



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Miglioramento delle prestazioni meccaniche di polimeri fibrorinforzati
in corrispondenza della linea di giunzione mediante il processo di
gas-assisted push-pull**

Relatore: Prof. Marco Sorgato

Laureando: Felice Fabrizio Scuderi

Matricola: 2026863

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

Abstract	3
1 Introduzione	5
1.1 Stampaggio ad iniezione	11
1.2 Difetti dello stampaggio ad iniezione	15
1.3 Weld line	18
1.4 Soluzioni per ridurre l'effetto della weld line	21
1.4.1 "Inflow"	22
1.4.2 Push-Pull	23
1.4.3 Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) combinato con il Push-Pull	25
1.4.4 Shear Controlled Orientation in Injection Molding (SCORIM)	27
1.5 Gas-Assisted Push-Pull	28
1.6 Simulazione numerica del processo stampaggio ad iniezione	29
2 Materiali e metodi	31
2.1 Polipropilene fibro-rinforzato	32
2.1.1 Normativa campioni	34
2.1.2 Pressa ad iniezione	35
2.1.3 Stampaggio dei campioni	38
2.2 Analisi dinamometriche	46
2.3 Analisi microscopio elettronico (SEM)	47
2.4 Simulazione numerica del processo d'iniezione	49
2.4.1 Simulazione numerica dei campioni	49
2.4.2 Simulazione numerica fan	51
2.5 Analisi strutturale agli elementi finiti (FEM)	56
3 Risultati e discussione	59
3.1 Prove dinamometriche	60
3.1.1 Risultati prove dinamometriche XT20, XT30, XT40	60

3.1.2 Risultati dinamometrici per il GREEN 40	66
3.2 Analisi della superficie di frattura	70
3.3 Simulazione del processo di stampaggio	77
3.3.1 Simulazione per provino di tipo 1B.....	77
3.3.2 Simulazione colling fan.....	80
3.4 Risultati analisi FEM	85
4 Conclusione.....	95
5 Bibliografia	97

Abstract

Nei processi convenzionali di stampaggio, una delle principali sfide è l'orientamento delle fibre in materiali termoplastici rinforzati. Quando le fibre si dispongono parallelamente alla weld line, le prestazioni meccaniche del materiale possono risultare compromesse, con una riduzione della resistenza e della rigidità. Questo fenomeno è particolarmente problematico in applicazioni dove è fondamentale avere elevate prestazioni meccaniche. Per risolvere questa problematica, nella mia tesi di laurea è stata testata una tecnologia innovativa di stampaggio denominata gas assisted push-pull (GAPP). Questa tecnica è stata sviluppata per ottimizzare l'orientamento delle fibre in prossimità della weld line.

Nella mia ricerca, ho utilizzato il polipropilene rinforzato con diverse percentuali di fibre di vetro: 20%, 30% e 40%. I campioni sono stati prodotti utilizzando sia tecniche di stampaggio convenzionali che la tecnologia GAPP. Successivamente, ho eseguito prove meccaniche per valutare le proprietà dei campioni ottenuti con entrambe le metodologie.

I risultati delle prove di trazione hanno chiaramente dimostrato che l'uso della tecnica GAPP porta a un significativo miglioramento della rigidità e della resistenza dei campioni. Questo miglioramento è dovuto all'orientamento delle fibre in direzione del flusso del materiale, in corrispondenza della weld line. Al contrario, nei metodi convenzionali, le fibre tendono a rimanere parallele alla weld line, limitando così le prestazioni meccaniche. La riorganizzazione delle fibre ottenuta con il GAPP non solo migliora le proprietà meccaniche, ma rende anche il materiale più prestazionale e resistente alle sollecitazioni meccaniche, ampliando le sue potenziali applicazioni industriali. Questo approccio innovativo rappresenta un passo avanti significativo nel miglioramento delle tecniche di stampaggio per materiali termoplastici fibrorinforzati, offrendo nuove opportunità per la progettazione di componenti più performanti.

1 Introduzione

Lo stampaggio ad iniezione (IM) si afferma come uno dei processi più diffusi per la produzione di massa di componenti plastici caratterizzati da geometrie complesse e un elevato grado di replicazione. Questo successo è strettamente legato alla crescente domanda di componenti leggeri che offrano eccellenti proprietà meccaniche a costi contenuti. I polimeri, materiali composti da lunghe catene di molecole, rispondono perfettamente a queste esigenze. Queste macromolecole conferiscono ai polimeri proprietà uniche e una notevole versatilità nei metodi di lavorazione, rendendoli estremamente richiesti nel mercato attuale.

La bassa densità dei polimeri, insieme alla loro capacità di essere modellati a temperature inferiori rispetto ai materiali tradizionali come metalli e ceramiche, li rende ideali per il consolidamento delle parti. Questo approccio progettuale consente di integrare più componenti in un unico pezzo, semplificando la produzione e riducendo i costi. Componenti che in passato erano realizzati in legno, metallo, ceramica o vetro vengono sempre più frequentemente riprogettati per l'uso della plastica, evidenziando l'evoluzione delle tecnologie e delle pratiche di design.

È importante sottolineare che le caratteristiche del prodotto finito non dipendono esclusivamente dalla scelta dei materiali e degli additivi, ma sono anche influenzate dal processo di produzione. La relazione tra il materiale e le prestazioni del prodotto è riassunta nel concetto delle 6 P: 1 Polimero, 2 Processo, 3 Prodotto, 4 Prestazione, 5 Profitto e 6 Vita Post-consumo. Questo approccio integrato è fondamentale per garantire che i prodotti non solo soddisfino le aspettative di qualità e performance, ma siano anche sostenibili e redditizi nel lungo termine [1]. Le 6 P rappresentano un approccio integrato che aiuta a garantire che il prodotto finale soddisfi non solo le esigenze del mercato, ma anche i requisiti di qualità, sostenibilità e redditività. Esaminare attentamente ciascun aspetto consente ai progettisti di anticipare eventuali sfide e ottimizzare il processo di sviluppo, assicurando che ogni fase della progettazione e produzione sia allineata con gli obiettivi strategici dell'azienda. Quando si sviluppa un nuovo prodotto, è fondamentale tenere in considerazione ciascuna delle 6 P. La Figura 1.1 fornisce un riepilogo delle 6 P. Per comprenderne appieno l'importanza, tuttavia, è fondamentale analizzarle singolarmente. Di seguito è riportata una descrizione dettagliata delle 6 P.

Polymer	Molecule Fillers Fibers Additives	Compatibility Adhesion Regulation/Legislation	Properties of polymer Properties of fiber Properties of additives
Process	Extrusion Injection Compression	Heating Mixing Pumping Forming	Morphology Orientation Degradation
Product	Pellet Film/Fiber Component Assembly		
Performance	Thermal Mechanical Optical Environmental		
Profit	Material cost Die and mold cost Machine and energy cost Labor and automation cost		
Post-consumer Life	Recycling Environment Sustainability Regulation/Legislation		

Figura 1.1. Sintesi delle 6 P: 1 Polimero, 2 Processo, 3 Prodotto, 4 Prestazione, 5 Profitto e 6 Vita Post-consumo [1].

I **polimeri** possono essere suddivisi in tre categorie principali: termoplastici, termoindurenti ed elastomeri. Sebbene tutte queste famiglie siano costituite da lunghe catene molecolari, si differenziano per la natura dei legami che intercorrono tra di esse. I termoplastici e gli elastomeri non vulcanizzati non presentano reticolazione, mentre i termoindurenti e gli elastomeri vulcanizzati sono caratterizzati da legami reticolati, che conferiscono loro proprietà uniche. I termoplastici sono solidi a temperatura ambiente e, quando vengono riscaldati oltre una certa soglia, possono tornare a uno stato fluido, rendendoli riciclabili. Inoltre, i materiali termoplastici si classificano in due sottocategorie: amorfi e semicristallini. Nella Tabella 1.1 sono riportati i materiali termoplastici amorfi e semicristallini più comuni, insieme alle loro applicazioni. I polimeri amorfi hanno una struttura disordinata e solidificano al di sotto della temperatura di transizione vetrosa (T_g). Al contrario, i semicristallini presentano una struttura più ordinata e compatta, con legami più forti, che richiedono un maggiore apporto energetico per essere rotti, consentendo loro di resistere a temperature più elevate, note come temperatura di fusione (T_m). I termoindurenti e gli elastomeri vulcanizzati, invece, formano legami molto robusti grazie alla reticolazione, mantenendo così la loro stabilità anche a temperature elevate. Tuttavia, questi materiali non sono riciclabili e la loro temperatura di transizione vetrosa è

spesso vicina a quella di degradazione. Nella Tabella 1.2 sono riportati i polimeri termoindurenti ed elastomeri più comuni e le loro applicazioni insieme alle loro applicazioni.

Tabella 1.1. Materiali amorfi e semi-cristallini più comuni e loro applicazioni [1].

Termoplastici	Applicazioni dei Polimeri
Amorfi	
Polistirene	Articoli trasparenti prodotti in massa, imballaggi termoformati, imballaggi espansi e prodotti per isolamento termico, ecc.
Polimetilmetacrilato	Lucernari, finestre per aerei, lenti, finestre antiproiettile, fanali posteriori per automobili, ecc.
Policarbonato	Caschi, lenti per occhiali, CD, maschere da hockey, finestre antiproiettile, luci di direzione, fari, ecc.
Polivinile clorurato non plastificato	Tubi, telai per finestre, rivestimenti, grondaie, bottiglie, imballaggi termoformati, ecc.
Polivinile clorurato plastificato	Scarpe, tubi, articoli cavi stampati rotazionalmente come palloni e altri giocattoli, film calandrati per impermeabili e tovaglie, ecc.
Semi-cristallini	
Polietilene ad alta densità	Bottiglie di latte e sapone, produzione di massa di articoli per uso domestico di qualità superiore, tubi, rivestimenti per carta, ecc.
Polietilene a bassa densità	Produzione di massa di articoli per uso domestico, bottiglie, sacchetti della spesa, ecc.
Polipropilene	Articoli come valigie, tubi, applicazioni ingegneristiche (rinforzate con fibra di vetro), involucri per elettrodomestici, ecc.
Politetrafluoroetilene	Rivestimento di padelle da cucina, cuscinetti senza lubrificante, ecc.
Poliammide	Cuscinetti, ingranaggi, bulloni, ruote per pattini, tubi, lenze da pesca, tessuti, corde, ecc.

Tabella 1.2. Polimeri termoindurenti ed elastomeri più comuni e loro applicazioni [1].

Polimeri	Applicazioni dei Polimeri
Termoindurenti	
Epossidico	Molle a foglia per automobili rinforzate con fibra di vetro, telai per biciclette rinforzati con fibra di carbonio, ali e fusoliere di aerei, ecc.
Melamina	Superfici decorative resistenti al calore per cucine e mobili, piatti, ecc.
Fenolici	Manici resistenti al calore per padelle, ferri da stiro e tostapane, prese elettriche, ecc.
Poliestere insaturo	Lati dei tostapane, manici degli ferri da stiro, antenne satellitari, involucri di interruttori rinforzati con fibra di vetro e pannelli della carrozzeria automobilistica, ecc.
Elastomeri	
Polibutadiene	Pneumatici per automobili (miscelati con gomma naturale e gomma stirene-butadiene), pelle delle palline da golf, ecc.
Gomma etilene-propilene	Tubi per radiatori automobilistici e guarnizioni per finestre, coperture per tetti, ecc.
Polietilene a bassa densità	Produzione di massa di articoli per uso domestico, bottiglie, sacchetti della spesa, ecc.
Polipropilene	Articoli come valigie, tubi, applicazioni ingegneristiche (rinforzate con fibra di vetro), involucri per elettrodomestici, ecc.
Politetrafluoroetilene	Rivestimento di padelle da cucina, cuscinetti senza lubrificante, ecc.
Poliammide	Cuscinetti, ingranaggi, bulloni, ruote per pattini, tubi, lenze da pesca, tessuti, corde, ecc.

Esistono anche i polimeri fibro-rinforzati, materiali composti costituiti da una matrice polimerica, generalmente una resina termoplastica o termoindurente, rinforzata con fibre di vario tipo, come fibra di vetro, fibra di carbonio o fibra aramidica. L'impiego di queste fibre rinforzanti consente di migliorare notevolmente le prestazioni meccaniche dei polimeri, rendendoli più resistenti a trazione, compressione e flessione. Le fibre possono essere lunghe o corte, a seconda dell'applicazione del componente e del processo produttivo utilizzato. È importante notare che le prestazioni meccaniche dei polimeri fibro-rinforzati tendono ad aumentare con l'incremento della percentuale di fibre. Ad esempio, la Figura 1.2 mostra il comportamento del polipropilene rinforzato, si evidenzia come le prestazioni meccaniche migliorino rispetto al materiale non rinforzato.

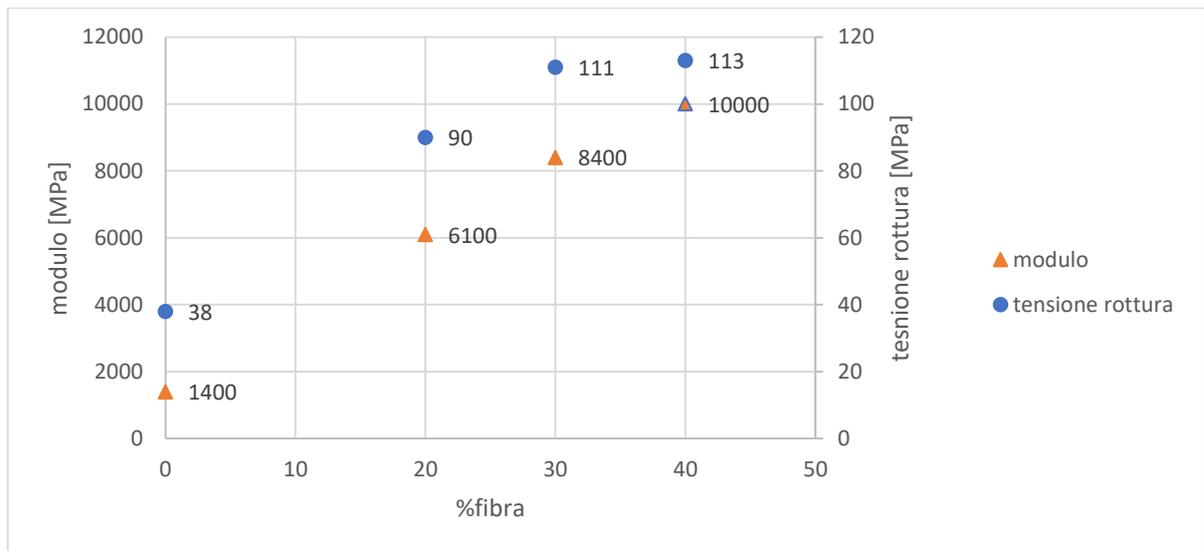


Figura 1.2. Andamento della tensione di rottura e del modulo al variare della percentuale di fibra di vetro nel polipropilene fibro-rinforzato.

Il **processo** di lavorazione dei polimeri può avvenire attraverso diverse tecniche, come estrusione, stampaggio a iniezione e stampaggio a compressione. Questi metodi comportano il riscaldamento, la fusione, la miscelazione, il pompaggio, la modellazione e la solidificazione del materiale polimerico. Ogni fase del processo influisce sulla storia termica e sulla deformazione del polimero, determinando le caratteristiche finali del prodotto. La morfologia, l'orientamento molecolare e il grado di riempimento sono fattori cruciali che emergono durante la lavorazione e possono influenzare significativamente le proprietà meccaniche, chimiche e fisiche del prodotto finale. Inoltre, il livello di degradazione del polimero durante il processo di lavorazione è un aspetto importante da considerare, poiché può compromettere le prestazioni del prodotto.

Il **prodotto** finale può manifestarsi in diverse forme, come pellet, film, fibre, componenti o assemblaggi. È essenziale che il prodotto finale rispetti specifici requisiti, come la capacità di resistere a carichi termici, di presentare particolari proprietà meccaniche o di avere qualità ottiche definite. Inoltre, è fondamentale che queste caratteristiche siano mantenute anche in ambienti potenzialmente dannosi per il materiale plastico.

Il successo di un prodotto o di un progetto si misura principalmente attraverso il suo impatto sul **profitto**. Il costo di produzione è uno dei fattori che influenzano la redditività e dipende da elementi come il prezzo dei materiali, i costi di stampi e attrezzature, e le spese per macchinari e manodopera. Le decisioni riguardanti l'automazione rispetto all'impiego di personale umano giocano un ruolo significativo in questo contesto.

Attualmente, la gestione della vita **post-consumo** si concentra soprattutto sul riciclo. Negli ultimi decenni, la domanda di plastica è cresciuta drasticamente, passando da 1,5 milioni di tonnellate nel 1950 a oltre 390 milioni nel 2021. Poiché la plastica è un materiale relativamente nuovo, il suo impatto ambientale a lungo termine è ancora incerto. Si stima che possa rimanere intatta per millenni prima di decomporsi, a seconda del tipo di plastica e delle condizioni ambientali [2]. Questo ha reso la gestione dei rifiuti di plastica un tema cruciale, soprattutto in Europa, dove nel 2020 il 6% dei rifiuti è stato recuperato energeticamente, il 15% interrato, il 39% riciclato e il 40% smaltito in discarica[3]. Il riciclaggio è visto come la soluzione principale per ridurre l'impatto ambientale della plastica, poiché riduce la necessità di materie prime vergini e la quantità di rifiuti. Esistono due categorie di plastica riciclabile: il rifiuto post-industriale (PIR), proveniente direttamente dall'industria e generalmente più facile da trattare, e il rifiuto post-consumo (PCR), che proviene dalla raccolta urbana e spesso è contaminato. Un esempio rilevante di plastica post-consumo è il polipropilene riciclato (rPP), ampiamente utilizzato nell'industria degli imballaggi. Questo materiale è una fonte significativa di rifiuti PCR a causa dell'uso diffuso di prodotti monouso. Il polipropilene presenta potenzialità per l'upcycling, un processo che trasforma materiali riciclati in prodotti di maggiore valore. Tuttavia, l'upcycling è ostacolato da problemi durante la rilavorazione del rPP, come la presenza di contaminanti che possono influenzare negativamente la qualità e l'aspetto finale dei prodotti. Tra i difetti riscontrati nei pezzi stampati in PP PCR ci sono le striature argentee, causate dalla formazione di bolle di gas all'interno della fusione plastica. Queste bolle si espandono e si rompono, creando striature visibili sulla superficie. La ricerca su questo fenomeno, così come sull'ottimizzazione delle temperature di stampo, è ancora in fase di sviluppo e rappresenta un'area promettente per migliorare la qualità dei materiali riciclati [2].

In sintesi, mentre il riciclaggio e l'upcycling rappresentano opportunità per un futuro sostenibile, rimangono sfide significative da affrontare per migliorare i processi e la qualità dei materiali riciclati. Dunque, è cruciale che ingegneri e progettisti considerino anche l'impatto ambientale e la sostenibilità durante la progettazione di prodotti in plastica e nello sviluppo dei materiali [1].

1.1 Stampaggio ad iniezione

Lo stampaggio a iniezione è il metodo principale per la produzione di articoli in plastica, rappresentando oltre un terzo dell'intera lavorazione dei materiali termoplastici. Questo processo si distingue per la sua capacità di realizzare componenti complessi con tolleranze estremamente precise, rendendolo ideale per produzioni in serie. Le origini dello stampaggio a iniezione risalgono al 1872, quando i fratelli Hyatt brevettarono una macchina innovativa per iniettare cellulosa negli stampi. Da allora, la tecnologia ha subito notevoli evoluzioni, integrando macchinari automatizzati e sistemi di controllo computerizzati che hanno incrementato l'efficienza e la precisione del processo. Le macchine moderne per lo stampaggio a iniezione si basano principalmente sulla tecnologia della vite alternata, introdotta nel 1956. Queste macchine sono composte da tre elementi essenziali: l'unità di plastificazione, l'unità di chiusura e lo stampo come rappresentato [4] in Figura 1.3. Durante il processo, la plastica fusa viene iniettata all'interno di uno stampo, dove si raffredda e solidifica, assumendo la forma desiderata. Grazie alla sua versatilità, lo stampaggio a iniezione è ampiamente utilizzato in vari settori, tra cui automotive, elettronica, imballaggio e beni di consumo. Permette l'utilizzo di diversi materiali e colori, rendendolo adatto a una vasta gamma di applicazioni e prodotti. In sintesi, lo stampaggio a iniezione continua a essere un pilastro fondamentale nella produzione industriale moderna.

A differenza di altri processi di produzione, lo stampaggio a iniezione richiede un'attenta ingegnerizzazione sia del prodotto che del processo stesso. Esistono diversi tipi di macchine, ciascuna progettata per specifiche forme, finiture, dimensioni, performance e costi del componente finale. Sebbene la fase di progettazione possa risultare più complessa, i vantaggi sono notevoli: è possibile ottenere oggetti di piccole o grandi dimensioni con geometrie complesse e un elevato grado di replicazione, anche per pareti sottili [5].

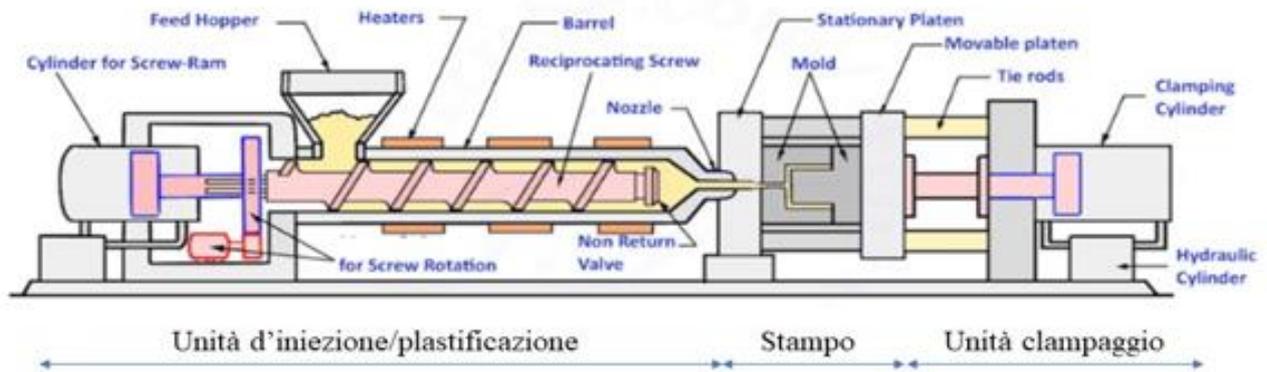


Figura 1.3. Pressa per lo stampaggio ad iniezione formata da 3 elementi essenziali che sono: l'unità di plastificazione, l'unità di chiusura e lo stampo [6].

Il ciclo di stampaggio a iniezione si articola in quattro fasi fondamentali, come illustrato nella Figura 1.4:

1. **Plastificazione (Plastification):** In questa fase iniziale, lo stampo viene chiuso e il materiale plastico viene iniettato nelle cavità dello stampo fino al completo riempimento. Questo passaggio è cruciale per garantire che ogni dettaglio del componente venga riprodotto con precisione.
2. **Iniezione (Injection):** Una volta riempito lo stampo, la vite di plastificazione esercita una pressione costante, generalmente intorno all'80% della pressione massima d'iniezione. Questa pressione è fondamentale per compensare i ritiri del materiale plastico durante il raffreddamento in cavità.
3. **Impaccamento/Raffreddamento (Packing/Cooling):** Durante questa fase, il componente rimane all'interno dello stampo per un periodo di tempo necessario a raggiungere una rigidità sufficiente per l'estrazione. In parallelo, la vite di plastificazione accumula il materiale necessario per il ciclo successivo, ottimizzando così il tempo di produzione.
4. **Estrazione (Ejection):** Infine, lo stampo si apre e il componente viene estratto. Questo passaggio segna la conclusione del ciclo di stampaggio e consente di avviare un nuovo ciclo con il materiale accumulato.

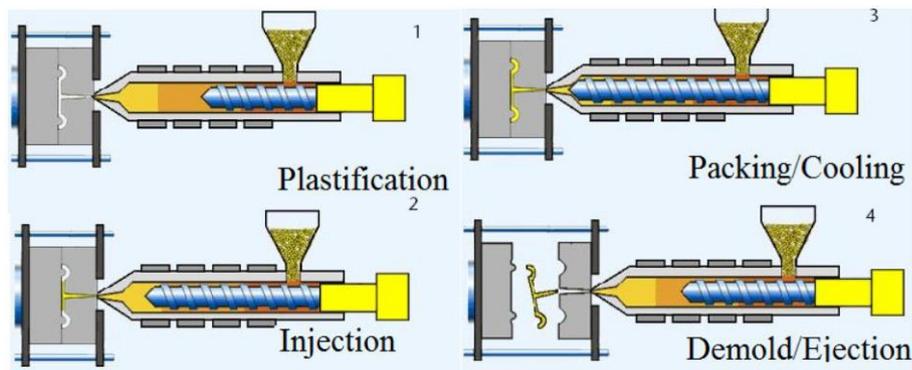


Figura 1.4. Descrizione delle quattro fasi del ciclo di stampaggio a iniezione : 1)Plastificazione (Plastification), 2) Iniezione (Injection), 3) Impaccamento (Packing) / Raffreddamento(Cooling), 4) Estrazione (Ejection) [7].

La sequenza di queste 4 fasi: 1) Plastificazione (Plastification), 2) Iniezione (Injection), 3) Impaccamento (Packing) / Raffreddamento (Cooling), 4) Estrazione (Ejection), determina il tempo di ciclo dello stampaggio. La Figura 1.4 mostra che tale tempo è principalmente influenzato dalla fase di raffreddamento (cooling). Questa fase è cruciale, poiché la durata del raffreddamento è direttamente correlata allo spessore massimo del componente prodotto. In generale, componenti più spessi richiedono tempi di raffreddamento più lunghi, poiché il calore deve dissiparsi completamente affinché il materiale raggiunga una rigidità adeguata all'estrazione. Di conseguenza, ottimizzare il design del componente e ridurre gli spessori non necessari può contribuire a diminuire il tempo di ciclo complessivo, migliorando così l'efficienza produttiva. Si può notare, in Figura 1.5, che il tempo di iniezione (injection) è molto ridotto, così come il tempo necessario per aprire e chiudere lo stampo (open/close mold) e il tempo di mantenimento della pressione (pressure hold), durante il quale si compensano i ritiri del componente iniettando ulteriore plastica. Pertanto, è fondamentale considerare attentamente la progettazione del componente e le specifiche del materiale, poiché questi fattori influenzano non solo la qualità finale del prodotto, ma anche la produttività del processo di stampaggio.

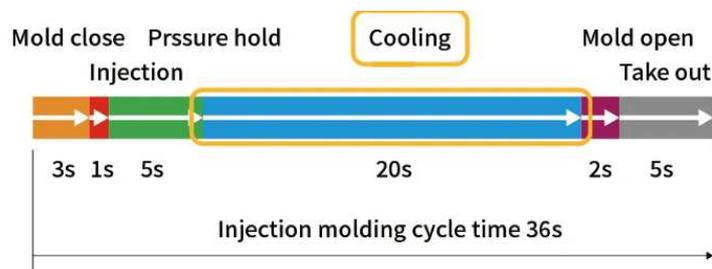


Figura 1.5. Tempi del ciclo di stampaggio a iniezione. La fase di raffreddamento (cooling) influenza maggiormente il tempo del ciclo. I valori in Figura sono indicativi di un ciclo generico di stampaggio.

Il diagramma pressione–volume-temperatura (diagramma PVT), illustrato nella Figura 1.6, offre una panoramica dettagliata della storia del processo di stampaggio a iniezione, riassumendo le quattro fasi principali: 1) riempimento, 2) impaccamento, 3) raffreddamento e 4) estrazione.

- 1) Nella **fase di riempimento**, il polimero viene iniettato mantenendo una portata costante e una temperatura stabile. Durante questa fase, la pressione aumenta fino a completare il riempimento della cavità dello stampo, rappresentato da un tratto isoterma (numeri 1-3 nella Figura 1.6). Una volta raggiunta la pressione massima d'iniezione, il sistema passa da un controllo di velocità a un controllo di pressione, per compensare eventuali ritiri del materiale nella cavità (numeri 3-4 nella Figura 1.6).
- 2) Nella **fase di impaccamento**, la pressione viene mantenuta costante, fissata all'80% della pressione massima d'iniezione. Questo è rappresentato da un tratto isobaro (numeri 4-5 nella Figura 1.6) e continua fino al completo congelamento del gate.
- 3) Nella **fase di raffreddamento**, sia la temperatura che la pressione diminuiscono, mentre il volume rimane costante, come indicato nel tratto isocoro (numeri 5-6 nella Figura 1.6). Questa fase è cruciale, poiché il raffreddamento adeguato garantisce che il componente raggiunga la rigidità necessaria per l'estrazione.
- 4) Nella **fase di estrazione**, una volta che la pressione raggiunge il valore atmosferico, essa rimane costante mentre temperatura e volume continuano a diminuire, rappresentati dal tratto isobaro (numeri 6-8 nella Figura 1.6). Il ritiro del componente è influenzato principalmente dalla differenza di temperatura tra il punto 6 e il punto 8, ossia tra la temperatura in stampo al termine dell'impaccamento e quella ambiente, oltre che dalla pressione esercitata durante il processo.

In sintesi, il diagramma PVT non solo illustra le dinamiche fisiche del processo di stampaggio, ma fornisce anche informazioni preziose per ottimizzare le condizioni operative, migliorando così la qualità del prodotto finale e l'efficienza del ciclo produttivo [4].

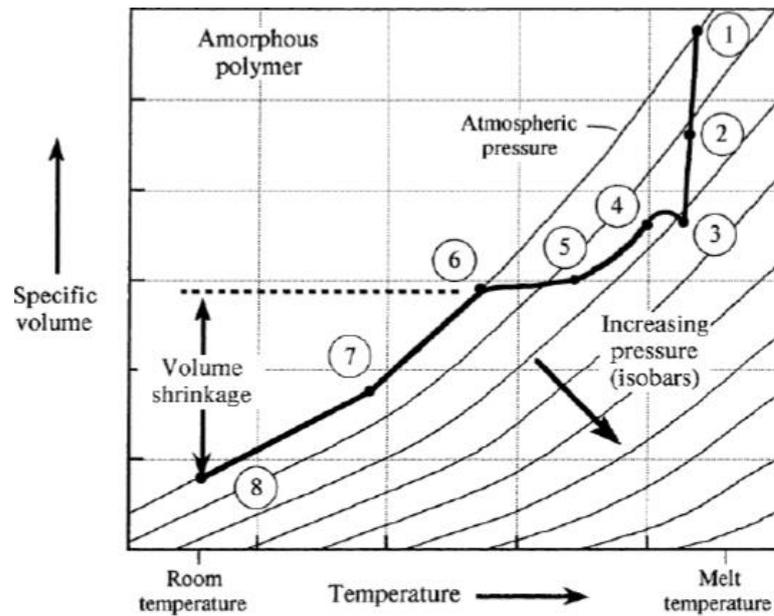


Figura 1.6. Diagramma pressione-temperatura-volume relativo al ciclo di stampaggio a iniezione.

1.2 Difetti dello stampaggio ad iniezione

Le combinazioni ottimali di pressione e temperatura necessarie per ottenere un componente conforme alle specifiche sono rappresentate in un grafico noto come “finestra di stampaggio”, come mostrato nella Figura 1.7. Questa finestra delimita le condizioni operative attraverso valori minimi e massimi di temperatura e pressione. Qualsiasi combinazione al di fuori di questi limiti può portare a diversi problemi, tra cui:

- **Short shot o weak weldlines:** Questi fenomeni si verificano quando il riempimento è incompleto o quando si formano linee di saldatura deboli, tipicamente a causa di temperature inferiori ai valori minimi richiesti.
- **Elevati ritiri:** Si manifestano quando le pressioni sono al di sotto del minimo, causando una contrazione eccessiva del materiale durante il raffreddamento.
- **Gradienti termici elevati:** L'uso di temperature troppo elevate può generare gradienti termici eccessivi, compromettendo la qualità del componente.
- **Flash:** Questo problema si verifica quando il materiale fuoriesce dallo stampo a causa di una pressione interna superiore alla forza di clampaggio, causando difetti nel prodotto finale.

È importante sottolineare che i ritiri del componente non possono essere completamente eliminati; pertanto, durante la fase di progettazione, si cerca di ottimizzare la geometria del componente per ottenere ritiri uniformi e prevedibili. D'altra parte, le deformazioni del

componente, come distorsioni geometriche e perdita di planarità, sono influenzate da diversi fattori, in ordine d'importanza: il tipo di materiale utilizzato, il design geometrico del componente, la progettazione dello stampo e i parametri di processo. Una progettazione accurata nelle fasi preliminari è quindi fondamentale per minimizzare questi effetti indesiderati e garantire la qualità del prodotto finale. La comprensione della finestra di stampaggio e l'ottimizzazione dei parametri di progettazione e processo sono essenziali per ottenere componenti di alta qualità e ridurre al minimo i difetti.

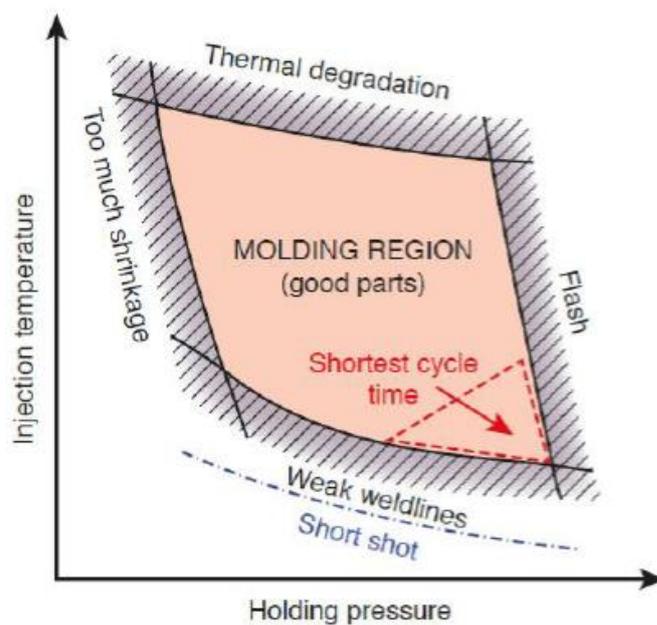


Figura 1.7. Finestra di stampaggio ad iniezione di materiale polimerico.

