

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Proprietà meccaniche a fatica di materiali
polimerici ottenuti per manifattura
additiva»***

Tutor universitario: Prof. Giovanni Meneghetti

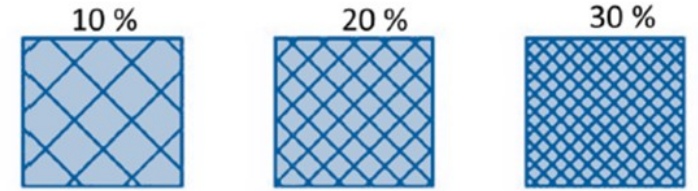
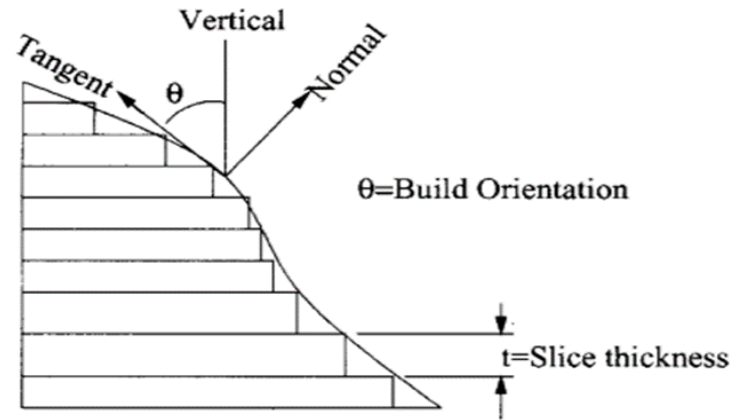
Laureando: Umberto Magro

Padova, 14/03/2022

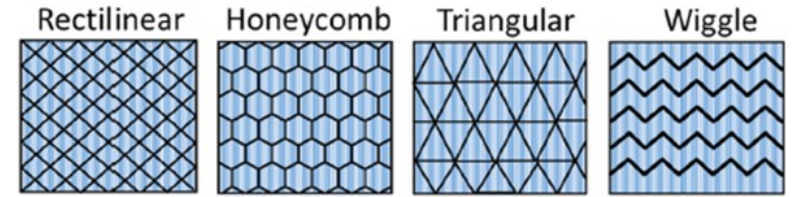
- La manifattura additiva (AM) è l'insieme delle pratiche produttive che si basano su un metodo di produzione «layer by layer», in opposizione alle classiche lavorazioni sottrattive. Esistono diverse tipologie di processi nell'ambito dell'additive manufacturing, tra cui la modellazione a deposizione fusa (FDM).
- I sistemi AM sfruttano le informazioni di file CAD, convertiti in G-Code da un software «slicer», per ricreare fedelmente il modello digitale. È così possibile realizzare prodotti con geometria molto complessa senza ricorrere a diverse operazioni e utensili, ottimizzando il pezzo finito in termini di consumo di materiali e peso.
- La tecnologia FDM si basa sulla deposizione di un filamento di materiale polimerico, talvolta rinforzato con fibre, ad una temperatura superiore a quella di transizione vetrosa. La macchina di stampa realizza dei piani sovrapposti di materiale attraverso il movimento automatizzato dell'ugello.
- Le condizioni di stampa e i parametri di set up della macchina hanno un effetto sia dal punto di vista dei tempi di produzione, dei consumi di materiale e dei costi, sia da quello della qualità del prodotto finale, in termini di resistenza e finitura.
- I materiali utilizzati sono polimeri termoplastici, facilmente formabili e stampabili se portati a temperature superiori a quelle di transizione vetrosa o di fusione, e che recuperano la durezza e resistenza originali se successivamente raffreddati.

- Raccogliere le informazioni presenti in letteratura riguardanti le proprietà meccaniche a fatica relative ad alcuni materiali polimerici d'interesse nell'ambito della stampa a filamento fuso, con particolare attenzione ai risultati delle prove di fatica realizzate nei diversi studi considerati.
- Evidenziare gli effetti che diverse combinazioni di parametri di processo hanno sul comportamento a fatica del materiale considerato e, dove possibile, delineare un set di valori da assegnare alle variabili di stampa che ottimizzino le prestazioni del prodotto dal punto di vista della resistenza dinamica.
- Osservare le differenze nel comportamento a fatica dei diversi materiali polimerici considerati e operare un confronto tra di essi ove i dati disponibili lo consentono. In alcuni casi sono state messe in evidenza le differenze tra i prodotti FDM e quelli realizzati per iniezione in stampo, utilizzando lo stesso materiale.

