.Stucker, “Addive Manufacturing Technologies” Ed. Springer. 2010.
- [12] F.W. Liou, “Rapid Prototyping and Engeneering Applications” Ed. Faulker, 2005.
- [13] M. A. Boboulos ,“CAD-CAM Rapid Prototyping Application Evaluation” Ed. Ventus, 2010.
- [14] A.K. Kamarai, E. A. Nasr, “Rapid Prototyping: Theory and Practice”. Ed. Parsaei, 2005.

Ringraziamenti

Per prima cosa desidero ringraziare il Prof. Leonardo Seccia per l'opportunità che mi ha dato, ovvero quella di mettermi alla prova in un campo a me poco familiare ma estremamente interessante, proponendomi questa tesi. In secondo luogo un pensiero va all' Ing. Sara Bagassi e all'Ing. Francesca Lucchi che mi hanno seguito durante questo lungo percorso dispensandomi preziosi consigli. Infine un grazie anche al caro Dott. Nicola Masotti sempre disponibile e gentile.

Non posso poi fare a meno di citare e ringraziare i miei genitori Francesco e Ambra che mi sono sempre stati vicino anche quando la situazione non procedeva come volevo; questo è stato un incentivo fondamentale ed estremamente importante.

Un grosso grazie va anche ai miei nonni, o meglio alle mie due nonne Luigia e Lina, allo zio Roberto, alle zie Rosa, Elettra e Marinella. Grazie anche Rhevin, Michele e Valeria, ma soprattutto alla piccola Ehvriil che rimane, a mio parere, la più bella bimba del mondo.

Fortunatamente sono nato in una famiglia che mi ha sempre sostenuto sebbene conoscessero i miei limiti e i miei difetti. Allo stesso modo hanno fatto anche i componenti della "famiglia" che io mi sono scelto, ovvero i miei amici. Dunque mi sembra doveroso ringraziare: Lucas, Marco, Brando, Alessio, Luca, Giovanni, Maicol, Andrea, Riccardo, Bruno, Roberto, Matteo, Stefano, Steve, Mattia, Gianluca, Stefano, Erik, Luca, Andrea, Orazio, Andrea, Luca, Elena, Chiara, Anna, Giulia, Alessia, Larissa, Giorgia, Elisa, Sara, Jessica, Francesca, Chiara, Giulia, Valentina, Francesca, Michela, Sara, Carlotta, Giulia.

Una parola di riconoscenza va anche a tutte quelle persone, poche a dire il vero, che ritenendomi non adeguato ad intraprendere questo cammino mi hanno comunque dato lo stimolo per arrivare dove volevo.

Grazie a tutti!

"PER ASPERA AD ASTRA"

Mhervin