La deformazione geometrica di un componente non rappresenta l'unico effetto negativo derivante da una progettazione inadeguata della cavità o da parametri di processo errati. Esistono diversi altri difetti che possono compromettere sia l'estetica che la funzionalità del prodotto finale rappresentati in Figura 1.8, tra cui:

- A. **Flow marks:** Queste linee ondulate sulla superficie del componente sono un difetto estetico che può derivare da un flusso irregolare del materiale durante il processo di iniezione. Sebbene non compromettano necessariamente la funzionalità del pezzo, possono influire negativamente sull'aspetto estetico.
- B. **Tiger Stripes:** Si tratta di striature visibili sulla superficie del componente, anch'esse di natura estetica. Questi difetti possono essere causati da variazioni nella temperatura o nella pressione durante il processo di stampaggio, rendendo il prodotto meno attraente.

- C. **Porosity:** Questo difetto strutturale si verifica quando si formano bolle d'aria intrappolate all'interno del componente. La porosità può compromettere la resistenza meccanica del pezzo e influire sulla sua durata nel tempo.
- D. **Sink marks:** Questi ritiri si manifestano in corrispondenza di sezioni con spessore elevato, risultando in difetti sia estetici che strutturali. I sink marks possono indicare una solidificazione non uniforme e possono ridurre la robustezza del componente.
- E. **Burn marks:** Le bruciature sul componente sono difetti sia estetici che strutturali, causati da un surriscaldamento del materiale durante il processo di iniezione. Questi difetti possono compromettere la qualità superficiale e la resistenza del pezzo.
- F. **Hesitation:** Questo difetto si verifica quando il riempimento della cavità avviene in modo imparziale, portando a un aspetto irregolare del componente. La hesitazione può essere il risultato di variazioni nei parametri di processo, come la velocità di iniezione.
- G. **Weld line:** Si forma quando due fronti di flusso del materiale si incontrano, creando una linea di giunzione. Sebbene possa non influenzare direttamente la funzionalità, le linee di saldatura possono rappresentare punti deboli nel componente, riducendo la sua integrità strutturale.

Un'errata progettazione della cavità o la gestione inadeguata dei parametri di processo possono portare a una serie di difetti che non solo compromettono l'estetica del prodotto, ma possono anche influire sulla sua funzionalità e durata. È fondamentale considerare attentamente questi aspetti durante la fase di progettazione e ottimizzazione per garantire componenti di alta qualità e prestazioni affidabili.

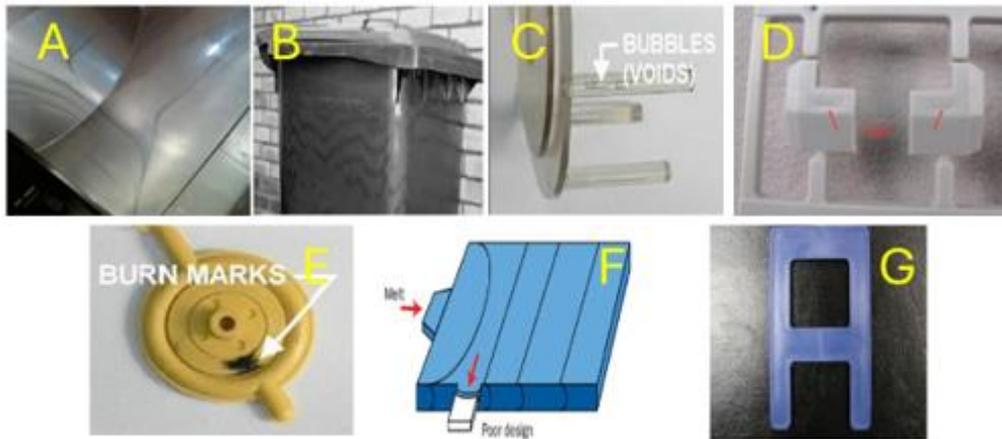


Figura 1.8. Difetti che si formano su componenti plastici a seguito di una errata progettazione del processo di stampaggio ad iniezione (A) flow marks, (B) tiger stripes, (C) porosity, (D) sink marks, (E) burn mark, (F) hesitation, (G) weld line.

1.3 Weld line

Lo stampaggio a iniezione è una delle tecnologie più utilizzate per la produzione di componenti in materiale termoplastico rinforzato con fibre corte (SFRT). Gli SFRT presentano proprietà anisotrope, fortemente influenzate dall'orientamento delle fibre che si verifica durante il processo di stampaggio a iniezione [8], [9], [10]. Tra i vari problemi che possono sorgere durante lo stampaggio, la formazione delle weld line, cioè la generazione di una linea di giunzione a seguito dell'incontro di due flussi di materiale, è tra i più comuni, specialmente nei componenti complessi con più punti di iniezione, inserti o variazioni di spessore delle pareti. Le weld lines hanno un impatto negativo sulle prestazioni meccaniche dei componenti in SFRT ma anche sull'aspetto estetico come si vede in Figura 1.9.

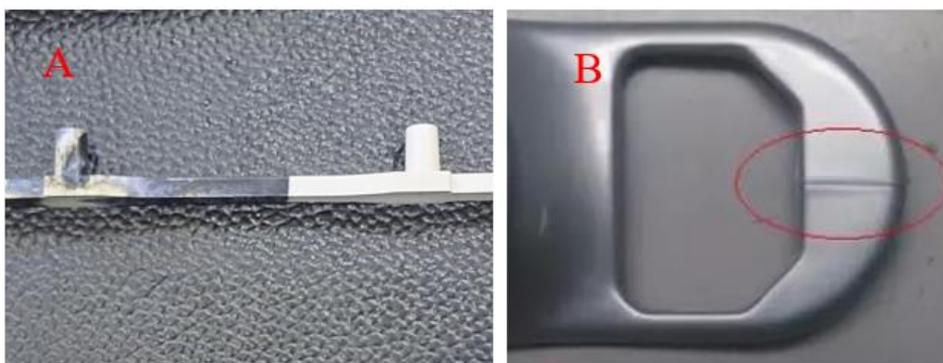


Figura 1.9. Componenti che presentano il difetto della weld line.

Le weld lines possono manifestarsi in diverse situazioni e vengono generalmente suddivise in due categorie: quelle derivanti da fronti di flusso che si scontrano frontalmente (tipo I) e quelle che si formano da flussi laterali (tipo II) come si vede in Figura 1.10. Nel primo caso (tipo I), la collisione frontale dei flussi crea un intaglio a V sulla superficie del pezzo, presenta aree con legami deboli nella matrice polimerica e si comporta come un punto di concentrazione di tensione. Nell'altra circostanza (tipo II), quando il polimero fuso viene immesso nello stampo attraverso due punti di iniezione vicini, i flussi si incontrano formando un angolo che genera una linea di giunzione [11], [12], [13]. In questo secondo caso l'effetto di danneggiamento indotto dal difetto è minore rispetto al caso di weld line frontale.

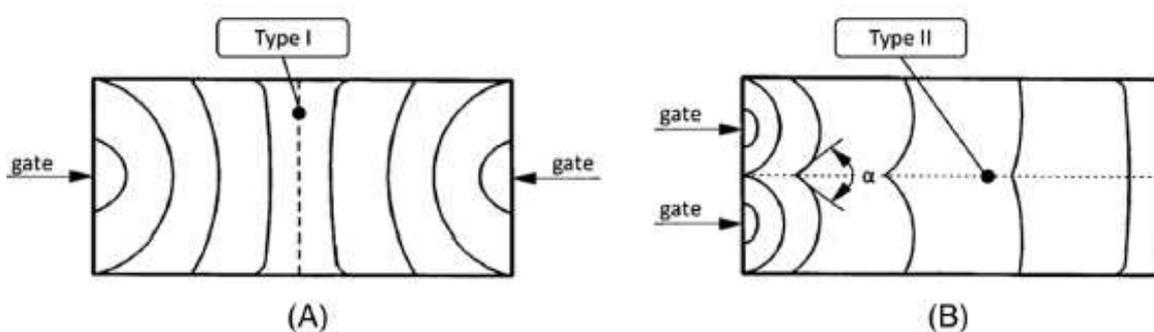


Figura 1.10. A formazione della weld line dovuta all'incontro tra due fronti di flusso frontali, B formazione della weld line dovuta all'incontro di due fronti di flusso laterali [14].

Sebbene le weld lines si formino durante la fase di riempimento, la loro struttura e le loro caratteristiche sono influenzate dall'intero ciclo di stampaggio a iniezione. Un elemento cruciale in questo processo è il "flusso a fontana", dove le linee di flusso del polimero appaiono come una fontana. Durante questa fase, il polimero che entra in contatto con le pareti dello stampo si solidifica, creando uno strato congelato. Nei termoplastici rinforzati con fibre come si vede in Figura 1.11, i componenti stampati mostrano strati esterni con fibre orientate parallelamente al flusso e una zona centrale con orientamento perpendicolare. L'orientamento delle fibre nella zona delle weld line influenza significativamente le prestazioni meccaniche del materiale. Questo fenomeno è dovuto al flusso a fontana del polimero durante il processo di stampaggio, che provoca un orientamento delle fibre perpendicolare alla direzione del flusso [15]. La distribuzione delle fibre è ulteriormente influenzata dallo spessore del componente, parti a parete spessa presentano una zona al cuore, caratterizzata da fibre disposte ortogonalmente alla direzione di flusso, più ampia rispetto a componenti in parete sottile. Come evidenziato in Figura 1.11 B nella zona di giunzione tra fronti di flusso le fibre non riescono ad attraversare

l'interfaccia di separazione rimanendo bloccate con un'orientazione perpendicolare. Quando il contenuto di fibre nel polimero aumenta, gli effetti negativi delle linee di saldatura diventano più pronunciati. Di conseguenza, a causa di questa mancanza di interazione delle fibre attraverso la weld line, le proprietà meccaniche locali, inclusa la resistenza, l'allungamento a rottura e la rigidità, sono significativamente ridotte [14].

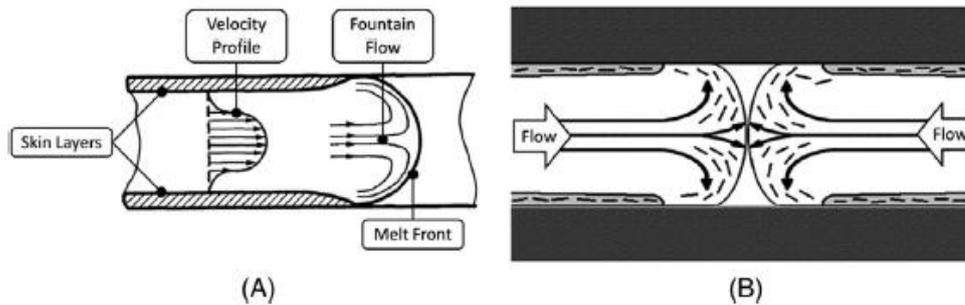


Figura 1.11. (A) cavità riempita con un flusso a fontana, (B) disposizione delle fibre e delle molecole in corrispondenza della superficie di separazione della weld line [14].

L'orientamento delle fibre è cruciale: quando sono allineate perpendicolarmente alla direzione di carico si verifica un comportamento “matrix- dominated“ [16],[17],[18]. In queste aree le tensioni sono trasmesse principalmente dalle forze intermolecolari del materiale della matrice, mentre le fibre risultano scariche, causando un indebolimento della parte. Di conseguenza, la tensione si concentra maggiormente all'interfaccia tra le fibre e la matrice, riducendo ulteriormente le prestazioni meccaniche complessive del materiale. Questo comportamento è in linea con la "rule of mixtures", che afferma che le proprietà meccaniche di un composito dipendono fortemente dall'orientamento delle fibre rispetto alla direzione del carico applicato. Quando le fibre sono parallele al carico, il materiale mostra un comportamento “fiber-dominated”, con migliori prestazioni meccaniche grazie ad un più efficace trasferimento di carico dalla matrice alla fibra di rinforzo. Nel caso di polimeri puri, l'imperfetta interdiffusione dei due fronti rappresentata in Figura 1.12, è legata alla bassa temperatura locale in corrispondenza della weld line e può essere risolta garantendo il mantenimento di temperature prossime a quelle di fusione del polimero. La condizione di "assenza di flusso" è evidenziata in Figura 1.9 A, nella regione della weld line limita la diffusione molecolare nella matrice, riducendo ulteriormente la resistenza, la rigidità e la duttilità del materiale. In queste condizioni la diffusione delle molecole all'interfaccia è solo legata alla temperatura [17].

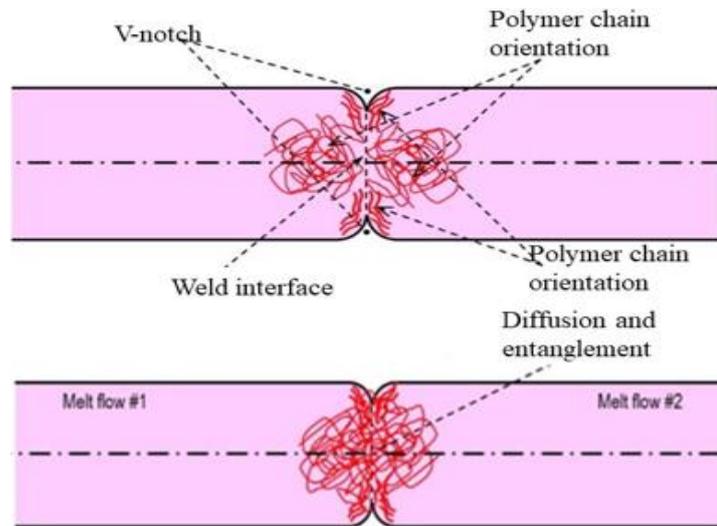


Figura 1.12. Interdiffusione tra due fronti di flusso [19].

La caratterizzazione meccanica è uno strumento fondamentale per analizzare le weld lines nei materiali, tenendo conto dei parametri di processo e del contenuto di fibra. È comunemente accettato che la resistenza meccanica delle linee di saldatura aumenti con l'incremento della temperatura del fuso o dello stampo grazie ai più forti legami che si creano nel materiale della matrice. Analogamente, un aumento della pressione d'impaccamento può portare a miglioramenti nella resistenza. Tuttavia, l'incremento del contenuto di fibra tende a influire negativamente sulla resistenza a trazione quasi-statica e sulla deformazione a rottura. Sebbene una buona progettazione del sistema di alimentazione e l'ottimizzazione dei parametri di processo siano essenziali, spesso non bastano per evitare la formazione di linee di saldatura [17].

1.4 Soluzioni per ridurre l'effetto della weld line

Numerosi studi si sono concentrati sulla risoluzione del problema delle weld lines nei materiali polimerici rinforzati. L'obiettivo principale di queste ricerche è stato quello di favorire il movimento della superficie di separazione, favorendo così una migliore disposizione delle fibre e una diffusione più efficace del materiale della matrice. Questo approccio mira a migliorare le prestazioni meccaniche complessive dei prodotti finiti.

Tra le tecniche proposte per raggiungere tali risultati, vi sono lo Shear Controlled Orientation in Injection Molding (SCORIM), il processo Push-Pull, l'effetto di Inflow e il Rapid Heat Cycle Molding (RHCM). Ognuna di queste metodologie offre un approccio distinto per migliorare la qualità delle linee di saldatura, ma ciascuna presenta anche delle limitazioni.

1.4.1 “Inflow”

La posizione e la forma della weld line, che si sviluppa quando due flussi convergono durante il riempimento dello stampo, possono essere modificate creando uno sbilanciamento di pressione tra i fronti di flusso nella fase di compattazione. Questo fenomeno, noto come inflow in letteratura, si basa sull'idea di Kazmer e Roe, secondo cui è possibile generare uno sbilanciamento di flusso attraverso una variazione locale della geometria. Scantamburlo e colleghi [14]. hanno approfondito questo concetto posizionando elementi laterali vicino alla weld line e per creare uno sbilanciamento di flusso e pressione, favorendo un flusso temporaneo durante la fase d'impaccamento che modifica la superficie della linea di giunzione e riorienta le fibre.

L'inflow può essere ottenuto posizionando asimmetricamente i punti di iniezione o inducendo esitazioni nel flusso del fuso mentre riempie le sezioni laterali della cavità principale. In questo contesto, come si vede in Figura 1.13 è stata progettata una geometria della cavità con appendici laterali per generare un gradiente di pressione a seguito dell'effetto di esitazione. L'esitazione del flusso è un fenomeno che si manifesta durante la fase di riempimento della cavità nel processo di iniezione. Questo fenomeno si verifica soprattutto quando la cavità presenta caratteristiche geometriche complesse o dettagli molto piccoli, orientati perpendicolarmente alla direzione del flusso. In queste condizioni, il flusso di polimero tende a riempire prima le aree della cavità in cui la resistenza è minore e poi le altre. In tal caso, l'esitazione del flusso è causata dalla maggiore resistenza nelle linguette di collegamento, che crea un gradiente di pressione tra la cavità principale e quelle secondarie. Durante la fase di impaccamento, questo gradiente favorisce un ritorno di flusso nell'area della linea di giunzione, alterandone posizione e forma. Inoltre, l'inflow aiuta a riorientare le fibre sulla superficie della giunzione, permettendo loro di sostenere una maggiore parte del carico applicato. Grazie a questo effetto, il carico di rottura e la rigidità dei campioni con una linea di giunzione sono aumentati rispettivamente del 19% e del 15% come si può osservare in Figura 1.14 [14].

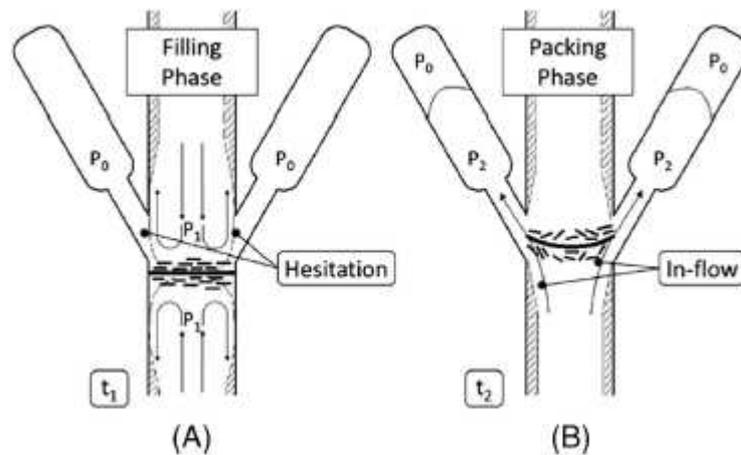


Figura 1.13. (A) Formazione della weld line durante la fase di riempimento effetto esitazione (B) Variazione della morfologia della weld line durante la fase d'impaccamento effetto inflow. [14].

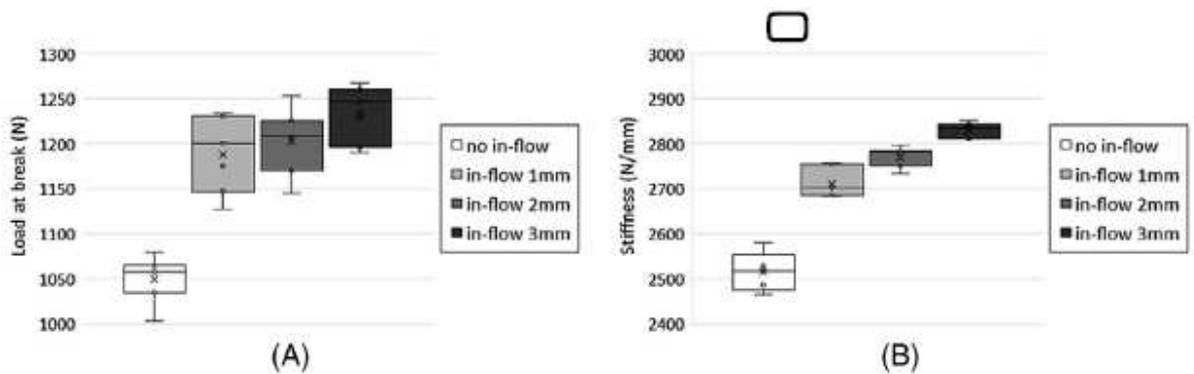


Figura 1.14. (A) Carico a rottura al variare dello spessore delle appendici laterali (B) Rigidezza al variare dello spessore delle appendici laterali. [14].

1.4.2 Push-Pull

Il processo Push-Pull, impiegato nel co-injection molding, è fondamentale per modificare la morfologia della weld line e l'orientamento delle fibre nei materiali compositi. Questo metodo richiede uno stampo dotato di almeno due aperture (gate), ciascuna collegata a una diversa unità di iniezione, il processo è schematizzato in Figura 1.15. Durante la fase di riempimento della cavità, lo strato di materiale a contatto con la parete della cavità solidifica per primo, mentre il nucleo del pezzo rimane fuso. Questa situazione permette di avviare la prima fase del processo Push-Pull. Nella prima fase di spinta Figura 1.15 b, il materiale fuso viene iniettato da una delle unità di iniezione, spingendo il nucleo fuso verso l'altra unità. Questo movimento altera la forma della linea di giunzione, conferendole una struttura a lingua. Il numero di fasi Push-Pull può essere regolato in base allo spessore del pezzo, consentendo una personalizzazione del processo.

Ogni fase di spinta crea un nuovo strato solido in cui le fibre si allineano lungo la direzione del flusso. Questo allineamento è dovuto allo stress di taglio (shear stress) applicato durante la solidificazione, che induce un'elevata orientazione del materiale. Una volta completate tutte le fasi push-pull, si procede con la compattazione e il raffreddamento, che risultano più veloci rispetto ai metodi di stampaggio a iniezione tradizionali [20]. Questo perché la solidificazione progressiva riduce il tempo necessario per il raffreddamento finale.

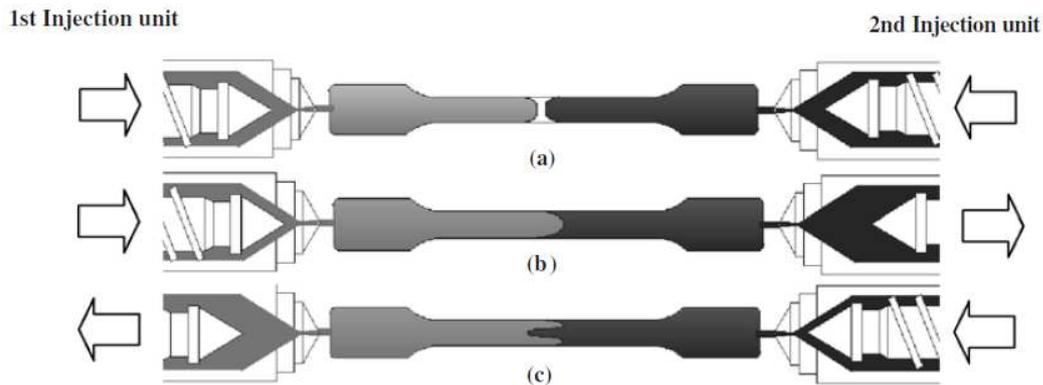


Figura 1.15: processo di Push-Pull (a) fase d’iniezione; (b) prima fase di spinta dalla 1° unità d’iniezione mentre la 2° arretra; (c) seconda fase di spinta dalla 2° unità d’iniezione mentre la 1° arretra [21].

È stato rilevato che la resistenza della linea di giunzione aumenta con una maggiore penetrazione della linea stessa; quindi, aumentando la differenza di pressione applicata come si vede in Figura 1.16 Tuttavia, aumentare il numero di fasi push-pull oltre un certo punto non sembra migliorare significativamente la resistenza rispetto a quando viene effettuata una sola fase [21], [22].

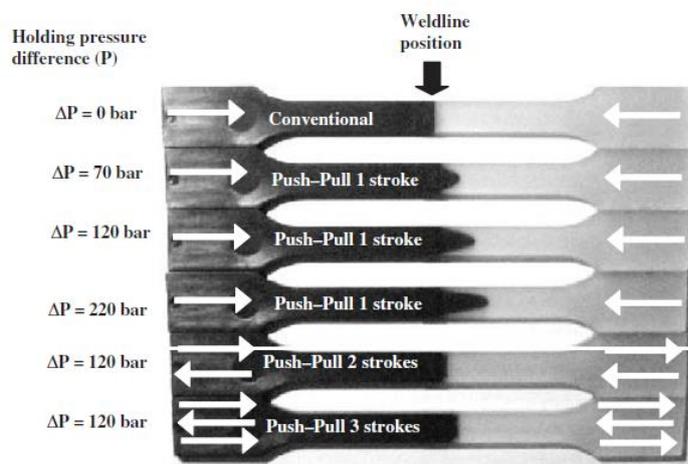


Figura 1.16. Formazione della “lingua” al variare delle corse e della pressione [21].

1.4.3 Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) combinato con il Push-Pull

Per migliorare l'intreccio tra le catene polimeriche durante la formazione della weld line, è essenziale mantenere il materiale fuso a una temperatura elevata. Una tecnica efficace per raggiungere questo obiettivo è il rapid heat cycle moulding (RHCM). Questo metodo utilizza un sistema variotermico che gestisce fluidi a temperature diverse attraverso un circuito di termoregolazione progettato per riscaldare e raffreddare rapidamente la superficie della cavità dello stampo durante il processo di stampaggio. Il riscaldamento dello stampo inizia nella fase di espulsione e continua fino al completamento del riempimento della cavità, raggiungendo temperature vicine alla transizione vetrosa del polimero iniettato. Nelle fasi di compattazione e raffreddamento, lo stampo viene raffreddato fino a quando il pezzo raggiunge la temperatura necessaria per l'espulsione, momento in cui il ciclo riparte. Il RHCM migliora la saldatura dei fronti di flusso nei polimeri non rinforzati, favorendo l'interdiffusione delle macromolecole anche negli strati più esterni, dove il polimero è a contatto con le superfici dello stampo [23],[24] come si evidenzia in Figura 1.17.

Uno studio condotto da Wang e colleghi [25] ha evidenziato che, mentre i materiali termoplastici non rinforzati beneficiano significativamente del processo RHCM, lo stesso non si può dire per i materiali rinforzati con fibre. In questi ultimi, l'aumento della temperatura dello stampo porta a una riduzione della resistenza alla trazione [25]. Per affrontare questo problema, è necessario combinare il RHCM con processi che creano uno sbilanciamento del flusso in corrispondenza della linea di giunzione. Questo approccio non solo garantisce una temperatura dello stampo sufficientemente elevata per favorire l'interdiffusione delle macromolecole, ma promuove anche una riorientazione dinamica delle fibre, migliorando le proprietà meccaniche nella regione di giunzione dei materiali rinforzati con fibre (FRT). In questo contesto, Scantamburlo e colleghi [17] hanno approfondito l'idea di combinare il RHCM con il processo Push-Pull. Questa combinazione mira a sfruttare i benefici di entrambi i metodi: il controllo termico del RHCM e l'effetto meccanico del Push-Pull, che induce uno sbilanciamento di flusso. Attraverso l'utilizzo di un metodo dinamico come il Push-Pull e RHCM, i ricercatori hanno scoperto che il Push-Pull da solo può migliorare significativamente la resistenza alla trazione e la rigidità del materiale. Tuttavia, quando il Push-Pull è combinato con RHCM, i miglioramenti risultano ancora più marcati.

Run	RHCM	Push-Pull	σ_{fail}		k	
			Avg. [MPa]	St. Dev. [MPa]	Avg. [MPa]	St. Dev. [MPa]
1	NO	NO	35.3	2.4	4258.3	44.3
2	NO	YES	89.0	1.2	5771.9	30.1
3	YES	NO	60.0	2.4	5048.2	44.2
4	YES	YES	106.4	1.4	6209.4	27.9

Figura 1.17. (a) Tensione a rottura e rigidezza dei provini ottenuti con diversi processi di stampaggio [17].

Le analisi in Figura 1.17, eseguite dai ricercatori Scantamburlo e colleghi [17] hanno evidenziato che l'azione dinamica del Push-Pull favorisce il riorientamento delle fibre all'interno del materiale, migliorando la resistenza della weld line. L'integrazione di RHCM con Push-Pull consente di riorientare le fibre anche negli strati più esterni, grazie al ritardo nella solidificazione della superficie, il che porta a un ulteriore potenziamento delle proprietà meccaniche come si osserva in Figura 1.18. Nonostante i vantaggi derivanti dalla combinazione di RHCM e Push-Pull, una parte consistente dei miglioramenti è attribuibile al solo Push-Pull. Considerando che l'implementazione di RHCM comporta costi elevati e presenta alcuni svantaggi, come tempi di ciclo più lunghi e maggiore deformazione, si suggerisce di utilizzare questa tecnica principalmente quando sono necessari livelli massimi di resistenza delle linee di giunzione o per soddisfare specifiche esigenze estetiche [17].

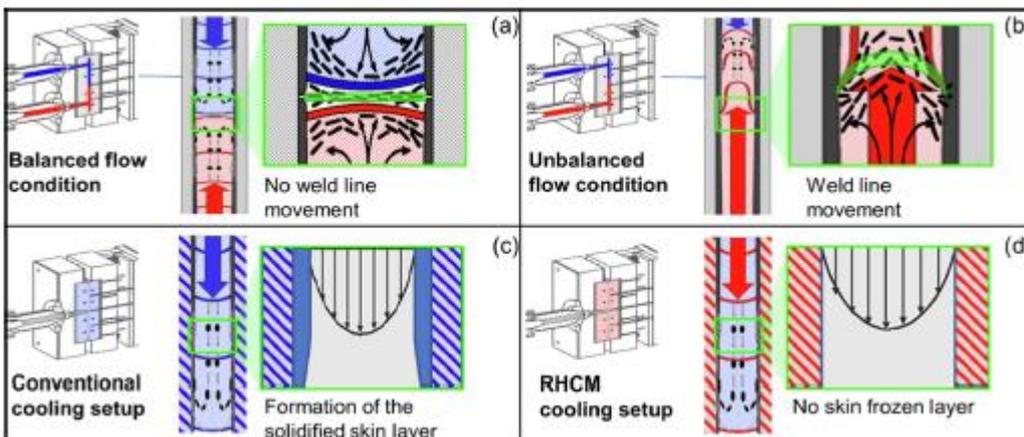


Figura 1.18. (a) Condizione standard di stampaggio con flusso bilanciato; (b) sbilanciamento del flusso causato dal processo Push-Pull; (c) formazione dello strato di pelle dovuta allo scambio termico con le pareti della cavità durante lo stampaggio convenzionale; (d) nel processo RHCM, le pareti della cavità mantengono la stessa temperatura del materiale fuso, evitando così la formazione dello strato di pelle durante il riempimento [17].

1.4.4 Shear Controlled Orientation in Injection Molding (SCORIM)

L'orientamento controllato dal taglio nello stampaggio a iniezione, noto come SCORIM, utilizza un sistema d'impaccamento a multi-alimentazione che si inserisce tra la cavità dello stampo e l'ugello della pressa di stampaggio. Questo sistema può essere adattato in varie configurazioni per rispondere a specifiche necessità di stampaggio. Il principio centrale di SCORIM consiste nell'applicare forze di taglio macroscopici controllati a un polimero durante la sua solidificazione all'interno della cavità dello stampo. Un esempio pratico di questo processo in Figura 1.19 prevede l'uso di due pistoni che oscillano con uno sfasamento di 180 gradi. Tale movimento, applicato al materiale fuso dopo il riempimento dello stampo e durante la sua solidificazione, elimina le linee di saldatura interne e promuove l'allineamento di componenti che possono essere orientati [26].

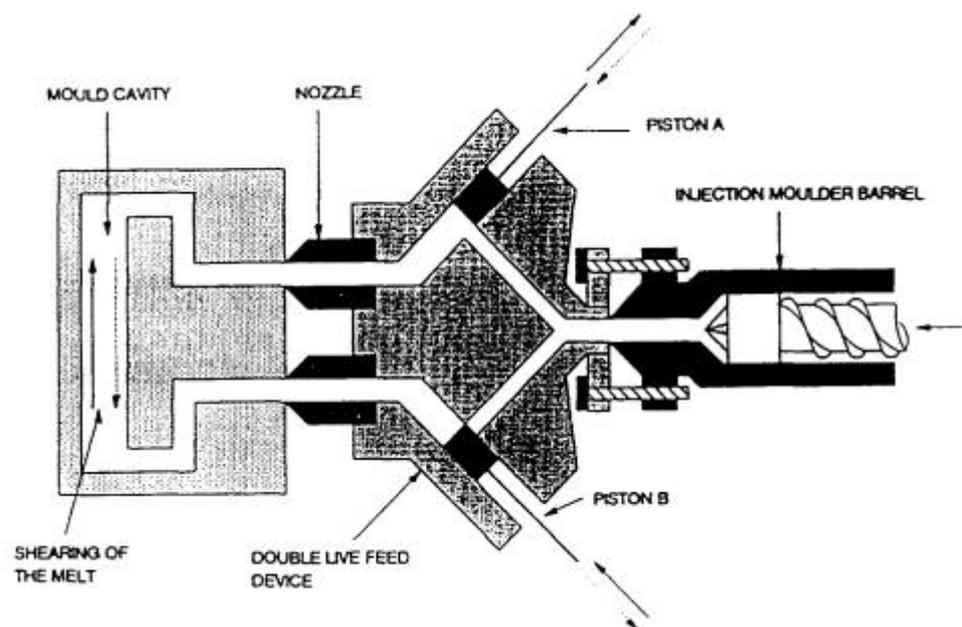


Figura 1.19. Disegno schematico di una configurazione a due vie con pistoni sfasati di 180° [27].

