Guida Completa ai Materiali per la Stampa 3D FDM

Questa guida illustra nel dettaglio i principali polimeri e compositi utilizzati nella stampa 3D a filamento (FDM/FFF), analizzandone le caratteristiche meccaniche, i campi di applicazione e i parametri tecnici necessari per la corretta lavorazione in macchina e per l'impiego del pezzo finito.

Principali materiali

- PLA
- PETG
- ABS
- TPU
- NYLON
- POLICARBONATO
- Materiali Compositi: Caricati Carbonio (CF) e Vetro (GF)

1. PLA (Acido Polilattico)

Il PLA è il materiale di gran lunga più diffuso nel mondo della stampa 3D.

È una bioplastica derivata da risorse rinnovabili (come amido di mais o canna da zucchero) ed è biodegradabile (solo in specifici impianti industriali).

La sua popolarità deriva dall'estrema facilità d'uso: ha un ritiro termico quasi nullo (non si deforma o "warpa") e non richiede una stampante chiusa.

- **Proprietà meccaniche:** Molto rigido e duro superficialmente. Il limite è la fragilità: sotto sforzo non si piega ma si spezza di netto.
- **Campi di applicazione:** Prototipazione rapida, modelli estetici, contenitori non sottoposti a calore, calibri di controllo dimensionale.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da 0°C a +50°C. Rammollisce a 55-60°C (mai lasciarlo in auto al sole).
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 190°C - 220°C
- **Temperatura del piatto:** 0°C - 60°C
- **Velocità max di estrusione:** 50 - 150 mm/s (anche 300+ mm/s con filamenti "High-Speed").

Come si vede chiaramente, il PLA è molto suscettibile alle temperature estive, specialmente all'interno di un abitacolo o sotto l'esposizione diretta dei raggi solari. Superati i 50-60°C, il materiale perde la sua rigidità strutturale, iniziando a incurvarsi e a deformarsi sotto il suo stesso peso o per eventuali tensioni interne, diventando inutilizzabile per applicazioni in ambienti caldi.

2. PETG (Polietilene Tereftalato Glicole)

L'evoluzione del materiale delle bottiglie d'acqua (PET), modificato con glicole.

È il ponte perfetto tra la facilità di stampa del PLA e le resistenze dell'ABS.
È igroscopico (assorbe umidità), quindi va conservato sigillato per evitare fili e bolle in stampa.

- **Proprietà meccaniche:** Ottima adesione tra i layer, leggermente flessibile (il che gli conferisce tenacia) e buona resistenza agli urti e all'acqua.
- **Campi di applicazione:** Componenti meccanici a medio sforzo, custodie elettroniche, supporti esterni, vasi.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da -20°C a +70°C.
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 230°C - 250°C
- **Temperatura del piatto:** 70°C - 90°C
- **Velocità max di estrusione:** 40 - 80 mm/s.

Il PETG è particolarmente adatto per questo tipo di applicazioni a basso o medio sforzo. Offre una maggiore tenacia rispetto al PLA (è meno fragile e assorbe meglio i piccoli impatti) e garantisce un'ottima adesione tra i layer, il che è fondamentale per componenti funzionali che devono resistere a forze meccaniche senza delaminarsi.

3. ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene)

Polimero industriale (usato per i LEGO). Emette fumi sgradevoli (VOC) in stampa e soffre di forte ritiro termico.

Richiede tassativamente una stampante 3D chiusa per evitare che il pezzo si imbarchi (warping) o si spacchi.

- **Proprietà meccaniche:** Estremamente tenace e duraturo, resiste benissimo agli impatti.
  È facilissimo da post-produrre (può essere lisciato chimicamente con vapori di acetone per renderlo lucido).
- **Campi di applicazione:** Componenti automotive, ingranaggi, involucri soggetti a stress continui.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da -20°C a +90°C.
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 230°C - 260°C
- **Temperatura del piatto:** 90°C - 110°C
- **Velocità max di estrusione:** 40 - 60 mm/s.