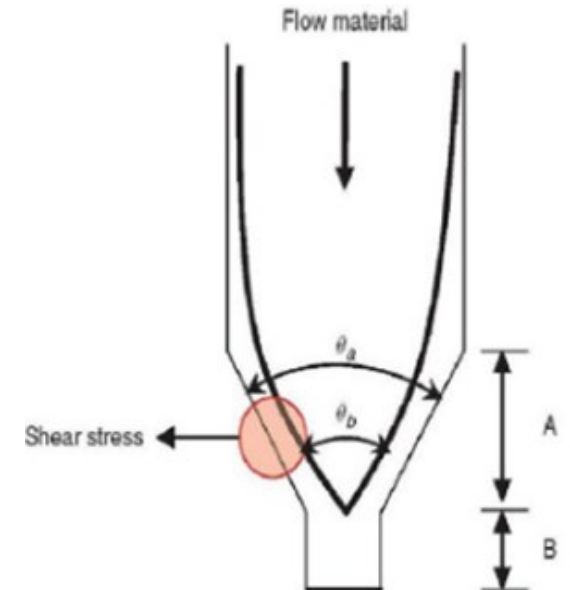
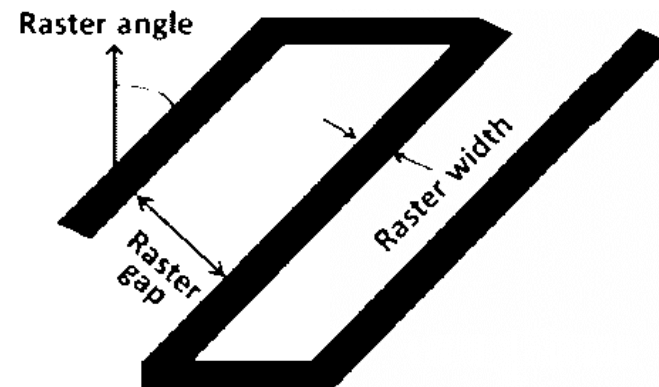
- Spessore del layer
- Densità di stampa
- Pattern
- Direzione di costruzione
- Angolo e spessore del raster
- Diametro dell'ugello e temperatura dell'estrusore
- Velocità di stampa
- Temperatura del letto di stampa
- Presenza di supporti



Infill density



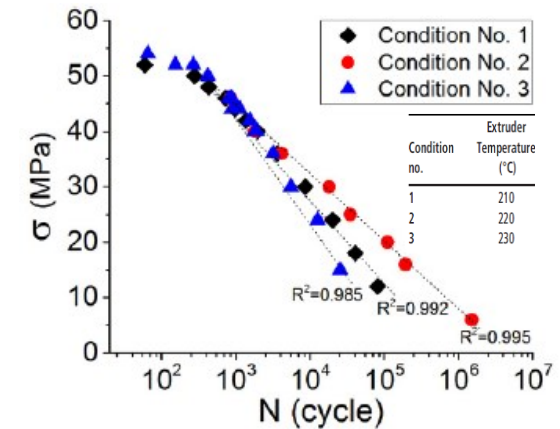
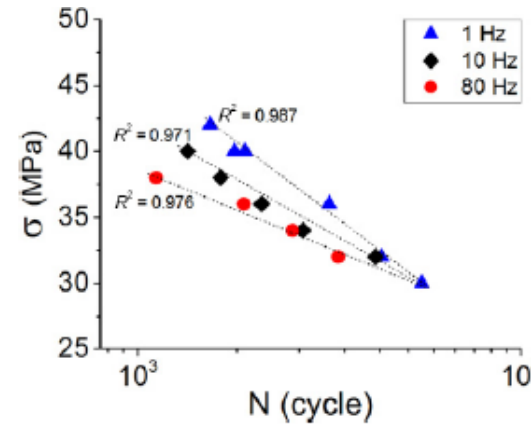
Infill pattern



