



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Analisi dell'effetto di un sistema push-pull sulle linee di giunzione di provini  
realizzati mediante stampaggio a iniezione

**Relatore:** Prof. GIOVANNI LUCCHETTA

**Correlatore:** Ing. ANDREA SCANTAMBURLO

**Laureando:** PAOLO PASQUALINI 1197726

ANNO ACCADEMICO 2020/2021



# Sommario

In questo lavoro di tesi è stato studiato l'effetto del processo di push-pull sul carico di rottura a trazione e sulla rigidità di provini con linea di giunzione realizzati in polipropilene caricato con fibra di vetro al 35% avente tre diversi valori di MFR. Per valutare tale effetto sono stati stampati provini senza linea di giunzione, provini con linea di giunzione a cui non è stato applicato il processo di push-pull e provini in cui questo processo è stato applicato mediante l'utilizzo di due unità di iniezione. Sono state poi condotte delle prove di trazione in modo da ricavare il carico ultimo a trazione e la rigidità. Questi due parametri sono stati utilizzati per valutare l'effetto del processo di push-pull e del MFR del materiale sulla linea di giunzione. Dai risultati è emerso che in generale all'aumentare del MFR e quindi all'aumentare della fluidità del materiale il carico a rottura e la rigidità aumentano per i provini senza linea di giunzione, per i provini con linea di giunzione e per i provini a cui è stato applicato il processo di push-pull. Con questi dati sono stati calcolati anche due indici in modo da valutare la variazione del carico a rottura e della rigidità rispetto a provini in cui non è presente il difetto ed è emerso che, senza applicare il processo di push-pull, all'aumentare del MFR diminuisce l'effetto indebolente della linea di giunzione, mentre applicando il push-pull aumenta l'effetto rafforzante indotto da tale processo. È stato condotto anche uno studio per determinare la temperatura di soglia alla quale si riesce ad eliminare l'impatto estetico della weld line e della meld line andando a stampare delle placche in polipropilene caricato con mica e applicando i processi di RHCM e push-pull. Questo studio è stato condotto sia sperimentalmente che tramite simulazioni condotte con Moldflow. Per determinare la temperatura di soglia è stata fatta variare la temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM da 70°C a 170°C con un passo di 20°C. I risultati hanno evidenziato che nel caso sperimentale la weld line scompare quando la temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM è impostata a 130°C e la meld line scompare completamente quando  $T=170^{\circ}\text{C}$ . I risultati delle simulazioni si discostano da quelli sperimentali in quanto si nota che in generale l'impatto estetico dovuto a questi due difetti si riduce più rapidamente all'aumentare della temperatura dell'acqua, questo è dovuto al fatto che le fasi di riscaldamento e raffreddamento dello stampo nelle simulazioni sono più rapide. Questa differenza viene attribuita in parte al ritardo della termocoppia nel misurare la temperatura della parete della cavità e in parte all'inerzia termica dello stampo che probabilmente non è stata correttamente simulata nelle analisi condotte. È stato anche progettato un sistema innovativo in cui il processo di push-pull non viene realizzato utilizzando due unità di iniezione o dei pistoni, ma utilizzando il gas.



# Indice

## Capitolo 1

Introduzione .....	1
1.1 USO DEL POLIPROPILENE NELL'INDUSTRIA .....	2
1.2 FIBRE E CARICHE MINERALI.....	6
1.3 ORIENTAZIONE DELLE FIBRE .....	10
1.4 MELT FLOW INDEX.....	12
1.5 LINEE DI GIUNZIONE.....	13
1.6 PUSH-PULL PROCESS.....	26
1.7 RAPID HEAT CYCLE MOLDING.....	32

## Capitolo 2

Setup sperimentale .....	35
2.1 GEOMETRIA DELLO STAMPO.....	35
2.1.1 Geometria dello stampo per lo studio sull'influenza del MFR.....	35
2.1.2 Geometria dello stampo per il processo di PPGAIM .....	38
2.2 GEOMETRIA DEI PEZZI STAMPATI .....	42
2.2.1 Provino per lo studio sull'influenza del MFR .....	42
2.2.2 Provino per il processo di PPGAIM .....	43
2.2.3 Placca per la determinazione della temperatura di soglia.....	45
2.3 PARAMETRI DI PROCESSO .....	46
2.3.1 Temperature per lo studio sull'influenza del MFR.....	47
2.3.2 Temperature per la determinazione della temperatura di soglia.....	49
2.3.3 Parametri di stampaggio per lo studio sull'influenza del MFR .....	51
2.3.4 Parametri di stampaggio per la determinazione della temperatura di soglia .....	58
2.4 CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE .....	59
2.4.1 Calore specifico .....	59
2.4.2 Temperatura di cristallizzazione e di fusione .....	62

2.4.3 Prove reologiche.....	63
2.5 PROVE DI TRAZIONE.....	71
Capitolo 3	
Risultati ottenuti .....	75
3.1 RISULTATI DELLO STUDIO SULL'INFLUENZA DEL MFR .....	75
3.1.1 Risultati del materiale con MFR = 1.2g/10' .....	75
3.1.2 Risultati del materiale con MFR = 5.9g/10' .....	78
3.1.3 Risultati del materiale con MFR = 10.7g/10' .....	81
3.2 STUDIO SULLA TEMPERATURA DI SOGLIA.....	84
Capitolo 4	
Confronto e discussione dei risultati .....	89
4.1 STUDIO SULL'INFLUENZA DEL MFR .....	89
4.1.1 Analisi dei valori del carico a rottura e di rigidità .....	89
4.1.2 Analisi degli indici SRF e KRF.....	92
4.2 STUDIO SULLA TEMPERATURA DI SOGLIA.....	94
Capitolo 5	
Conclusioni e sviluppi futuri .....	97
Bibliografia .....	101

# Capitolo 1

## Introduzione

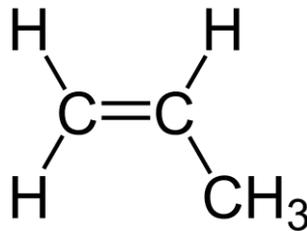
Negli ultimi decenni c'è stato un continuo aumento dell'utilizzo di materiali polimerici, soprattutto in ambito di metal replacement nel settore automotive. L'utilizzo di materiali polimerici spesso rinforzati con fibre per sostituire componenti in acciaio nei veicoli è giustificato dalla bassa densità che li caratterizza e dalla loro economicità, questo consente di ridurre le emissioni nocive senza però aumentare il costo del veicolo. Il largo utilizzo di questi materiali ha aumentato l'attenzione delle attività di ricerca verso questo settore con lo scopo di sviluppare tecniche di lavorazione sempre più efficienti, di studiare con maggiore precisione gli effetti dei parametri di processo sul prodotto finito e di trovare nuove tecniche che consentano di ridurre i difetti che si possono riscontrare nei componenti realizzati.

Una delle tecnologie di lavorazione dei materiali polimerici più diffusa è lo stampaggio a iniezione. Il largo impiego di questa tecnologia è giustificato dal fatto che è possibile processare una grande varietà di polimeri, anche rinforzati, andando a modificare in modo opportuno i parametri di processo, si riescono ad ottenere componenti con geometria anche molto complessa, inoltre il processo è rapido e può essere completamente automatizzato. Uno dei difetti tipici che si possono riscontrare in componenti realizzati mediante stampaggio a iniezione sono le linee di giunzione, che verranno descritte meglio in seguito. I lavori di ricerca per ridurre o eliminare questi difetti sono molteplici e in tale ambito si inserisce il lavoro di questa tesi. Il lavoro svolto ha l'obiettivo di valutare l'effetto di un processo noto come push-pull sulla linea di giunzione di provini al variare del MFR del materiale e di determinare la temperatura di soglia nel processo di RHCM alla quale scompare il difetto. Oltre a questi studi è stato anche progettato un sistema che consenta di realizzare il processo di push-pull utilizzando il gas (PPGAIM). Questa nuova tecnica ha lo scopo di andare ad applicare il processo di push-pull a livello locale vicino a dove si forma la linea di giunzione, per questo motivo l'apparato da progettare non deve essere ingombrante e le modifiche dello stampo devono essere ridotte. Le tecniche finora utilizzate per realizzare il processo di push-pull prevedono l'utilizzo di macchine 2K che sono costose e non consentono di agire a livello locale vicino alla linea di giunzione, oppure si utilizzano dei pistoni i quali però sono più ingombranti rispetto agli iniettori del gas e spesso, come nella tecnica SCORIM, non agiscono nemmeno localmente vicino al difetto. Il nuovo sistema che è stato progettato ha quindi lo scopo di risolvere questi problemi.

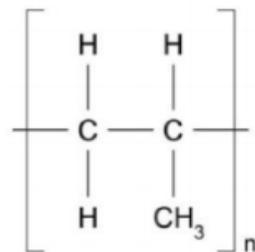
## 1.1 USO DEL POLIPROPILENE NELL'INDUSTRIA

Il polipropilene (PP) è un polimero termoplastico semicristallino molto usato in vari settori industriali grazie alla sua elevata duttilità, alla buona resistenza termica e chimica, soprattutto ad acidi, alcali e solventi, alla bassa densità e alla buona resistenza all'umidità. Presenta però una scarsa resistenza agli idrocarburi aromatici, alifatici e alogenati, all'ossidazione e ai raggi UV.

Il monomero da cui deriva il polipropilene è il propilene, un idrocarburo alifatico insaturo caratterizzato dalla presenza di un gruppo metilico al posto di un atomo di idrogeno come mostrato in Figura 1.1. A seguito della polimerizzazione le unità monomeriche di propilene si legano tra loro e formano lunghe catene, la formula del polipropilene può quindi essere schematizzata come riportato in Figura 1.2, dove n indica il grado di polimerizzazione ovvero il numero di unità monomeriche che formano la macromolecola.



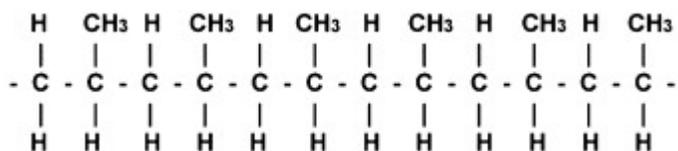
**Figura 1. 1:** *Molecola di propilene.*



**Figura 1. 2:** *Macromolecola di polipropilene.*

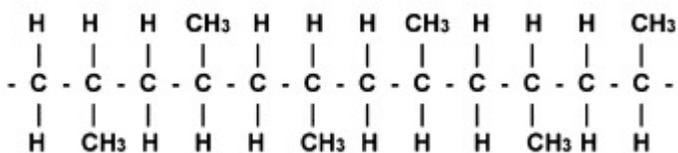
A seconda di dove si posiziona il gruppo metilico rispetto la catena è possibile riconoscere tra diverse configurazioni del polipropilene: isotattico (Figura 1.3), sindiotattico (Figura 1.4) e atattico (Figura 1.5).

Nel polipropilene isotattico il gruppo metilico si ripete con regolarità, ma da un solo lato rispetto la catena formata dagli atomi di carbonio.



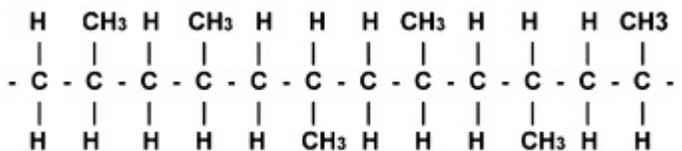
**Figura 1. 3:** *Polipropilene isotattico.*

Nel polipropilene sindiotattico il gruppo metilico si ripete con regolarità, ma in questo caso l'orientazione lungo la catena è alternata.



**Figura 1. 4:** *Polipropilene sindiotattico.*

Nel polipropilene atattico non è presente una regolarità nell'orientazione del gruppo metilico rispetto la catena.



**Figura 1. 5:** *Polipropilene atattico.*

Nella Tabella 1.1 sono riportate le principali proprietà del polipropilene che però possono essere modificate usando rinforzi, cariche o additivi [1].

**Tabella 1. 1:** *Proprietà del polipropilene.*

Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	0,915
Modulo elastico [N/mm <sup>2</sup> ]	1400
Resistenza a trazione [N/mm <sup>2</sup> ]	30
Allungamento a rottura [%]	70
Temperatura di fusione [°C]	160
Conducibilità termica [W/Km]	0,22
Coefficiente di dilatazione termica lineare [10 <sup>6</sup> K <sup>-1</sup> ]	160
Creep: deformazione 1% in 1000h [N/mm <sup>2</sup> ]	4
Temperatura minima di utilizzo [°C]	0
Temperatura di utilizzo continuo [°C]	95
Temperatura di utilizzo per breve periodo senza carico [°C]	110

Il polipropilene viene molto utilizzato nell'industria anche perché è possibile lavorarlo utilizzando varie tecnologie in modo da ottenere prodotti con proprietà differenti tra loro a seconda dell'utilizzo a cui sono destinati. Tra i molteplici settori in cui viene impiegato si citano: automotive, medicale, beni di consumo, packaging, abbigliamento, elettronica e arredamento.

**SETTORE AUTOMOTIVE:** In questo settore il polipropilene viene spesso rinforzato con fibre o con cariche minerali in modo da ottenere proprietà specifiche per l'applicazione a cui i vari componenti sono destinati. L'impiego del PP nel settore automotive è giustificato dalla bassa densità del materiale, dalle buone proprietà meccaniche specifiche, dalla possibilità di ottenere buone finiture superficiali con eventualmente delle texture per i componenti estetici, dai costi ridotti, dalla possibilità di riciclarlo e dalla resistenza termica. La bassa densità del materiale è particolarmente importante in questo settore perché consente di ottenere componenti leggeri che permettono di ridurre il consumo di carburante e quindi anche le emissioni nocive. Nelle automobili il polipropilene viene utilizzato per realizzare componenti interni ed esterni, sia estetici che non, per esempio si possono realizzare elementi del paraurti, delle portiere, del cruscotto, degli specchietti, dei fari e dettagli interni o esterni come riportato in Figura 1.6.



**Figura 1. 6:** Componenti in PP usati nel settore automotive.

Il polipropilene viene utilizzato anche in forma espansa per realizzare componenti leggeri con proprietà di isolamento acustico e termico, di protezione dagli urti e capaci di dissipare energia [2].

**SETTORE MEDICALE:** In questo settore il polipropilene viene utilizzato per creare provette, fiale, siringhe, contenitori rigidi e anche dispositivi di protezione come mascherine e camici monouso grazie alla sua caratteristica di essere un materiale con una buona resistenza chimica.

**SETTORE DEI BENI DI CONSUMO:** Molti degli oggetti di plastica presenti nelle case sono realizzati in PP, soprattutto in cucina, in quanto è un materiale idoneo al contatto con gli alimenti, resiste bene alle temperature della lavastoviglie e ai detersivi. Con questo materiale si realizzano oggetti come terrine, ciotole, contenitori, ma anche giocattoli.

**SETTORE DEL PACKAGING:** In questo settore viene utilizzato sia per creare packaging rigido come scatole e casse, sia packaging flessibile come film o sacchi, in particolare il PP è adatto alla creazione di imballaggi per il settore alimentare. In questo ambito riveste un ruolo importante anche il BOPP ovvero polipropilene orientato biassialmente [3]. Questo film garantisce un elevato effetto barriera ed è per questo molto utilizzato nel settore alimentare per aumentare la vita a scaffale dei cibi, presenta inoltre buone caratteristiche estetiche e può raggiungere elevate trasparenze. Il BOPP viene molto usato per la creazione di etichette e per la realizzazione di film poliaccoppiati.

**SETTORE DELL'ABBIGLIAMENTO:** Il polipropilene può essere utilizzato per creare delle fibre da cui ricavare tappeti, tende, coperte o abbigliamento sportivo. L'impiego nella produzione di indumenti tecnici per lo sport è giustificato da una serie di vantaggi. I tessuti ricavati da fibre di PP infatti sono leggeri, traspiranti, garantiscono un buon isolamento termico e resistenza allo sporco, tuttavia presentano costi abbastanza elevati [4].

**SETTORE ELETTRICO:** Grazie alla caratteristica di essere un buon isolante elettrico il polipropilene trova un grande impiego nel settore elettrico e viene utilizzato per realizzare componenti di elettrodomestici o di prese di corrente.

**SETTORE DELL'ARREDAMENTO:** Il polipropilene trova impiego anche nel settore dell'arredamento, soprattutto nella realizzazione di sedie, tavoli e armadi per l'esterno grazie alle sue proprietà meccaniche e alla resistenza all'umidità e all'acqua.

## **1.2 FIBRE E CARICHE MINERALI**

Il polipropilene viene spesso utilizzato come matrice per formare materiali compound o compositi attraverso l'aggiunta di fibre, particelle, additivi o cariche minerali. Lo scopo è quello di modificare le proprietà del polipropilene vergine a seconda delle esigenze o di cambiarne l'aspetto. In generale in un materiale composito è possibile identificare le seguenti fasi:

- La matrice che costituisce la fase continua.
- Il rinforzo che costituisca la fase dispersa.
- Interfaccia tra fase continua e fase dispersa che assume particolare importanza soprattutto nei materiali rinforzati con fibre.

In aggiunta possono anche essere presenti dei filler o inerti riempitivi che hanno lo scopo di ridurre il contenuto di matrice.

[5] Nei materiali compositi rinforzati con fibre la fase di rinforzo dovrà sopportare la maggior parte dei carichi applicati. Le proprietà finali del composito dipenderanno dalle proprietà meccaniche del materiale delle fibre, dall'interfaccia che si forma tra rinforzo e matrice, dalla frazione in volume di fibre e dall'orientazione delle fibre. La matrice invece ha le seguenti funzioni:

- Tenere distanti le fibre in modo che non si tocchino.
- Trasferire il carico alle fibre.
- Proteggere le fibre dagli agenti chimici e atmosferici.
- Proteggere le fibre da danneggiamenti meccanici.
- Ritardare la propagazione delle cricche.

Oltre alle fibre la fase di rinforzo può comprendere flakes, lamine, particelle o riempitivi.

Le fibre maggiormente utilizzate nella produzione di materiali compositi sono: fibre di vetro, di carbonio e fibre aramidiche (Kevlar). Le fibre di vetro si distinguono in “vetro E” e “vetro S”, per le fibre di carbonio invece si possono distinguere “carbonio HS (High Strength)”, “carbonio HM (High Modulus)” e “carbonio UHM (Ultra High Modulus)”. Di seguito in Tabella 1.2, in Figura 1.7 e in Figura 1.8 vengono riportate le principali proprietà di queste fibre.

**Tabella 1. 2:** *Principali proprietà delle fibre più utilizzate.*

Fibra	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Modulo a trazione (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo a trazione specifico (MN*m/kg)	Resistenza a trazione specifica (MN*m/kg)	Coefficiente di espansione termica (10 <sup>-6</sup> m/m°C)
E-glass	2.54	72	2400	29	0.95	2.8
S-glass	2.49	86	4300	34	1.7	5
Carbon HS	1.76	228	3500	129	2	-0.1 ÷ -0.5
Carbon HM	1.77	390	3100	220	1.7	0.5 ÷ -1.2
Carbon UHM	1.85	440	2000	237	1.08	-0.1 ÷ -0.5
Kevlar 49	1.45	131	3620	90	2.5	-2
Boron	2.7	393	3400	145	1.26	5
SiC	3.08	400	3440	130	1.12	1.5
Aluminium (5083)	2.8	72	130/280	26	0.046/0.1	-
Titanium (125)	4.5	105	250/400	23	0.055/0.089	-
Mild Steel (43A)	7.8	206	275/460	27	0.035/0.059	-
Stainless Steel (316)	7.9	196	206/520	25	0.0260/0.066	-

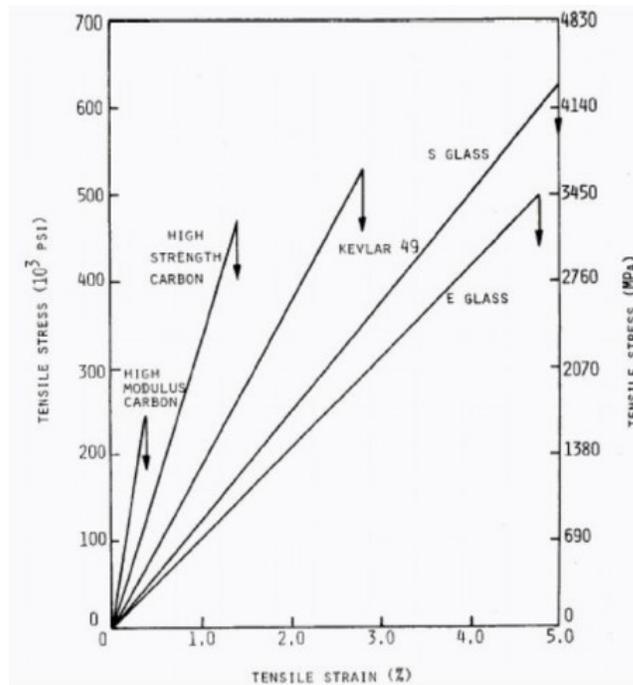


Figura 1. 7: Grafico riassuntivo delle proprietà meccaniche delle fibre.

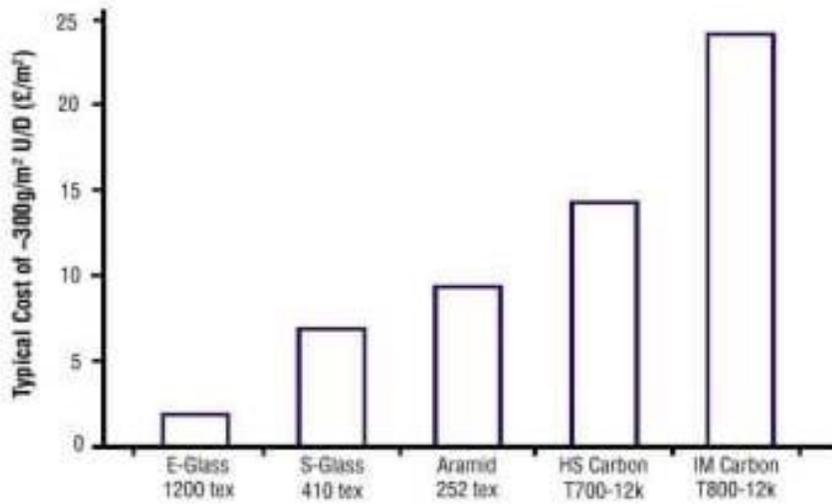


Figura 1. 8: Costi tipici delle fibre più utilizzate.

Le fibre di vetro presentano le seguenti caratteristiche:

- Hanno una densità maggiore rispetto a Kevlar e carbonio, ma inferiore rispetto all'acciaio.

- Hanno un modulo a trazione molto basso.
- Hanno una buona resistenza a trazione con il vetro S che raggiunge valori di 4300MPa.
- Il modulo a trazione specifico è inferiore rispetto alle fibre di carbonio e al Kevlar, ma ha valori simili all'acciaio.
- La resistenza a trazione specifica è simile a quella delle altre fibre ed è due ordini di grandezza superiore rispetto all'acciaio.
- Sono molto economiche e per questo sono molto utilizzate.

Le fibre di carbonio:

- Hanno una densità intermedia tra le fibre di Kevlar e le fibre di vetro.
- Hanno un modulo a trazione elevato, superiore a quello delle altre fibre e anche all'acciaio. Le fibre di carbonio UHM sono quelle che hanno il modulo a trazione più elevato.
- Hanno buona resistenza a trazione.
- Il modulo a trazione specifico è superiore a quello delle altre fibre ed è un ordine di grandezza superiore rispetto all'acciaio.
- La resistenza a trazione specifica è confrontabile con quella delle altre fibre ed è due ordini di grandezza superiore a quella dell'acciaio.
- Le fibre di carbonio hanno un costo superiore rispetto alle fibre di vetro con il carbonio UHM che presenta un costo molto superiore rispetto a tutte le altre.

Le fibre aramidiche o Kevlar:

- Hanno la densità minore rispetto a tutte le altre fibre.
- Il modulo a trazione è intermedio tra le fibre di vetro e quelle di carbonio.
- Hanno una buona resistenza a trazione.
- Il modulo a trazione specifico è intermedio tra le fibre di vetro e quelle di carbonio, ma è comunque superiore rispetto all'acciaio.
- La resistenza a trazione specifica è la più elevata tra le fibre riportate in tabella ed è due ordini di grandezza superiore rispetto all'acciaio.
- Il costo è intermedio tra le fibre di vetro e le fibre di carbonio.

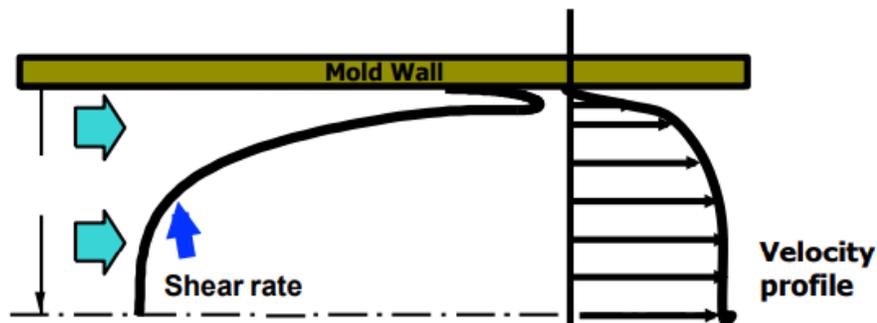
Oltre alle fibre si possono utilizzare anche delle cariche minerali, le più comuni sono:

- Il carbonato di calcio: viene usato per aumentare la stabilità, la rigidità, la resistenza all'urto e le proprietà meccaniche del materiale. L'utilizzo del carbonato di calcio permette anche di velocizzare il processo produttivo, di diminuire le temperature di processo e facilita il processo di saldatura. Si riducono i consumi energetici e il prodotto finale è generalmente più economico [6].

- La mica: viene utilizzata per aumentare la resistenza a trazione, diminuire la conducibilità elettrica e termica e per ridurre le distorsioni del pezzo e il ritiro. Ha buona resistenza termica e chimica e conferisce un buon effetto barriera [7].
- Il talco: aumenta la rigidità, la resistenza all’impatto, la stabilità dimensionale, migliora la resistenza termica, chimica e al creep. Il talco ha una buona conducibilità termica quindi il raffreddamento della plastica è più veloce e di conseguenza anche il processo produttivo è più rapido [8].

### 1.3 ORIENTAZIONE DELLE FIBRE

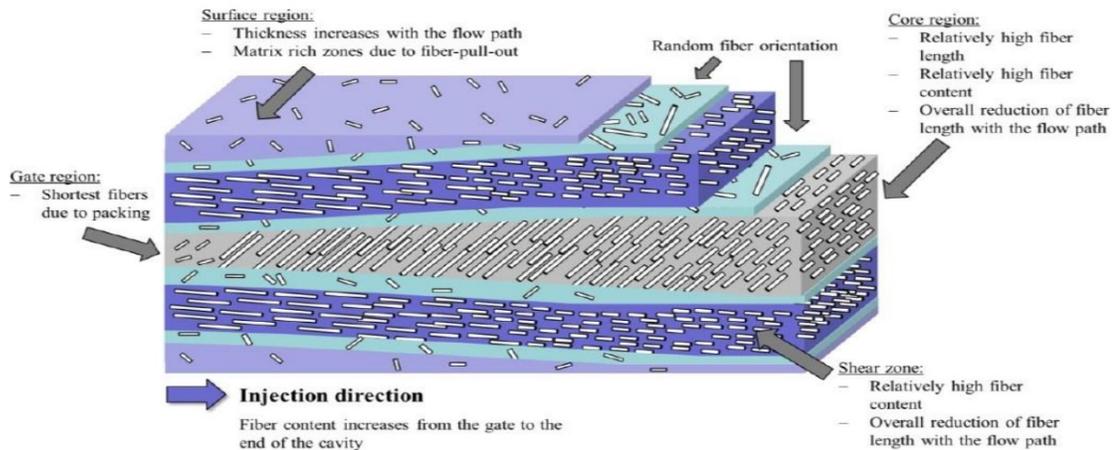
[5] Il processo di stampaggio a iniezione influenza l’orientazione delle fibre nel pezzo finale, questo perché durante la fase di riempimento le fibre sono sottoposte a shear strain, ovvero a sforzi a taglio, che le orientano secondo direzioni preferenziali. Lo shear strain è dato dal prodotto dello shear rate per il tempo e lo shear rate rappresenta la derivata della velocità. In Figura 1.9 sono riportati gli andamenti dello shear rate e della velocità che si hanno di solito in un polimero che fluisce tra due piastre.



**Figura 1. 9:** Profilo della velocità e dello shear rate per un polimero che fluisce tra due piastre.

Le pareti dello stampo sono ferme quindi in prossimità di queste la velocità con cui fluisce il polimero è nulla, mentre al centro è massima. Complessivamente la velocità ha un profilo a tappo. Lo shear rate, essendo la derivata della velocità, è massimo a ridosso delle pareti per poi decrescere rapidamente e assumere valori nulli in prossimità del centro del flusso, lo shear strain sarà quindi maggiore vicino alle pareti. Bisogna però considerare che lo stampo è più freddo del polimero fuso, quindi quando questo viene in contatto con le pareti forma velocemente uno strato di pelle solida il cui spessore dipende da un bilancio tra calore apportato dal polimero fuso e calore asportato dallo stampo.

In Figura 1.10 è riportato un esempio di come si orientano tipicamente le fibre lungo lo spessore di un pezzo realizzato mediante stampaggio a iniezione.



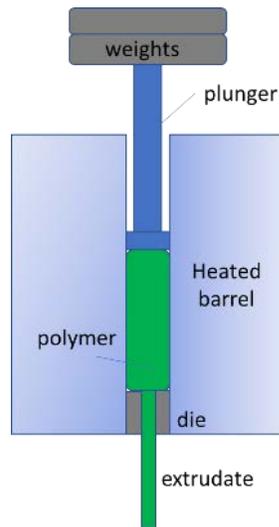
**Figura 1. 10:** Orientazione delle fibre lungo lo spessore nello stampaggio a iniezione.

Osservando la Figura 1.10 è possibile fare alcune considerazioni:

- Si distinguono cinque strati principali: due skin layer più esterni (la pelle), due shear layer ed un core layer centrale.
- La pelle raffreddandosi velocemente presenta fibre poco orientate.
- Nella pelle sono presenti poche fibre perché vengono strappate dal flusso di polimero fuso (pull-out delle fibre).
- La concentrazione di fibre nello shear layer e nel core layer è minore vicino al gate e aumenta man mano che ci si allontana a causa delle fibre che vengono strappate dallo skin layer.
- Man mano che ci si allontana dal gate le fibre sono via via più corte perché si rompono durante la fase di riempimento.
- Vicino al gate ci sono molte fibre corte perché vengono spezzate durante l'impaccamento.
- Nello shear layer le fibre sono orientate lungo la direzione di flusso perché lo shear rate è maggiore.
- Nel core layer le fibre sono orientate in modo random perché lo shear rate è quasi nullo.

## 1.4 MELT FLOW INDEX

[9] Il Melt Flow Index (MFI) è un indice che rappresenta la fluidità dei polimeri, quindi valori elevati di MFI indicano che il materiale fuso fluisce con più facilità. La normativa di riferimento per la determinazione del MFI è la ISO 1133 [10] o in alternativa la ASTM D1238 [11]. Nella ISO 1133 sono descritti due metodi di prova: il metodo A e il metodo B, che consentono di determinare due differenti indici: il melt mass flow-rate (MFR) e il melt volume flow-rate (MVR). Tralasciando i dettagli specifici della normativa il principio generale su cui si basano i test per determinare il MFI è quello di inserire del materiale polimerico in un cilindro riscaldato, fonderlo e poi estruderlo attraverso un ugello grazie ad un pistone che viene spinto da un peso. In Figura 1.11 è riportato schematicamente il processo appena descritto.