4. TPU (Poliuretano Termoplastico)

Il filamento flessibile per eccellenza. Ne esistono di varie durezze (scala Shore A).

Per stamparlo efficacemente è consigliato un estrusore di tipo "Direct Drive" per evitare che il filo morbido si attorcigli nel percorso.

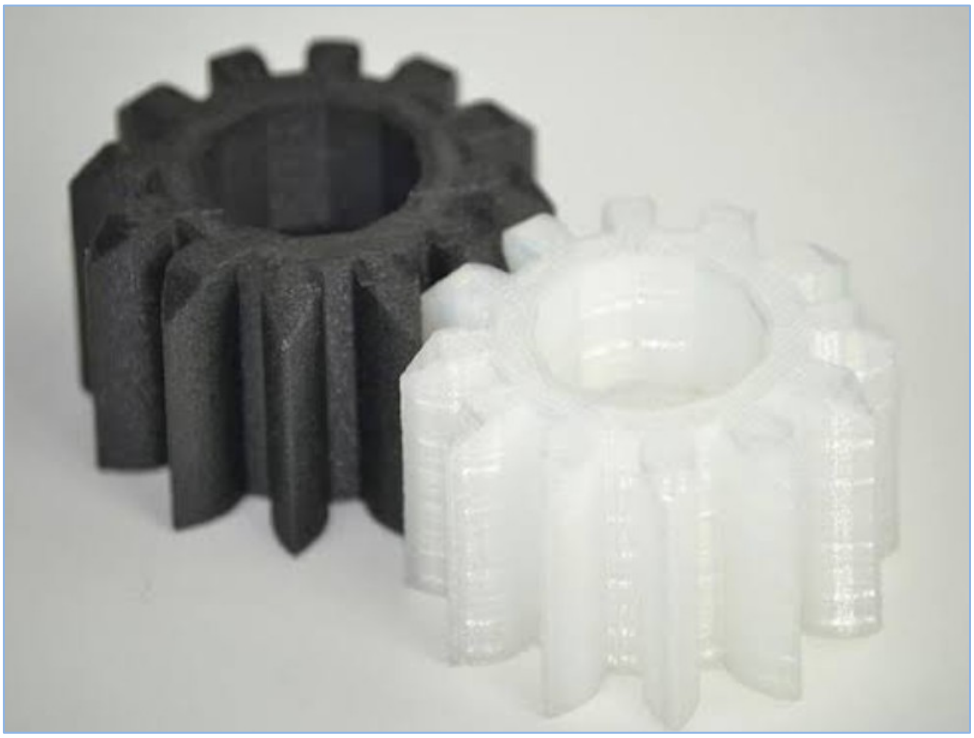
- **Proprietà meccaniche:** Incredibilmente elastico, sopporta forti stiramenti e compressioni. Eccezionale resistenza all'abrasione, ai tagli, agli oli e grassi. Adesione tra layer indissolubile.
- **Campi di applicazione:** Guarnizioni, piedini antivibrazione, ruote, cover, cinghie.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da -40°C a +80°C.
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 210°C - 240°C
- **Temperatura del piatto:** 0°C - 60°C
- **Velocità max di estrusione:** 15 - 40 mm/s (va stampato molto lentamente).

In ambito meccanico e didattico, quando si progettano e assemblano sistemi cinematici come piccoli riduttori ad ingranaggi azionati da motori in corrente continua, questo materiale si rivela strategicamente utilissimo. Grazie alla sua capacità di deformarsi, assorbire gli urti e resistere all'usura, viene spesso impiegato per stampare su misura giunti elastici di accoppiamento (ideali per compensare i leggeri disallineamenti tra gli alberi a gradini) oppure supporti e guarnizioni antivibrazione, perfetti per smorzare le oscillazioni del motore e isolarlo dal resto della struttura.

5. Nylon (Poliammide - PA)

Materiale ingegneristico puro.
Estremamente igroscopico: assorbe acqua in poche ore e va asciugato in forno/dry-box prima della stampa. Soffre di ritiro termico (serve stampante chiusa).