Una configurazione più complessa in Figura 1.20, può includere quattro alimentazioni indipendenti, ciascuna con la propria pressione regolabile. L'operazione sequenziale e fuori fase dei pistoni permette di creare laminati con orientamenti specifici, come quelli a 0° - 90° [27].

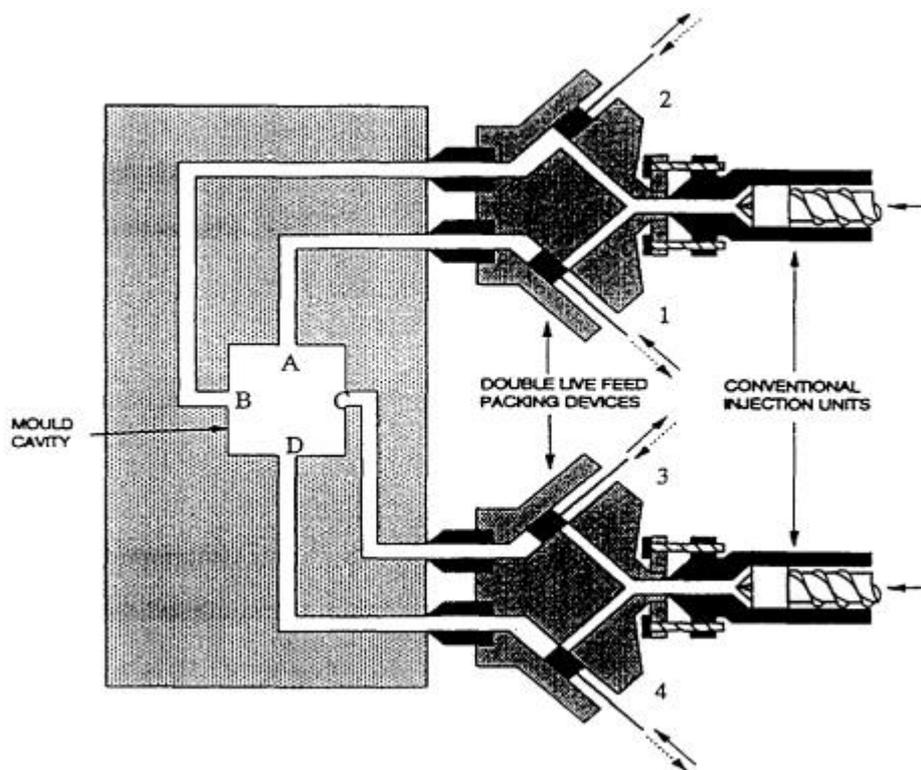


Figura 1.20. Configurazione a quattro vie con pistoni sfasi di 90° [27].

Le ricerche condotte dal Wolfson Centre for Materials Processing [27] hanno evidenziato che i dispositivi SCORIM consentono di produrre componenti in materiali termoplastici che sono privi di difetti come vuoti, crepe e linee di saldatura interne. Inoltre, questi stampi garantiscono un eccellente controllo dimensionale e riproducibilità. Nel caso di polimeri rinforzati con fibre corte, è possibile ottenere in corrispondenza della weld line un allineamento delle fibre lungo la direzione del flusso aumentando le prestazioni meccaniche. Il processo SCORIM rispetto allo stampaggio convenzionale rappresenta una soluzione per migliorare significativamente la qualità e le proprietà meccaniche dei prodotti.

1.5 Gas-Assisted Push-Pull

L'utilizzo delle tecnologie appena descritte è spesso limitato da costi elevati, complessità operativa e difficoltà di integrazione con stampi e macchine per stampaggio a iniezione già esistenti. Questi ostacoli ne limitano la diffusione, nonostante i potenziali vantaggi che potrebbero offrire.

In questo contesto, il presente elaborato propone l'applicazione di un nuovo processo chiamato Gas-Assisted Push-Pull (GAPP). Questo metodo combina l'effetto dinamico del processo Push-Pull, ma con una differenza sostanziale: il movimento del materiale al cuore del

provino e quindi lo sbilanciamento di flusso non sono causati dal movimento alternato delle viti di plastificazione, bensì dall'iniezione di gas. Il gas spinge il materiale presente in specifici pozzetti di accumulo situati vicino alla weld line in modo da riorientare le fibre lungo la direzione del flusso. Questa innovazione potrebbe offrire una soluzione più efficiente e meno costosa per migliorare le prestazioni meccaniche dei componenti ottenuti con materiale termoplastico fibro-rinforzato.

1.6 Simulazione numerica del processo stampaggio ad iniezione

Lo stampaggio a iniezione è un processo industriale fondamentale per la produzione di componenti plastici, particolarmente in settori che richiedono materiali con elevate prestazioni meccaniche. Questo metodo consente di ottenere forme complesse e dettagliate, rendendolo ideale per applicazioni in cui la resistenza e la rigidità sono cruciali. L'utilizzo di polimeri rinforzati con fibre rappresenta una soluzione efficace per sostituire i metalli, offrendo vantaggi come una riduzione del peso e una maggiore resistenza alla corrosione. Un aspetto chiave delle proprietà meccaniche di questi materiali è la distribuzione dell'orientamento delle fibre (FOD) e la distribuzione della lunghezza delle fibre (FLD). Questi fattori influenzano direttamente le caratteristiche meccaniche finali del prodotto. La FOD, in particolare, è determinata dal flusso del polimero all'interno della cavità dello stampo, il quale è influenzato dalla geometria dello stampo stesso e dalle condizioni operative. Questo rende la previsione dell'orientamento delle fibre una sfida significativa, poiché non può essere facilmente controllata come nei compositi laminati[28].

Negli ultimi anni, l'adozione di software di simulazione numerica ha rivoluzionato il modo in cui gli ingegneri progettano e ottimizzano i processi di stampaggio. Questi strumenti permettono di modellare accuratamente le fasi di riempimento, impaccamento e raffreddamento, fornendo previsioni sulla FOD in stampi di forme diverse. La capacità di analizzare e prevedere l'orientamento delle fibre è fondamentale per garantire che i materiali soddisfino i requisiti di prestazione nelle applicazioni finali. Tuttavia, la maggior parte degli studi si è concentrata su geometrie semplici, come dischi e piastre rettangolari, trascurando le complessità delle forme più complesse. Questo è un punto critico, poiché le geometrie complesse possono comportare effetti che influenzano il flusso del polimero e, di conseguenza, l'orientamento delle fibre. Pertanto, è essenziale dedicare maggior attenzione alla ricerca su queste forme, utilizzando approcci innovativi che combinano metodi numerici e sperimentali [29].

In conclusione, la comprensione e la previsione dell'orientamento delle fibre nello stampaggio a iniezione sono cruciali per ottimizzare le proprietà meccaniche dei materiali plastici. Con l'evoluzione delle tecnologie di simulazione, è possibile affrontare le sfide legate a geometrie complesse, migliorando così l'affidabilità e l'efficacia dei prodotti finali.

2 Materiali e metodi

Nel capitolo seguente vengono descritti i materiali, i macchinari e i metodi che sono stati utilizzati per la ricerca condotta nel presente elaborato di tesi. Il materiale principale impiegato è il polipropilene rinforzato con diverse concentrazioni di fibra di vetro. I macchinari utilizzati per lo stampaggio e gli strumenti usati per la misurazione delle proprietà fisiche dei materiali sono:

1. **Pressa a stampaggio ad iniezione:** dotata di uno stampo dedicato e sagomato per consentire l'applicazione di diversi tipi di processi, come il single gate, il double gate e il GAPP.
2. **Dinamometro:** utilizzato per sottoporre i campioni a trazione e testare la forza a rottura.
3. **Sputter Coating:** impiegato per rivestire le superfici di frattura dei campioni sottoposti a trazione.
4. **Microscopio elettronico a scansione (SEM):** utilizzato per analizzare le superfici di frattura al fine di comprendere il meccanismo di rottura dei campioni e osservare l'orientamento delle fibre in corrispondenza della weld line.

Infine, i processi verranno simulati utilizzando Moldflow per verificare la corrispondenza tra i risultati delle prove sperimentali e quelli simulati. La simulazione sarà condotta non solo sui campioni di tipo 1B ma anche su una ventola di raffreddamento (cooling fan) per valutare l'applicabilità su componenti reali mostrati in Figura 2.1.

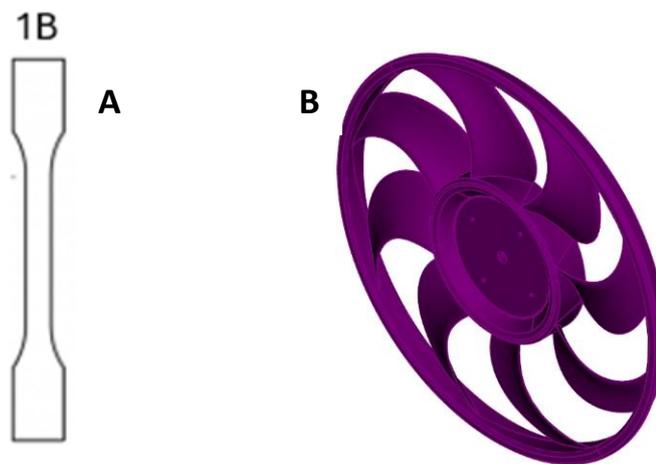


Figura 2.1. A) Campione tipo 1B (osso di cane), B) Cooling fan.

2.1 Polipropilene fibro-rinforzato

Il polipropilene rinforzato con fibre di vetro è un materiale composito che combina i vantaggi del polipropilene con quelli delle fibre di vetro. Questa sinergia conferisce al materiale una maggiore resistenza meccanica, rigidità e stabilità dimensionale rispetto al polipropilene non rinforzato. Le fibre di vetro, infatti, migliorano significativamente le proprietà strutturali del polimero, rendendolo più adatto a sopportare carichi e sollecitazioni. Oltre alla robustezza, sia il vetro che il polipropilene possiedono eccellenti proprietà isolanti, che li rendono ideali per applicazioni che richiedono protezione elettrica e termica. Queste caratteristiche rendono il polipropilene rinforzato con fibre di vetro uno dei materiali più utilizzati in diversi settori industriali, tra cui quello aeronautico, edilizio, automobilistico, elettronico e idraulico. Per le ragioni sopra indicate, in questo elaborato di tesi sono stati stampati dei provini in polipropilene rinforzato al 20%, 30% e 40% con fibre di vetro. Per brevità in questo elaborato i provini in polipropilene rinforzato con fibre di vetro al 20%, 30% e 40% saranno rispettivamente denominati XT20, XT30 e XT40. Le caratteristiche fisiche principali dei materiali elencati sono riportate in tabella 2.1, tabella 2.2 e tabella 2.3. Per ogni materiale con la stessa matrice e diverse percentuali di fibra di rinforzo, sono stati stampati 20 provini. Questo approccio consente di confrontare le proprietà al variare della percentuale di carica. Successivamente, si è deciso di stampare con del polipropilene rinforzato al 40% con fibre di vetro misciato avente una matrice composta per il 30% di materiale riciclato, in modo da poter confrontare campioni con matrice differente. Il polipropilene rinforzato con fibre di vetro ed il 30% di materiale riciclato nell'elaborato è chiamato Green40 le caratteristiche fisiche sono riportate in tabella 2.4.

Tabella 2.1: Isoglass[®] XT 4007U, PP GF 20%, Sirmax [30].

Proprietà	Metodo	Unità	Valore
Melt flow rate (230°C - 2,16 Kg)	ISO 1133	g/10'	7
Density at 23°C 1,04	ISO 1183	g/cm ³	1,04
Filler content (1h/600°C)	ISO 3451-1	%	20
Vicat B50	ISO 306	°C	148
Flexural Modulus (23° - 2 mm/min)	ISO 178	MPa	6100
Tensile stress at yield (23°C-50 mm/min)	ISO 527-2	MPa	90

Tabella 2.2: Isoglass® XT 6010H, PP GF 30%, Sirmax [30].

Proprietà	Metodo	Unità	Valore
Melt flow rate (230°C - 2,16 Kg)	ISO 1133	g/10'	6
Density at 23°C 1,04	ISO 1183	g/cm ³	1,13
Filler content (1h/600°C)	ISO 3451-1	%	30
Vicat B50	ISO 306	°C	149
Flexural Modulus (23° - 2 mm/min)	ISO 178	MPa	8400
Tensile stress at yield (23°C-50 mm/min)	ISO 527-2	MPa	111

Tabella 2.3: Isoglass® XT 8008H, PP GF 40%, Sirmax [30].

Proprietà	Metodo	Unità	Valore
Melt flow rate (230°C - 2,16 Kg)	ISO 1133	g/10'	10
Density at 23°C 1,04	ISO 1183	g/cm ³	1,21
Filler content (1h/600°C)	ISO 3451-1	%	40
Vicat B50	ISO 306	°C	135
Flexural Modulus (23° - 2 mm/min)	ISO 178	MPa	6000
Tensile stress at yield (23°C-50 mm/min)	ISO 527-2	MPa	80

Tabella 2.4: Green Isoglass[®] H 40 CGF X HS, PP GF 40%, Sirmax [30].

Proprietà	Metodo	Unità	Valore
Melt flow rate (230°C - 2,16 Kg)	ISO 1133	g/10'	5
Density at 23°C 1,04	ISO 1183	g/cm ³	1,24
Filler content (1h/600°C)	ISO 3451-1	%	40
Vicat B50	ISO 306	°C	150
Flexural Modulus (23° - 2 mm/min)	ISO 178	MPa	10000
Tensile stress at yield (23°C-50 mm/min)	ISO 527-2	MPa	113

2.1.1 Normativa campioni

I campioni sono stati ricavati in conformità alla normativa ISO 527, utilizzando i provini a forma di "dog-bone" (osso di cane) illustrati in Figura 2.2. La norma ISO 527 è uno standard internazionale che stabilisce i metodi per valutare, quantificare e certificare le proprietà di trazione dei compositi con matrice polimerica, rinforzati sia con fibre continue che discontinue. Questa normativa è fondamentale per garantire l'affidabilità e la comparabilità dei dati ottenuti durante i test sui materiali compositi. In particolare, la ISO 527 fornisce le linee guida per misurare il coefficiente di Poisson, il modulo elastico e la resistenza alla trazione. Definisce anche tre tipi di provini tra cui scegliere, a seconda del tipo di materiale e del rinforzo utilizzato:

- Tipo 1B: provino sagomato a "dog-bone", utilizzato principalmente per testare materiali con matrice termoplastica rinforzati con fibre corte. Questa forma consente di concentrare lo stress nella sezione centrale del provino, facilitando l'analisi delle proprietà meccaniche.
- Tipo 2: provino di forma rettangolare con sezione trasversale costante, adatto per materiali con matrice termoindurente o termoplastica rinforzati con fibre continue. Questo tipo di provino permette di valutare le prestazioni dei materiali sotto carico uniforme lungo tutta la lunghezza del campione.
- Tipo 3: simili ai provini di tipo 2, ma con una linguetta finale per evitare danni durante la fase di presa. Questa modifica riduce il rischio di rotture accidentali nei punti di contatto con le pinze della macchina di prova.

L'adozione di questi standard assicura che i risultati ottenuti siano accurati e ripetibili, facilitando il confronto tra diversi materiali e configurazioni di rinforzo [31].

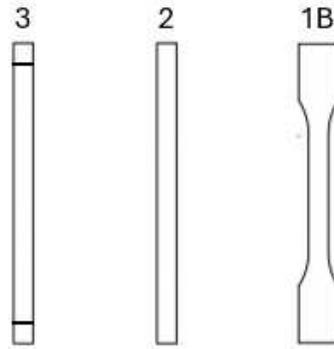


Figura 2.2. Da sinistra a destra i provini di tipo 3, tipo 2 e tipo 1B.

2.1.2 Pressa ad iniezione

Per stampare i provini si è usata una pressa ad iniezione Wittmann – Battenfeld (HM110/525H/210S Wittmann – Battenfeld), con stampo a canali caldi a due piastre (fissa e mobile) alimentati in modo indipendente da due viti di plastificazione (Figura 2.3).



Figura 2.3. Pressa iniezione 2K (HM110/525H/210S Wittmann – Battenfeld).

La metà fissa dello stampo è composta da diverse componenti: la piastra di clampaggio, la piastra del manifold, la piastra di supporto, la piastra di forma e l'inserto. Per prevenire l'aumento della temperatura dello stampo dovuto all'inerzia termica, queste piastre sono dotate di un circuito di raffreddamento in cui circola acqua a 60°C. La temperatura dell'acqua in ingresso è mantenuta costante grazie a un termoregolatore, che riceve l'acqua in uscita da un sistema di refrigerazione, come illustrato in Figura 2.4 A e 2.4 B.

La progettazione del sistema di condizionamento termico è stata effettuata per garantire una distribuzione uniforme della temperatura all'interno della cavità e per assicurare un'elevata efficienza termica durante le varie fasi del processo di stampaggio. Inoltre, è stato inserito un isolante termico tra l'inserto e la piastra di forma per ridurre le perdite di calore, come mostrato

in Figura 2.5. Questa soluzione contribuisce a mantenere le condizioni termiche ottimali, migliorando la qualità del prodotto finale e la durata dello stampo.



Figura 2.4. (A) Termoregolatore.; (B) Frigorifero.

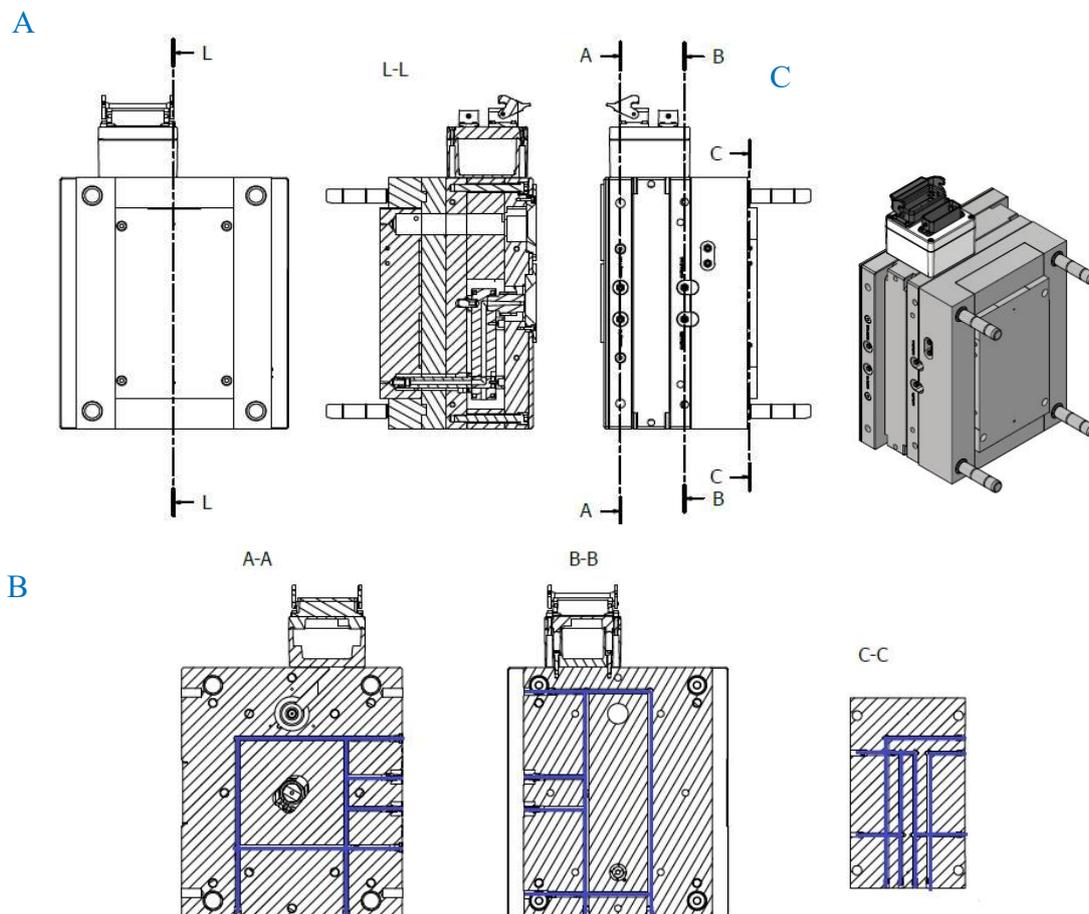


Figura 2.5: (A) vista frontale, laterale ed interna della parte fissa dello stampo, (B) sezioni interne delle piastre che compongono la parte fissa, evidenziando i condotti di raffreddamento in blu, (C) 3D della parte fissa dello stampo.

La parte mobile dello stampo è costituita da diverse componenti chiave: la piastra di clampaggio, i lardoni laterali, il cassetto estrattore, la piastra di forma, la piastra porta stampo, la piastra iniettori e la piastra di cavità. Il movimento dello stampo e degli estrattori è gestito da un sistema idraulico, che garantisce precisione e affidabilità nei processi di apertura e chiusura. Per l'estrazione dei pezzi, sono stati utilizzati sei estrattori, strategicamente posizionati in corrispondenza degli sprue e dei runner. Questa disposizione assicura che la geometria del provino non venga compromessa durante l'estrazione. La piastra iniettori è collegata a una centralina di gas (Maximator RM/500/2/N2) che comprime l'azoto e lo inietta nella cavità al termine della fase di riempimento. Questo processo serve a riorientare le fibre del materiale in corrispondenza della weld line prima della fase di impaccamento, migliorando così la qualità strutturale del prodotto finale. Per prevenire il trafilamento del polimero fuso attraverso i fori di uscita del gas durante la fase di riempimento, vengono utilizzati due iniettori che consentono esclusivamente il passaggio del gas. Inoltre, la piastra contenente la cavità è dotata di un circuito di raffreddamento in cui scorre acqua a 60°C e include un isolante termico per minimizzare le perdite di calore. Questo sistema di raffreddamento è essenziale per mantenere una temperatura costante e ottimale, assicurando così una qualità elevata e uniforme dei pezzi stampati.

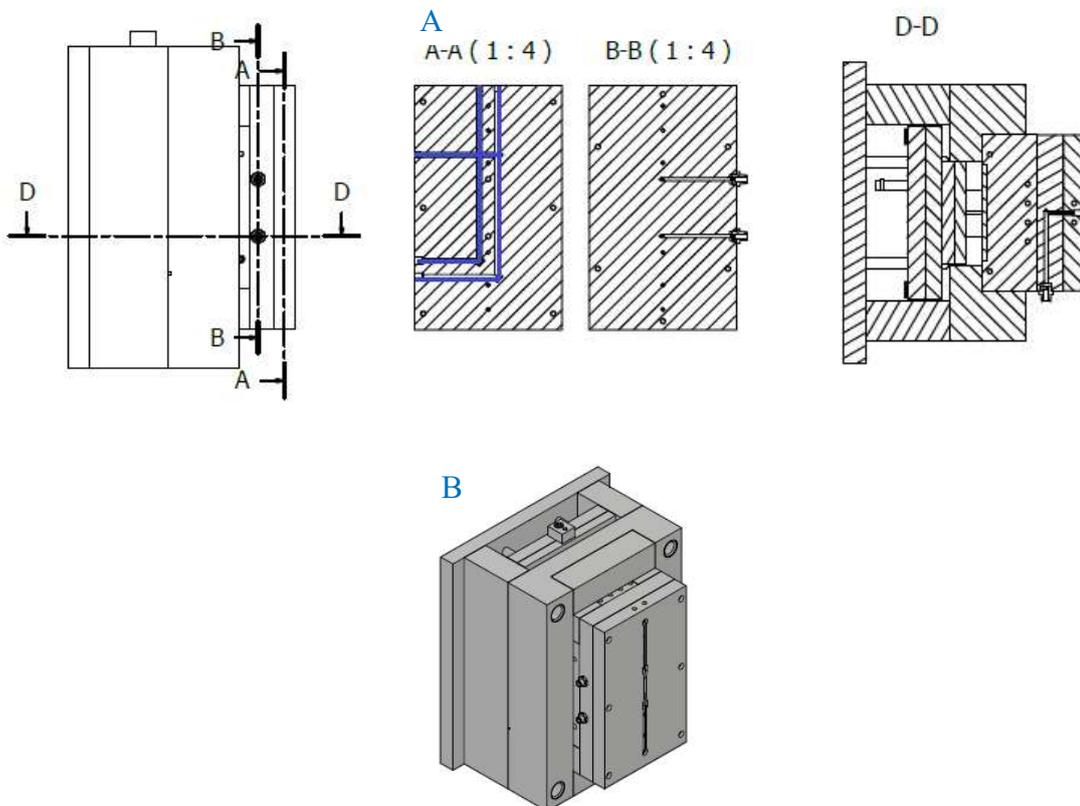


Figura 2.6. (A) Da sinistra a destra: vista laterale stampo mobile, vista A-A sezione interna della piastra di cavità con i condotti di raffreddamento, vista B-B sezione della piastra

iniezione del gas, vista D-D sezione della parte mobile dello stampo. (B) 3D della parte mobile dello stampo.

2.1.3 Stampaggio dei campioni

L'inserto viene riempito tramite due iniettori posizionati alle estremità superiore e inferiore. Questa configurazione è progettata per garantire che la linea di saldatura si formi precisamente nella zona centrale del tratto utile del provino, come illustrato in Figura 2.7. Il componente finale ottenuto dal processo di stampaggio presenta le seguenti caratteristiche:

- **Due sprue:** posizionati rispettivamente alle estremità superiore e inferiore.
- **Due runner:** con sezione rettangolare di $7.40 \times 4 \text{ mm}^2$ e lunghezza di 85 mm, questi canali guidano il materiale fuso verso la cavità principale, assicurando un riempimento uniforme.
- **Tratto utile:** caratterizzato da una sezione rettangolare di $5 \times 4 \text{ mm}^2$ e lunghezza di 30 mm, rappresenta la parte del provino dove vengono misurate le proprietà meccaniche.
- **Due zone di presa:** con sezione rettangolare di $10 \times 4 \text{ mm}^2$ e lunghezza di 11 mm.
- **Due "pozzetti":** situati in corrispondenza delle zone di presa, dove il materiale ancora fuso si accumula. Successivamente, il gas viene utilizzato per spingere questo materiale.

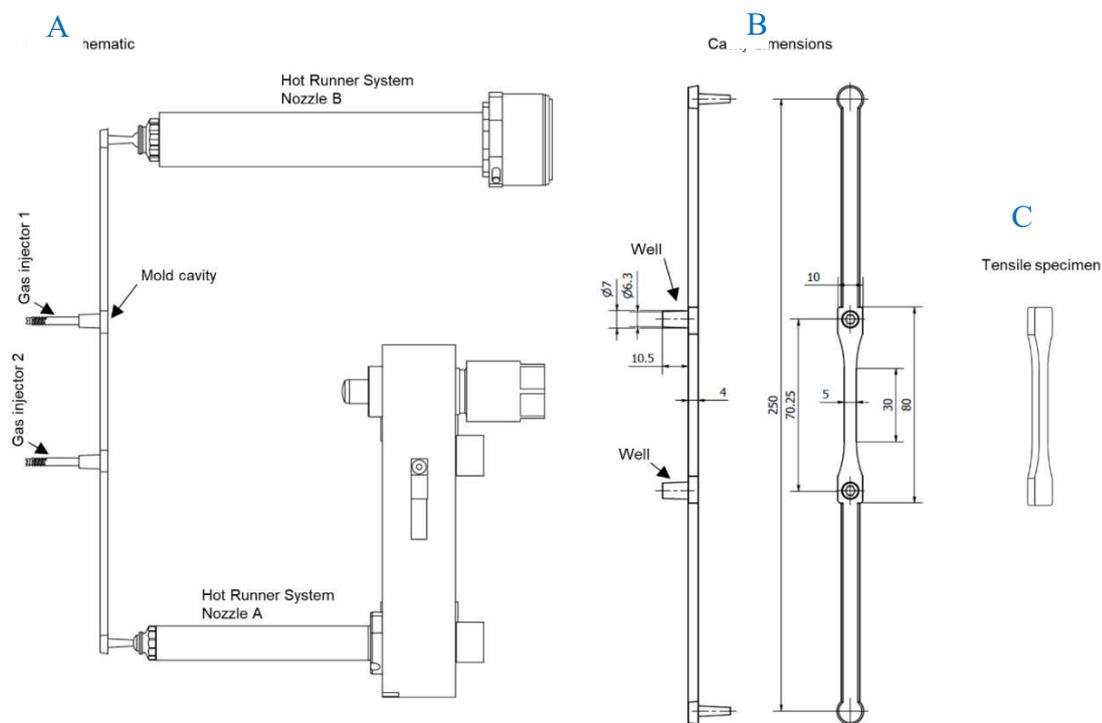


Figura 2.7. (A) Schema di stampaggio (inserto, iniettori del gas e ugelli caldi di alimentazione), (B) Dimensioni della cavità, (C) Provino.

Per ciascun materiale elencato nel paragrafo 2.1, sono stati adottati tre diversi metodi di iniezione: 1) single gate, 2) double gate, 3) double gate con GAPP. L'iniezione single gate avviene attraverso una sola vite di plastificazione e un solo gate. Questo setup permette la formazione di un unico fronte di flusso, eliminando la possibilità di formazione della weld line. Le fibre si orientano principalmente lungo la direzione del flusso, il che contribuisce a ottenere un componente finale privo di difetti. I valori di tensione a rottura e modulo risultano essere nominali, indicando che le proprietà meccaniche del componente sono ottimali. Per garantire la coerenza nei risultati, i parametri di processo utilizzati per produrre i venti campioni (come riportato in tabella 2.5) sono stati mantenuti costanti per tutti e quattro i materiali in esame.

Tabella 2.5. Parametri di processo single gate.

Parametri	Valori
Temperatura del fuso	240°C
Portata	7 cm ³ /s
Pressione impaccamento	500 bar
Tempo impaccamento	10 s
Tempo raffreddamento	22 s

L'iniezione di tipo double gate può essere effettuata utilizzando una singola vite di plastificazione con un sistema che alimenta due gate, oppure con due viti di plastificazione separate. Nel nostro caso, abbiamo optato per l'uso di due viti di plastificazione che alimentano indipendentemente due canali di alimentazione. Questo approccio consente un controllo più preciso del flusso di materiale verso ciascun gate. I due gate sono stati posizionati alle estremità del pezzo per garantire la formazione di una weld line nella zona centrale del provino. Questa disposizione è particolarmente vantaggiosa quando il materiale è rinforzato con fibre, poiché le fibre tendono a disporsi parallelamente alla weld line, migliorando la resistenza del componente lungo la linea di saldatura.

Per ottenere la weld line esattamente nella posizione desiderata, è stata eseguita una sequenza di operazioni specifiche. Poiché i canali caldi di alimentazione hanno lunghezze diverse, le perdite di carico variano lungo i canali, influenzando il flusso del materiale. Di

conseguenza, non è stato possibile utilizzare gli stessi parametri di processo per entrambe le viti di plastificazione. I parametri sono stati determinati sperimentalmente attraverso i seguenti passaggi:

1. **Tempo di switch-over uniforme:** Entrambe le viti sono state impostate per cambiare modalità nello stesso momento, garantendo un coordinamento iniziale del flusso.
2. **Regolazione della portata d'iniezione:** Partendo da una portata di riferimento per una vite, l'altra è stata regolata fino a quando i due fronti di flusso si sono incontrati correttamente, come mostrato in Figura 2.8.
3. **Aggiustamento della pressione d'impaccamento:** La pressione è stata inizialmente impostata a circa l'80% della pressione d'iniezione, poi variata fino a bilanciare i due fronti di flusso, come illustrato in Figura 2.9.

In tabella 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 vengono riportati i parametri di processo per i quattro materiali in esame.



Figura 2.8. Incontro tra i due fronti di flusso per determinare la portata d'iniezione.

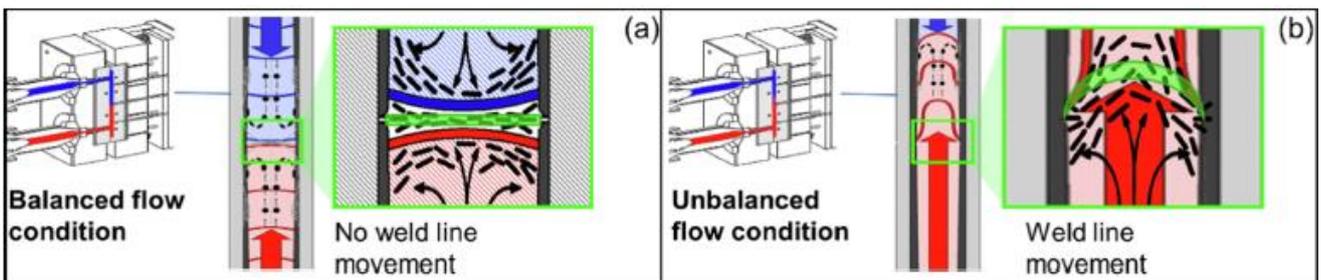


Figura 2.9. Schematizzazione della formazione della weld line avente la pressione d'impaccamento. (a) Bilanciata, la weld line non si muove, (b) Non bilanciate, la weld line si muove.

Tabella 2.6 parametri di processo Isoglass® XT 4007U, PP GF 20%.

Parametri	Vite A	Vite B
Temperatura del fuso	240°C	240 °C
Portata	6.55 cm ³ /s	5.65 cm ³ /s
Pressione d'iniezione	179 bar	302 bar
Pressione impaccamento	115 bar	235 bar
Switch-over	1.20 s	1.20 s
Tempo impaccamento	0 – 10 s	0 – 10 s
Tempo raffreddamento	25 s	25 s

Tabella 2.7 parametri di processo Isoglass® XT 6010H, PP GF 30%.

Parametri	Vite A	Vite B
Temperatura del fuso	240°C	240°C
Portata	6.90 cm ³ /s	5.85cm ³ /s
Pressione d'iniezione	218 bar	332 bar
Pressione impaccamento	130 bar	255 bar
Switch-over	1.20 s	1.20 s
Tempo impaccamento	0 – 10 s	0 – 10 s
Tempo raffreddamento	25 s	25 s

Tabella 2.8 parametri di processo Isoglass® XT 8008H, PP GF 40%.