**Figura 1. 11:** *Principio di funzionamento di un plastometro per la determinazione del MFI.*

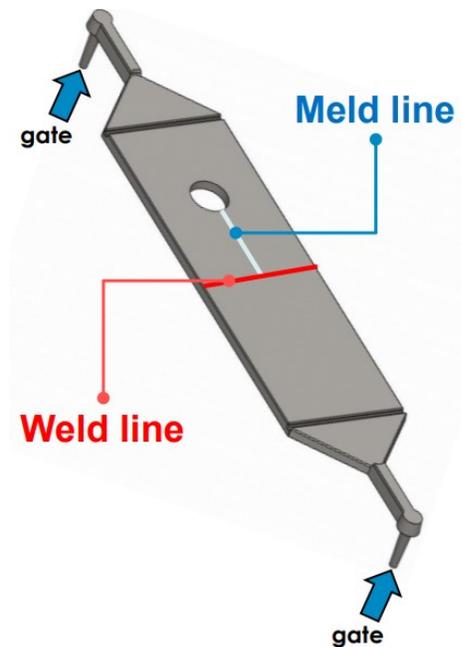
Il metodo A serve a determinare il MFR. Questo metodo prevede di estrarre il polimero e, ad intervalli di dieci minuti, si taglia il filamento estruso e si pesa ogni segmento. In questo modo è possibile calcolare la velocità di estrusione espressa in grammi per dieci minuti ( $\text{g}/10'$ ).

Il metodo B serve a determinare il MVR. In questo metodo si va sempre ad estrarre il polimero, ma in questo caso si misura la posizione del cilindro attraverso un encoder di posizione. È così possibile calcolare il volume di polimero che viene estruso in un tempo di dieci minuti ( $\text{cm}^3/10'$ ).

In entrambi i casi la temperatura e il peso da applicare sono specificati da normativa.

## 1.5 LINEE DI GIUNZIONE

[5] Le linee di giunzione sono difetti tipici di componenti realizzati mediante stampaggio a iniezione e si distinguono in weld lines e meld lines a seconda di come si formano. Per capire questa differenza si osservi la Figura 1.12.



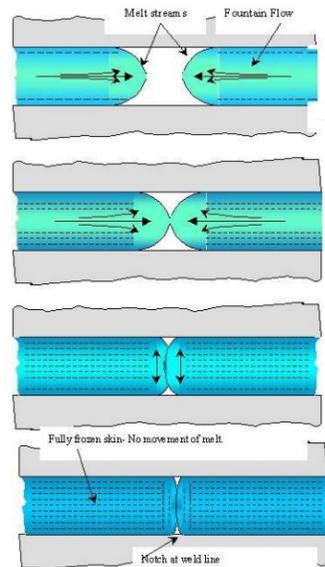
**Figura 1. 12** *Differenza tra weld line e meld line.*

La differenza principale tra questi due difetti è la seguente:

- Le weld lines si formano quando due flussi di polimero fuso si incontrano di testa.
- Le meld lines si formano quando due flussi di polimero fuso si incontrano di fianco.

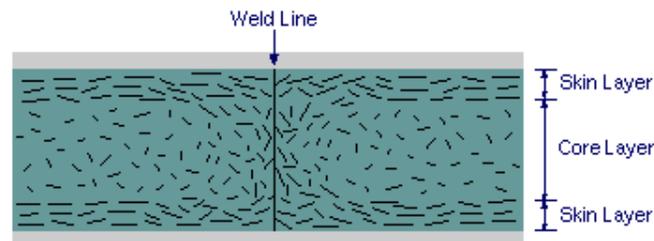
Le linee di giunzione in componenti realizzati mediante stampaggio a iniezione sono da evitare per motivi estetici e perché riducono le proprietà meccaniche del componente, infatti questi difetti generalmente lasciano un segno sul pezzo finito e costituiscono una zona di indebolimento del materiale a causa della non compenetrazione delle macromolecole attraverso l'interfaccia della linea di giunzione. Questo è dovuto all'effetto del flusso a fontana che tende ad orientare le macromolecole e le fibre nella zona del fronte di flusso in direzione ortogonale rispetto alla direzione di riempimento sfavorendo così la compenetrazione.

In Figura 1.13 è riportato il processo di formazione di una weld line.



**Figura 1. 13:** *Processo di formazione di una weld line.*

La Figura 1.13 mette in evidenza un altro problema che si può riscontrare quando si forma una linea di giunzione ovvero la comparsa di notches o intagli. Questo si verifica soprattutto quando non si ha una pressione sufficiente per spingere il polimero a chiudere gli intagli o quando la superficie dello stampo è molto fredda, questo genera uno strato di materiale più viscoso che oppone maggiore resistenza al flusso. Nel caso di polimero caricato con fibra l'indebolimento causato dalla linea di giunzione è ancora più marcato perché attorno alla linea le fibre sono orientate ortogonalmente rispetto alla direzione di riempimento come raffigurato in Figura 1.14 e si genera una zona con una bassa concentrazione di fibre lungo l'interfaccia del difetto.



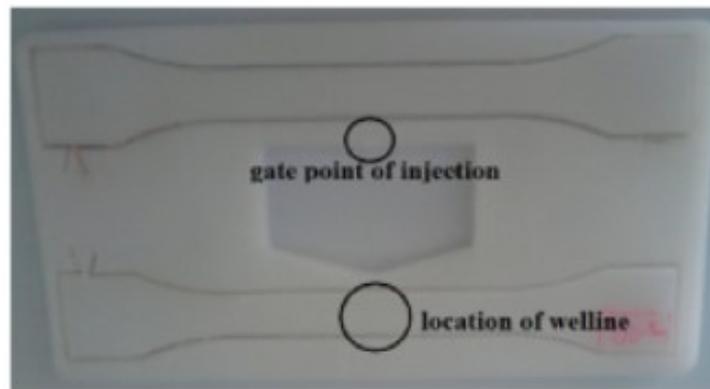
**Figura 1. 14:** *Orientazione delle fibre attorno alla linea di giunzione.*

Per eliminare o rinforzare le linee di giunzione senza ricorrere a processi particolari che verranno descritti più avanti si può intervenire nei seguenti modi:

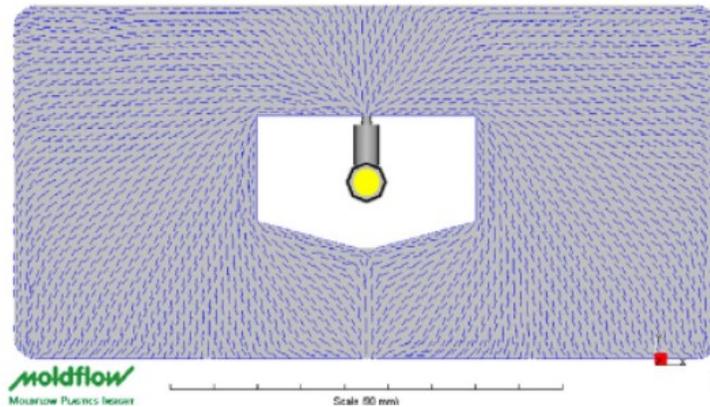
- Modificare la geometria della parte o la posizione dei gate in modo da evitare che due flussi si incontrino di testa o fare in modo che si incontrino in una zona in cui la pressione è elevata.
- Inserire degli sfiati nelle zone dove si formano le linee di giunzione, in questo modo si può far fuoriuscire l'aria che altrimenti rimarrebbe intrappolata e opporrebbe una certa resistenza all'unione dei fronti di flusso.
- Modificare i parametri di processo: in particolare si può aumentare la temperatura dello stampo o la pressione di impaccamento.

Di seguito sono riportati i risultati di alcuni lavori di ricerca svolti negli ultimi anni nell'ambito dello studio delle linee di giunzione.

Nella ricerca di Ozcelik *et al.* [12] è stato condotto uno studio sulla formazione delle linee di giunzione in provini realizzati in polipropilene. In questo lavoro il difetto si forma a causa della presenza di un ostacolo, di cui viene modificato l'angolo. Nello studio vengono anche valutati gli effetti della variazione di alcuni parametri di processo, come la temperatura del polimero fuso e la pressione di mantenimento, sulle proprietà meccaniche dei provini ottenute da prove di trazione e da prove di impatto Izod. In Figura 1.15 viene riportata la geometria del pezzo stampato da cui sono stati ricavati i provini e in Figura 1.16 l'orientazione delle linee di flusso derivanti da uno studio condotto con Moldflow.

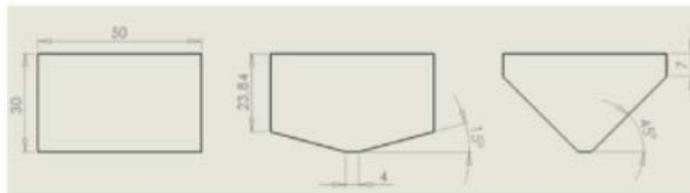


**Figura 1. 15:** Geometria del pezzo stampato nello studio di Ozcelik *et al.*



**Figura 1. 16:** Orientazione delle linee di flusso derivanti da uno studio condotto con Moldflow nella ricerca di Ozcelik et al.

In Figura 1.17 sono riportate le geometrie degli ostacoli utilizzati in questo studio con lo scopo di generare la linea di giunzione, aventi angoli di  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $45^\circ$ .



**Figura 1. 17:** Geometrie degli ostacoli utilizzati per formare la linea di giunzione nello studio di Ozcelik et al.

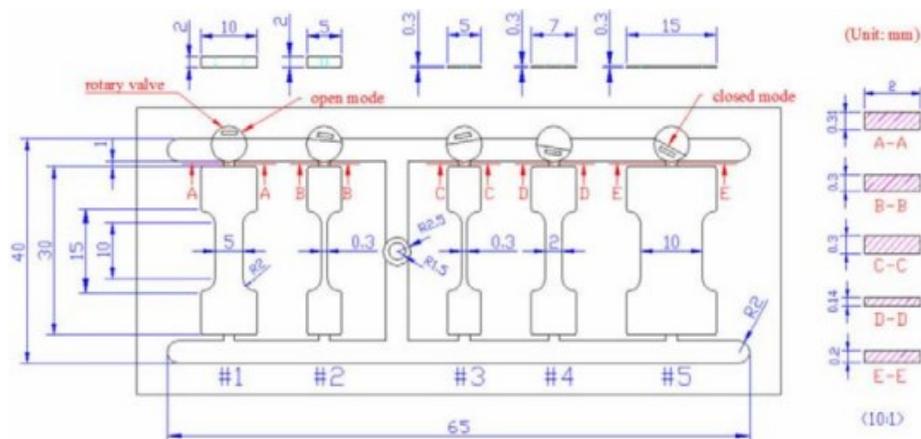
I risultati hanno dimostrato che la resistenza a trazione a all’impatto dei provini con linea di giunzione è inferiore rispetto a quelli senza linea di giunzione e la diminuzione maggiore si ha per la resistenza a impatto. Aumentando la pressione di impaccamento da 14MPa a 20MPa la resilienza per provini senza linea di giunzione tende ad aumentare, ma questo non è valido per i provini con linea di giunzione. Aumentando la temperatura del polimero e la pressione di impaccamento la resistenza a trazione non varia di molto sia per provini con linea di giunzione che per provini senza linea. Per quanto riguarda gli angoli è stato notato che la resistenza a trazione è maggiore quando l’angolo dell’ostacolo è di  $15^\circ$ .

Nel lavoro di Park et al. [13] è stato studiato l’effetto della temperatura della parete della cavità sulla linea di giunzione, in particolare in questa ricerca è stata aumentata la temperatura della superficie dello stampo nella zona dove si forma il difetto attraverso un sistema di

riscaldamento a induzione ad alta frequenza ed è stata analizzata l'estetica del componente stampato. In questo studio il riscaldamento è stato realizzato localmente nei punti dove si formano le linee di giunzione, individuati attraverso simulazione numerica e analisi sperimentale. Grazie a questa tecnica di riscaldamento la temperatura della superficie dello stampo vicino alla linea di giunzione arriva a 143°C dopo circa tre secondi, mentre il resto della piastra è a 60°C. Per quanto riguarda la fase di raffreddamento la zona riscaldata scende a circa 80°C dopo tre secondi in condizione di convezione naturale. In questo modo è possibile riscaldare e raffreddare velocemente e a livello locale la parete della cavità, evitando quindi il problema di inerzia termica che si ha utilizzando la tecnica del Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) e quindi senza aumentare troppo il tempo ciclo. Analizzando la superficie del pezzo in corrispondenza della linea di giunzione è stato osservato che la profondità dell'intaglio che si forma a seguito dell'incontro dei due fronti di flusso passa dai 2.943µm senza riscaldamento ai 0.298µm con il riscaldamento dimostrando la validità di questa tecnica nel ridurre l'impatto estetico della linea di giunzione.

Seldén [14] ha condotto uno studio sulle linee di giunzione utilizzando cinque materiali termoplastici: PA6 caricato con fibra vetro al 35%, PPS caricato con fibra di vetro al 40%, PP rinforzato con 40% di talco, PPO non rinforzato e ABS non rinforzato. Lo studio è stato condotto andando a variare quattro parametri: la pressione di mantenimento, la velocità di iniezione, la temperatura del polimero fuso e la temperatura di parete della cavità. Per valutare l'influenza di queste variabili sulle linee di giunzione è stato calcolato un fattore (WLF) dato dal rapporto tra la resistenza del provino con il difetto e la resistenza del provino senza difetto. Per ricavare le proprietà meccaniche dei provini sono state condotte delle prove di impatto, di flessione e di trazione. I risultati hanno condotto alle seguenti conclusioni: WLF più bassi sono stati ottenuti per i materiali rinforzati con fibre di vetro e con talco ( $WLF=0.25\div 0.77$ ), per i materiali non rinforzati sono stati ricavati valori di WLF compresi tra 0.84 e 0.98. Variando i parametri di stampaggio non si riscontrano variazioni significative sul WLF, ma è stato osservato che con pressioni di mantenimento maggiori, temperature del polimero maggiori e con temperature dello stampo più basse il WLF è più elevato, mentre l'effetto della velocità di iniezione può essere sia positivo che negativo a seconda del materiale. In generale comunque c'è una bassa correlazione tra i WLF ricavati da prove di flessione e quelli ottenuti da prove di impatto.

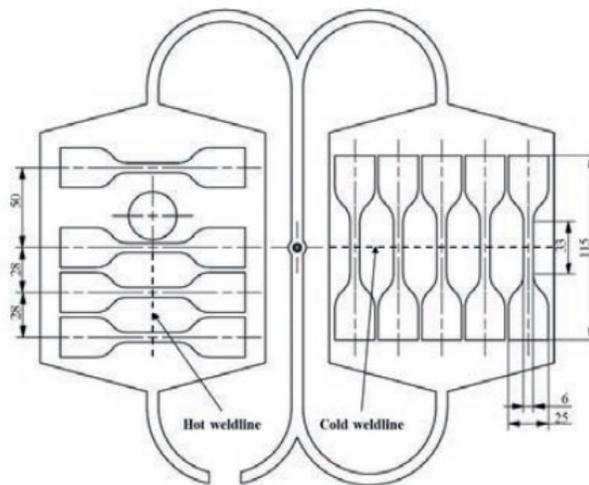
In una ricerca di Kuo e Jeng [15] è stata studiata l'influenza dei parametri di processo e della geometria della cavità sulla resistenza a trazione di provini con linea di giunzione e senza linea, usando come materiale UHMWPE. Le differenti geometrie dei provini sono riportate in Figura 1.18.



**Figura 1. 18:** Geometrie dei provini utilizzate nello studio di Kuo e Jeng.

Lo studio ha condotto alle seguenti conclusioni: per i provini realizzati in UHMWPE senza linea di giunzione la variazione delle dimensioni della sezione del tratto utile ha un maggiore effetto sulla resistenza a trazione rispetto alla variazione dei parametri di processo, la formazione della linea di giunzione riduce gli effetti delle dimensioni della sezione e dei parametri di stampaggio sulla resistenza a trazione. Il provino #4 è quello che presenta la resistenza maggiore in presenza della linea di giunzione seguito dal #5, #2, #1 ed infine il #3. In generale quindi più piccolo è lo spessore del tratto utile e maggiore è la resistenza della linea di giunzione, fa eccezione il provino #3 che ha la sezione minore, ma anche la resistenza più bassa. Questo viene attribuito ad un effetto di riscaldamento per attrito che è maggiore in questo provino perché presenta la sezione minore e va a modificare la viscosità del polimero e la resistenza della linea.

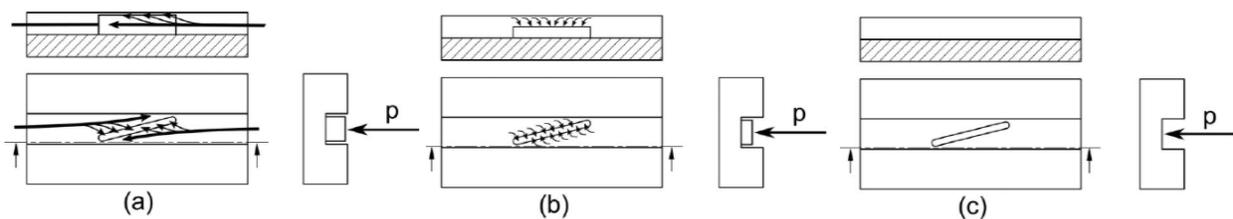
In uno studio di Chookaew *et al.* [16] è stata studiata la formazione di linee di giunzione in provini di gomma naturale andando a variare la concentrazione di cariche minerali e alcuni parametri di stampaggio. Le linee di giunzione sono state ricavate secondo due metodi come riportato in Figura 1.19: a sinistra il formarsi del difetto è dovuto alla presenza di un ostacolo, mentre a destra si forma dall'incontro di due flussi contrapposti di polimero.



**Figura 1. 19:** Geometria del pezzo stampato per lo studio di Chookaew *et al.*

I risultati hanno dimostrato che l'aggiunta di  $\text{CaCO}_3$  non ha effetti sulla resistenza della linea di giunzione, mentre aumentando la quantità di silice o di nerofumo la resistenza della linea decresce. È stato inoltre osservato che aumentando la temperatura dello stampo la resistenza a trazione dei provini senza il difetto tende a diminuire, mentre nei provini con linea di giunzione aumenta. Nel caso di linee di giunzione generate dalla presenza dell'ostacolo la resistenza aumenta all'aumentare della distanza dall'ostacolo stesso.

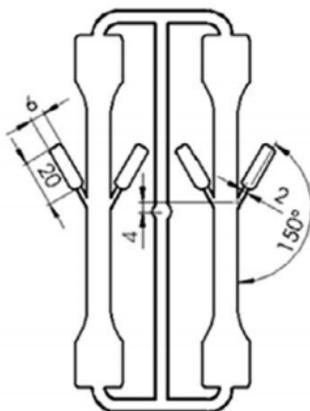
In un lavoro di Janko *et al.* [17] è stato implementato un metodo per modificare la direzione dei flussi di polimero quando si forma la linea di giunzione ed è stato studiato il suo effetto su polietere etere chetone (PEEK) rinforzato con fibra di carbonio. Per valutare l'efficacia del processo sono state condotte delle prove di trazione e di flessione. Il principio alla base di questo lavoro è quello di andare ad interferire con la formazione della linea di giunzione attraverso un ostacolo che ha il compito di modificare la direzione dei flussi di polimero che si incontrano con lo scopo di migliorare l'orientazione delle fibre. Questo ostacolo è progettato in modo da essere spinto fuori dalla cavità quando la pressione raggiunge un certo valore, per poi tornare in posizione una volta estratto il pezzo. In Figura 1.20 viene riportato il principio di funzionamento dell'ostacolo durante la fase di riempimento.



**Figura 1. 20:** *Principio di funzionamento dell’ostacolo nello studio di Janko et al.*

Grazie alla presenza dell’ostacolo la resistenza a flessione aumenta di circa 61÷66% rispetto ad un provino in cui questa nuova tecnica non viene utilizzata, mentre la resistenza a trazione aumenta del 22%. Il WLF per prove di trazione passa da 0.44 a 0.55 utilizzando l’ostacolo per deviare i flussi, mentre per prove flessionali passa da 0.44 a 0.74.

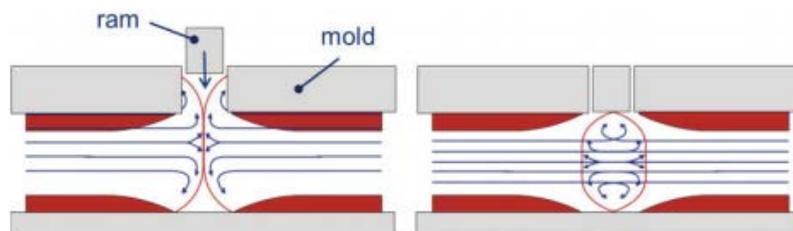
In un lavoro di Scantamburlo *et al.* [18] è stato studiato l’effetto della tecnica nota come “inflow” che consiste nel generare uno sbilanciamento di pressione tra i fronti di flusso che vanno a formare la linea di giunzione durante la fase di impaccamento. In questo lavoro il fenomeno di inflow è stato ottenuto andando a collocare delle appendici di materiale vicino alla linea di giunzione ed è stato valutato il loro effetto sulla morfologia della linea di giunzione e sull’orientazione delle fibre. I provini sono stati realizzati in polipropilene rinforzato con fibra corta di vetro. In Figura1.21 è riportata la geometria del pezzo stampato in cui è possibile notare la forma delle due appendici vicine alla linea.



**Figura 1. 21** *Geometria del pezzo stampato per lo studio dell’effetto del fenomeno di inflow nella ricerca di Scantamburlo et al.*

I risultati hanno dimostrato l'efficacia di questa nuova tecnica per realizzare il fenomeno di inflow, infatti la posizione e la geometria della linea di giunzione vengono modificate grazie all'aggiunta delle due appendici e si ha anche un effetto positivo sull'orientazione delle fibre nella zona del difetto. Grazie all'effetto di inflow il carico a rottura e la rigidità ottenuti da prove di trazione risultano superiori rispettivamente del 19% e del 15% rispetto a provini in cui questo fenomeno è assente.

In uno studio di Geyer e Bonten [19] è stata sviluppata e analizzata una tecnica per migliorare le proprietà della linea di giunzione basata sull'utilizzo di un pistone collocato nella zona dove si forma il difetto come riportato in Figura 1.22.



**Figura 1. 22:** Principio di funzionamento della tecnica adottata nello studio di Geyer e Bonten.

Quando il pistone è in posizione arretrata viene lasciato libero dello spazio in cavità che viene riempito con il polimero durante la fase di riempimento andando così a creare una specie di serbatoio di materiale che viene poi spinto dal pistone all'interno della cavità principale alla fine della fase di iniezione. In questo lavoro è stata anche valutata l'influenza dei parametri di processo sulle proprietà meccaniche della linea di giunzione. Per quanto riguarda l'istante di tempo a cui spingere il materiale con il pistone i risultati migliori sono stati ottenuti quando viene effettuato allo switch-over. Andando ad aumentare la velocità di iniezione si ha un aumento della resistenza a trazione, mentre la pressione di mantenimento e il suo profilo nel tempo hanno più che altro un effetto sulla fluttuazione dei risultati. In generale comunque l'utilizzo del pistone ha aumentato le proprietà meccaniche della linea di giunzione, questo perché spingendo il materiale nella cavità principale si va a modificare l'orientazione delle fibre nella zona del difetto.

Turng e Kharbas [20] hanno studiato gli effetti di alcuni parametri di stampaggio sulle proprietà meccaniche delle linee di giunzione in provini realizzati mediante stampaggio microcellulare. I parametri di processo selezionati sono: la temperatura del polimero fuso, la quantità di materiale iniettato, la concentrazione di gas nella soluzione polimero-gas e la velocità di iniezione. Dai risultati è stato notato che il parametro che influenza maggiormente la resistenza della linea di giunzione è la quantità di materiale iniettato. In generale è stato

osservato che la resistenza del difetto aumenta all'aumentare della velocità di iniezione, della temperatura del polimero fuso e della quantità di materiale iniettato, mentre la concentrazione di gas nella soluzione polimero-gas ha un effetto ridotto.

In una ricerca di Kagitci e Tarakcioglu [21] è stato studiato l'effetto della pressione di iniezione, del tempo di iniezione e della pressione di impaccamento sulla linea di giunzione di un componente realizzato in poliammide rinforzata con fibra di vetro (PA 6 GFR 30). Per valutare gli effetti della variazione di questi parametri sono state condotte prove di trazione ed analisi visive condotte con microscopio SEM. È stato osservato che se si imposta un tempo di iniezione più lungo aumenta la quantità di materiale che fluisce nello stampo, questo riduce la larghezza della linea di giunzione e aumenta la resistenza, un effetto analogo si ottiene aumentando la pressione di iniezione.

Nel lavoro di Wang *et al.* [22] sono stati studiati gli effetti della temperatura della superficie della cavità sulle proprietà meccaniche di provini con e senza linea di giunzione realizzati mediante rapid heat cycle molding (RHCM). Il processo di RHCM consiste nell'aumentare la temperatura della superficie dello stampo prima di iniettare il polimero in modo che sia maggiore della temperatura di transizione vetrosa o della temperatura di fusione del materiale. Una volta finita la fase di riempimento si va a raffreddare la superficie della cavità in modo che il componente si solidifichi, poi si estrae il pezzo e si ricomincia il ciclo. In questo studio sono stati impiegati sei materiali diversi per i provini: PS, PP, ABS, ABS/PMMA, ABS/PMMA/nano-CaCO<sub>3</sub> e PP rinforzato con fibra di vetro (FRPP). Per determinare le proprietà meccaniche dei provini sono state condotte delle prove di trazione e delle prove di impatto Izod. I risultati della ricerca hanno condotto alle seguenti conclusioni:

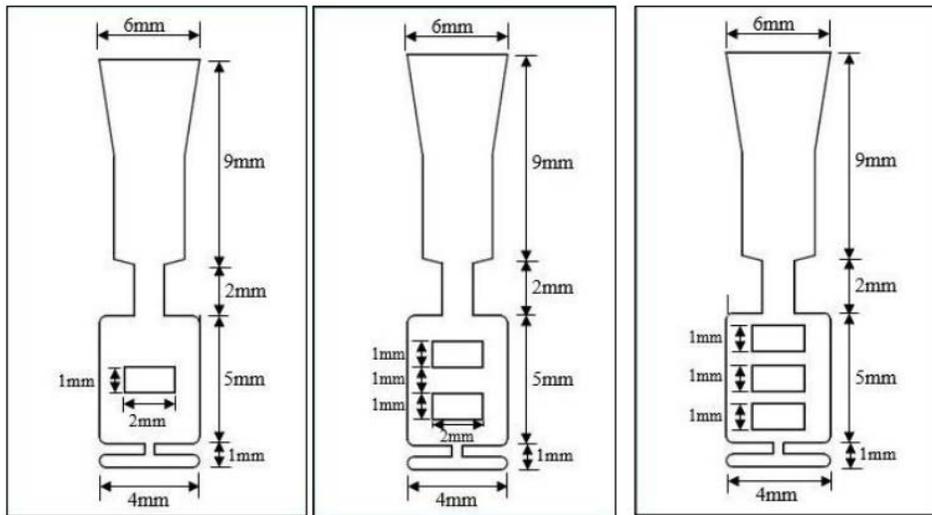
- La resistenza a trazione dei provini senza linea di giunzione realizzati in PS, ABS, ABS/PMMA, ABS/PMMA/nano-CaCO<sub>3</sub> e FRPP decresce poco e in modo graduale all'aumentare della temperatura della superficie della cavità, mentre per i provini in PP la resistenza a trazione fluttua in modo random.
- La resistenza a trazione dei provini con linea di giunzione realizzati in PS e PP aumenta gradualmente all'aumentare della temperatura, mentre per provini in ABS, ABS/PMMA, ABS/PMMA/nano-CaCO<sub>3</sub> e FRPP la resistenza si riduce. Il materiale FRPP si differenzia dagli altri perché quando la temperatura supera i 100°C la resistenza a trazione cala in modo marcato.
- Il fattore WLF derivante da prove di trazione può essere notevolmente migliorato nel caso di provini in PS aumentando la temperatura della parete delle cavità, mentre per FRPP tende a diminuire e per questo materiale risulta essere sempre minore di 0.4. Per gli altri materiali il WLF rimane sempre vicino a 1 per tutte le temperature di parete impostate.
- Il WLF derivante da prove di impatto oscilla tra 0.8÷1 nel caso del PS, è sempre maggiore a 1 nel caso di PP; per ABS, ABS/PMMA e ABS/PMMA/nano-CaCO<sub>3</sub>

varia rispettivamente tra  $0.6 \div 0.8$ ,  $0.5 \div 0.7$  e  $0.5 \div 0.7$ . Per i provini in FRPP questo fattore varia tra  $0.5 \div 0.8$  ed è quindi sempre maggiore rispetto al WLF calcolato per le prove di trazione.

Guo e Ait-Kadi [23] hanno studiato la morfologia e la resistenza meccanica della linea di giunzione di provini realizzati in un blend PS/PMMA (70/30) e PS/PMMA (30/70). Per valutare gli effetti dei due blend è stato utilizzato un microscopio SEM e sono state condotte delle prove di trazione. La ricerca condotta ha portato alla conclusione che il rapporto tra la viscosità della fase dispersa e la viscosità della matrice rappresenta un parametro che influenza molto la linea di giunzione di componenti realizzati utilizzando un blend di polimeri immiscibili, infatti la morfologia del difetto per i due blend studiati in questo lavoro è diversa. Nel caso di PS/PMMA (30/70) la viscosità della fase dispersa è minore della viscosità della matrice in PMMA, per questo materiale è stato osservato che il PS è assente vicino alla linea di giunzione e che le particelle di PS sono fortemente orientate parallelamente rispetto al difetto. Nel caso del blend PS/PMMA (70/30) la fase dispersa di PMMA nella zona della linea di giunzione ha forma sferica nel core layer. Il rapporto tra la resistenza a trazione dei provini con linea di giunzione e la resistenza dei provini senza linea di giunzione è maggiore per il blend PS/PMMA (70/30) rispetto al blend PS/PMMA (30/70), questo viene attribuito alla differente morfologia del materiale nella zona della linea di giunzione.

In uno studio di Hashemi [24] è stato valutato l'effetto della concentrazione di fibre, dello strain rate e della temperatura sulla resistenza di provini single gate e double gate realizzati in PBT rinforzato con fibra corta di vetro a varie percentuali: 0%, 10%, 20% e 30% in peso. Dai risultati è emerso che la resistenza a trazione dei provini single gate aumenta in modo non lineare all'aumentare della concentrazione di fibre. Per i provini double gate la resistenza a trazione risulta essere molto inferiore rispetto ai provini realizzati con un solo punto di iniezione nel caso di materiale rinforzato con fibre, mentre se i provini sono realizzati in PBT non rinforzato la riduzione è molto più contenuta. Sia per i provini single gate che per quelli double gate la resistenza a trazione aumenta in modo lineare rispetto al logaritmo naturale dello strain rate e diminuisce in modo lineare all'aumentare della temperatura. La resistenza a flessione per entrambi i tipi di provini è maggiore rispetto alla resistenza a trazione di un fattore pari a 1.6.