- **Proprietà meccaniche:** Altissima resistenza alla trazione, flette senza spezzarsi (resilienza). È un materiale autolubrificante, con bassissimo attrito superficiale.
- **Campi di applicazione:** Ingranaggi (senza grasso), boccole, cerniere, parti strutturali soggette a sfregamento.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da -40°C a +120°C.
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 240°C - 270°C
- **Temperatura del piatto:** 70°C - 100°C
- **Velocità max di estrusione:** 30 - 60 mm/s.



Il Nylon puro, privo di coloranti o additivi, ha tipicamente un aspetto biancastro, lattiginoso e leggermente traslucido. Rispetto alla versione nera e opaca caricata a carbonio, la superficie del Nylon puro risulta un po' più lucida e scivolosa al tatto, confermando visivamente la sua natura autolubrificante.

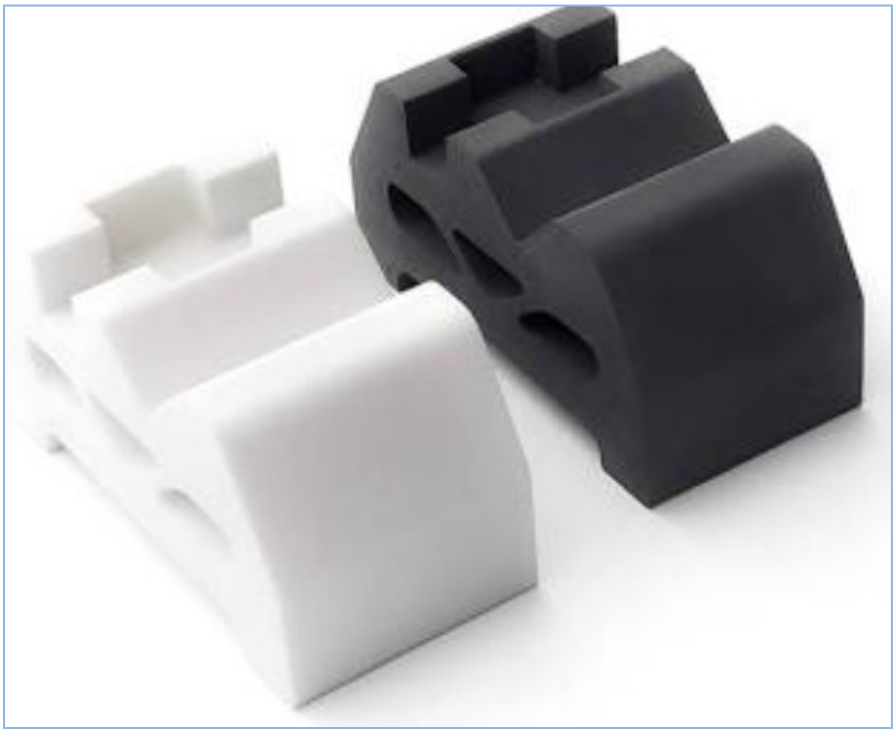
Grazie al suo bassissimo coefficiente di attrito e alla caratteristica di essere autolubrificante, il Nylon (PA) è il materiale d'elezione per i cinematismi e gli organi di trasmissione.

Se si sta progettando e assemblando un riduttore ad ingranaggi, stampare le ruote dentate in Nylon garantisce una fluidità di movimento eccellente e un'usura minima, specialmente quando i componenti in plastica lavorano in accoppiamento diretto con elementi in acciaio, come alberi a gradini, e vengono supportati da classici cuscinetti a sfera.

6. PC (Policarbonato)

Uno dei materiali più forti stampabili in FDM (base dei vetri antiproiettile). Molto difficile da stampare: richiede temperature estreme e una camera chiusa pre-riscaldata per evitare fortissime delaminazioni e warping.