Parametri	Vite A	Vite B
Temperatura del fuso	240°C	240 °C
Portata	6.50 cm ³ /s	5.70 cm ³ /s
Pressione d'iniezione	179 bar	302 bar
Pressione impaccamento	140 bar	265 bar
Switch-over	1.20 s	1.20 s
Tempo impaccamento	0 - 10 s	0 – 10 s
Tempo raffreddamento	15 s	15 s

Tabella 2.9 parametri di processo Green Isoglass[®] H 40 CGF X HS, PP GF 40%.

Parametri	Vite A	Vite B
Temperatura del fuso	240°C	240 °C
Portata	6.55 cm ³ /s	5.70 cm ³ /s
Pressione d'iniezione	179 bar	354 bar
Pressione impaccamento	145 bar	265 bar
Switch-over	1.20 s	1.20 s
Tempo impaccamento	10 s	10 s
Tempo raffreddamento	25 s	25 s

Come visto in precedenza, con l'iniezione di tipo double gate, si formano due fronti di flusso che, incontrandosi, creano una weld line. Questa linea di saldatura altera la morfologia e le prestazioni meccaniche del componente, influenzando negativamente la sua integrità strutturale. Per risolvere questo problema, è stata implementata una nuova tecnologia chiamata gas assisted push-pull (GAPP). Il sistema GAPP funziona iniettando gas nella cavità dopo che è stata riempita con il materiale plastico. Questa iniezione avviene attraverso due iniettori, creando uno sbilanciamento del flusso. Il processo prevede il collegamento della piastra iniettori del pacco stampo mobile (come illustrato in Figura 2.6) a una centralina di gas (Maximator RM/500/2/N2) in Figura 2.10. Questa centralina comprime e inietta il gas in due fasi: prima attraverso l'iniettore (gas injection) 1 e successivamente attraverso l'iniettore (gas injection) 2 come mostrato in Figura 2.11. Questo metodo provoca uno sbilanciamento del flusso e un riorientamento delle fibre all'interno del materiale. Di conseguenza, in prossimità della weld line, le fibre si allineano lungo la direzione del flusso. Questo allineamento migliora le proprietà meccaniche del componente, riducendo l'impatto negativo della weld line e ottimizzando la distribuzione delle fibre per una maggiore resistenza e durabilità del pezzo finale. L'adozione della tecnologia GAPP rappresenta un significativo avanzamento nel miglioramento delle prestazioni dei componenti stampati, garantendo una qualità superiore e una maggiore affidabilità strutturale.



Figura 2.10. Centralina di gas (Maximator RM/500/2/N2) .

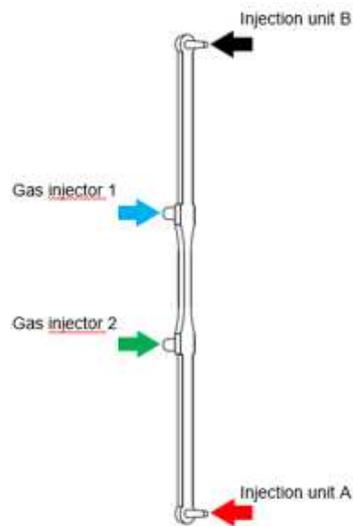
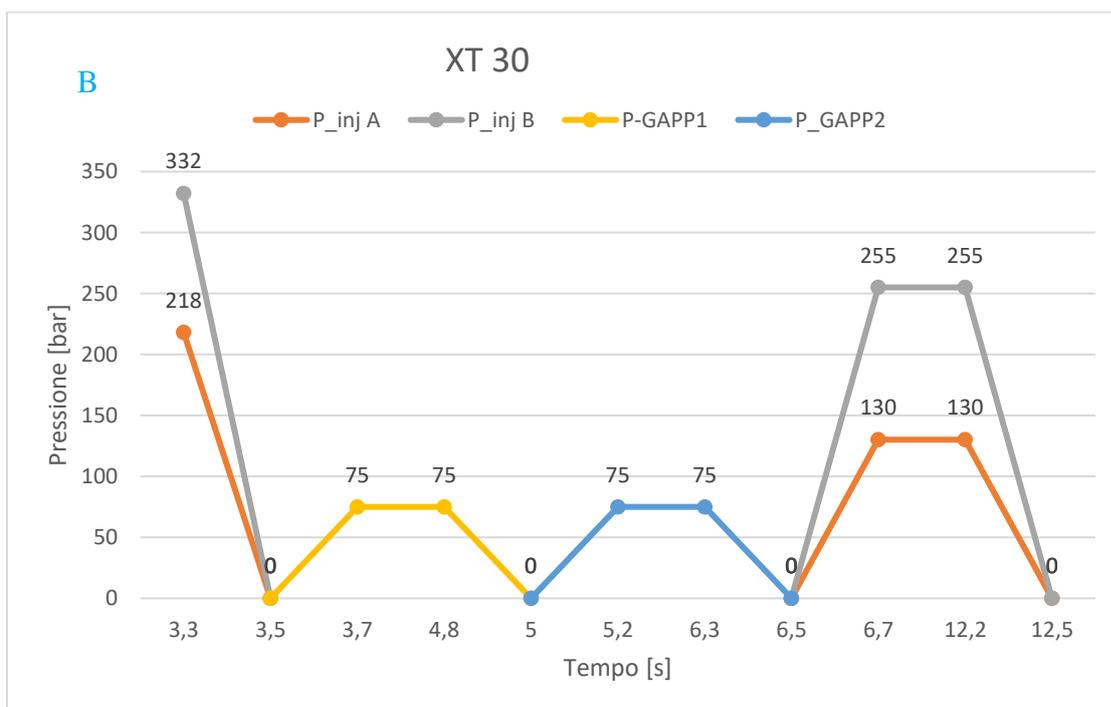
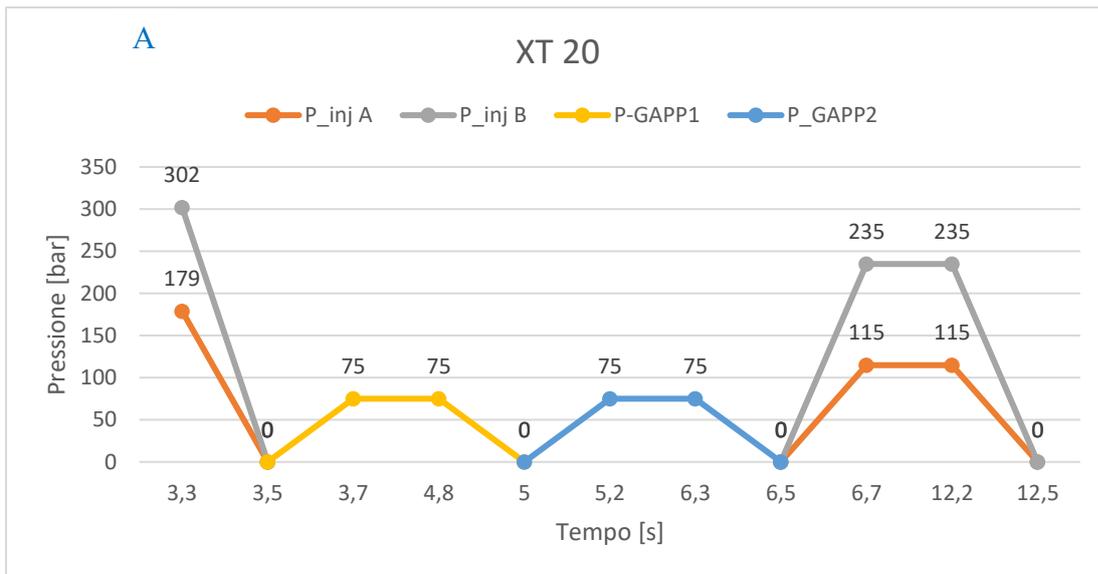


Figura 2.11: rappresentazione schematica dei gate d'ingresso del polimero fuso e del gas.

Per la stampa dei provini, sono stati utilizzati gli stessi parametri di processo impiegati per l'iniezione double-gate, come riportato nelle tabelle 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9. Tuttavia, è stata apportata una modifica significativa al tempo di impaccamento: esso è stato ritardato di 4 secondi rispetto alla fine del riempimento della cavità e ridotto da 10 secondi a 6 secondi. Questo cambiamento è stato necessario perché i 4 secondi rimanenti vengono utilizzati per l'iniezione dell'azoto. Questa strategia consente di integrare il processo di iniezione del gas

senza alterare il tempo ciclo complessivo. Mantenere inalterato il tempo ciclo è cruciale per garantire l'efficienza produttiva e la coerenza nei risultati.

Il grafico in Figura 2.12 pressione-tempo illustra l'andamento del processo, evidenziando le fasi di riempimento della cavità, iniezione del gas e impaccamento. Questo grafico è fondamentale per comprendere come ciascuna fase del processo contribuisce alla formazione del componente finale e come l'iniezione del gas viene integrata senza compromettere l'efficienza del ciclo.



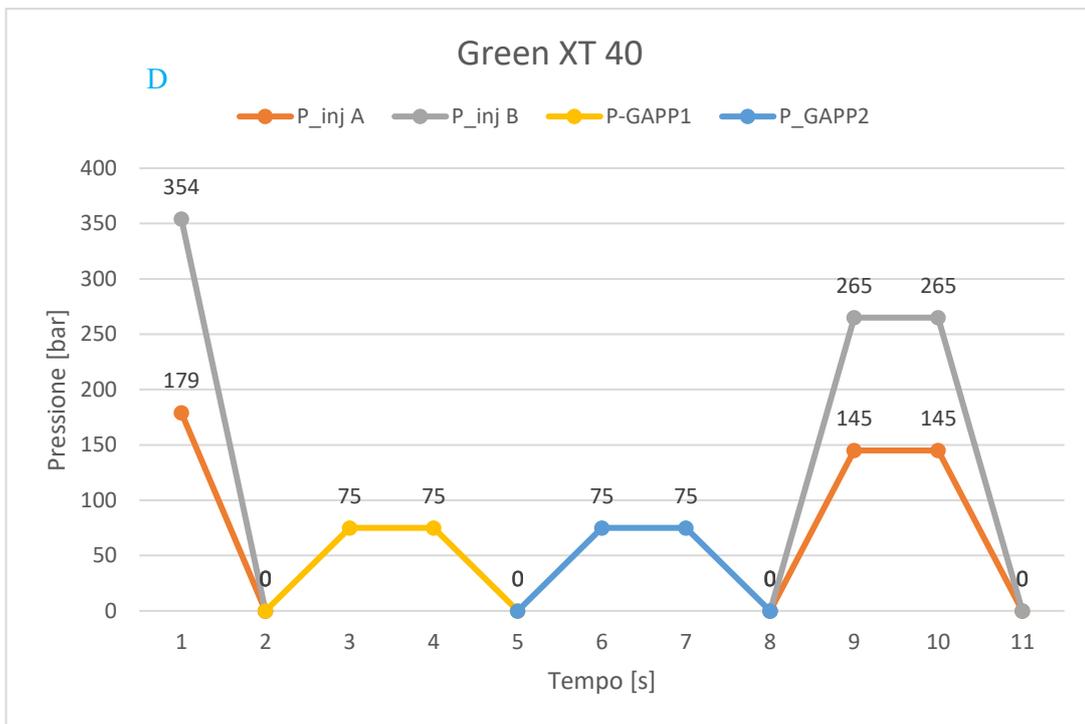
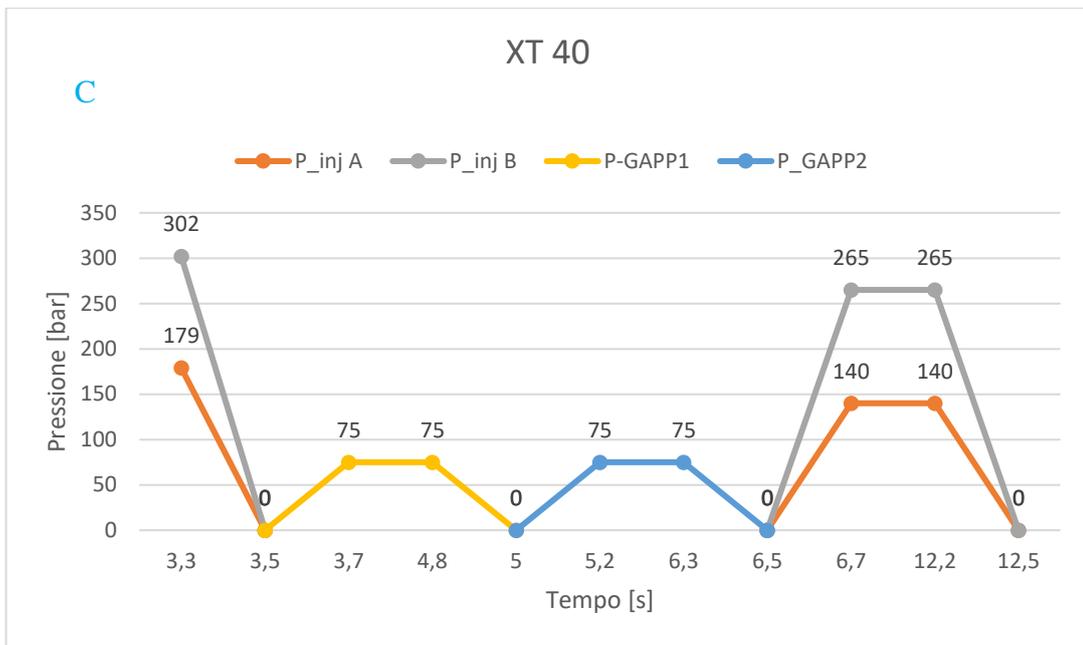


Figura 2.12. Le figure A, B, C e D mostrano l'andamento della pressione in funzione del tempo. L'intervallo da 0 a 3.3 s rappresenta la fase d'iniezione, da 3.5 a 5 s fase iniezione del gas da iniettore 1, da 5 a 6.5 s fase iniezione del gas da iniettore 2, da 6.5 a 12.5 s fase d'impaccamento.

2.2 Analisi dinamometriche

La macchina di prove a trazione Instron serie 5969 in Figura 2.13 è stata impiegata per effettuare test di trazione su diversi provini. Questa macchina è dotata di prese meccaniche di trazione con azione a cuneo della serie 2716-015, progettate per basse forze, e utilizza una cella di carico da 50 kN insieme al software Bluehill Universal di Instron. I test sono stati condotti a una temperatura costante di 25°C. Durante le prove, la velocità della traversa è stata impostata a 1 mm/s fino a una deformazione dello 0,3% e successivamente a 5 mm/s fino alla rottura. Sono stati inseriti come input i valori della larghezza e dello spessore del provino; come output, sono stati ottenuti i valori della forza massima a rottura e della rigidezza per i materiali XT20, XT30, XT40 e Green40. La forza a rottura è stata definita come la massima forza raggiunta durante la prova.

L'approccio adottato ha privilegiato l'uso di valori estrinseci, come la forza a rottura, a causa della presenza delle weld line, che causano una variazione locale delle proprietà meccaniche a causa della diversa orientazione delle fibre all'interno del campione. Questa variabilità rende complessa la valutazione della deformazione nel tempo, poiché ogni area del campione risponde in modo diverso allo stesso carico. Pertanto, si è scelto di utilizzare variabili estrinseche come la forza a rottura come indicatori di risposta, anziché basarsi sulla resistenza. Sono stati sottoposti a trazione dieci campioni per ciascuno dei quattro tipi di materiale e per ciascuna tipologia di stampa utilizzando tre diverse tecniche di stampaggio. L'obiettivo era evidenziare l'impatto della presenza delle weld line sulle prestazioni meccaniche dei componenti. Questo approccio ha permesso di comprendere meglio come le weld line influenzano la forza a rottura e la rigidezza dei materiali testati, fornendo indicazioni utili per ottimizzare i processi di produzione e migliorare la qualità dei prodotti finiti.



Figura 2.13. Instron serie 5969 equipaggiata con prese meccaniche di trazione con azione a cuneo serie 2716-015 a bassa forza.

2.3 Analisi microscopio elettronico (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione (SEM) in Figura 2.14 è stato utilizzato per esaminare la superficie fratturata dei campioni dopo le prove di trazione. Prima dell'analisi SEM, ogni campione è stato rivestito con un sottile strato di materiale conduttivo composto da oro-palladio. Questo rivestimento è essenziale perché il SEM utilizza un fascio focalizzato di elettroni che interagisce con la superficie conduttiva del campione. L'interazione genera elettroni secondari che vengono rilevati da un detector, il quale produce un segnale utilizzato per ricostruire l'immagine dettagliata della superficie

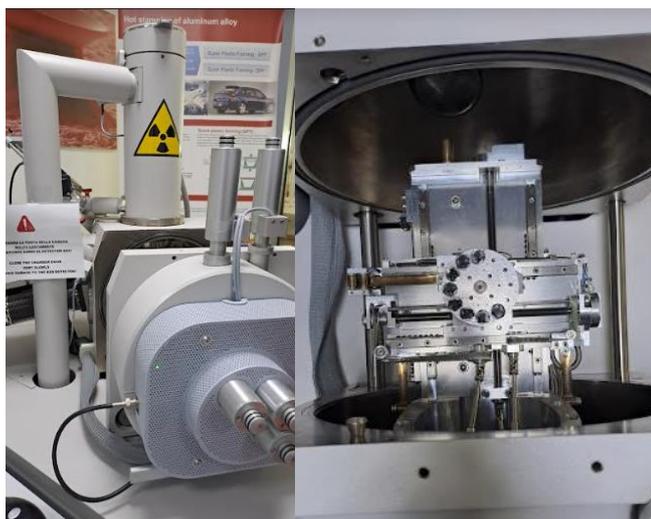


Figura 2.14. Foto del microscopio elettronico (SEM), usato per analizzare la superficie di frattura.

Prima di procedere con il rivestimento, i campioni sono stati fissati con nastro conduttivo su appositi supporti e inseriti nella macchina di sputter coater (Denton Vacuum Desk V) in Figura 2.15. Una volta creato il vuoto all'interno della camera, è stata applicata una differenza di potenziale che ha causato la deposizione degli atomi di oro sulla superficie del campione, garantendo così una copertura uniforme e conduttiva come mostrato in Figura 2.16.

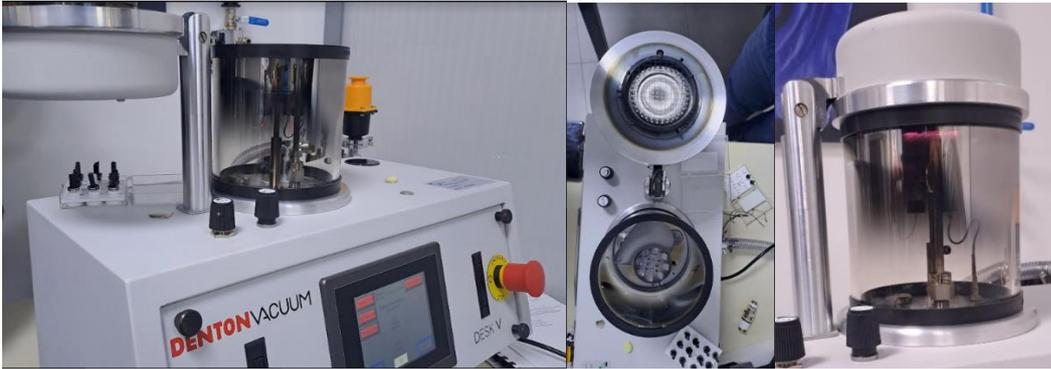


Figura 2.15: foto della macchina di sputter coater (denton vacuum desk v), usata per rivestire la superficie dei campioni.

Dopo il rivestimento, i campioni sono stati collocati nella camera del SEM per l'analisi. L'obiettivo principale di questa analisi è stato quello di esaminare in dettaglio la superficie di frattura del componente. In particolare, l'analisi si è concentrata sull'identificazione del tipo di frattura (elastica o fragile), sull'orientamento delle fibre all'interno del materiale e sul fenomeno del pull-out delle fibre. Queste informazioni sono cruciali per comprendere meglio il comportamento meccanico del materiale.



Figura 2.16. Foto dei campioni dopo aver subito il processo di sputter coater.

2.4 Simulazione numerica del processo d'iniezione

La simulazione numerica è stata condotta usando Autodesk Moldflow Insight (AMI) 2023, in modo da capire l'orientazione delle fibre e la morfologia della weld line. Inoltre, per simulare l'effetto del GAPP e Double-Gate sui componenti è stato implementato il modulo "Gas-Assisted Injection Molding" e "Multiple-Barrel Thermoplastic Injection Molding".

2.4.1 Simulazione numerica dei campioni

La simulazione numerica del processo di stampaggio è stata impiegata per analizzare l'effetto di due diverse tecniche di stampaggio, Double-gate e GAPP, sulle proprietà strutturali dei componenti stampati. Per condurre queste simulazioni, il design della parte è stato modificato con l'inserimento di "pozzetti di accumulo" posizionati sui lati opposti rispetto ai punti di iniezione del materiale, come illustrato nella Figura 2.18. Questi pozzetti sono stati progettati per garantire una portata costante durante la fase di riempimento della sezione utile del componente.

La geometria del componente è stata discretizzata utilizzando una mesh tridimensionale composta da elementi tetraedrici, ciascuno con una lunghezza di spigolo di 0,4 mm. Complessivamente, la mesh è costituita da 850.000 elementi e 160.000 nodi. Questa discretizzazione dettagliata è fondamentale per ottenere una rappresentazione accurata del comportamento del materiale e delle sue proprietà strutturali durante il processo di simulazione.

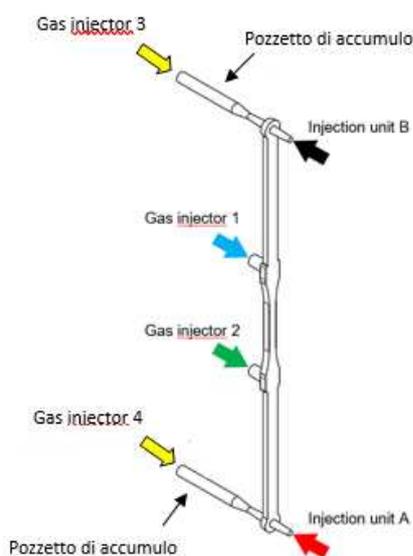


Figura 2.18. Geometria della cavità simulata.

Per il processo Double-gate è stato modellato un sistema di alimentazione a canali caldi usando elementi tipo trave e con due iniettori indipendenti per alimentare la parte vedi Figura 2.19. I parametri di processo usati per la simulazione sono riportati in tabella 2.10

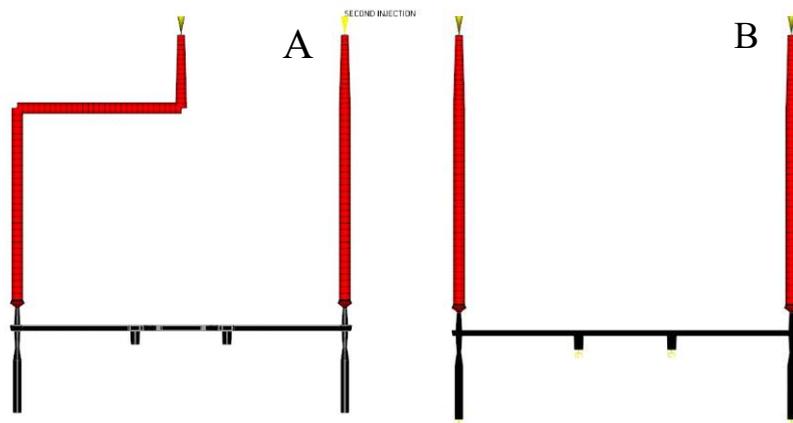


Figura 2.19. (A) sistema di alimentazione per il processo Double-gate, (B) sistema alimentazione per GAPP.

Per simulare efficacemente il processo di stampaggio GAPP, è stato necessario apportare modifiche significative alla geometria del campione. In particolare, sono stati inseriti "pozzetti di accumulo" sui lati opposti ai punti di iniezione del materiale, come illustrato nelle figure 2.18 e 2.19. Queste modifiche sono state fondamentali perché il modulo di "Gas-Assisted Injection Molding" non prevede una fase di impaccamento dopo l'iniezione del gas attraverso gli iniettori 1 e 2. Per ovviare a questa limitazione, sono stati posizionati due iniettori aggiuntivi alla base dei "pozzetti di accumulo". Questi iniettori, numerati 3 e 4, vengono attivati al termine del processo GAPP. L'iniezione di gas da parte di questi iniettori spinge il materiale nelle cavità, compensando i ritiri e simulando efficacemente la fase di impaccamento.

I parametri di processo utilizzati sono dettagliati nella Tabella 2.10. È importante notare che il tempo ciclo per l'iniezione del gas è stato mantenuto identico a quello degli esperimenti pratici, con due cicli di 1,5 secondi ciascuno. Tuttavia, la pressione di iniezione del gas è stata mantenuta più bassa rispetto agli esperimenti reali. Questa scelta è stata fatta per tenere conto delle perdite di pressione che possono verificarsi negli iniettori e lungo la linea del gas, perdite che non vengono considerate nella simulazione. Inoltre, mantenere una pressione del gas più bassa aiuta a prevenire infiltrazioni e intrappolamenti nelle cavità, che potrebbero compromettere l'integrità strutturale del componente.

Tabella 2.10. Parametri di processo simulazione

Parametri	Double-gate	GAPP
Temperatura del fuso	240°C	240°C
Portata	5.5 cm ³ /s	5.5 cm ³ /s
Pressione iniezione gas 1	0	15 bar
Pressione iniezione gas 2	0	12 bar
Tempo iniezione gas	0	0-4 s
Pressione impaccamento	200 bar	200 bar
Tempo impaccamento	0 – 10 s	0 – 6 s
Tempo raffreddamento	22 s	22 s

2.4.2 Simulazione numerica fan

È stata eseguita una simulazione del processo di stampaggio GAPP su un componente reale, con l'obiettivo di valutare l'impatto di questa metodologia sulla morfologia weld line e sull'orientamento delle fibre. L'intento dello studio è di verificare l'esistenza di una corrispondenza tra i campioni analizzati in laboratorio e il comportamento di un componente reale. Per questa analisi è stato scelto un cooling fan, come illustrato nella Figura 2.20. L'importanza di questa simulazione risiede nella capacità di comprendere come le diverse tecniche di stampaggio possano influenzare le proprietà strutturali e meccaniche del componente finale. La weld line si forma quando due flussi di materiale si incontrano, è spesso un punto critico in termini di resistenza e integrità strutturale. Allo stesso modo, l'orientamento delle fibre all'interno del materiale composito influenza significativamente le sue proprietà meccaniche, come la resistenza alla trazione e la rigidità. La scelta di un cooling fan come oggetto di studio permette di analizzare un componente con geometrie complesse e requisiti funzionali specifici, rendendo i risultati della simulazione particolarmente rilevanti per applicazioni pratiche.



Figura 2.20. Modello CAD del cooling fan.

Nell'ambito dello studio del processo di stampaggio convenzionale, sono state eseguite tre simulazioni per analizzare l'effetto delle modifiche geometriche sulla qualità del componente finale. La prima simulazione è stata condotta utilizzando la geometria originale del ventilatore, come mostrato nella Figura 2.20, per stabilire un punto di riferimento di base senza alcuna alterazione strutturale. Le successive due simulazioni hanno introdotto variazioni alla geometria del cooling fan. In queste, sono stati aggiunti quattro "pozzetti di accumulo" sui lati opposti ai punti di iniezione del materiale, oltre a due ulteriori pozzetti posizionati lungo la linea di giunzione (weld line). Le due geometrie modificate si differenziano principalmente per l'inclinazione dei pozzetti di accumulo rispetto alla weld line, come illustrato nella Figura 2.21. Questa variazione nell'inclinazione è stata introdotta per studiare come l'angolazione dei pozzetti possa influenzare il flusso del materiale e, di conseguenza, la morfologia della weld line.

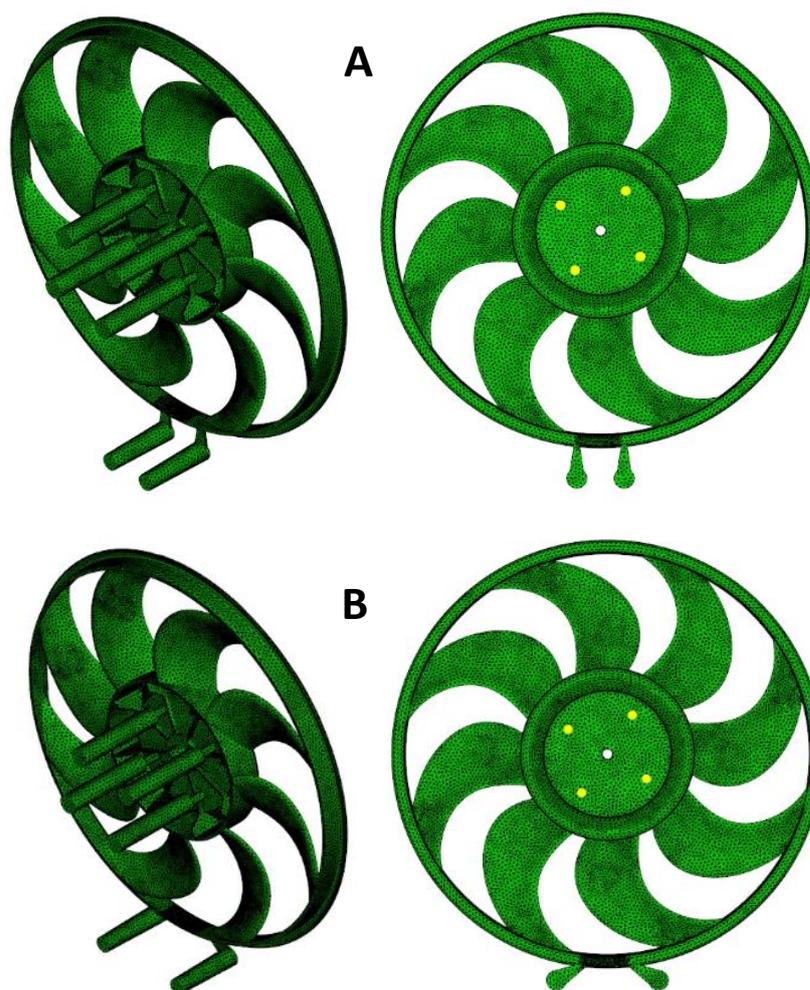


Figura 2.21. (A) Geometria cooling fan modificata con pozzetti localizzati paralleli alla weld line. (B) Geometria cooling fan modificata con pozzetti localizzati inclinati rispetto weld line.

La simulazione numerica del processo GAPP (Gas-Assisted Injection Molding) è stata condotta utilizzando la geometria del cooling fan già impiegata nelle precedenti simulazioni del processo double-gate. Questa scelta ha permesso di mantenere una coerenza nei confronti delle variabili geometriche già studiate, consentendo un confronto diretto tra i due processi di stampaggio. Nella simulazione GAPP, sono stati integrati due iniettori di gas, identificati come 1 e 2, collocati alla base dei pozzetti situati in corrispondenza della weld line. In aggiunta, sono stati posizionati altri quattro iniettori di gas (3, 4, 5, e 6) alla base dei pozzetti sul lato opposto rispetto ai punti di iniezione del materiale, come mostrato in Figura 2.22. Questi iniettori sono stati introdotti per replicare la fase di impaccamento è essenziale per compensare i ritiri del materiale durante il raffreddamento. La necessità di questa modifica deriva dal fatto che il modulo "Gas-Assisted Injection Molding" utilizzato nella simulazione non permette la fase di impaccamento dopo l'iniezione del gas. Pertanto, l'aggiunta di iniettori supplementari è stata una soluzione

ingegnosa per simulare efficacemente questa fase, assicurando che il processo di stampaggio rispecchi le condizioni reali.

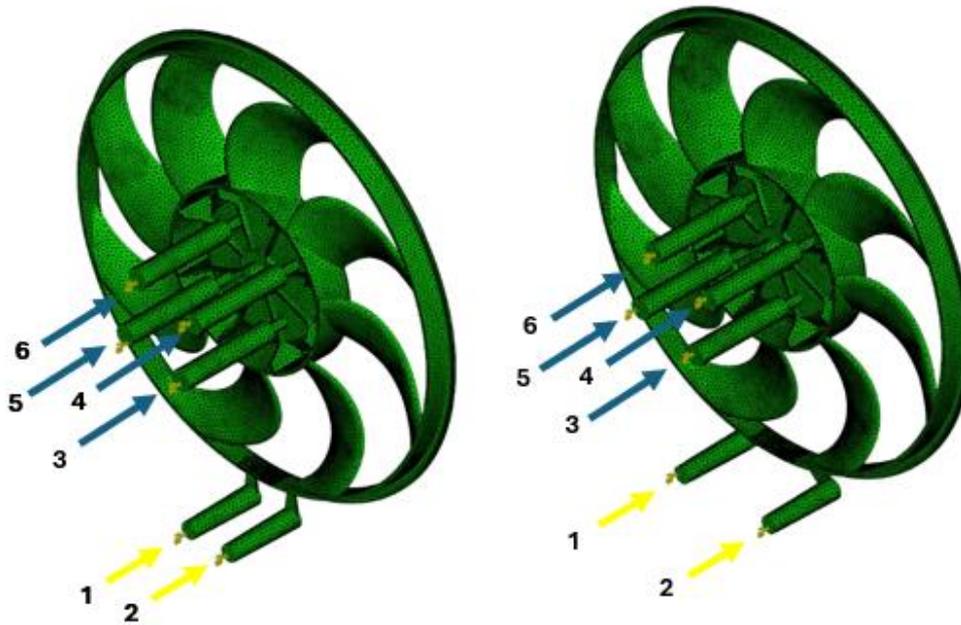


Figura 2.22. Geometria del fan modificata con iniettori del gas posizioni sulla base dei “pozzetti”.