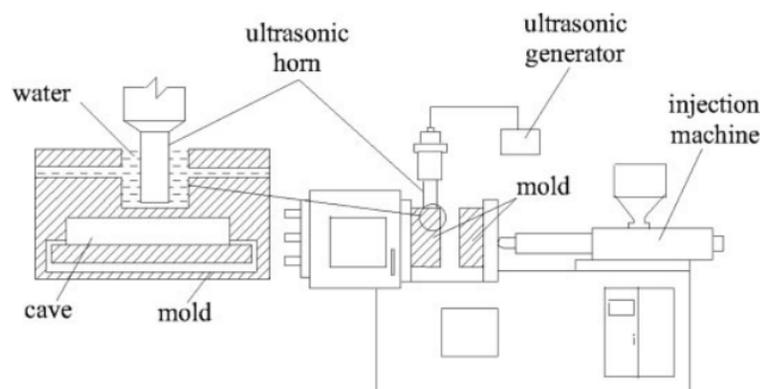
Nella ricerca di Dzulkipli e Azuddin [25] è stata studiata la formazione della linea di giunzione utilizzando polipropilene rinforzato con fibra di vetro e non rinforzato al variare di alcuni parametri come la temperatura, il materiale e il design della cavità. I risultati sperimentali relativi alla formazione delle linee di giunzione sono stati confrontati con quelli derivanti da un'analisi numerica condotta con Moldflow. Per studiare l'effetto della geometria della cavità sono stati realizzati tre stampi diversi come riportato in Figura 1.23.



**Figura 1. 23:** Geometria delle cavità utilizzate nello studio di Dzulklipli e Azuddin.

Lo studio ha evidenziato una somiglianza tra i risultati sperimentali e quelli derivanti da simulazione numerica nel caso di polipropilene non rinforzato che viene fuso ad una temperatura di 240°C e per polipropilene caricato con fibra di vetro, mentre per PP fuso a temperature di 250°C e 260°C i risultati sono molto diversi. È stato inoltre osservato che all'aumentare della temperatura si riduce la formazione del difetto e che per elevate concentrazioni di fibra si hanno linee di giunzione più corte e l'angolo con cui si incontrano i due flussi di materiale è più grande. Con riferimento alla Figura1.23 passando dalla geometria di sinistra a quella di destra la lunghezza della linea di giunzione diminuisce, mentre l'angolo con cui si forma non subisce grandi variazioni.

Nello studio di Lu *et al.* [26] è stato valutato l'effetto di oscillazioni ultrasoniche sulla linea di giunzione di provini realizzati in polistirene e con un blend polistirene-polietilene. In questa ricerca le vibrazioni sono state indotte vicino alla zona di formazione della linea di giunzione secondo due modi: nel modo I le vibrazioni sono state mantenute durante tutto il processo di stampaggio a iniezione, mentre nel modo II vengono fatte iniziare dopo la fase di riempimento. In Figura1.24 è riportato schematicamente l'apparato sperimentale utilizzato in questo studio.



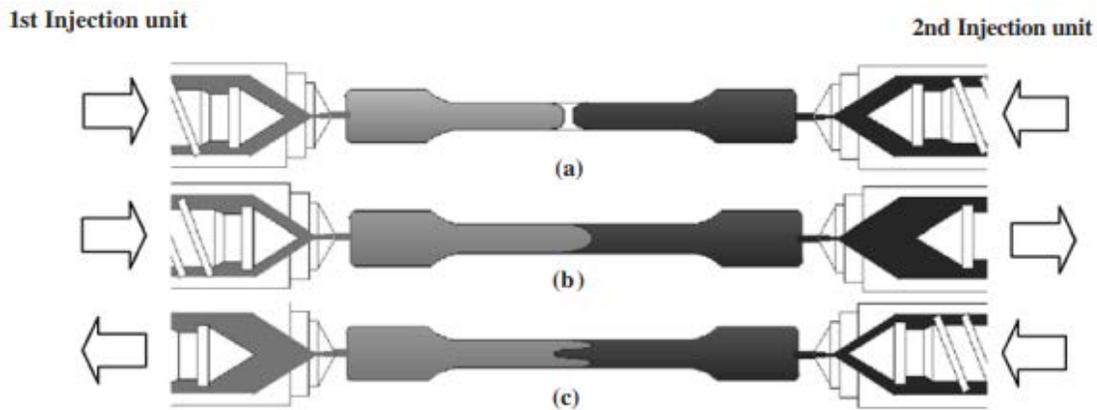
**Figura 1. 24:** Schema dell'apparato sperimentale utilizzato nello studio di Luo *et al.*

Nel caso di provini in PS l'utilizzo delle vibrazioni ultrasoniche riesce ad aumentare la resistenza della linea di giunzione, in particolare utilizzando il modo II l'effetto migliorativo derivante dall'applicazione delle vibrazioni risulta essere maggiore rispetto al modo I. L'aumento della resistenza della linea di giunzione è attribuito al fatto che le oscillazioni riescono a migliorare la diffusione delle macromolecole attraverso l'interfaccia della linea. Nel caso di blend PS-HDPE si nota un comportamento simile a quanto già detto nel caso di provini realizzati solo in PS.

In una ricerca di Yu *et al.* [27] è stato condotto uno studio sull'effetto che hanno le oscillazioni ultrasoniche sulla linea di giunzione di provini realizzati in polistirene, in polimetilmetacrilato e in un blend PS/PMMA 20/80, 50/50, 80/20. L'impiego di vibrazioni ultrasoniche consente di migliorare la resistenza a trazione di tutti i materiali studiati perché favoriscono la diffusione delle macromolecole attraverso l'interfaccia della linea di giunzione. Per quanto riguarda i blend utilizzati è stato notato che nel caso di PS/PMMA 80/20 l'effetto migliorativo indotto dalle oscillazioni è maggiore rispetto ai blend PS/PMMA 50/50 e PS/PMMA 20/80, questo è dovuto alla differente morfologia della fase dispersa. Nel caso di PS/PMMA 80/20 la fase dispersa ha una forma sferica, mentre negli altri blend il PS assume una morfologia a strisce orientate perpendicolarmente rispetto alla direzione di flusso, questo riduce l'effetto migliorativo indotto dalle oscillazioni.

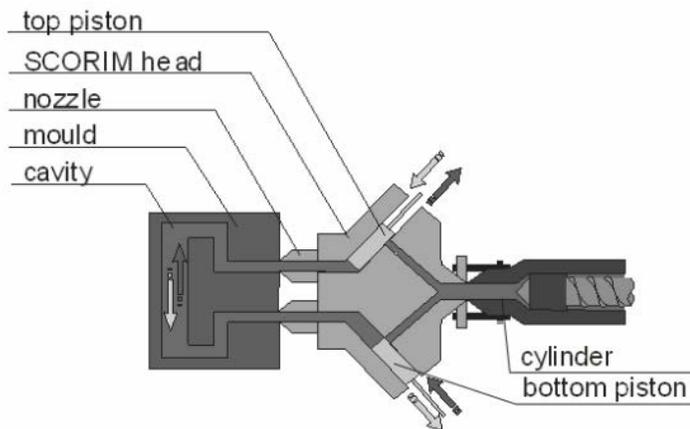
## 1.6 PUSH-PULL PROCESS

Il processo di push-pull viene impiegato nell'ambito dello stampaggio a iniezione con lo scopo di ridurre l'effetto indebolente delle linee di giunzione. Il principio alla base di questa tecnica è quello di alternare la pressione di mantenimento tra i due flussi in modo da spingere prima da una parte, poi dall'altra e così via come riportato schematicamente in Figura 1.25. In questo modo si riesce a ridurre l'effetto negativo che le linee di giunzione hanno sulle proprietà meccaniche del pezzo stampato, soprattutto se caricato con fibre, perché andando a spingere in modo alternato prima con un flusso e poi con l'altro si riescono a ri-orientare le fibre presenti nell'intorno della linea di giunzione che altrimenti avrebbero un'orientazione ortogonale rispetto alla direzione di riempimento.



**Figura 1. 25:** *Principio di funzionamento del processo di push-pull.*

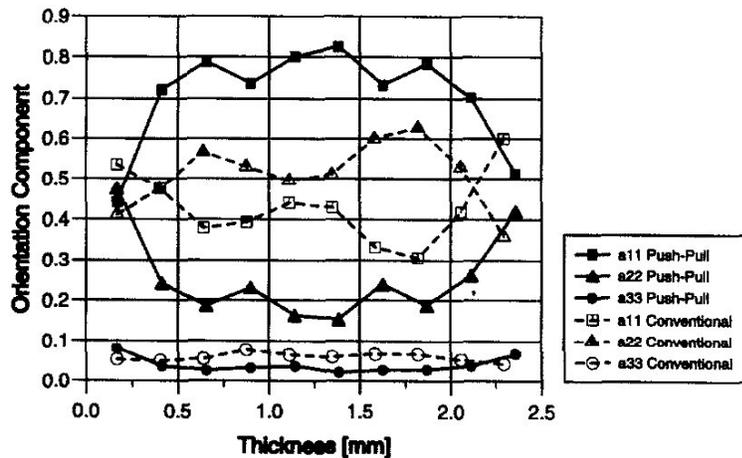
Generalmente per spingere il materiale nel processo di push-pull vengono utilizzati dei pistoni o due viti di plastificazione. Ne è un esempio la tecnica nota come SCORIM, il cui principio di funzionamento è schematizzato in Figura 1.26. Questa tecnologia prevede l'utilizzo di un solo cilindro di plastificazione e di due pistoni che servono a spingere in modo alternato il polimero verso la cavità.



**Figura 1. 26:** *Principio di funzionamento della tecnologia SCORIM per l'applicazione del processo di push-pull.*

Il problema è che questa tecnica non consente di agire localmente vicino alla linea di giunzione, inoltre l'unità aggiuntiva da inserire tra il cilindro di plastificazione e lo stampo è abbastanza ingombrante. Una soluzione potrebbe essere quella di inserire i pistoni all'interno dello stampo, ma questo richiederebbe comunque abbastanza spazio perché oltre all'ingombro del pistone bisogna considerare anche la corsa necessaria per la sua movimentazione. Utilizzando il gas per spingere il polimero fuso i pistoni vengono sostituiti da degli iniettori che occupano molto meno spazio e quindi sono più facilmente alloggiabili all'interno dello stampo.

L'effetto del processo di push-pull sull'orientazione delle fibre rispetto allo stampaggio a iniezione tradizionale è stato studiato da Ludwig *et al.* [28]. In questo lavoro i provini sono stati realizzati in polipropilene caricato con fibra, ma anche non caricato. Per quanto riguarda il materiale senza fibre è stato osservato come varia la cristallinità e la temperatura di fusione andando a stampare i provini con il processo di push-pull. Il primo parametro passa da 45.5% per il processo di stampaggio ad iniezione convenzionale a 48.8% applicando il push-pull, mentre la temperatura di fusione passa da 166.5°C a 165.8°C. In Figura 1.27 vengono riportate le componenti del tensore di orientazione per il materiale caricato fibra e realizzato tramite stampaggio a iniezione convenzionale e processo di push-pull.



**Figura 1. 27:** Componenti del tensore di orientazione per il materiale caricato fibra.  
(studio di Ludwing et al.)

Osservando il grafico riportato in Figura1.27 è possibile fare le seguenti considerazioni:

- La componente  $a_{33}$  del tensore, che rappresenta l’orientazione delle fibre lungo lo spessore, è bassa sia nel caso di stampaggio a iniezione convenzionale, sia nel caso di provini realizzati mediante processo di push-pull.
- La componente  $a_{11}$ , che rappresenta l’orientazione delle fibre lungo la direzione di flusso, è più alta nel caso di provini realizzati tramite processo di push-pull soprattutto se si considera il core layer.
- La componente  $a_{22}$ , che rappresenta l’orientazione delle fibre lungo la direzione ortogonale al flusso, è più bassa nel caso di provini realizzati tramite processo di push-pull, soprattutto se si considera il core layer.

Questi risultati portano alla conclusione che con il processo di push-pull si ha una maggiore orientazione delle fibre nella direzione di flusso e quindi si ha una maggiore anisotropia delle proprietà del pezzo stampato. In Figura1.28 vengono riportati gli andamenti delle curve sforzo-deformazione derivanti da prove di trazione condotte tirando i provini sia in direzione parallela al flusso che perpendicolarmente.

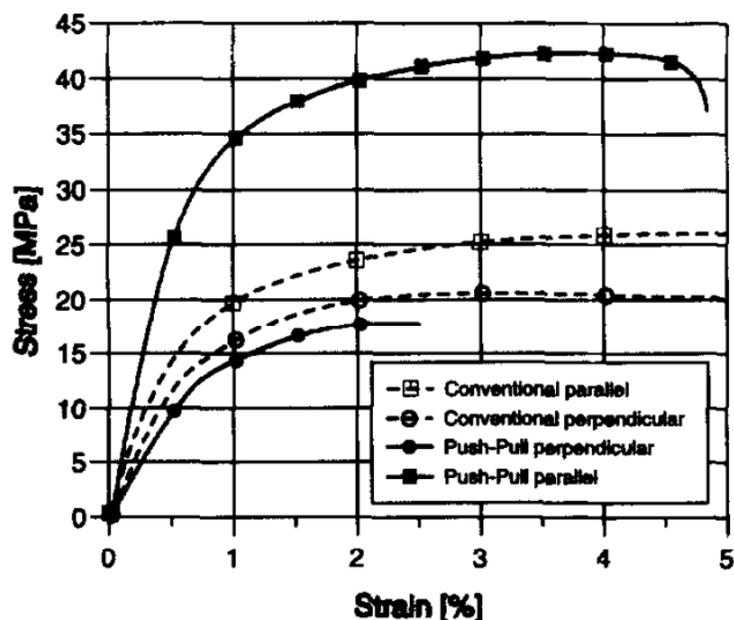
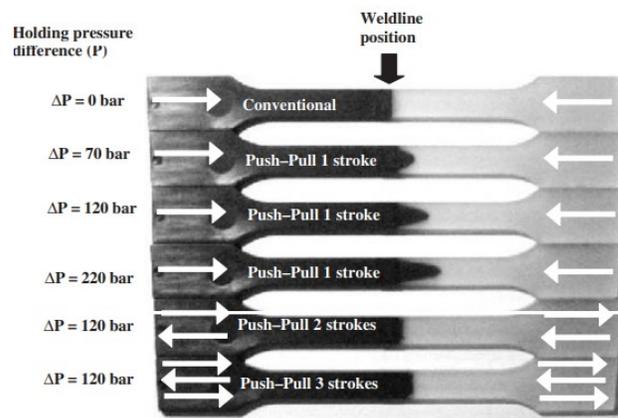


Figura 1. 28: Curve sforzo-deformazione derivanti da prove di trazione (studio di Ludwing *et al.*).

Le curve ottenute per provini realizzati mediante stampaggio a iniezione tradizionale sono abbastanza simili tra loro, questo può derivare dalla presenza di un core layer molto spesso in cui le fibre sono orientate in modo random. Nel caso di provini realizzati mediante processo di push-pull si nota invece una grande differenza tra le due curve con il carico ultimo a trazione lungo la direzione di flusso che è molto maggiore rispetto a quello lungo la direzione perpendicolare, ma anche rispetto ai provini realizzati mediante stampaggio a iniezione tradizionale. Questo dimostra la maggiore anisotropia delle proprietà meccaniche nel caso di provini realizzati tramite processo di push-pull dovuta alla maggiore orientazione delle fibre lungo la direzione di flusso.

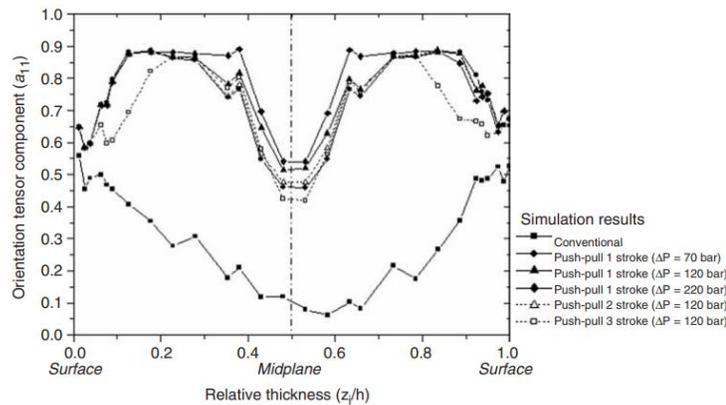
Due studi interessanti sul processo di push-pull sono stati condotti da Patcharaphun *et al.* Nel primo articolo [29] è stata studiata la resistenza della linea di giunzione in provini realizzati in policarbonato rinforzato con fibra corta di vetro a cui è stato applicato il processo di push-pull. In questo lavoro è stato anche valutato l'effetto della variazione della pressione di mantenimento e del numero di oscillazioni eseguite durante il processo di push-pull sulla resistenza della linea di giunzione dei provini. In Figura 1.29 si può notare come cambia la geometria del difetto al variare di questi parametri.



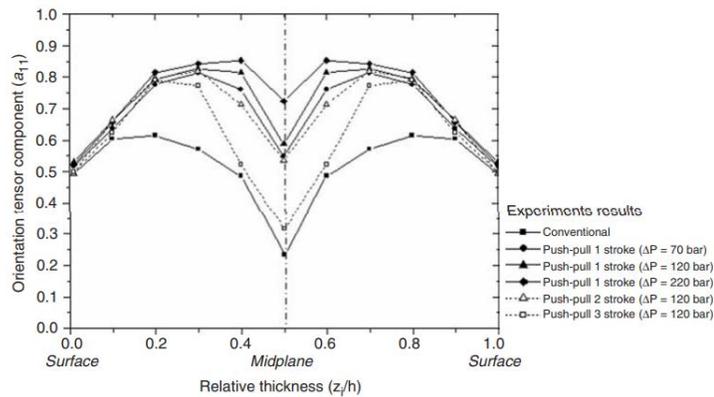
**Figura 1. 29:** *Variazione della geometria della linea di giunzione al variare dei parametri nello studio di Patcharaphun et al.*

I risultati hanno dimostrato che, mantenendo invariati gli altri parametri, la penetrazione di un flusso all'interno dell'altro aumenta all'aumentare della differenza tra le pressioni di mantenimento applicate ai due flussi. La relazione tra questi due parametri non è tuttavia di tipo lineare, questo viene attribuito a dei fattori legati alla reologia del materiale. È stato inoltre osservato che aumentando la concentrazione delle fibre nella matrice si riduce la penetrazione di un flusso all'interno dell'altro. Dai risultati delle prove di trazione è emerso che nel caso di provini realizzati in PC non rinforzato la presenza della linea di giunzione e l'applicazione del processo di push-pull non hanno una grande influenza sulla resistenza a trazione, mentre nel caso di PC rinforzato la presenza del difetto riduce di molto la resistenza rispetto ad un provino realizzato senza la linea di giunzione e questa riduzione si accentua all'aumentare della concentrazione di fibre. È stato inoltre osservato che, effettuando una sola oscillazione nel processo di push-pull, la resistenza della linea di giunzione aumenta all'aumentare della differenza tra le pressioni di mantenimento dei due flussi, se invece si mantiene costante questo parametro e si aumenta il numero di oscillazioni i risultati hanno dimostrato che passando da una a due oscillazioni la resistenza aumenta, ma se ne si eseguono tre diminuisce, rimanendo comunque superiore a quella di provini stampati senza l'applicazione del processo di push-pull.

In un secondo studio di Patcharaphun *et al.* [30] è stata implementata una simulazione in Moldflow per simulare e predire l'orientazione delle fibre nella zona della linea di giunzione durante il processo di push-pull. I risultati di questa simulazione sono stati confrontati con quelli derivanti da un'analisi sperimentale. In Figura1.30 è riportato l'andamento della componente  $a_{11}$  del tensore di orientazione derivante dalla simulazione numerica, mentre in Figura1.31 è riportato quello ottenuto dall'analisi sperimentale.



**Figura 1. 30:** Andamento della componente  $a_{11}$  del tensore di orientazione derivante da simulazione numerica (studio di Patcharaphun *et al.*).

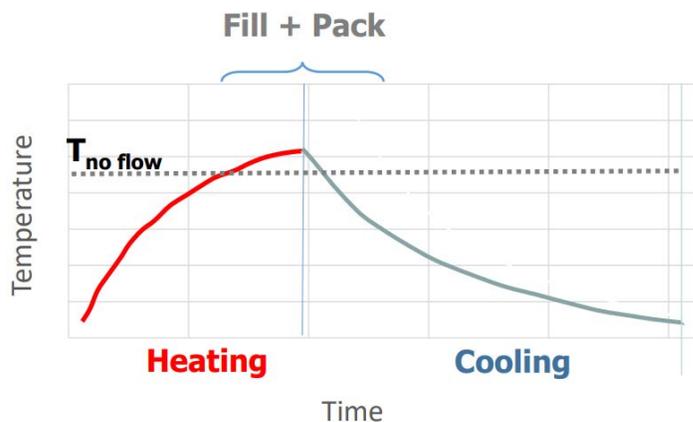


**Figura 1. 31:** Andamento della componente  $a_{11}$  del tensore di orientazione derivante da analisi sperimentale. (studio di Patcharaphun *et al.*).

Dai due grafici appena riportati si nota che i risultati derivanti da simulazione numerica hanno un andamento simile a quelli ottenuti per via sperimentale, tuttavia si notano alcune differenze che vengono attribuite al coefficiente di interazione tra le fibre  $C_1$  utilizzato in fase di simulazione. In questo studio sono stati variati gli stessi parametri del primo articolo di Patcharaphun *et al.* [29] citato in precedenza, dai risultati è emerso che l'orientazione delle fibre lungo la direzione di flusso aumenta all'aumentare della differenza tra le pressioni di mantenimento dei due flussi, mentre aumentando il numero di oscillazioni nel processo di push-pull non si osservano significativi miglioramenti.

## 1.7 RAPID HEAT CYCLE MOLDING

[5] Il Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) è una tecnica speciale di stampaggio a iniezione in cui si va a modificare nel tempo la temperatura della parete della cavità attraverso il passaggio alternato di acqua calda e fredda nei canali dello stampo. Questa alternanza viene gestita da un termoregolatore collegato allo stampo in grado di controllare due diversi circuiti: uno per l'acqua calda e uno per l'acqua fredda. Lo scopo di questa tecnologia è quello di aumentare la temperatura di parete della cavità prima di iniettare il polimero fuso in modo che quando questo viene in contatto con lo stampo si riduca o si elimini la formazione di pelle, una volta che la cavità è stata riempita è necessario far circolare acqua fredda per consentire il raffreddamento del pezzo stampato. Rispetto allo stampaggio a iniezione convenzionale è quindi necessario aspettare che la parete dello stampo si scaldi, il tempo ciclo è perciò più lungo a causa dell'inerzia termica durante questa fase. Per poter riscaldare e raffreddare più velocemente è possibile realizzare dei canali con diametro più piccolo, più vicini tra loro e alla cavità, questo però può comportare dei problemi di tipo strutturale perché la parete della cavità potrebbe deformarsi. In Figura 1.32 è riportato l'andamento tipico della temperatura di parete della cavità in un ciclo di RHCM.



**Figura 1.32:** Andamento della temperatura della parete della cavità nel processo di RHCM.

La tecnica di RHCM presenta quindi i seguenti vantaggi:

- Lo spessore della pelle è ridotto o nullo.
- Si riesce a replicare bene la superficie della cavità.
- Riducendo lo spessore della pelle il passaggio per il polimero fuso è più largo, questo permette di usare pressioni più basse.
- Si ottengono proprietà estetiche migliori e si migliora l'effetto gloss.

- Si elimina o si riduce il fenomeno di jetting.
- Si riducono i gradienti di pressione e quindi la birifrangenza.
- Ha un effetto benefico sulle linee di giunzione.

Presenta però i seguenti svantaggi:

- Il tempo ciclo è maggiore rispetto allo stampaggio a iniezione tradizionale.
- Per ridurre l'inerzia termica è possibile progettare uno stampo ad hoc, con un conseguente aumento dei costi.
- Aumenta il costo di impianto perché è necessario utilizzare dei macchinari specifici.
- Se si utilizza uno stampo con i canali molto vicini alla cavità per ridurre l'inerzia termica si possono avere dei problemi strutturali.



# Capitolo 2

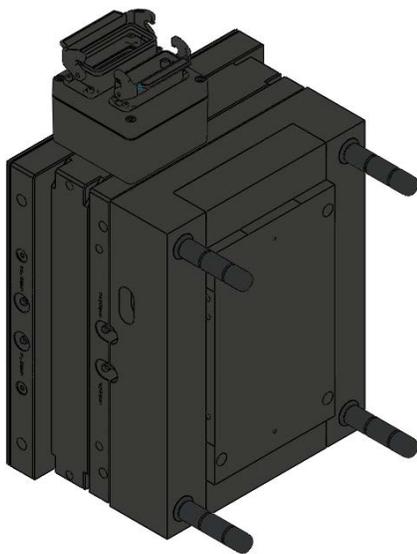
## Setup sperimentale

In questo capitolo si descrivono gli strumenti utilizzati e le procedure preliminari necessarie per poter svolgere gli studi, in particolare si riporta la geometria dello stampo, i materiali e i macchinari impiegati, si dà una descrizione del metodo usato per determinare i parametri di processo, di come sono state condotte le prove di trazione e le prove per la caratterizzazione del materiale nello studio sulla determinazione della temperatura di soglia.

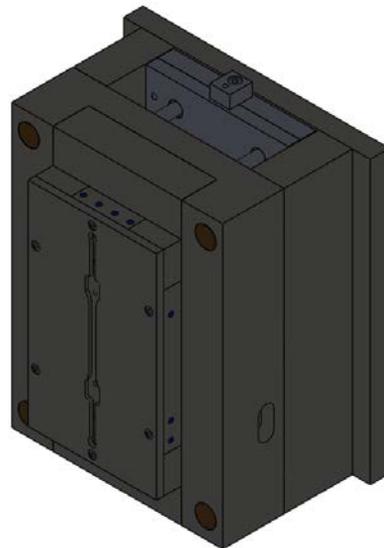
### 2.1 GEOMETRIA DELLO STAMPO

#### 2.1.1 Geometria dello stampo per lo studio sull'influenza del MFR

Lo stampo utilizzato in questo lavoro è uno stampo a due piastre con canali caldi e con due punti di iniezione. In Figura 2.1 viene riportata la geometria dell'assieme fisso, mentre in Figura 2.2 l'assieme mobile.



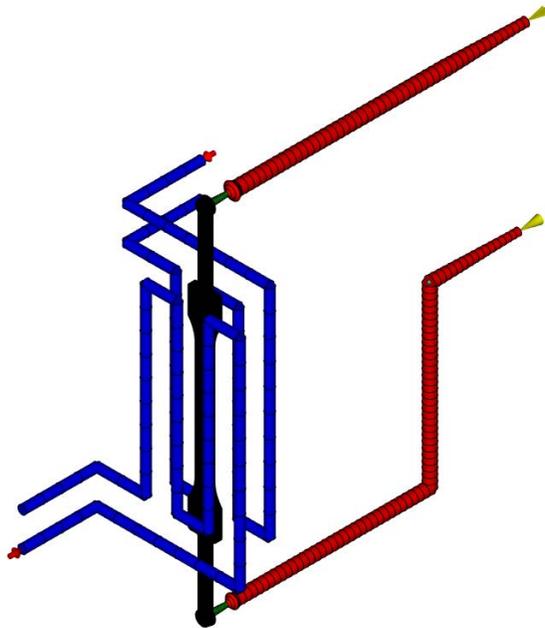
**Figura 2. 1:** Geometria dello stampo: metà fissa.



**Figura 2. 2:** Geometria dello stampo: metà mobile.

Per poter far funzionare le camere calde la metà fissa è collegata ad una centralina tramite l'elemento posto sulla parte superiore, inoltre sia la metà mobile che la metà fissa sono collegate ad un termoregolatore che invia acqua ad una temperatura impostata per poter raffreddare il polimero fuso nella cavità e anche i vari elementi dello stampo. A sua volta il termoregolatore è collegato ad un chiller che ha il compito di raffreddare l'acqua calda che proviene dallo stampo e di inviare l'acqua fredda verso il termoregolatore.

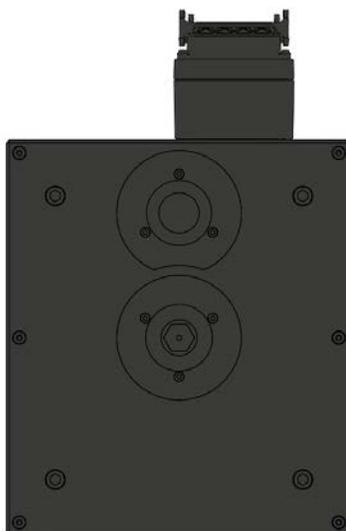
In Figura 2.3 viene riportato il layout dei canali di raffreddamento e dei canali caldi.



**Figura 2. 3:** *Layout dei canali di raffreddamento e dei canali caldi.*

Come si può notare la geometria dei due canali caldi che conducono il polimero fuso dai cilindri di iniezione alla cavità è diversa, questo genera perdite di carico differenti lungo i due percorsi e quindi le pressioni di impaccamento da impostare per lo stampaggio saranno differenti. Questa differenza tra i due percorsi è necessaria a causa della posizione ravvicinata dei due cilindri di iniezione che caratterizzano la macchina come si può notare in Figura 2.4 dove viene riportata la geometria della piastra che va a contatto con i due iniettori.

Per poter far arrivare il polimero fuso dai due punti di iniezione alla cavità del provino sono previsti due tratti di materozza che verranno poi rimossi per ottenere il pezzo finito.



**Figura 2. 4:** Piastra fissa a contatto con i cilindri di iniezione.

In Tabella 2.1 sono riportate le dimensioni principali dei canali di raffreddamento.

**Tabella 2. 1:** Dimensioni dei canali di raffreddamento.

Numero canali	4
Lunghezza canali [mm]	129
Diametro canali [mm]	6
Passo tra i canali [mm]	22
Distanza dalla cavità [mm]	16,5

Nella macchina per lo stampaggio a iniezione i due cilindri sono identificati nel seguente modo:

- Il cilindro superiore è identificato con la lettera B.
- Il cilindro inferiore è identificato con la lettera A.

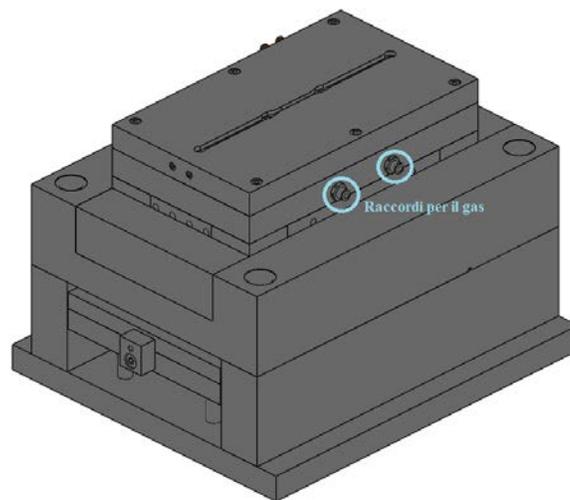
Il riscaldamento delle camere calde dei canali di alimentazione viene gestito attraverso una centralina collegata alla metà fissa dello stampo. In totale sono necessari cinque segnali in uscita dalla centralina: due sono destinati alle camere calde per il canale superiore, mentre gli altri tre servono per il riscaldamento del canale di alimentazione inferiore. I valori di temperatura impostati nella centralina verranno riportati in seguito nel *paragrafo 2.3*.

