



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Marcelo Passos da Costa

Estudo do comportamento do fluxo em  
microcavidades na microinjeção.

Marcelo Passos da Costa | Estudo do comportamento do fluxo em  
microcavidades na microinjeção.





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Marcelo Passos da Costa

Estudo do comportamento do fluxo em  
microcavidades na microinjeção.

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor António José Vilela Pontes  
Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco

# DECLARAÇÃO

Nome: Marcelo Passos da Costa

Endereço eletrónico: a55658@alunos.uminho.pt    Telefone: 00351 912687203

Número do cartão do cidadão: 13367055

Título dissertação: **Estudo do comportamento do fluxo em microcavidades na microinjeção.**

Orientadores: Professor Doutor António José vilela Pontes.

Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco.

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

Universidade do Minho, \_\_ / \_\_ / \_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_



## AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação foi possível devido ao trabalho desenvolvido por um conjunto de pessoas, que foram fundamentais na realização desta dissertação, posto isto gostaria de oferecer uma palavra de apreço por toda a disponibilidade e apoio prestado.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr António Pontes pela oportunidade e confiança depositadas para a resolução desta dissertação. Gostaria também de agradecer a sua disponibilidade para resolver todos os problemas que foram aparecendo durante este projeto.

Seguidamente gostaria de agradecer ao meu co- orientador, Dr Joel Oliveira Correia Vasco, pelo apoio prestado assim como auxílio fundamental nas questões durante a execução desta dissertação.

Gostava de agradecer também aos meus colegas Luís Martins pela formação durante a manipulação e utilização da microinjetora, assim como várias dicas fundamentais necessárias durante a realização deste projeto como a minha colega Isabel Santos pela ajuda e apoio prestado.

Queria também dedicar uma palavra de enorme apreço á minha família pelo grande apoio prestado ao longo destes 5 anos da minha vida académica, e crucialmente ao longo destes últimos meses, pelo apoio e motivação para a realização desta dissertação. Sem o seu, incentivo, sacrifício e confiança seria para mim muito mais difícil realizar este curso e esta dissertação. À minha namorada pelo constante incentivo e muita compreensão ao longo destes meses em que a dissertação sempre esteve em primeira opção.

Gostaria também de agradecer ao DEP e todos os seus colaboradores pelo excelente acolhimento durante estes 5 anos e a todos os meus colegas, com quem trabalhei e desenvolvi amizades. Foi através deste ambiente agradável, que nestes 5 anos desenvolvi competências muito importantes para o meu futuro. Muito Obrigado.

*“ A sabedoria é filha da experiência ” – Leonardo Da Vinci*



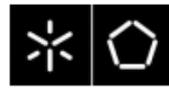


## **RESUMO**

A microinjeção pode ser utilizada como um processo de monitorização para a realização da caracterização reológica, no comportamento desenvolvido pelos polímeros fundidos durante o enchimento em microcavidades. O sistema adotado permite obter a informação do comportamento do polímero no interior dos microcanais estudados. A dissertação apresentada é adequada uma vez que enuncia vários fenómenos reológicos tais como, o escorregamento na parede dos microcanais, tensão de superfície gerada, queda de pressão, assim como a frente do fluxo do fundido. Neste estudo desenvolvido o sistema de aquisição de dados para avaliar a queda de pressão foi obtido através do uso de dois sensores incorporados no interior do molde. Os microcanais foram utilizados para a avaliação reológica do polímero fundido, contudo o uso de posições com diferentes microcanais, permite apenas a informação sobre a queda de pressão ao longo do microcanal, bem como a pressão de injeção desenvolvida e a velocidade da frente do fluxo. Assim através do uso de um molde como ferramenta acoplado á utilização de uma microinjetora foi possível realizar uma quantificação do comportamento reológico do polímero fundido. O uso da microinjeção como sistema de estudo no âmbito da reometria, permitiu a elaboração das curvas de fluxo para dois materiais, polipropileno (Moplen HP 548R) e poliestireno (Edistir N1910), desenvolvidas através da imposição de diferentes velocidades de injeção. Neste trabalho e para as curvas de fluxo obtidas para o microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  demonstra-se claramente o desenvolvimento do escorregamento ao longo das paredes do microcanal, já para o microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , não foi possível demonstrar-se o efeito de escorregamento. No entanto toda a configuração experimental imposta permitiu obter conclusões importantes sobre o comportamento do fluxo dentro de ambos os microcanais.

**Palavras – Chave:** Microinjeção; Microcanais; Microcavidades; Reologia; Fluxo; Escorregamento.



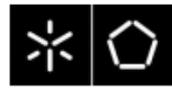


## **ABSTRACT**

Microinjection moulding can be used to process monitoring and rheological characterization, and can help to understand the behaviour of polymer melt flows during the filing of micro cavities. The system used allows a study on characterization of polymer behaviour in microchannels. This approach is appropriate since rheological phenomena such as wall slip, surface tension, melt pressure drop and polymer flow length can be studied. In this system, the data acquisition for the pressure drop has been made by incorporation of two sensors inside the mould. The microchannels were used for rheological evaluation of polymer flow; therefore, the products of the injection tests with these moulding blocks with different microchannels will provide only useful information on pressure drop along the microchannel, injection pressure developed and melts front speed. Thus, through the utilization of a characteristic mould as tool for the quantitative evaluation of the rheological behaviour of polymer melts under typical microinjection moulding conditions was developed. The use of a microinjection moulding tool for rheometry purposes provided the preparation of flow curve for two materials, polypropylene, (Moplen HP 548R) and to polystyrene, (Edistir N1910), developed through the imposition of different injections speeds. In this present work, the flow curves measured by the two sensors into the mould demonstrated that the wall-slip effect was clearly observed to microchannel with section of  $100\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$  and the other microchannel, with section of  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , it was not possible demonstrated the wall slip effect. For the other hand, entire configuration experimental imposed allowed to obtain important conclusions concerning flow behavior within both microchannels.

**Keywords:** Micro Injection Moulding, Microcavities Microchannels, Rheology, Flow, Wall slip.





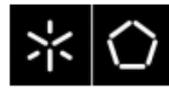
## **MOTIVAÇÃO**

A implementação dos novos avanços tecnológicos na produção de microcomponentes plásticos tem surgido devido á elevada existência na produção de peças com dimensões micrométricas. No entanto atualmente torna-se um desafio entender como ocorre o desenvolvimento do fluxo em microcanais dos polímeros fundidos para uma escala micrométrica.

A caracterização do fluxo em microcanais é um desafio, pois atualmente o comportamento do fluxo para a escala macro, moldação por injeção, diverge daquilo que realmente acontece quando é realizado para uma abordagem a nível micrométrico.

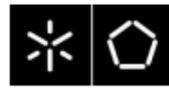
Espera-se que seja possível definir de uma forma mais detalhada o desenvolvimento do fluxo nos microcanais durante o processo de microinjeção, fornecendo uma resposta ao setor da indústria para a reprodução e microinjeção de microcomponentes.





# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
MOTIVAÇÃO .....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS .....	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xx
ÍNDICE DE TABELAS .....	xix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Conteúdo .....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Micromoldação .....	3
2.2 Microinjeção .....	3
2.3 Fluxo .....	5
2.3.1 Regimes de Escoamento de Fluidos .....	5
2.3.1.1 Fluxo Laminar .....	5
2.3.1.2 Fluxo Tampão .....	6
2.3.1.3 Fluxo Turbulento .....	6
2.4 Microreologia .....	8
2.4.1 Efeito do “Escorregamento” .....	8
2.5 Caracterização reológica não convencional em microcanais .....	12
CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO .....	19
3.1 Fluidos não-newtonianos .....	19
3.2 Fluidos newtonianos .....	20
3.3 Velocidade de Escorregamento .....	21
4 METODOS EXPERIMENTAIS .....	23
4.1 Molde .....	23



4.2 Instrumentação .....	28
4.3 Controlo de Temperatura .....	30
4.4 Microcanais .....	31
4.5 Insertos moldantes .....	34
4.6 Materiais .....	35
CAPÍTULO 5 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	39
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
6.1 Reometria capilar .....	45
6.1.1 Poliestireno .....	46
6.1.2 Polipropileno .....	47
6.2 Resultados preliminares .....	48
6.3 Microcanal 200 µm x 200 µm .....	51
6.3.1 Parâmetros de processamento .....	51
6.3.2 Curvas de Pressão do microcanal 200 µm x 200 µm .....	52
6.3.3 Curvas de fluxo microcanal 200 µm x 200 µm .....	55
6.4 Microcanal 100 µm x 400 µm .....	59
6.4.1 Parâmetros de processamento. ....	59
6.4.2 Curvas de Pressão do microcanal 100 µm x 400 µm .....	60
6.4.3 Curvas de Fluxo microcanal 100 µm x 400 µm .....	61
6.5 Microcanal 200 µm x 200 µm vs Microcanal 100 µm x 400 µm .....	63
6.5.1 Reometria Vs Microinjeção no microcanal 200 µm x 200 µm .....	63
6.5.2 Reometria Vs Microinjeção no microcanal 100 µm x 400 µm .....	65
6.5.3 Influência da Secção dos Microcanais .....	67
CONCLUSÃO .....	69
TRABALHO FUTURO .....	71
BIBLIOGRAFIA .....	73
ANEXOS .....	77
ANEXO 1 .....	77
ANEXO 2 .....	78



ANEXO 3.....	80
ANEXO 4.....	82
ANEXO 5.....	84





## **LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS**

$\mu$ I – Microinjeção

ABS – Copolímero de Acrílonitrilo Butadieno Estireno

COP – Copolímero de Olefino Cíclico

MABS – Metacrilato de Metilo Acrilonitrilo Butadieno Estireno

PAI – Poliamida-imida

PEI – Poliéter-imida

PC – Policarbonato

PMMA – Polimetacrilato de metilo

PS – Poliestireno

PSU – Polisulfona

PPE – Poli-Éter de Fenileno

SAN – Copolímero de estireno-acrilonitrilo

SBS – Copolímero de estireno-butadieno – estireno

LCP – Polímero Líquido Cristalino

PA 6 – Poliamida 6

PA 12 – Poliamida 12

PBT – Polibutileno-tereftalato

PE – Polietileno

PEEK – Poliéter Cetona

PFA – Perfluoroalcóxido

PLA – Poli Ácido Láctico

PVDF – Fluoreto de Polivinilideno

POM – Polióxido de metileno



PP – Polipropileno

$\Delta P$  – Queda de Pressão

TTS – Princípio da Superposição Tempo-Temperatura

$\Delta t$  – Intervalo de Tempo

$\tau$  – Tensão de corte

$\gamma$  – Taxa de corte

$\eta$  – Viscosidade

Q – Caudal volumétrico

R – raio

L – comprimento

w – Largura

h – Altura

n – Declive

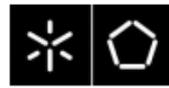
$T_{\text{Cilindro}}$  = Temperatura do Cilindro

$T_{\text{Molde}}$  = Temperatura do Molde

$T_{\text{Fundido}}$  = Temperatura do Fundido

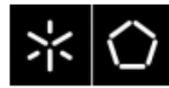
2D – Desenho em duas dimensões

CAD – Desenho assistido por computador



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Máquina de microinjeção (Arburg Allrounder 170 U) .....	4
<b>Figura 2.</b> Exemplo de microcomponentes .....	4
<b>Figura 3.</b> Ilustração da distribuição (A) velocidades; (B) de tensões em regime laminar no interior de um canal circular de secção uniforme .....	5
<b>Figura 4.</b> Esquema representativo da distribuição de (A) velocidades (B) tensões de corte .....	6
<b>Figura 5.</b> (A) Perfil de velocidade média no fluxo turbulento, no interior de um canal circular de secção uniforme; (B) Variação da velocidade pontual, em função do tempo no fluxo turbulento.....	6
<b>Figura 6.</b> Layout proposto para a fabricação de microprovetes.....	7
<b>Figura 7.</b> Influência do deslizamento no comportamento do fluxo .....	9
<b>Figura 8.</b> Efeito de “Escorregamento “.....	10
<b>Figura 9.</b> Conceito desenvolvido para um estudo reológico em microcanais.....	12
<b>Figura 10.</b> Variáveis para a avaliação do fluxo em microcanais .....	13
<b>Figura 11.</b> Microcanal e sensores de pressão .....	13
<b>Figura 12.</b> Layout da célula de microinjeção, demonstração das duas zonas de controlo de temperatura e da pressão do sistema, com sensores localizados na placa fixa do molde .....	14
<b>Figura 13.</b> Curvas de fluxo de reometria obtidas com base nas secções de 200 µm × 200 µm e 400 µm x 100 µm características dos microcanais .....	14
<b>Figura 14.</b> Resultados a diferentes temperaturas da reometria capilar convencional e com a secção do microcanal com 200 µm × 200 µm .....	15
<b>Figura 15.</b> Relação entre a velocidade média do fundido e velocidade de deslizamento na parede ao longo do canal .....	16
<b>Figura 16.</b> Layout utilizado no estudo com os sensores nos microcanais .....	17
<b>Figura 17.</b> Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 200 ° C.....	17
<b>Figura 18.</b> Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 225 ° C.....	18
<b>Figura 19.</b> Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 250 ° C.....	18
<b>Figura 20.</b> Máquina microinjetora BOY 12 A.....	23
<b>Figura 21.</b> Dimensões em milímetros e a estrutura geral do Molde. ....	24
<b>Figura 22.</b> A- Sistema de guiamento do molde; B - Cones de travamento do molde a amarelo. ....	25
<b>Figura 23.</b> Ventilação no molde dos escapes de gases. ....	26
<b>Figura 24.</b> A- Sistema de refrigeração na placa; B- sistema de refrigeração no postigo. ....	27
<b>Figura 25.</b> A- Vista lateral do sistema de extração; B- Avanço do sistema de extração. ....	27
<b>Figura 26.</b> Ferramenta utilizada para a caracterização microreológica. ....	28
<b>Figura 27.</b> Layout dos sistemas de pressão no interior do molde. ....	29
<b>Figura 28.</b> Sistema de aquisição de dados. ....	29
<b>Figura 29.</b> Colocação dos termopares a vermelho na figura; A- lado injeção; B- lado extração.....	30
<b>Figura 30.</b> Geometria e forma necessária para a inserção do termopar do lado da extração. ....	30



**Figura 31.** Sistema de monitorização de temperatura do molde. .... 31

**Figura 32.** Layout do microcanal com 5 milímetros com os respetivos sensores. .... 32

**Figura 33.** Sistema de alimentação ..... 32

**Figura 34.** Dimensões gerais em milímetros dos microcanais com 5 milímetros de comprimento. .... 33

**Figura 35.** Microcanais L=5 em cima e microcanais L=0 em baixo. .... 33

**Figura 36.** Dimensões em milímetros dos inserts ..... 35

**Figura 37.** Esquematisação do estudo para o microcanal 400 µm x 100 µm; **A**-Microcanal L=5; **B**-microcanal L=0 ..... 40

**Figura 38.** A- Demonstração do Sistema utilizado, B- Instrumentação do Molde. .... 41

**Figura 39.** Queda de pressão obtida no microcanal com 200 µm x 200 µm ente os instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$ ; ..... 42

**Figura 40.** A- Reómetro Capilar; B- Zonas de aquecimento; C- Extrusão do fundido através das fieiras; 45

**Figura 41.** Curvas de Fluxo obtida através da reometria capilar para o Edistir N1910 ..... 46

**Figura 42.** Curva de Fluxo obtida através da reometria capilar a 240°C para o Edistir N1910. .... 46

**Figura 43.** Curvas de Fluxo obtida através da reometria capilar para o Moplen HP 548R. .... 47

**Figura 44.** Curvas de fluxo obtidas através: A- Autodesk Moldflow Insight 2012; B- Moldex 3D,[8]. ... 47

**Figura 45.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 80°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; ..... 52

**Figura 46.** Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 80°C e velocidade de injeção de 200mm/s; ..... 52

**Figura 47.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 90°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; ..... 53

**Figura 48.** Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 90°C e velocidade de injeção de 200mm/s; ..... 53

**Figura 49.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 100°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; ..... 53

**Figura 50.** Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 100°C e velocidade de injeção de 200mm/s; ..... 54

**Figura 51.** Curvas de Fluxo do PP\_Moplen HP548R para diferentes  $T_{Molde}$  no microcanal de 200 µm x 200 µm. .... 55

**Figura 52.** Curvas de Fluxo do PP\_Moplen HP548R para diferentes  $T_{Molde}$  no microcanal de 200 µm x 200 µm. .... 55

**Figura 53.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{Molde} = 100^{\circ}C$ , para a secção de 200 µm x 200 µm. .. 57

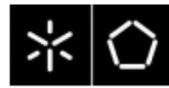
**Figura 54.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{Molde} = 90^{\circ}C$ , para a secção de 200 µm x 200 µm. .... 57

**Figura 55.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{Molde} = 80^{\circ}C$ , para a secção de 200 µm x 200 µm. .... 58

**Figura 56.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 155°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; ..... 60

**Figura 57.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 155°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; ..... 60

**Figura 58.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{molde}$  a 155°C para a secção de 100 µm x 400 µm. .... 61



**Figura 59.** Curvas de fluxo e tensão corte vs taxa de corte obtidas para o microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ . ..... 62

**Figura 60.** Resultados obtidos para o PP\_Moplen HP548R, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , injetado para uma  $T_{\text{Molde}}= 80^{\circ}\text{C}$ ;  $90^{\circ}\text{C}$ ; e  $T_{\text{Fundido}} = 240^{\circ}\text{C}$ .  $T_{\text{Molde}}=100^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ ..... 63

**Figura 61.** Resultados obtidos para o PS\_Edistir 1910, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , injetado para uma  $T_{\text{Molde}}= 80^{\circ}\text{C}$ ;  $90^{\circ}\text{C}$ ; e  $T_{\text{Fundido}} = 240^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{Molde}}=100^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ ..... 64

**Figura 62.** Resultados obtidos para o PP\_Moplen HP548R, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , injetado para uma  $T_{\text{Molde}}= 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ ..... 65

**Figura 63.** Resultados obtidos para o PS\_Edistir 1910, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , injetado para uma  $T_{\text{Molde}}= 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ ..... 65





## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Insetos utilizados no interior do molde.....	34
<b>Tabela 2.</b> Polímeros utilizados em microinjeção .....	36
<b>Tabela 3.</b> Principais propriedades dos materiais.....	37
<b>Tabela 4.</b> Características das feiras utilizadas. ....	45
<b>Tabela 5.</b> Conjunto de experiências realizadas nos microcanais L=5 e L=0. ....	50
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros de processamento para a secção 200 µm x 200 µm para L=5 e L=0. ....	51
<b>Tabela 7.</b> Parâmetros de processamento para a secção 400 µm x 100 µm para L=5 e L=0. ....	59
<b>Tabela 8.</b> Características dos microcanais 200 µm x 200 µm e 100 µm x 400 µm. ....	67





## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

A replicação de microcomponentes em plástico através da moldação por microinjeção apresenta cadências elevadas de produção. No entanto e durante o processo de microinjeção o desenvolvimento do polímero fundido possui um comportamento característico em microcanais.

No decorrer desta dissertação é efetuado um estudo sobre o comportamento do fluxo desenvolvido em microcanais, pois o estudo feito recai sobre a microreologia presente ao longo de diferentes microcanais. Em termos reológicos reproduz-se a formação de um fluxo em fonte ao longo do microcanal, que apresenta uma velocidade máxima no centro e nula junta às paredes do microcanal, no entanto para valores de taxa de corte muito elevados observa-se que a frente do polímero fundido excede um valor crítico e presencia-se um escorregamento ao longo do microcanal. A realização desta dissertação pretende esclarecer e planificar o que realmente acontece ao polímero fundido nesta fase. Com o auxílio da microreologia, ciência que estuda a reologia á escala micrométrica, vão realizar-se curvas de fluxo características para demonstrar o comportamento do fluxo em microcanais.

Abordagem desta dissertação permite o processamento de diferentes polímeros em diferentes microcanais com um conjunto de parâmetros de processamento para a sua caracterização utilizando o processo de microinjeção.

### **1.1 Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação é estudar o fluxo desenvolvido no interior de um molde para microinjeção utilizando microcanais com diferentes secções e através da incorporação de sensores e com um sistema de aquisição de dados vai realizar-se e caracterizar- se reologicamente o fluxo de polímeros fundidos á escala micrométrica. Assim os principais objetivos para esta dissertação são:

- Seleção dos materiais a usar;
- Caracterização reológica dos materiais utilizados;
- Montagem e preparação do sistema:
  - Molde – Microcanais;



- Microinjetora;
- Controlo de Temperatura;
- Sistema de aquisição de dados;
- Condições de processamento a usar para a microreologia;
- Processamento e aquisição dos dados obtidos;
- Tratamento dos resultados obtidos;
- Avaliação do fluxo durante a microinjeção das microcavidades;
- Caracterização das curvas fluxo;
- Escrita da tese;

## **1.2 Conteúdo**

A dissertação é constituída por seis capítulos, o primeiro refere-se a uma fase introdutória do estudo, enuncia-se o objetivo global da realização da dissertação. No segundo capítulo é referido toda a revisão bibliográfica adquirida para compreender os trabalhos científicos mais relevantes, como a reflexão do conhecimento alcançado do estudo a elaborar. Já o seguinte capítulo refere-se ao estudo da caracterização do fluxo, neste capítulo demonstra-se através da reologia quais as equações e correções a elaborar para a análise do escoamento do fluxo. No capítulo posterior descreve-se os métodos experimentais, neste capítulo aborda-se o molde utilizado, bem como toda a sua instrumentação, o controlo de temperatura, os microcanais estudados, geometrias dos insertos moldantes e os materiais utilizados. No seguinte capítulo demonstra-se o procedimento experimental elaborado durante o tratamento dos resultados, para a avaliação e validação dos resultados obtidos. Seguidamente e no último capítulo demonstra-se e interpreta-se os resultados obtidos e devida discussão dos resultados. No final desta dissertação obtêm-se as conclusões, assim como o desenvolvimento de trabalhos futuros.