Per la simulazione dei processi di stampaggio le geometrie sono state discretizzate con una mesh 3D di elementi tetragonali con una lunghezza di spigolo globale pari a 2.5 mm. Inoltre, è stata infittita la mesh tetragonali con una lunghezza di spigolo globale pari a 1.2 mm in corrispondenza della weld line in modo da ottenere risultati più precisi. I parametri di processo con cui è stata condotta le simulazioni sono riportati in tabella 2.11, si osserva che il tempo d’impaccamento ed il tempo ciclo d’iniezione del gas è stato mantenuto uguale a quello degli esperimenti dei campioni.

Tabella 2.11: parametri di processo usati per le simulazioni.

Parametri	Double-gate	GAPP
Temperatura del fuso	240°C	240°C
Portata	55 cm ³ /s	55 cm ³ /s
Pressione iniezione gas 1	0	80 bar
Pressione iniezione gas 2	0	80 bar
Tempo iniezione gas	0	0-4 s
Pressione impaccamento	180 bar	180 bar
Tempo impaccamento	0 – 10 s	0 – 6 s
Tempo raffreddamento	25 s	25 s

2.5 Analisi strutturale agli elementi finiti (FEM)

Le analisi sono state condotte sui provini di tipo 1B con materiale XT30, polipropilene rinforzato con il 30% di fibre di vetro. Per eseguire le analisi strutturali mediante il metodo degli elementi finiti (FEM), è stato utilizzato come software Ansys, uno degli strumenti più avanzati e diffusi nel campo della simulazione ingegneristica. Tuttavia, è stato necessario integrare i dati relativi alla distribuzione e all'orientazione delle fibre nel provino. Queste informazioni sono state ottenute attraverso le simulazioni del processo di stampaggio eseguita su Autodesk Moldflow. Per combinare i dati tra i due software, è stato utilizzato Autodesk Helius Advanced Material Exchange. Questo ha permesso di garantire che le caratteristiche anisotrope del materiale, dovute all'orientazione delle fibre di vetro, fossero correttamente rappresentate nel modello FEM [32].

Per condurre la simulazione FEM, è stato importato il modello 3D da analizzare nel software di simulazione Ansys. Per ottimizzare il tempo di calcolo, è stata considerata solo la parte centrale del provino, cioè l'area in cui si forma la weld line, come illustrato nella Figura 2.23. La geometria del componente è stata discretizzata mediante una mesh tridimensionale, composta da elementi tetraedrici, ognuno con una lunghezza di spigolo di 0,35 mm. Questa scelta di discretizzazione consente di ottenere una rappresentazione dettagliata delle caratteristiche geometriche e meccaniche del provino. Inoltre, sono state impostate le condizioni al contorno, inclusi i vincoli, gli spostamenti e i parametri di step time e substep, per garantire una simulazione realistica e accurata delle sollecitazioni a cui il componente sarà sottoposto durante il processo di analisi.

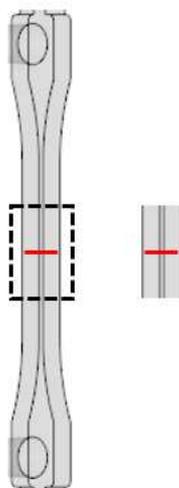


Figura 2.23: sezione del provino usata per eseguire le simulazioni FEM

Per quanto riguarda i vincoli, è stata scelta l'imposizione di un vincolo senza attrito (frictionless). Questo tipo di vincolo impedisce il movimento della superficie nella direzione normale alla faccia, consentendo però alla faccia di ruotare, spostarsi o deformarsi lungo la direzione tangenziale [33]. È stato necessario vincolare anche i due bordi della superficie, poiché, se la superficie non è completamente vincolata, la simulazione non può essere avviata. Questa scelta è stata motivata dalla necessità di evitare la formazione di zone di concentrazione di tensione che si sarebbero verificate con l'applicazione di un vincolo di tipo "fixed support", che avrebbero potuto compromettere i risultati della simulazione. Lo spostamento è stato applicato sulla superficie non vincolata, imponendo uno spostamento di 0.2 mm lungo la direzione del carico, cioè lungo l'asse y come indicato in Figura 2.24. Il numero di substep è stato impostato a 100 e lo step time a 0.2 secondi, una scelta dettata dalla necessità di ottimizzare il tempo computazionale. Un numero maggiore di step facilita l'individuazione del punto esatto di rottura, ma comporta anche un significativo incremento del tempo di calcolo. L'adozione di 100 substeps e di uno spostamento massimo di 0.2 mm consente di analizzare la storia di carico del componente con incrementi di deformazione di 2 micron.

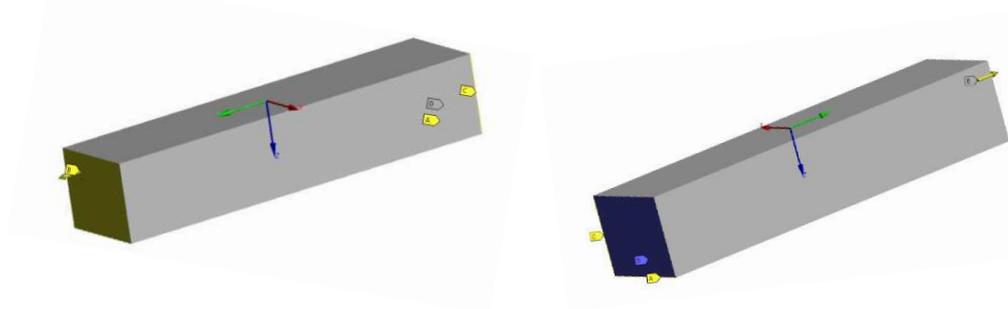


Figura 2.24. in giallo la superficie del provino in cui si applicato lo spostamento di 0.2mm, in blu la superficie del provino vincolata

I risultati strutturali ottenuti da ANSYS sono stati integrati con quelli derivanti da Moldflow. Questa combinazione è stata possibile grazie al software Advanced Material Exchange, che consente di sovrapporre le due geometrie e i relativi risultati, come illustrato nella Figura 2.25. Questo approccio ha permesso di eseguire il mapping dell'orientazione delle fibre nel materiale. Inoltre, è stato impostato un weld factor, un indice che varia da 0 a 1, che considera l'influenza della weld line sulle prestazioni meccaniche del componente. Sebbene il software possa analizzare come l'orientazione delle fibre influisca sulle prestazioni, non tiene conto di altri effetti legati alla weld line che potrebbero compromettere ulteriormente le

prestazioni del materiale. Questo aspetto è cruciale per una valutazione completa e accurata del comportamento meccanico del provino.

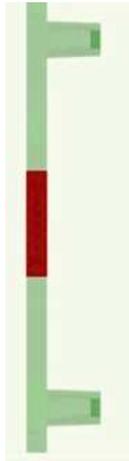


Figura2.25. in rosso il modello importato da Ansys e in verde chiaro il modello importato da Moldflow

I risultati ottenuti da Autodesk Helius saranno reimportati in Ansys, consentendo di analizzare i dati relativi a spostamento, deformazione, tensione, forza di rottura, weld factor e cedimento della matrice. Questa integrazione permetterà di ottenere una visione complessiva delle prestazioni meccaniche del componente.

3 Risultati e discussione

In questo capitolo, sono presentati e discussi i risultati ottenuti sottoponendo i campioni fibrorinforzati a diverse metodologie di indagine. In particolare, i campioni sono stati sottoposti a prove dinamometriche e successivamente sono state osservate al microscopio elettronico a scansione (SEM) le superfici di frattura. Inoltre, sono state condotte delle simulazioni dei processi di stampaggio con Autodesk Moldflow Insight (AMI) 2023 per andare and indagare come il processo condicione la distribuzione e l'orientazione delle fibre. L'obiettivo di questo capitolo è esaminare in dettaglio i fattori e i fenomeni che influenzano significativamente le proprietà meccaniche materiale. Per brevità in questo elaborato i campioni di polipropilene rinforzato con fibre di vetro al 20%, 30% e 40% saranno rispettivamente denominati XT20, XT30 e XT40. Mentre il polipropilene rinforzato con fibre di vetro al 40% ed il 30% di materiale riciclato verrà chiamato Green40. Le caratteristiche fisiche di questo materiale sono riportate in tabella 2.4. Inoltre, i risultati delle prove dinamometriche verranno distinti in *F-ref* e *Mod-ref* per indicare la forza a rottura e il modulo dei campioni privi di difetti, rispettivamente; *F-WL* e *Mod-WL* per indicare la forza a rottura e il modulo elastico dei campioni con la weld line, rispettivamente; *F-GAPP* e *Mod-GAPP* per indicare la forza a rottura e il modulo elastico dei campioni ottenuti con il processo GAPP, rispettivamente.

Analizzando i dati delle prove dinamometriche, ci concentreremo su come la presenza di difetti, come la weld line, influisce sulla resistenza e sul comportamento meccanico dei materiali. L'osservazione al SEM ci permetterà di visualizzare le microstrutture e di investigare i meccanismi di frattura, fornendo un quadro dettagliato di come le fibre si orientano e interagiscono nei diversi scenari. Le simulazioni con AMI 2023 consentiranno di confrontare i risultati sperimentali con quelli simulati, offrendo una visione integrata delle prestazioni dei materiali sotto diverse condizioni di processo.

3.1 Prove dinamometriche

I test dinamometrici eseguiti sui campioni di materiali XT20, XT30, XT40 e GREEN40 hanno fornito dati significativi riguardo ai valori della forza a rottura e del modulo elastico. Questi risultati ci hanno permesso di analizzare come il processo di produzione e la percentuale di fibra presente nella matrice influenzino le prestazioni meccaniche del componente.

Inoltre, sarà possibile valutare le prestazioni meccaniche di un materiale riciclato, esaminando l'impatto della matrice polimerica composta da un 30% di polipropilene riciclato, mantenendo costante la percentuale di fibra di rinforzo. Questo confronto ci aiuterà a comprendere meglio le potenzialità e le limitazioni dei materiali riciclati in applicazioni strutturali.

3.1.1 Risultati prove dinamometriche XT20, XT30, XT40

I box plot presentati nelle Figure 3.1 e 3.2 sintetizzano i risultati, mostrando il valore medio e la deviazione standard per ciascun materiale e processo di stampaggio. Un'analisi comparativa tra i valori di $F-ref$ (campioni senza difetti) e $F-WL$ (campioni con weld line) rivela che la presenza della weld line, con l'orientamento delle fibre parallelo ad essa e ortogonale al carico applicato, comporta una significativa diminuzione delle prestazioni meccaniche. L'effetto diventa più evidente con l'aumento della percentuale di fibre nella matrice, poiché l'interfaccia della weld line presenta una maggiore concentrazione di fibre. Una maggiore quantità di fibre all'interfaccia di separazione, mantenendo costante l'unità di volume, riduce la quantità di matrice. In questa situazione, la matrice svolge principalmente il ruolo di supporto per il carico, portando a una diminuzione della resistenza della weld line e, di conseguenza, del componente stesso. Questo fenomeno sarà ulteriormente confermato dalle immagini ottenute al SEM della superficie di frattura.

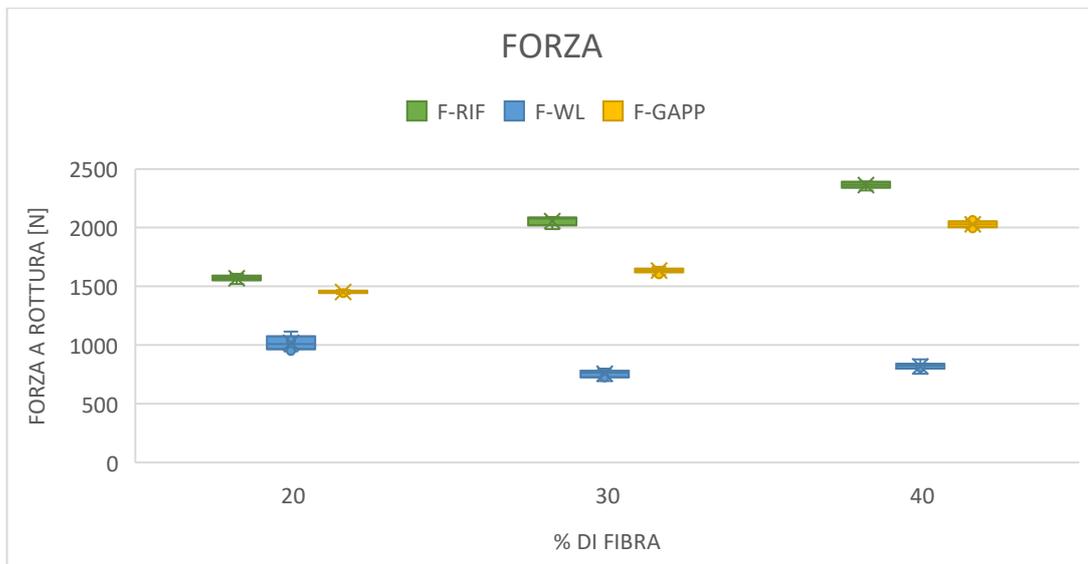


Figura 3.1. Box plot contenente i valori della forza a rottura al variare della percentuale di fibra.

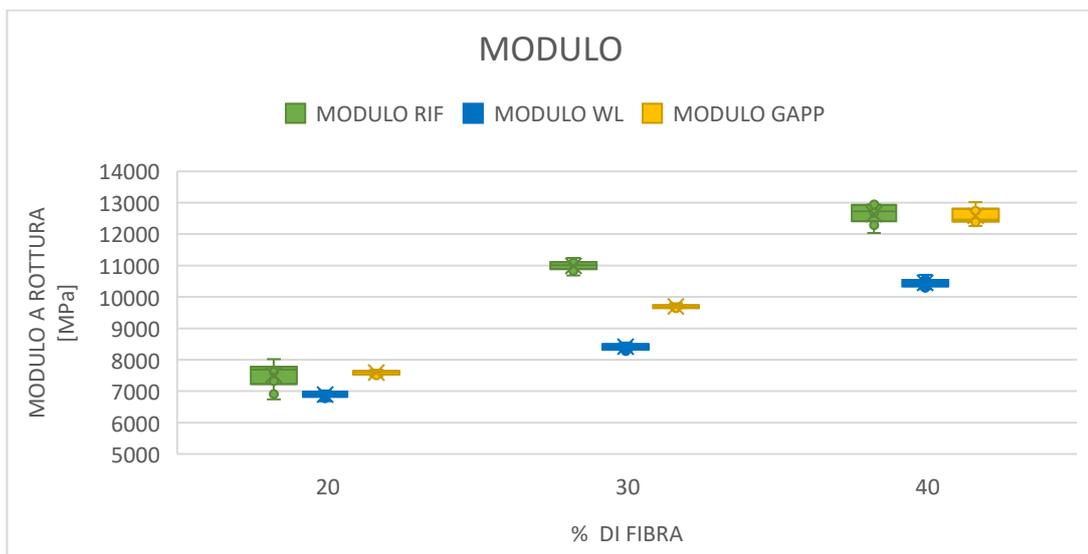


Figura 3.2. Box plot contenente i valori del modulo elastico al variare della percentuale di fibre.

In dettaglio, la Tabella 3.1 mostra che la forza a rottura $F-WL$ si riduce rispetto a $F-ref$ di 550.34 N per XT20, 1300.68 N per XT30, e 1547.74 N per XT40. Osservando il box plot nella Figura 3.2, emerge che, contrariamente alla forza a rottura, il modulo elastico $Mod-WL$ tende a crescere con l'aumento della quantità di fibra. Tuttavia, la presenza della weld line interrompe la continuità della matrice, portando a una riduzione del $Mod-WL$ rispetto al $Mod-ref$. Nel dettaglio, la Tabella 3.1 indica che il $Mod-WL$ è inferiore al $Mod-ref$ di 625 MPa per XT20, 2572 MPa per XT30, e 2173 MPa per XT40. Questo aspetto è particolarmente interessanti in quanto strutturalmente i componenti sono più deboli quindi riescono a sostenere un carico minore come mostrato in Figura3.1, in quanto la resistenza è un parametro locale e risente

maggiormente dell'influenza della weld line. Mentre è possibile avere una rigidità maggiore all'aumentare della quantità di fibra dispersa nella matrice. In quanto, la rigidità dipende principalmente dalle proprietà intrinseche del materiale. Tuttavia, è importante notare in Figura 3.2 che, aumentando la quantità di fibra dispersa nella matrice, si può ottenere una maggiore rigidità del materiale. La rigidità è principalmente determinata dalle proprietà intrinseche del materiale stesso.

		F-rottura [N]		σ - rottura [MPa]		Modulo [MPa]	
		Media	Dev. Stand.	Media	Dev. Stand.	Media	Dev. Stand.
XT20	Rif	1569,86	27,4	78,5	1,4	7517,0	409,2
	Wl	1019,52	59,7	50,9	3,0	6892,0	104,5
	GAPP	1452,72	10,4	72,6	0,5	7590,0	69,5
XT30	Rif	2055,86	36,8	102,8	1,8	10989,0	163,5
	Wl	755,18	33,9	37,7	1,7	8417,0	97,3
	GAPP	1633,7	21,7	81,7	1,7	9697,0	52,9
XT40	Rif	2363,82	25,8	118,2	1,3	12626,0	305,8
	Wl	819,08	34,2	40,9	1,7	10453,0	135,2
	GAPP	2029,74	27,0	101,5	1,3	12583,0	254,3

Tabella 3.1. Tabella contenente i valori medi e la deviazione standard della forza, della tensione e del modulo.

Il processo di stampaggio GAPP consente di ottenere provini con un'elevata anisotropia al cuore, dovuta allo sbilanciamento del flusso che riorienta le fibre in prossimità della weld line. Questo fenomeno è accompagnato dalla solidificazione della pelle del provino, che, a causa dello scambio termico con le pareti dello stampo, congela le fibre in una direzione sfavorevole. La combinazione di questi due effetti comporta una perdita minima delle prestazioni meccaniche rispetto ai valori di riferimento, ma un miglioramento significativo rispetto ai provini con weld line, come evidenziato nelle Figure 3.1 e 3.2. Dalla Tabella 3.1, si nota che la forza a rottura $F-GAPP$ si riduce rispetto a $F-ref$ di 117.14 N per XT20, 422.16 N per XT30, e 334.08 N per XT40. Tuttavia, rispetto ai campioni con weld line, la $F-GAPP$ mostra un incremento di 433.2 N per XT20, 878.52 N per XT30, e 1210.66 N per XT40. Questo indica che, nonostante la riduzione rispetto ai campioni di riferimento, il processo GAPP offre un miglioramento rispetto ai campioni con weld line. Inoltre, come mostrato nella Figura 3.2 e

nella Tabella 3.1, si osserva un aumento significativo del modulo elastico *Mod-GAPP* rispetto a *Mod-WL*: 698 MPa per XT20, 1280 MPa per XT30, e 2180 MPa per XT40. Questi risultati sottolineano l'efficacia del processo GAPP nel migliorare le prestazioni meccaniche complessive dei materiali, riducendo l'impatto negativo della weld line e ottimizzando l'orientamento delle fibre per una maggiore resistenza e rigidità.

Analizzando i valori medi della forza a rottura in funzione della percentuale di fibra per diverse tecniche di stampaggio, è stato possibile creare il grafico illustrato in Figura 3.3, che mostra l'andamento delle curve *F-ref-mean*, *F-WL-mean* e *F-GAPP-mean*. Le curve *F-ref-mean* e *F-GAPP-mean* evidenziano un incremento quasi lineare con l'aumento della quantità di fibre nella matrice. Questo comportamento è attribuibile all'allineamento delle fibre lungo la direzione del carico applicato, che migliora l'efficienza del trasferimento del carico dalle fibre alla matrice. Al contrario, la curva *F-WL-mean* mostra un andamento opposto, dovuto alla disposizione ortogonale delle fibre rispetto alla direzione del carico. Questo contrasto è coerente con la "rule of mixtures", secondo cui il comportamento meccanico di un composito è influenzato dall'orientamento delle fibre rispetto al carico. Quando le fibre sono allineate parallelamente al carico applicato, il comportamento è definito "fiber-dominated". In questo regime, il carico viene distribuito uniformemente dalla matrice alle fibre, assumendo un'adesione perfetta tra di esse. Un aumento della percentuale di fibre porta quindi a un miglioramento delle prestazioni meccaniche. Nel regime "matrix-dominated", invece, le fibre non fungono da elemento di rinforzo efficace; anzi, un aumento della percentuale di fibre può penalizzare le prestazioni meccaniche. Ciò accade perché la tensione si concentra principalmente all'interfaccia tra fibra e matrice, aumentando le aree critiche e riducendo l'efficacia del rinforzo. In questo scenario, la matrice è l'elemento principale che sostiene il carico, e l'incremento della percentuale di fibre riduce la quantità di matrice disponibile per sopportare il carico. In sintesi, il comportamento meccanico dei compositi rinforzati è fortemente influenzato dall'orientamento delle fibre rispetto al carico applicato [16]. L'allineamento parallelo delle fibre migliora le prestazioni meccaniche, mentre un orientamento ortogonale può ridurle, specialmente con un aumento della percentuale di fibre che accentua le aree critiche all'interfaccia fibra-matrice [34].

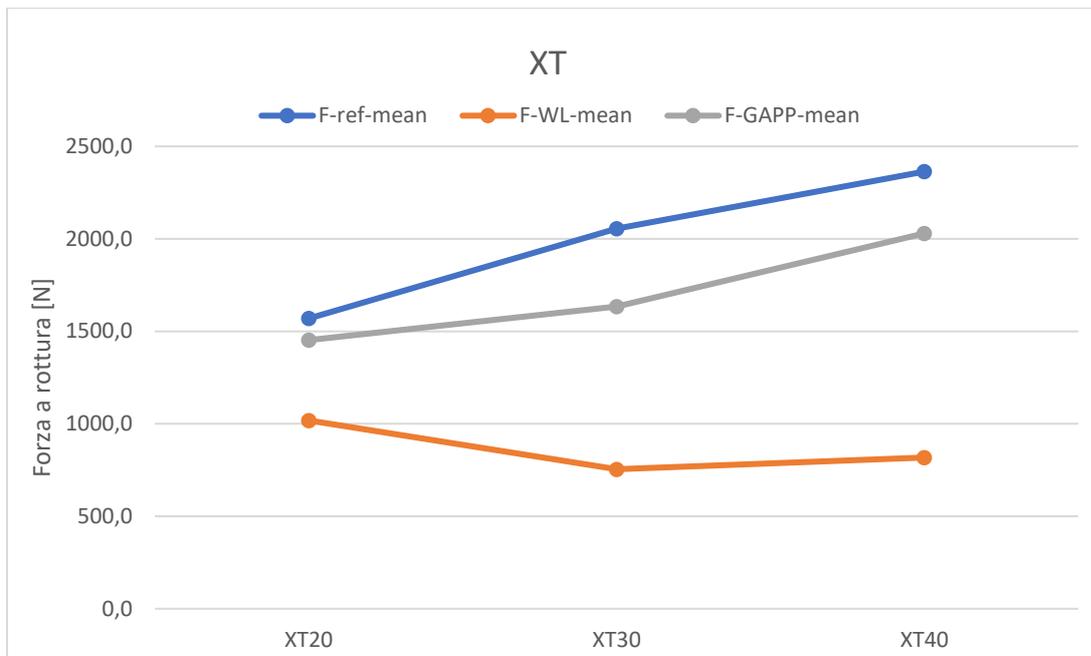


Figura 3.3. Andamento della forza a rottura per i tre processi di stampaggio (single gate, double gate e GAPP) al variare della percentuale di fibra nella matrice.

I campioni realizzati attraverso il processo di stampaggio convenzionale mostrano un comportamento dominato dalla matrice ("matrix-dominated"). Come riportato nella Tabella 3.1, la forza a rottura media (F_{WL}) è di 1019,52 N per XT20, 755,18 N per XT30 e 819,08 N per XT40. Confrontando questi valori con quelli ottenuti dai campioni stampati con il sistema single gate (F_{ref}), si nota una riduzione della forza a rottura. Per quantificare questa diminuzione, si utilizza il fattore di riduzione SRF_{DG} , definito nell'equazione (3.1) come il rapporto tra F_{WL} e F_{ref} . I valori di SRF_{DG} sono pari a 0,65 per XT20, 0,37 per XT30 e 0,35 per XT40, evidenziando una tendenza alla diminuzione con l'aumentare della percentuale di fibra. Questa dinamica è illustrata nella Figura 3.3.

$$SRF_{DG} = \frac{F_{WL}}{F_{ref}} \quad (3.1)$$

Per quanto riguarda il modulo elastico dei campioni, si osserva una riduzione rispetto ai campioni realizzati con il sistema single gate, come mostrato nella Figura 3.4. Questa riduzione è dovuta alla scarsa interdifferenza tra le matrici in corrispondenza della weld line, che porta a legami più deboli. Tuttavia, mentre la forza a rottura diminuisce con l'aumentare della quantità di fibra, come discusso in precedenza, il modulo elastico tende ad aumentare con l'incremento della percentuale di fibra. Questo perché il modulo a trazione non è influenzato dall'orientamento delle fibre nella zona della weld line, ma dipende principalmente dalle

proprietà intrinseche del materiale e dalla continuità della matrice[16]. Questo comportamento è ulteriormente accentuato dal fatto che i campioni tendono a rompersi precisamente in corrispondenza della weld line, riducendo la duttilità complessiva e mostrando un comportamento fragile.

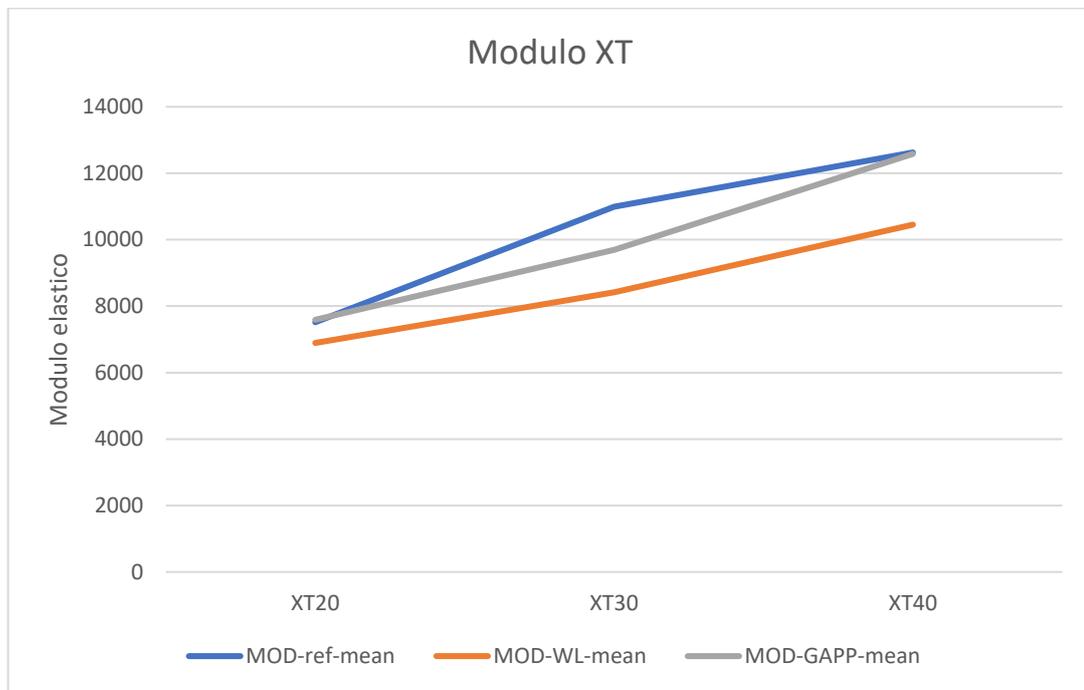


Figura 3.4. Andamento del modulo elastico per i tre processi di stampaggio (single gate, double gate e GAPP) al variare della percentuale di fibra nella matrice.

I campioni realizzati tramite il processo GAPP evidenziano un significativo miglioramento delle proprietà meccaniche rispetto a quelli ottenuti con il processo double gate. Come riportato nella Tabella 3.1, i valori della forza a rottura (F_{GAPP}) per i tre materiali analizzati sono: 1452,72 N per XT20, 1633,7 N per XT30 e 2029,74 N per XT40. Sebbene si osservi un recupero delle prestazioni meccaniche, la forza a rottura di questi campioni rimane comunque inferiore rispetto al valore di riferimento (F_{ref}). Per quantificare questa differenza, è stato calcolato il fattore di riduzione SRF_{GAPP} , definito nell'equazione (3.2) come il rapporto tra F_{GAPP} e F_{ref} .

$$SRF_{GAPP} = \frac{F_{GAPP}}{F_{ref}} \quad (3.2)$$

I valori del fattore SRF_{GAPP} sono 0,93 per XT20, 0,79 per XT30 e 0,86 per XT40. Si nota che SRF_{GAPP} tende ad aumentare con l'incremento della percentuale di fibra nella matrice, come

illustrato nella Figura 3.5. Questo fenomeno è attribuibile a uno sbilanciamento del flusso vicino alla weld line, che provoca un riallineamento delle fibre all'interfaccia di separazione e una maggiore interdifferenza della matrice. Questa transizione da un comportamento dominato dalla matrice ("matrix-dominated") a uno dominato dalle fibre ("fiber-dominated") ha effetti positivi sulla forza a rottura del componente. Per quanto riguarda il modulo elastico, il processo GAPP, grazie allo sbilanciamento del flusso, determina uno spostamento e una compenetrazione delle matrici, creando legami più forti nella zona della weld line. Gli effetti benefici di questo fenomeno sono visibili nella Figura 3.4, dove si nota che i valori ottenuti si avvicinano a quelli del sistema single gate, mostrando una tendenza crescente con l'aumento della percentuale di fibra. Questo indica che il processo GAPP non solo migliora la forza a rottura, ma favorisce anche una miglior diffusione matriciale generando legami di forti e ristabilendo continuità tra la superficie di separazione della weld line.

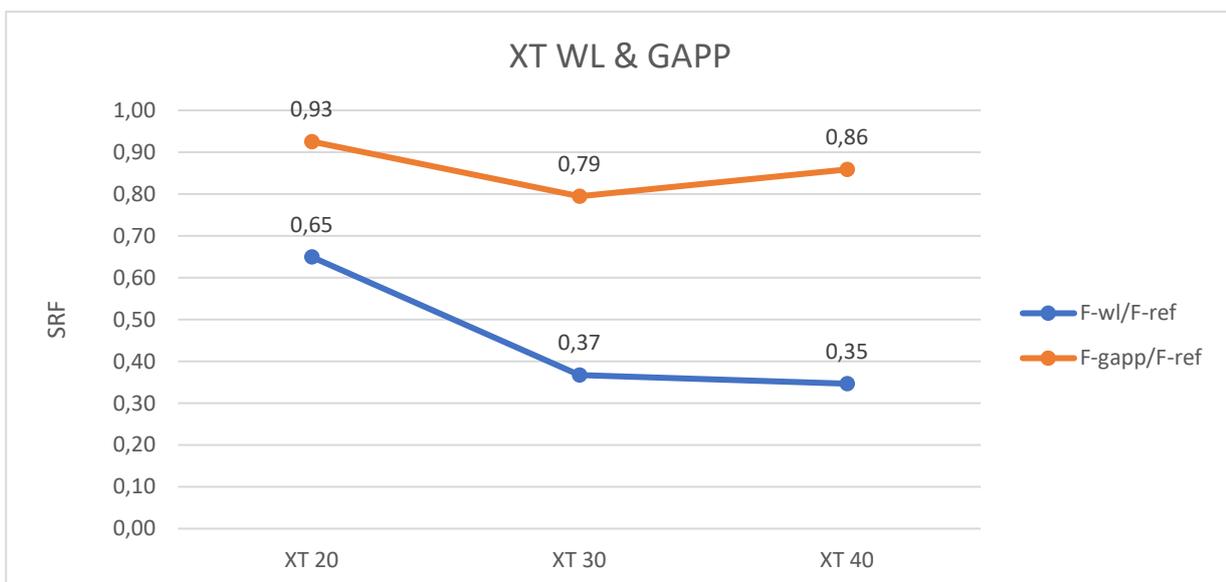


Figura 3.5. Andamento del fattore di riduzione di forza (SRF_{WL} e SRF_{GAPP}) al variare della quantità di fibra nella matrice.

3.1.2 Risultati dinamometrici per il GREEN 40

Dalle prove dinamometriche sono emersi risultati significativi riguardo alla forza a rottura, alla tensione a rottura e al modulo elastico del materiale GREEN40. Come riportato nella Tabella 3.2, che elenca i risultati ottenuti dalle prove, si osserva che la forza a rottura dei campioni realizzati con il processo convenzionale double gate presenta una diminuzione di 900 N rispetto ai provini di riferimento, privi di weld line. Questa riduzione è attribuibile all'orientamento delle fibre lungo la superficie della weld line, che risulta parallelo all'interfaccia di separazione.

Al contrario, la Tabella 3.2 mostra che la forza a rottura dei provini stampati con il processo GAPP è superiore di 500 N rispetto ai campioni con la weld line. Questo risultato è particolarmente rilevante, poiché il processo di stampaggio GAPP ha consentito di recuperare il 50% della forza a rottura, evidenziando l'efficacia di questa metodologia nel migliorare le prestazioni meccaniche del materiale. Per quanto riguarda il valore del modulo elastico, i componenti ottenuti tramite il processo di stampaggio convenzionale double gate mostrano una diminuzione di 2564 MPa rispetto al campione di riferimento privo di weld line. Come spiegato nel paragrafo 3.1.1, questa riduzione è principalmente causata da una scarsa interdizione lungo la superficie della weld line, che comporta una perdita di continuità. Al contrario, il processo GAPP non solo favorisce l'orientamento delle fibre, ma migliora anche l'interdizione della matrice. Come evidenziato nella Tabella 3.2, si osserva un recupero di 1000 MPa rispetto ai provini che presentano il difetto della weld line, dimostrando l'efficacia di questa metodologia nel migliorare le proprietà meccaniche del materiale.

Tabella 3.2. Tabella contenente i valori medi della forza, della tensione e del modulo.