### 2.1.2 Geometria dello stampo per il processo di PPGAIM

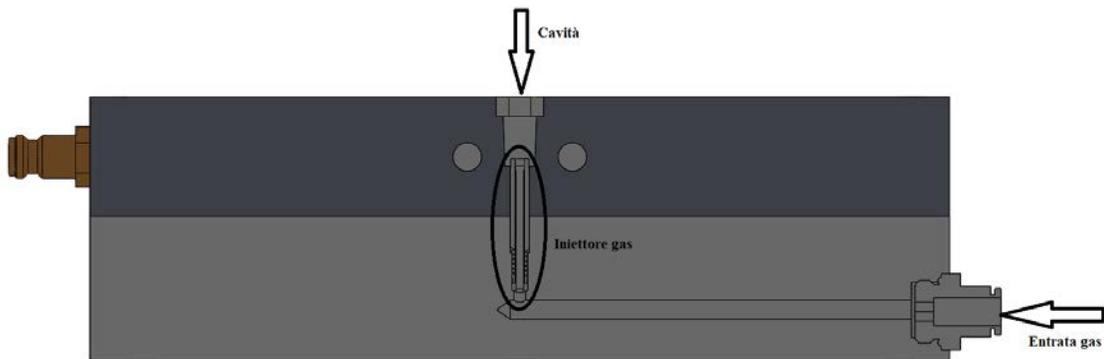
Per poter realizzare il processo di push-pull assistito da gas è stato necessario apportare delle modifiche allo stampo esistente che rispettassero i seguenti requisiti:

- Realizzare dei canali per il gas che comprendano anche i fori per l'alloggiamento degli iniettori.
- Ridurre al minimo le zone dove si possono avere trafilementi del gas.
- Creare dei serbatoi di materiale da svuotare con il gas.
- Contenere i costi.
- Rendere veloce e semplice il passaggio dalla configurazione di stampaggio a iniezione tradizionale a quella relativa al processo di push-pull assistito da gas.
- Rendere agevole l'inserimento degli iniettori del gas e la loro rimozione nel caso venissero danneggiati.

Una volta definiti questi requisiti sono state progettate le modifiche necessarie richieste dalla nuova tecnica di stampaggio. La soluzione individuata prevede la sostituzione della piastra dove è presente la cavità con altre due piastre che hanno i seguenti scopi: in una vengono realizzati i canali per il gas e gli alloggiamenti per gli iniettori, nella seconda è presente la cavità e i canali di raffreddamento. In Figura2.5 è riportato l'assieme relativo alla metà mobile dello stampo in cui sono state inserite le nuove piastre, mentre in Figura2.6 la vista in sezione dell'assieme che serve ad evidenziare il percorso che fa il gas attraverso lo stampo fino agli iniettori.



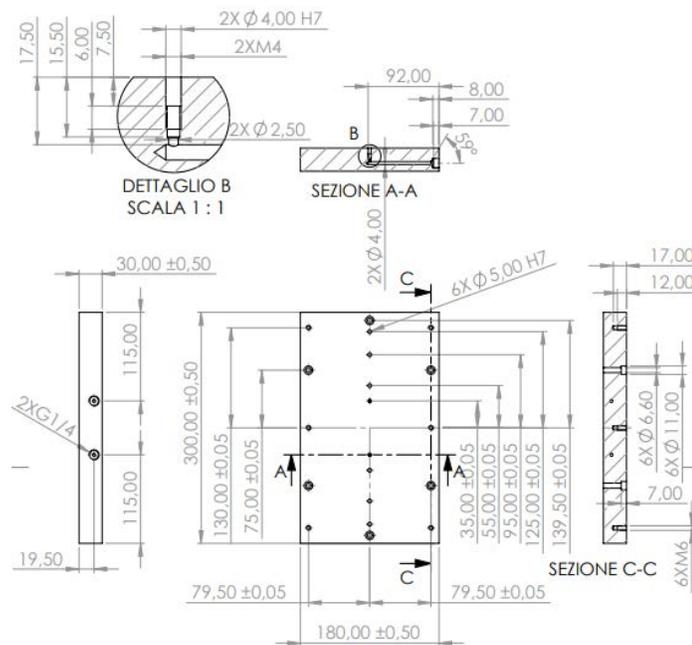
**Figura 2. 5:** *Assieme mobile con le modifiche necessarie per il processo di PPGAIM.*



**Figura 2. 6:** Vista in sezione dell'assieme delle piastre utilizzate per il processo di PPGAIM.

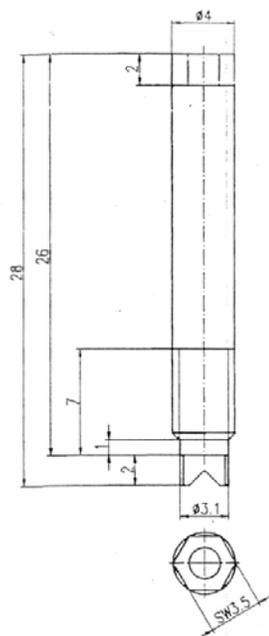
Come si può notare i canali per il gas sono contenuti all'interno di un'unica piastra e non attraversano piani di separazione, in questo modo le uniche zone dove si possono avere dei trafiletti sono le filettature dell'iniettore e del raccordo, inoltre la realizzazione di due piastre, invece di una unica, consente di inserire agevolmente gli iniettori.

In Figura2.7 e in Figura2.8 vengono riportati rispettivamente i disegni tecnici della piastra portastampo, cioè quella in cui sono stati realizzati i canali per il gas, e della piastra con la cavità.



**Figura 2. 7:** Disegno tecnico della piastra portastampo.





**Figura 2. 9:** *Disegno tecnico dell'iniettore di gas fornito dall'azienda Bauer.*

Per far arrivare il gas agli iniettori è stato pensato di utilizzare bombole di azoto collegate con i raccordi presenti sullo stampo, mentre per poter controllare il flusso del gas in modo da alternare la spinta esercitata sul materiale si può utilizzare una centralina che comanda l'apertura di due valvole.

Le dimensioni dei canali di raffreddamento realizzati nella piastra in cui è presente la cavità sono riassunti nella Tabella 2.2.

**Tabella 2. 2:** *Dimensioni dei canali di raffreddamento realizzati nella piastra per PPGAIM.*

Numero canali	2
Lunghezza canale 1 [mm]	150
Lunghezza canale 2 [mm]	130
Diametro canali [mm]	6
Passo tra i canali [mm]	22
Distanza dalla cavità [mm]	8,5

## 2.2 GEOMETRIA DEI PEZZI STAMPATI

### 2.2.1 Provino per lo studio sull'influenza del MFR

Le dimensioni del provino sono state ricavate dalla normativa ISO 527 [31] relativa alle prove di trazione per materiali polimerici. La geometria utilizzata fa riferimento al provino di tipo 1A riportato a pagina 3 della ISO 527-2 e in Figura 2.10 di questo elaborato. Il provino ha uno spessore di 4mm.

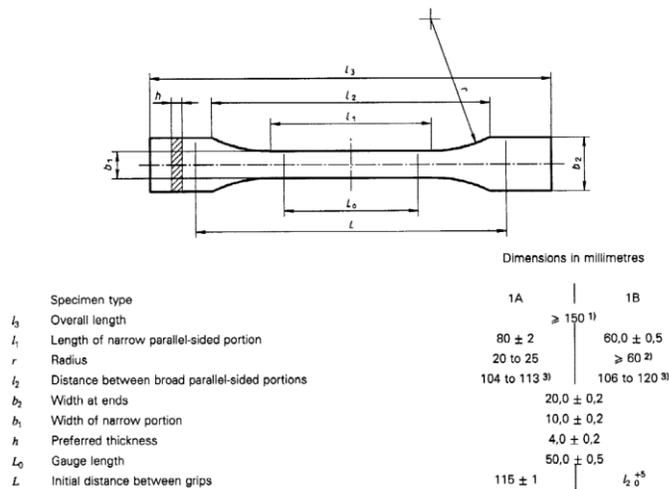


Figura 2. 10: Dimensioni del provino per le prove di trazione.

La geometria del pezzo stampato è in realtà un po' diversa perché sono presenti anche delle materozze a destra e a sinistra che servono a portare il polimero fuso dai due punti di iniezione alla cavità. Per cui la geometria del pezzo stampato è quella riportata in Figura 2.11.



Figura 2. 11: Geometria del pezzo stampato.

Le due materozze laterali dovranno poi essere rimosse per ottenere il provino finito da utilizzare nelle prove di trazione.

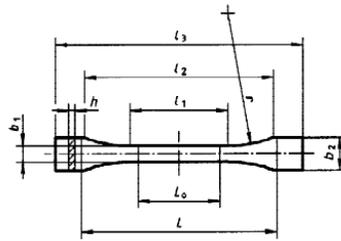
Il materiale impiegato per realizzare questi provini è un polipropilene rinforzato con fibra di vetro al 35%: ISOGLASS XT 7001H fornito da Sirmax S.p.A. (Cittadella, Italia) a tre diversi valori di MFR: 1.2g/10', 5.9g/10' e 10.7g/10'. Nella Tabella 2.3 viene riportata la scheda tecnica del materiale ricavata dal sito dell'azienda [32], le proprietà però fanno riferimento ad un materiale con MFR=3g/10'.

**Tabella 2. 3:** Scheda tecnica del materiale utilizzato ricavata dal sito dell'azienda Sirmax..

Properties	Method	Unit	Value
<b>Physical</b>			
Melt flow rate (230°C - 2,16 Kg)	ISO 1133	g/10'	3
Density at 23°C	ISO 1183	g/cm3	1,16
Mould Shrinkage (%)	INTERNAL	%	0,2 – 0,4
Filler content (1h/600°C)	ISO 3451-1	%	35
<b>Thermal</b>			
Vicat B50	ISO 306	°C	142
HDT, A (1.80 MPa)	ISO 75/Ae	°C	152
<b>Mechanical at 23 °C</b>			
Flexural Modulus (23°C - 2 mm/min)	ISO 178	MPa	8000
Tensile stress at yield (23°C-50 mm/min)	ISO 527-2	MPa	105
Izod notched impact strength (23°C) ISO	ISO 180/1A	KJ/m <sup>2</sup>	12
<b>Flammability Class</b>			
Flammability class (1,6 mm)	UL94		HB

### 2.2.2 Provino per il processo di PPGAIM

L'idea alla base dell'utilizzo del gas per spingere in modo alternato il polimero fuso è quella di agire vicino alla linea di giunzione, a differenza del processo di push-pull tradizionale in cui generalmente si utilizzano le viti di plastificazione o dei pistoni che sono lontani dalla zona dove si forma il difetto. Per poter spingere il polimero fuso con il gas è necessario prevedere la presenza di due serbatoi di materiale che andranno poi svuotati e che vengono posizionati alle estremità, dove il provino è più largo. Per questo motivo i provini realizzati per lo studio dell'effetto del processo di PPGAIM sulla linea di giunzione sono più piccoli rispetto a precedenti. Le dimensioni fanno ancora riferimento alla normativa ISO 527-2 ed in particolare alla geometria del provino di tipo 1BA riportato a pagina 4 della normativa e in Figura 2.12 di questo elaborato.



Dimensions in millimetres

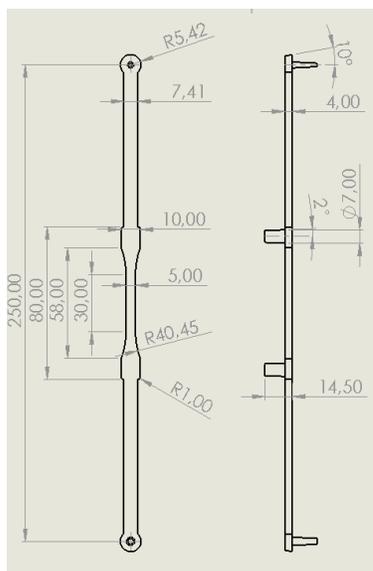
Type of specimen	1BA	1BB
$l_3$ Overall length	$> 75$	$> 30$
$l_1$ Length of narrow parallel-sided portion	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
$r$ Radius	$\geq 30$	$\geq 12$
$l_2$ Distance between broad parallel-sided portions	$58 \pm 2$	$23 \pm 2$
$b_2$ Width at ends	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
$b_1$ Width of narrow portion	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
$h$ Thickness	$> 2$	$> 2$
$L_0$ Gauge length	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
$L$ Initial distance between grips	$l_2^{+2}$	$l_2^{+1}$

**Figura 2. 12:** Dimensioni del provino per il processo di PPGAIM (da normativa).

Per poter realizzare i due serbatoi di materiale che verranno poi svuotati con il gas alcune dimensioni come la lunghezza complessiva del provino ( $l_3$ ) e il raggio ( $r$ ) sono state modificate, sempre però nel rispetto delle indicazioni presenti nella normativa. Il pezzo stampato comprende anche due tratti di materozza che servono per portare il polimero fuso dai punti di iniezione alla cavità principale che verranno poi rimossi. In Figura2.13 è raffigurata la geometria del pezzo stampato, mentre in Figura2.14 sono riportate le dimensioni.



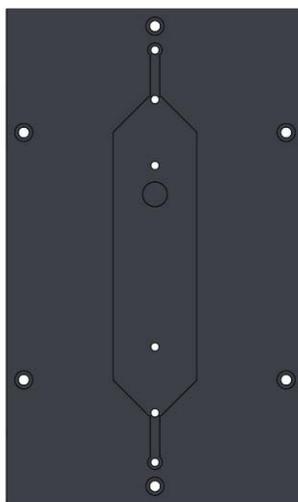
**Figura 2. 13:** Geometria del pezzo stampato per il processo di PPGAIM.



**Figura 2. 14:** *Disegno tecnico del pezzo stampato per il processo di PPGAIM.*

### 2.2.3 Placca per la determinazione della temperatura di soglia

Per condurre lo studio sulla determinazione della temperatura di soglia oltre la quale si elimina l'impatto estetico della linea di giunzione sono state stampate delle placchette in polipropilene caricato con mica: Dafnelen HR12 mineral silver, fornito dall'azienda Sirmax S.p.A. utilizzando la piastra riportata in Figura2.15.



**Figura 2. 15:** *Geometria della cavità per lo stampaggio delle placche nello studio sulla temperatura di soglia.*

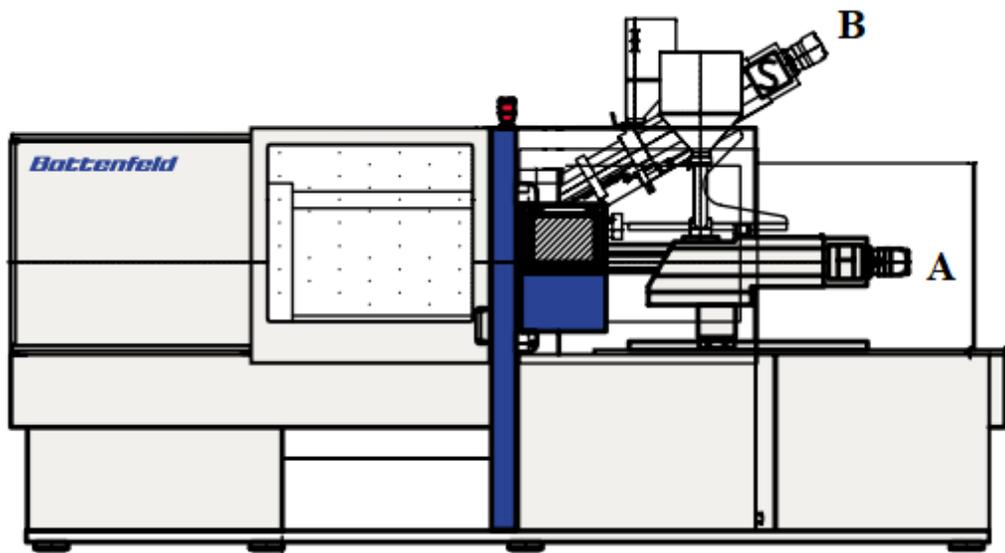
Come si può notare dalla Figura 2.15 la placca presenta due gate e un ostacolo circolare che consentono di ottenere rispettivamente una weld line e una meld line, è necessario quindi studiare l'effetto della temperatura dello stampo e del processo di push-pull su entrambi questi difetti. Il pezzo stampato avrà quindi la geometria riportata in Figura 2.16.



**Figura 2. 16:** *Placche stampate per la determinazione della temperatura di soglia.*

## **2.3 PARAMETRI DI PROCESSO**

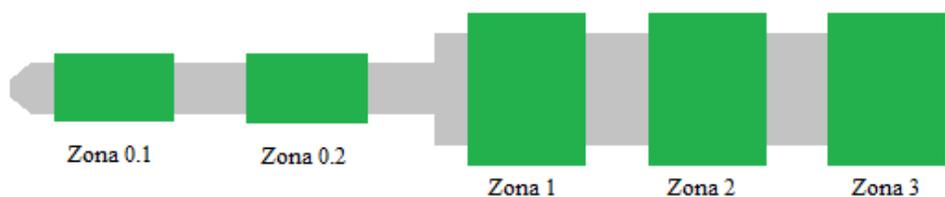
I parametri di processo sono stati ricavati in parte da studi realizzati in passato sullo stesso materiale e in parte per via sperimentale andando a stampare dei provini di prova. La macchina utilizzata per lo stampaggio a iniezione è la Battenfeld HM 110/525H/210S. La S identifica il tipo di configurazione della macchina, in particolare determina la posizione relativa dei due cilindri di iniezione: il primo è orizzontale, mentre il secondo è posizionato diagonalmente rispetto al primo. Entrambi gli ugelli sono comunque ortogonali alla piastra fissa. I due cilindri possono essere movimentati e gestiti in modo indipendente e sono termicamente separati. In Figura 2.17 viene riportato un disegno di insieme della macchina per lo stampaggio, da notare la posizione dei due cilindri di plastificazione e le lettere con cui vengono identificati.



**Figura 2. 17:** *Disegno di insieme della macchina per lo stampaggio a iniezione.*

### 2.3.1 Temperature per lo studio sull'influenza del MFR

Le temperature impostate sono state ricavate da studi precedenti in cui è stato utilizzato lo stesso materiale e lo stesso stampo. I due cilindri di plastificazione sono riscaldati da delle resistenze e sono suddivisi in zone come riportato schematicamente in Figura 2.18, nel cilindro A la zona 0.2 è mancante.

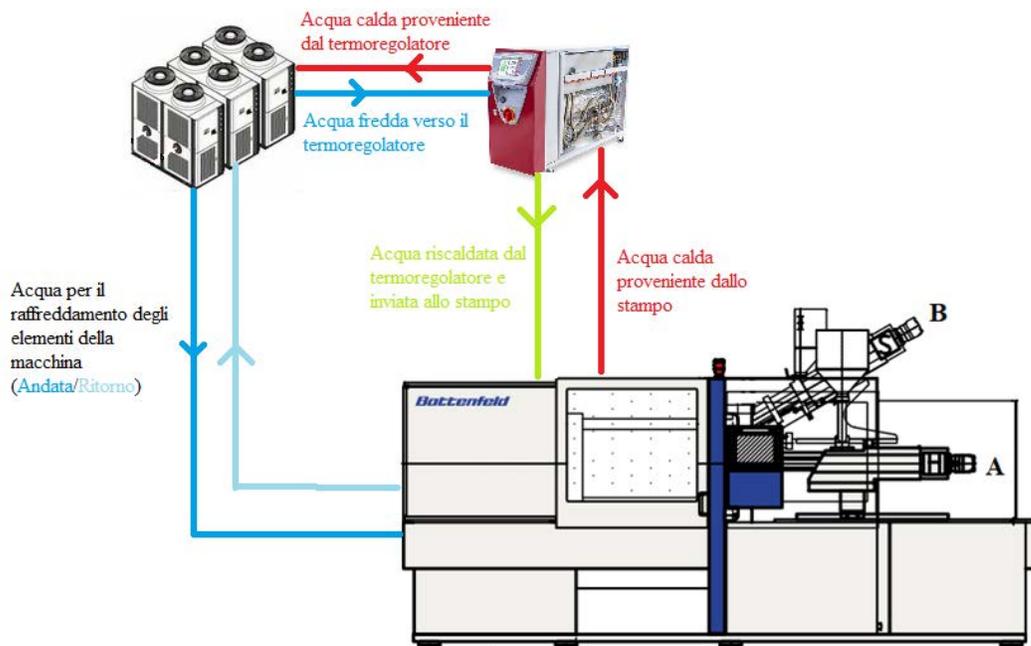


**Figura 2. 18:** *Collocazione delle resistenze lungo il cilindro di plastificazione.*

Per ciascuna zona è possibile impostare attraverso il pannello della macchina una temperatura di riferimento che deve essere raggiunta dalla resistenza e dei limiti di tolleranza. La zona 0.1 e la zona 0.2 servono per riscaldare l'ugello, mentre le altre tre resistenze riscaldano il tratto terminale del cilindro di plastificazione.

Le temperature delle camere calde dei canali di alimentazione sono invece controllate attraverso una centralina che si collega allo stampo. Anche in questo caso vengono identificate cinque zone: due fanno riferimento al canale caldo relativo al cilindro superiore e le altre tre fanno riferimento al canale caldo relativo al cilindro inferiore. La temperatura impostata per i canali caldi sarà la stessa che si ha nell'ultima zona del cilindro di plastificazione, mentre nella zona del gate viene scelta una temperatura superiore.

La temperatura dell'acqua di raffreddamento viene impostata su un termoregolatore collegato con lo stampo. L'acqua calda che esce dallo stampo viene raffreddata facendola passare in un chiller che poi la invia nuovamente al termoregolatore e quindi torna allo stampo. In Figura 2.19 è riportato schematicamente il percorso dell'acqua di raffreddamento.



**Figura 2. 19:** Schema del percorso dell'acqua di raffreddamento.

Nella Tabella 2.4 vengono riportate le temperature impostate per i cilindri di plastificazione, per i canali caldi e per l'acqua di raffreddamento.

**Tabella 2. 4:** Parametri di processo: temperature impostate.

<b>CILINDRI DI PLASTIFICAZIONE</b>			
Cilindro A		Cilindro B	
Zona 0,1	240 °C	Zona 0,1	240 °C
Zona 0,2	/	Zona 0,2	240°C
Zona 1	230°C	Zona 1	230°C
Zona 2	210°C	Zona 2	210°C
Zona 3	180°C	Zona 3	180°C
<b>CENTRALINA</b>			
Gate (x2)		320°C	
Canali caldi (x3)		240°C	
<b>TERMOREGOLATORE</b>			
Temperatura impostata		70°C	
<b>CHILLER</b>			
Temperatura impostata		16°C	

### *2.3.2 Temperature per la determinazione della temperatura di soglia*

Per determinare la temperatura di soglia oltre la quale non si vede più la linea di giunzione sul lato estetico del pezzo stampato è stato usato lo stesso stampo utilizzato nello studio sull'influenza del MFR, quindi le zone identificate in precedenza per il riscaldamento dei cilindri e il numero di canali in uscita dalla centralina per riscaldare il sistema di alimentazione sono gli stessi anche per questo studio. Il materiale utilizzato è sempre polipropilene quindi anche le temperature impostate sono le stesse, l'unica eccezione è la temperatura dei due tratti terminali dei canali caldi che è stata impostata a 280°C. In questo studio viene sempre utilizzato un chiller per raffreddare l'acqua calda e un termoregolatore che però serve solo a raffreddare alcuni elementi dello stampo e non la cavità, per questo motivo la temperatura è stata impostata a 20°C.

Il processo di RHCM viene gestito da un termoregolatore con due circuiti d'acqua e da un gruppo di valvole che servono per alternare il passaggio dell'acqua calda e di quella fredda, il termoregolatore usato è il Temprow plus D Variotherm dell'azienda Wittmann Technology GmbH (Figura2.20) che può raggiungere una temperatura massima di 180°C.



**Figura 2. 20:** Termoregolatore a doppio circuito usato per il processo di RHCM.

Nel processo di RHCM è necessario definire altri tre parametri legati al termoregolatore per completare il settaggio delle temperature: la temperatura dell'acqua calda, la temperatura dell'acqua fredda e il tempo di riscaldamento, il tempo di raffreddamento viene invece impostato sulla macchina per lo stampaggio a iniezione, sullo schermo del termoregolatore si può comunque leggere la durata complessiva del raffreddamento.

Per trovare il valore della temperatura di soglia alla quale non si vede più la linea di giunzione è stata fatta variare la temperatura del circuito caldo da 70°C a 170°C ad intervalli di 20°C. La scelta dei due valori estremi di temperatura è legata alle seguenti considerazioni: il valore massimo raggiungibile dal termoregolatore è di 180°C, perciò è stata scelta una temperatura leggermente inferiore, la temperatura più bassa è uguale a quella impostata per il circuito freddo, in questo modo è come se la superficie della cavità rimanesse sempre a temperatura costante. La fase di riscaldamento dello stampo inizia quando questo si apre e la sua durata viene impostata sul termoregolatore. Il tempo di riscaldamento non deve essere troppo breve, perché altrimenti la temperatura della superficie della cavità rimarrebbe bassa, non deve essere nemmeno troppo lungo per non allungare troppo il tempo ciclo. In questo studio il tempo di riscaldamento è stato impostato andando a studiare la temperatura della parete della cavità, misurata con l'ausilio di una termocoppia di tipo K (Hasco Z251/2). Per le considerazioni fatte in precedenza il tempo di riscaldamento è stato impostato in modo che la temperatura misurata a regime dalla termocoppia sia di circa 140°C con il circuito caldo a 170°C.

Nella Tabella 2.5 sono riportati i parametri impostati sul termoregolatore usato per il RHCM, il tempo di raffreddamento è stato letto sullo schermo dopo aver eseguito un ciclo di stampaggio.

**Tabella 2. 5:** *Parametri impostati sul termoregolatore per il RHCM.*

<b>PARAMETRI RHCM</b>	
<b>Temp. acqua fredda [°C]</b>	<b>Temp. acqua calda [°C]</b>
70	70
	90
	110
	130
	150
	170
<b>Tempo di riscaldamento [s]</b>	
87	
<b>Tempo di raffreddamento [s]</b>	
54	
<b>Tempo ciclo [s]</b>	
141	

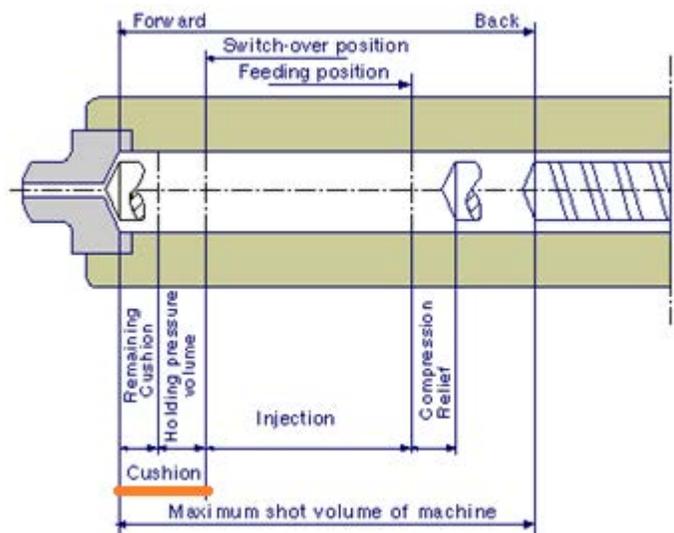
### 2.3.3 Parametri di stampaggio per lo studio sull'influenza del MFR

In questo lavoro sono stati stampati provini utilizzando tre tecniche differenti: stampaggio single gate, double gate e double gate con l'applicazione del processo di push-pull, ma il metodo utilizzato per determinare i parametri di processo è comune a tutti.

I primi due parametri da trovare e impostare sono il tempo a cui fare lo switch over e il volume di materiale da plastificare. Lo switch over è l'istante in cui si passa dal controllo di velocità al controllo di pressione ed è buona norma che avvenga quando il volume della cavità è riempito per circa il 95% [5]. Prima dello switch over la vite inietta il materiale mantenendo costante la velocità di iniezione che viene impostata in macchina e che nel caso trattato è di 10 cm<sup>3</sup>/s. Dopo lo switch over la vite spinge ancora il materiale, ma questa volta in controllo di pressione, in questo modo si compensa il ritiro volumetrico del polimero durante il raffreddamento. Il tempo di switch over è stato ricavato per via sperimentale andando a fare delle stampe di prova senza le fasi di mantenimento e raffreddamento e variando questo parametro attraverso il pannello di comando della macchina. In questo modo è stato possibile osservare come il polimero fuso va a riempire la cavità ed è stato scelto come valore del

tempo quello per il quale essa è stata quasi completamente riempita. In questo caso il volume plastificato impostato in macchina non era ancora quello ottimizzato.

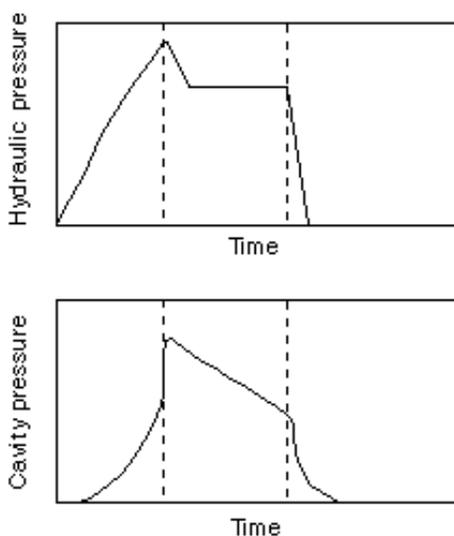
Una volta impostato il tempo di switch over è possibile capire quanto materiale dovrà essere plastificato ad ogni ciclo. All'inizio viene impostato un valore di primo tentativo e si fa un'analisi della fase di riempimento andando a leggere sullo schermo del pannello della macchina il valore del cuscino minimo di materiale che rimane in punta all'unità di iniezione. Per poter garantire che durante la fase di mantenimento la vite riesca a spingere all'interno della cavità altro materiale è necessario che il cuscino minimo che si raggiunge durante la fase di riempimento sia di circa  $7\div 8 \text{ cm}^3$ . Se fosse più basso durante il mantenimento scenderebbe fino a zero e non si riuscirebbe a compensare adeguatamente il ritiro del materiale. È bene anche che il valore del cuscino minimo non sia troppo grande perché è comunque del materiale che rimane a temperatura elevata per molti secondi e quindi degrada. Una volta individuato il volume di dosaggio sono state fatte più analisi di riempimento in modo da verificare che il cuscino minimo rimanesse abbastanza costante e che non ci fossero effetti transitori che potessero alterarne il valore. In Figura 2.21 vengono riportate schematicamente le varie posizioni che la vite assume durante un ciclo di stampaggio, con evidenziato il cuscino da mantenere dopo lo switch over.



**Figura 2. 21:** Posizioni della vite durante un ciclo di stampaggio a iniezione.

Il parametro successivo da impostare è la pressione di mantenimento. Questa pressione viene applicata al cuscino di materiale presente in testa alla vite dopo lo switch over e viene mantenuta costante per un tempo impostato in modo da spingere del polimero fuso all'interno

della cavità per compensare il ritiro volumetrico causato dal raffreddamento del materiale. Il valore che viene generalmente consigliato è circa l'80% della pressione massima di iniezione [5]. È quindi necessario andare ad osservare la curva di pressione, visibile sullo schermo del pannello della macchina, che fa riferimento alla sola fase di riempimento. Anche in questo caso, come in precedenza, prima di valutare l'andamento della curva vengono fatte varie prove per vedere che la pressione massima di iniezione sia abbastanza simile tra un riempimento e quello successivo e per evitare di avere alterazioni dovute ad effetti transitori. La macchina mostra a video la curva della pressione idraulica necessaria per far muovere la vite e per spingere il materiale che sarà diversa dalla pressione che misurerebbe un eventuale sensore posto nella cavità a causa delle perdite di carico. In Figura 2.22 vengono riportate due curve di pressione tipiche: una fa riferimento alla pressione idraulica della macchina, mentre l'altra è la pressione che si registrerebbe con un sensore posto in cavità.