- **Proprietà meccaniche:** Rigidissimo, resiste agli urti in modo ineguagliabile e ha altissima stabilità dimensionale.
- **Campi di applicazione:** Componenti ad altissimo stress termico e meccanico, protezioni antinfortunistiche, collettori.
- **Temperature di impiego (Pezzo finito):** Da -40°C a +110°C (fino a +135°C in miscele pure).
- **Temperatura estrusione (Ugello):** 260°C - 310°C
- **Temperatura del piatto:** 100°C - 120°C (o superiore).
- **Velocità max di estrusione:** 30 - 60 mm/s.



A differenza dei materiali compositi che risultano ruvidi e opachi, il Policarbonato puro si presenta spesso con una finitura solida e, a seconda del filamento, può mantenere una leggera traslucenza.

Come puoi vedere dalle geometrie massicce in foto, questo materiale viene scelto quando il pezzo finito deve garantire una stabilità dimensionale assoluta e resistere a stress termici e meccanici elevatissimi (come impatti violenti), situazioni in cui quasi tutti gli altri polimeri FDM cederebbero.

7. Materiali Compositi: Caricati Carbonio (CF) e Vetro (GF)

I materiali compositi sono formati da un polimero di base (spesso Nylon-PA, PETG o ABS) in cui vengono mescolate micro-fibre sminuzzate di carbonio (CF) o vetro (GF), solitamente dal 15% al 30% in peso.

Attenzione: le fibre sono estremamente abrasive e distruggeranno i normali ugelli in ottone in poche ore; è obbligatorio l'uso di ugelli in acciaio temprato o rubino.

- **Proprietà meccaniche (Carbonio - CF):** Le fibre di carbonio aumentano esponenzialmente la rigidità strutturale e la stabilità dimensionale del pezzo, annullando quasi del tutto il ritiro termico (warping) in fase di stampa, rendendo ad esempio il Nylon molto più facile da stampare. Riducono però la resistenza agli urti rispetto al polimero puro (il pezzo diventa più fragile).
- **Proprietà meccaniche (Vetro - GF):** Simili a quelle del carbonio, ma meno rigide e più tenaci. Le fibre di vetro permettono al pezzo di resistere meglio agli urti e offrono un isolamento elettrico superiore (il carbonio è conduttivo).
- **Campi di applicazione:** Parti strutturali per droni, telai per robotica, supporti per motori, calibri industriali, attrezzi e dime personalizzate. Il Nylon-CF (PA-CF) è oggi lo standard per parti FDM ad altissime prestazioni.
- **Temperature di impiego:** Uguali o leggermente superiori (+5°C / +10°C) al polimero di base utilizzato.
- **Temperatura estrusione (Ugello):** Generalmente 240°C - 280°C (dipende dal polimero di base).
- **Temperatura del piatto:** Dipende dal polimero di base.
- **Velocità max di estrusione:** 30 - 60 mm/s.

Come puoi notare, i materiali caricati a carbonio hanno tipicamente una finitura superficiale nera opaca e leggermente ruvida (dovuta alle micro-fibre sminuzzate al loro interno) che nasconde quasi perfettamente i layer di stampa, conferendo al pezzo un aspetto estremamente professionale oltre a una rigidità eccezionale.

Tabella Riassuntiva dei materiali la stampa 3D

Materiale	Facilità Stampa	Rigidità	Res. Urti (Tenacia)	Temp. Impiego Max	Temp. Ugello (°C)	Temp. Piatto (°C)
PLA	Altissima	Molto Alta	Bassa	~ 50 °C	190 - 220	0 - 60
PETG	Alta	Media	Alta	~ 70 °C	230 - 250	70 - 90
ABS	Bassa (serve camera)	Media	Alta	~ 90 °C	230 - 260	90 - 110
TPU (Flex)	Media (lento)	Molto Bassa	Altissima	~ 80 °C	210 - 240	0 - 60
Nylon (PA)	Bassa (igroscopico)	Bassa (flette)	Molto Alta	~ 120 °C	240 - 270	70 - 100
PC	Molto Bassa (arduo)	Altissima	Altissima	~ 110/135 °C	260 - 310	100 - 120+
PA-CF / GF	Media (ugello acciaio)	Altissima	Media			