GREEN40	F-rottura_media [N]	σ- rottura_media [MPa]	Modulo_medio [MPa]
Rif	1700	83.3	11609
WI	800	40.3	9045
GAPP	1300	66.6	10529

Nell'ultima analisi dei risultati, è interessante confrontare i valori dell'XT40 con quelli del GREEN40 per evidenziare l'influenza della matrice sulle prestazioni meccaniche del componente. Nella Figura 3.6 sono riportati i risultati ottenuti. Si osserva che il GREEN40 risulta meno performante rispetto al polipropilene non riciclato, con una riduzione della forza a rottura di 800 N per il materiale riciclato, rispetto ai provini privi di difetti. Questa diminuzione è attribuibile alla perdita delle proprietà meccaniche della matrice durante il processo di riciclaggio, che provoca il degrado del materiale a causa della rottura delle catene polimeriche. Inoltre, il materiale riciclato può contenere impurezze che generano bolle di gas all'interno del componente. Queste bolle si formano perché il gas intrappolato nel materiale fuso, a seguito della fusione delle impurezze, tende ad espandersi quando la pressione nella cavità diminuisce.

Un dato significativo riguarda la forza a rottura dei componenti affetti dal difetto della weld line: come illustrato in Figura 3.6, entrambi i campioni mostrano lo stesso valore di

resistenza. Questo evidenzia come l'orientamento parallelo alla weld line possa compromettere le prestazioni meccaniche del componente. Pertanto, in presenza del difetto della weld line, l'impiego di materiali più performanti non comporta alcun beneficio strutturale. Inoltre, nella Figura 3.7 sono riportati i valori del modulo elastico per il materiale non riciclato e quello riciclato. Si nota che il modulo del materiale riciclato è inferiore di 1000 MPa rispetto a quello non riciclato a causa del degrado dei materiali riciclati.

Il degrado dei materiali riciclati è principalmente causato dal ciclo di riciclaggio, durante il quale si verificano rotture delle catene polimeriche e dei legami interni. Questo fenomeno comporta una notevole perdita delle prestazioni meccaniche, in particolare in termini di allungamento a rottura e tenacità del materiale. Le catene polimeriche, quando sono lunghe e ben intrecciate, conferiscono al materiale resistenza e flessibilità. Tuttavia, quando queste catene vengono danneggiate, la capacità del materiale di assorbire energia e deformarsi senza rompersi diminuisce. Di conseguenza, si osserva una riduzione dell'allungamento a rottura, che misura quanto un materiale può allungarsi prima di rompersi, e della tenacità, che indica la resistenza complessiva del materiale agli impatti [3], [35] [36]. Dal confronto tra i due materiali emerge chiaramente quanto le proprietà intrinseche della matrice siano fondamentali per il miglioramento delle prestazioni meccaniche in assenza di weld line.

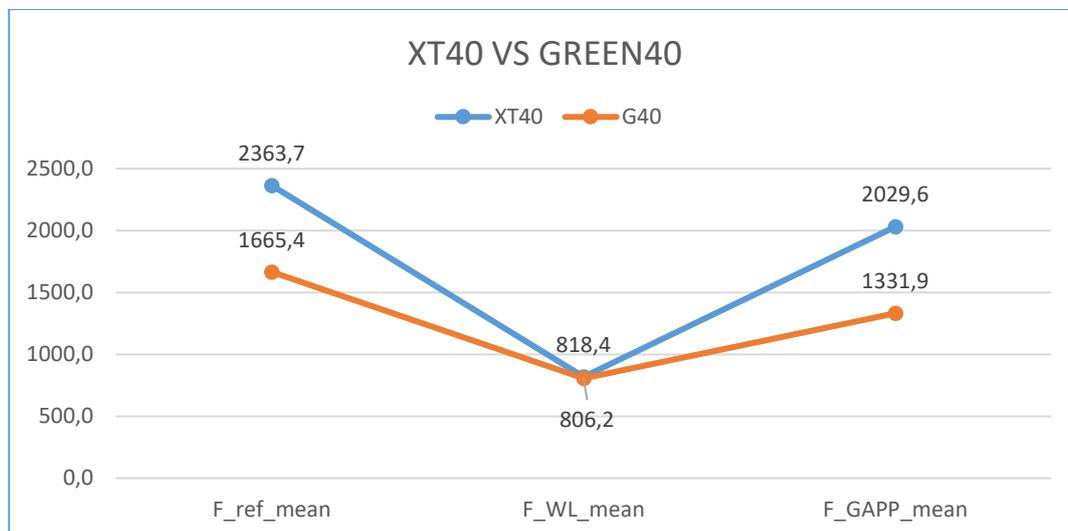


Figura 3.6. Confronto tra la forza a rottura dei componenti stampati con l'XT40 ed il GREEN40

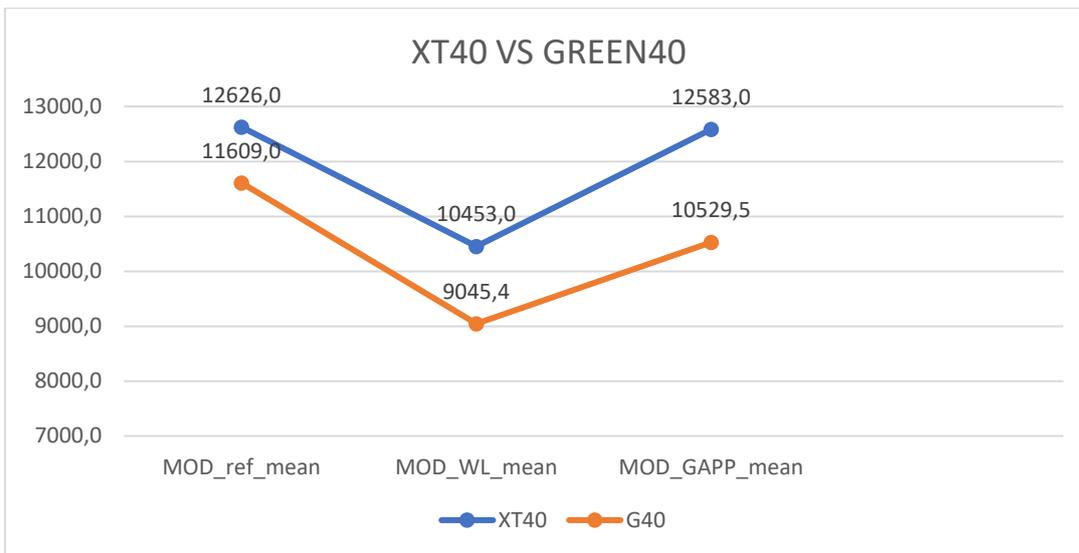


Figura 3.7. Confronto tra il modulo elastico dei componenti stampati con l'XT40 ed il GREEN4

3.2 Analisi della superficie di frattura

L'analisi delle immagini della superficie di frattura ottenute tramite microscopia elettronica a scansione (SEM) offre una comprensione approfondita dei meccanismi di rottura dei componenti. Dall'osservazione preliminare delle immagini SEM, come mostrato in Figura 3.8, emerge che i meccanismi di rottura variano significativamente a seconda della disposizione delle fibre vicino alla weld line. In particolare, le immagini 3.8A e 3.8C evidenziano superfici di frattura più irregolari, indicative di una migliore adesione tra matrice e fibre. Questo suggerisce un trasferimento di carico più efficace tra fibra e matrice, contribuendo a una maggiore resistenza complessiva del materiale è favorito dalla presenza di compatibilizzanti nella matrice del XT. Al contrario, l'immagine 3.8B mostra una superficie di frattura lucida e piatta, segnale di una scarsa adesione tra matrice e fibre in prossimità della weld line. Questa caratteristica indica un minor trasferimento di carico, portando a una rottura fragile e a una resistenza ridotta, come confermato dai dati della Tabella 3.1. Nella superficie di frattura dei provini con WL la fibra è separata in maniera pulita dalla matrice indicando una bassa adesione e un basso trasferimento di carico da matrice a fibra di rinforzo. La plasticizzazione della matrice visibile in Figura 3.10 B indica che nei componenti con WL la matrice è l'elemento portante e conferma la natura fiber-dominated di questi componenti.

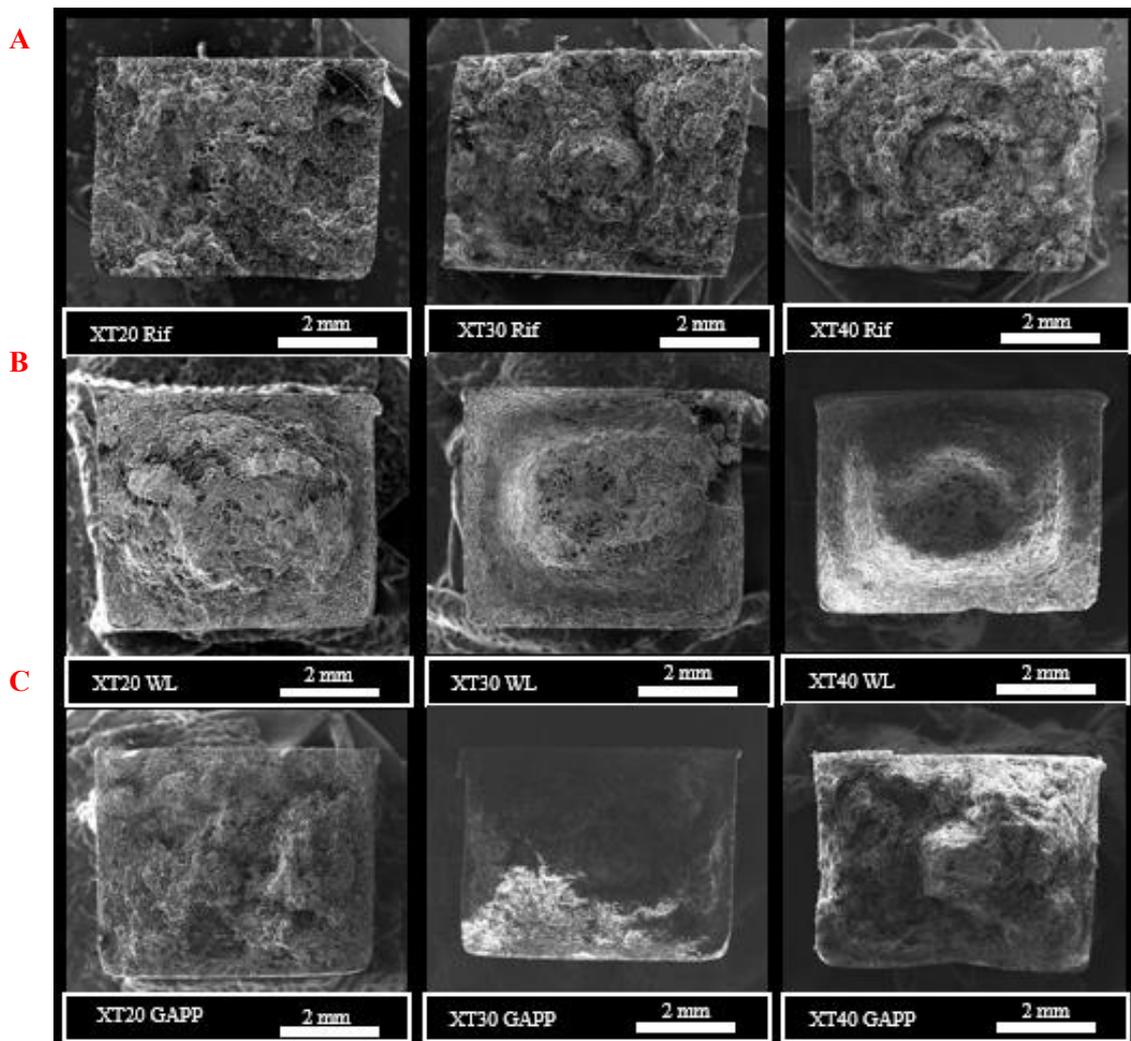


Figura 3.8. (A) Superficie di frattura dei campioni single gate; (B) Superficie di frattura campioni double gate; (C) Superficie di frattura dei campioni GAPP.

Le immagini catturate a vari livelli di ingrandimento permettono un'analisi dettagliata della superficie di frattura, facilitando l'identificazione del tipo di rottura e dell'orientamento delle fibre sia alla pelle che al cuore del materiale. In Figura 3.9, le immagini dei campioni realizzati con la tecnica "single gate" mostrano un'assenza di linee di saldatura e una presenza di fibre orientate lungo la direzione di carico. Le fibre sporgono dalla superficie di frattura e presentano segni di rottura lucida, suggerendo che il cedimento del componente sia avvenuto principalmente a causa della frattura delle fibre stesse. L'assenza di fenomeni di pull-out indica un'adesione ottimale tra fibra e matrice, con una distribuzione uniforme del carico applicato. È interessante notare come la superficie di frattura vari in funzione della percentuale di fibra presente. Un aumento della percentuale di fibra comporta una diminuzione della matrice per unità di volume, modificando significativamente le caratteristiche della superficie di frattura. In particolare, si osserva una tendenza verso superfici più irregolari e lucide. Questo fenomeno

può essere spiegato dal fatto che un maggior contenuto di fibre offre un supporto strutturale superiore e una distribuzione più omogenea delle forze applicate, rendendo più difficile la frattura del componente. Le superfici lucide osservate possono indicare un comportamento di frattura più duttile e meno fragile, suggerendo un maggiore assorbimento di energia durante il processo di frattura e la conseguente rottura della fibra. Questo implica che il materiale è in grado di dissipare energia in modo più efficiente, aumentando la sua capacità di resistere a carichi elevati.

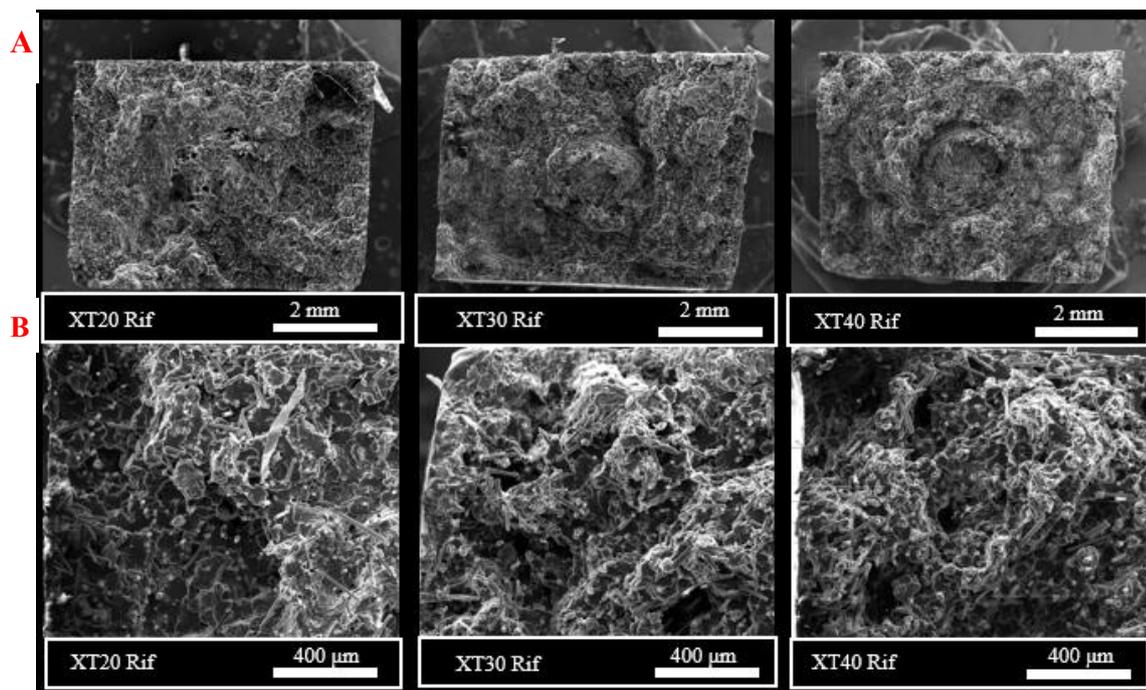


Figura 3.9. Superficie di frattura dei campioni single gate: (A) Vista principale; (B) Ingrandimento dell'angolo destro.

L'analisi delle immagini in Figura 3.10, che mostrano ingrandimenti dell'angolo della superficie di frattura, rivela che i componenti realizzati tramite la tecnica di stampaggio double gate presentano rotture localizzate lungo la weld line, identificata come zona di fragilità del componente. L'ingrandimento dell'angolo del provino evidenzia la separazione tra lo strato di pelle e il cuore del materiale. Lo strato più esterno del provino, definito pelle, è a contatto con le pareti delle cavità dello stampo e tende a solidificarsi per primo, congelando l'orientazione delle fibre in una configurazione perpendicolare al carico, come illustrato in Figura 3.10. Al cuore, a causa del leggero sbilanciamento nei canali caldi dello stampo, l'orientazione delle fibre è più randomica, specialmente nel provino in XT20. Un effetto simile è visibile nel provino realizzato con XT30, mentre nel provino in XT40 le fibre sono quasi esclusivamente parallele alla linea di giunzione su tutta la superficie di frattura. In Figura 3.10, si possono osservare le

fibre disposte parallelamente alla superficie. Inoltre, è visibile la presenza di debonding, ovvero la rottura della matrice lungo la direzione delle fibre. Questo fenomeno si manifesta perché il provino presenta un comportamento dominato dalla matrice (matrix-dominated), con la tensione che tende a concentrarsi lungo l'interfaccia di separazione tra fibra e matrice. Tale fenomeno si accentua con l'aumento della percentuale di fibra nella matrice, come mostrato in Figura 3.10 A e 3.10 B. Di conseguenza, la matrice, con una tensione di rottura inferiore, cede, portando alla rottura del campione. Dall'analisi condotta, si deduce che la rottura è stata causata principalmente dal cedimento della matrice, e che le fibre non hanno migliorato le prestazioni meccaniche del campione. Anzi, la loro presenza sembra aver compromesso ulteriormente le prestazioni, poiché l'aumento della percentuale di fibra ha portato a una maggiore concentrazione di stress lungo le interfacce, facilitando il cedimento della matrice.

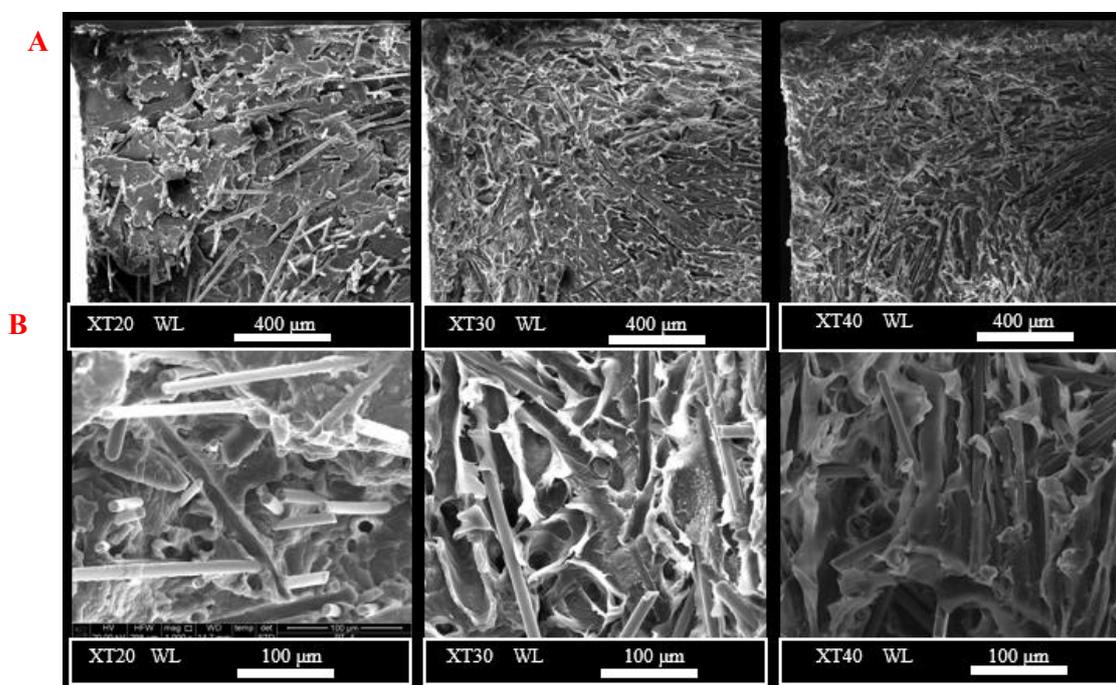


Figura 3.10. Superficie di frattura dei campioni double gate: (A) Vista principale; (B) Ingrandimento dell'angolo destro.

Per quanto riguarda le superfici di frattura dei campioni ottenuti con il processo GAPP, in Figura 3.11 vengono mostrati gli ingrandimenti della zona dell'angolo. È interessante osservare come lo sbilanciamento di flusso a seguito dell'iniezione del gas ha generato due zone, separate in Figura 3.11A da una linea di confine rossa. La zona a sinistra di tale linea chiamata pelle, ha le fibre disposte in modo randomico a causa dello scambio termico con la superficie della cavità che genera un congelato della direzione delle fibre. Invece, la zona a destra della linea rossa chiamata cuore, ha le fibre uscenti dalla superficie lungo la direzione

del carico. Gli ingrandimenti in Figura 3.11B rivelano che le fibre mostrano segni di rottura, evidenziati dalla loro lucentezza e dalla superficie di frattura rugosa. Da questa analisi, si può concludere che, a differenza del caso double gate, le fibre nel processo GAPP hanno effettivamente svolto una funzione di rinforzo. Questo giustifica anche i valori di forza a rottura riportati nel paragrafo 3.1.1. Confrontando il cuore dei campioni ottenuti tramite il processo double gate con quelli realizzati mediante il metodo GAPP, utilizzando lo stesso materiale, come illustrato in Figura 3.12, emergono differenze significative in termini di rugosità e lucentezza delle superfici. In Figura 3.12A, il processo double gate, a causa della mancanza di compenetrazione dei due fronti di flusso nella zona di giunzione, genera superfici di frattura piatte nel cuore del campione. Al contrario, come mostrato in Figura 3.12B, i campioni realizzati con la tecnica GAPP presentano superfici più irregolari. Questo effetto di irregolarità diventa più pronunciato con l'aumento della quantità di fibra, contribuendo a una maggiore resistenza strutturale e a una migliore distribuzione delle forze applicate. Di conseguenza, la frattura del componente risulta più difficile, evidenziando l'efficacia del processo GAPP nel migliorare le prestazioni meccaniche dei materiali compositi.

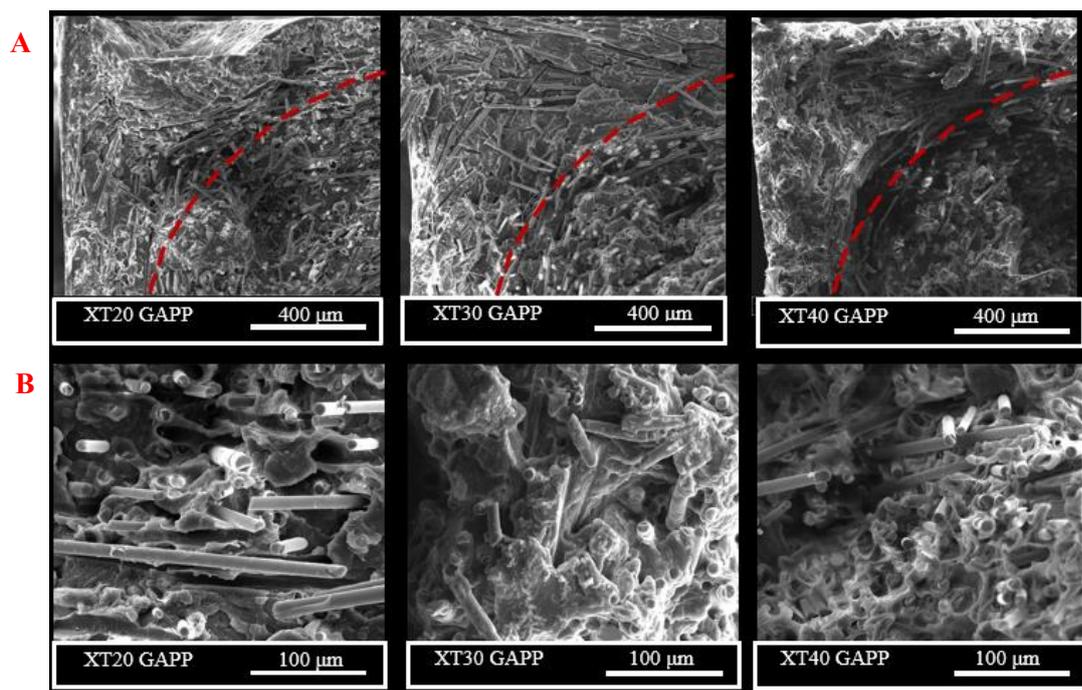


Figura 3.11. Superficie di frattura dei campioni GAPP: (A) Vista principale; (B) Ingrandimento dell'angolo destro.

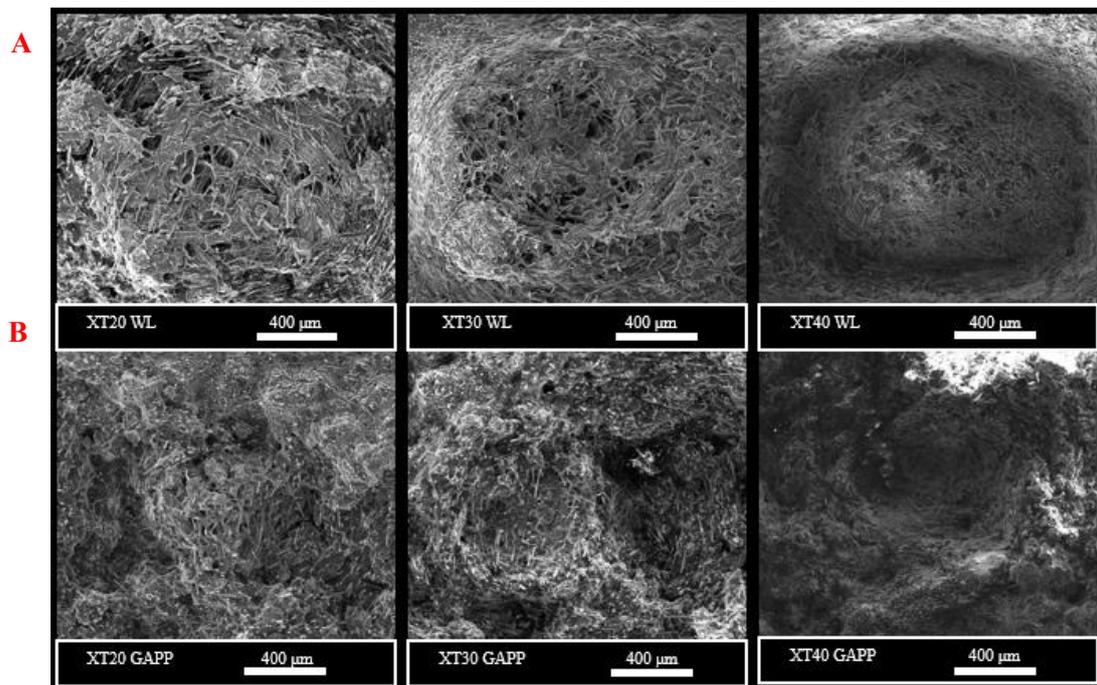


Figura 3.12. (A) Superficie di frattura dei campioni double gate con ingrandimento al cuore; **(B)** Superficie di frattura dei campioni GAPP con ingrandimento al cuore.

Analizzando la morfologia della superficie di frattura dei provini stampati in materiale riciclato caricato con il 40% di fibre di vetro GREEN40, come mostrato nella Figura 3.13, si ottiene una conferma dei risultati delle prove dinamometriche. Nella Figura 3.13, sono messe a confronto le superfici di frattura dell'XT40 e del GREEN40, evidenziando le differenze tra i provini con matrici diverse ma con la stessa percentuale di fibra.

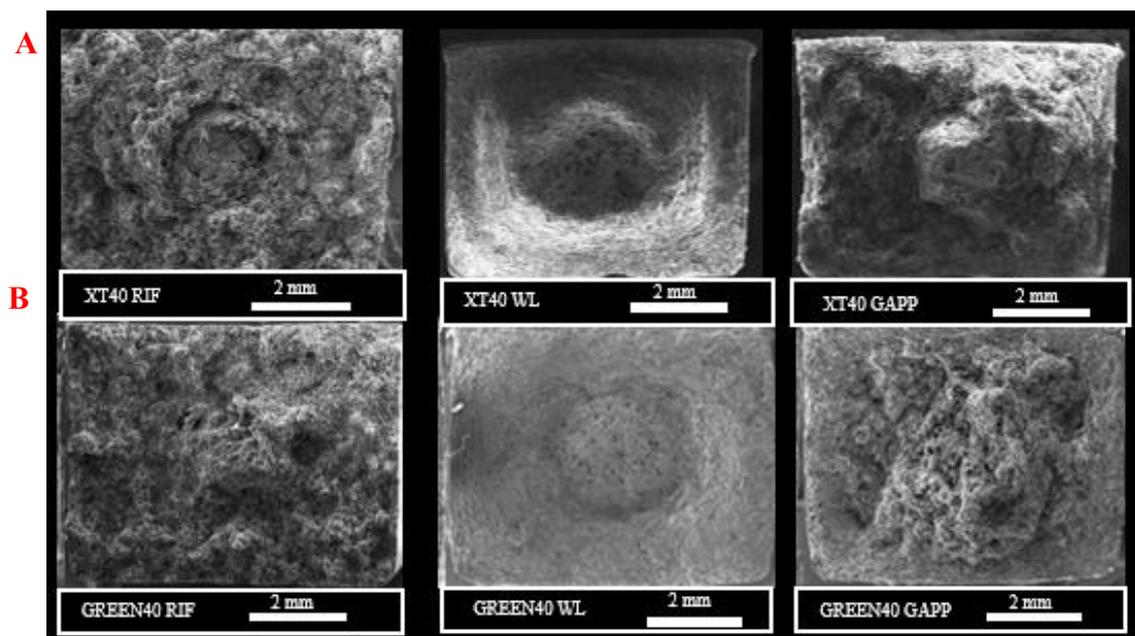


Figura 3.13. (A) Superficie di frattura dei campioni XT40 con le diverse tecniche di stampaggio **(B)** Superficie di frattura dei campioni GREEN40 con le diverse tecniche di stampaggio

Confrontando le superfici di frattura dei campioni di riferimento, si nota che entrambe presentano una superficie rugosa, indicativa di una buona diffusione della matrice e della sua plasticità, con numerose fibre rotte. Tuttavia, i campioni stampati con il GREEN40 mostrano segni di pull-out, evidenziando una scarsa adesione tra matrice e fibra. Questo fenomeno è attribuibile al processo di riciclaggio, che provoca una degradazione polimerica, rendendo il polimero più viscoso e compromettendo la bagnabilità delle fibre, riducendone l'adesione. Inoltre, la superficie di frattura del GREEN40 presenta piccole bolle nella regione centrale, causate da impurità nella matrice riciclata, che riducono la resistenza e la rigidità del materiale [3]. Questi effetti spiegano i risultati delle prove dinamometriche, evidenziando che il materiale riciclato risulta meno performante.

Le superfici di frattura dei componenti realizzati con il processo convenzionale presentano il difetto della weld line e risultano molto simili tra loro. Questo è un aspetto significativo, poiché indica che la scelta di un materiale più performante, come l'XT40, non comporta alcun beneficio strutturale. Entrambe le superfici appaiono piatte, suggerendo una scarsa adesione lungo la weld line e una rottura di tipo fragile. Pertanto, nonostante il GREEN40 sia un materiale di qualità inferiore, offre prestazioni e morfologia della superficie di frattura comparabili a quelle dell'XT40.

Il processo GAPP, grazie allo sbloccamento del flusso generato dall'iniezione del gas nella cavità, consente di riallineare le fibre e migliorare la diffusione lungo la superficie della weld line. Infatti, entrambe le superfici di frattura risultano abbastanza simili tra loro, presentando una superficie rugosa con fibre spezzate che fuoriescono dal piano di frattura. Queste caratteristiche morfologiche sono state riscontrate anche nei campioni di riferimento. In questo caso, l'utilizzo di un materiale più performante porta a benefici strutturali per il componente.

3.3 Simulazione del processo di stampaggio

Le simulazioni dei processi di stampaggio (single gate, double gate e GAPP) condotte per i campioni di tipo 1B e per il cooling fan realizzati con materiale XT30 hanno permesso di esaminare in dettaglio la distribuzione delle fibre attraverso lo spessore dei componenti. L'obiettivo principale era capire come le diverse tecniche di stampaggio influenzino la disposizione delle fibre e la morfologia della weld line. A tal fine, è stata utilizzata la funzione "Fiber orientation tensor: Probe XY plot" in Autodesk Moldflow Insight (AMI) 2023, focalizzandosi sulla weld line per visualizzare il tensore di orientazione delle fibre attraverso lo spessore dei componenti. In particolare, è stata analizzata la componente T_{yy} del tensore per il provino e la componente T_{xx} per il cooling fan, poiché il carico viene applicato lungo tale direzione. Le simulazioni hanno fornito risultati significativi sulla distribuzione delle fibre.

3.3.1 Simulazione per provino di tipo 1B

Le simulazioni di stampaggio condotte sui provini di tipo 1B hanno rivelato dettagli interessanti sulla distribuzione delle fibre, influenzata dalle diverse tecniche di stampaggio. Nel caso del processo double gate, come illustrato in Figura 3.12, si osserva una chiara tendenza delle fibre a disporsi perpendicolarmente alla direzione del carico. In particolare, un'analisi del fotogramma catturato a 2 secondi dall'inizio del processo, durante la fase di riempimento, mostra che le fibre nella zona della cresta del flusso a fontana presentano una distribuzione randomica, con un valore medio del tensore di orientazione pari a 0,45. Questo indica una disposizione inizialmente disordinata delle fibre. Tuttavia, quando i due flussi si incontrano, le fibre riorientano la loro orientazione, disponendosi perpendicolarmente alla direzione del carico, come evidenziato nei fotogrammi 4.1 e 6.1. In questa fase, il valore medio del tensore scende a 0,2, e quindi il componente DG presenta un'orientazione delle fibre ortogonale al carico nella di giunzione.