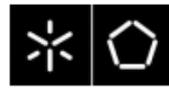
## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Micromoldação**

A miniaturização de componentes e de sistemas é claramente, uma tendência global dos setores tecnológicos mais avançados. Nas duas últimas décadas, têm vindo a surgir necessidades cada vez maiores da utilização de microcomponentes e de micro estruturas dado o constante aumento do número de aplicações técnicas nas áreas da biomedicina, farmacêutica, fibras óticas, microeletrónicas, telecomunicações, informática, indústria automóvel, entre outras. Através da micromoldação atingiu-se um novo nível de complexidade e precisão que simplesmente não era possível atingir até agora, [1]. O início da produção de componentes com redução de escala, com um novo nível de complexidade e precisão deu-se com a miniaturização do setor eletrónico durante a Segunda Guerra Mundial, mantendo-se em franca expansão até aos dias de hoje e tendo um significativo avanço em meados da década de 90. Devido á projeção de equipamentos especificamente dedicados á produção de microcomponentes, a maioria das aplicações eram e são bastante complexas, mas como exemplo de isso, foi assim possível desenvolver microsistemas combinando subsistemas para tarefas importantes, como a análise do fluído com microsensores ou microatuadores para se avaliar e analisar o que acontece à escala micrométrica. Atualmente a ascensão da micromoldação está associada em inúmeras microtecnologias, tais como microótica, microfluídica, microeletrónica e micromecânica, [2]. Posto isto, o conceito imposto de um microcomponente está associado a uma elevada razão de superfície e volume, [3], as paredes laterais dos canais e peça a replicar com dimensões reduzidas, [4] a presença de uma elevada razão de aspeto[5] , o peso da peça, [6], assim como o detalhe das microestruturas com dimensões micrométricas,[7].

### **2.2 Microinjeção**

A microinjeção ( $\mu\text{I}$ ) é uma das principais tecnologias para a produção de microcomponentes, é uma técnica de replicação eficaz para produção em massa. A capacidade de replicação desta tecnologia tem vindo a ser estudada sistematicamente, a fim de determinar as limitações do processo. A moldação por microinjeção teve origem na adaptação às necessidades de produção de micropeças moldadas com dificuldade na moldação por injeção convencional.



Devido ao desenvolvimento de equipamentos específicos destinados à produção de microcomponentes, é possível projetar inúmeros microcomponentes.

Sendo que nos dias de hoje existem numerosos avanços tecnológicos na produção de zonas moldáveis, recorrendo a diferentes técnicas, de dimensões à escala micrométrica necessária para a replicação de microcomponentes.

Este tipo de moldação torna-se interessante pela possibilidade de produção de microcomponentes tendo em conta uma elevada produtividade e complexidade geométrica.

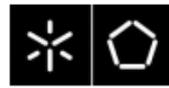
Na Figura 1, é possível observar o modelo de uma máquina utilizada para o processo de microinjeção, já na Figura 2, é possível observar a complexidade e tamanho de várias peças com dimensões micrométricas.



Figura 1. Máquina de microinjeção (Arburg Allrounder 170 U), [8].



Figura 2. Exemplo de microcomponentes, [5].



## 2.3 Fluxo

Os fluídos são essencialmente incompressíveis. Consequentemente, a densidade de um líquido no fluxo em microcanais permanece quase constante como em função da distância ao longo do canal, apesar de termos gradientes muito grandes que caracterizam o fluxo na escala micrométrica.

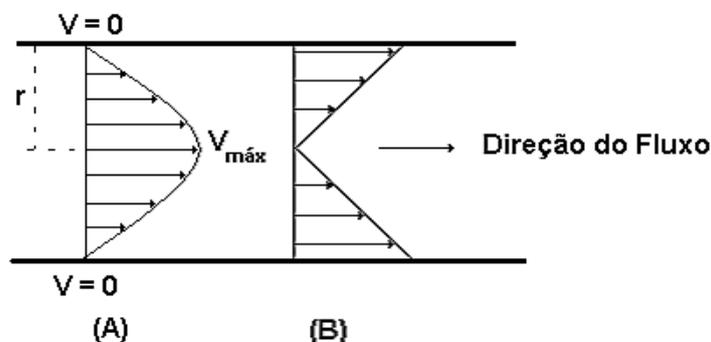
### 2.3.1 Regimes de Escoamento de Fluidos

Na teoria clássica de escoamento de fluidos, são conhecidos dois regimes: o regime “Permanente” e o regime “Transiente ou Transitório”.

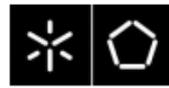
- 1- Regime Permanente ou Estado Estacionário: o escoamento desenvolvido é perfeitamente estável e a velocidade pontual do fluido não varia com o tempo.
- 2- Regime Transiente ou Transitório: o escoamento apresenta uma velocidade pontual variável com o tempo [9].

#### 2.3.1.1 Fluxo Laminar

No fluxo laminar Figura 3, a distribuição de velocidades é parabólica no interior dos canais. A velocidade é máxima no eixo axial e nula na parede do canal circular. A distribuição de tensão é linear ao longo da secção do tubo, sendo máxima na parede e nula no centro,[9].



**Figura 3.** Ilustração da distribuição (A) velocidades; (B) de tensões em regime laminar no interior de um canal circular de secção uniforme, [9].



### 2.3.1.2 Fluxo Tampão

O fluxo tampão Figura 4, é um caso particular do escoamento laminar. Neste escoamento, temos presente um deslocamento relativo próximo das paredes do canal, no entanto na região central do fluido este desloca-se como se fosse um corpo sólido, sem apresentar deslocamento relativo no centro [9].

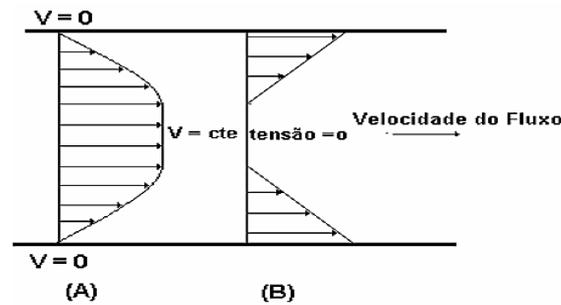


Figura 4. Esquema representativo da distribuição de (A) velocidades (B) tensões de corte, [9].

### 2.3.1.3 Fluxo Turbulento

O fluxo turbulento Figura 5, caracteriza-se pelo deslocamento caótico das cadeias do fluido ao longo do canal. Neste tipo de fluxo, as cadeias do fluido movem-se ao acaso e através de trajetórias acentuadamente curvas, temos uma mistura no fluido de uma forma não linear, ou seja de uma forma caótica com turbulência. Desta maneira, as velocidades pontuais mudam de valor e direção, [9].

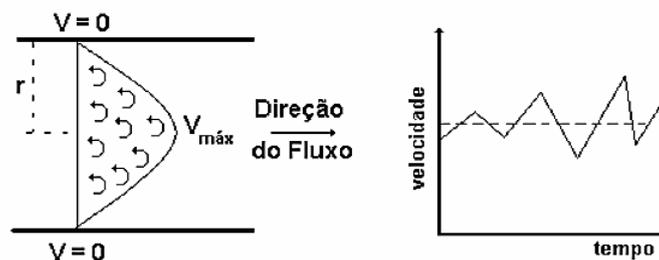
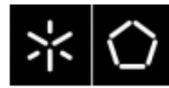


Figura 5. (A) Perfil de velocidade média no fluxo turbulento, no interior de um canal circular de secção uniforme; (B) Variação da velocidade pontual, em função do tempo no fluxo turbulento, [9].



Observações experimentais de líquidos tais como água, óleo de silicone, álcool e soluções de polímeros em microcanais com dimensões de dezenas de micrômetros têm mostrado que a viscosidade junto da parede do canal é de 50-80% mais elevada do que a viscosidade de um fluido desorientado, [9,10].

Acredita-se que este aumento possa ser justificado pelos efeitos de movimento coletivo das cadeias moleculares, ou através da imobilidade da camada das moléculas em contato com a superfície sólida, [10]. Isto ocorre em fluxos de polímeros devido à interação intermolecular elevada e o comprimento característico interno relativamente grande.

Na Figura 6, é possível observar o “layout” da injeção de microprovetes, é de salientar e frisar a geração do microfluxo aqui desenvolvido para o enchimento dos microprovetes.

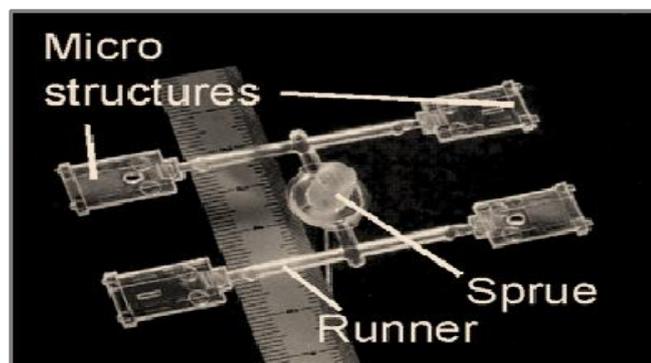
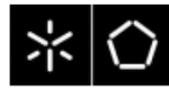


Figura 6. Layout proposto para a fabricação de microprovetes, [11].

Na abordagem de microcanais tem-se associado uma elevada razão de superfície e volume o que em microcavidades pode gerar um arrefecimento rápido. Surge então a importância da temperatura do fundido e da temperatura do molde. Estudos revelaram que o aumento da temperatura do cilindro e do molde assim como um aumento da velocidade de injeção, proporcionam que o polímero fundido possua melhor capacidade para preencher de uma forma mais eficiente as microcavidades, [12]. A temperatura do fundido é importante pois ao aumentarmos a temperatura do cilindro verifica-se a melhoria do fluxo do fundido devido à redução da viscosidade do material e à tensão de corte, no entanto alguns polímeros poderiam apresentar um aumento na tensão de corte. Outro fator para a temperatura é o fato de ser controlada devido à quantidade de material no interior do cilindro e por isso devemos ter em atenção ao tempo de residência do polímero fundido pois pode causar a possível degradação do material se este for demasiado longo, [13].



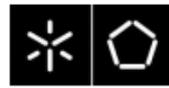
## **2.4 Microreologia**

A caracterização reológica de um polímero fundido é amplamente utilizada na monitorização de processos, no controlo da qualidade, projeto e na simulação de processos e aplicações na solução de problemas, [12]. Atualmente e macroscopicamente os valores obtidos para os modelos impostos para a frente do fluxo de um polímero fundido não se adequam para modelar os fluxos desenvolvidos na escala micrométrica. Pois devido á elevada razão de superfície e volume associados ás dimensões micrométricas presentes no processo de microinjeção obtém-se uma ordem de grandeza diferente, também fatores como viscosidade, a rugosidade da superfície e tensão de superfície presente em contato com o fluido, assim como o chamado “escorregamento/deslizamento“ referente ao efeito do deslizamento na parede, caracterizado pela tensão de corte do material ao qual este, excede um valor critico, [14]. A transferência de calor presente para diferentes espessuras como também a viscoelasticidade característica dos polímeros fundidos induz um comportamento reológico característico.

Em geral, com base na instrumentação do fluxo rotacional, capilar ou corte utiliza-se instrumentação necessária para obter medições precisas de uma série de taxas de deformação e temperaturas definidas, [15]. Alguns trabalhos foram realizados e publicados por meio de modelos de fluxo corte/capilar utilizando feiras embutidas em bicos para testar a reologia do material com uma máquina de moldação por injeção, [16,17, 18, 19, 20]. Estes métodos conseguem proporcionar dados reológicos com a mesma história termomecânica a que o material experimenta durante as condições reais de processo, tais como o aquecimento por dissipação viscosa, pois o fluxo de polímeros fundidos em microcavidades é influenciado por vários fatores que determinam a capacidade de replicação do processo.

### **2.4.1 Efeito do “Escorregamento”**

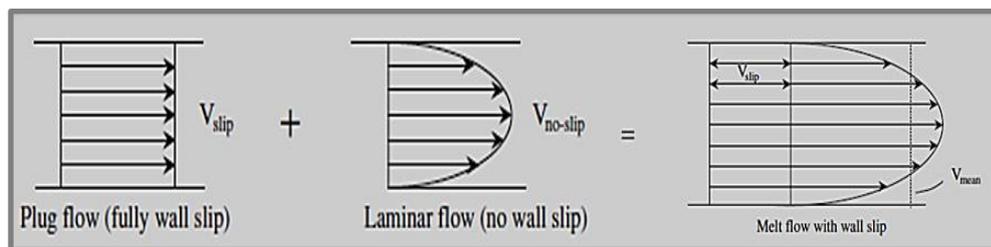
Com o decorrer do escoamento do fluxo de um polímero fundido, acredita-se que este efeito possa estar relacionado com dois fenómenos, uma com a possível interação intermolecular elevada e outra com a desarticulação entre a superfície e as paredes das cadeias, durante o escoamento no microcanal, [21,22].



Este efeito foi estudado inicialmente por Mooney em 1931, que verificou que certas curvas de fluxo dependiam do raio do capilar e ao mesmo tempo que a tensão de corte excedia um valor crítico, [23]. O efeito tem lugar quando a tensão de corte na parede dos microcanais excede um valor crítico, que se considera como superior a 0,1 MPa, [13,24,25].

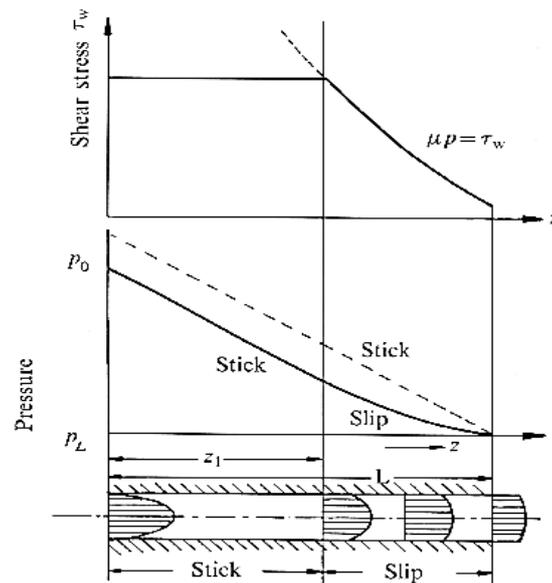
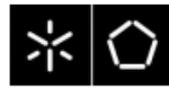
Quando ocorre o deslizamento na parede verifica-se a tensão crítica na parede do microcanal, posteriormente com a elaboração das respetivas curvas de fluxo, obtidas através da viscosidade de corte versus a taxa de corte, observa-se este efeito. No entanto as curvas de fluxo vão divergir consoante o tamanho dos microcanais.

Na Figura 7, é possível observar o comportamento do fluxo sem o efeito do deslizamento assim como o comportamento do fluxo com o efeito do deslizamento ao longo dos microcanais.



**Figura 7.** Influência do deslizamento no comportamento do fluxo, [14].

Na, Figura 8, demonstra-se a avaliação da tensão de corte na parede em canais de tamanho normal e em microcanais, a tensão de corte na parede aumenta rapidamente à medida que o tamanho do canal vai diminuindo. No entanto verifica-se um aumento da velocidade média, que influencia o comprimento do fluxo do material, o efeito do deslizamento na parede para a transferência de calor tem um papel fundamental no cumprimento do fluxo. A avaliação do comprimento de fluxo em microcanais realiza-se com as seguintes premissas, o tempo de injeção é suficientemente curto para supor que não há perda de calor no interior da cavidade durante o processo de injeção, a pressão do fundido é dependente do volume no total e a taxa do fluxo fundido é constante. Estas considerações foram estabelecidas para determinar a possibilidade de preencher uma peça micro em forma cilíndrica.

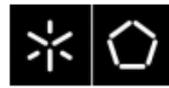


**Figura 8.** Efeito de “Escorregamento”, [26].

O comprimento do fluxo é fortemente dependente do fenômeno da transferência de calor, e também da relação do comportamento térmico do fundido com o material do molde, [8]. A microreologia de um polímero fundido avalia sob condições extremas o controle do comportamento do fluxo de um polímero para a escala micrométrica ou manométrica, [27].

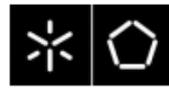
No entanto e baseados em simulação numérica, Yao *et al.*, [13], estudaram o efeito da viscosidade através do deslizamento/escorregamento na parede, como a tensão de superfície durante o enchimento e verificaram que o deslizamento só deve ser considerado para canais menores que 10  $\mu\text{m}$ . Sobre a tensão de superfície, os autores citaram que quando se trata do processo de microinjeção esta é irrelevante, e relativamente ao aquecimento por ação viscosa é insignificante para canais menores que 100  $\mu\text{m}$ , [13].

Outro estudo elaborado por, Chien *et al.*, [14] comprovaram que a viscosidade ao longo dos microcanais é mais baixa do que a viscosidade medida usando um reômetro capilar tradicional, demonstraram também que a velocidade de deslizamento do fundido aumenta com a diminuição do microcanal, assim como também uma redução da viscosidade aparente à medida que o tamanho do canal diminui, [14].



Também num trabalho similar desenvolvido por Vasco *et al.*, [28] no estudo comportamento reológico de polímeros fundidos em microcanais, demonstraram que numa análise realizada ao fundido permitiu-se testemunhar a transição do regime de fluxo em fonte para um regime de escorregamento e foi notório que os resultados não eram consistentes com o princípio TTS, (princípio da superposição tempo-temperatura). A transferência de calor analisada na moldação por injeção convencional não se aplica á microinjeção, pois temos uma elevada razão de superfície e volume, embora estes estudos nos forneçam informação de como se comporta reologicamente os polímeros fundidos para a escala micrométrica, eles determinaram a medição da viscosidade em condições isotérmicas, [28].

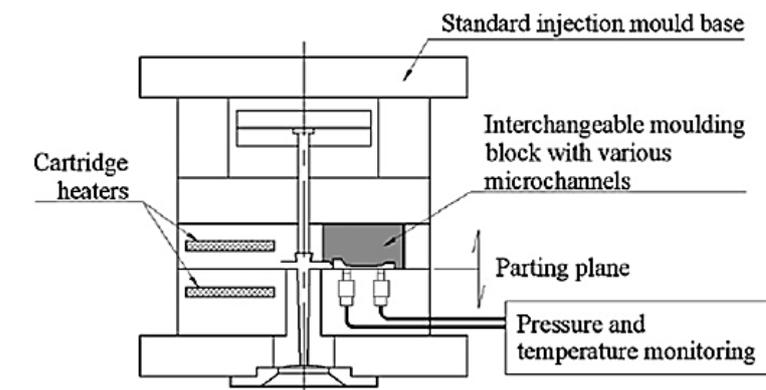
Muitos outros autores têm estudado a importância de fatores relacionados com o comportamento do fluxo em microinjeção, entre quais estão Yao e Kim, [29], Zao *et al.*, [30], Mönkkönen *et al.* [31], Shen *et al.*, [32]. As principais conclusões destes estudos foram que para altas temperaturas do fundido e do molde aliados a uma elevada velocidade injeção, obtém-se um efeito positivo no fluxo para a replicação das microcavidades, no entanto os resultados não foram muito consistentes, [1]. No entanto alguns destes artigos referem-se a dados obtidos através de simulações de microinjeção e não a concretamente a testes reais, embora se possa considerar que as alterações feitas ao código da simulação sejam realizadas com o intuito de confirmar os dados experimentais. Os estudos desenvolvidos fundamentam o que realmente acontece no comportamento reológico no entanto a plasticização induzida e história termomecânica do material pode também influenciar a viscosidade do polímero, [33].



## 2.5 Caracterização reológica não convencional em microcanais

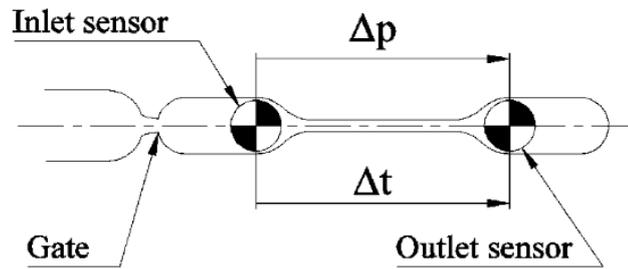
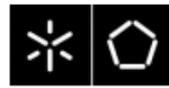
Como o uso de reômetros convencionais não permite fornecer uma informação adequada da caracterização reológica em microcanais, através do trabalho realizado por Vasco *et al.* [34], e através de um controlo preciso da temperatura durante o ciclo de moldação, e também com o controlo da pressão nas microcavidades recorrendo á inserção de uns sensores no molde foi possível obter a informação necessária para explicar a caracterização reológica do fluxo em microcanais, [34].

A Figura 9, ilustra o sistema adotado, que apesar de não ser um microréometro permite obter uma configuração capaz de reproduzir as condições de fluxo em situações reais de microinjeção. O sistema consiste na utilização de um molde de injeção com uma estrutura de (100 mm x 130 mm), que possui blocos moldáveis intermutáveis com microcanais calibrados.



**Figura 9.** Conceito desenvolvido para um estudo reológico em microcanais,[8, 28].

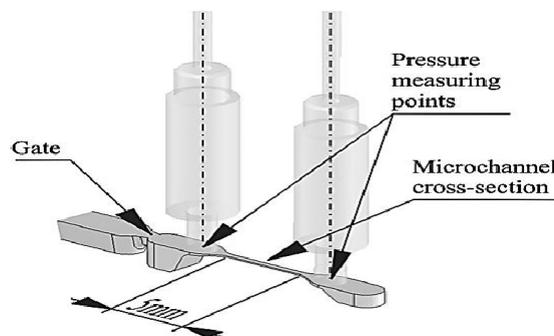
Na Figura 10, demonstra-se o uso de sensores de pressão com dimensões reduzidas, que permitem a obtenção necessária para a caracterização reológica do fluxo no microcanal, assim como a ilustração das microcavidades onde é possível observar o ataque, e a contabilização da queda de pressão e o intervalo de tempo [27,29].