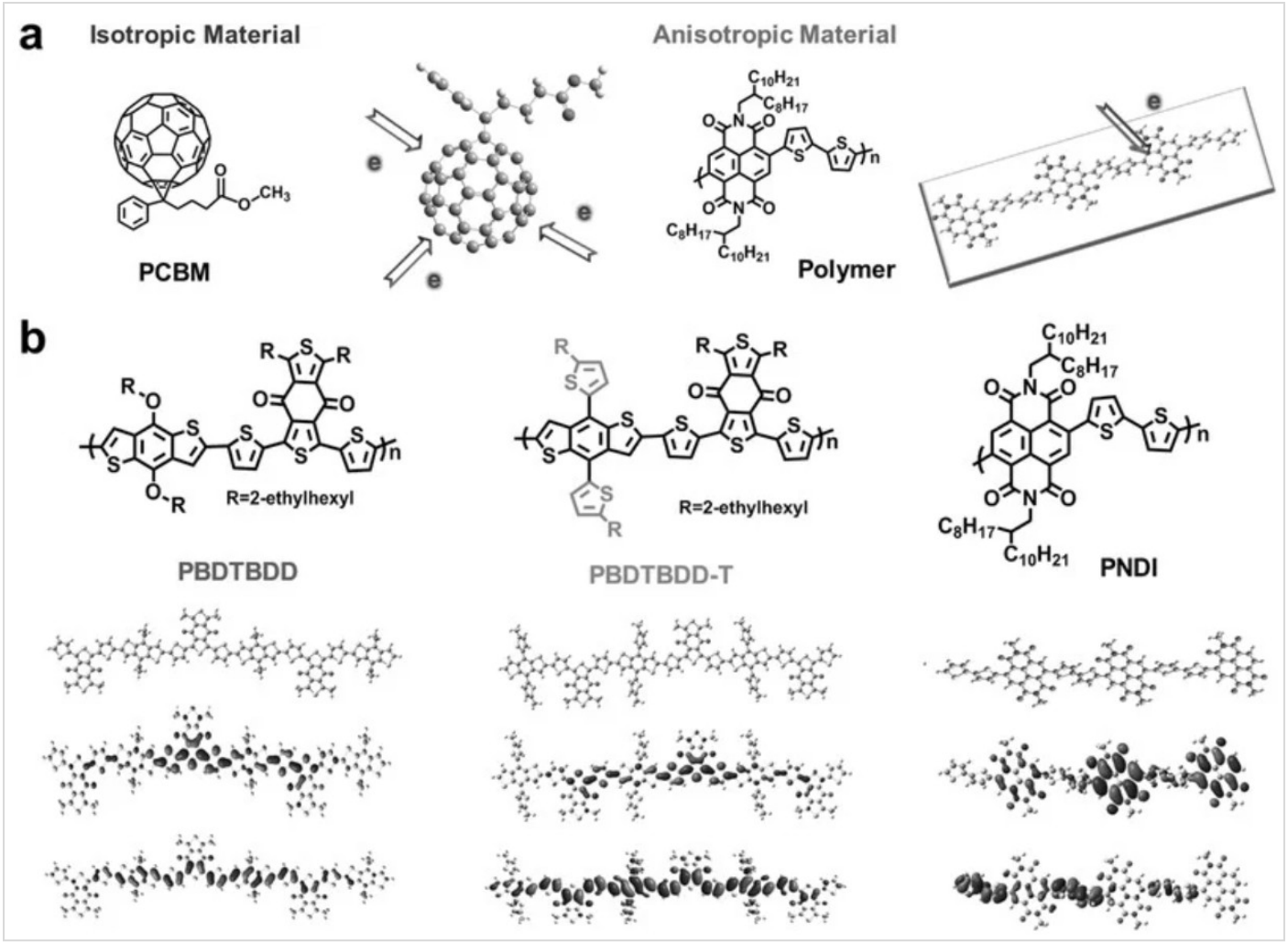
Polimeri Tecnici FDM vs Leghe di Alluminio