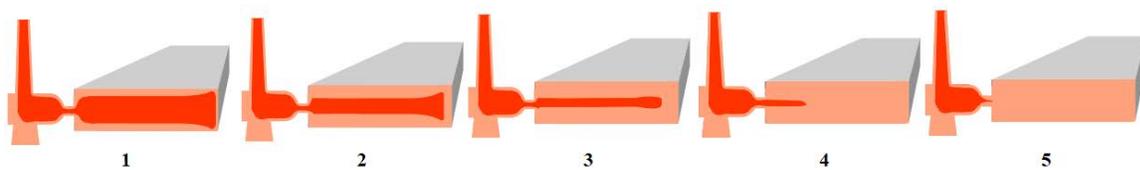


**Figura 2. 22:** *Andamento della pressione idraulica e della pressione in cavità nello stampaggio a iniezione.*

Per trovare la pressione di mantenimento da impostare sono state eseguite delle analisi di riempimento della cavità con impostato il tempo di switch over corretto. Sono quindi state osservate le curve di pressione mostrate dalla macchina ed è stato letto il valore massimo di pressione raggiunto, infine è bastato moltiplicare questo dato per 0.8 per trovare il parametro cercato, che è stato poi arrotondato. Questa procedura è valida per i provini realizzati con un solo punto di iniezione, per quelli che presentano la linea di giunzione è necessario eseguire un ulteriore step di analisi.

Per trovare la pressione di mantenimento nel caso di provini con linea di giunzione è necessario fare anche un'analisi della fase di impaccamento per assicurarsi che le due viti vadano ad iniettare circa la stessa quantità di materiale durante questa fase. I valori di pressione di primo tentativo impostati sono stati ricavati seguendo la procedura riportata in precedenza, cioè andando ad eseguire delle analisi di riempimento. Successivamente è necessario verificare che durante il mantenimento il volume iniettato dalle due viti sia circa lo stesso andando a vedere sullo schermo del pannello di comando della macchina come diminuisce il volume di materiale nei due cilindri di plastificazione. Nel caso risulti che una delle due viti inietta più polimero rispetto all'altra basta intervenire riducendone la pressione di mantenimento. Per i provini con linea di giunzione e push-pull le pressioni impostate sono le stesse dei provini stampati senza push-pull. Anche in questo caso, come per i precedenti parametri, per considerare accettabili i valori impostati sono stati fatti diversi cicli di stampaggio successivi per verificare che non ci fossero degli effetti transitori iniziali che potessero alterare la fase di impaccamento.

[5] Durante la fase di impaccamento il polimero inizia a raffreddarsi e quindi si ha un certo ritiro volumetrico. Per compensare questo ritiro è necessario esercitare una pressione di mantenimento per un certo tempo. Il valore di questo tempo viene impostato attraverso il pannello di comando della macchina e dovrebbe durare fino a quando il gate non si solidifica, cioè fino a quando non è più possibile introdurre altro materiale nella cavità. In Figura 2.23 è possibile osservare come avviene tipicamente la solidificazione del polimero, è importante sottolineare che il gate dovrebbe essere tra le ultime parti a solidificarsi perché in questo modo è possibile iniettare più materiale per compensare il ritiro volumetrico.

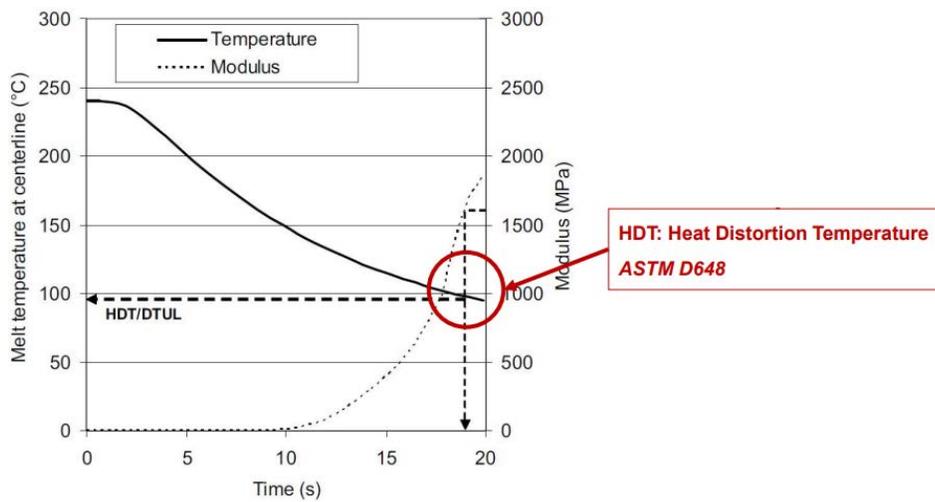


**Figura 2. 23:** *Solidificazione di un componente realizzato mediante stampaggio a iniezione.*

Per questo studio i tempi di mantenimento sono stati ricavati da ottimizzazioni svolte in precedenza condotte con lo stesso materiale e lo stesso stampo. I tempi sono uguali per i provini con linea di giunzione e senza linea, mentre per il processo di push-pull è necessario definire anche dei tempi intermedi per alternare la pressione di mantenimento tra una vite e l'altra.

L'ultimo parametro da impostare per lo stampaggio è il tempo di raffreddamento che corrisponde al tempo che intercorre tra la fine della fase di mantenimento e l'apertura dello

stampo. Sebbene il polimero inizi già a raffreddarsi durante l’impaccamento è necessario comunque prevedere una fase di raffreddamento che consenta di diminuire la temperatura del pezzo stampato fino ad una temperatura di estrazione che generalmente viene fornita o si trova in tabelle, a seconda del materiale. Il componente raffreddandosi aumenta il suo modulo e diventa quindi più rigido come riportato nel grafico di Figura 2.24 dove sono riportati gli andamenti della temperatura del polimero e del modulo nel tempo [33]. La Heat Distorsion Temperature riportata nel grafico è la temperatura di estrazione. Le curve servono solo da esempio e non sono riferibili al caso in esame in questo studio.



**Figura 2. 24:** Andamento tipico della temperatura e del modulo di un componente realizzato mediante stampaggio a iniezione durante il raffreddamento.

Esistono delle equazioni per poter stimare il tempo di raffreddamento noto lo spessore, la temperatura della parete dello stampo, la temperatura iniziale del polimero fuso, la temperatura di estrazione e la diffusività termica, tuttavia in questo caso il tempo di raffreddamento da impostare in macchina è stato ricavato da esperienze passate condotte con lo stesso materiale, con le stesse temperature e utilizzando lo stesso stampo.

In Tabella 2.6, Tabella 2.7 e Tabella 2.8 sono riportati rispettivamente i parametri di stampaggio dei provini single gate, double gate e double gate con l’applicazione del processo di push-pull per i vari valori di MFR.

**Tabella 2. 6:** *Parametri di stampaggio per provini single gate.*

<b>Single gate</b>	MFR =1,2g/10'	MFR=5,9g/10'	MFR=10,7g/10'
Velocità di iniezione [cm <sup>3</sup> /s]	10	10	10
Tempo switch over [s]	1,7	1,5	1,5
Materiale plastificato [cm <sup>3</sup> ]	25	25	25
Pressione di mantenimento [bar]	495	265	275
Tempo di impaccamento [s]	30	30	30
Tempo di raffreddamento [s]	10	10	10

**Tabella 2. 7:** *Parametri di stampaggio per provini double gate.*

<b>Double gate</b>	MFR =1,2g/10'	MFR=5,9g/10'	MFR=10,7g/10'
Velocità di iniezione [cm <sup>3</sup> /s]	10	10	10
Tempo switch over [s]	1,15	1,15	1,15
Materiale plastificato [cm <sup>3</sup> ]	15	15	15
Pressione di mantenimento A [bar]	455	227	235
Pressione di mantenimento B [bar]	480	285	295
Tempo di impaccamento [s]	30	30	30
Tempo di raffreddamento [s]	10	10	10

**Tabella 2. 8:** *Parametri di stampaggio per provini double gate con push-pull.*

<b>Push-pull</b>	MFR =1,2g/10'	MFR=5,9g/10'	MFR=10,7g/10'
Velocità di iniezione [cm <sup>3</sup> /s]	10	10	10
Tempo switch over [s]	1,15	1,15	1,15
Materiale plastificato [cm <sup>3</sup> ]	18	18	18
Pressione di mantenimento A [bar]	455	227	235
Pressione di mantenimento B [bar]	480	285	295
Tempo di impaccamento [s]	30	30	30
Tempo di raffreddamento [s]	10	10	10

Per il materiale più fluido riuscire a trovare le pressioni di mantenimento ottimali per i provini con linea di giunzione è più complicato perché, a causa della elevata fluidità, è più facile che ci sia compenetrazione tra i due fronti di flusso e che quindi lungo la linea di giunzione siano presenti fibre. Per il materiale meno fluido questa procedura è più semplice perché è più difficile avere compenetrazione tra i due fronti di flusso quando questi si incontrano.

Il tempo di mantenimento per i provini realizzati applicando il processo di push-pull è complessivamente di trenta secondi, ma è suddiviso in intervalli come riportato in Tabella2.9, Tabella2.10 e Tabella2.11 in modo da alternare la pressione tra i due punti di iniezione.

**Tabella 2. 9:** *Intervalli di tempo della fase di mantenimento per provini con MFR=10.7g/10' realizzati mediante processo di push-pull.*

Mantenimento B										
Pressione [bar]	0	0	295	295	0	0	295	295	295	295
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30
Mantenimento A										
Pressione [bar]	235	235	0	0	235	235	0	0	235	235
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30

**Tabella 2. 10:** *Intervalli di tempo della fase di mantenimento per provini con MFR=5.9g/10' realizzati mediante processo di push-pull.*

Mantenimento B										
Pressione [bar]	0	0	285	285	0	0	285	285	285	285
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30
Mantenimento A										
Pressione [bar]	227	227	0	0	227	227	0	0	227	227
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30

**Tabella 2. 11:** *Intervalli di tempo della fase di mantenimento per provini con MFR=1.2g/10' realizzati mediante processo di push-pull.*

Mantenimento B										
Pressione [bar]	0	0	480	480	0	0	480	480	480	480
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30
Mantenimento A										
Pressione [bar]	455	455	0	0	455	455	0	0	455	455
Tempo [s]	0	5,5	5,51	11	11,01	16,5	16,51	22	22,01	30

### 2.3.4 Parametri di stampaggio per la determinazione della temperatura di soglia

I parametri impostati per il processo di stampaggio a iniezione nello studio per la determinazione della temperatura di soglia oltre la quale non si vede più la linea di giunzione sono stati ricavati dalla tesi di dottorato di Andrea Scantamburlo [34] e vengono riassunti in Tabella 2.12, mentre in Tabella 2.13 sono riportati gli andamenti nel tempo della pressione di mantenimento per le due unità di iniezione.

**Tabella 2. 12:** Parametri di stampaggio per lo studio sulla determinazione della temperatura di soglia.

	Cilindro A	Cilindro B
Velocità di iniezione [cm <sup>3</sup> /s]	2,95	2,60
Volume switch-over [cm <sup>3</sup> ]	7,00	16,50
Materiale plastificato [cm <sup>3</sup> ]	20,00	30,00
Tempo di raffreddamento [s]	25,00	25,00

**Tabella 2. 13:** Andamento della pressione di mantenimento nel tempo durante il processo di push-pull.

Mantenimento A					
Tempo [s]	0,00	5,00	5,01	20,00	23,00
Pressione [bar]	20	20	275	275	225
Mantenimento B					
Tempo [s]	0,00	5,00	5,01	20,00	23,00
Pressione [bar]	680	680	300	300	250

In questo studio il processo di push-pull è stato realizzato andando ad eseguire una sola alternanza della pressione di mantenimento perché lo scopo è quello di andare ad agire sulla pelle e non sui layer più interni, in modo da eliminare la linea di giunzione almeno da un punto di vista estetico. La pelle è uno strato di materiale che solidifica immediatamente, quindi al variare della temperatura della parete della cavità varierà anche il suo spessore, di conseguenza anche il processo di push-pull andrà ad agire a profondità diverse rispetto la superficie. Se lo stampo ha una temperatura troppo bassa questo processo agisce su uno strato più interno e quindi la linea di giunzione sarà ancora visibile.

## 2.4 CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE

La caratterizzazione è stata condotta sul polipropilene caricato con mica: Dafnelen HR12 mineral silver, in modo da trovare i dati necessari da inserire in Moldflow per condurre le simulazioni. I risultati di queste simulazioni vengono poi confrontati con quelli derivanti dall'analisi sperimentale.

### 2.4.1 Calore specifico

Per determinare l'andamento del calore specifico con la temperatura è stata seguita la procedura riportata nella normativa di riferimento: ASTM E1269 [35]. La procedura prevede inizialmente di inserire nella camera del calorimetro un contenitore vuoto, in cui di solito si inserisce il campione di materiale, a cui è stato applicato il coperchio e un altro da usare da riferimento. Successivamente si riscalda o raffredda la camera fino alla temperatura iniziale della prova ad una velocità di  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . e la si mantiene costante per almeno quattro minuti, poi si scalda la camera fino alla temperatura finale alla stessa velocità e la si mantiene nuovamente per almeno quattro minuti, infine si raffredda fino a temperatura ambiente. Nel contenitore viene ora inserito uno zaffiro standard di peso noto (la precisione richiesta è di  $\pm 0.01\text{mg}$ ) e si ripete il processo termico già descritto per il contenitore vuoto. Nel contenitore va ora inserito il campione di materiale da studiare, lo si pesa con una precisione di  $\pm 0.01\text{mg}$  e lo si sottopone allo stesso ciclo termico. Da questi cicli si ricavano delle curve in cui è riportato l'andamento del flusso termico in funzione della temperatura come riportato in Figura 2.25.

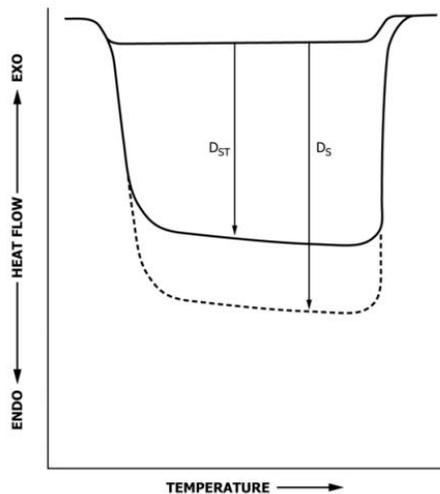


FIG. 1 Specific Heat Capacity Thermal Curves of Standard Sapphire, and Unknown Specimens

**Figura 2. 25:** Curve impiegate per la determinazione del calore specifico (immagine presa dalla normativa).

Per determinare il calore specifico viene utilizzata l'Equazione 2.1:

$$C_p(s) = C_p(st) \frac{D_s * W_{st}}{D_{st} * W_s} \quad (2.1)$$

Dove:

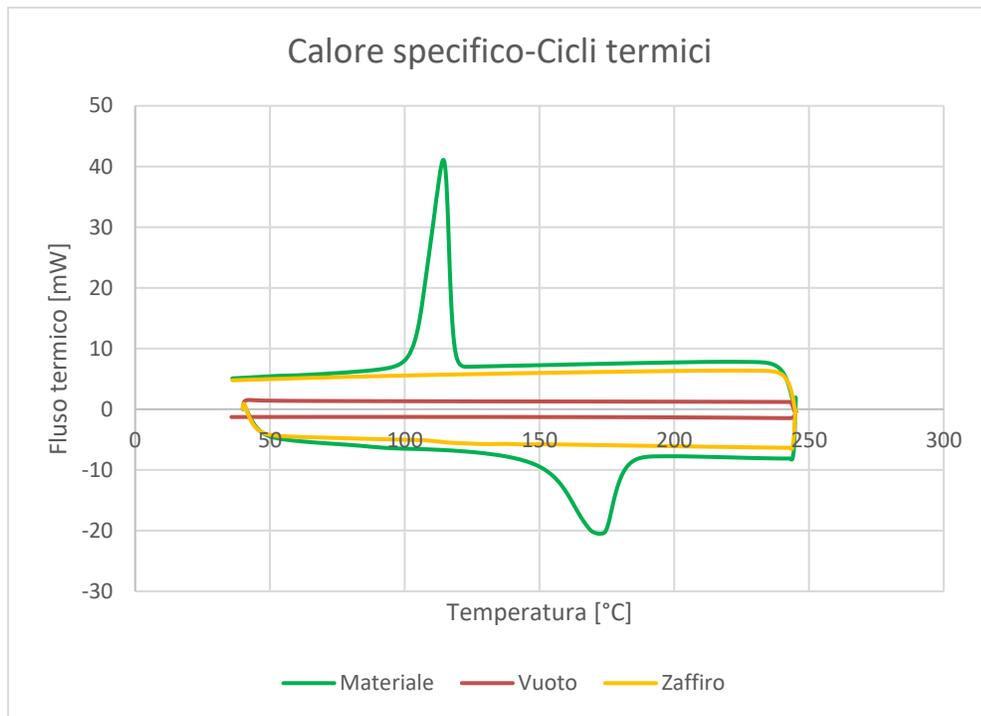
- $C_p(s)$  è il calore specifico del materiale [J/(g\*K)].
- $C_p(st)$  è il calore specifico dello zaffiro standard [J/(g\*K)].
- $D_s$  è la differenza tra la curva ricavata per il contenitore vuoto e quella del materiale ad una data temperatura [mW].
- $D_{st}$  è la differenza tra la curva ricavata per il contenitore vuoto e quella dello zaffiro ad una data temperatura [mW].
- $W_s$  è la massa del materiale inserito [mg].
- $W_{st}$  è la massa dello zaffiro standard [mg].

Per condurre queste analisi è stato utilizzato un calorimetro a scansione: Q200 di TA Instruments (Figura 2.26)

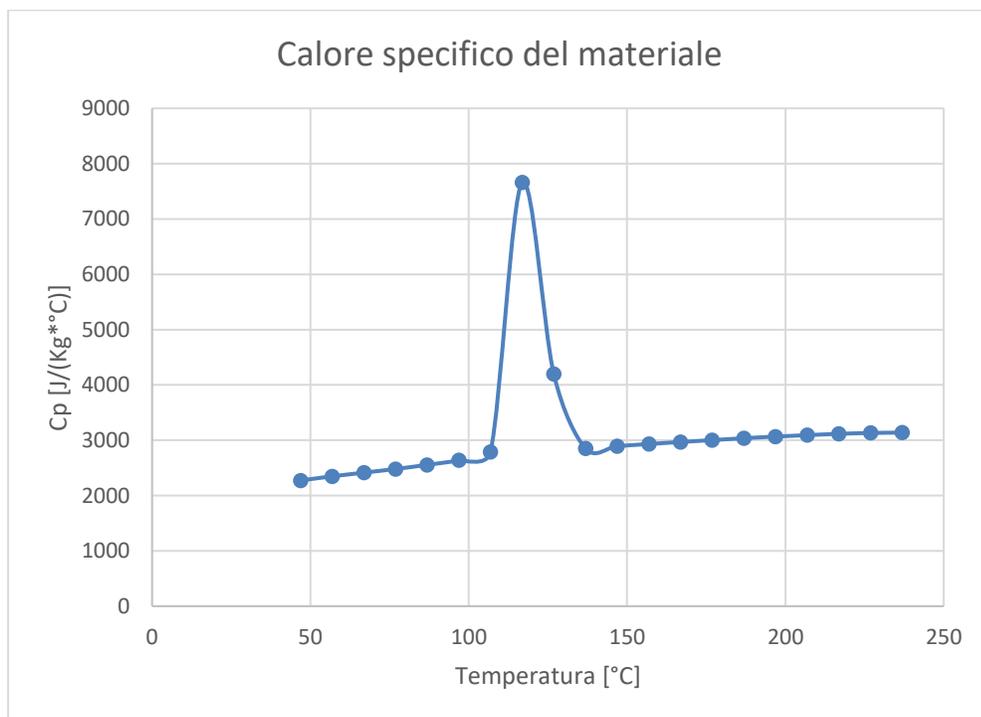


**Figura 2. 26:** Calorimetro a scansione: Q200 TA Instruments.

In Figura 2.27 e Figura 2.28 sono riportati rispettivamente i cicli termici ottenuti con il calorimetro e l'andamento del calore specifico al variare della temperatura per il materiale.



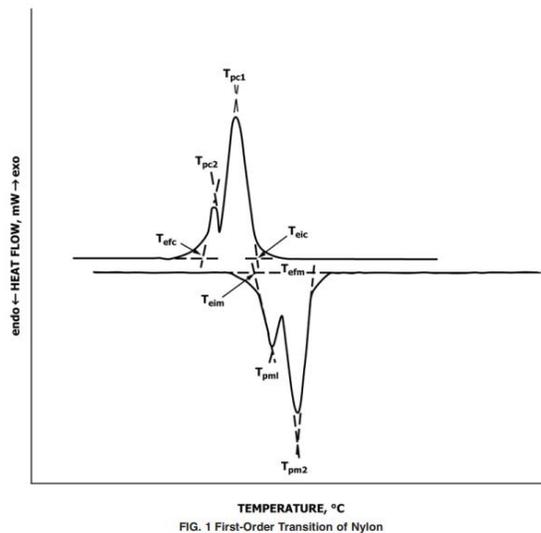
**Figura 2. 27:** Cicli termici misurati per la determinazione del calore specifico.



**Figura 2. 28:** Andamento del calore specifico del materiale con la temperatura.

## 2.4.2 Temperatura di cristallizzazione e di fusione

Per determinare la temperatura di fusione e quella di cristallizzazione è stata condotta un'analisi DSC usando lo stesso calorimetro impiegato per trovare il calore specifico. L'analisi è stata condotta seguendo la normativa di riferimento: ASTM D3418 [36]. La normativa prevede una fase di riscaldamento preliminare condotta utilizzando la stessa velocità di riscaldamento impiegata per fare il testing che parta da una temperatura di almeno 50°C inferiore rispetto a quella di fusione fino ad arrivare ad una temperatura di almeno 30°C superiore, è necessario ridurre il tempo in cui il materiale è esposto ad elevate temperature per evitare di avere un'eccessiva degradazione. Successivamente si va raffreddare fino ad una temperatura di almeno 50°C inferiore rispetto il picco corrispondente alla temperatura di cristallizzazione e si mantiene questo valore per 5 minuti, infine si ripete il riscaldamento. Per il materiale utilizzato in questo studio il riscaldamento viene fatto iniziare da una temperatura di 30°C fino ad arrivare a 245°C con una velocità di riscaldamento/raffreddamento di 20°C/min. Per la determinazione delle temperature si fa riferimento all'esempio riportato nella normativa (Figura 2.29) riguardante il Nylon.



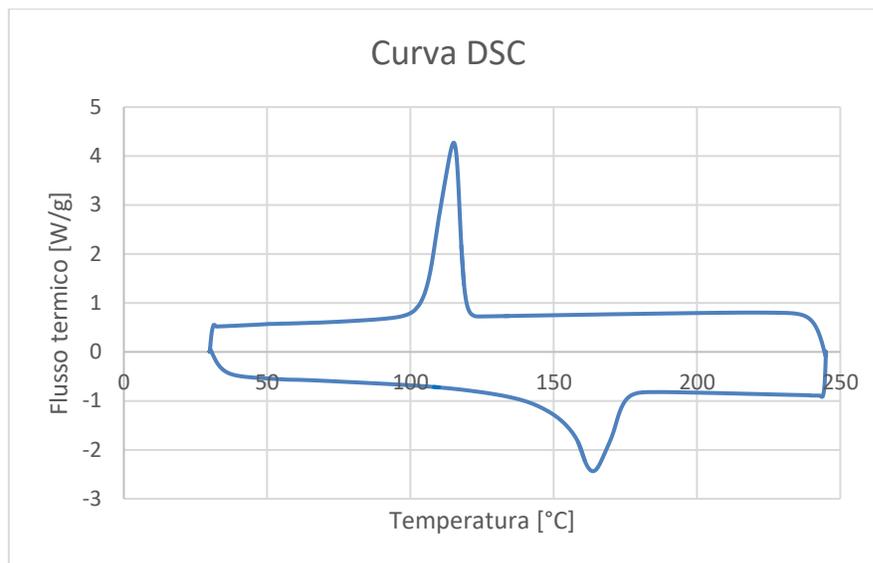
**Figura 2. 29:** Determinazione delle temperature di fusione e cristallizzazione del Nylon (normativa).

Dove:

- $T_{eim}$  è la temperatura alla quale il materiale inizia a fondere.
- $T_{efm}$  è la temperatura registrata alla fine della fusione.

- $T_{pm}$  è la temperatura corrispondente al picco registrato durante la fusione.
- $T_{eic}$  è la temperatura alla quale il materiale inizia a cristallizzare.
- $T_{pc}$  è la temperatura corrispondente al picco registrato durante la cristallizzazione.
- $T_{efc}$  è la temperatura registrata alla fine della cristallizzazione.

In Figura 2.30 è riportata la curva DSC ottenuta per il materiale, da questa sono state ottenute le temperature da inserire in Moldflow:  $T_c=119.473^\circ\text{C}$  e  $T_m=152.915^\circ\text{C}$ .



**Figura 2. 30:** Curva DSC per Dafnelen HR12 mineral silver.

### 2.4.3 Prove reologiche

Le prove reologiche sono state condotte utilizzando un reometro capillare (Figura2.31): Ceast Rheologic 2500 e un reometro rotazionale (Figura2.32): ARES dell'azienda TA Instruments. Il reometro capillare è stato utilizzato per trovare la viscosità a valori di shear rate superiori a  $20\text{ s}^{-1}$ , mentre con il reometro rotazionale soni stati studiati valori di shear rate più bassi. Da questa analisi si ricavano dei punti sperimentali che servono per determinare i coefficienti del modello di Cross che descrive l'andamento della viscosità del materiale in funzione dello shear rate e della temperatura. Le prove sono state condotte impostando tre diversi valori di temperatura:  $190^\circ\text{C}$ ,  $210^\circ\text{C}$  e  $230^\circ\text{C}$ .



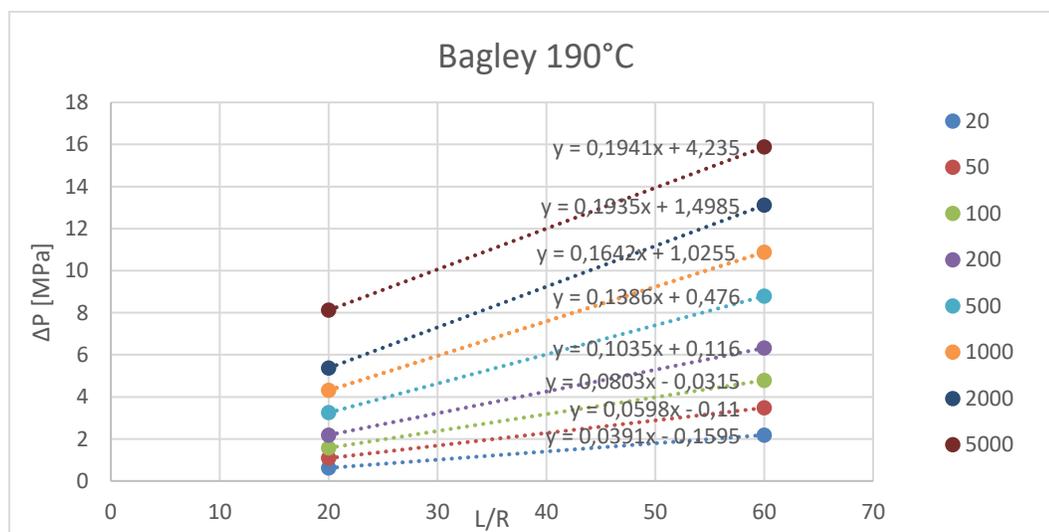
**Figura 2. 31:** Reometro capillare: *Ceast Rheologic 2500.*



**Figura 2. 32:** Reometro rotazionale: *ARES Ta Industries.*

Il principio di funzionamento del reometro capillare è il seguente: il materiale viene inserito all'interno di una camera cilindrica riscaldata e viene fuso, successivamente un pistone avanza con una velocità impostata e spinge il polimero attraverso un capillare di diametro e lunghezza noti. In output si ottengono i valori della differenza di pressione misurata tra l'ingresso e l'uscita del capillare in funzione dello shear rate apparente impostato.

Per poter procedere a determinare la viscosità è necessario prima effettuare delle correzioni sui valori trovati. La prima correzione da applicare è conosciuta come correzione di Bagley e serve per determinare la variazione di pressione dovuta alle perdite di imbocco quando il polimero fuso passa dalla camera del reometro al capillare. Per poter trovare le perdite di imbocco sono stati utilizzati due capillari aventi le seguenti dimensioni: D=1mm L=10mm; D=1mm L=30mm, dove D è il diametro della sezione di passaggio del capillare e L è la lunghezza di questa sezione. Conducendo le prove alle varie temperature e per i due capillari si ottengono così due punti per ogni valore di shear rate impostato che vengono riportati in un grafico avente sull'asse delle ordinate la differenza di pressione complessiva misurata con il reometro e sull'asse delle ascisse il rapporto L/R. Per questi due punti si traccia una retta e si determina il valore di  $\Delta P$  corrispondente all'intercetta con l'asse delle ordinate, tale valore corrisponde alle perdite di imbocco ed è quindi necessario sottrarlo al  $\Delta P$  complessivo. In Figura2.33, Figura2.34 e Figura2.35 sono riportati i grafici utilizzati per la correzione di Bagley alle varie temperature.



**Figura 2. 33:** Grafico per la correzione di Bagley, temperatura=190°C.

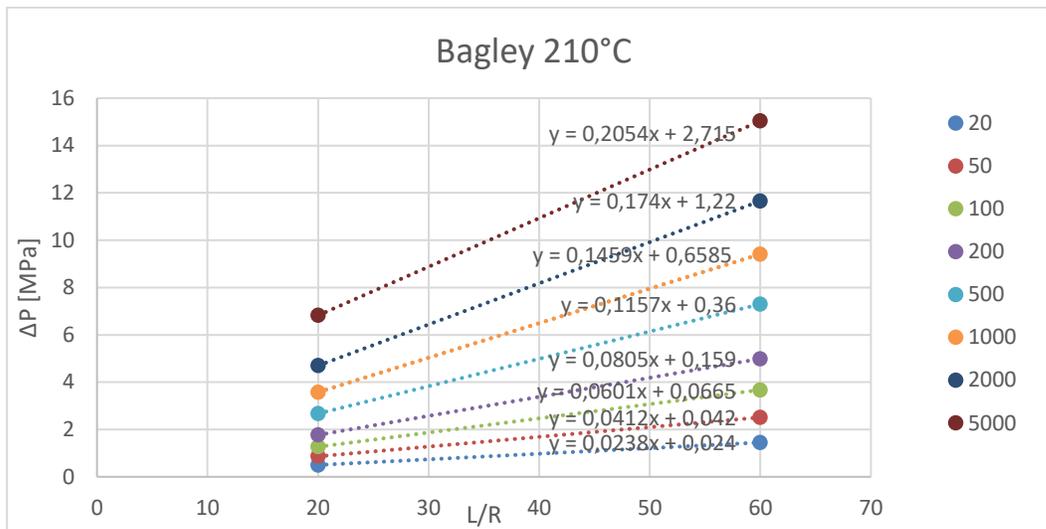


Figura 2. 34: Grafico per la correzione di Bagley, temperatura=210°C.