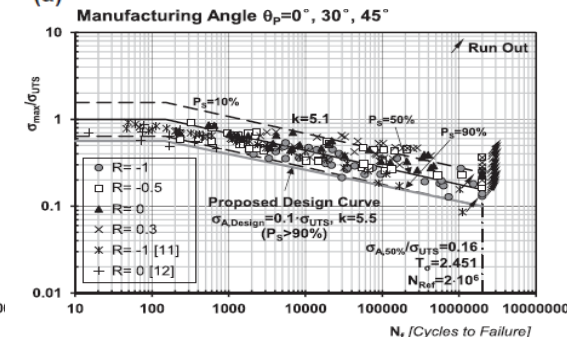
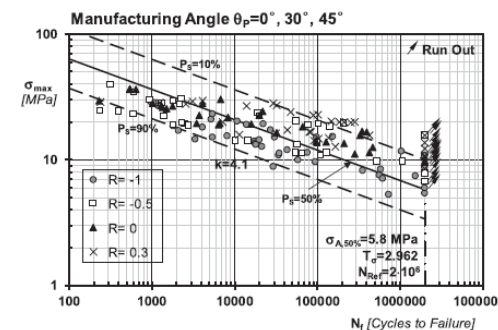
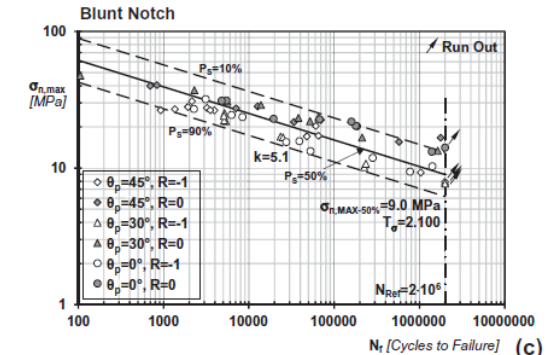
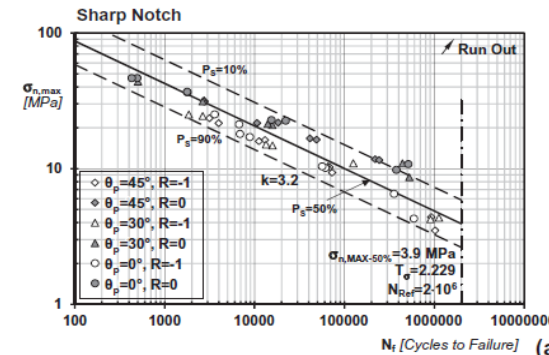
- PLA (Acido Polilattico / Polilattato): polimero dell'acido L-lattico, ottenuto da fermentazione di amido e zuccheri di origine vegetale, appartenente alla categoria dei poliesteri, con formula bruta $(C_3H_6O_3)_n$. È apprezzato per la biodegradabilità e la possibilità di riciclo, ma è caratterizzato da bassa resistenza all'umidità.
- ABS (Acrilonitrile butadiene stirene): copolimero ottenuto dalla polimerizzazione di tre particolari monomeri; stirene (45-55 %), butadiene (15-30 %) e acrilonitrile (25-35 %), secondo la composizione chimica $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Lo stirene conferisce l'aspetto lucido alla superficie e contribuisce alla durezza e alla rigidità del materiale, l'acrilonitrile è responsabile della resistenza chimica e termica e della resistenza a fatica, mentre il butadiene conferisce resilienza e duttilità. L'ABS risulta sensibile alla luce ultravioletta, è infiammabile e tossico.
- PC (Policarbonato): polimero caratterizzato dalla presenza di un gruppo carbonato e da una catena alchilica derivata tipicamente da un composto organico aromatico. Il più diffuso è quello ottenuto a partire dal bisfenolo-A, al quale sono associate le migliori caratteristiche meccaniche e termiche.
- PA (Poliammide): polimero ottenuto a partire da composti bifunzionali come amminoacidi e lattami, o diammina e acido bicarbossilico, con formazione di legame ammidico. Esistono diverse tipologie di PA, ma le più importanti sono le poliammidi alifatiche (Nylon). Caratterizzato da igroscopicità, richiede processi di essiccazione.