**Figura 10.** Variáveis para a avaliação do fluxo em microcanais,[8,28].

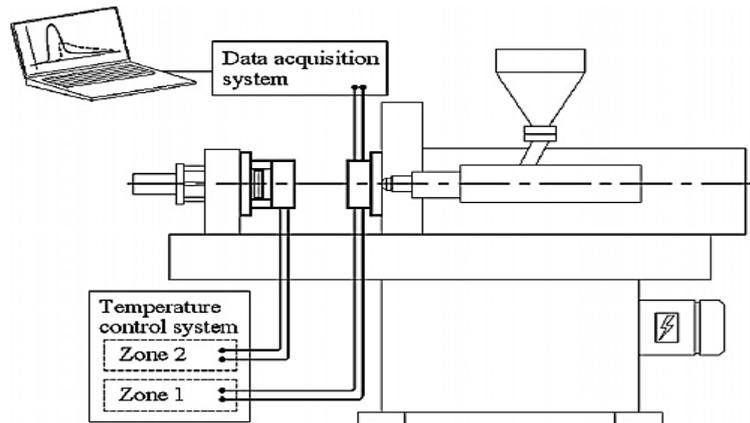
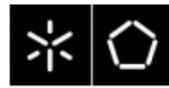
Neste trabalho desenvolvido o molde foi projetado para albergar dois blocos de moldação intermutáveis, permitindo a substituição das microcavidades. Os dois blocos têm canais com secções transversais diferentes, um em forma de fenda com secção retangular, 400  $\mu\text{m}$  de largura por 100  $\mu\text{m}$  de profundidade, e uma secção quadrada de 200  $\mu\text{m}$  por 200  $\mu\text{m}$ .

O comprimento dos microcanais é igual, no entanto na Figura 11, pode-se observar o layout utilizado para descrever todo o processo realizado,[8,28].



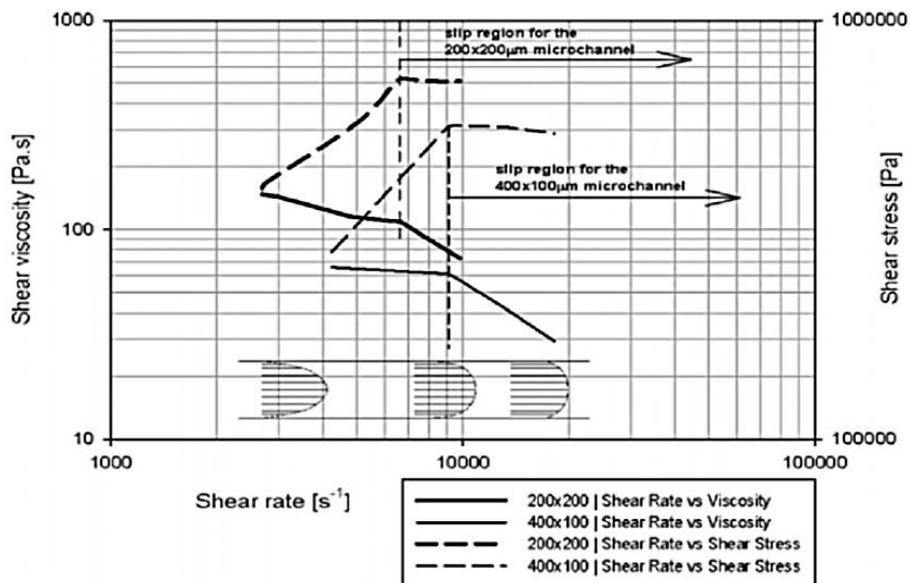
**Figura 11.** Microcanal e sensores de pressão, [8,28].

No entanto foi imposto o seguinte layout, presente na Figura 12, para estudar e caracterizar o comportamento reológico do fluxo em microcanais, foram posteriormente obtidos resultados que realçam o que realmente acontece ao fluxo.

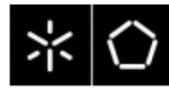


**Figura 12.** Layout da célula de microinjeção, demonstração das duas zonas de controlo de temperatura e da pressão do sistema, com sensores localizados na placa fixa do molde, [8,28].

Após a realização dos ciclos de injeção efetuaram-se a aquisição dos dados realizados e o tratamento dos resultados através dos cálculos reológicos e obtiveram-se as curvas que evidenciaram o comportamento do fluxo. Na Figura 13,conclui-se que ocorre uma clara inflexão no que diz respeito ao fluxo nos microcanaís. Pois com o aumento da taxa de corte, ambas as curvas apresentam uma transição a partir de um fluxo normal para o desenvolvimento de um novo fluxo característico do comportamento não-newtoniano, mostrando este um índice próximo de 1, iniciando-se então o deslizamento ao longo da parede, [34].

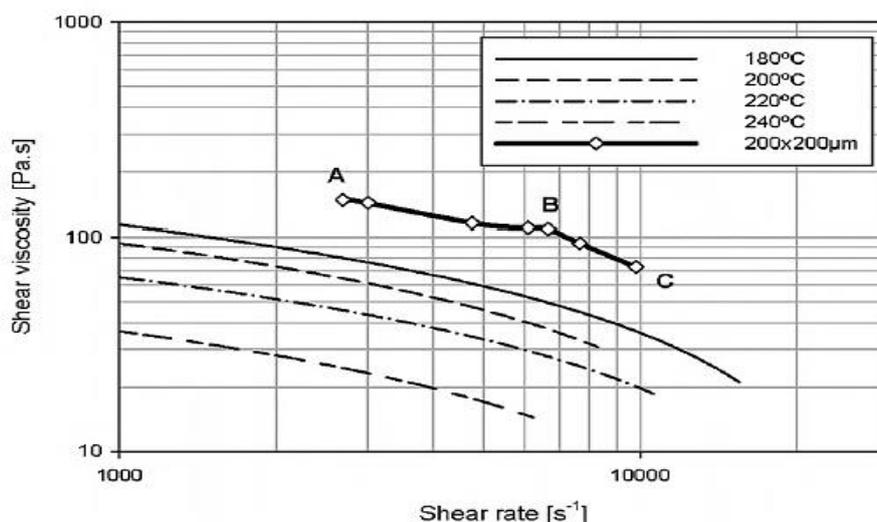


**Figura 13.** Curvas de fluxo de reometria obtidas com base nas secções de 200 μm × 200 μm e 400 μm x 100 μm características dos microcanaís, [8, 28,35].

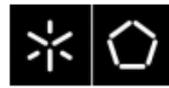


Também é possível observar que a taxa de corte crítica para o material no microcanal com  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  é cerca de  $5000\ \text{s}^{-1}$ , no microcanal com dimensão  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , obteve-se um valor superior para a taxa de corte de  $6000\ \text{s}^{-1}$ . A secção quadrada de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , possui uma razão de aspecto de 1:1, correspondente na secção a um diâmetro de  $200\ \mu\text{m}$ . Já na secção com dimensão de  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  tinha-se uma razão de aspecto de 4:1, correspondente a um diâmetro hidráulico de  $160\ \mu\text{m}$ , pois trata-se de uma geometria menos favorável para o fluxo. Esta diferença no diâmetro hidráulico leva a uma diminuição de 20% no fluxo com secção transversal efetiva do microcanal de  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , atingindo-se assim, a taxa de corte crítica para valores mais baixos,[8].

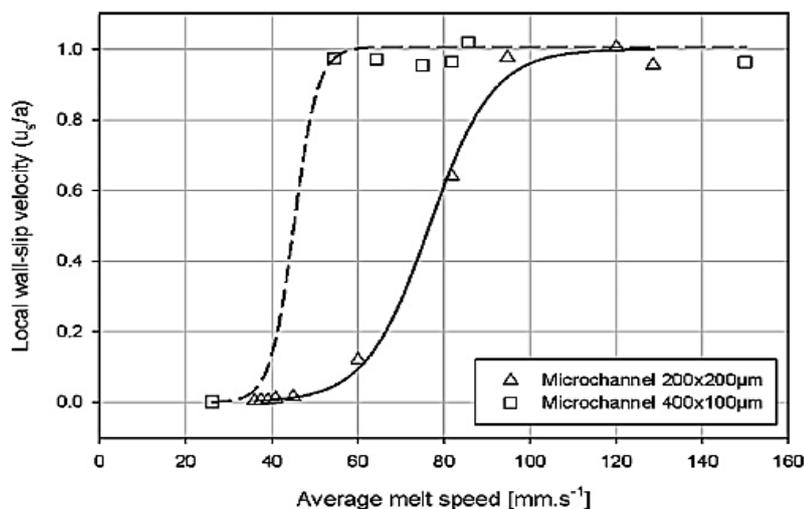
Na Figura 14, tem-se representado os dados obtidos do gráfico de reometria capilar convencional e os resultados reológicos dos cálculos do microcanal com uma secção de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ . Através da sua análise observa-se as diferentes temperaturas como a curva de fluxo com o microcanal de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  onde pode ser observado dois segmentos um de A para B, onde o fluxo de corte está presente, no entanto no final deste segmento obtém-se a transição para o segmento de B para C onde o fluxo de tampão ao longo do microcanal está completamente desenvolvido, obtendo-se o escorregamento.



**Figura 14.** Resultados a diferentes temperaturas da reometria capilar convencional e com a secção do microcanal com  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ ,[8,28,35].

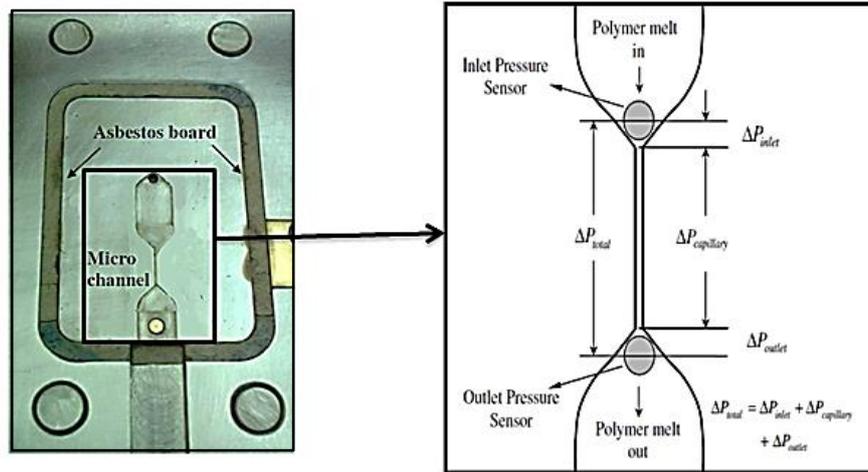
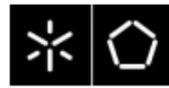


A Figura 15, ilustra a velocidade média do fundido e a velocidade do deslizamento da parede ao longo do canal, para ambas as secções dos microcanais,  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  e  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ . No entanto, as duas curvas mostram a mesma tendência, pois quando a tensão de corte é menor do que a tensão de corte crítica, a velocidade de deslizamento ao longo da parede é quase zero. Contudo foi previsto que a velocidade do deslizamento na parede localmente aproxima-se de 1 ( $u_s/a$ ), quando se manteve o aumento da tensão de corte. Neste estudo foi também concluído que o fluxo no interior do molde não é isotérmico, o polímero fundido não respeita o princípio da superposição tempo-temperatura e os dados obtidos não são quantitativamente precisos, e no entanto é preciso salientar que a configuração do sistema para a caracterização reológica do fluxo não se trata de um microréometro mas sim funciona como um viscosímetro pois consegue fornecer condições reais da análise do fluxo à escala micrométrica,[8].



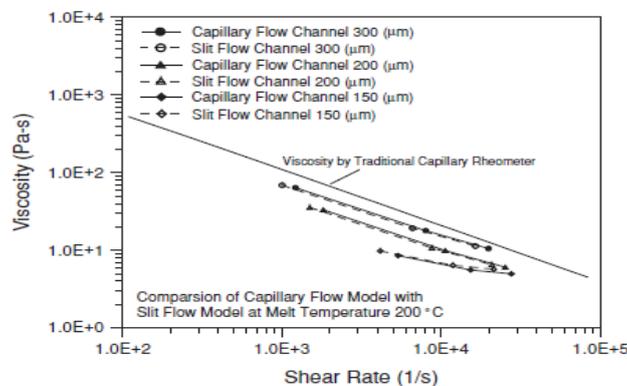
**Figura 15.** Relação entre a velocidade média do fundido e velocidade de deslizamento na parede ao longo do canal, [8, 28, 35].

Noutro estudo, Chien *et al.* [14], Figura 16, efetuaram uma análise ao comportamento reológico do polímero fundido ao longo de microcanais considerando o deslizamento nas paredes dos microcanais e utilizaram um molde com microcanais com diferentes secções.

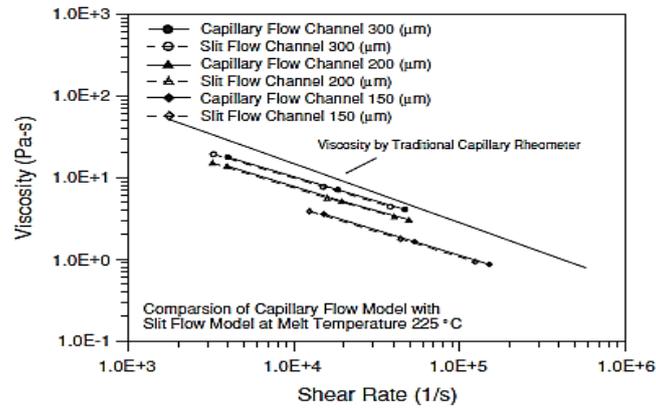
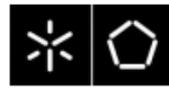


**Figura 16.** Layout utilizado no estudo com os sensores nos microcanais, [14].

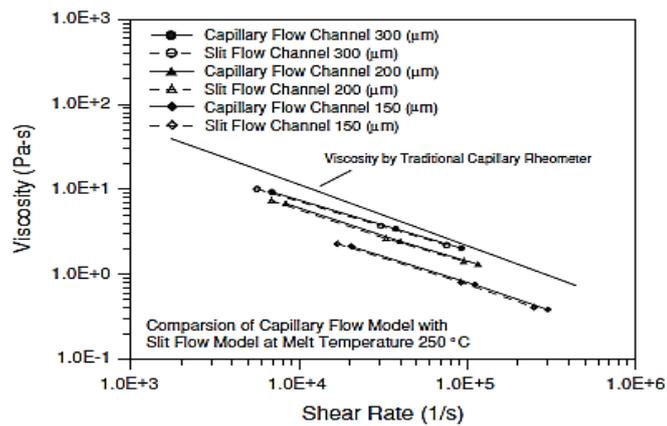
As Figuras 17, 18 e 19, demonstram os resultados obtidos, gráficos de viscosidade com a respectiva taxa de corte em microcanais com 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , para temperaturas de fundido de 200 ° Celsius, 225° Celsius e 250° Celsius, respetivamente. No entanto, em cada figura foi realizada a comparação da curva de fluxo obtida no reómetro capilar, com as respetivas curvas obtidas através de o molde com os microcanais. Sendo possível também observar que para ambas as figuras, as curvas de fluxo avaliadas nos microcanais demonstram valores de viscosidade inferiores em relação aos valores de viscosidade medidos através do reómetro convencional. Neste estudo realizado Chien *et al.*[14] enunciaram que ambas as figuras, demonstram valores de viscosidade 4 - 10 % superiores nos medidos através do microcanal com fluxo capilar em relação aos medidos do microcanal com fluxo de corte. Enunciaram também que geralmente a viscosidade medida num microcanal com 150  $\mu\text{m}$ , possui um fator de 2,3 - 4,1 menor que o da viscosidade medida num reómetro tradicional convencional.



**Figura 17.** Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 200 ° C, [14].



**Figura 18.** Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 225 ° C, [14].



**Figura 19.** Comparação das curvas de viscosidade analisadas nos microcanais através do fluxo capilar e de corte para uma temperatura de 250 ° C, [14].



## CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO

### 3.1 Flúidos não-newtonianos

1. Através da geometria presente nos microcanais neste caso de estudo o modelo matemático utilizado para descrever o microfluxo, equação 1, é o mesmo abordado na reometria capilar e fluxo de corte.

$$\dot{\gamma}_{w(app)} = \frac{4Q}{\pi \cdot R^3} \quad (1)$$

2. Posteriormente e através da correção de *Rabinowitsch* a taxa de corte junto á parede é definido pela, equação 1.1, descrita para fluídos não newtonianos,[34]

$$\dot{\gamma}_{w(real)} = \frac{4Q}{\pi \cdot R^3} \left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4}n \right) \quad (1.1)$$

$Q$  – Caudal volumétrico,

$R$  – Raio do canal do capilar,

$n$  – Declive obtido através da relação bi-logarítmica entre  $\log \dot{\gamma}_{w(app)}$  e  $\log \tau_w$ ,

3. Tendo em conta a eliminação do efeito viscoso e elástico á entrada do capilar e para a, utiliza-se a equação 1.2, para através da correção de *Bagley* determinar a tensão de corte aparente,  $\tau_w$ .

$$\tau_{w(app)} = \frac{\Delta P}{2L} R \quad (1.2)$$



4. Obtendo-se a seguinte, equação 1.3), que traduz tensão de corte:

$$\tau_{w(real)} = \frac{\Delta P}{2\left(\frac{L}{R}+e\right)} = \frac{\Delta P-P_0}{2L} R \quad (1.3)$$

$\Delta P$  – Queda de pressão ao longo do capilar,

$L$  e  $R$  – Comprimento e raio do capilar,

$e$  – Fator de correção de Bagley,

$P_0$  – Expressa a queda de pressão no capilar com o comprimento zero para uma dada taxa de corte;

5. No entanto para o desenvolvimento dos fluxos de corte a taxa de corte aparente, (Equação 1.4).

$$\dot{\gamma}_{w(app)} = \frac{6Q}{w \cdot h^2} \quad (1.4)$$

6. Posteriormente aplicando a correção de Walter para fluídos não Newtonianos, (Equação 1.5).

$$\dot{\gamma}_{w(real)} = \frac{6Q}{w \cdot h^2} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} n \right) \quad (1.5)$$

$Q$  – Caudal volumétrico,

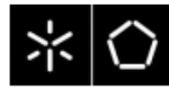
$w$  e  $h$  – largura e altura da secção transversal retangular do canal,

$n$  – Declive obtido através da relação bi-logarítmica entre  $\log \dot{\gamma}_{w(app)}$  e  $\log \tau_w$ ,

### 3.2 Fluídos newtonianos

1. Para fluidos newtonianos a tensão de corte real, (Equação 1.6).

$$\tau_{w(real)} = \frac{h}{2} \left( \frac{-\Delta P_{real}}{L} \right) \quad (1.6)$$



2. Para o caso do corte por fenda a tensão de corte deve ser corrigida quando a razão entre a largura e espessura for menor que 10, (Equação 1.7).

$$\tau_{w(real)} = \frac{w \cdot h}{2(w+h)} \left( \frac{-\Delta P_{real}}{L} \right) \quad (1.7)$$

3. Finalmente e realizando-se as correções no capilar e nos modelos de fluxo de fenda a viscosidade real pode ser calculada para cada tipo de fluxo, basta apenas dividir a tensão de corte real pela taxa de corte real, obtendo-se a viscosidade real e representação da curva de fluxo final,[34][36], (Equação 1.8).

$$\eta_{(real)} = \frac{\tau_{real}}{\dot{\gamma}_{real}} \quad (1.8)$$

### 3.3 Velocidade de Escorregamento

Aquando do desenvolvimento do fluxo nos microcanais, surgem fenômenos á escala micro que tornam o fluxo complexo de caracterizar. Um desses fenômenos está associado ao comportamento microreológico presente nos microcanais é o efeito de escorregamento. Estudado inicialmente por Money (1931), como já referido anteriormente, o efeito de escorregamento surge quando a tensão de corte no microcanal excede um valor de aproximadamente 0,1 MPa, [13], [24], [25]. Consoante a estrutura morfológica do polímero e as dimensões dos microcanais a estudar durante a caracterização do fluxo, obtêm-se curvas de fluxo que vão divergir aquando do aparecimento do ponto de inflexão que vão permitir observar o efeito de deslizamento, no entanto é de esperar que á medida que as dimensões dos microcanais vão diminuindo o aparecimento do deslizamento seja mais rápido a ocorrer.

Posto isto e tendo em conta os fenômenos de transferência de calor associados no processamento do fluxo, assumiu-se que nas paredes dos microcanais o fluxo de calor era constante  $\left( \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ e } Bi (T_0 - T_w) \right)$ , e considerando independentes a pressão e a temperatura, e simplificando o modelo do índice de potência para o escorregamento, surge o modelo matemático para avaliar a velocidade de escorregamento,[37], (Equação 1.9).



$$u_s = \frac{a}{1 + \left(\frac{\tau_c}{\tau_w}\right)^{10}} \tau_w^m \quad (1.9)$$

Para

$\tau_w$  – Tensão de corte na parede do microcanal,

$\tau_c$  – Tensão de corte crítica no deslizamento ,

$a$  – Coeficiente escalar,

$m$  – Taxa de fluxo constante dado pela massa através da Equação 2:

$$m = 2\pi \int_0^R \rho \times v_z \times r dr \quad (2)$$



## CAPÍTULO 4 – METODOS EXPERIMENTAIS

Atualmente para a caracterização reológica de materiais poliméricos em microcanais, surge a necessidade de recorrer a outro tipo de equipamentos, abandonando assim o uso tradicional dos reômetros convencionais que não permitem caracterizar o desenvolvimento do fluxo para a escala micro. Surge a necessidade de adotar novos equipamentos dotados de sistemas que permitam gerar uma pressão tal para o possível desenvolvimento do microfluxo e consequente leitura de altas taxas de corte desenvolvidas pela passagem do polímero fundido no microcanal,[14,38].