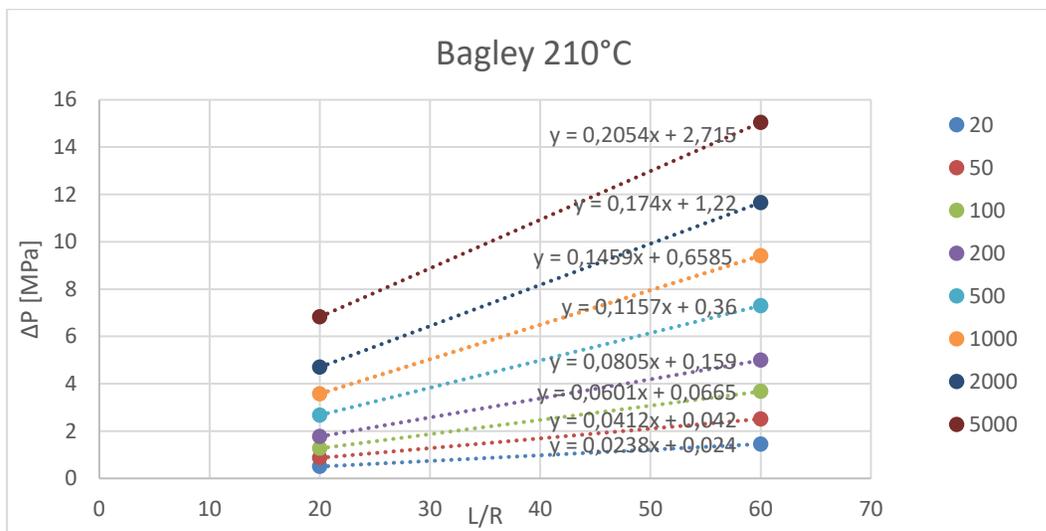


Figura 2. 35: Grafico per la correzione di Bagley, temperatura=230°C.

In Tabella 2.14 sono riportati i valori di  $\Delta P$  corretti con la correzione di Bagley per il capillare con  $L/R=60$ , non è necessario calcolarli anche per l'altro capillare.

**Tabella 2. 14:** Differenze di pressione tra ingresso e uscita per il capillare con  $L/R=60$  dopo la correzione di Bagley.

Pressione Corretta		Shear Rate [ $s^{-1}$ ]							
		20	50	100	200	500	1000	2000	5000
190 [ $^{\circ}C$ ]	$\Delta P$ [MPa]	2,344	3,588	4,816	6,207	8,313	9,850	11,6115	11,646
210 [ $^{\circ}C$ ]	$\Delta P$ [MPa]	1,428	2,472	3,607	4,833	6,939	8,752	10,437	12,324
230 [ $^{\circ}C$ ]	$\Delta P$ [MPa]	1,299	2,289	3,295	4,56	6,519	8,331	10,308	12,835

A questo punto è necessario calcolare i valori di shear stress reali, a partire dai  $\Delta P$  appena trovati utilizzando l'Equazione 2.2.

$$\tau = \frac{\Delta P_{corr.}}{2 * L/R} \quad (2.2)$$

Dove:

- $\tau$  è lo shear stress reale [MPa].
- $\Delta P_{corr}$  è la differenza di pressione calcolata dopo la correzione di Bagley [MPa].
- $L/R$  è il rapporto tra la lunghezza del capillare e il raggio della sezione di passaggio.

In Tabella 2.15 sono riportati i valori di shear stress reali così calcolati.

**Tabella 2. 15:** Valori di shear stress reale in funzione della temperatura e dello shear rate apparente.

Shear Stress Reale		Shear Rate [ $s^{-1}$ ]							
		20	50	100	200	500	1000	2000	5000
190 [ $^{\circ}C$ ]	$\tau$ [Pa]	19537,5	29900,0	40137,5	51725,0	69275,0	82087,5	96762,5	97050,0
210 [ $^{\circ}C$ ]	$\tau$ [Pa]	11900,0	20600,0	30062,5	40275,0	57825,0	72937,5	86975,0	102700,0
230 [ $^{\circ}C$ ]	$\tau$ [Pa]	10825,0	19075,0	27462,5	38000,0	54325,0	69425,0	85900,0	106962,5

Una volta determinati i valori di shear stress reale è necessario applicare un'ulteriore correzione, nota come correzione di Rabinowitsch che consente di calcolare i valori di shear rate reale da cui si ricaverà la viscosità reale necessaria per determinare i coefficienti del modello di Cross.

Per poter trovare lo shear rate reale è necessario applicare l'Equazione 2.3:

$$\dot{\gamma} = \frac{3 * n + 1}{4 * n} * \dot{\gamma}_a \quad (2.3)$$

Dove:

- $\dot{\gamma}$  è lo shear rate reale [ $s^{-1}$ ].
- $\dot{\gamma}_a$  è lo shear rate apparente [ $s^{-1}$ ].
- $n$  è un fattore adimensionale del modello power law.

Per trovare l'indice  $n$  sono stati riportati i dati sperimentali in dei grafici aventi in ordinata il logaritmo dello shear stress reale e in ascissa il logaritmo dello shear rate apparente, sono state quindi determinate le equazioni delle varie curve interpolanti ed è stato calcolato il valore della derivata prima di queste curve nei vari punti sperimentali riportati nei grafici. Tali valori corrispondono all'indice  $n$  cercato.

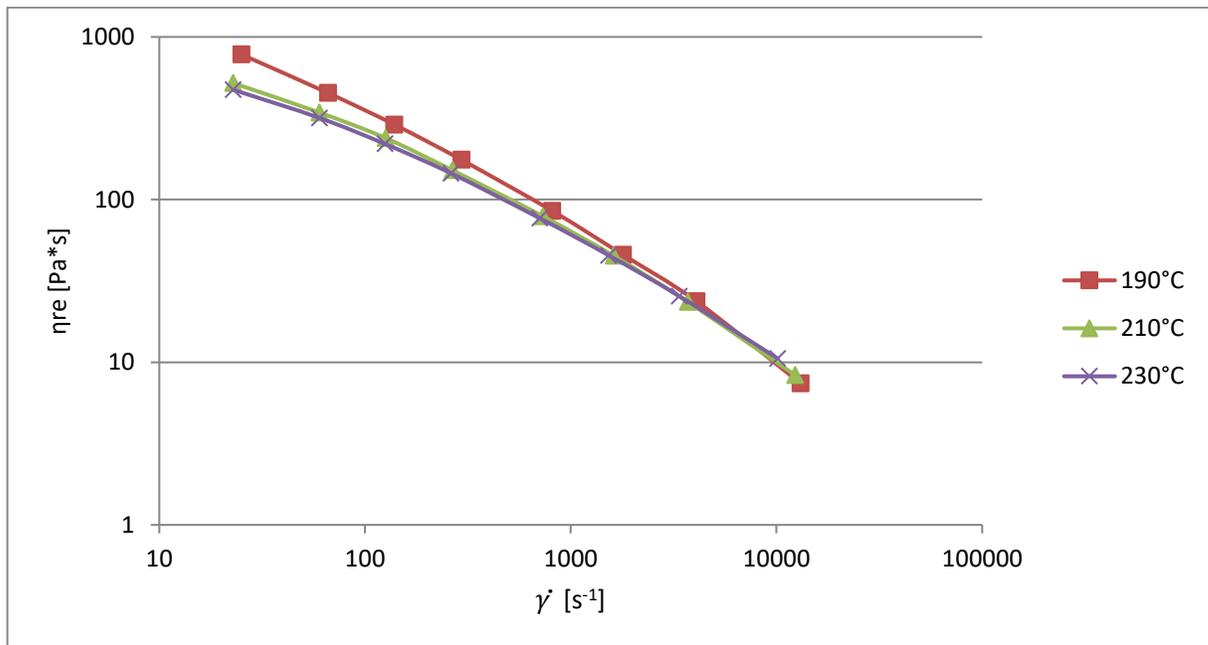
A questo punto è possibile calcolare la viscosità reale [Pa\*s] data dal rapporto tra shear stress reale e shear rate reale (Equazione 2.4):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

In Tabella 2.16 sono riassunti i valori di shear rate reale e viscosità reale così calcolati, mentre nel grafico di Figura 2.36 sono riportati i punti sperimentali che verranno poi usati per la determinazione dei coefficienti del modello di Cross.

**Tabella 2. 16:** Valori della viscosità reale e dello shear rate reale.

Viscosità reale		Shear Rate app [ $s^{-1}$ ]							
		20	50	100	200	500	1000	2000	5000
190 [°C]	$\dot{\gamma}$ [ $s^{-1}$ ]	25,03	66,04	138,76	294,39	812,50	1792,10	4076,21	13112,12
	$\eta$ [Pa*s]	780,55	452,73	289,26	175,70	85,26	45,81	23,74	7,40
210 [°C]	$\dot{\gamma}$ [ $s^{-1}$ ]	22,88	60,09	125,81	266,10	732,60	1617,45	3704,10	12326,33
	$\eta$ [Pa*s]	520,09	342,82	238,95	151,35	78,93	45,09	23,48	8,33
230 [°C]	$\dot{\gamma}$ [ $s^{-1}$ ]	22,87	59,99	124,84	261,77	707,76	1527,85	3371,58	10145,64
	$\eta$ [Pa*s]	473,29	317,98	219,98	145,17	76,76	45,44	25,48	10,54



**Figura 2. 36:** Grafico della viscosità reale in funzione dello shear rate reale.

Prima di determinare i coefficienti del modello di Cross sono stati trovati altri punti utilizzando un reometro rotazionale. Il principio di funzionamento di questo reometro è quello di inserire del materiale tra due piatti, uno fisso e l'altro rotante, di fonderlo e di porre in rotazione uno dei due piatti in modo da indurre un flusso di scorrimento nel materiale, in questo modo è possibile trovare il valore della viscosità reale del polimero. Con questo tipo di reometro è stato studiato un intervallo di shear rate più basso rispetto a quello investigato con il reometro capillare. In Tabella 2.17 sono riportati i valori di shear rate reale e di viscosità trovati con il reometro rotazionale.

**Tabella 2. 17:** Valori di viscosità trovati con il reometro rotazionale.

$\eta$ [Pa*s]	Shear Rate reale [s-1]									
	0,05	0,06295	0,07924	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
190 [°C]	2902,09	2801,13	2705,02	2713,03	2548,35	2263,1	2015,61	1729,87	1335,5	1050,61
210 [°C]	1715,39	1674,82	1584,42	1586,35	1496,83	1364,41	1245,69	1101,22	888,285	723,911
230 [°C]	1158,92	1086,44	1036,72	1039,24	983,821	916,493	849,068	769,984	642,822	538,054

È ora possibile implementare il modello di Cross, la cui equazione è la seguente (Equazione 2.5):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2.5)$$

Dove:

- $\eta$  è la viscosità [Pa\*s].
- $\eta_0$  è la viscosità newtoniana [Pa\*s].
- $\dot{\gamma}$  è lo shear rate [ $s^{-1}$ ].
- $\tau^*$  è lo shear stress critico al quale si ha shear thinning [Pa].
- $n$  è un fattore adimensionale.

$\eta_0$  può essere calcolata con l'Equazione 2.6:

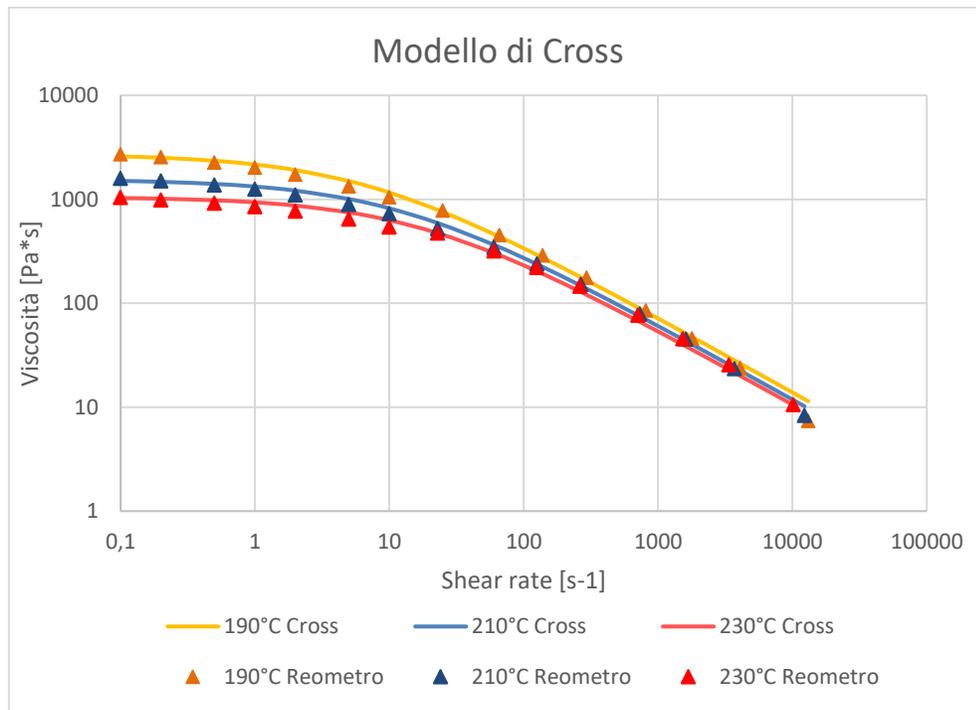
$$\eta_0 = D_1 * \exp\left[-\frac{A_1 * (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right] \quad (2.6)$$

Dove:

- $T$  è la temperatura [K].
- $T^*$  è la temperatura di transizione vetrosa [K].
- $A_2 = A_3 + D_3 * p$ ,  $p$  è la pressione [Pa].
- $D_1$ ,  $A_1$ ,  $A_3$  e  $D_3$  sono parametri di fitting.

La temperatura di transizione vetrosa del polipropilene è di  $-10^\circ\text{C}$ .

I parametri  $n$ ,  $\tau^*$  e i vari coefficienti di fitting possono essere determinati utilizzando lo strumento risolutore di Excel andando a minimizzare la somma quadratica degli errori tra i valori di viscosità calcolati a partire dalle prove reologiche e la viscosità calcolata con l'Equazione 2.5. In Figura 2.37 sono riportati i risultati derivanti da questa analisi, le curve sono state tracciate sulla base dell'Equazione 2.5, mentre i punti sono stati ricavati dalle prove reologiche.



**Figura 2. 37:** Curve reologiche trovate con il modello di Cross.

## 2.5 PROVE DI TRAZIONE

Le prove di trazione sono state condotte secondo la normativa ISO 527 [31]. Per svolgere le prove è stata utilizzata la macchina Instron 5966 riportata in Figura 2.38.



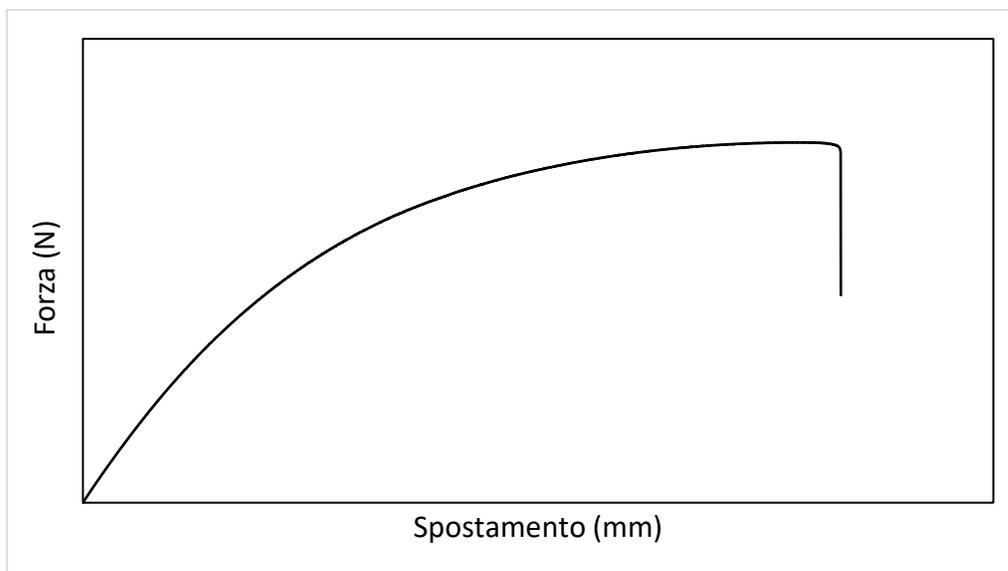
**Figura 2. 38:** Macchina per le prove di trazione: Instron 5966.

Le prove sono state condotte a temperatura ambiente, andando a misurare come parametri di output il carico applicato e lo spostamento della griffa superiore. La normativa prevede che per ogni tipo di provino analizzato vengano condotte almeno cinque prove di trazione, con la possibilità di effettuare un numero maggiore di prove nel caso si voglia ridurre la deviazione standard. Per questo motivo per ogni tecnica di stampaggio impiegata e per i vari valori di MFR del materiale sono stati realizzati venti provini. In questo modo si ha la certezza di riuscire ad eseguire almeno cinque prove di trazione corrette al netto di risultati che possono essere scartati per i seguenti motivi: perché il provino non è stato correttamente posizionato nella macchina, perché le griffe non sono state completamente serrate e quindi il provino scivola o semplicemente perché i risultati ottenuti da una prova si discostano molto da quelli delle altre prove.

Nel serrare i provini tra le griffe è importante assicurarsi che questi siano il più possibile allineati lungo la direzione di applicazione del carico e che le griffe non vadano ad afferrare il provino nel tratto utile.

La velocità a cui sono state condotte le prove di trazione è definita dalla normativa ed è di 2mm/min.

In Figura 2.39 viene riportato l'andamento tipico di una curva forza-spostamento per polipropilene caricato fibra vetro in cui si può notare una prima zona di comportamento lineare elastico, seguita da una zona di elasticità non lineare ed infine una zona di comportamento elasto-plastico.



**Figura 2. 39:** *Andamento tipico della curva carico-spostamento per PP caricato con fibra di vetro.*

[37] Se il carico applicato venisse rimosso nel tratto lineare elastico il materiale recupererebbe la deformazione subita e la curva di scarico sarebbe sovrapposta alla curva di carico. Se la forza venisse rimossa nel tratto di elasticità non lineare il materiale recupererebbe completamente la deformazione, ma seguirebbe una curva di scarico diversa da quella di carico, infine se la rimozione della forza applicata avvenisse nella zona di comportamento elasto-plastico il materiale recupererebbe la componente elastica della deformazione, ma non quella plastica. Come si può notare per PP caricato fibra di vetro la fase di stiro è praticamente assente e quindi non si forma neanche il collo di strizione.

Ciò che interessa ricavare dalle curve forza-spostamento sono due parametri: il carico ultimo a rottura e la rigidezza del provino, da qui in poi identificata con la variabile “k”. In questo caso si parla di rigidezza del provino e non di rigidità del materiale perché viene analizzato un provino con un difetto ovvero la linea di giunzione. Questo è anche il motivo per cui si utilizzano curve forza-spostamento e non curve tensione-deformazione.

La forza a rottura si ottiene andando ad individuare il valore massimo della forza raggiunto durante la prova.

Per trovare la rigidezza si applica lo stesso metodo che viene usato per trovare la rigidità, ovvero calcolare la pendenza del tratto lineare elastico. La differenza sta nel fatto che per trovare la rigidezza si usa una curva forza-spostamento, mentre per la rigidità si fa riferimento ad una curva tensione-deformazione. Per fare questo è necessario individuare due punti di riferimento nel tratto lineare, il primo viene preso ad uno spostamento di 0.04mm mentre il secondo ad uno spostamento di 0.2mm. Successivamente è possibile determinare la rigidezza utilizzando l'Equazione 2.7:

$$k = \frac{F_{0.2} - F_{0.04}}{0.2 - 0.04} \quad (2.7)$$

Dove:

- $F_{0.2}$  è la forza ricavata dai risultati delle prove per uno spostamento di 0.2mm.
- $F_{0.04}$  è la forza ricavata dai risultati delle prove per uno spostamento di 0.04mm.

Dopo aver ricavato questi dati per i vari set di provini stampati, è stato calcolato il valore medio della forza massima e della rigidezza e la deviazione standard.

Per confrontare tra loro i risultati delle prove di trazione dei provini a diverse fluidità realizzati utilizzando le tre diverse tecniche di stampaggio (single gate, double gate e double gate con push-pull) è necessario calcolare ulteriori due parametri: SRF e KRF.

SRF è un fattore che serve per capire di quanto si riduce il carico a rottura nel caso di provini con linea di giunzione con e senza push-pull rispetto ai provini single gate. Questo parametro è definito dal rapporto riportato nell'Equazione 2.8.

$$\text{SRF} = \frac{F_{\text{double}}}{F_{\text{single}}} \quad (2.8)$$

Dove:

- $F_{\text{single}}$  è la forza media di rottura per provini single gate.
- $F_{\text{double}}$  è la forza media di rottura per provini double gate senza push-pull o con push-pull a seconda che il fattore SRF sia calcolato per il primo tipo di provini o per il secondo.

KRF è un fattore che serve per capire di quanto si riduce la rigidezza nel caso di provini con linea di giunzione con e senza push-pull rispetto ai provini single gate. Questo parametro è definito dal rapporto riportato nell'Equazione 2.9.

$$\text{KRF} = \frac{k_{\text{double}}}{k_{\text{single}}} \quad (2.9)$$

Dove:

- $k_{\text{single}}$  è la rigidezza media per provini single gate.
- $k_{\text{double}}$  è la rigidezza media per provini double gate senza push-pull o con push-pull a seconda che il fattore KRF sia calcolato per il primo tipo di provini o per il secondo.

# Capitolo 3

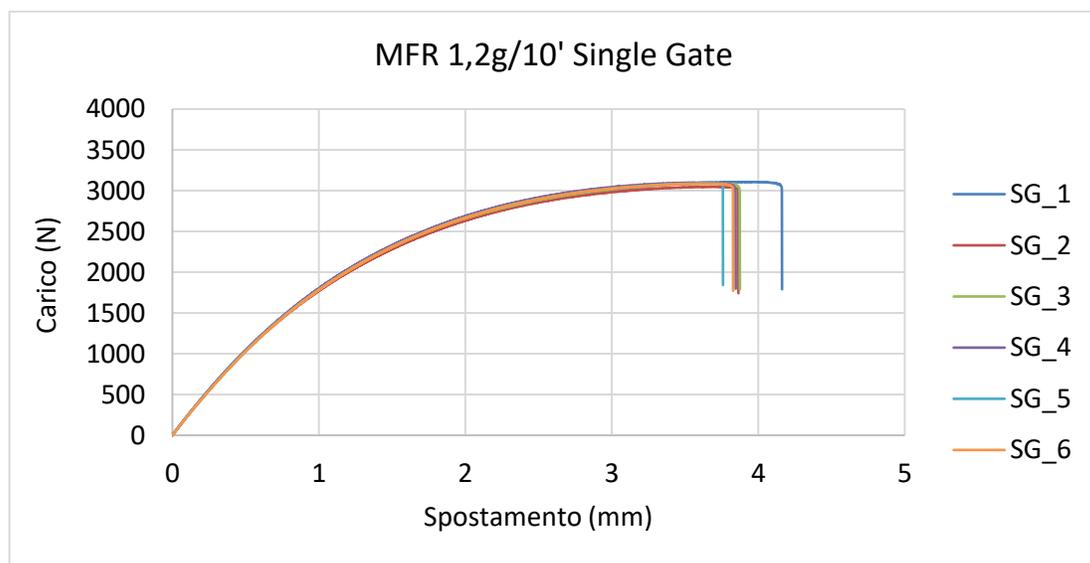
## Risultati ottenuti

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle prove di trazione condotte sui provini realizzati, per ogni valore di MFR del materiale sono riportate le curve carico-spostamento per provini single gate, double gate e double gate con push-pull e i valori di forza massima e di rigidezza ottenuti. Sono inoltre riportati i risultati dello studio per la determinazione della temperatura di soglia ricavati sperimentalmente e tramite simulazioni.

### 3.1 RISULTATI DELLO STUDIO SULL'INFLUENZA DEL MFR

#### 3.1.1 Risultati del materiale con $MFR = 1.2g/10'$

Di seguito sono riportati i risultati delle prove di trazione condotte sui provini realizzati utilizzando il materiale con  $MFR=1.2g/10'$ . In Figura 3.1 sono raffigurate le curve carico-spostamento per i provini single gate e in Tabella 3.1 vengono riportati i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove condotte, la media e la deviazione standard.



**Figura 3. 1:** Curve carico-spostamento per provini single gate con  $MFR=1.2g/10'$ .

**Tabella 3. 1:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini single gate con  $MFR=1.2g/10'$ .

1,2g/10' Single gate								
Prova	1	2	3	4	5	6	Media	STD
Fmax [N]	3106,50	3046,40	3088,70	3097,90	3090,40	3083,90	3085,63	20,79
k [N/mm]	2231,25	2210,00	2223,13	2235,00	2209,38	2168,13	2212,81	24,31

In Figura3.2 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione e senza l'applicazione del processo di push-pull, mentre in Tabella3.2 i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard.

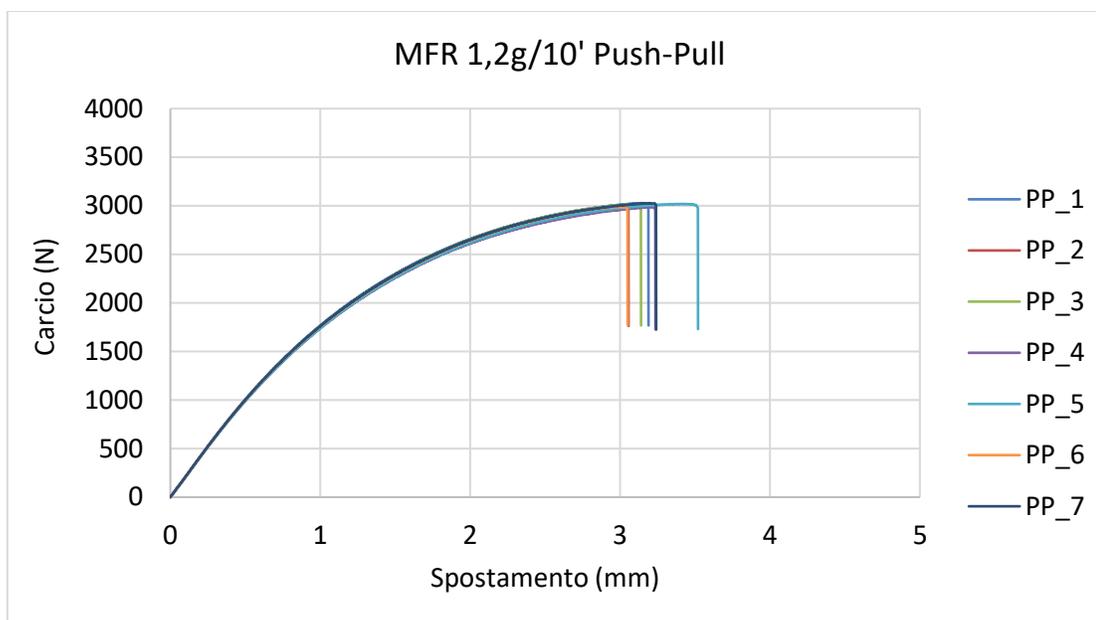


**Figura 3. 2:** Curve carico-spostamento per provini double gate con  $MFR=1.2g/10'$ .

**Tabella 3. 2:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini double gate con  $MFR=1.2g/10'$ .

1,2g/10' No push-pull									
Prova	1	2	3	4	5	6	7	Media	STD
Fmax [N]	1379,70	1437,70	1405,60	1433,50	1377,50	1391,20	1368,90	1399,16	27,49
k [N/mm]	1781,25	1793,13	1778,75	1789,38	1775,00	1747,50	1716,25	1768,75	27,45

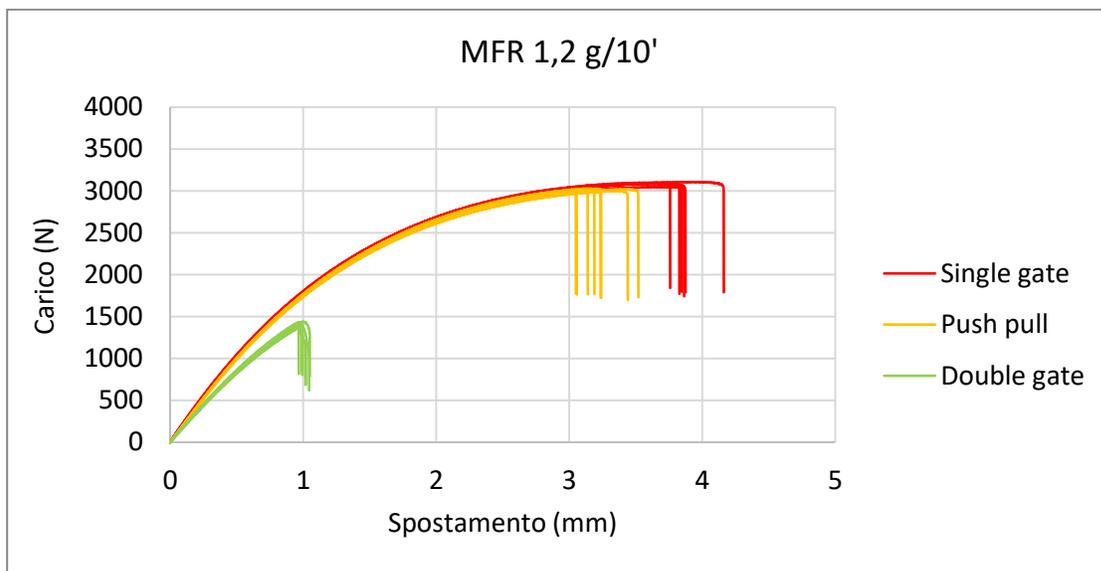
In Figura 3.3 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione stampati utilizzando il processo di push-pull, mentre in Tabella 3.3 sono presenti i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard. In Figura 3.4 vengono riportate in un unico grafico tutte le curve carico-spostamento ottenute dalle prove di trazione per il materiale con MFR=1.2g/10'.



**Figura 3. 3:** Curve carico-spostamento per provini realizzati applicando il processo di push-pull con MFR=1.2g/10'.

**Tabella 3. 3:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini realizzati applicando il processo di push-pull con MFR=1.2g/10'.