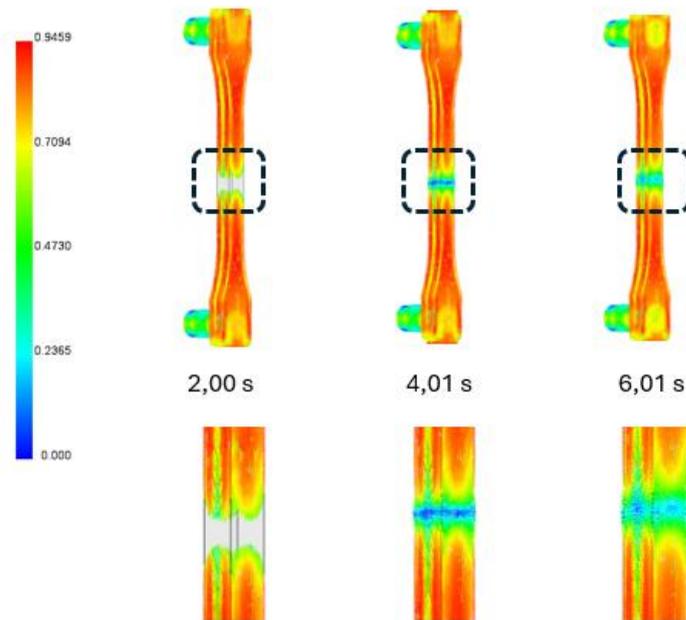


Figura 3.12. Tensore di distribuzione medio T_{yy} per i provini double gate.

Per quanto riguarda il processo GAPP, la Figura 3.13 mostra che l'orientazione media delle fibre vicino alla weld line varia significativamente, con valori che vanno da 0,3 a 0,7. Nel fotogramma a 2,45 secondi, che segna la transizione tra la fine del riempimento e l'inizio dell'iniezione del gas, il valore del tensore si attesta tra 0,3 e 0,4. Questo suggerisce un'orientazione delle fibre quasi perpendicolare alla direzione del carico al momento della formazione della linea di saldatura. Tuttavia, nei fotogrammi successivi, a 4,01 secondi (alla fine dell'iniezione del gas dal primo iniettore) e a 6,01 secondi (alla fine dell'iniezione del gas dal secondo iniettore), si osserva un cambiamento significativo. I valori del tensore aumentano tra 0,7 e 0,8, indicando che le fibre tendono a orientarsi quasi parallelamente al carico applicato in queste fasi. Questo fenomeno è attribuibile all'azione dinamica del gas iniettato attraverso gli iniettori. L'iniezione di gas crea uno sbilanciamento nel flusso del materiale, che a sua volta induce una riorientazione delle fibre. In pratica, la pressione generata dal gas sul materiale contenuto nei pozzetti genera uno sbilanciamento di flusso in corrispondenza della superficie della weld line, favorendo un riallineamento delle fibre. Questo effetto come abbiamo visto dalle prove dinamometriche non solo modifica l'orientazione delle fibre, ma influenza le proprietà meccaniche del componente, migliorandone le prestazioni.

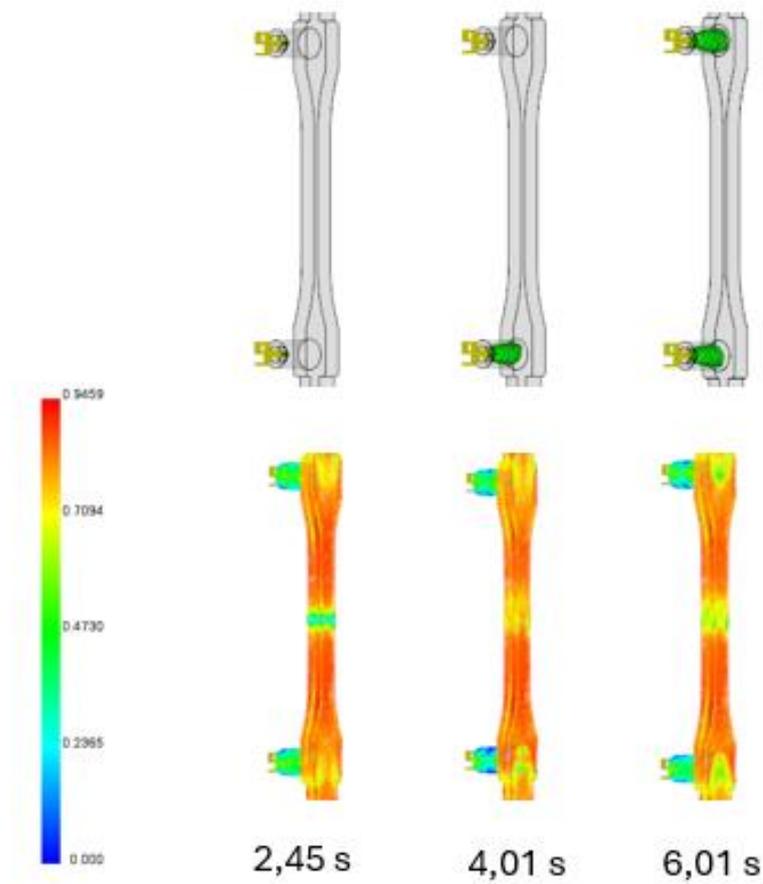


Figura 3.13. Tensore di distribuzione medio T_{yy} per i provini GAPP.

Il grafico del tensore di orientazione lungo l'asse y (T_{yy}) mostrato nelle figure 3.14 A e 3.14B evidenzia come le fibre si orientano attraverso lo spessore del provino double gate e nel provino GAPP. È particolarmente interessante notare che, nel cuore del provino, l'orientazione cambia significativamente, passando da un valore medio di 0.25 nel caso DF a 0.70 nel campione GAPP; questo indica che le fibre tendono ad allinearsi nella direzione del carico applicato a seguito dell'iniezione del gas. Al contrario, nella pelle del campione, corrispondente ai tratti iniziali e finali nel grafico, l'orientazione rimane costante. Questo fenomeno è attribuibile allo scambio termico tra il polimero e la cavità, che congela l'orientazione delle fibre al termine della fase di riempimento. Quindi l'applicazione del GAPP non riesce a modificare l'orientazione delle fibre in tutto il componente, come era stato osservato anche nelle foto al SEM. In conclusione, le simulazioni condotte risultano coerenti sia con le immagini ottenute al SEM e potrebbero essere usate per predire l'orientazione delle fibre in componenti strutturali

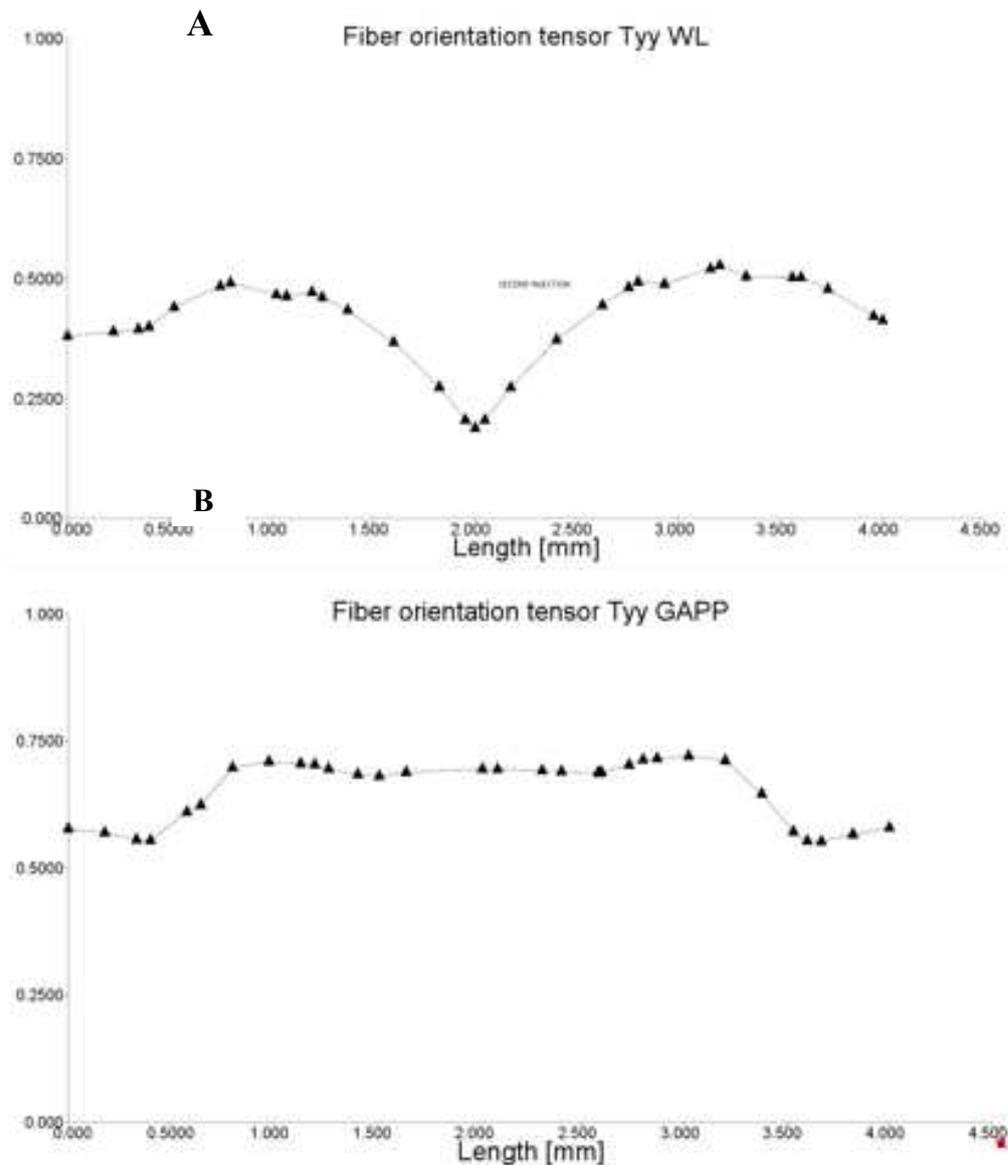


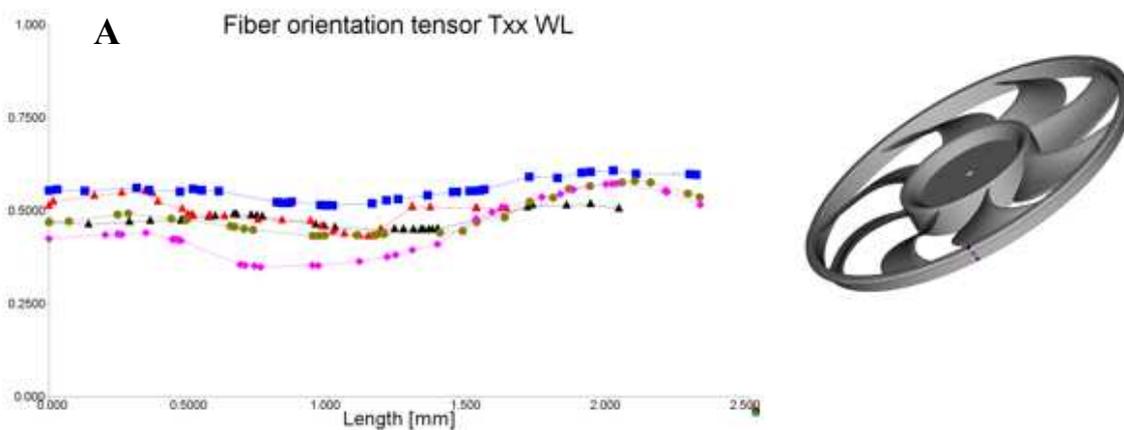
Figura 3.14. Plot del tensore di orientazione delle fibre Tyy attraverso lo spessore dei provini: (A) double gate, (B) GAPP.

3.3.2 Simulazione colling fan

La simulazione del processo di stampaggio effettuata per il cooling fan ha messo in evidenza aspetti molto importanti relativi all'applicazione del processo di stampaggio convenzionale e GAPP. Le geometrie complesse, come quella di un cooling fan, sono influenzate da diversi fattori che possono condizionare il processo di stampaggio. Per questo motivo, è stata fondamentale la realizzazione di analisi e simulazioni preliminari prima di procedere con l'inserimento dei pozzetti di accumulo. Queste fasi di studio hanno permesso di comprendere

come tali geometrie possano impattare sul processo di stampaggio, garantendo così un risultato finale di maggiore qualità e precisione.

Per il colling fan è stato necessario condurre delle simulazioni preliminari, con geometria della parte modificata come descritto nel paragrafo 2.5.2, per determinare la configurazione ottimale dei pozzetti di accumulo. In quanto, essendo la geometria del fan molto grande essendo, la mobilitazione del materiale è minore e quindi servono pozzetti molto più grandi rispetto al caso del provino che alterano la distribuzione del flusso in cavità. Per tale motivo, il collegamento delle appendici secondarie, ovvero i pozzetti di accumulo, alla cavità principale provoca il fenomeno d'inflow [14]. Questo fenomeno genera un gradiente di pressione tra la cavità principale e le appendici secondarie, il quale varia in base alla geometria di queste ultime. Di conseguenza, si verifica uno spostamento e una variazione nella forma della weld line, che influiscono sull'orientamento delle fibre nel materiale. Nella Figura 3.15 è possibile osservare come l'orientamento delle fibre cambi con la variazione della geometria, mantenendo costanti i parametri di processo, a causa del fenomeno dell'inflow. In particolare, è interessante notare che il semplice posizionamento dei pozzetti causa il fenomeno dell'esitazione, generando una differenza di pressione e quindi uno sbilanciamento dei fronti di flusso. Questo consente di ottenere un'orientazione al cuore più favorevole rispetto al cooling fan privo di pozzetti. Infine, è stata selezionata la configurazione mostrata in Figura 3.15 C, con i pozzetti di accumulo inclinati rispetto alla weld line. Questa configurazione ha dimostrato un andamento del tensore di orientazione lungo l'asse x (T_{xx}) migliore, con un valore medio di 0.6, come evidenziato in Figura 3.15 C. Al contrario, la configurazione con pozzetti perpendicolari presenta un'oscillazione maggiore del tensore T_{xx} , come si osserva in Figura 3.15 A.



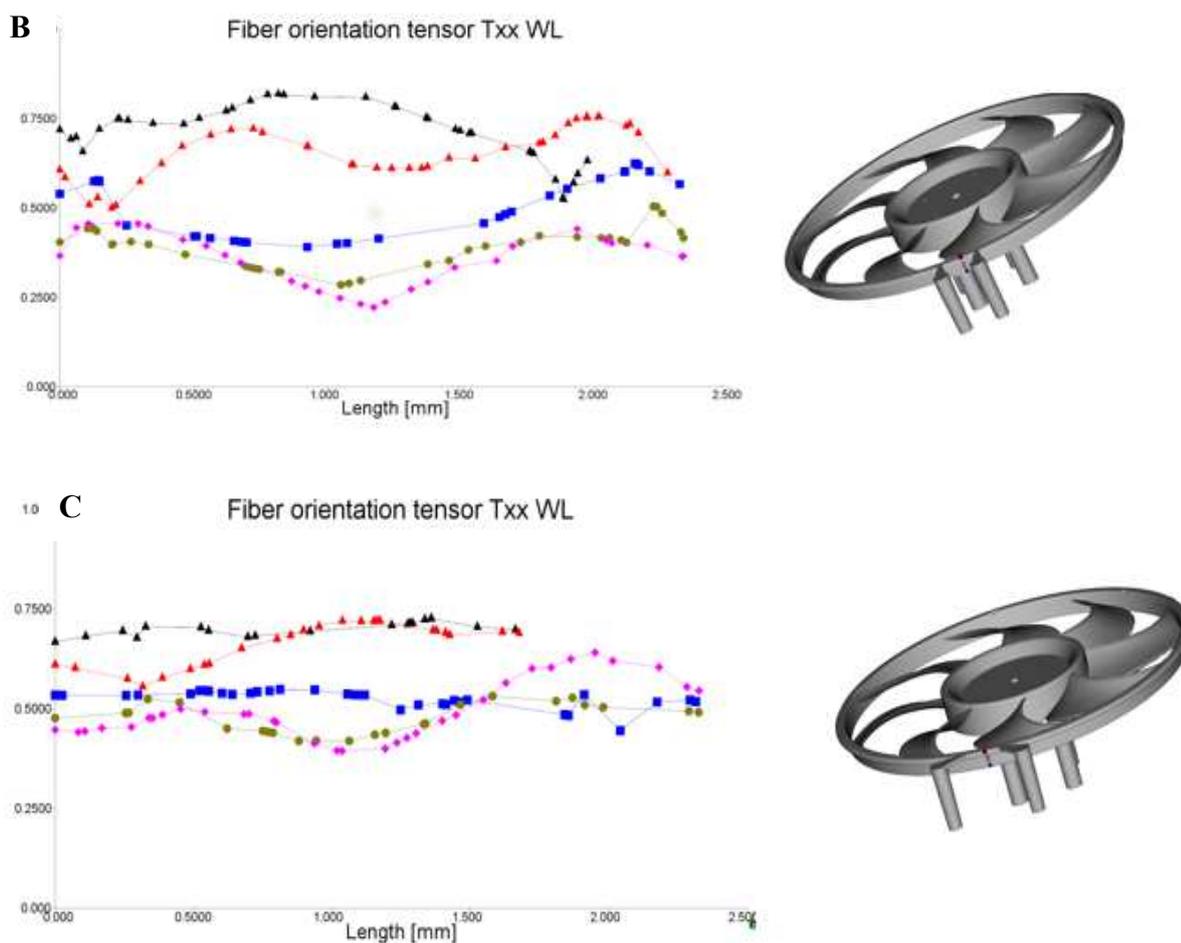


Figura 3.15. Plot del tensore di orientazione attraverso lo spessore del provino al variare della geometria (A) Priva di pozzetti, (B) Pozzetti perpendicolari, (C) Pozzetti inclinati.

Definita la geometria dei pozzetti, è stato simulato il processo GAPP per la parte. In Figura 3.16 si vede come le fibre in corrispondenza della weld line cambiano orientazione dopo l'iniezione del gas. Al frame 4.5s e 6.5s fine iniezione del gas dal primo e dal secondo iniettore in corrispondenza della zona della weld line ha un valore medio di 0.75; quindi, le fibre sono in prevalenza orientate lungo l'asse x, contrariamente al frame 3.75s in cui si ha un valore medio di 0.45 che indica una direzione tendente alla perpendicolarità. È stata utilizzata la funzione "Fiber orientation tensor: Probe XY plot" di Moldflow, mediante la quale sono stati analizzati cinque punti lungo la linea di saldatura per esaminare l'orientamento delle fibre attraverso lo spessore del materiale. I risultati, riportati nella Figura 3.17, mostrano che al cuore della sezione si ottiene un valore medio di 0.75 per il GAPP, mentre nel processo con doppio gate il valore era di 0.5. Inoltre, dai grafici in Figura si evince che l'allineamento delle fibre è stato ottenuto non solo nella zona del cuore, ma anche in corrispondenza della pelle. Ciò suggerisce che il processo adottato consente una riduzione dello spessore dello strato di pelle rispetto a quanto

osservato nel caso del doppio gate. I risultati ottenuti dalla simulazione numerica potrebbero risultare più affidabili rispetto a quelli derivati dalla simulazione dei provini. Sebbene la geometria dei provini sia molto più semplice rispetto a quella del fan, quest'ultimo presenta una geometria complessa con pareti sottili, mentre i provini sono più spessi. Questa differenza influisce sui risultati delle simulazioni, poiché Moldflow ha difficoltà a stimare l'orientazione delle fibre al cuore quando i componenti hanno pareti spesse. Pertanto, nel caso del fan, i risultati potrebbero essere considerati più attendibili [29].

La simulazione numerica del processo di stampaggio GAPP è stata condotta solo su una porzione del fan, poiché la geometria considerata era simmetrica. Tuttavia, i pozzetti dovrebbero essere collegati in corrispondenza di tutte le posizioni in cui si formano anche le altre linee di saldatura, il che rende l'intervento sullo stampo piuttosto complesso. Inoltre, i fan reali presentano pale asimmetriche per ridurre la risonanza e le vibrazioni durante il funzionamento, il che implica che la formazione delle linee di saldatura non sarebbe simmetrica. Pertanto, è fondamentale eseguire una simulazione del processo per identificare le aree in cui posizionare i pozzetti, al fine di garantire un'applicazione pratica efficace.

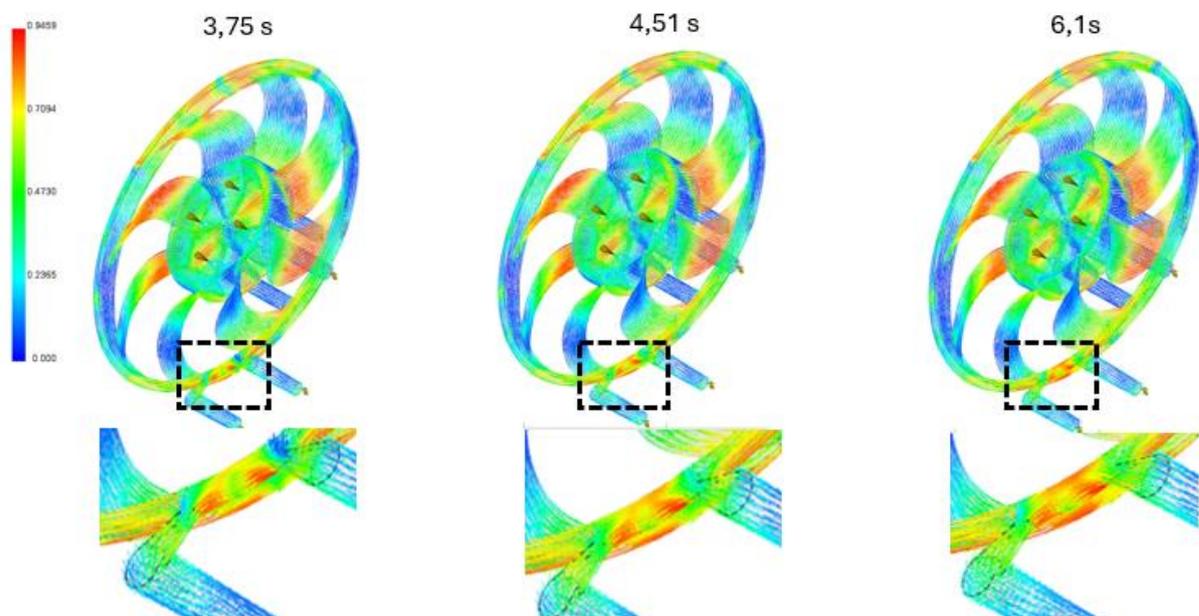


Figura 3.16. Tensore orientazione delle fibre medio a diversi fotogrammi.

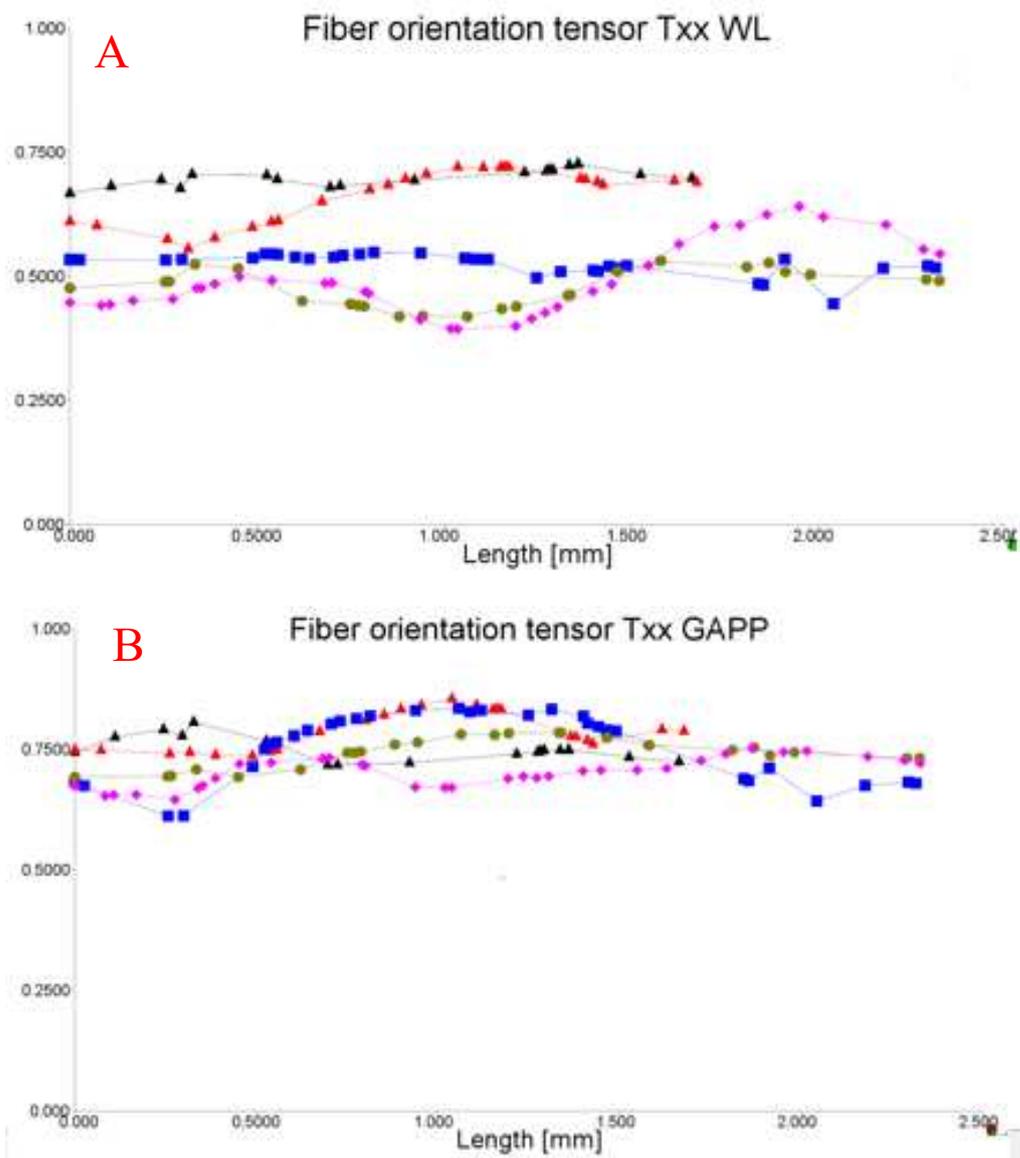


Figura 3.17. Plot del tensore di orientazione delle fibre Txx attraverso lo spessore del provino al variare del processo: **(A)** Double gate, **(B)** GAPP.

3.4 Risultati analisi FEM

I risultati ottenuti dall'analisi FEM condotta su Ansys e Helius offrono informazioni significative sulla dinamica dei processi e sul loro impatto sulle prestazioni meccaniche del componente, in particolare riguardo alle proprietà strutturali della parte. Di seguito verranno elencati e analizzati i risultati, iniziando dai valori dei campioni che presentano il difetto della weld line e successivamente quelli del GAPP.

È importante notare che non è stato possibile determinare con precisione il valore della forza e della tensione a rottura dei campioni, poiché impostando una simulazione con cedimento degli elementi, la simulazione tende a divergere appena la matrice inizia a cedere. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito a un'errata caratterizzazione del materiale in Autodesk Moldflow, oltre al fatto che Moldflow ha difficoltà a simulare correttamente l'orientazione delle fibre al cuore quando i componenti hanno uno spessore elevato [28].

In Figura 3.18, è rappresentato il fattore di saldatura (weld line factor). Si osserva che il valore è pari a 1 in tutto il componente, mentre si riduce a 0.9 in corrispondenza della weld line. Questo grafico consente di verificare che la simulazione sia stata eseguita correttamente e che il valore di 0.9 sia stato applicato in modo appropriato nella zona della weld line. Ciò implica che i valori saranno sottostimati del 10% per tenere conto dell'influenza della weld line sulle prestazioni del componente.

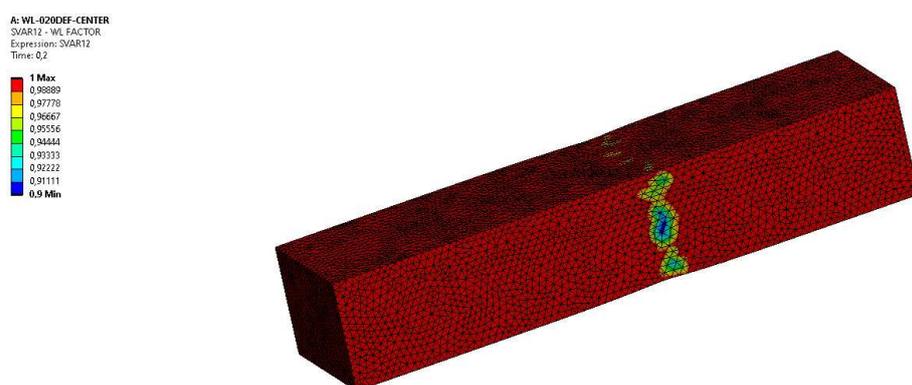


Figura 3.18. Grafico weld line factor per il provino con weld line.

Successivamente, è stato identificato il punto esatto in cui la matrice inizia a cedere, utilizzando questo valore come riferimento per calcolare la forza di rottura, la tensione e la deformazione. La Figura 3.19 A mostra che la matrice inizia a cedere in corrispondenza della weld line; ora è necessario determinare l'istante in cui si verifica la cricca. Il grafico in Figura 3.19 B illustra la storia del cedimento della matrice in funzione del tempo. È stato preso come

riferimento l'istante in cui il valore raggiunge 1, il quale indica l'inizio del cedimento della matrice. Filtrando i risultati, si è constatato che dopo 0.07 mm di deformazione la matrice inizia a cedere.

Analizzando le superfici iso presentate in Figura 3.20, si evidenzia che il cedimento ha inizio nel cuore del provino. Tuttavia, questa osservazione non è coerente con i risultati sperimentali. Infatti, dall'analisi delle superfici di frattura emerge che la cricca si innesca inizialmente nella pelle del provino e poi si propaga nel componente, come visto dai risultati ricavati al SEM. Qui, la superficie vicina alla pelle mostra una rottura di tipo plastico, mentre la superficie speculare presenta una rottura fragile. Questa discrepanza tra i dati sperimentali e quelli teorici è attribuibile al fatto che Moldflow non riesce a simulare correttamente l'orientamento delle fibre nel cuore per componenti spessi. Tale considerazione diventerà ancora più evidente nell'analisi successiva dei risultati del GAPP. Nonostante questa differenza, si è comunque considerato come riferimento l'istante in cui inizia a cedere la matrice al cuore, poiché fornisce un dato oggettivo.

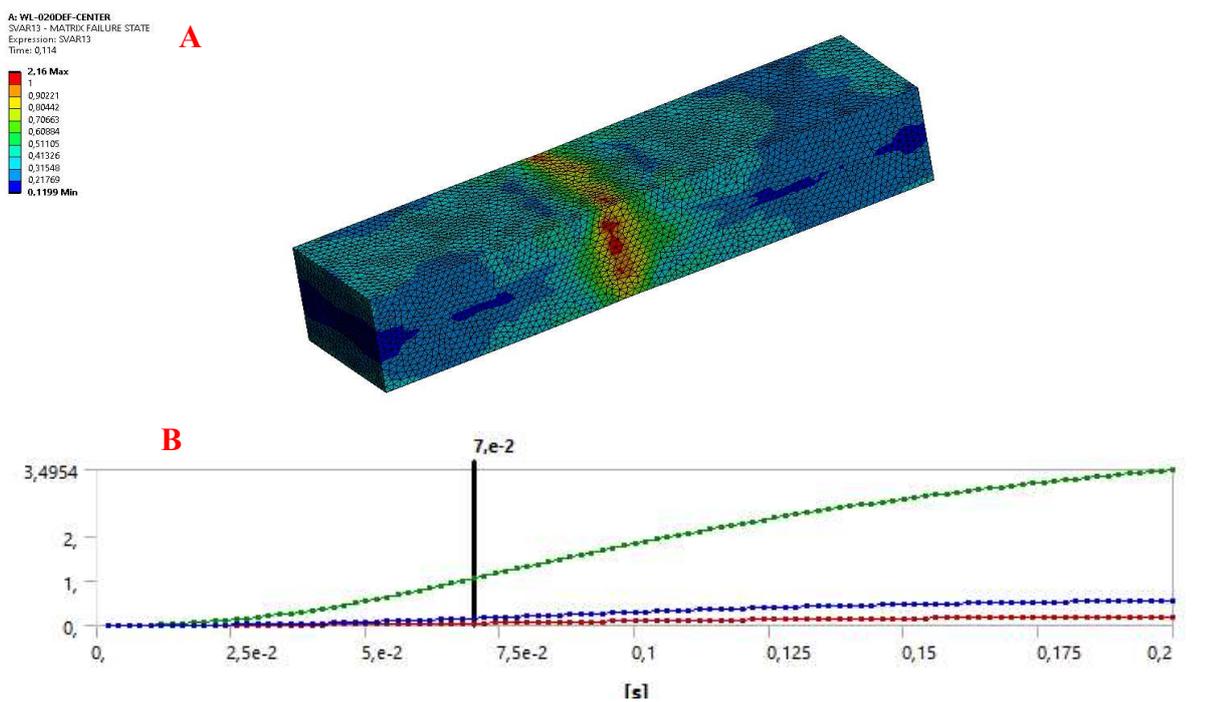


Figura 3.19. (A) Cedimento della matrice concentrato nell'intorno della weld line; (B) andamento del cedimento della matrice in funzione del tempo

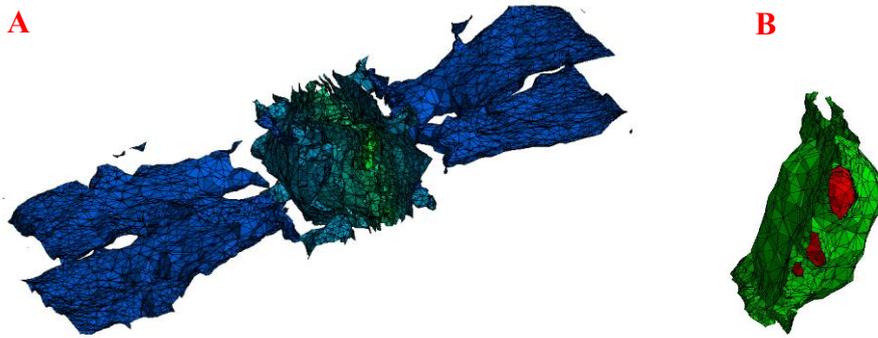


Figura 3.20. (A) geometria iso a 0.07 s; (B) superfici iso a 0.07 s, in rosso le superfici con valore pari a 1 al cuore.