Para a realização deste estudo utilizou-se uma microinjetora de processamento de polímeros fundidos para microinjeção de 12 toneladas BOY 12 A, Figura 20, para assegurar os parâmetros de processamento necessários para o enchimento dos microcanais durante a microinjeção dos polímeros fundidos.



Figura 20. Máquina microinjetora BOY 12 A,[8].

### 4.1 Molde

Na, Figura 21 está representado o molde utilizado neste estudo, sendo o mesmo utilizado no estudo para a realização da tese de doutoramento de J.Vasco,[8], o molde desenvolvido permite a capacidade de albergar posições com diferentes microcanais. O molde utilizado possui uma estrutura standarizada com componentes da HASCO com placas do tipo K com dimensões de 130x100 milímetros. Possui dois anéis de centragem, um do lado da injeção com 110 milímetros de diâmetro e outro do lado da extração com 60 milímetros de diâmetro, e um injetor de 40 milímetros de raio de referência HASCO K51.O molde fechado tem uma altura de 155 milímetros entre os pratos da máquina e tem uma abertura máxima de 145 milímetros.

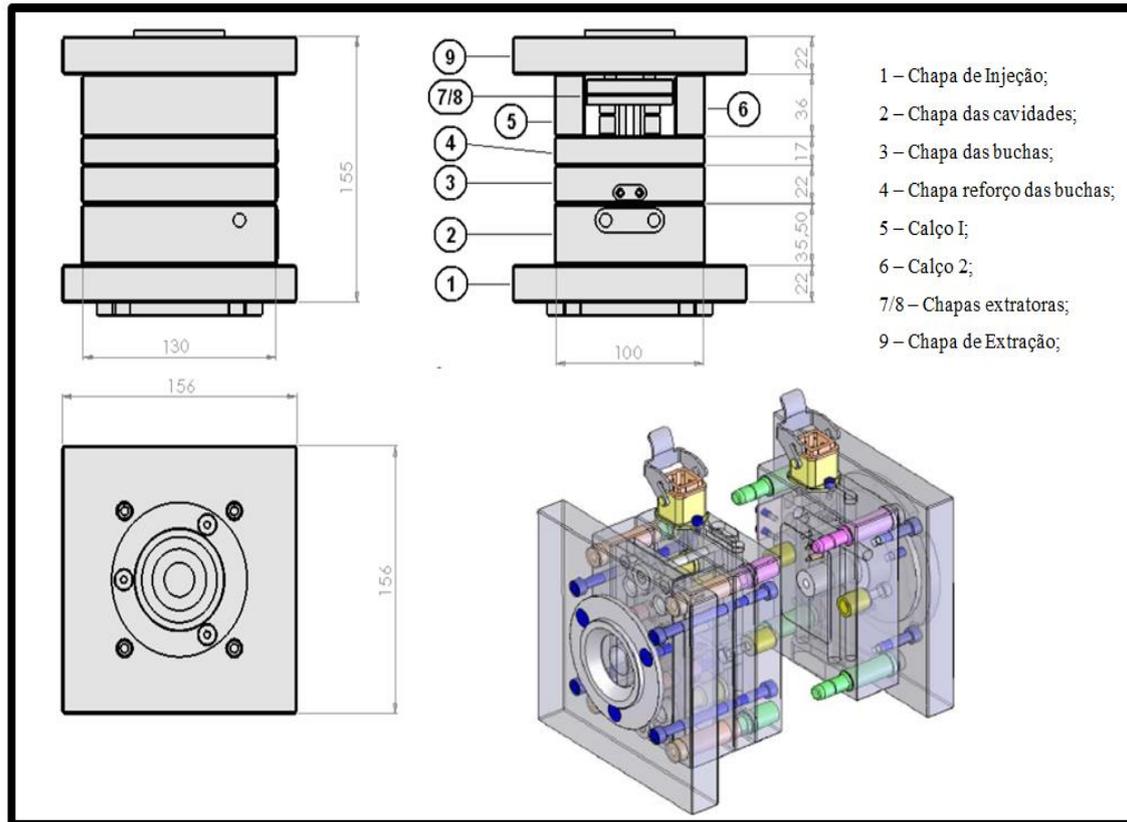
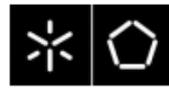
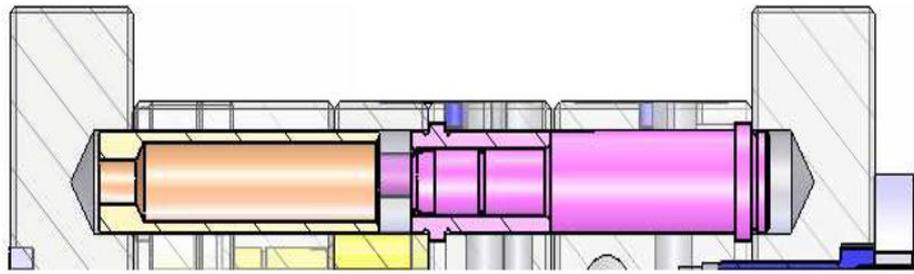
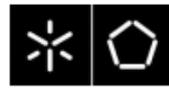


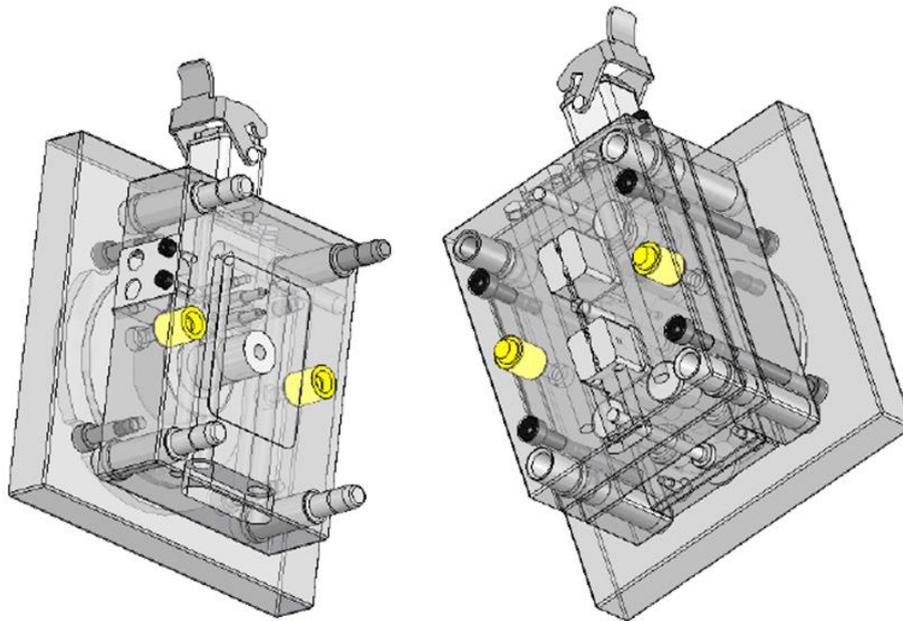
Figura 21. Dimensões em milímetros e a estrutura geral do Molde.

A necessidade da microinjeção utilizar moldes com tolerâncias muito apertadas, surge devido á necessidade do projeto do molde englobar sistemas funcionais, como a impressão final, centragem e guiamento, alimentação do material fundido ao molde, ventilação que associa-se aos escapes de gases, controlo de temperatura e extração, todas estas alterações no projeto do molde desempenham um papel fundamental no processo de replicação da peça final.

O molde utilizado como ferramenta de estudo possui um sistema de guiamento auxiliado por quatro guias alinhadas devidamente com os pinos das respetivas guias, **A**, assim como cones de travamento, **B**, Figura 22, para proporcionar um auxílio na abertura e fecho do molde.



A



B

**Figura 22.** A- Sistema de guiamento do molde; B - Cones de travamento do molde a amarelo.

A ventilação do molde é efetuada nos postigos, através da Figura 23, é possível observar todo o sistema de escapes de gases adotado assim como a folga existente nos pinos extratores, todo este sistema de ventilação permite o auxílio correto do enchimento da peça.

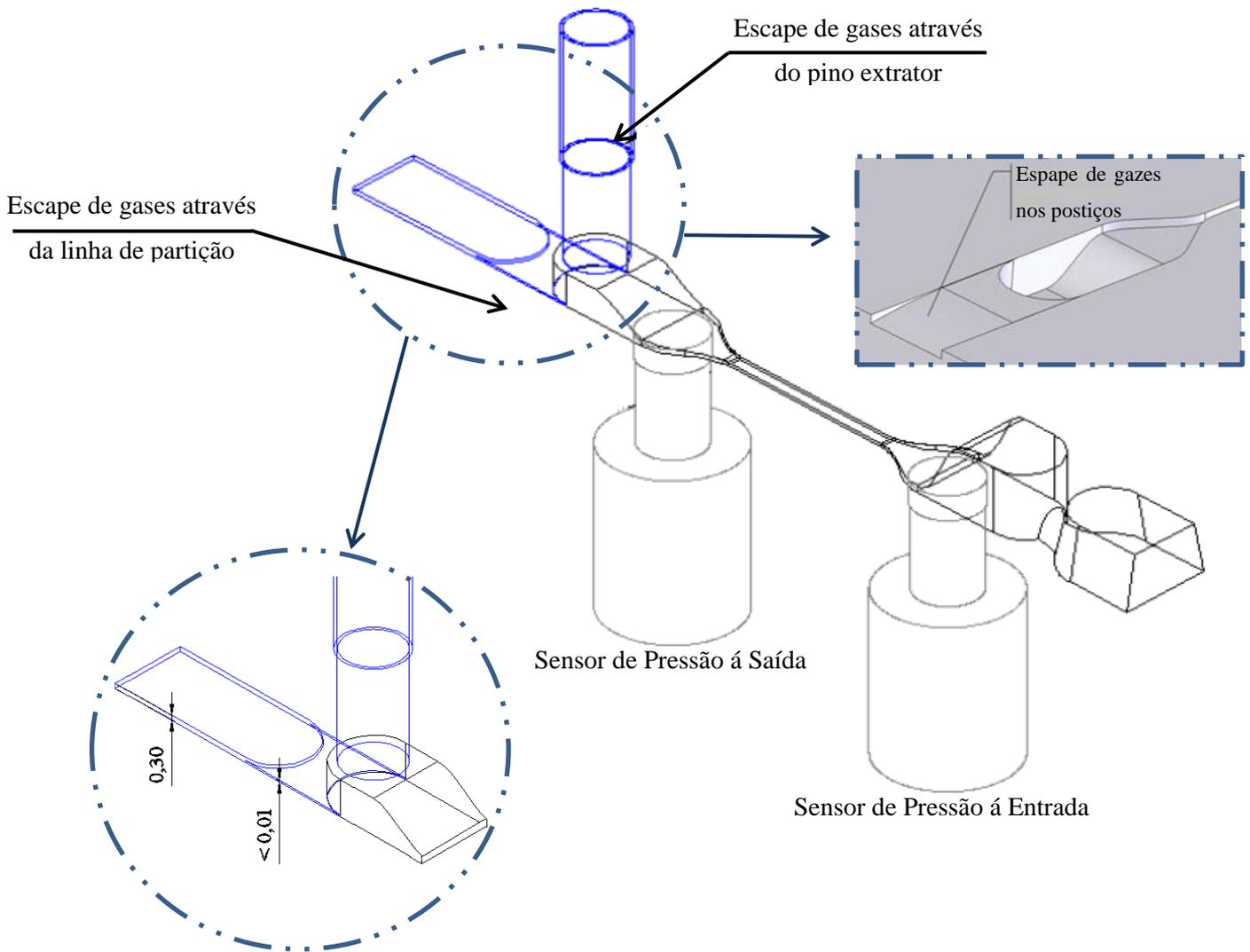
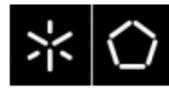
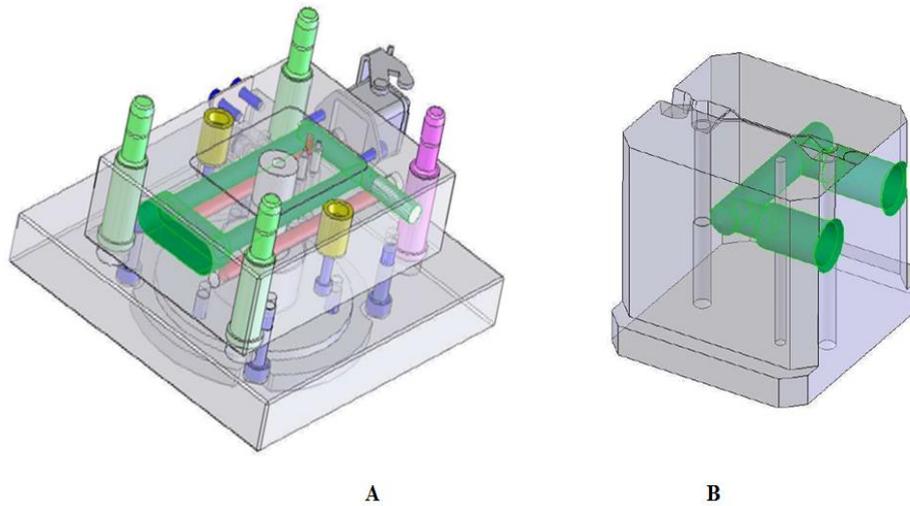
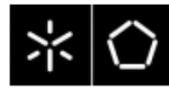


Figura 23. Ventilação no molde dos escapes de gases.

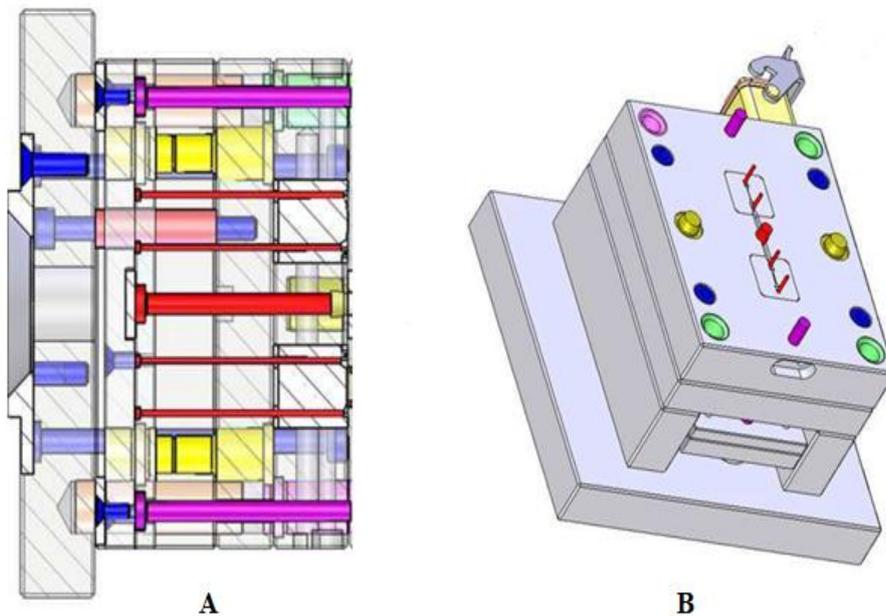
No que diz respeito ao arrefecimento do molde, este tem circuitos diferentes, pois do lado da injeção é refrigerado através da placa, **A**, quanto ao lado da extração o molde é refrigerado nos postigos, **B**,

Figura 24, exemplifica os canais a verde do sistema de refrigeração utilizado no molde.

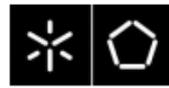


**Figura 24.** A- Sistema de refrigeração na placa; B- sistema de refrigeração no postço.

Na Figura 25, demonstra-se todo o sistema de extração do molde com pinos normalizados da HASCO, o molde tem dois pernos antiretorno Z40/5,5x100, um extrator para o jito Z40/5.5x58, e quatro extratores para a extração dos microcanais, dois colocados a montante dos microcanais, Z40/51,5x61 e outros dois extratores colocados a jusante dos microcanais, Z40/1,5x62.



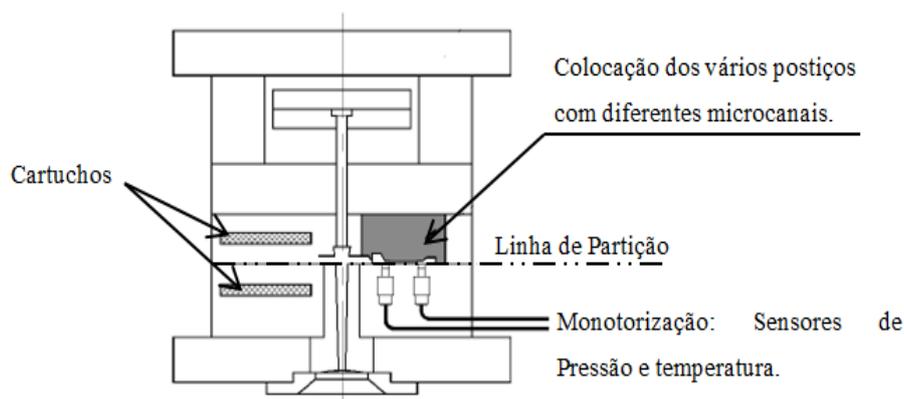
**Figura 25.** A- Vista lateral do sistema de extração; B- Avanço do sistema de extração.



## 4.2 Instrumentação

Na Figura 26, demonstra-se esquematizado toda a instrumentação envolvente no molde. Recorrendo ao uso de dois sensores acoplados no interior do molde, mais concretamente nos postigos, e devido ao aquecimento do molde durante a injeção do material fundido, é possível realizar uma caracterização reológica do fluxo desenvolvido nos microcanais.

Contudo é muito importante salientar que o sistema utilizado não é um microreómetro, mas no entanto o material fundido ao entrar para o interior do molde replica eficazmente o desenvolvimento do microfluxo. O sistema desenvolvido funciona como um viscosímetro, pois os parâmetros de procesos desenvolvidos na microinjetora são característicos do processo de microinjeção.



**Figura 26.** Ferramenta utilizada para a caracterização microreológica.

O molde, Figura 26, tem acoplado na chapa das cavidades dois sensores de pressão piezoresistivos, Priamus 6006B com 1.8 milímetros de diâmetro, incorporados do lado da injeção á face do postigo do microcanal. Na, Figura 27, esta explicito o molde com o local onde estão inseridos os dois sensores de pressão.

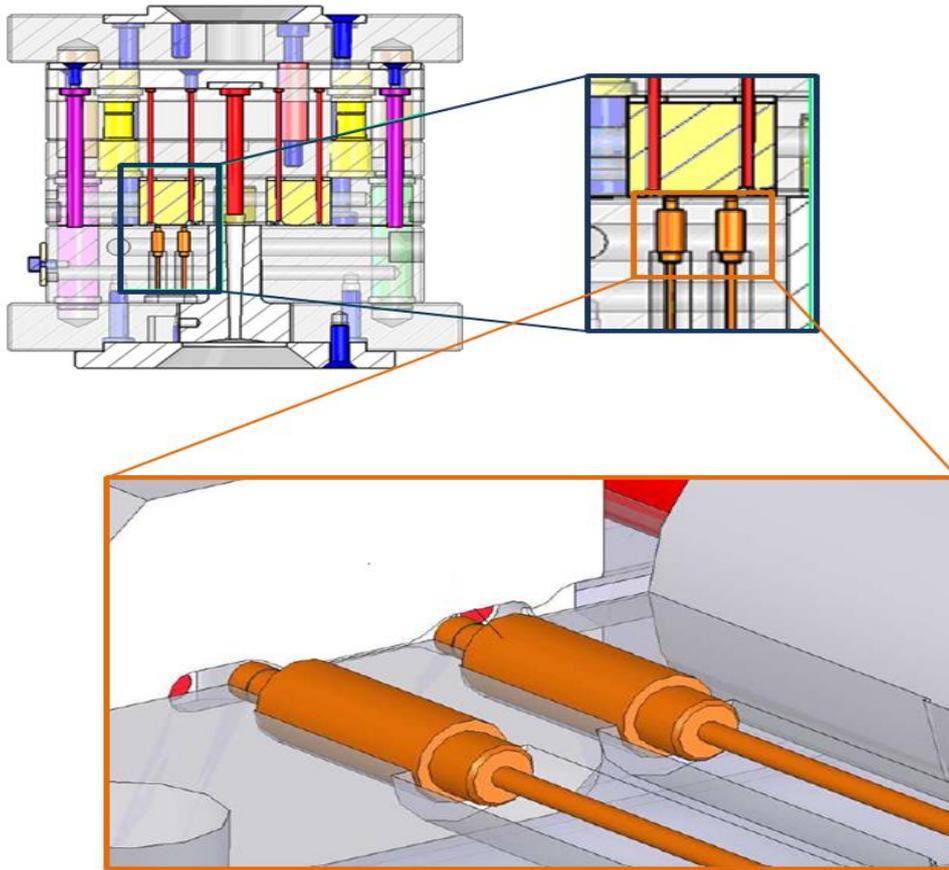
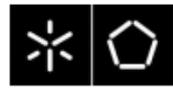
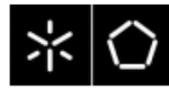


Figura 27. Layout dos sistemas de pressão no interior do molde.