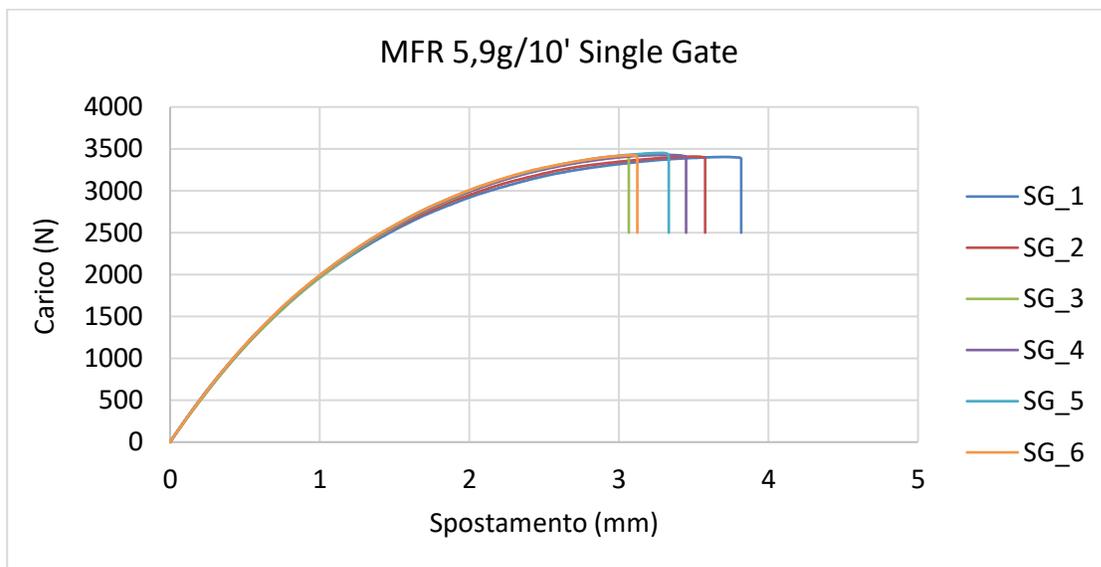
1,2g/10' Push-pull									
Prova	1	2	3	4	5	6	7	Media	STD
Fmax [N]	2991,20	3015,70	2986,70	3018,40	2989,20	3025,60	2998,90	3003,67	15,91
k [N/mm]	2087,50	2102,50	2071,88	2078,13	2095,00	2095,63	2121,25	2093,13	16,31



**Figura 3. 4:** Curve carico-spostamento per provini con MFR=1.2g/10'.

### 3.1.2 Risultati del materiale con MFR = 5.9g/10'

Di seguito sono riportati i risultati delle prove di trazione condotte sui provini realizzati utilizzando il materiale con MFR=5.9g/10'. In Figura3.5 sono raffigurate le curve carico-spostamento per i provini single gate e in Tabella3.4 vengono riportati i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove condotte, la media e la deviazione standard.



**Figura 3. 5:** Curve carico-spostamento per provini single gate con MFR=5.9g/10'.

**Tabella 3. 4:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini single gate con  $MFR=5.9g/10'$ .

5,9g/10' Single gate								
Prova	1	2	3	4	5	6	Media	STD
Fmax [N]	3404,76	3409,52	3407,59	3428,24	3452,12	3425,52	3421,29	17,98
k [N/mm]	2458,27	2501,02	2411,81	2511,20	2480,10	2492,92	2475,89	36,34

In Figura3.6 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione e senza l'applicazione del processo di push-pull, mentre in Tabella3.5 i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard.



**Figura 3. 6:** Curve carico-spostamento per provini double gate con  $MFR=5.9g/10'$ .

**Tabella 3. 5:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini double gate con  $MFR=5.9g/10'$ .

5,9g/10' No push-pull							
Prova	1	2	3	4	5	Media	STD
Fmax [N]	1514,91	1459,97	1489,47	1503,49	1510,57	1495,68	22,17
k [N/mm]	2077,25	2009,73	1992,43	2064,97	2029,26	2034,73	35,94

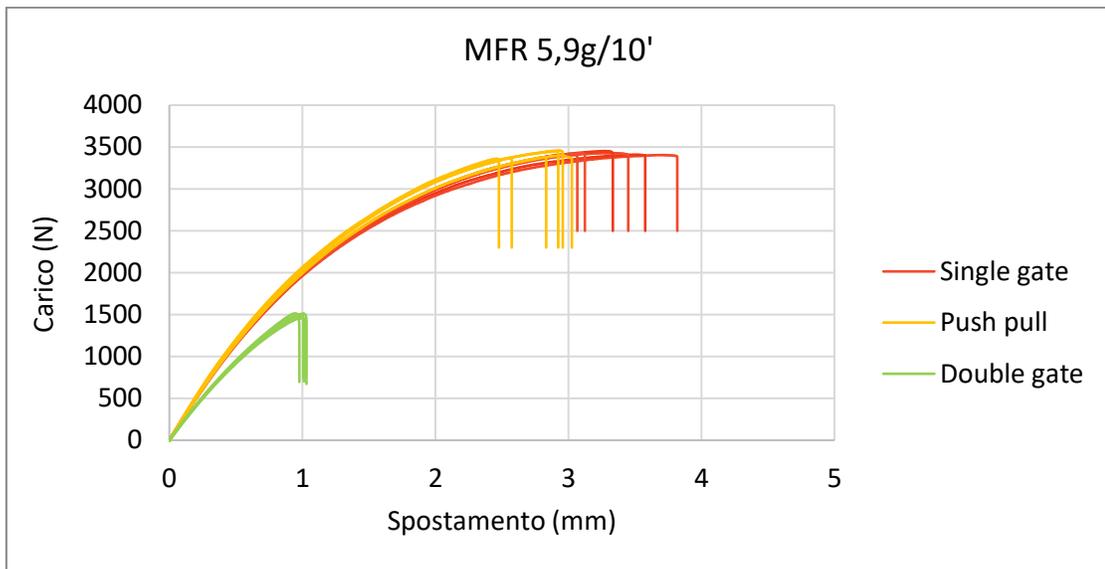
In Figura 3.7 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione stampati utilizzando il processo di push-pull, mentre in Tabella 3.6 sono presenti i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard. In Figura 3.8 vengono riportate in un unico grafico tutte le curve carico-spostamento ottenute dalle prove di trazione per il materiale con  $MFR=5.9g/10'$ .



**Figura 3. 7:** Curve carico-spostamento per provini realizzati applicando il processo di push-pull con  $MFR=5.9g/10'$ .

**Tabella 3. 6:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini realizzati applicando il processo di push-pull con  $MFR=5.9g/10'$ .

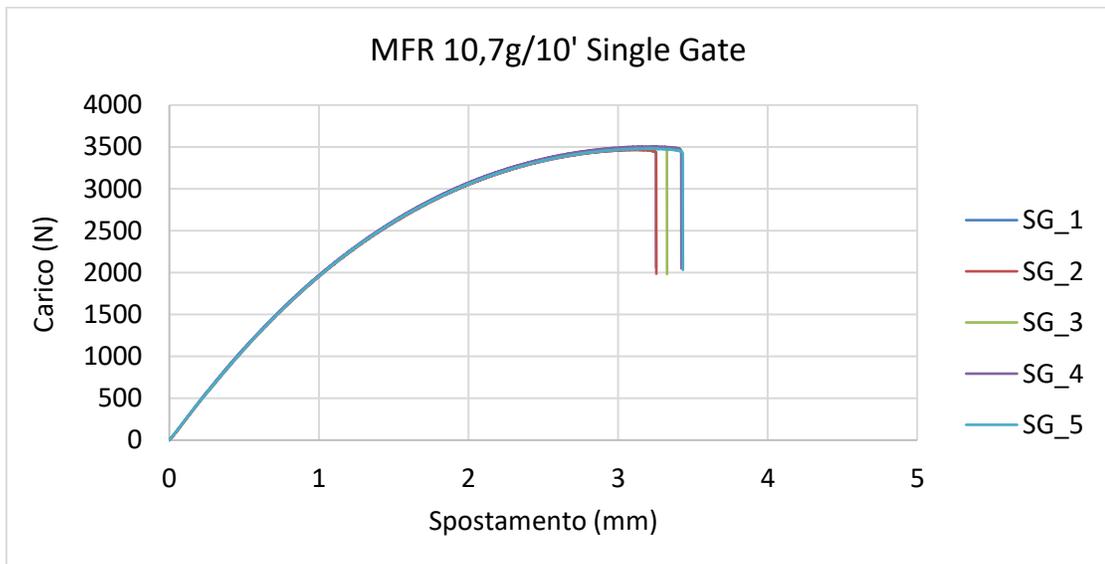
5,9g/10' Push-pull								
Prova	1	2	3	4	5	6	Media	STD
Fmax [N]	3360,41	3371,43	3446,32	3379,69	3433,23	3386,24	3396,22	35,07
k [N/mm]	2579,40	2534,26	2568,87	2448,43	2559,49	2468,04	2526,41	55,23



**Figura 3. 8:** Curve carico-spostamento per provini con MFR=5.9g/10'.

### 3.1.3 Risultati del materiale con MFR = 10.7g/10'

Di seguito sono riportati i risultati delle prove di trazione condotte sui provini realizzati utilizzando il materiale con MFR=10.7g/10'. In Figura3.9 sono raffigurate le curve carico-spostamento per i provini single gate e in Tabella3.7 vengono riportati i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove condotte, la media e la deviazione standard.

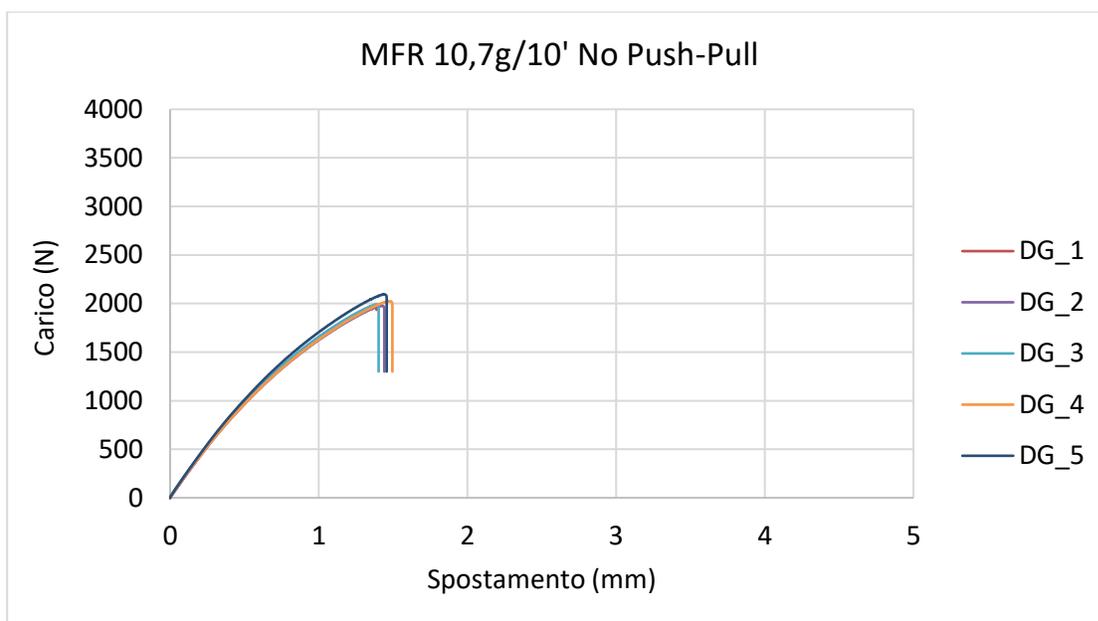


**Figura 3. 9:** Curve carico-spostamento per provini single gate con MFR=10.7g/10'.

**Tabella 3. 7:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini single gate con  $MFR=10.7g/10'$ .

10,7g/10' Single gate							
Prova	1	2	3	4	5	Media	STD
Fmax [N]	3468,5	3465	3488,6	3505	3479	3481,22	16,20
k [N/mm]	2331,87	2311,87	2286,25	2321,85	2312,5	2312,88	16,97

In Figura3.10 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione e senza l'applicazione del processo di push-pull, mentre in Tabella3.8 i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard.



**Figura 3. 10:** Curve carico-spostamento per provini double gate con  $MFR=10.7g/10'$ .

**Tabella 3. 8:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini double gate con  $MFR=10.7g/10'$ .

10,7g/10' No push-pull							
Prova	1	2	3	4	5	Media	STD
Fmax [N]	1967,43	1977,80	1992,62	2024,49	2094,70	2011,41	51,30
k [N/mm]	2120,08	2099,49	2118,65	2091,78	2167,88	2119,58	29,62

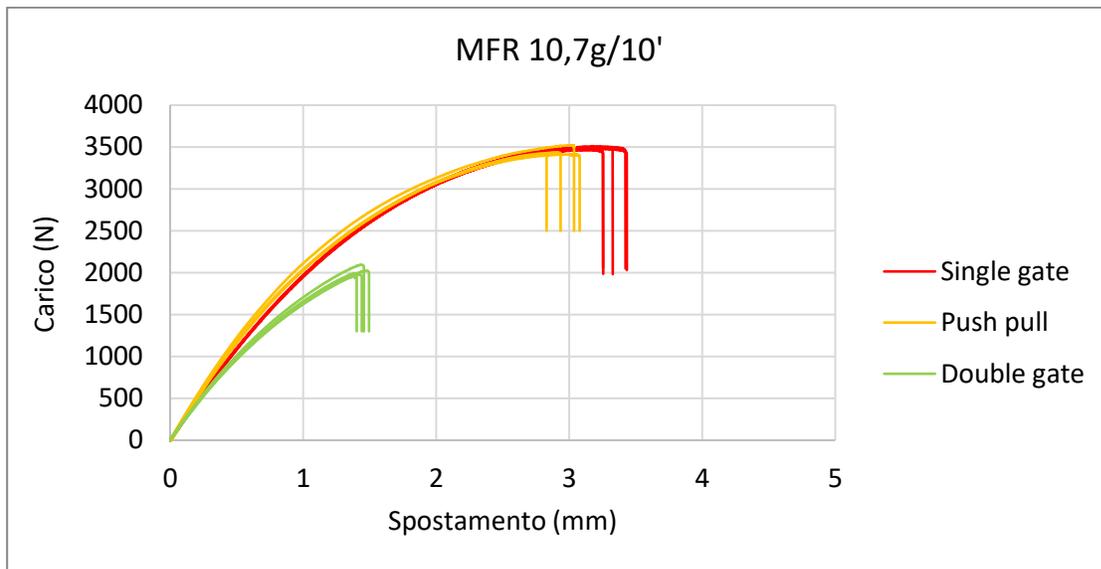
In Figura3.11 sono riportate le curve carico-spostamento relative ai provini con linea di giunzione stampati utilizzando il processo di push-pull, mentre in Tabella3.9 sono presenti i valori della forza massima e della rigidezza ottenuti per le varie prove, la media e la deviazione standard. In Figura3.12 vengono riportate in un unico grafico tutte le curve carico-spostamento ottenute dalle prove di trazione per il materiale con MFR=10.7g/10'.



**Figura 3. 11:** Curve carico-spostamento per provini realizzati applicando il processo di push-pull con MFR=10.7g/10'.

**Tabella 3. 9:** Valori della forza massima e della rigidezza per provini realizzati applicando il processo di push-pull con MFR=10.7g/10'.

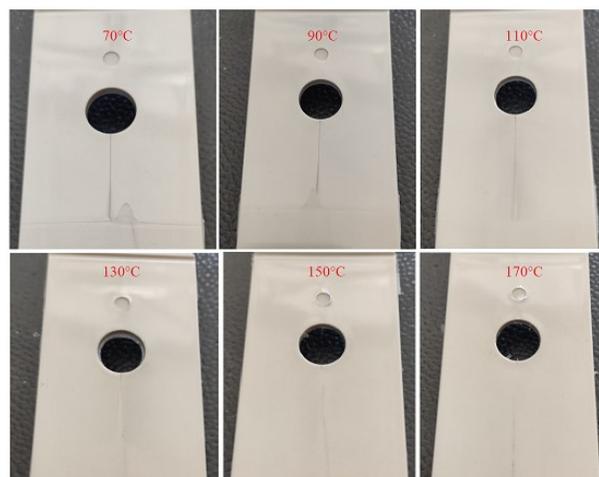
10,7g/10' Push-pull								
Prova	1	2	3	4	5	6	Media	STD
Fmax [N]	3422,12	3438,07	3521,14	3411,06	3580,57	3569,90	3490,48	76,28
k [N/mm]	2521,99	2580,42	2538,75	2552,25	2554,99	2679,64	2571,34	56,46



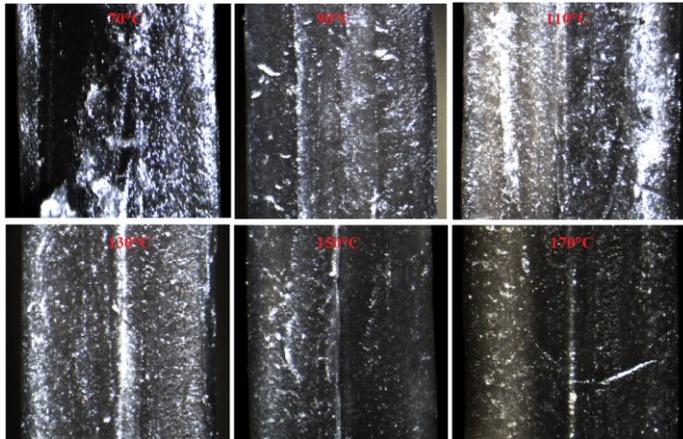
**Figura 3. 12:** Curve carico-spostamento per provini con  $MFR=10.7g/10'$ .

### 3.2 STUDIO SULLA TEMPERATURA DI SOGLIA

Di seguito in Figura3.13 sono riportate le immagini delle placche stampate per lo studio sulla determinazione della temperatura di soglia oltre la quale scompare la linea di giunzione, queste foto servono per valutare l'impatto della variazione della temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM sull'estetica del pezzo stampato. In Figura3.14 sono riportate le foto scattate con uno stereomicroscopio alla sezione delle placche in corrispondenza della linea di giunzione.

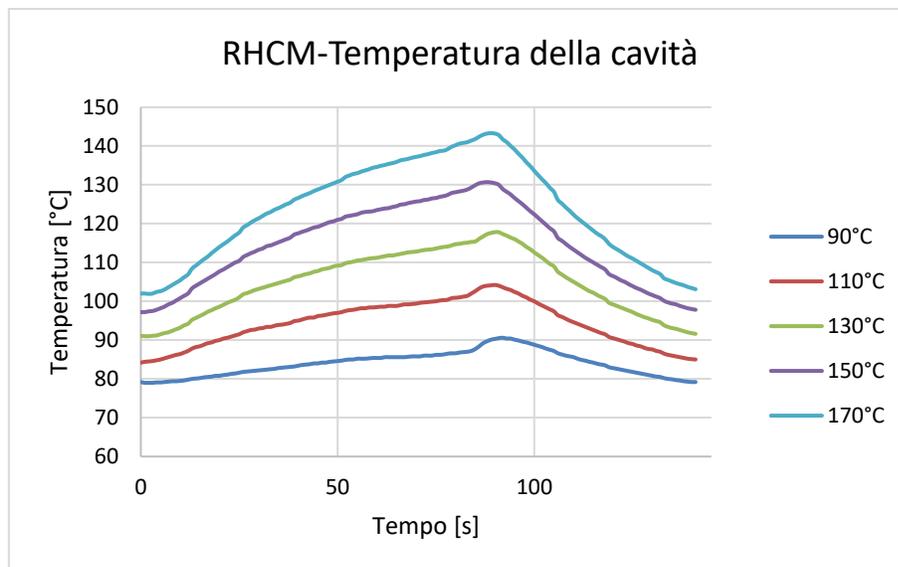


**Figura 3. 13:** Impatto estetico della variazione della temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM.



**Figura 3. 14:** Immagini della sezione delle placche in corrispondenza della linea di giunzione ricavate con lo stereomicroscopio.

Nel grafico di Figura 3.15 sono riportati i cicli termici misurati durante il processo di RHCM con la termocoppia che è stata inserita all'interno dello stampo ad una distanza di 3mm dalla parete della cavità. L'andamento della temperatura è stato misurato a regime, ovvero quando il valore massimo raggiunto rimane costante per più cicli di stampaggio successivi. In Tabella 3.10 sono riportati i valori di temperatura misurati al momento della chiusura dello stampo per le varie temperature impostate, ovviamente non è riportato il valore per  $T=70^{\circ}\text{C}$  perché in questo caso la parete della cavità rimane praticamente a temperatura costante.



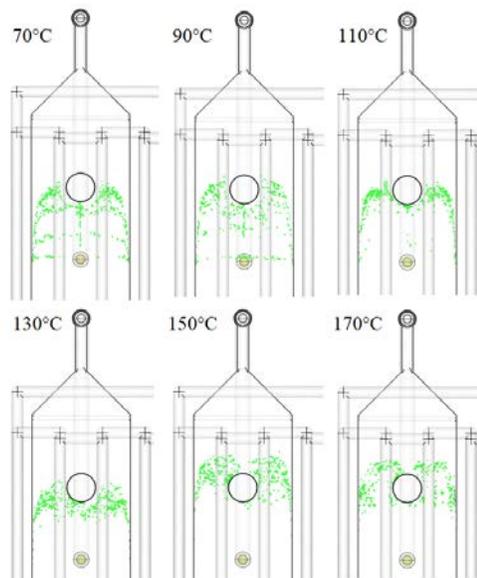
**Figura 3. 15:** Temperatura di parete della cavità misurata con una termocoppia durante il processo di RHCM.

**Tabella 3. 10:** *Temperatura misurata con la termocoppia alla chiusura dello stampo.*

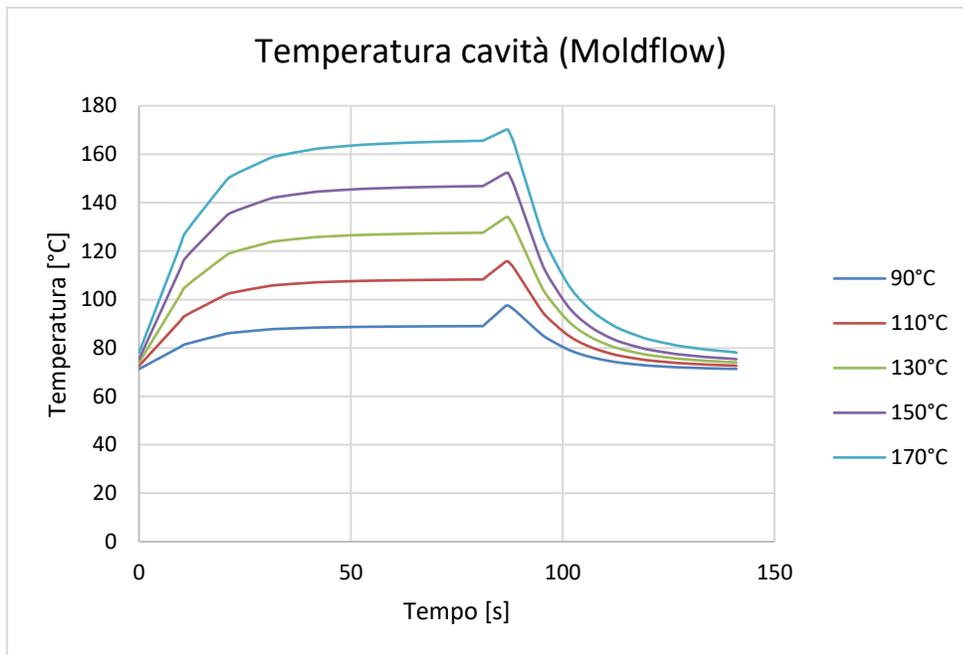
Temp. acqua calda [°C]	Temp. chiusura stampo [°C]
90	86
110	100
130	114
150	128
170	140

Le simulazioni in Moldflow sono state realizzate impostando gli stessi parametri di processo dell'analisi sperimentale, mentre i dati del materiale sono stati ricavati secondo le procedure riportate nel *paragrafo 2.4*. Sono state condotte delle simulazioni fill+pack+cool FEM in cui oltre alla geometria della cavità è stata anche introdotta una geometria relativa allo stampo in modo da simulare il ciclo termico a cui è sottoposto durante il processo di RHCM.

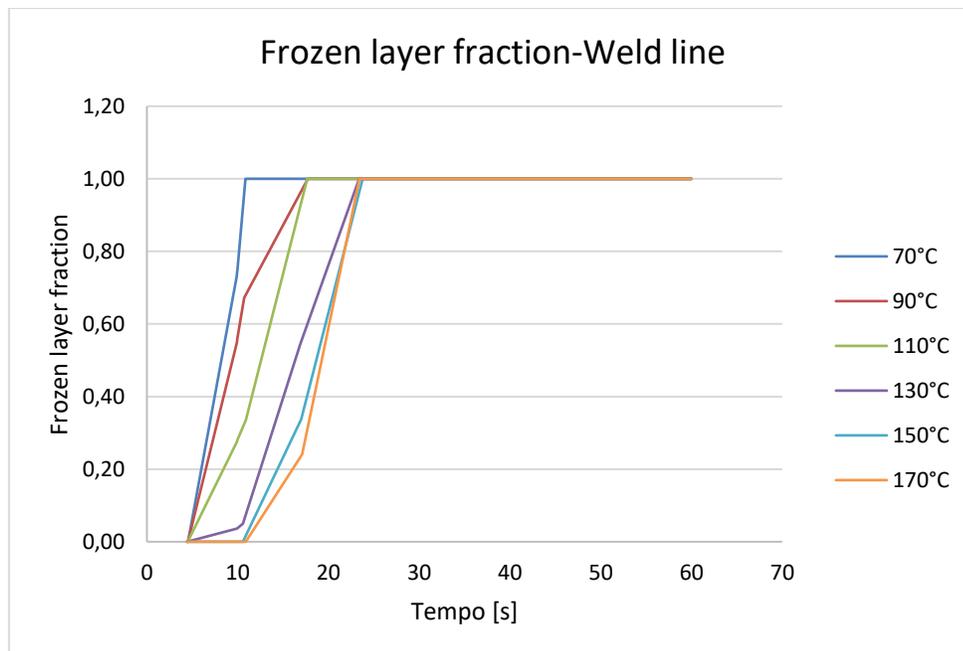
Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte con Moldflow, in particolare in Figura3.16 si vede come si muove la linea di giunzione per effetto del processo di push-pull alle varie temperature, in Figura3.17 sono riportati i cicli termici dovuti al processo di RHCM in prossimità della superficie della cavità, infine in Figura3.18 e Figura3.19 sono raffigurati i grafici del “frozen layer fraction” in funzione del tempo ricavati per un nodo vicino alla zona dove si forma la weld line e vicino alla zona della meld line.



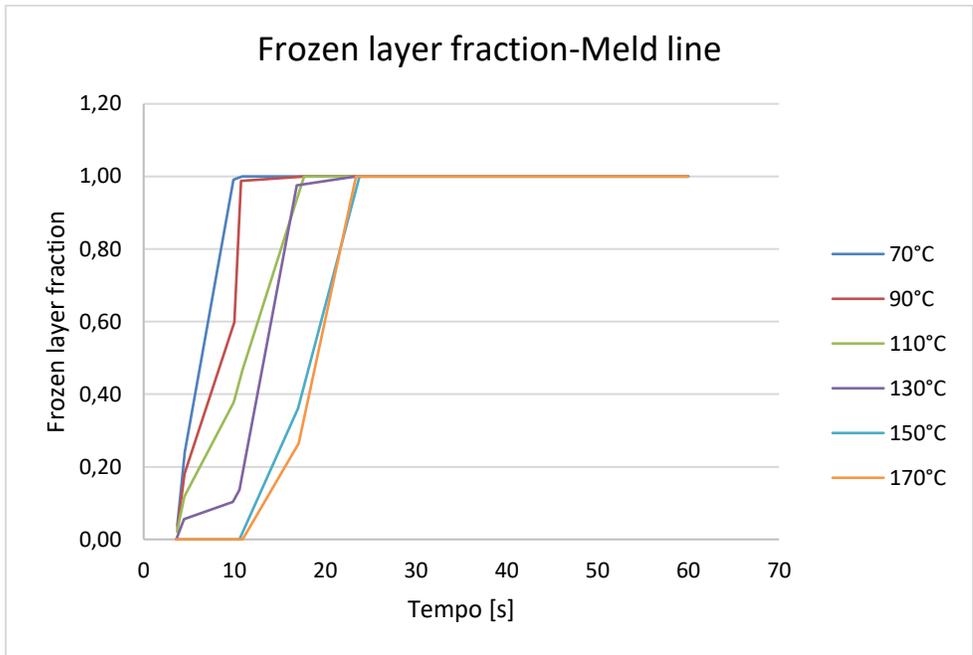
**Figura 3. 16:** *Spostamento della linea di giunzione per effetto del processo di push-pull al variare della temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM.*



**Figura 3. 17:** Andamento della temperatura di parete della cavità ricavato con Moldflow durante il processo di RHCM.



**Figura 3. 18:** Frozen layer fraction per un nodo in prossimità della weld line.



**Figura 3. 19:** *Frozen layer fraction per un nodo in prossimità della meld line.*

# Capitolo 4

## Confronto e discussione dei risultati

In questo capitolo vengono discussi i risultati ottenuti nei due studi condotti. Inizialmente si confrontano i risultati ottenuti dallo studio sull'influenza del MFR, in particolare si andranno ad analizzare i valori del carico a rottura, della rigidezza e gli indici SRF e KRF per poter valutare l'effetto del MFR sulle proprietà a trazione dei vari provini realizzati. Successivamente si discutono i risultati dello studio sulla determinazione della temperatura di soglia ricavati sperimentalmente e li si confrontano con quelli ottenuti dalle simulazioni.

### 4.1 STUDIO SULL'INFLUENZA DEL MFR

#### 4.1.1 Analisi dei valori del carico a rottura e di rigidezza

In Figura 4.1 sono riportati sottoforma di istogramma i valori del carico a rottura (Figura 4.1a) e della rigidezza (Figura 4.1b) ottenuti dalle prove di trazione dei provini single gate a varie fluidità. In Figura 4.2 e 4.3 sono riportati rispettivamente i dati ottenuti per i provini double gate stampanti senza push-pull e con push-pull.