Definito l'istante in cui la matrice inizia a cedere, ovvero a 0.07 s, è stato ricavato il valore della forza di rottura dal grafico in Figura 3.21. Il valore della forza a 0.07 s è pari a 527 N. Questo valore risulta inferiore rispetto a quello ricavato sperimentalmente, che è di 755.18 N. Tale differenza è attribuibile alle considerazioni precedenti riguardo alle difficoltà di Moldflow nel simulare correttamente l'orientamento delle fibre nel cuore del componente.

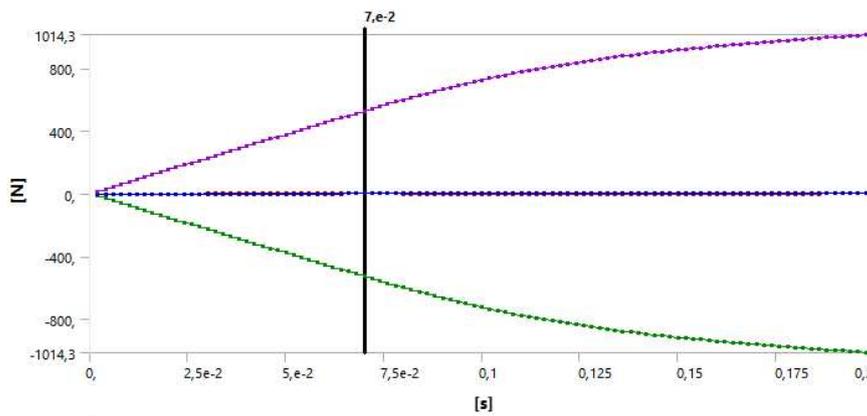


Figura 3.21. plot della forza in funzione del tempo, evidenziando il valore della forza a 0.07 s.

In Figura 3.22, è possibile osservare la concentrazione delle tensioni sul componente a 0.07 s. È interessante notare come la distribuzione della tensione non sia uniforme a causa dell'anisotropia del componente, con valori elevati di concentrazione di tensione nelle vicinanze della weld line.

A: WL-020DEF-CENTER
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 0.2

69.419 Max
65.274
61.129
56.984
52.839
48.694
44.549
40.404
36.259
32.114 Min

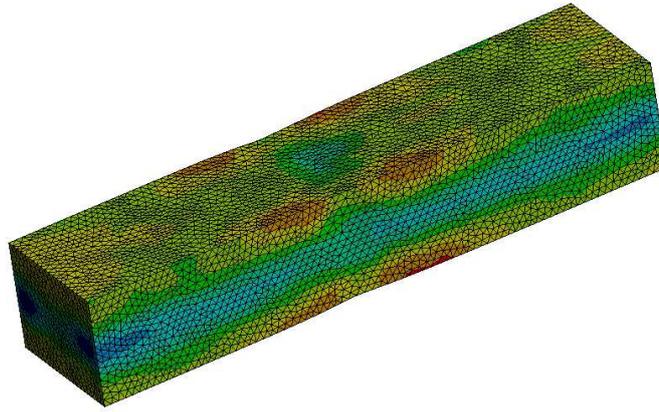


Figura 3.22. distribuzione della tensione sul componente a 0.07s

La deformazione del componente a 0.07 s, mostrata in Figura 3.23, evidenzia una concentrazione in corrispondenza della zona della weld line. Questo indica che il cedimento e, di conseguenza, la cricca si innescano proprio in questa area. Si sottolinea quindi come questa rappresenti una criticità per il componente. Inoltre, nella Figura 3.24 è illustrato lo spostamento del componente a 0.07 s.. È interessante osservare come la zona centrale del provino presenti una strizione, indicando che questa area rappresenta una zona fragile del componente.

A: WL-020DEF-CENTER
 Maximum Principal Elastic Strain
 Type: Maximum Principal Elastic Strain
 Unit: mm/mm
 Time: 7.e-002

0.0069817 Max
0.0064568
0.005932
0.0054071
0.0048823
0.0043574
0.0038326
0.0033077
0.0027828
0.002258 Min

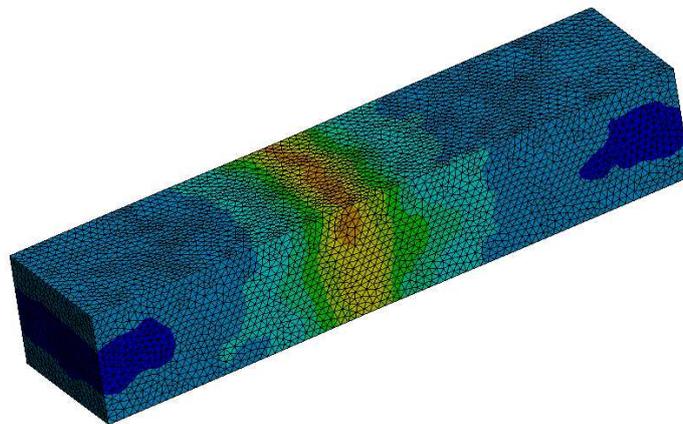


Figura3.23. deformazione del componente a 0.07s

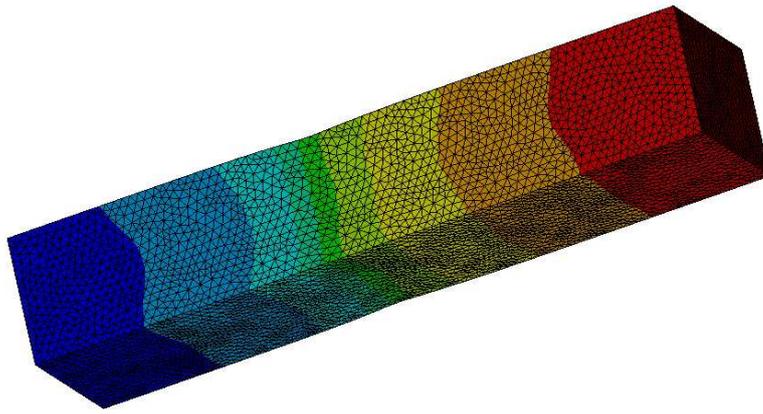


Figura 3.24. spostamento che subisce il componente con weld line a 0.07 s

Per quanto riguarda i campioni simulati con il processo di stampaggio GAPP, la Figura 3.25 mostra l'andamento del weld line factor. La zona delle weld line presenta un valore di 0.9, considerando una penalizzazione del 10% dovuta alla presenza della weld line. Questo approccio consente di confrontare i risultati con le analisi condotte sul provino ottenuto tramite lo stampaggio convenzionale a doppio gate. In questo modo, è possibile valutare se il processo GAPP rappresenti un miglioramento e se aumenti le prestazioni strutturali.

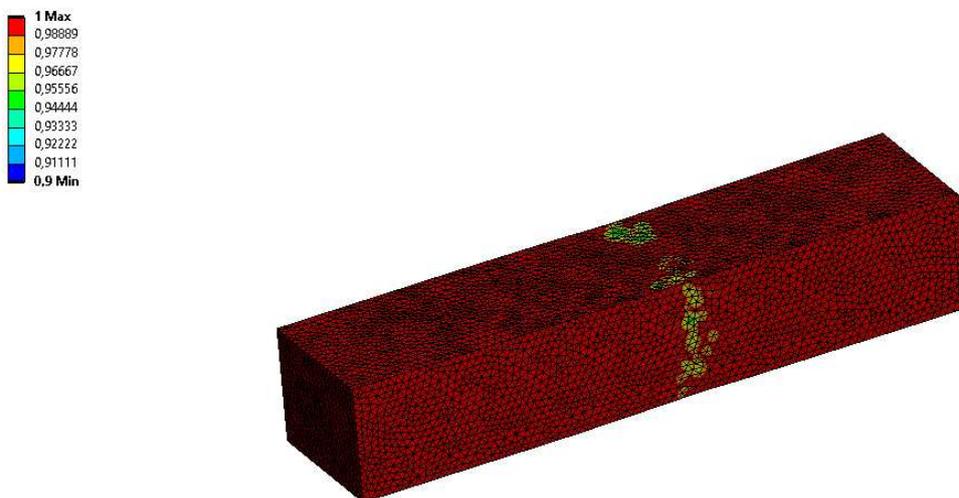


Figura 3.25. grafico weld line factor per il provino GAPP.

Dal plot in Figura 3.26, è stato individuato l'istante in cui la matrice inizia a cedere, corrispondente a un valore pari a 1. Questo valore si raggiunge a 0.13 s, indicando che la cricca si innesca dopo 0.13 mm di deformazione. Analizzando le superfici iso per comprendere il

punto di innesco della cricca, si osserva in Figura 3.27 che la matrice inizia a cedere nel cuore del provino. Come menzionato in precedenza, questo fenomeno è attribuibile alle difficoltà di Moldflow nel simulare correttamente l'orientamento delle fibre in componenti spessi. Infatti, dalle immagini ottenute al SEM della superficie di frattura dei componenti XT30, si può notare che le fibre nel cuore hanno una direzione che esce dalla superficie di frattura, confermando così le difficoltà di Moldflow nel rappresentare l'orientamento delle fibre nel cuore del provino.

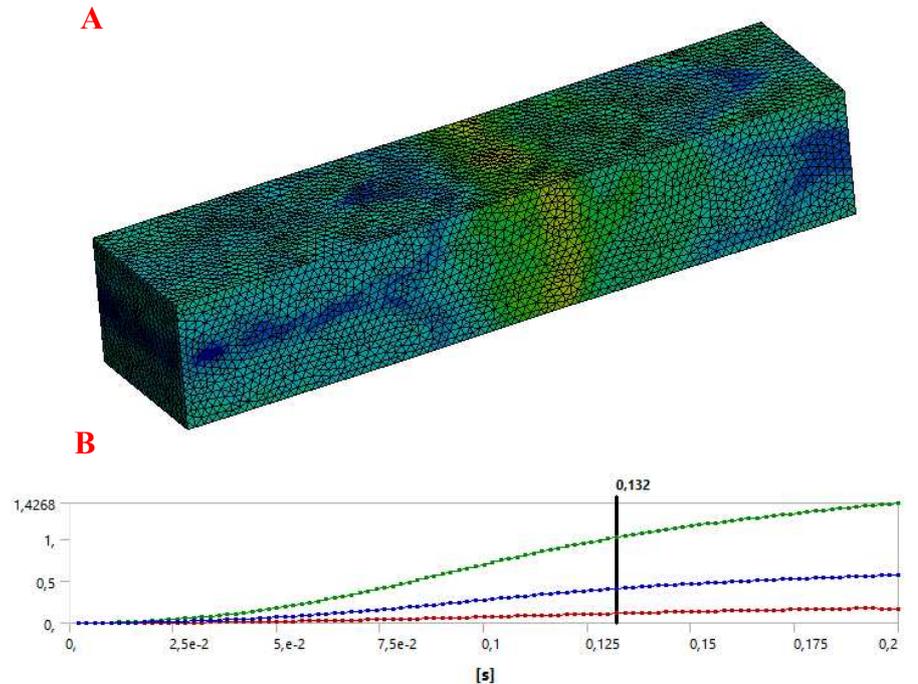


Figura 3.26. (A) cedimento della matrice concentrato nell'intorno della weld line a 0.13 s; (B) plot dell'andamento del cedimento della matrice in funzione del tempo

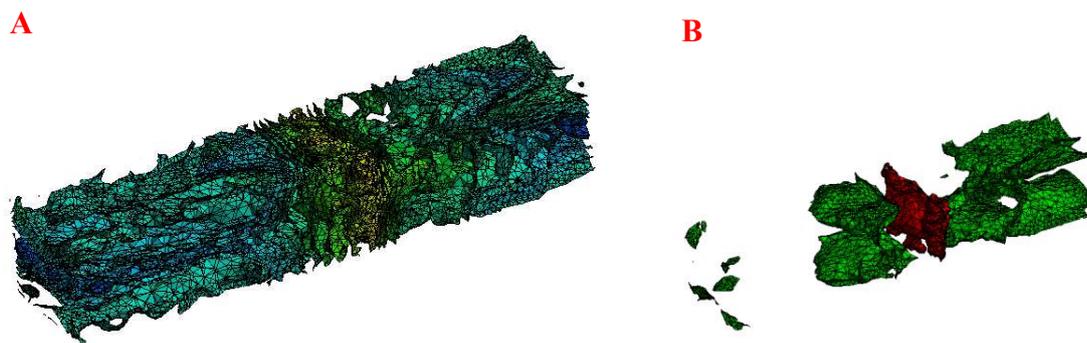


Figura 3.27. (A) geometria iso a 0.13 s; (B) superfici iso a 0.13 s, in rosso le superfici con valore pari a 1 al cuore.

Dopo aver determinato l'istante in cui la cricca si propaga, è stato calcolato il valore della forza di rottura a 0.13 s, come mostrato nel plot in Figura 3.28. Questo valore è pari a 870 N, significativamente inferiore rispetto al valore sperimentale di 1633.7 N. È interessante notare

in Figura 3.29 come la distribuzione della tensione sia più uniforme sul provino, grazie all'allineamento delle fibre lungo la direzione di carico. Si osserva una notevole differenza rispetto al processo dual-gate, dove si registrava un'elevata concentrazione di tensione in corrispondenza della weld line. Questo porta a una deformazione più uniforme nella zona della weld line, come evidenziato in Figura 2.30.

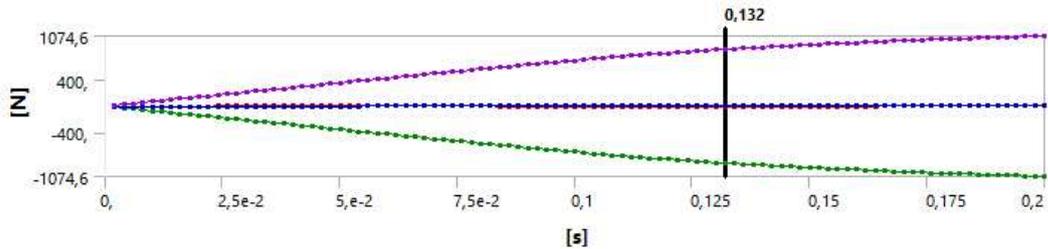


Figura 3.28. Plot della forza in funzione del tempo, evidenziando il valore della forza a 0.13 s.

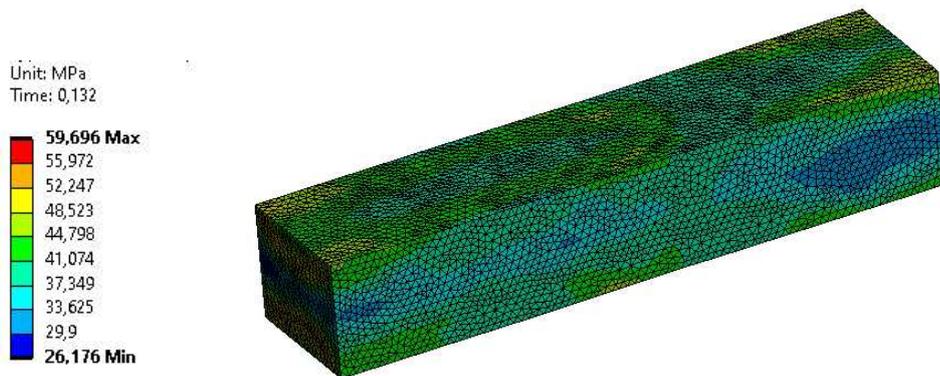


Figura3.29. distribuzione della tensione sul componente a 0.13s

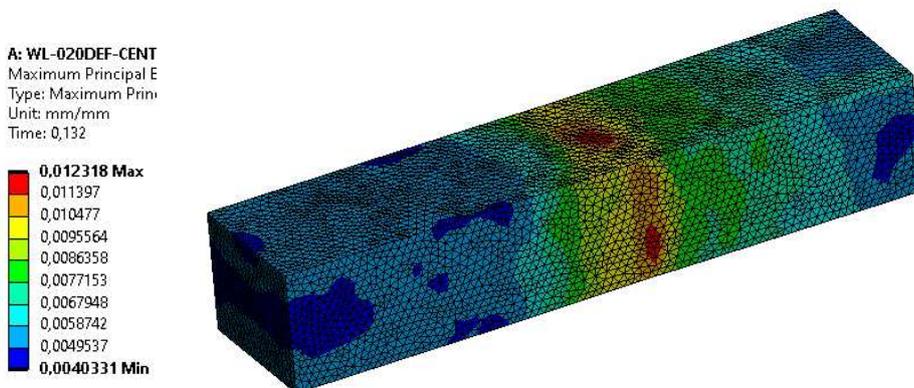


Figura3.30. deformazione sul componente a 0.13s

Nella Figura 3.131 è rappresentato lo spostamento del componente ottenuto attraverso il processo di simulazione GAPP. Si osserva che la zona centrale del provino presenta una minore tendenza a strizzarsi rispetto al campione con il difetto della weld line. Questo fenomeno è attribuibile allo sbilanciamento di flusso, che non solo riorienta le fibre in corrispondenza della superficie di separazione, ma migliora anche la diffusione della matrice, ristabilendo la continuità della stessa. In questo modo, la matrice è in grado di distribuire meglio il carico alle fibre, mentre le fibre, orientate prevalentemente lungo la direzione del carico, riducono le concentrazioni di tensione e deformazione localizzate lungo la superficie delle weld line.

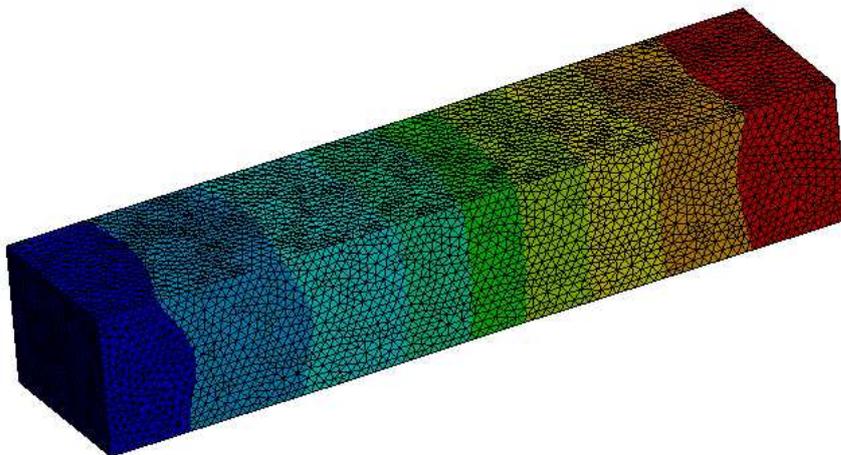


Figura3.31. spostamento che subisce il componente GAPP a 0.13 s

Dal confronto tra i risultati delle due simulazioni, si evidenzia che l'istante in cui la cricca inizia a propagarsi, ossia il momento di cedimento della matrice, è aumentato rispetto ai provini simulati con il processo di stampaggio convenzionale. In particolare, il tempo è passato da **0.07 s** a **0.13 s**, indicando che il processo GAPP offre un miglioramento strutturale per il provino. Infatti, i valori della forza di rottura, della tensione di rottura e della deformazione risultano superiori. Questo effetto è attribuibile al fatto che il componente simulato con il processo GAPP presenta le fibre orientate lungo la direzione del carico, il che consente di ridurre la concentrazione di tensione e deformazione. Di conseguenza, il componente riesce a resistere in modo più efficace alle cariche applicate.

Nonostante non si sia ottenuto un riscontro diretto tra i dati sperimentali e quelli simulati a causa delle limitazioni del software, si può comunque concludere che il processo di stampaggio GAPP, grazie allo sbilanciamento del flusso che genera un riorientamento delle fibre e un'interdiffusione della matrice in corrispondenza della weld line, risulta migliorativo

rispetto al processo convenzionale a doppio gate. In tal modo, si riesce a ridurre l'influenza dell'effetto della weld line su componete.

4 Conclusione

In questo studio, sono stati stampati ad iniezione provini di tipo 1B in polipropilene rinforzato con fibre di vetro al 20%, 30% e 40%, utilizzando tre processi di stampaggio: single gate, double gate e Gas-Assisted Push-Pull (GAPP). L'obiettivo era confrontare le prestazioni meccaniche dei diversi campioni ottenuti con i vari processi, analizzando l'impatto della weld line sulle loro proprietà meccaniche in relazione alla percentuale e all'orientazione di fibra e al tipo di processo utilizzato. In particolare, si è voluto capire se il processo GAPP potesse offrire un miglioramento rispetto al convenzionale double gate.

Il confronto dei risultati delle prove di trazione ha rivelato che i campioni senza weld line (single gate) presentano una forza a rottura significativamente superiore rispetto a quelli con weld line (double gate). Si è osservata una diminuzione quasi lineare della forza a rottura dei campioni con weld line all'aumentare della percentuale di fibra di vetro nella matrice polimerica: una riduzione del 35% per XT20, del 63% per XT30 e del 65% per XT40 rispetto ai campioni privi di difetti. Per quanto riguarda il modulo elastico, i campioni con weld line mostrano una diminuzione rispetto a quelli senza difetti (single gate), con una riduzione dell'8% per XT20, del 23% per XT30 e del 17% per XT40. Tuttavia, a differenza della forza a rottura, il modulo elastico tende ad aumentare con l'aumentare della percentuale di fibra nella matrice. Questo suggerisce che l'orientazione delle fibre ha un'influenza limitata sul modulo elastico, il quale sembra dipendere maggiormente dall'interdiffusione e continuità della matrice.

Dal confronto dei risultati delle prove dinamometriche, è emerso che i campioni stampati con il processo GAPP mostrano un recupero significativo delle prestazioni meccaniche rispetto a quelli ottenuti con il processo convenzionale double gate. In particolare, la forza a rottura aumenta del 28% per XT20, del 42% per XT30 e del 51% per XT40, avvicinandosi ai valori dei componenti privi di weld line. Anche il modulo elastico presenta un incremento rispetto ai campioni con weld line, con un aumento dell'8% per XT20, dell'11% per XT30 e del 16% per XT40, raggiungendo valori comparabili a quelli dei campioni senza difetti. Questi risultati evidenziano l'efficacia del processo GAPP nel migliorare le prestazioni meccaniche e nel ripristinare l'integrità strutturale del componente.

I risultati ottenuti dalle prove dinamometriche trovano ulteriore conferma nell'analisi delle superfici di frattura, eseguita tramite microscopia elettronica a scansione (SEM). Le superfici dei campioni realizzati con il processo di stampaggio GAPP mostrano fratture irregolari, con fibre esposte allineate lungo la direzione del carico. Questo comportamento indica che le fibre hanno efficacemente assorbito il carico applicato, suggerendo che la rottura

del componente sia avvenuta a causa del cedimento delle fibre stesse. La morfologia della superficie di frattura in questo caso risulta simile a quella dei campioni privi di difetti, evidenziando l'efficacia del rinforzo. Al contrario, la morfologia della superficie di frattura dei componenti ottenuti con il processo double gate presenta una superficie piatta e lucida, con le fibre disposte parallelamente al carico applicato e segni di debonding. Questo suggerisce che la rottura sia avvenuta principalmente a causa del cedimento della matrice, dimostrando che le fibre non hanno svolto adeguatamente la loro funzione di rinforzo. Questi fattori giustificano i risultati dinamometrici ottenuti, evidenziando l'importanza del processo di stampaggio.

Le simulazioni numeriche condotte hanno ulteriormente chiarito come il processo influenzi la disposizione delle fibre. In particolare, lo sbilanciamento dinamico del flusso generato dall'iniezione del gas consente di riallineare le fibre e migliorare la diffusione della matrice in corrispondenza della weld line. Le simulazioni effettuate sul cooling fan confermano che il processo di stampaggio GAPP comporta benefici tangibili anche per componenti reali con geometria complessa, suggerendo un miglioramento nelle prestazioni meccaniche. Inoltre, si osserva che Moldflow riesce a simulare in modo più efficace l'orientazione delle fibre, poiché il componente in esame, pur avendo una geometria complessa, è a parete sottile, a differenza dei provini che presentano uno spessore maggiore.

Le analisi FEM condotte con Ansys confermano che il processo di stampaggio GAPP permette di ottenere valori di forza di rottura, tensione e deformazione superiori rispetto al processo di stampaggio convenzionale. Tuttavia, non è stato possibile avere un riscontro diretto con i dati sperimentali a causa delle limitazioni di Moldflow nella simulazione corretta dell'orientamento delle fibre nel cuore di componenti spessi.

In conclusione, l'analisi condotta dimostra che il processo di stampaggio Gas-Assisted Push-Pull risolve efficacemente i problemi strutturali associati alla presenza della weld line. Questo approccio porta a un recupero delle prestazioni meccaniche grazie a un riallineamento delle fibre lungo la direzione del carico e a una migliore interdizione della matrice

5 Bibliografia

- [1] T. A. Osswald e G. Menges, «Material Science of Polymers for Engineers», in *Material Science of Polymers for Engineers (Third Edition)*, T. A. Osswald e G. Menges, A c. di, Hanser, 2012, p. I–XIX. doi: 10.3139/9781569905241.fm.
- [2] A. Bortoletto, E. Bovo, M. Sorgato, e G. Lucchetta, «Enhancing properties and manufacturability of post-consumer recycled polypropylene via gas counter-pressure injection molding», *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 40, p. e00897, lug. 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00897.
- [3] N. Bahlouli *et al.*, «Recycling effects on the rheological and thermomechanical properties of polypropylene-based composites», *Mater. Des.*, vol. 33, pp. 451–458, gen. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.049.
- [4] Tim A. Osswald Juan P. Hernández-Ortiz Hanser Publishers, Munich • H, *Polymer Processing* -.
- [5] D. V. Rosato e M. G. Rosato, *Injection molding handbook*. Springer Science & Business Media, 2012. Consultato: 17 marzo 2024. [Online]. Disponibile su: <https://books.google.com/books?hl=it&lr=&id=4VHxBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=injection+molding&ots=5KsRdlux7O&sig=5eg99u1hQychDCGrERyrXjpTQKw>
- [6] «What is Injection Moulding, its applications and materials», Engineering Product Design. Consultato: 17 marzo 2024. [Online]. Disponibile su: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/injection-moulding/>
- [7] M. Etcheverry e S. E. Barbosa, «Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement», *Materials*, vol. 5, fasc. 6, pp. 1084–1113, 2012.
- [8] E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, S. Sulaiman, e M. Ahmad, «Fiber orientation of short fiber reinforced injection molded thermoplastic composites: A review», *J. Inject. Molding Technol.*, vol. 6, fasc. 1, pp. 1–10, 2002.
- [9] M. Gupta e K. K. Wang, «Fiber orientation and mechanical properties of short-fiber-reinforced injection-molded composites: Simulated and experimental results», *Polym. Compos.*, vol. 14, fasc. 5, pp. 367–382, ott. 1993, doi: 10.1002/pc.750140503.

- [10] M. Ricotta, M. Sorgato, e M. Zappalorto, «Tensile and compressive quasi-static behaviour of 40% short glass fibre - PPS reinforced composites with and without geometrical variations», *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 114, p. 102990, ago. 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.102990.
- [11] D. F. Mielewski, D. R. Bauer, P. J. Schmitz, e H. Van Oene, «Weld line morphology of injection molded polypropylene», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 38, fasc. 12, pp. 2020–2028, dic. 1998, doi: 10.1002/pen.10371.
- [12] S. Fellahi, A. Meddad, B. Fisa, e B. D. Favis, «Weldlines in injection-molded parts: A review», *Adv. Polym. Technol.*, vol. 14, fasc. 3, pp. 169–195, set. 1995, doi: 10.1002/adv.1995.060140302.
- [13] S. Patcharaphun, B. Zhang, e G. Mennig, «Investigation on Weldline Strength of Short-glass-fiber Reinforced Polycarbonate Manufactured through Push-Pull-processing Technique», *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, fasc. 4, pp. 421–435, mar. 2006, doi: 10.1177/0731684405060570.
- [14] «Investigation of the inflow effect on weld lines morphology and strength in injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene - Scantamburlo - 2020 - Polymer Composites - Wiley Online Library». Consultato: 4 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25562>
- [15] G.-H. Oh, J.-H. Jeong, S.-H. Park, e H.-S. Kim, «Terahertz time-domain spectroscopy of weld line defects formed during an injection moulding process», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 157, pp. 67–77, 2018.
- [16] A. Khamsehnezhad e S. Hashemi, «Mechanical properties of single- and double-gated injection moulded short glass fibre reinforced PBT/PC composites», *J. Mater. Sci.*, vol. 43, fasc. 18, pp. 6344–6352, set. 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2918-1.
- [17] A. Scantamburlo, F. Zanini, G. Lucchetta, e M. Sorgato, «Improving the weld lines mechanical properties by combining alternate dynamic packing and rapid heat cycle moulding», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 163, p. 107239, dic. 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107239.
- [18] «Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics - Seldén - 1997 - Polymer Engineering & Science - Wiley Online Library». Consultato: 16 novembre 2024.

[Online]. Disponibile su:

<https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.11663>

[19] «On the Weld Line of Injection Molding Part». Consultato: 21 marzo 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.linkedin.com/pulse/weld-line-injection-molding-part-hank-tsai>

[20] K. Waschitschek, A. Kech, e J. deC Christiansen, «Influence of push–pull injection moulding on fibres and matrix of fibre reinforced polypropylene», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, fasc. 5, pp. 735–744, 2002.

[21] «Investigation on Weldline Strength of Short-glass-fiber Reinforced Polycarbonate Manufactured through Push-Pull-processing Technique». Consultato: 17 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0731684405060570>

[22] H.-C. Ludwig, G. Fischer, e H. Becker, «A quantitative comparison of morphology and fibre orientation in push-pull processed and conventional injection-moulded parts», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 53, fasc. 2, pp. 235–239, gen. 1995, doi: 10.1016/0266-3538(95)00023-2.

[23] «A Strategy for Rapid Thermal Cycling of Molds in Thermoplastic Processing | J. Manuf. Sci. Eng. | ASME Digital Collection». Consultato: 17 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-abstract/128/4/837/475562/A-Strategy-for-Rapid-Thermal-Cycling-of-Molds-in>

[24] D. Yao e B. Kim, «Development of rapid heating and cooling systems for injection molding applications», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 42, fasc. 12, pp. 2471–2481, 2002, doi: 10.1002/pen.11133.

[25] G. Wang, G. Zhao, e X. Wang, «Effects of cavity surface temperature on mechanical properties of specimens with and without a weld line in rapid heat cycle molding», *Mater. Des. 1980-2015*, vol. 46, pp. 457–472, apr. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.10.054.

[26] P. J. Hine, R. A. Duckett, I. M. Ward, P. S. Allan, e M. J. Bevis, «A comparison of short glass fiber reinforced polypropylene plates made by conventional injection molding and using shear controlled injection molding», *Polym. Compos.*, vol. 17, fasc. 3, pp. 400–407, giu. 1996, doi: 10.1002/pc.10627.

[27] P. S. Allan, M. J. Bevis, J. R. Gibson, C. J. May, e I. E. Pinwill, «Shear controlled orientation technology for the management of reinforcing fibres in moulded and extruded

composite materials», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 56, fasc. 1, pp. 272–281, gen. 1996, doi: 10.1016/0924-0136(96)85104-1.

[28] R. Chang e W. Yang, «Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach», *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 37, fasc. 2, pp. 125–148, 2001, doi: 10.1002/flid.166.

[29] S. Kleindel, D. Salaberger, R. Eder, H. Schretter, e C. Hochenauer, «Prediction and Validation of Short Fiber Orientation in a Complex Injection Molded Part with Chunky Geometry», *Int. Polym. Process.*, vol. 30, fasc. 3, pp. 366–380, lug. 2015, doi: 10.3139/217.3047.

[30] «Performance elevate, alta qualità e vasta gamma di prodotti| Sirmax Spa». Consultato: 22 maggio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.sirmax.com/it/compound/compound-poliiolefinici>

[31] «ISO 527-4 Test di trazione di materiali compositi». Consultato: 23 marzo 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.instron.com/it-it/testing-solutions/iso-standards/iso-527-4>

[32] A. Arriaga *et al.*, «Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS», *Polym. Test.*, vol. 26, fasc. 3, pp. 284–305, mag. 2007, doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.10.012.

[33] «Guida | Vincolo senza attrito | Autodesk». Consultato: 30 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ITA/?guid=SIM-FRICTIONLESS-CONSTRAINT>

[34] «Prediction of weldline strength for injection molded short-glass-fiber composites - ScienceDirect». Consultato: 22 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322075745>

[35] L. Incarnato, P. Scarfato, e D. Acierno, «Rheological and mechanical properties of recycled polypropylene», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 39, fasc. 4, pp. 749–755, 1999, doi: 10.1002/pen.11463.

[36] C. Meran, O. Ozturk, e M. Yuksel, «Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene», *Mater. Des.*, vol. 29, fasc. 3, pp. 701–705, gen. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.02.007.