Os dois sensores que quantificam a pressão avaliada á entrada e saída do microcanal, estão ligados a um sistema de aquisição de dados composto por duas unidades físicas – Priamus Multi DAQ 8101A, e um amplificador – Priamus Mobile DQA8001B, Figura 28. O sistema permite a ligação de vários sinais, como de sensores de temperatura, e a interface com o utiizador , que é assegurada através do software – Priamus Molding Monitor Software.



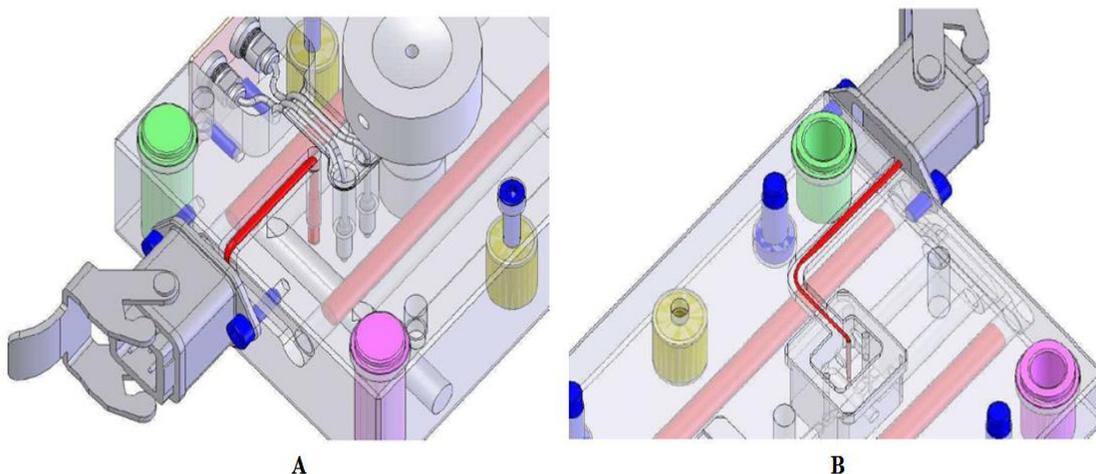
Figura 28. Sistema de aquisição de dados.



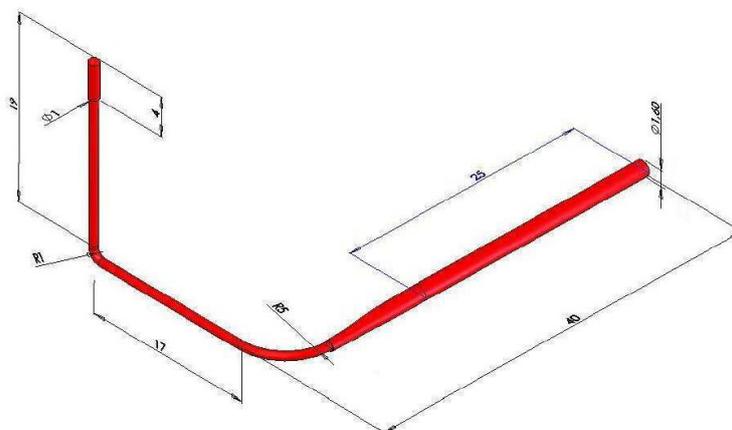
### 4.3 Controlo de Temperatura

O molde é aquecido em duas zonas, uma do lado da injeção, e outra do lado da extração, Figura 29, cada uma destas zonas é aquecida por dois cartuchos com 6,5 milímetros de diâmetro e com 160 W, cada zona de aquecimento tem instalada um termopar do tipo J para em tempo real fornecer a temperatura alcançada. Como do lado da injeção não existe a presença de postigos o termopar TC.002 da Resitec está colocado o mais próximo possível da linha de partição no enfiamento do microcanal.

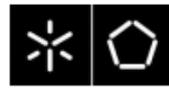
No lado da extração, o termopar está inserido no interior do postigo, e o mais próximo do microcanal e devido á sua geometria escolheu-se um termopar flexível, utilizou-se um termopar TC.001 Resitec com 50 milímetros de comprimento e com 1 milímetro diâmetro, Figura 30.



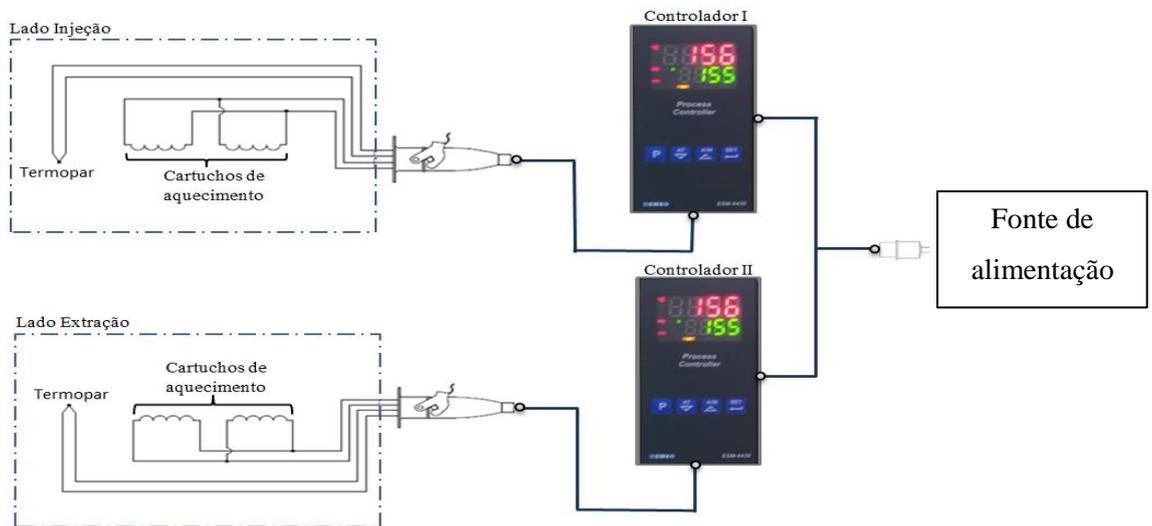
**Figura 29.** Colocação dos termopares a vermelho na figura; **A-** lado injeção; **B-** lado extração.



**Figura 30.** Geometria e forma necessária para a inserção do termopar do lado da extração.



Na Figura 31, demonstra-se o sistema de monitorização da temperatura do molde, observando-se os controladores de temperatura ligados aos cartuchos que funcionam como resistências assim como a ligação dos termopares.

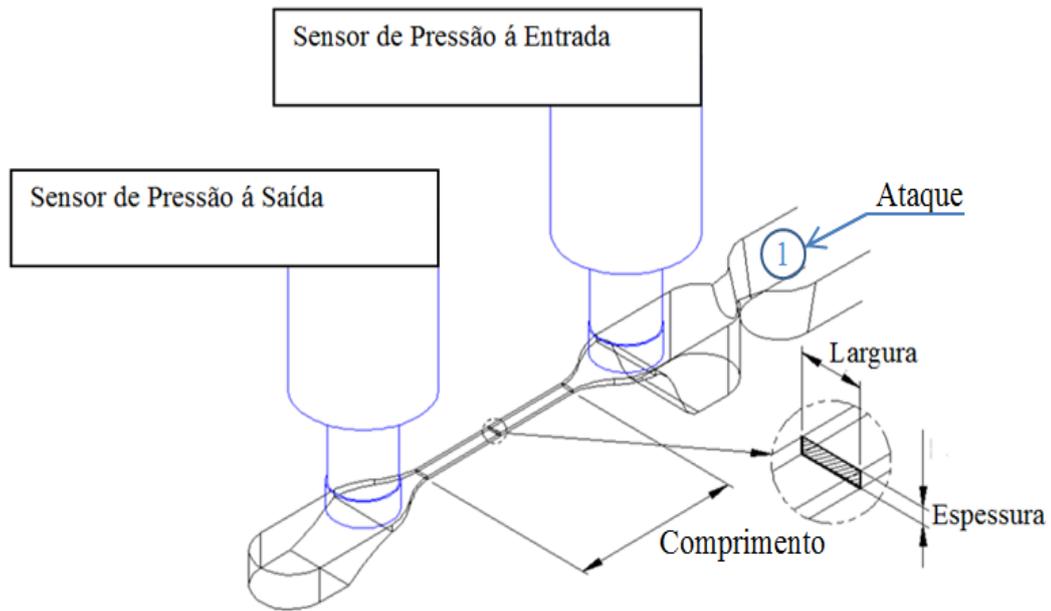
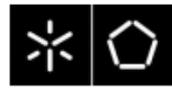


**Figura 31.** Sistema de monitorização de temperatura do molde.

#### 4.4 Microcanais

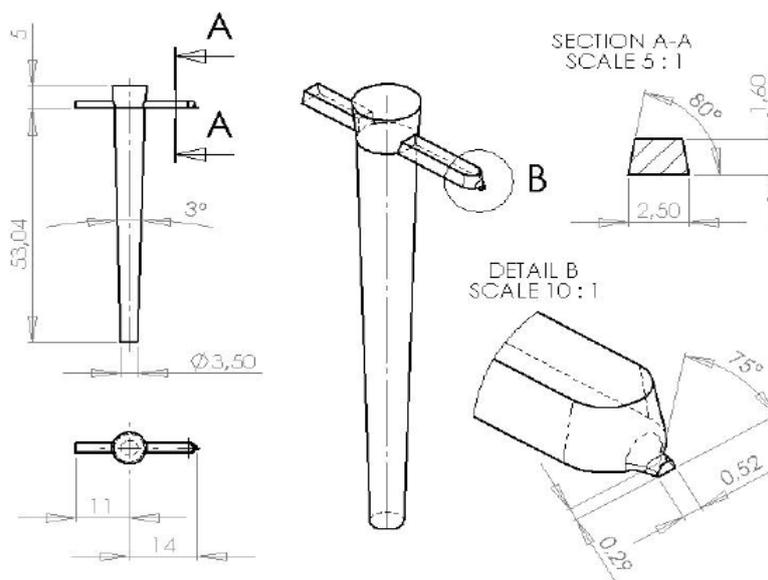
A geometria dos microcanais permitem avaliar a queda de pressão observada em cada um dos materiais a estudar, basicamente estas geometrias apresentam em cada uma das extremidades, zonas de alívio para a saída do material fundido.

Os microcanais para o desenvolvimento do microfluxo possuem duas secções transversais diferentes, uma retangular com uma largura de 400  $\mu\text{m}$  e uma espessura de 100  $\mu\text{m}$ , e uma secção quadrada com 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ . Na Figura 32, apresenta-se o layout do microcanal, assim como a profundidade do ataque **1** que permite um alívio estratégico maior para permitir o estabelecimento da frente do fluxo no interior do microcanal.

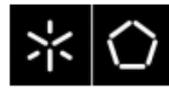


**Figura 32.** Layout do microcanal com 5 milímetros com os respetivos sensores.

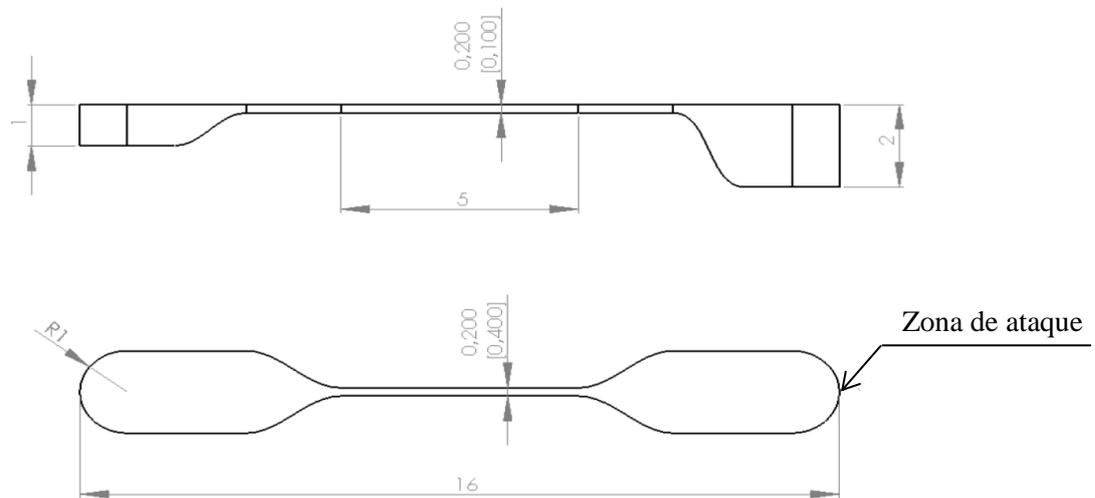
A Figura 33, descreve em modelo 2D o sistema de alimentação dos microcanais, trata-se de um sistema de canais frios standarizado, com o um jito cónico e com dois canais frios de alimentação, assim como o ataque. O sistema de alimentação tem um volume total de 1,27 cm<sup>3</sup>.



**Figura 33.** Sistema de alimentação,[8].

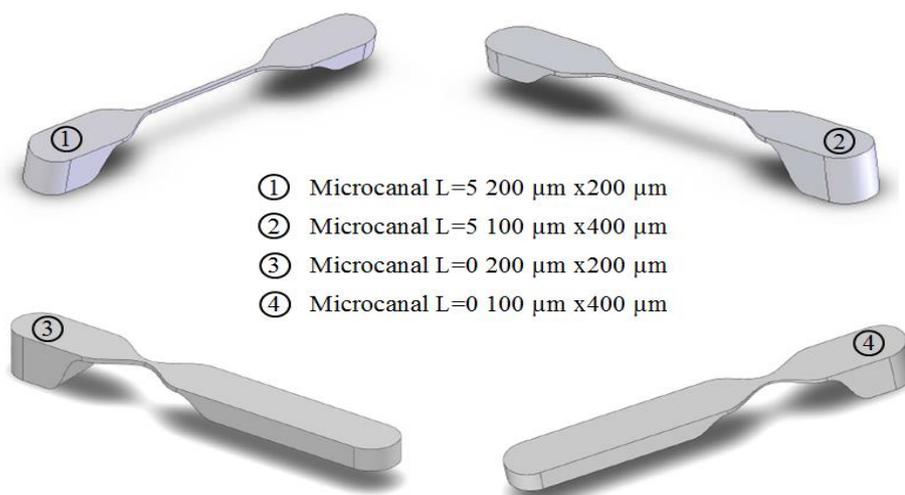


Na Figura 34, é possível observar as geometrias em 2D dos microcanais com 5 milímetros de comprimento estudados, para ambas as secções 400  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ .



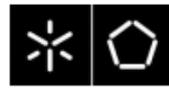
**Figura 34.** Dimensões gerais em milímetros dos microcanais com 5 milímetros de comprimento.

No entanto para determinar e quantificar os efeitos de entrada nos microcanais, com o intuito de realizar as correções reológicas, é necessário a utilização dos microcanais com comprimento, (L), igual a zero. Os microcanais com  $L=0$  possuem a mesma geometria na entrada do ataque do microcanal comparando com os microcanais  $L=5$ , enquanto a restante geometria é alongada, tudo isto para permitir a quantificação da pressão exatamente no mesmo local dos microcanais com  $L=5$ . Na Figura 35, é possível observar a geometria em 3D, quer dos microcanais  $L=5$  e dos microcanais  $L=0$ .



- ① Microcanal  $L=5$  200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$
- ② Microcanal  $L=5$  100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$
- ③ Microcanal  $L=0$  200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$
- ④ Microcanal  $L=0$  100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$

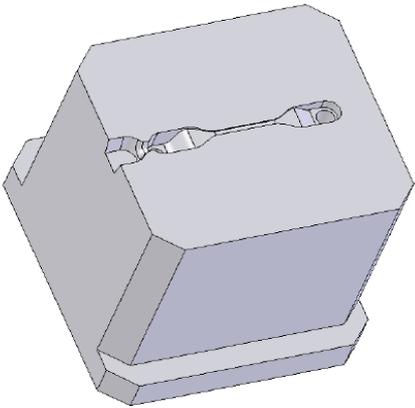
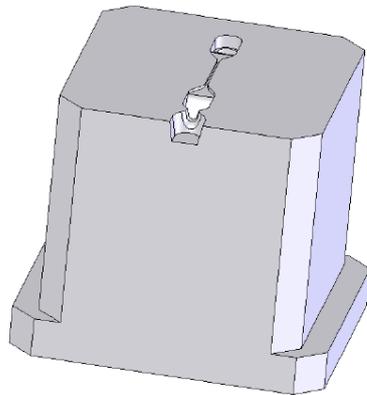
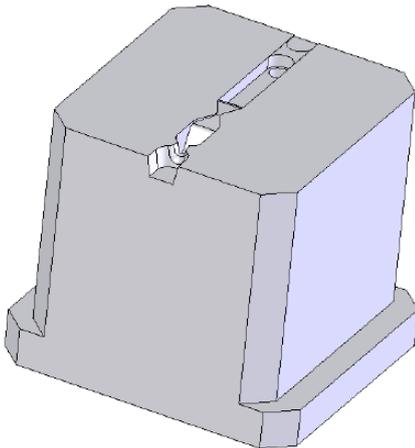
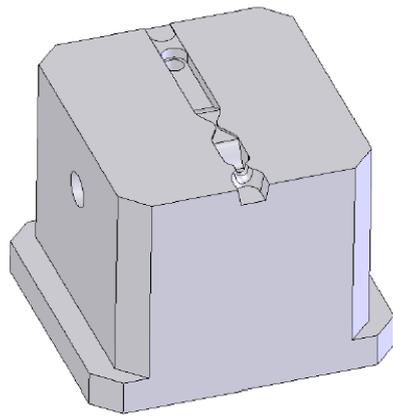
**Figura 35.** Microcanais  $L=5$  em cima e microcanais  $L=0$  em baixo.



### 4.5 Insertos moldantes

Os insertos apresentados na

Tabela 1, foram substituídos no interior do molde ao longo do estudo pois á medida que se realizava os ensaios foi necessário para cada geometria 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , a utilização dos posiços com os microcanaís L=5 e para a efeitos de correção os posiços com os microcanaís L=0. A Figura 36, ilustra as dimensões em 2D dos insertos nos quais foram reproduzidos os microcanaís.

	Geometria 100 $\mu\text{m}$ x400 $\mu\text{m}$	Geometria 200 $\mu\text{m}$ x200 $\mu\text{m}$
Microcanal L5 mm		
Microcanal L0 mm		

**Tabela 1.** Insertos utilizados no interior do molde,[8].

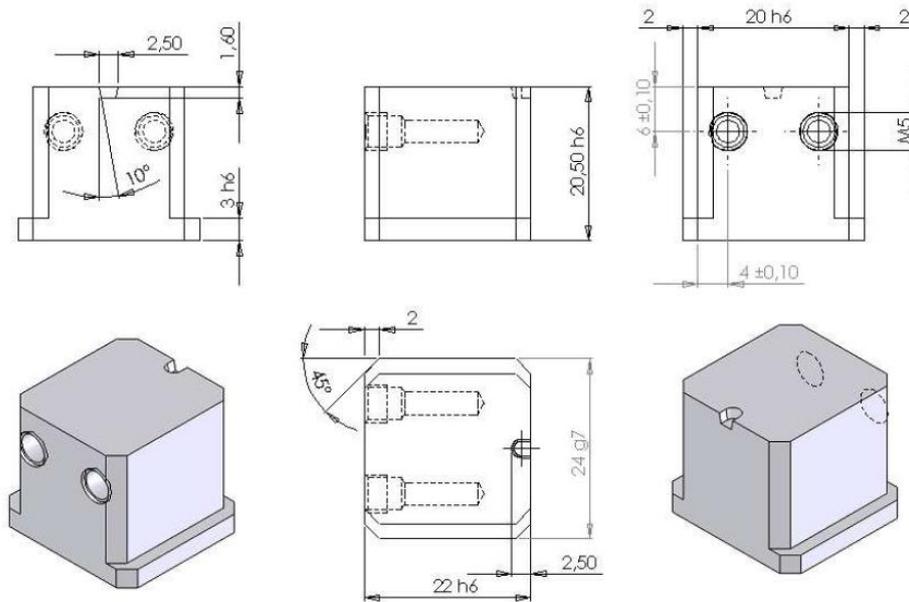
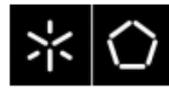
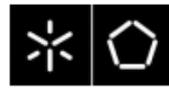


Figura 36. Dimensões em milímetros dos insertos, [8].

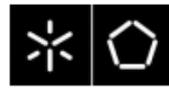
## 4.6 Materiais

- Atualmente existem inúmeros materiais com diferentes graus no mercado, através desta variedade é possível em termos de propriedades proporcionar as condições ideais para a aplicação em microsistemas.
- Neste estudo vão ser injetados dois materiais diferentes, para a caracterização do desenvolvimento do fluxo, para tal vai utilizar-se um polímero amorfo e um polímero semicristalino, pois na microinjeção temos o processamento destes materiais.
- Os materiais selecionados devem corresponder às especificações necessárias para melhorar a reprodutividade do fluxo, neste estudo o material tem de estar a uma temperatura que permita o enchimento dos diferentes microcanais para que seja possível o toque do fluxo em cada um dos dois sensores acoplados no molde para a determinação da respetiva queda de pressão associada a cada um dos materiais, amorfo e semicristalino.
- Atualmente com a miniaturização de vários componentes á escala mundial surge a necessidade de conhecer quais os materiais existentes no mercado a ser utilizados no processo de microinjeção. A Tabela 2, demonstra uma lista dos materiais utilizados no processo de microinjeção.