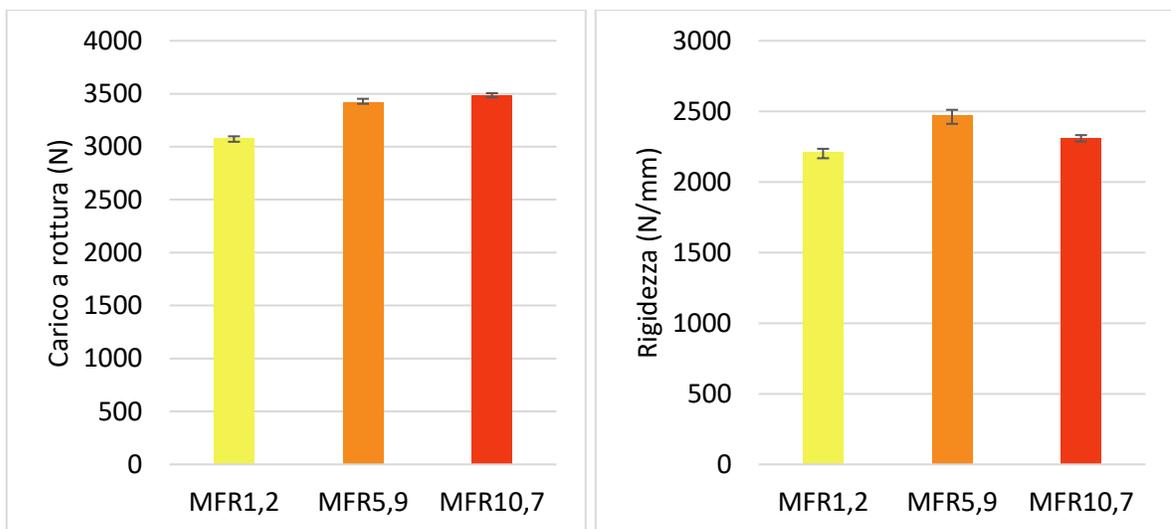
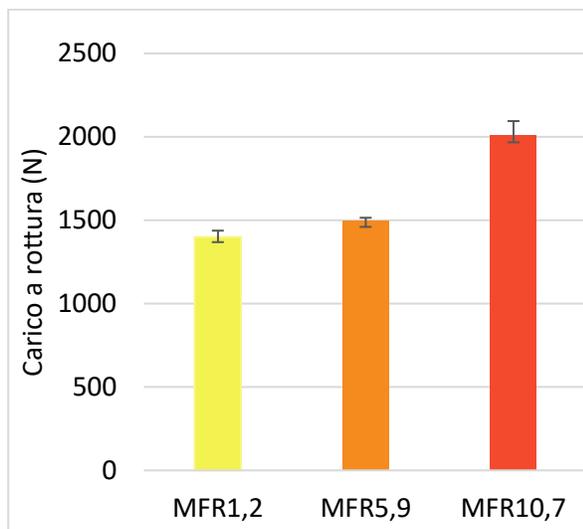
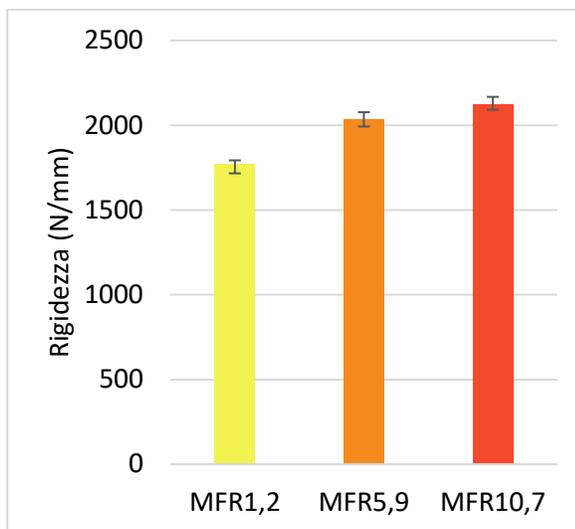


Figura 4. 1a: Carico a rottura per provini single gate.

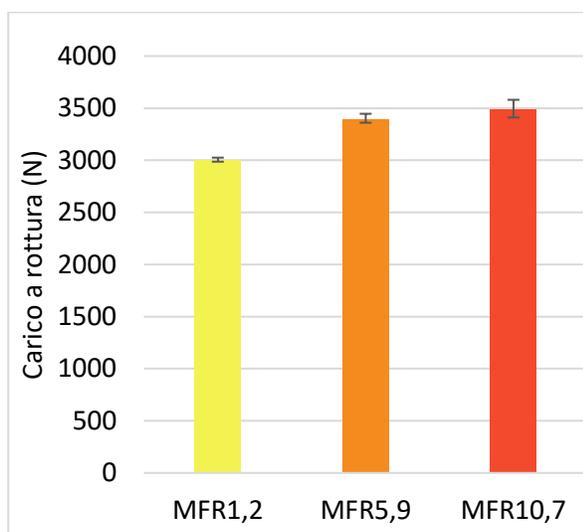
Figura 4. 1b: Rigidezza per provini single gate.



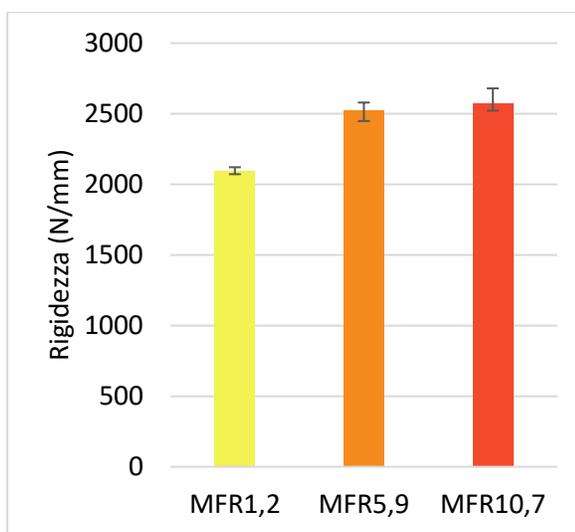
**Figura 4. 2a:** Carico a rottura per provini double gate.



**Figura 4. 2b:** Rigidezza per provini double gate.



**Figura 4. 3a:** Carico a rottura per provini con PPP.



**Figura 4. 3b:** Rigidezza per provini con PPP.

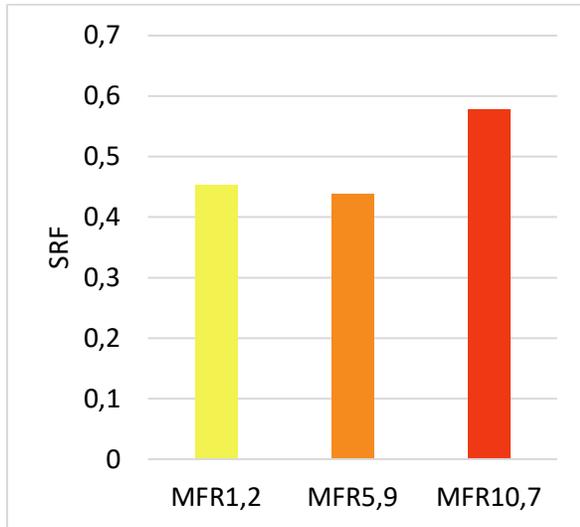
Osservando i grafici è possibile fare alcune considerazioni sull'effetto della fluidità del materiale sulle proprietà ricavate dalle prove di trazione:

- All'aumentare della fluidità del materiale i valori delle proprietà studiate in questo lavoro aumentano per tutti i tipi di provini stampati, ad eccezione della rigidezza dei provini single gate in cui il valore ottenuto per MFR=10.7 è inferiore a quello del materiale con MFR=5.9.

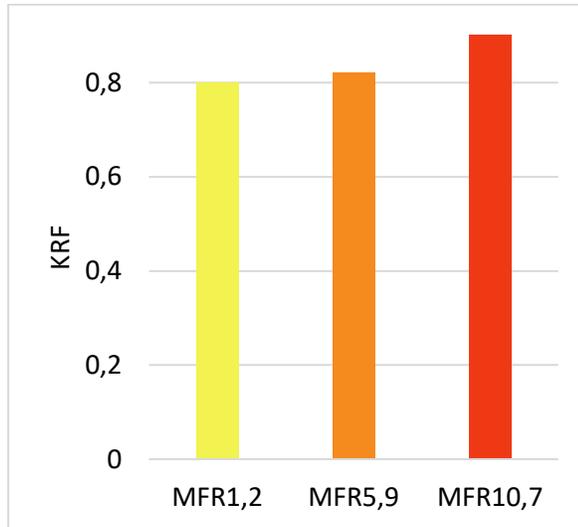
- Per i provini single gate il carico a rottura aumenta all'aumentare della fluidità, questo è dovuto probabilmente alle minori perdite di carico che caratterizzano il fluire del polimero fuso nella cavità. Se il materiale è molto fluido il profilo di velocità è tale da garantire elevati valori di shear rate nello shell layer lungo tutta la lunghezza del provino, se invece è poco fluido le elevate perdite di carico riducono la velocità del fronte di flusso man mano che avanza andando così ad appiattire il profilo di velocità, di conseguenza si riduce anche lo shear rate e quindi le fibre sono meno orientate. L'andamento della rigidità presenta un'anomalia perché ci si aspetterebbe di ottenere il valore più elevato per MFR=10.7, questo è forse dovuto alla scelta errata di qualche parametro di stampaggio.
- Per i provini con linea di giunzione e senza push-pull sia il carico a rottura che la rigidità aumentano all'aumentare della fluidità del polimero. In questi provini le proprietà dipendono dalla forza della linea di giunzione che si viene a formare invece che dall'orientazione delle fibre perché, a causa del flusso a fontana, lungo l'interfaccia della linea la concentrazione di fibre è praticamente nulla. Nel caso in esame meno fluido è il materiale e maggiori sono le perdite di carico, quindi man mano che il polimero avanza sia la velocità che la pressione si riducono in modo più marcato rispetto al materiale più fluido determinando così una linea di giunzione più debole. Il carico a rottura nel caso del materiale con MFR=10.7g/10' è molto più elevato rispetto agli altri, questo può essere dovuto alla presenza di qualche fibra nella zona della linea di giunzione causata dalla maggiore difficoltà nell'impostare correttamente le pressioni di mantenimento per questo materiale.
- Per i provini stampati con il processo di push-pull si riescono a raggiungere valori di carico a rottura e di rigidità vicini a quelli ottenuti per i provini senza linea di giunzione e in alcuni casi anche superiori come si vedrà meglio in seguito dall'analisi degli indici SRF e KRF. Anche in questo caso all'aumentare del MFR aumenta il carico a rottura e la rigidità perché all'aumentare della fluidità diminuiscono le perdite di carico e quindi si ha un maggiore movimento del materiale nella zona della linea di giunzione quando si applica il processo di push-pull, di conseguenza lo shear rate esercitato sulle fibre nella zona del difetto è più elevato.
- Oltre ad avere un effetto sull'orientazione delle fibre il MFR influenza probabilmente anche i vari layer che si formano lungo lo spessore del provino, questo perché un materiale meno fluido fa più fatica a fluire lungo la cavità e quindi l'apporto di calore da parte di nuovo polimero fuso che viene iniettato in cavità sarà ostacolato, condizionando così il raffreddamento del materiale e lo spessore dei vari layer che si formano lungo lo spessore del provino.

#### 4.1.2 Analisi degli indici SRF e KRF

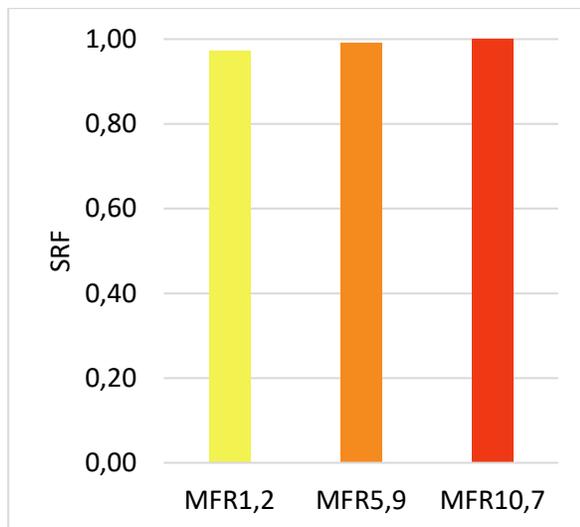
In Figura 4.4 sono riportati sottoforma di istogramma i valori del SRF (Figura 4.4a) e del KRF (Figura 4.4b) calcolati per i provini con linea di giunzione e senza l'applicazione del processo di push-pull, mentre in Figura 4.5a e 4.5b sono riportati i valori ottenuti applicando questo processo. Gli indici calcolati sono riassunti in Tabella 4.1.



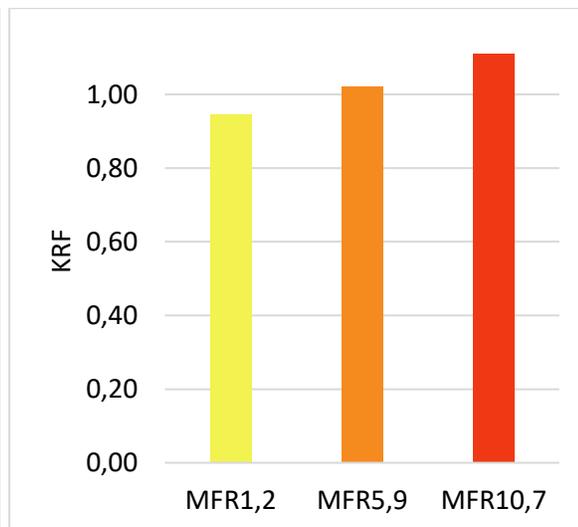
**Figura 4. 4a:** SRF per provini senza PPP.



**Figura 4. 4b:** KRF per provini senza PPP.



**Figura 4. 5a:** SRF per provini con PPP.



**Figura 4. 5b:** KRF per provini con PPP.

**Tabella 4. 1:** *Tabella riassuntiva degli indici SRF e KRF.*

	No push-pull		Push-pull	
	SRF	KRF	SRF	KRF
MFR=1,2g/10'	0,453	0,799	0,973	0,946
MFR=5,9g/10'	0,437	0,822	0,993	1,020
MFR=10,7g/10'	0,578	0,916	1,003	1,112

Questi parametri riprendono le considerazioni già fatte in precedenza sui valori del carico a rottura e della rigidità dei vari provini, ovvero che si nota un generale aumento di questi coefficienti all'aumentare della fluidità, ad eccezione dei valori di SRF per provini senza l'applicazione del PPP. Al netto di questa eccezione è possibile fare le seguenti considerazioni:

- Utilizzare un materiale più fluido consente di ridurre gli effetti negativi delle linee di giunzione sia nel caso in cui venga applicato il processo di push-pull, sia nel caso in cui non venga applicato. Questo effetto positivo si osserva per i due parametri studiati in questo lavoro ovvero il carico a rottura e la rigidità. Il miglioramento è tuttavia abbastanza modesto, soprattutto se viene confrontato con il miglioramento che si ottiene dall'applicazione del processo di push-pull.
- Nel caso di provini con linea di giunzione stampati senza il processo di push-pull il fattore SRF è sempre inferiore al fattore KRF, quindi la linea di giunzione influenza maggiormente il primo parametro rispetto al secondo.
- Il carico a rottura dei provini con linea di giunzione è circa la metà del carico a rottura dei provini single gate, l'indice SRF varia da 0.437 a 0.578.
- Applicando il processo di push-pull il carico a rottura e la rigidità dei provini aumentano notevolmente portandosi a valori simili a quelli del caso single gate, se non addirittura superiori. L'indice SRF varia da 0.973 a 1.003, mentre il KRF varia da 0.946 a 1.112.
- Escludendo i valori di SRF dei provini con MFR=10.7g/10' senza push-pull, influenzati probabilmente da un non corretto settaggio della pressione di mantenimento, la variazione di MFR sembra avere un'influenza maggiore sulla rigidità rispetto al carico a rottura, infatti nel caso di provini stampati con PPP passando da MFR=1.2g/10' a MFR=10.7g/10' il valore di SRF aumenta di circa il 3% mentre l'indice KRF aumenta di circa il 17.5%.
- Nel caso del materiale più fluido applicando il processo di push-pull si ottengono valori di SRF e KRF superiori a 1, quindi il carico a rottura e la rigidità sono

maggiori rispetto al caso di provini single gate. Questo è dovuto all'elevato grado di orientazione delle fibre che si riesce a raggiungere con il processo di push-pull.

- In generale si nota che all'aumentare del MFR si riduce l'effetto indebolente della linea di giunzione nei provini double gate, mentre nel caso di provini realizzati applicando il processo di push-pull aumenta l'effetto rinforzante indotto da questo processo.

## 4.2 STUDIO SULLA TEMPERATURA DI SOGLIA

Analizzando i risultati ricavati dalle simulazioni numeriche condotte con Moldflow e osservando le placche ottenute variando la temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM è possibile formulare le seguenti conclusioni:

- Osservando le placche stampate si nota che la weld line sparisce completamente quando la temperatura dell'acqua calda è impostata a 130°C, ovvero quando la temperatura della cavità, misurata con la termocoppia, è di 114°C. Al di sotto di questa soglia la weld line risulta ben visibile per T=70°C e T=90°C, mentre per T=110°C si nota una riduzione dell'impatto estetico della linea di giunzione che però risulta ancora visibile. Questo è dovuto al fatto che, aumentando la temperatura della superficie della cavità, si riduce lo spessore della pelle e la velocità di raffreddamento del materiale negli strati più esterni quando questo viene in contatto con le pareti della cavità, perciò quando si applica il processo di push-pull questo va ad agire su uno strato più vicino alla superficie e su del materiale meno viscoso perché la temperatura è più alta.
- Sperimentalmente è stato osservato che la meld line è ben visibile quando la temperatura dell'acqua calda è impostata a 70°C, 90°C e 110°C, per T=130°C l'impatto estetico è minore, ma il difetto è ancora visibile. Per T=150°C, la meld line è quasi completamente scomparsa, rimane solo un segno in prossimità del foro, per T=170°C scompare anche questo ultimo segno. Il fatto che la temperatura di soglia della meld line sia superiore rispetto alla temperatura di soglia della weld line è attribuito al fatto che per eliminare questo difetto non basta aumentare la temperatura dello stampo, è necessario anche che la meld line venga investita dal flusso di materiale spinto durante il processo di push-pull. Aumentando la temperatura della parete dello stampo il materiale viene spinto ad una distanza sempre maggiore e il processo di push-pull agisce ad un livello più vicino alla superficie, perciò affinché la meld line sparisca è necessario che la temperatura sia sufficientemente alta da consentire al materiale che viene spinto di investire il difetto per tutta la sua lunghezza.

- Analizzando i risultati delle simulazioni condotte con Moldflow si nota che per temperature pari a 70°C, 90°C e 110°C il “frozen layer fraction” ricavato per due nodi scelti sulla superficie del pezzo in prossimità della meld line e della weld line aumenta rapidamente già nei primi secondi, questo significa che si forma velocemente uno strato di materiale più viscoso che poi solidifica a ridosso della parete della cavità, per questo motivo il processo di push-pull non consente di eliminare i due difetti come si può vedere in Figura 3.16 in cui sia la meld line che la weld line risultano ancora visibili. Per una temperatura pari a 130°C il “frozen layer fraction” durante la fase di iniezione aumenta più lentamente, quindi il processo di push-pull consente di eliminare la weld line, tuttavia la meld line non viene completamente investita dal flusso di materiale, quindi questo difetto non viene totalmente eliminato. Per temperature pari a 150°C e 170°C il “frozen layer fraction” durante la fase di iniezione è pari a zero, questo significa che non si forma pelle, inoltre il materiale che viene spinto durante il processo di push-pull investe completamente la meld line, perciò per queste temperature spariscono entrambi i difetti.
- I risultati ottenuti con le simulazioni mostrano che l’impatto estetico della meld line e della weld line si riduce più velocemente rispetto ai risultati sperimentali e che la meld line sparisce ad una temperatura inferiore. Questo è dovuto al fatto che nelle simulazioni le fasi di riscaldamento e raffreddamento durante il processo di RHCM sono più rapide e le temperature raggiunte alla chiusura dello stampo sono maggiori, questo è dovuto in parte allo strumento usato per misurare la temperatura perché la termocoppia ha un ritardo nel rilevare il valore e questo problema si accentua quando la temperatura viene fatta variare nel tempo. Un altro fattore che può aver contribuito a generare questa differenza è l’inerzia termica dello stampo nelle fasi di riscaldamento e di raffreddamento che probabilmente non è stata correttamente simulata nelle analisi condotte.



# Capitolo 5

## Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro è stata studiata l'influenza del MFR sulle proprietà della linea di giunzione nel processo di push-pull. Per poter valutare l'effetto di questo parametro sono stati stampati dei provini senza linea di giunzione, provini con linea di giunzione ma senza push-pull e provini con linea di giunzione a cui invece è stato applicato tale processo. Il materiale usato è un polipropilene caricato con fibra di vetro al 35% avente tre diversi valori di MFR: 1.2g/10', 5.9g/10' e 10.7g/10'. I provini così ottenuti sono poi stati utilizzati per fare delle prove di trazione in modo da trovare il carico ultimo a rottura e la rigidità. Da queste proprietà sono stati infine calcolati due fattori: SRF e KRF, il primo serve per capire di quanto si riduce il carico a rottura rispetto al caso di provini single gate, mentre il secondo per determinare di quanto si riduce la rigidità. In generale è stato notato che all'aumentare del MFR aumenta sia il carico a rottura che la rigidità così come aumentano anche gli indici SRF e KRF, al netto di qualche risultato che non è in linea con quanto detto, forse a causa di un non corretto settaggio di alcuni parametri. Questo porta a concludere che, a parità di materiale, aumentando il MFR l'effetto indebolente causato dalla presenza della linea di giunzione diminuisce e che l'effetto rinforzante del processo di push-pull aumenta, superando anche i valori di carico a rottura e rigidità ottenuti per provini single gate. Tale fenomeno viene attribuito alle maggiori perdite di carico che caratterizzano il materiale con MFR più basso che quindi condizionano il profilo di velocità, l'orientazione delle fibre, la resistenza delle linee di giunzione e anche la fase di raffreddamento. La presenza della linea di giunzione sembra influenzare maggiormente il carico a rottura piuttosto che la rigidità, mentre nel caso di provini realizzati applicando il processo di push-pull la variazione di MFR sembra influenzare maggiormente la rigidità rispetto al carico di rottura, il KRF infatti aumenta di circa il 17.5% passando da MFR=1.2g/10' a MFR=10.7g/10', mentre il SRF aumenta di circa il 3%.

È stato condotto anche uno studio per determinare la temperatura di soglia oltre la quale si elimina l'impatto estetico della weld line e della meld line. In questo studio sono stati accoppiati il processo di RHCM e il processo di push-pull, il primo serve per variare la temperatura della parete della cavità, il secondo per alternare la pressione di mantenimento in modo da eliminare il difetto. La temperatura dell'acqua calda nel processo di RHCM è stata fatta variare tra 70°C e 170°C, aumentando ogni volta di 20°C. Nel processo di push-

pull è stata applicata una sola alternanza della pressione di mantenimento tra le due unità di iniezione perché lo scopo è di andare ad agire sullo strato più esterno del materiale. L'influenza della temperatura è stata valutata conducendo un'analisi visiva sulle placche stampate, i risultati sperimentali sono stati confrontati con quelli derivanti da delle simulazioni condotte con Moldflow. Dai risultati sperimentali è emerso che la weld line scompare completamente quando la temperatura è superiore ai 130°C ovvero quando la temperatura della parete della cavità misurata con una termocoppia è superiore a 114°C. Per T=70°C e T=90°C la weld line è ben visibile, mentre per T=110°C l'impatto estetico di questo difetto è minore, ma non è completamente scomparso. La weld line è ben visibile per T=70°C, T=90°C e T=110°C, per T=130°C l'impatto estetico è minore, per T=150°C è quasi completamente scomparsa, mentre per T=170°C la weld line non è più visibile. Questi risultati sono dovuti al fatto che riducendo la temperatura di parete della cavità aumenta la velocità di raffreddamento del polimero e aumenta anche lo spessore della pelle, perciò il processo di push-pull va spingere su uno strato di materiale più distante dalla superficie che è anche più viscoso e quindi il suo impatto da un punto di vista estetico è minore. Per la weld line è stata trovata una temperatura di soglia più elevata perché per eliminare questo difetto è necessario che il materiale che viene spinto durante il processo di push-pull la investa completamente. Per quanto riguarda i risultati delle simulazioni condotte con Moldflow è stato osservato come varia nel tempo il "frozen layer fraction" in due nodi in corrispondenza della weld line e della mold line, inoltre è stato osservato come viene spostata la linea di giunzione grazie al processo di push-pull. Le temperature di soglia trovate per la weld line e la mold line sono rispettivamente di 130°C e 150°C, in generale comunque è stato osservato che l'impatto estetico dei due difetti diminuisce più rapidamente all'aumentare della temperatura impostata per l'acqua calda rispetto ai risultati sperimentali. Questo è da attribuire al fatto che le fasi di riscaldamento e di raffreddamento dello stampo sono più rapide e le temperature massime raggiunte sono più elevate. Tale discrepanza rispetto i risultati sperimentali deriva in parte dallo strumento usato per misurare la temperatura della parete della cavità, perché la termocoppia è caratterizzata da un certo ritardo nel raggiungere il valore effettivo di temperatura, e in parte viene attribuita al fatto che l'inerzia termica dello stampo non è stata correttamente simulata nelle analisi condotte.

In questo lavoro è stato progettato anche un sistema di push-pull assistito da gas. Lo scopo di questa nuova tecnica è quello di andare ad eseguire il processo di push-pull agendo localmente nei punti dove si forma la linea di giunzione, in questo modo non è più necessario utilizzare macchine 2K o pistoni, si riducono gli ingombri e i costi per modificare lo stampo. Per poter applicare il processo di PPGAIM sono state progettate due piastre da montare sulla metà mobile dello stampo: in una sono stati realizzati i canali per il gas, nell'altra i canali di raffreddamento e la cavità. Il gas proviene da delle bombole esterne, è presente inoltre una centralina che comanda delle valvole che consentono di alternare il flusso del gas tra i due canali. La geometria del provino è stata leggermente modificata in modo che fossero presenti

due serbatoi di materiale da svuotare con l'ausilio del gas che viene iniettato nel polimero fuso grazie a due iniettori. Non avendo potuto studiare l'efficacia di questa nuova tecnica si suggeriscono alcuni sviluppi futuri sui quali svolgere attività di ricerca:

- Valutare l'effetto di questa nuova tecnica sulla linea di giunzione, eseguire delle prove di trazione e confrontare i risultati con quelli ottenuti per provini single gate e double gate.
- Valutare l'effetto di questa tecnica sull'orientazione delle fibre.
- Confrontare l'effetto del PPGAIM con l'effetto del processo di push-pull eseguito mediante l'utilizzo di due unità di iniezione.
- Valutare l'effetto dei parametri di processo sulle proprietà della linea di giunzione, in particolare studiare gli effetti dei parametri associati al gas, ad esempio: il tempo a cui iniziare ad iniettare il gas (allo switch over, prima dello SO o dopo lo SO), gli intervalli di tempo che definiscono l'alternanza nello spingere il materiale prima da una parte e poi dall'altra, la pressione esercitata dal gas.
- Valutare l'effetto del materiale utilizzato e del MFR sulle proprietà della linea di giunzione nel caso di PPGAIM.
- Implementare in Moldflow una simulazione numerica del processo e confrontare i risultati derivanti da questa simulazione con quelli ottenuti da un'analisi sperimentale.
- Applicare il processo di PPGAIM su componenti reali che presentano la linea di giunzione e verificarne la fattibilità e gli effetti.



# Bibliografia

- [1] Scheda tecnica polipropilene PP, [www.rggomma.it](http://www.rggomma.it).
- [2] “Cos’è l’EPP”, [www.mpe.it](http://www.mpe.it).
- [3] “What is BOPP? And Why Make Labels From It?” [www.uptprinting.com](http://www.uptprinting.com)-2017.
- [4] Produzione tessuto in polipropilene, [www.technofabric.com](http://www.technofabric.com).
- [5] Appunti del corso “Tecnologie e sistemi di lavorazione dei materiali polimerici”.
- [6] “Carbonato di calcio per plastica”, [www.nicemsrl.it](http://www.nicemsrl.it).
- [7] “Mica for plastic industry”, [www.micaworld.in](http://www.micaworld.in).
- [8] “Improving your products: take advantage of talc-filled polypropylene, [www.hqcinc.com](http://www.hqcinc.com)
- [9] “Melt Flow Index”, [www.amse.it](http://www.amse.it).
- [10] ISO1133, “Plastics-Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics”, *International standard*, 2011.
- [11] D1238, “Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastomer”, *ASTM International*, 2014.
- [12] B. Ozcelik, E. Kuram., M. Mustafa Topal, “Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012.
- [13] K. Park, D.-H. Sohn, K.-H. Cho, “Eliminating weldlines of an injection-molded part with the aid of high-frequency induction heating,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010.
- [14] R. Seldén, “Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics.” *Polymer Engineering and science*, 1997; Vol. 37, pag. 205–218.
- [15] H.-C. Kuo, M.-C. Jeng, “Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer,” *Materials and Design*, 2010.

- [16] W. Chookaew, J. Mingbunjurdsuk, P. J Jittham, N. Na Ranong, S. Patcharaphun, “An investigation of weldline strength in injection molded rubber parts.”, *Energy Procedia*, 2013; Vol. 34: pag. 767-774.
- [17] M. Janko, B. Spiegl, A. Kaufmann, T. Lucyshyn, C. Holzer, “Weld line improvement of short fiber reinforced thermoplastics with a movable flow obstacle”, *Journal of Applied Polymer Science*, 2015.
- [18] A. Scantamburlo, M. Sorgato, G. Lucchetta, “Investigation of the inflow effect on weld lines morphology and strength in injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene”, *Polymer Composites*, 2020; Vol.41: pag. 2634-2642.
- [19] A. Geyer, C. Bonten, “Enhancing the weld line strength of injection molded components”, *AIP Conference proceedings 2055*, 2019; 070023-1-070023-5.
- [20] L.-S. Turng, H. Kharbas, “Effect of Process Conditions on the Weld-Line Strength and Microstructure of Microcellular Injection Molded Parts”, *Polymer Engineering and Science*, 2003; Vol. 43 No.1: pag. 157-168.
- [21] Y. C. Kagitci, N. Tarakcioglu, “The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016; Vol. 85: pag. 1125-1135.
- [22] G. Wang, G. Zhao, X. Wang, “Effects of cavity surface temperature on mechanical properties of specimens with and without a weld line in rapid heat cycle molding”, *Materials and Design*, 2013; Vol. 46: pag. 457-472.
- [23] S. Guo, A. Ait-Kadi, “A Study on Weld Line Morphology and Mechanical Strength of Injection Molded Polystyrene/Poly(methyl methacrylate) Blends”, *Journal of Applied Polymer Science*, 2002; Vol. 84: pag. 1856-1865.
- [24] S. Hashemi, “Temperature, strain rate and weldline effects on strength and micromechanical parameters of short glass fibre reinforced polybutylene terephthalate (PBT)”, *Polymer testing*, 2011; Vol. 30: pag. 801-810.
- [25] A. A. Dzulkipli, M. Azuddin, “Study of the Effects of Injection Molding Parameter on Weld Line Formation”, *Procedia Engineering*, 2017; Vol. 184: pag. 663-672.
- [26] C. Lu, X. Yu, S. Guo, “The Mechanism of Ultrasonic Improvement of Weld Line Strength of Injection Molded Polystyrene and Polystyrene/ Polyethylene Blend Parts”, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2006; Vol. 44: pag. 1520-1530.

- [27] X. Yu, C. Lu, H. Wu, S. Guo, “Effect of Ultrasonic Oscillations on Weld Line Strength of PS, PMMA, and Their Blends”, *Journal of Applied Polymer Science*, 2006; Vol. 102: pag. 2990-2997.
- [28] H.-C. Ludwig, G. Fischer, H. Becker, “A Quantitative Comparison of Morphology and Fibre Orientation in Push-Pull Processed and Conventional Injection-Moulded Parts”, *Composites Science and Technology*, 1995; Vol. 53: pag. 235-239.
- [29] S. Patcharaphun, B. Zhang, G. Mennig, “Investigation on Weldline Strength of Short-glass-fiber Reinforced Polycarbonate Manufactured through Push–Pull-processing Technique”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006; Vol. 25, No. 4: pag. 421-435.
- [30] S. Patcharaphun, B. Zhang, G. Mennig, “Simulation of Three-dimensional Fiber Orientation in Weldline Areas During Push-pull-processing”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007; Vol. 26, No. 10: pag. 977-985.
- [31] ISO527, “Plastics-Determination of tensile properties”, *International Standard*, 2012.
- [32] ISO\_SCHEDA\_ISOGLASS\_XT\_7001\_H, [www.sirmax.com](http://www.sirmax.com).
- [33] Appunti del corso “Laboratorio di ingegneria avanzata di prodotto e di processo”.
- [34] Tesi di dottorato di Andrea Scantamburlo, 2020.
- [35] E1269, “Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry”, *ASTM International*, 2018.
- [36] D3418, “Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry”, *ASTM International*, 2019.
- [37] Appunti del corso “Progetto del prodotto in materiale polimerico per impieghi strutturali”.