- I provini stampati sul piano XY lungo la direzione di stampa a 45° hanno mostrato resistenza a fatica monoassiale maggiore rispetto a quelli ottenuti lungo X e Y e risultano essere caratterizzati da maggiore duttilità.
- La temperatura di estrusione deve essere controllata adeguatamente per non ridurre il numero di cicli a rottura, inoltre è opportuno applicare frequenze di carico ridotte in corrispondenza di elevate ampiezze di tensione applicata per evitare fenomeni di surriscaldamento che riducono la vita a fatica.
- Per sollecitazione di flessione rotante il pattern di stampa più indicato è quello a nido d'ape, che raggiunge un miglior comportamento a fatica se abbinato ad elevata densità di stampa. Inoltre è opportuno non superare un valore minimo del rapporto tra diametro dell'ugello e spessore del layer pari a 1.5 .
- Come avviene nel caso dei materiali metallici, rapporti di ciclo maggiori di -1, corrispondenti a tensioni medie non nulle, hanno portato ad un danneggiamento più rapido del materiale.
- Per prevedere il comportamento a fatica è stata proposta una curva di Wöhler unificatrice, valida per $P_s \geq 90\%$ e caratterizzata da pendenza $k=5.5$, $\sigma_{MAX} = 0.1UTS$ e numero di cicli del ginocchio inferiore $N_{REF} = 2 \cdot 10^6$.
- I provini intagliati mostrano una riduzione della vita a fatica causata dall'effetto di concentrazione delle tensioni. Il fenomeno può essere studiato attraverso la Teoria delle Distanze Critiche.

Umberto Magro



Hamid Reza Vanaei, Mohammadali Shirinbayan, Saeedeh Vanaei, Joseph Fitoussi, Sofiane Khellad, Abbas Tcharhtchi, (2021), *Multi-scale damage analysis and fatigue behavior of PLA manufactured by fused deposition modeling (FDM)*, Rapid Prototyping Journal, Volume 27, Number 2, 371–378.

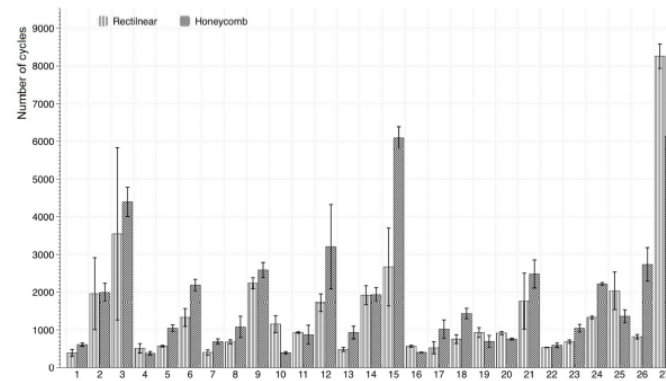


O.H. Ezeh, L. Susmel, (2019), *Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of raster angle and non-zero mean stresses*, International Journal of Fatigue, 126, 319–326.

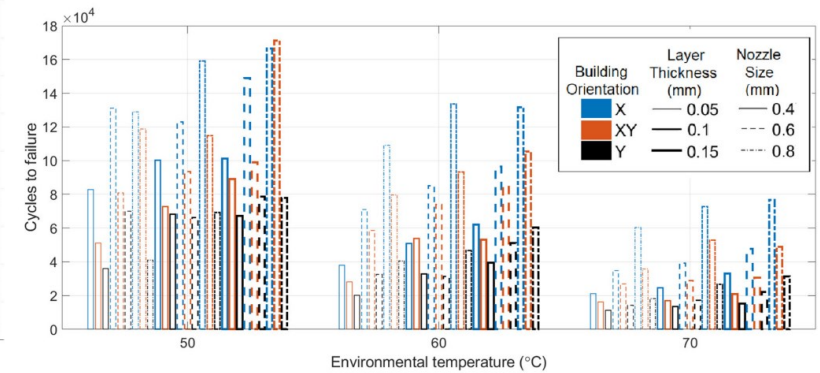
- Per prove di flessione rotante le orientazioni del raster che offrono le migliori prestazioni a fatica sono quella alternata a 45°C e -45°C e quella lungo l'asse X. In particolare angoli di raster alternati offrono prestazioni nella resistenza statica e dinamica di poco inferiori rispetto a quelle dello stesso materiale formato in stampo.
- Prove di fatica tensione-tensione hanno mostrato come il pattern di stampa a nido d'ape risulti essere quello più prestazionale, anche se per determinate combinazioni di spessore del layer, diametro dell'ugello sono state osservate proprietà migliori per i pattern rettilinei.
- La temperatura influenza fortemente la resistenza a fatica man mano che ci si avvicina alla temperatura di transizione vetrosa (105°C). Risulta comunque meno sensibile del polilattato rispetto a fenomeni di surriscaldamento e meno suscettibile alle alte temperature.
- Aumentare lo spessore del layer e il diametro dell'estrusore produce in generale delle proprietà migliori a fatica.
- A parità di condizioni di carico e di direzione di stampa, prove di flessione rotante hanno mostrato una vita a fatica inferiore rispetto al PLA.