<i>Polímeros Amorfos</i>		<i>Polímeros semicristalinos</i>	
<i>Sigla</i>	<i>Nome</i>	<i>Sigla</i>	<i>Nome</i>
ABS	Copolímero de Acrilonitrilo Butadieno Estireno	LCP	Polímero Líquido Cristalino
COC	Copolímero de Olefino Cíclico	PA.6 (Nylon)	Poliamida 6
COP	Polímero de Olefino Cíclico	PA 12	Poliamida 12
MABS	Metacrilato de Metilo Acrilonitrilo Butadieno Estireno	PA 12 - C	Poliamida 12 – Carbono
PAI	Poliamida-imida	PBT	Polibutileno-tereftalato
PEI	Poliéter-imida	PBT	Polibutileno- tereftalato (15 % de fibra de vidro)
PC	Policarbonato	PE	Polietileno
PMA	Polimetacrilato de metilo	PEEK	Poliéter Cetona
PS	Poliestireno	PFA (resina teflon)	Perfluoroalcóxido
PSU	Polisulfona	PLA	Poli Ácido Láctico
PPE	Poli-Éter de Fenileno	PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
SAN	Copolimero de estireno-acrilonitrilo	POM	Polióxido de metileno
SBS	Copolímero de estireno-butadieno - estireno	POM- C	Polióxido de metileno – carbono
		PP	Polipropileno

**Tabela 2.** Polímeros utilizados em microinjeção, [6].



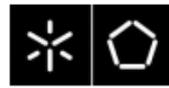
Para o estudo em questão selecionaram-se os materiais com os seguintes graus Moplen HP548R da Lyondell-Basell e Edistir N1910 da Polimeri Europa.

Ambos os materiais possuem graus adequados para microinjeção e valores de índice fluidez elevados que são propícios para um melhor desenvolvimento do fluxo durante a fase de injeção da moldação, através da Tabela 3, são enunciadas as principais características dos materiais selecionados.

<b>Material</b>	<b>Grau</b>	<b>Morfologia</b>	<b>Índice de Fluidez</b>	<b>Densidade</b>
<b>Polipropileno</b>	Moplen HP548R	Semicristalino	23 g/10min (230°C - 2.16Kg)	0.9 g/cm <sup>3</sup>
<b>Poliestireno</b>	Edistir N1910	Amorfo	27 g/10min (200°C - 5 Kg)	1.05 g/cm <sup>3</sup>

Tabela 3. Principais propriedades dos materiais.





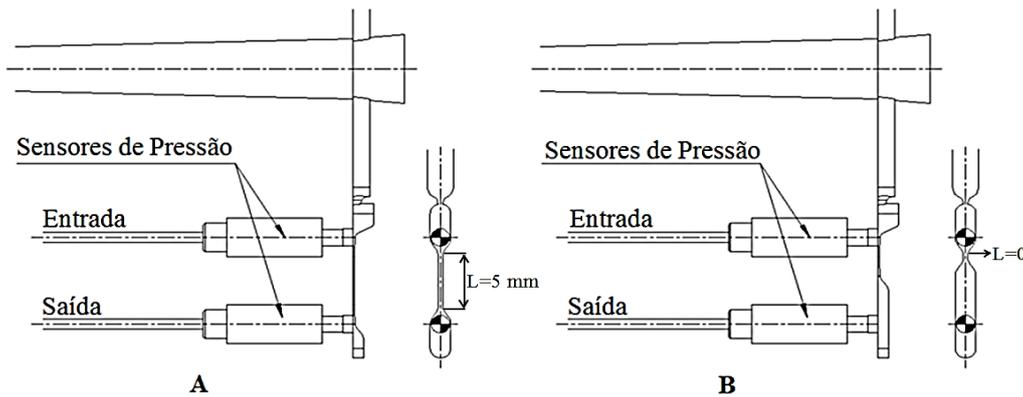
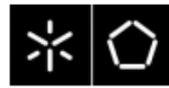
## **CAPÍTULO 5 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O pressuposto uso das duas secções, retangular e quadrangular permite uma comparação a nível reológico dos valores de pressão para uma secção circular, porque apesar das secções transversais serem diferentes, o diâmetro hidráulico é muito semelhante para ambas as secções.

A geometria dos microcanais é completada por dois pequenos depósitos nas extremidades para proporcionar uma estabilização da fluidez do fluxo, ou seja a zona de transição entre os depósitos a montante do microcanal e a jusante do microcanal, apresenta uma geometria o mais suave o quanto possível para que o microfluxo gerado no microcanal sofra o mínimo de perturbações possíveis. No que diz respeito aos sensores de pressão existe um erro enunciado, porque as dimensões comerciais físicas dos sensores são de escala diferente dos microcanais.

Os microcanais  $L=0$  possuem as duas extremidades mais largas, pois esta variação na geometria vai influenciar a queda de pressão, originando a correção necessária dos efeitos de entrada, sendo necessário o uso dos postigos com os microcanais  $L=0$ .

A Figura 37, esquematiza a realização do estudo analisando o desenvolvimento do microfluxo para secção retangular  $400 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , onde é possível observar o microcanal com  $L=5$ , e para corrigir os efeitos de entrada da queda de pressão do material fundido, necessários aos cálculos reológicos surge o microcanal  $L=0$ .



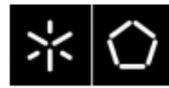
**Figura 37.** Esquemática do estudo para o microcanal  $400 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ; **A**-Microcanal  $L=5$ ; **B**-microcanal  $L=0$ ,[8].

Após a devida colocação dos postigos no molde e da instrumentação do sistema de aquisição de dados, o molde passa a ser utilizado como um viscosímetro de alta pressão, verificando-se as altas pressões de injeção nos microcanais. Isto porque seria muito difícil ativar em viscosímetros convencionais,[14,13,34,38,39].

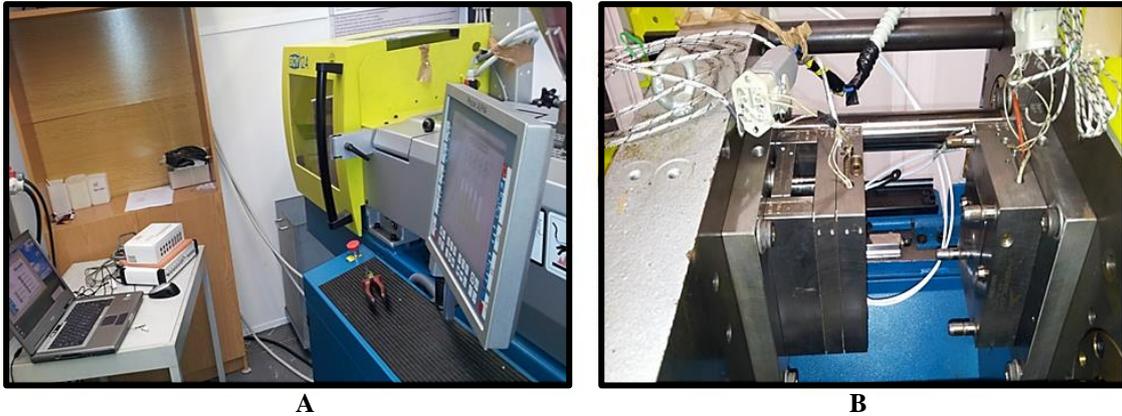
Numa dada altura os valores de pressão de injeção são demasiado elevados que o fluxo passa de um regime de fluxo em fonte para um regime em que o fluxo apresenta uma fase de transição para o escorregamento.

Na análise da caracterização reológica do fluxo, realizou-se as devidas correções necessárias para os cálculos da reometria capilar. Com microcanal  $L=0$ , efetuou-se a correção de Bagley, para corrigir os efeitos da pressão á entrada, Os dois sensores de pressão estão colocados no exterior e á face dos microcanais devido às suas dimensões. Sendo necessário então o uso de um microcanal com comprimento zero para as duas secções.

A reometria capilar admite que cada velocidade imposta através do êmbolo/ pistão vai originar taxas de corte características estabelecendo-se as curvas de fluxo resultantes. Neste caso em concreto como a nossa ferramenta utilizada não é um reómetro capilar mas sim um molde com o princípio de um viscosímetro, a variação de velocidade não é realizada durante o ciclo como, o caso da reometria capilar. A variação de velocidade é realizada ciclo a ciclo de injeção, exigindo a realização de vários ciclos de injeção com diferentes velocidades de injeção para uma dada temperatura do material. Posteriormente obtém-se um conjunto de pontos, dados pela variação da velocidade de injeção para a mesma temperatura do fundido que vão reproduzir a curva de fluxo.



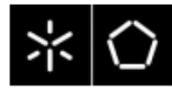
Na Figura 38, demonstra-se a montagem de todo sistema utilizado assim como a respetiva instrumentação do molde.



**Figura 38.** A- Demonstração do Sistema utilizado, B- Instrumentação do Molde.

Seguidamente é descrito todos os passos realizados durante a caracterização microreológica do fluxo:

- 1- Aquisição das curvas de pressão obtidas no microcanal com 5 milímetros de comprimento, á passagem do fluxo nos sensores de entrada e saída, resultado das diferentes velocidades de injeção impostas;
- 2- Selecionar as curvas de pressão obtidas, correspondentes a cada ciclo de injeção. (O ideal é para cada velocidade de injeção correr cerca de 8 ciclos de injeção e posteriormente fazer comparação e seleção das curvas);
- 3- Efetuar a média das curvas de pressão nos sensores de entrada e saída do microcanal;
- 4- Identificar o instante de tempo  $t_1$  para qual o polímero fundido toca no sensor á entrada do microcanal;
- 5- Identificar o instante de tempo  $t_2$  para qual o polímero fundido toca no sensor á saída do microcanal;



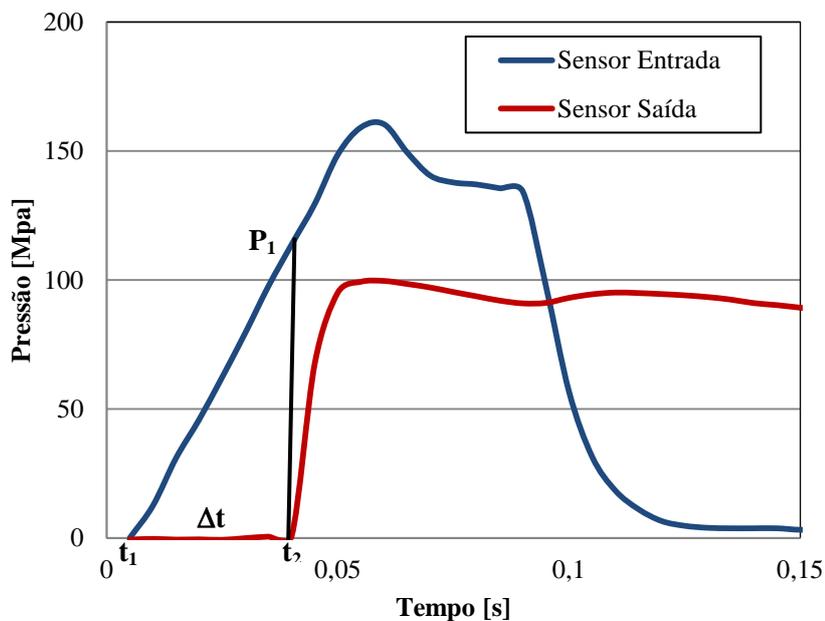
6- Determinar a velocidade média no microcanal:

- A distância entre os sensores de pressão tem um  $\Delta L = 9 \text{ mm}$ ;
- A velocidade média é calculada através  $V_{m\acute{e}dia} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{t_2 - t_1}$ ;

7- Determinar o caudal médio no microcanal:

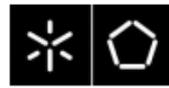
- O volume do microcanal é obtido através do modelo do desenho 3D;
- O caudal é calculado através  $Q_{m\acute{e}dio} = \frac{Vol}{\Delta t} = \frac{Vol}{t_2 - t_1}$ ;

8- Através das curvas obtidas retirar a queda de pressão entre os instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , na figura 30 demonstra-se uma das curvas exemplo;



**Figura 39.** Queda de pressão obtida no microcanal com  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  ente os instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$ ;

- 9- Aquisição das curvas de pressão obtidas no microcanal zero de comprimento, á passagem do microfluxo nos sensores de entrada e saída, resultado das diferentes velocidades de injeção impostas;
- 10- Repetir os passos enunciados anteriormente do 2º até ao 8º, mas neste caso para o microcanal zero ( $L=0$ ) de comprimento;



11- Calcular a queda de pressão,  $\Delta P_{real} = \Delta P_{L5} - \Delta P_{L0}$  ;

12- Efetuar o calculo da tensão de corte aparente,  $\tau_w (app) = \frac{h}{2} = \left( \frac{-\Delta P_{real}}{L} \right)$  ;

13- Efetuar o calculo da taxa de corte aparente,  $\dot{\gamma}_w (app) = \frac{6Q}{w \times h^2}$  ;

14- Determinar o índice de comportamento do fluxo não newtoniano,

$$n = \frac{\ln \sigma_{real_i} - \ln \sigma_{real_{i-1}}}{\ln \gamma_{app_i} - \ln \gamma_{app_{i-1}}}$$

15- Determinar a taxa de corte aplicando a correção de Rabinowitsch,

$$\dot{\gamma}_w (real) \frac{6Q}{w \times h^2} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} n \right)$$

16- Determinar a taxa de corte aplicando a correção de Bagley,

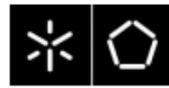
$$\tau_w (real) = \frac{w \times h}{2 (w + h)} \left( \frac{-\Delta P_{real}}{L} \right)$$

17- Através dos valores obtidos da taxa de corte e da tensão de corte calculados

através dos passos **15** e **16** calcula-se a viscosidade,  $\eta_{real} = \frac{\tau_{real}}{\dot{\gamma}_{real}}$

18- Traçar os gráficos viscosidade versus taxa de corte em escala logarítmica.





## CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Reometria Capilar

Com a realização deste estudo foi necessário conhecer o comportamento reológico característico de cada material. Na Figura 40, está ilustrado o reômetro capilar (A), utilizado para a caracterização reológica, dotado de três zonas de aquecimento (B), e a saída do material nas feiras (C). Durante a realização do ensaio o material foi extrudido ao longo de duas feiras uma longa e outra curta, as feiras selecionadas possuem diâmetros pequenos para impor ao material taxas de corte elevadas, iguais às verificadas no processo de microinjeção, necessário para a caracterização do fluxo, a, Tabela 4, descreve as principais características das feiras utilizadas.

Fieira	Comprimento [mm]	Diâmetro [mm]	Ângulo [°]	Penetramento [mm]	Rosca [mm]
Comprida	4	0.5	180	20.3	2
Curta	2	0.5	180	21.1	4

Tabela 4. Características das feiras utilizadas.

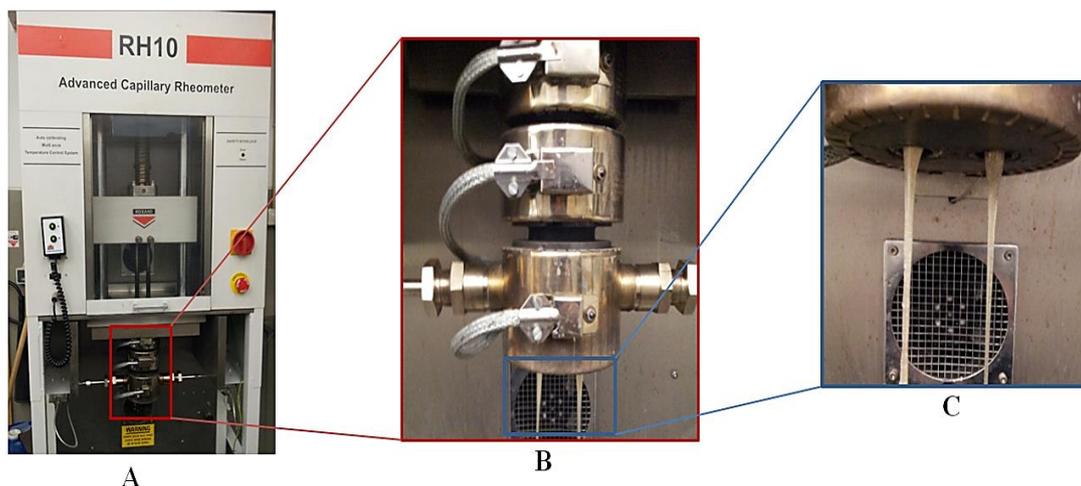
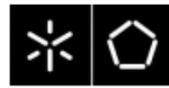


Figura 40. A- Reômetro Capilar; B- Zonas de aquecimento; C- Extrusão do fundido através das feiras;



### 6.1.1 Poliestireno

No Poliestireno efetuou-se o ensaio de reometria capilar tendo como temperatura de referência,  $T_{ref} = 200\text{ °C}$  seguidamente atribuíram-se temperaturas  $T_{ref} - 20\text{ °C}$  e  $T_{ref} + 20$ . A Figura 41, demonstra as curvas de fluxo obtidas para as três temperaturas realizadas durante o ensaio.

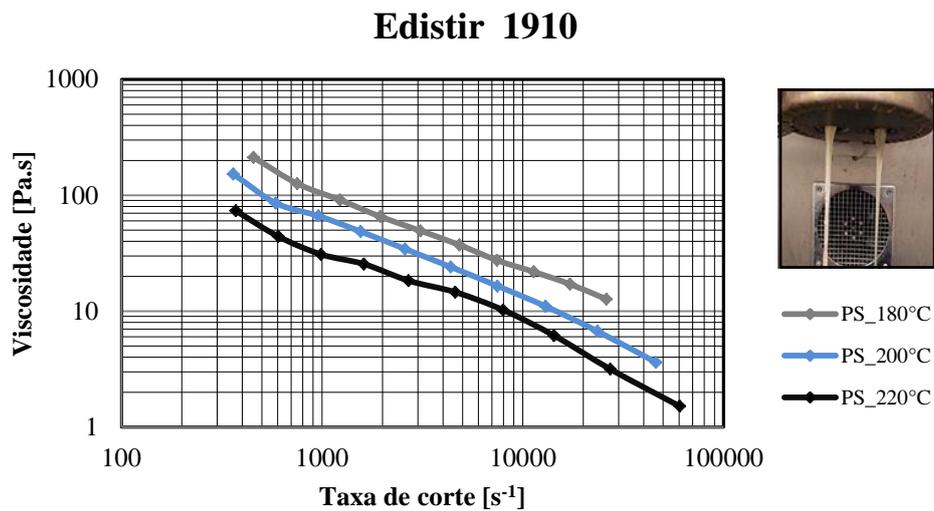


Figura 41. Curvas de Fluxo obtida através da reometria capilar para o Edistir N1910

Ainda para o Poliestireno Edistir N1910 realizou-se um ensaio para uma temperatura de  $240\text{ °C}$  no entanto, e sabendo que o material estava sujeito a esta temperatura nas três zonas aquecimento, começou a degradar, Figura 42.

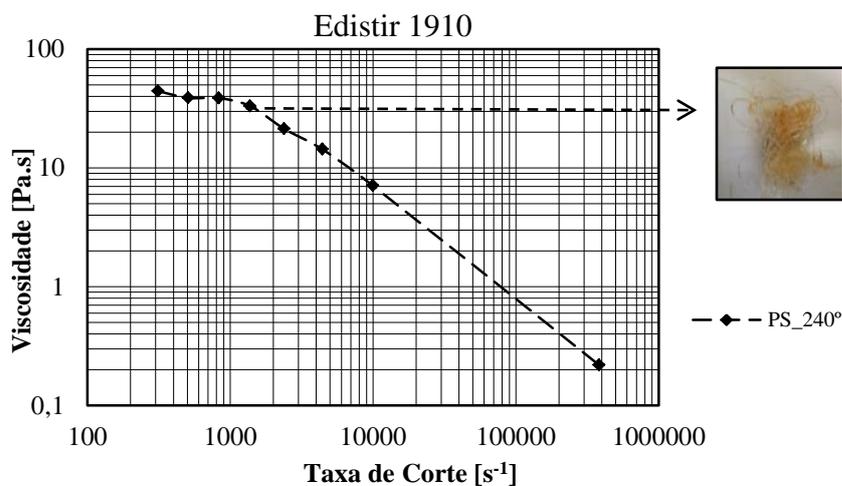
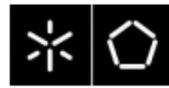
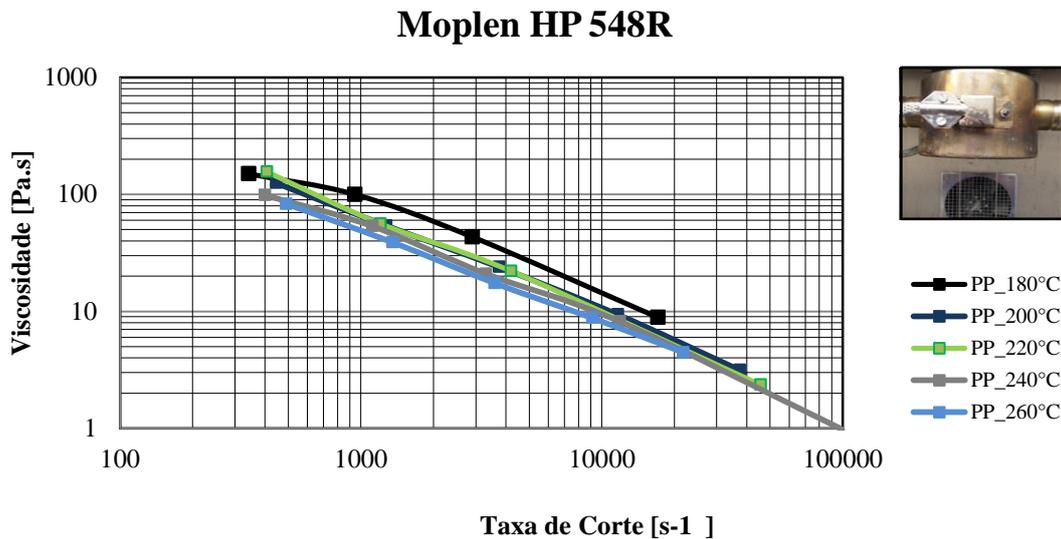


Figura 42. Curva de Fluxo obtida através da reometria capilar a  $240\text{ °C}$  para o Edistir N1910.