Nello studio e nella progettazione di sistemi cinematici la scelta del materiale è lo snodo cruciale del dimensionamento meccanico.
Storicamente, la prototipazione funzionale e i componenti finali venivano realizzati per asportazione di truciolo (fresatura CNC e tornitura) utilizzando leghe leggere.
Oggi, i polimeri ingegneristici e i super-polimeri stampati in 3D si pongono come valide alternative, ma con precise limitazioni progettuali.
Per fare un confronto reale, prenderemo come riferimento metallico una lega di alluminio standard da lavorazione meccanica, come l'Anticorodal (Lega AW 6082 - T6).

1. Il Riferimento: Lega di Alluminio (AW 6082)

L'alluminio lavorato dal pieno è un materiale isotropo (ha le stesse proprietà in tutte le direzioni) e garantisce prestazioni strutturali eccellenti.

- **Carico di rottura a trazione (Rm):** ~ 300 - 340 MPa
- **Modulo di elasticità (Modulo di Young, E):** ~ 70 GPa (70.000 MPa)
- **Densità (Peso specifico):** 2,7 g/cm³
- **Comportamento termico:** Fonde oltre i 600°C, utilizzabile per impieghi continui anche a 200-250°C senza perdita drastica di proprietà.



Guardando la struttura a livello microscopico (o atomico/molecolare) capiamo subito il perché del loro comportamento meccanico:

- **A sinistra (Comportamento Isotropo):** La struttura è simmetrica in tutte le direzioni nello spazio (come un reticolo cristallino metallico regolare o, in questa immagine, una molecola sferica). Poiché i legami chimici e la disposizione degli atomi sono identici in ogni asse (X, Y e Z), se applichi una forza da qualsiasi direzione incontrerai esattamente la stessa resistenza.
- **A destra (Comportamento Anisotropo):** La materia è organizzata in "catene" lunghe e orientate (come le molecole dei polimeri, le fibre di carbonio o, su scala più grande, i layer depositati da una stampante 3D). I legami *lungo* la catena sono fortissimi (legami covalenti), quindi tirando in quella direzione il materiale è resistentissimo. Ma i legami *tra una catena e l'altra* sono molto più deboli. Se applichi una forza lateralmente (cercando di separare le catene o i layer), il materiale cederà con uno sforzo minimo.

Nella stampa 3D, l'ugello fonde e allinea queste catene polimeriche lungo il piano orizzontale (creando grande resistenza). Ma quando deposita il layer successivo sopra quello freddo, si crea solo una debole adesione superficiale, generando esattamente la debolezza direzionale (anisotropia) che vediamo nel grafico di destra.

2. I Sostituti Plastici: Compositi e Super-Polimeri FDM

Per avvicinarsi (o competere) con l'alluminio, il normale PLA o il PETG non sono sufficienti. Il campo meccanico richiede l'uso di materiali avanzati.

A. Nylon Caricato a Fibra di Carbonio (PA-CF / PA-GF)

È il cavallo di battaglia della stampa 3D meccanica accessibile. Le fibre sminuzzate all'interno del Nylon bloccano lo scorrimento molecolare, aumentando drasticamente la rigidità.

- **Carico di rottura a trazione:** 80 - 120 MPa (circa 1/3 dell'alluminio).
- **Modulo di elasticità (E):** 5 - 10 GPa (molto più rigido della plastica standard, ma 7-10 volte più flessibile dell'alluminio).
- **Densità:** 1,1 - 1,2 g/cm³ (pesa meno della metà dell'alluminio).
- **Vantaggio meccanico:** Eccezionale rapporto resistenza/peso. Ha un comportamento tribologico eccellente: le ruote dentate in PA-CF accoppiate con pignoni in acciaio o alberi a gradini metallici subiscono un'usura minima anche in assenza di lubrificazione, situazione in cui l'alluminio tenderebbe a grippare.

B. Policarbonato (PC) e PC-CF

Utilizzato per parti strutturali che devono resistere a urti violenti e temperature medie.