Max % UTS	Longitudinal (0°)	Diagonal (45°)	Transverse (90°)	Default (+45/-45°)
0	315, 39.2	176, 39.8	45, 13.9	1,155, 86.9
75	1,738, 161.7	706, 149.9	308, 193.2	4,593, 366.1
60	4,315, 591.3	3,057, 870.5	1,271, 228.8	13,628, 3,463.2
45	1,6419*, 1,149.7	17,843, 4,230.0	10,575, 2,757.7	17,366* ^, 54.6

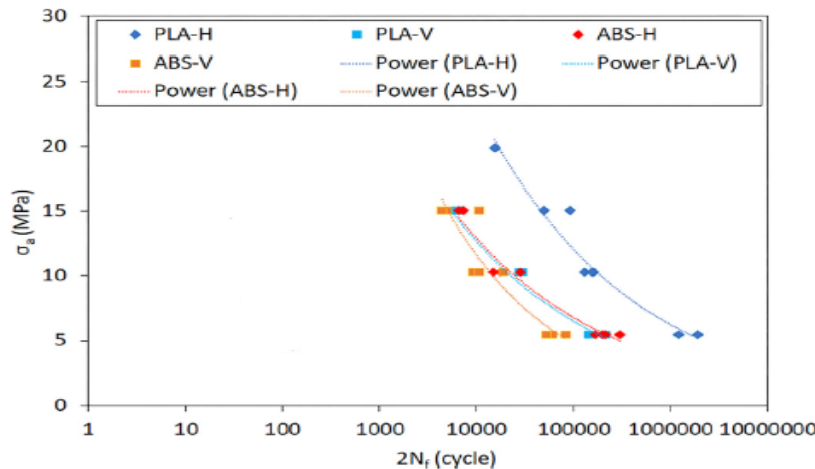
Sophia Ziemian, Maryvivan Okwara, Constance Wilkens Ziemian, (2015), *Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene*, Rapid Prototyping Journal, 270–278



Miquel Domingo-Espin, J. Antonio Travieso-Rodriguez, Ramn Jerez-Mesa, Jordi Lluma-Fuentes, (2018), *Fatigue Performance of ABS Specimens Obtained by Fused Filament Fabrication Materials*, 11, 1-16.

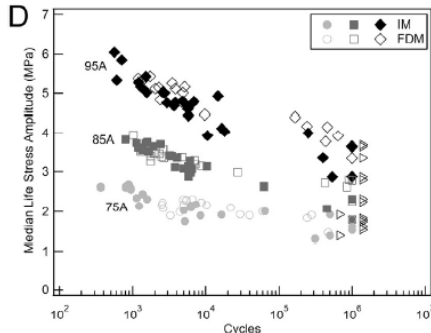


Feiyang He, Muhammad Khan, (2021), *Effects of Printing Parameters on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed ABS under Dynamic Thermo-Mechanical Loads*, Polymers, 13, 1-23.