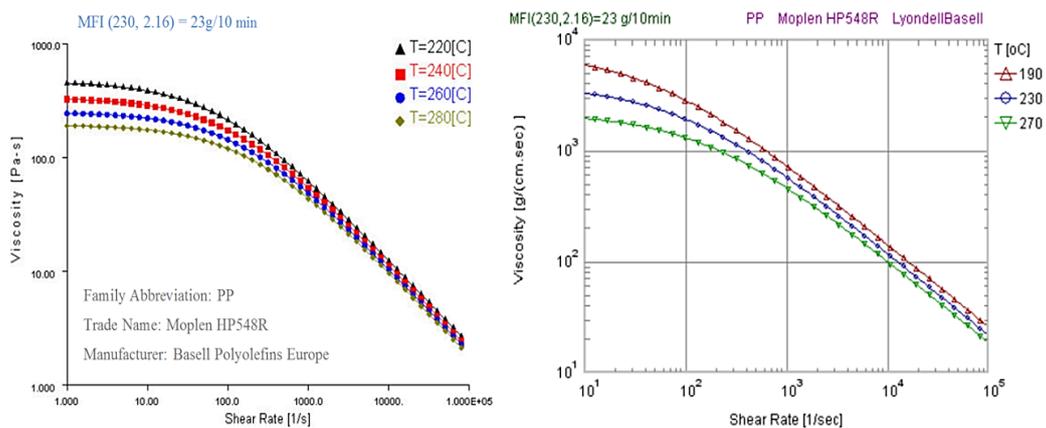
### 6.1.2 Polipropileno

Para o polipropileno Moplen HP548R, efetuou-se também o ensaio de reometria capilar tendo como temperatura de referência,  $T_{ref} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$  seguidamente atribuíram-se temperaturas  $T_{ref} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $T_{ref} + 20$  e  $T_{ref} - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $T_{ref} + 40$ .

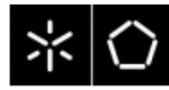


**Figura 43.** Curvas de Fluxo obtida através da reometria capilar para o Moplen HP 548R.

Recorrendo a base de dados dos materiais existentes nos programas de simulação de injeção de polímeros como, Autodesk Moldflow Insight 2012 e Moldex 3D, é possível observar através da Figura 44, as curvas de fluxo obtidas para diferentes temperaturas. Como o grau do poliestireno escolhido não está enunciado neste tipo de programas de simulação não foi possível apresentar as curvas de fluxo.



**Figura 44.** Curvas de fluxo obtidas através: A- Autodesk Moldflow Insight 2012; B- Moldex 3D,[8].



## **6.2 Resultados preliminares**

Realizou-se um conjunto de experiências necessárias para a caracterização do fluxo ao longo dos microcanais,  $L=5$  e  $L=0$ . A Tabela 5, demonstra todos os ensaios realizados durante este estudo.

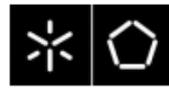
Inicialmente e para a secção de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , e para ambos os materiais PP Moplen HP548R e PS Edistir N1910 com uma temperatura do molde de  $100^\circ\text{C}$  e com uma temperatura do fundido de  $220^\circ\text{C}$ , conseguiu-se que o fluxo enchesse o microcanal e efetuava-se o toque nos dois sensores para a obtenção e aquisição de dados.

Ainda para a mesma secção e para os mesmos materiais, PP Moplen HP548R e PS Edistir N1910, efetuaram-se um conjunto de ciclos de injeção, com um ligeiro aumento da temperatura de fundido para  $240\ ^\circ\text{C}$  com uma temperatura do molde  $80\ ^\circ\text{C}$ , para a secção transversal  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , e fazendo-se variar de forma crescente os valores da velocidade de injeção, obtiveram-se os pontos necessários para a reprodução das curvas de fluxo, verificou-se novamente que o fluxo enchia o microcanal e efetuava o toque nos dois sensores colocados á entrada e saída do microcanal, sendo possível assim a respetiva aquisição de dados, para a queda de pressão.

No entanto e ainda para mesma secção de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  e para ambos os materiais, manteve-se a temperatura de fundido  $240^\circ\text{C}$ , mas aumentou-se a temperatura do molde para  $90^\circ\text{C}$  e novamente realizando-se um conjunto de vários ciclos de injeção com diferentes valores de velocidades de injeção sucedeu-se o mesmo que anteriormente o fluxo permitia o toque nos dois sensores, fundamental para o sistema de aquisição de dados.

Com a secção de  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  realizou-se um conjunto de experiências para ambos os materiais e utilizando-se como temperaturas do molde  $80^\circ\text{C}$   $90^\circ\text{C}$  e  $100^\circ\text{C}$  e uma temperatura do fundido  $220^\circ\text{C}$ , verificou-se que o microcanal com  $400\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  não enchia totalmente o microcanal, ou seja o fluxo com as condições impostas não alcançava o sensor colocado á saída do microcanal.

Uma das possíveis causas para o não enchimento do microcanal deveu-se ao facto da temperatura do molde imposta ser demasiado baixa, e como a secção é micrométrica o material solidificava mesmo antes de chegar ao segundo sensor.



Foi necessário, a realização do ajuste dos parâmetros de processamento para ser possível o enchimento completo do microcanal com a secção de 400  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ .

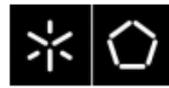
Efetuada-se um controlo da temperatura do fundido para 220°C e aumentando-se a temperatura do molde para 120°C o fluxo continuava ainda com o mesmo problema, pois não enchia totalmente o microcanal, solucionando-se este problema com um aumento significativo do valor da temperatura do molde para 155°C. Através deste aumento foi possível para ambos os materiais, o total enchimento do microcanal elaborando-se um conjunto de vários ciclos de injeção.

A importância do uso de vários valores de velocidade de injeção seleccionados, surge porque para a realização das curvas de fluxo é necessário obter vários pontos para ser possível a visualização da zona ao qual o fluxo no interior do microcanal passa de um regime de fluxo em fonte para um fase de transição, designada por efeito de escorregamento do material ao longo das paredes do microcanal. Outra nota importante a frisar são os pontos seleccionados durante as curvas de fluxo, isto porque nem todas as velocidades realizadas foram seleccionadas para traçarem os pontos das curvas.

Como vai ser possível observar ao longo dos gráficos apresentados, correspondentes a essas mesmas curvas de fluxo, estes têm poucos pontos definidos, pois ao tratar-se os gráficos de pressão vs tempo para as várias velocidades manteve-se em conta uma coerência nos resultados, partindo do seguinte princípio:

Dando um exemplo para o microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , mantendo-se o mesmo valor de temperatura do molde 80°C e temperatura do fundido 240°C durante o processamento do poliestireno, ao aumentarmos a velocidade de injeção em cada ciclo, vai ser necessário mais pressão para injetar a mesma quantidade de material, logo os valores de pressão adquiridos vão ser superiores. Em relação ao  $\Delta t$ , correspondente ao toque entre os dois sensores, terá de ser inferior, porque como a velocidade vai sendo mais elevada o material passa pelo microcanal mais rapidamente, ou seja o tempo de leitura entre  $t_1$  e  $t_2$  vai ser inferior.

Neste caso em concreto da curva de fluxo obtida para o poliestireno variou-se de forma crescente a cada 20 mm/s, os valores para a velocidade de injeção desde 120 mm/s até ao máximo definido pela máquina 240 mm/s.



No entanto seguindo o intuito do método explicado nos parágrafos anteriores, as velocidades que reproduziram a curva de fluxo para o poliestireno com  $T_{molde}=80^{\circ}C$ , foram:

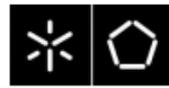
- 1-Ponto -140mm/s; 2 Ponto-160mm/s; 3-Ponto-200mm/s; 4-Ponto240mm/s

Todas as outras velocidades de injeção, 120, 180 e 220 mm/s, não foram selecionadas pela não significativa reprodução da curva, mantendo-se o mesmo critério para a obtenção das outras curvas de fluxo apresentadas.

Através da Tabela 5, que apresenta o conjunto de experiências realizadas, explica-se o enquadramento do conjunto de parágrafos enunciados anteriormente, demonstra-se também detalhadamente os diferentes valores de temperatura de fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção utilizados para os diferentes microcanais, realizados durante o estudo da caracterização reológica dos materiais, PP Moplen H548R e PS Edistir N1910.

<i> Materiais</i>	<i> Secção [<math>\mu m^2</math>]</i>	<i> Temperatura do fundido [<math>^{\circ} C</math>]</i>	<i> Temperatura do molde [<math>^{\circ} C</math>]</i>	<i> Velocidade de injeção [mm/s]</i>
<b>PS</b>	<i>200x200</i>	<i>240</i>	<i>80</i>	<i>120-140-160-180-200-220-240</i>
	<i>200x200</i>	<i>240</i>	<i>90</i>	<i>120-140-160-180-200-220-240</i>
	<i>200x200</i>	<i>220</i>	<i>100</i>	<i>120-140-160-180-200</i>
	<i>100x400</i>	<i>220</i>	<i>155</i>	<i>40-60-80-100-120-140-160-180-200-220-240</i>
<b>PP</b>	<i>200x200</i>	<i>240</i>	<i>80</i>	<i>120-140-160-180-200-220-240</i>
	<i>200x200</i>	<i>240</i>	<i>90</i>	<i>120-140-160-180-200-220-240</i>
	<i>200x200</i>	<i>220</i>	<i>100</i>	<i>120-140-160-180-200</i>
	<i>100x400</i>	<i>220</i>	<i>155</i>	<i>40-60-80-100-120-140-160-180-200-220-240</i>

**Tabela 5.** Conjunto de experiências realizadas nos microcanais L=5 e L=0.



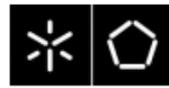
### 6.3 Microcanal 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$

#### 6.3.1 Parâmetros de processamento

A Tabela 6, fornece a informação relativamente aos ensaios realizados para a secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , para os microcanais L=5 e L=0, com o processamento dos dois materiais, PP Moplen HP548R e PS Edistir N1910, observa-se também as diferentes temperaturas do molde utilizadas 100°C 90°C e 80°C. No que diz respeito ao perfil de temperatura, na Tabela 6 pode-se verificar que na zona 5 possui um valor de 240 graus celsius, porque ao contrário da reometria capilar, Figura 42, o material foi sujeito a 240°C em três zonas consecutivas antes de ser extrudido, por isso degradou, enquanto na microinjeção isso não aconteceu, pois só a zona do bico é que se encontrava a 240°C.

Parâmetros		Intervalo	
Temperatura (°C)	Zona 1	200	200
	Zona 2	200	205
	Zona 3	220	210
	Zona 4	230	215
	Zona 5	240	220
Temperatura do Molde (°C)		90 - 80	100
Temperatura do Fluido – Arrefecimento (°C)		-	-
Dosagem (mm)		13,5	13.5
Comutação (mm)		Fuso 2	Fuso 2
Pressão de Injeção (bar)		130	130
Tempo de Injeção (s)		0,25	0,25
Velocidade de Injeção (mm/s)		240/220/200/180/160/140/120	200/180/160/140/120
Segunda Pressão (bar)		-	-
Tempo de Seg. Pressão (bar)		-	-
Velocidade de Plasticização (mm/s)		100	120
Contra Pressão (bar)		5	5
Tempo de Arrefecimento (s)		25	15
Tempo de Ciclo (s)		-	-

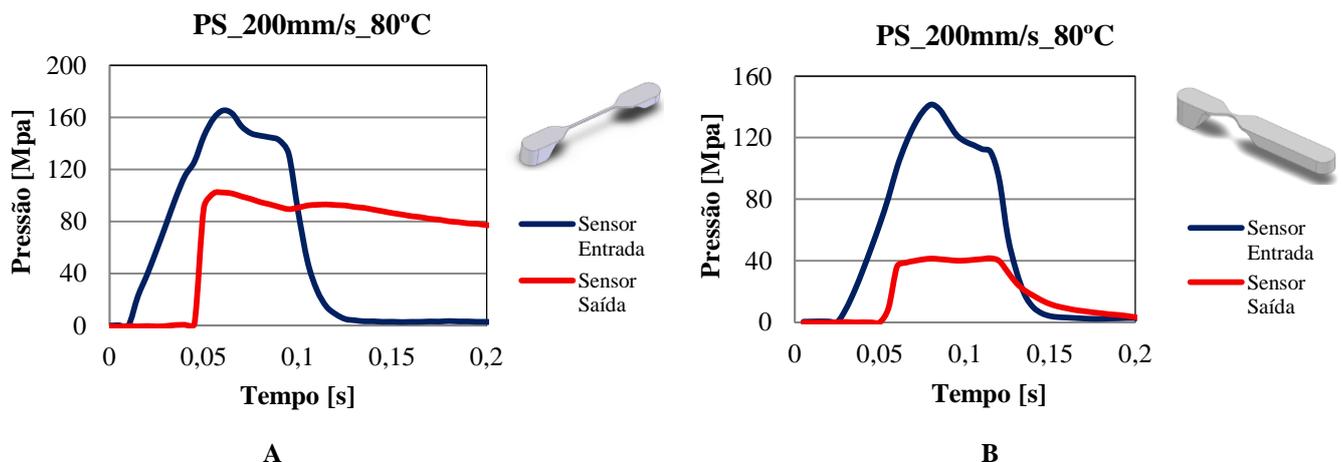
**Tabela 6.** Parâmetros de processamento para a secção 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  para L=5 e L=0.



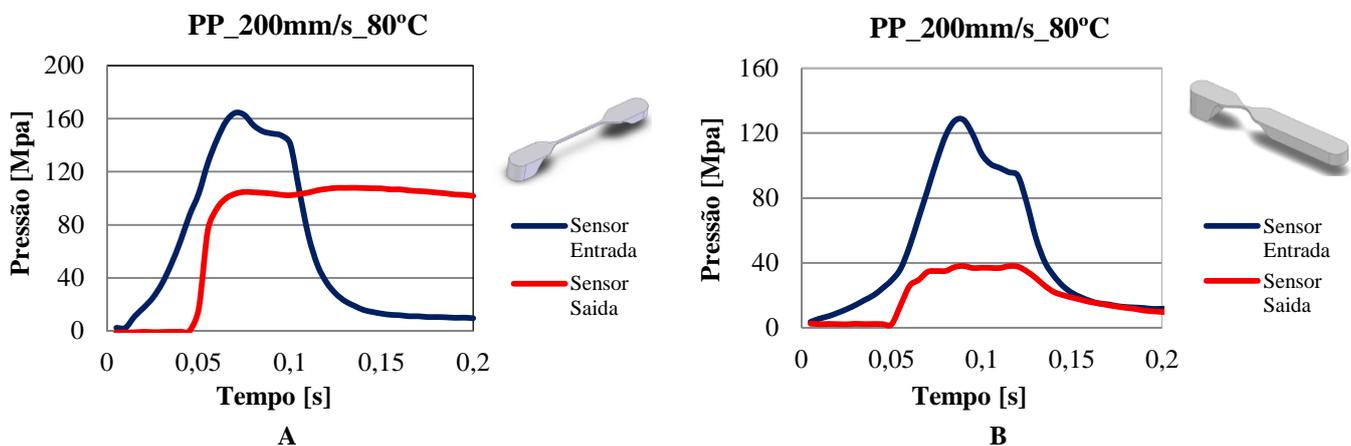
### 6.3.2 Curvas de Pressão do microcanal 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$

Como para a realização das curvas de fluxo são necessários vários pontos obtidos através da reprodução de vários ciclos de injeção com diferentes velocidades. Após o tratamento do sistema de aquisição de dados dos respectivos ciclos de injeção realizou-se, o tratamento dos gráficos obtidos, para cada velocidade e temperatura do molde impostas.

Para os gráficos de pressão vs tempo obtidos para o microcanal de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  para L=5 e L=0, e após selecionar-se um valor de velocidade de injeção imposta, 200 mm/s, como exemplo dos resultados obtidos do sistema de aquisição de dados, demonstra-se através das figuras 45, 46, 47,48,49 e 50 os gráficos de pressão vs tempo obtidos que descrevem o toque da frente do polímero fundido em cada um dos sensores, colocados á entrada e saída do microcanal, para diferentes temperaturas do molde., 80°C, 90°Ce 100°C, para ambos os materiais.



**Figura 45.** Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 80°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0



**Figura 46.** Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 80°C e velocidade de injeção de 200mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0.

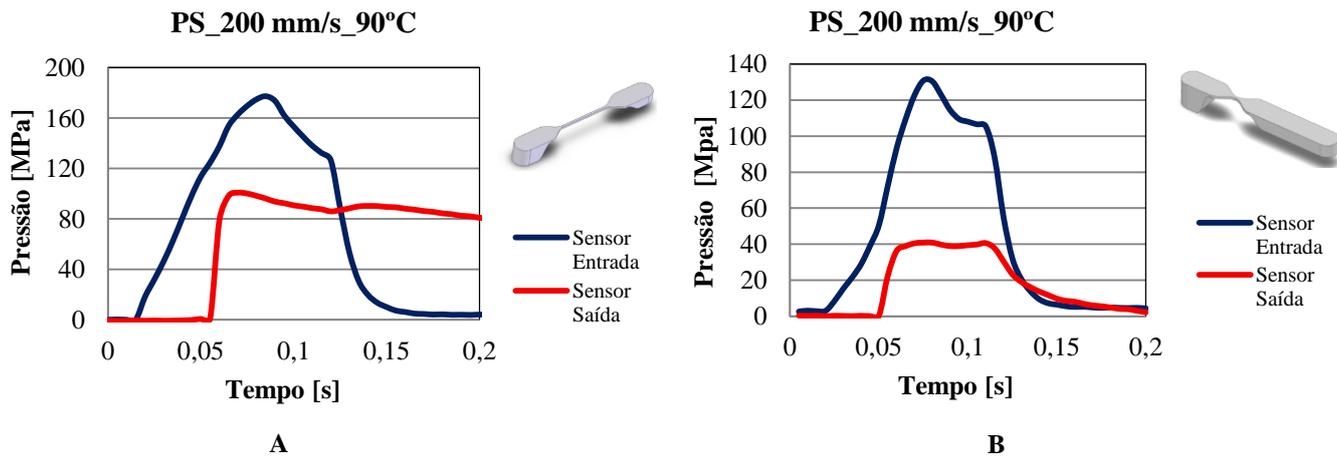


Figura 47. Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 90°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0.

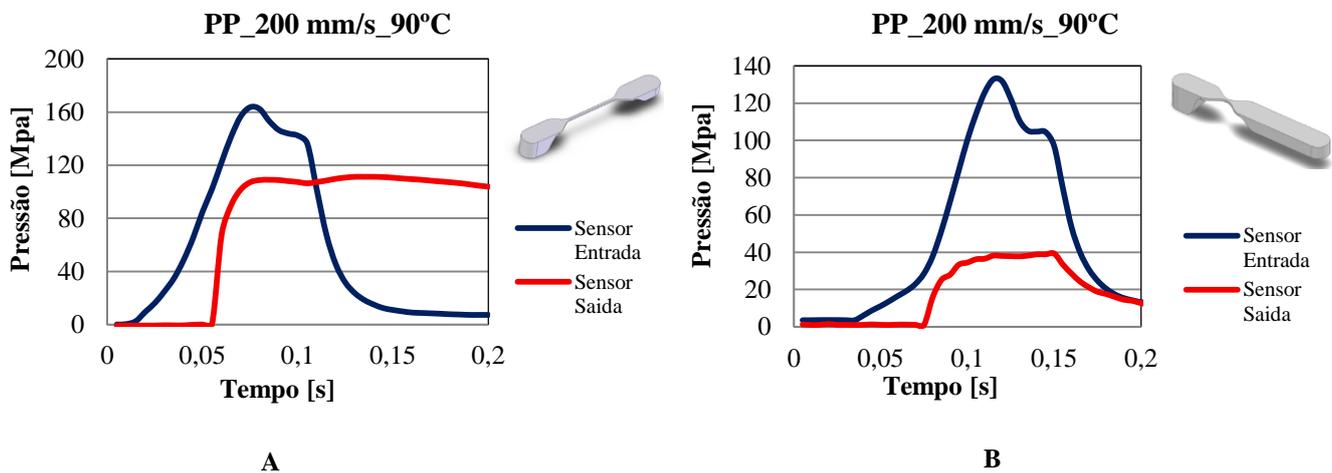


Figura 48. Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 90°C e velocidade de injeção de 200mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0.