- **Carico di rottura a trazione:** 70 - 90 MPa.
- **Modulo di elasticità (E):** 2,5 - 3 GPa (fino a 6 GPa se caricato a carbonio).
- **Vantaggio meccanico:** Straordinaria resilienza. Mentre l'alluminio sotto un urto oltre il limite di snervamento si ammacca in modo plastico permanente, il PC assorbe l'energia flettendosi o assorbendo l'urto mantenendo l'integrità geometrica.

C. I Super-Polimeri (PEEK, PEI/Ultem)

Questi materiali richiedono stampanti industriali in grado di fondere a 400°C in camere riscaldate a 150°C. Sono i veri e propri "metal replacement" impiegati nell'aerospaziale e nel motorsport.

- **Carico di rottura a trazione:** 100 - 140 MPa (fino a 200+ MPa nelle varianti caricate a fibra di carbonio continua).
- **Modulo di elasticità (E):** 10 - 20 GPa.
- **Resistenza termica:** Temperatura di impiego continuo fino a 250°C.
- **Vantaggio meccanico:** Sostituiscono l'alluminio in ambienti chimicamente aggressivi o dove l'isolamento elettrico e il risparmio di peso estremo sono vincolanti, offrendo tolleranze dimensionali paragonabili a quelle delle macchine utensili.

3. Confronto Progettuale: Quando scegliere cosa?

Nella transizione da un pezzo in alluminio a uno stampato in 3D (ad esempio, passando da una scatola di riduzione in alluminio fresato a una stampata in PA-CF), non si può applicare la stessa geometria, a causa di tre fattori fondamentali:

1. **L'Ostacolo della Rigidità Assoluta:** A parità di volume e spessore, **nessun polimero stampato in 3D è rigido quanto l'alluminio** (70 GPa contro un massimo di 15-20 GPa). Un carter stampato in 3D sottoposto a torsione fletterà molto di più. Per compensare, il progettista deve riprogettare il componente sfruttando la topologia: aumentare gli spessori delle pareti, inserire nervature di irrigidimento e raggi di raccordo ampi, sfruttando il fatto che in 3D aggiungere complessità geometrica non aumenta il costo di produzione (al contrario delle lavorazioni CNC).

2. **L'Anisotropia della Stampa 3D (Il punto debole):** Un albero o un tirante tornito in lega AW 6082 resiste a 300 MPa in qualsiasi direzione lo si tiri. Un pezzo stampato in 3D in FDM è **anisotropo**. I valori di trazione dichiarati dai produttori (es. 100 MPa per il PA-CF) valgono solo lungo gli assi X e Y (il piano di stampa). Lungo l'asse Z (la direzione in cui si sovrappongono i layer), la resistenza meccanica crolla dal 30% al 50%. Se un componente è sottoposto a carichi di trazione lungo l'asse Z, i layer si separeranno (delaminazione) molto prima di raggiungere il limite teorico del materiale.

3. **Accoppiamenti e Tolleranze:** Per inserire un cuscinetto a sfere in una sede in alluminio si utilizzano tolleranze centesimali (es. H7/j6) realizzate con alesatori o bareni. Nella stampa 3D FDM, l'inevitabile ritiro termico dei polimeri rende impossibile garantire la centesimale direttamente dalla macchina. In ambito meccanico si aggira il problema stampando le sedi dei cuscinetti leggermente sottodimensionate e ripassandole successivamente a macchina utensile, oppure prevedendo l'inserimento a caldo di boccole filettate in ottone per i serraggi, poiché i filetti stampati in plastica tendono a spanarsi rapidamente sotto sforzo assiale.

In sintesi: l'alluminio rimane ineguagliabile per rigidità assoluta, isotropia e capacità di gestire calore estremo. I polimeri tecnici stampati in 3D diventano superiori quando si ricercano un'estrema riduzione delle masse inerziali, inerzia chimica, isolamento termico/elettrico o capacità autolubrificanti in cinematismi complessi.