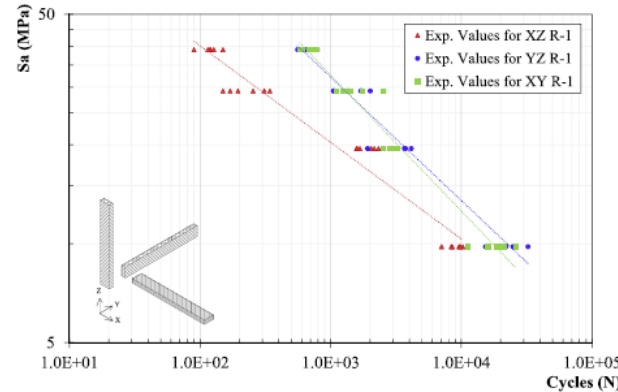


M. Azadi, A. Dadashi, S. Dezianian, M. Kianifar, S. Torkaman, M. Chiyani, (2021), *High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing*, Forces in Mechanics, 3, 1-11.

- Sulla base di prove di flessione di provini rettangolari, è risultato che quelli stampati in direzione YZ mostrano il migliore comportamento a fatica per rapporti di ciclo pari a -0.5, mentre per rapporti di ciclo pari a -1 le prestazioni di quelli realizzati lungo la direzione XY sono simili, a volte migliori.
- Le prestazioni degli stessi provini sono risultate in ogni caso molto inferiori rispetto a quelle del policarbonato iniettato in stampo, a causa dell'elevata porosità e degli stress termici che interessano i filamenti.
- Prove di fatica in controllo di deformazione su provini in PCU (policarbonato uretano) hanno rivelato che questo materiale riesce a pareggiare e in alcuni casi superare le prestazioni dei campioni ottenuti in stampo.

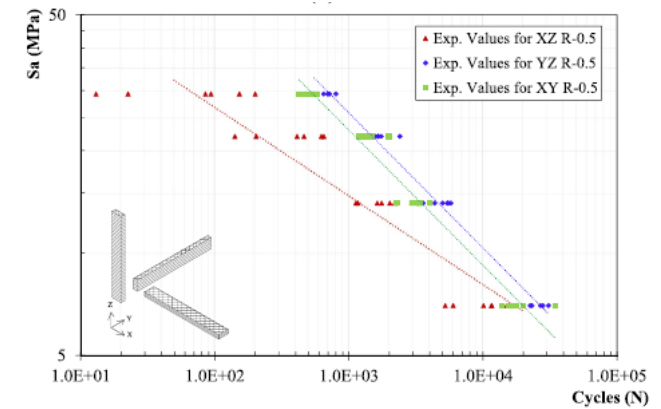


Andrew T. Miller, David L. Safranski, Kathryn E. Smith, Dalton G. Sycks, Robert E. Guldberg, Ken Gall, (2017), *Fatigue of injection molded and 3D printed polycarbonate urethane in solution*, Polymer, 108, 121-134.



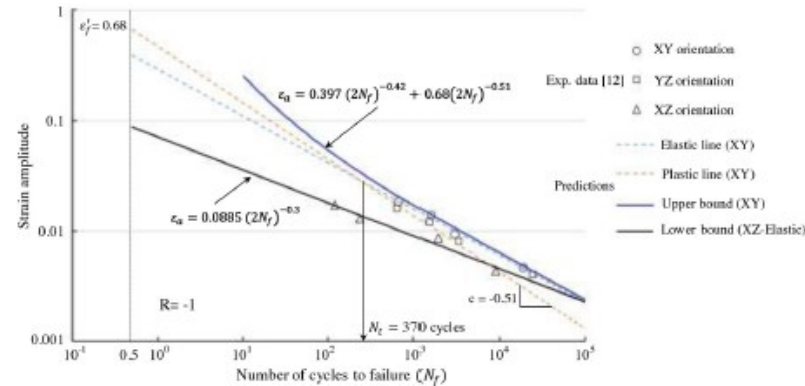
(a) R-1

Orientation	Maximum loading (% ultimate tensile strength, UTS)			
	80% UTS	60% UTS	40% UTS	20% UTS
XY (R - 1)	678 (74)	1563 (528)	2940 (234)	18,749 (4990)
YZ (R - 1)	645 (82)	1483 (392)	3258 (784)	24,303 (5571)
XZ (R - 1)	120 (19)	237 (78)	1894 (321)	8936 (1180)
XY (R - 0.5)	499 (55)	1442 (290)	3203 (577)	19,561 (7608)
YZ (R - 0.5)	665 (103)	1736 (344)	4936 (830)	24,853 (4663)
XZ (R - 0.5)	94 (73)	415 (210)	1650 (438)	9925 (3711)

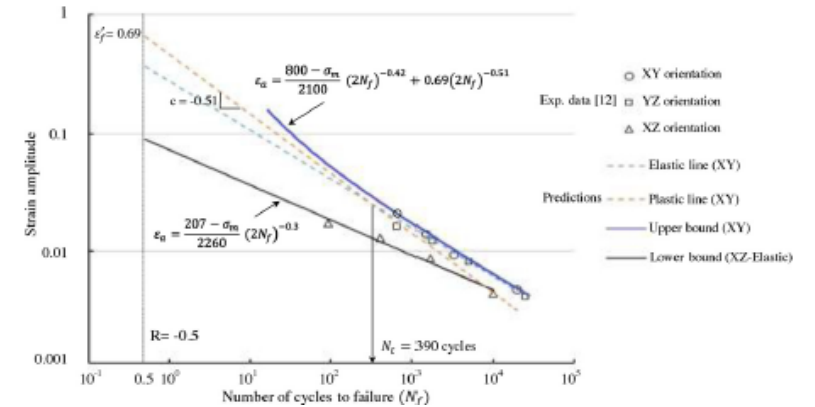


(b) R-0.5

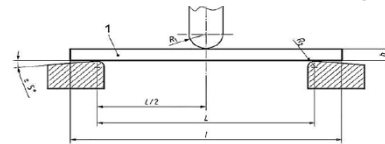
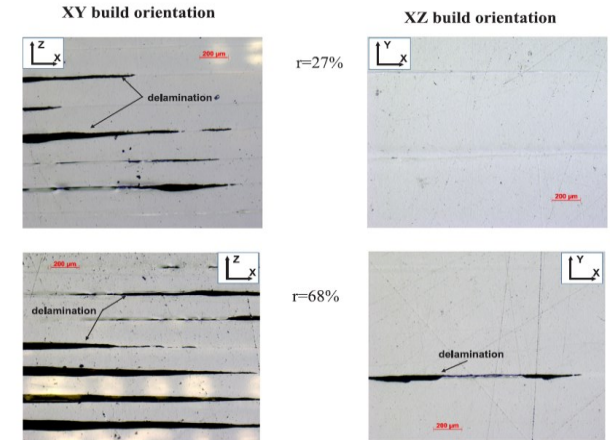
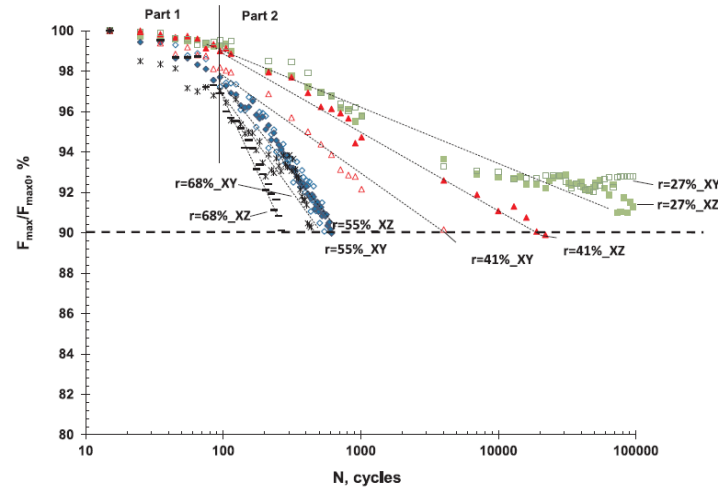
Josep M. Puigoriol-Forcada, Alex Alsina, Antonio G. Salazar-Martín, Giovanni Gomez-Gras, Marco A. Pérez, (2018), *Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens*, Materials and Design, 155, 414–421



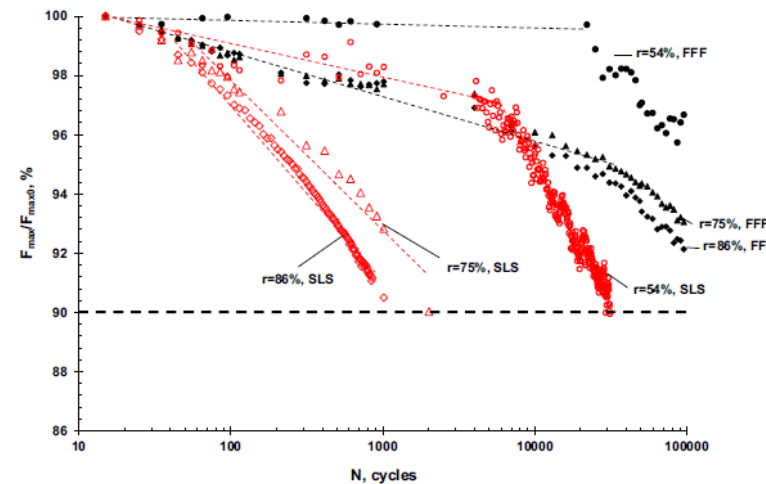
Soran Hassanifard, Seyed M. Hashemi, (2020), *On the strain-life fatigue parameters of additive manufactured plastic materials through fused filament fabrication process*, Additive Manufacturing, 32, 1-8.



- Prove di fatica a flessione su tre punti hanno rivelato un migliore comportamento a fatica nel caso di provini in Nylon PA6 e PA12 stampati in direzione XZ, in quanto poco intaccati da fenomeni di delaminazione, a parità di rapporto di ciclo.
- Dalle stesse prove è stata stimata una durata dei componenti FDM maggiore del 40% rispetto a quelli ottenuti tramite sinterizzazione laser additiva. Quest'ultimi inoltre hanno mostrato una modalità di danneggiamento diversa, che procede attraverso l'ingrandimento dei pori.
- Le proprietà meccaniche a fatica del Nylon possono essere esaltate utilizzando fibre di rinforzo nella matrice polimerica. Un'analisi agli elementi finiti ha mostrato una superiorità delle fibre di Kevlar rispetto a quelle di vetro nel rinforzare il materiale.



S. Terekhina, T. Tarasova, S. Egorov, I. Skorniyakov, L. Guillaumat, M.L. Hattali, (2020), *The effect of build orientation on both flexural quasi-static and fatigue behaviours of filament deposited PA6 polymer*, International Journal of Fatigue, 140, 1-13.



S. Terekhina, T. Tarasova, S. Egorov, I. Skorniyakov, L. Guillaumat, M.L. Hattali, (2020), *On the difference in material structure and fatigue properties of polyamide specimens produced by fused filament fabrication and selective laser sintering*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111, 93-107.

- L'acido polilattico consente di ottenere prestazioni superiori a quelle dell'ABS dal punto di vista della vita a fatica, se è possibile controllare correttamente la temperatura, la frequenza di carico e di conseguenza gli effetti di surriscaldamento. Per applicazioni più gravose dal punto di vista delle temperature e in ambiente umido è preferibile utilizzare l'ABS.
- Nel caso di sollecitazioni monoassiali e soprattutto di flessione rotante, la scelta di un pattern di stampa a nido d'ape abbinato ad elevati valori di densità, spessore del layer e diametro dell'ugello porta ad un miglioramento del comportamento a fatica per PLA e ABS.
- Nell'ottica di avvicinarsi alle prestazioni di componenti realizzati in stampo appare efficace la scelta di raster alternati a $\pm 45^\circ$, che riducono sensibilmente la porosità del componente e di conseguenza la quantità di possibili siti d'innescio per le cricche da fatica.
- I diversi materiali considerati, similmente a quanto osservato nel caso dei materiali metallici, sono soggetti ad un deterioramento della vita a fatica in presenza di effetti d'intaglio, e quindi a concentrazione delle tensioni, o quando sottoposti a sollecitazioni con tensione media diversa da 0.
- Utilizzare blend di diversi polimeri, come il PCU, o materiali rinforzati con fibre, consente di migliorare la vita a fatica dei prodotti finiti e avvicinare o addirittura superare le proprietà di quelli ottenuti per iniezione in stampo.