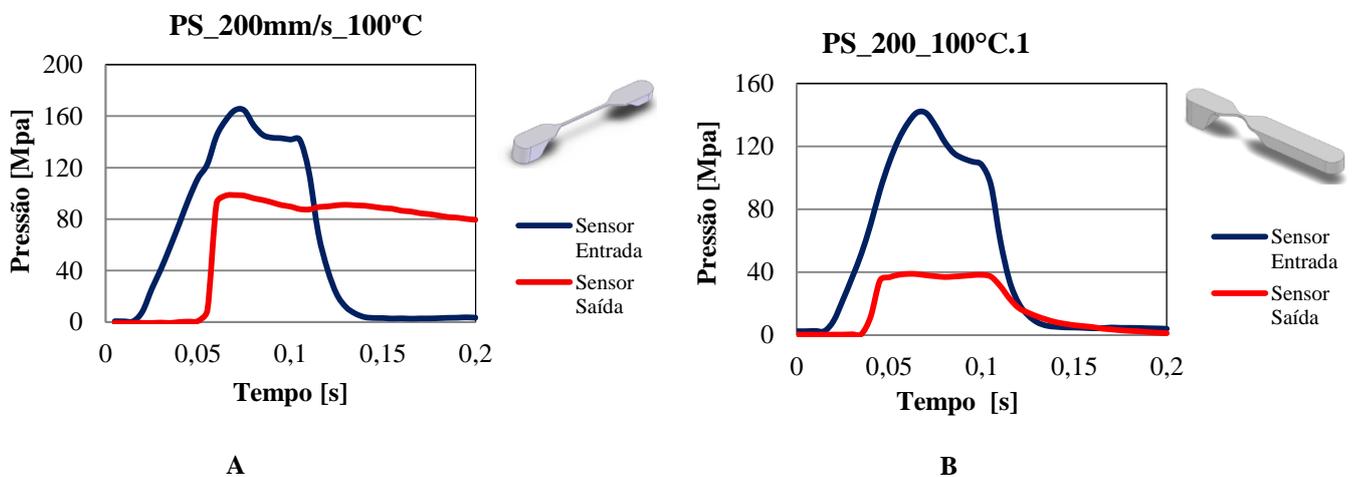
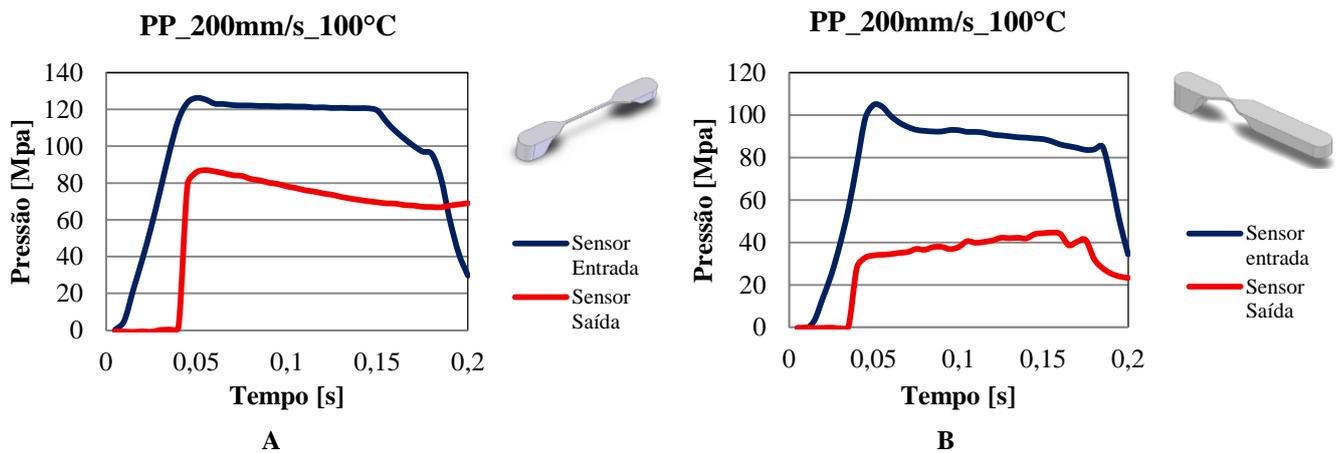
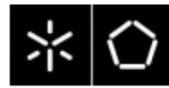
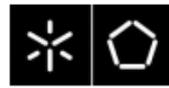


Figura 49. Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 100°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0.



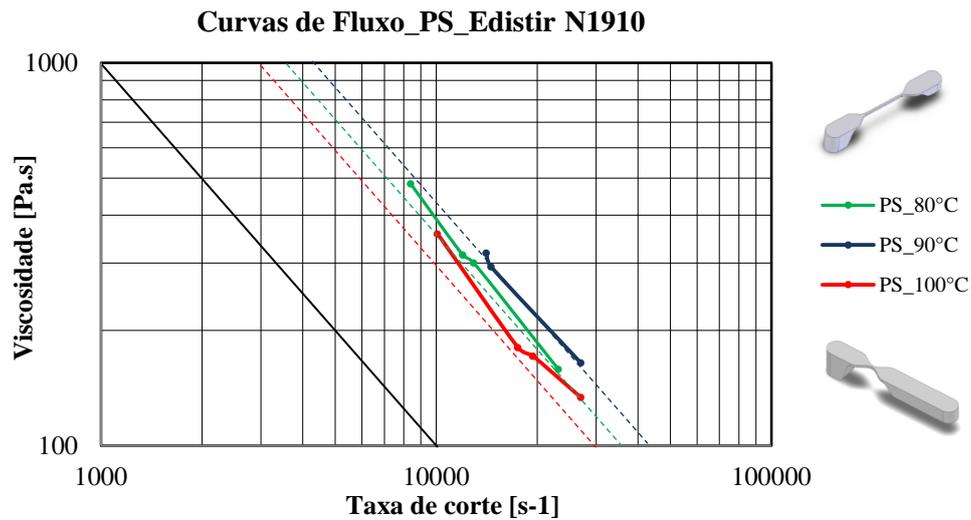
**Figura 50.** Gráficos obtidos para o PP\_MoplenHP 548R com temperatura do molde 100°C e velocidade de injeção de 200mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0.

As figuras 45, 46 47,48,49 e 50, caracterizam os resultados definidos pela frente do fluxo de cada um dos polímeros fundidos. Durante o enchimento do microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , são registados as leituras dos valores de pressão fornecidos pelos sensores. Para ambas as figuras apresentadas o valor da velocidade de injeção é sempre o mesmo 200 mm/s, no entanto as temperaturas do molde são diferentes. Observando-se as figuras 45,46,47,48, os valores de pressão obtidos nos gráficos assim como o intervalo de tempo,  $\Delta t$ , avaliados são muito similares o que significa que para a mesma secção e para a mesma velocidade de injeção imposta, para ambos os materiais, ao impor-se temperaturas diferentes no molde 80°C e 90°C, não se obteve grande influência nos gráficos pressão vs tempo. No que diz respeito às figuras 49 e 50 os resultados divergem pois para a mesma temperatura do molde e mesma velocidade de injeção, os materiais durante a reprodução do ciclo de injeção apresentaram gráficos muito diferentes, pois na figura 49 descreve-se a avaliação da queda de pressão do poliestireno que obteve valores de pressão superiores em relação aos valores de pressão do polipropileno, figura 50, por outro lado o  $\Delta t$  obtido durante o ciclo de injeção para o polipropileno figura 50, foi inferior ao do avaliado no gráfico do poliestireno, figura 49.

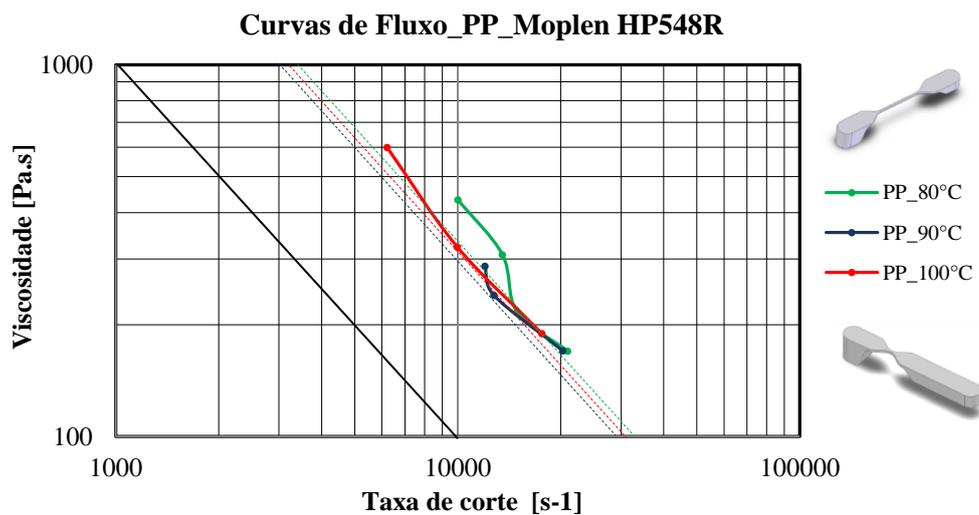


### 6.3.3 Curvas de fluxo microcanal 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$

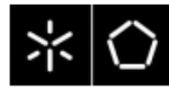
Nas figuras 51 e 52 estão representadas as curvas de fluxo obtidas para os dois materiais de morfologia diferente avaliados reologicamente, como já referido anteriormente, um amorfo poliestireno e outro semicristalino polipropileno. As curvas de fluxo referem-se ao estudo efetuado para o microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , e neste caso, o fluxo foi sujeito a três temperaturas diferentes do molde, 80°C, 90°C e 100°C.



**Figura 51.** Curvas de Fluxo do PP\_Moplen HP548R para diferentes  $T_{\text{Molde}}$  no microcanal de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ .



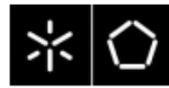
**Figura 52.** Curvas de Fluxo do PP\_Moplen HP548R para diferentes  $T_{\text{Molde}}$  no microcanal de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ .



As figuras 51 e 52 demonstram a sobreposição das três curvas de fluxo obtidas para o PS\_Edistir N1910, e para PP\_Moplen HP548R para diferentes temperaturas do molde, 80°C curva a verde, 90°C curva a azul e para 100°C curva a vermelho. Para a obtenção das curvas de fluxo apresentadas utilizaram-se um conjunto variado de pontos reproduzidos pelos diferentes valores de velocidade usados em cada ciclo de injeção. Efetuou-se uma análise detalhada de cada curva, traçando uma reta auxiliar em cada uma das figuras 51 e 52. Esta reta é traçada a 45 ° tendo em conta uma década na escala logarítmica em cada um dos eixos, exemplo, no eixo y de 100 a 1000 e no eixo do x de 1000 a 10000. O pressuposto desta reta, e das retas a tracejado reside no fácil auxílio para a interpretação das curvas obtidas pois se algumas das curvas de fluxo apresentarem inclinação superior a 45°, conclui-se então que a curva apresenta escorregamento.

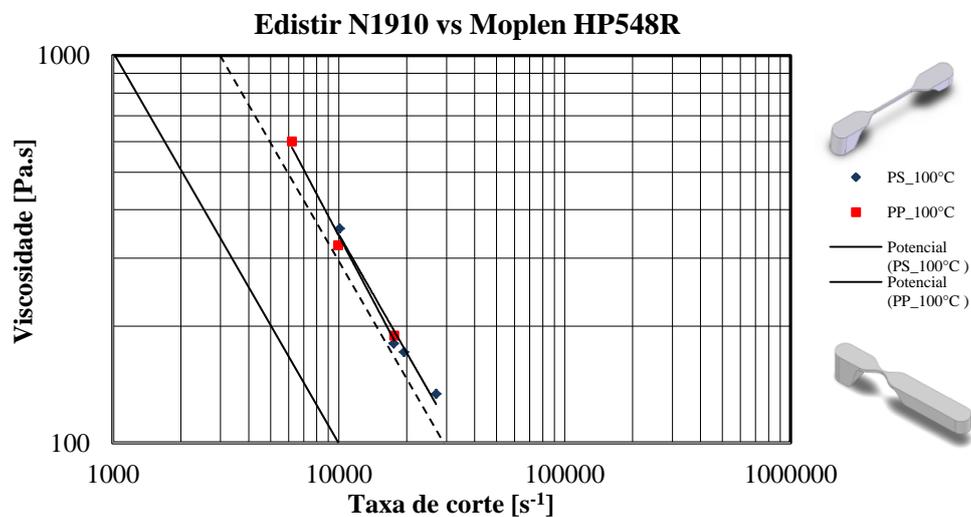
Na figura 51, demonstra-se as curvas de fluxo obtidas para PS\_Edistir N1910, para uma  $T_{\text{Molde}}$  de 80°C, 90°C e 100°C. As curvas a verde e vermelho respetivamente com  $T_{\text{Molde}}$  de 80°C e 100°C, demonstram que desde o primeiro ponto até ao segundo verifica-se uma possível e acentuada inclinação da curva, característica do escorregamento. No entanto em ambas as curvas do segundo para o terceiro ponto verifica-se um ligeiro degrau, e posteriormente do terceiro para o quarto ponto verifica-se que a curva não apresenta escorregamento este comportamento pode ser devido a algumas flutuações que possam ter acontecido durante o processo de microinjeção. A curva azul com  $T_{\text{Molde}}$  de 90°C, demonstra que está no limiar do escorregamento no entanto nunca chega a atingir uma inclinação na curva capaz de reproduzir o escorregamento completamente desenvolvido.

Na figura 52, demonstra-se as curvas de fluxo obtidas para PP\_Moplen HP548R, para uma  $T_{\text{Molde}}$  de 80°C, 90°C e 100°C. A curva a verde,  $T_{\text{Molde}}$  de 80°C, apresenta do primeiro para o segundo ponto uma inclinação próximo do regime de escorregamento, do segundo para o terceiro ponto apresenta um degrau muito acentuado logo depois do terceiro para o quarto nota-se que a curva não ultrapassa a inclinação desejada. Na curva azul,  $T_{\text{Molde}}$  de 90°C, verifica-se que do primeiro para o segundo ponto existe um ligeiro aumento da inclinação mas logo a seguir do segundo para o terceiro ponto volta a diminuir essa inclinação. A curva a vermelho  $T_{\text{Molde}}$  de 100°C, observa-se que esta tem um comportamento mais linear em comparação com as outras, curva verde e azul, mas no entanto a inclinação que apresenta pode estar no limite para atingir escorregamento mas nunca reproduz completamente esse efeito.

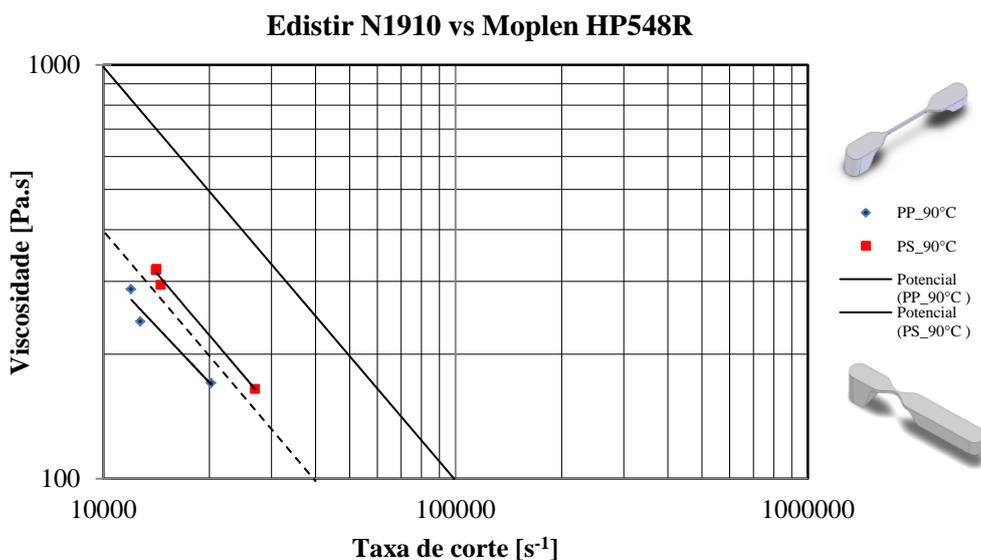


Logo, não foi possível observar o escorregamento ao longo do microcanal com secção 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , para tal suceder seria necessário aumentar a temperatura do molde visto que os valores de velocidade utilizados não foram eficazes, porque não se conseguiu demonstrar a passagem do fluxo para um regime de escorregamento do material.

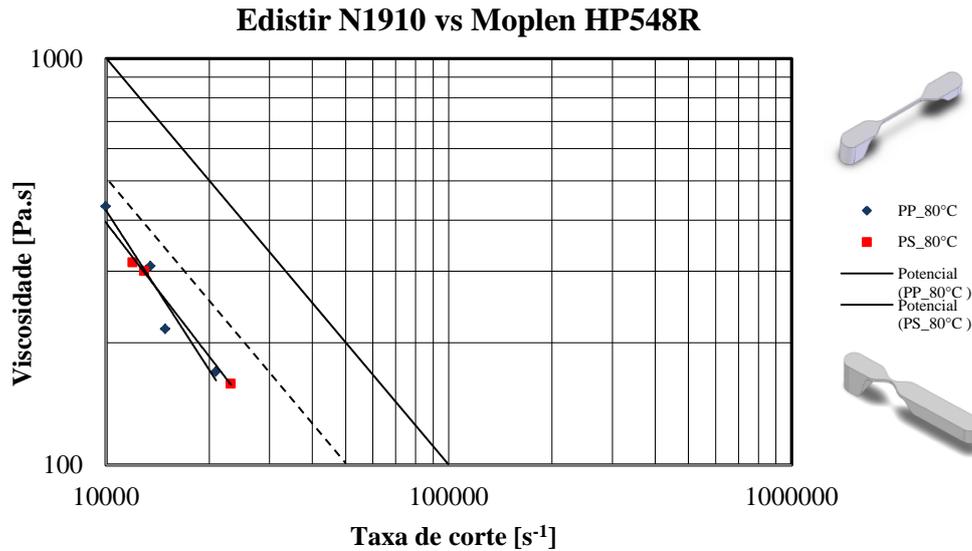
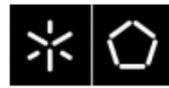
Os gráficos ilustrados nas figuras 53 54 e 55, reproduzem de igual forma as curvas de fluxo ilustradas nos anteriores gráficos figuras 51 e 52, no entanto para uma melhor visualização realizou-se uma comparação entre o PS\_Edistir N1910 e PP\_Moplen HP548R para cada uma das três temperaturas do molde impostas em cada figura.



**Figura 53.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{\text{Molde}} = 100^{\circ}\text{C}$ , para a secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 54.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{\text{Molde}} = 90^{\circ}\text{C}$ , para a secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 55.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{\text{Molde}} = 80^{\circ}\text{C}$ , para a secção de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ .

Realizando-se novamente uma análise com o mesmo princípio, já mencionado anteriormente, traçou-se uma reta a  $45^{\circ}$ . No entanto aqui as curvas foram reproduzidas apenas através de pontos, e como tem-se presente a escala logarítmica utilizou-se a regressão potencial, que permite uma transformação para um modelo linear.

Na Figura 53 com o gráfico correspondente á temperatura de molde de  $100^{\circ}\text{C}$ , verifica-se que ambos os materiais aproximam-se muito da inclinação da linha a tracejado no entanto sem nunca alcançarem o regime de escorregamento. No gráfico com a temperatura do molde a  $90^{\circ}\text{C}$ , figura 54, demonstra-se que as curvas de fluxo de cada material não são reprodutivas, pois de todas as curvas de fluxo efetuadas, são as que apresentaram piores resultados. Isto porque para o PS\_Edistir N1910, obteve-se dois pontos muito próximos um do outro, pois o ideal seria o primeiro ponto estar mais distanciado, para ser possível reproduzir melhor o fluxo. Para a curva do PP\_Moplen HP548R, é possível observar que a geometria da curva não se aproxima da inclinação da reta a tracejado, verificando-se sim um paralelismo em relação á reta a tracejado. Mais uma vez não é possível demonstrar-se o escorregamento dos materiais. Por último e com a temperatura do molde a  $80^{\circ}\text{C}$ , figura 55, é possível observar que o PS\_Edistir N1910 continua a não demonstrar o escorregamento do material, enquanto para o PP\_Moplen HP548R, apresenta a curva que mais se aproxima de um regime de escorregamento devido á inclinação da reta. De um modo geral foi possível observar que alguns pontos das curvas não foram reprodutivos, muito provavelmente devido a pequenas flutuações pontoais presentes no processo de microinjeção.



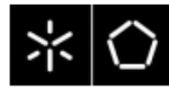
## 6.4 Microcanal 100 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$

### 6.4.1 Parâmetros de processamento.

Na Tabela 7, demonstra-se os valores de processamento utilizados para a secção de 400  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ , onde é possível observar as principais diferenças, quando comparado com a secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , para os valores de temperatura do molde, perfil de temperaturas a dosagem utilizada, velocidades de injeção impostas e velocidade de plasticização, todos estes parâmetros foram necessários para garantir o enchimento dos microcanais L=5 e L=0 para o processamento de ambos os materiais.

Parâmetros		Intervalo
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Zona 1	200
	Zona 2	205
	Zona 3	210
	Zona 4	215
	Zona 5	220
Temperatura do Molde ( $^{\circ}\text{C}$ )		155
Temperatura do Fluido – Arrefecimento ( $^{\circ}\text{C}$ )		-
Dosagem (mm)		14
Comutação (mm)		Fuso 3
Pressão de Injeção (bar)		130
Tempo de Injeção (s)		-
Velocidade de Injeção (mm/s)		80/100/120/140/160/
Segunda Pressão (bar)		180/200/220/240
Tempo de Seg. Pressão (bar)		-
Velocidade de Plasticização (mm/s)		160
Contra Pressão (bar)		5
Tempo de Arrefecimento (s)		20
Tempo de Ciclo (s)		-

**Tabela 7-** Parâmetros de processamento para a secção 400  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$  para L=5 e L=0.



### 6.4.2 Curvas de Pressão do microcanal 100 μm x 400 μm

Da mesma forma que anteriormente fez-se referência aos gráficos de pressão vs tempo obtidos para o microcanal de 200 μm x 200 μm, volta-se a realizar o mesmo para o microcanal de 100 μm x 400 μm. Posto isto e após selecionar-se um valor de velocidade de injeção imposta, por exemplo, 140 mm/s, como um dos resultados obtidos do sistema de aquisição de dados. Demonstra-se através das figuras 56 e 57, os gráficos obtidos que descrevem o toque da frente do polímero fundido em cada um dos sensores, colocados á entrada e saída do microcanal, para uma  $T_{\text{Molde}} = 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ .

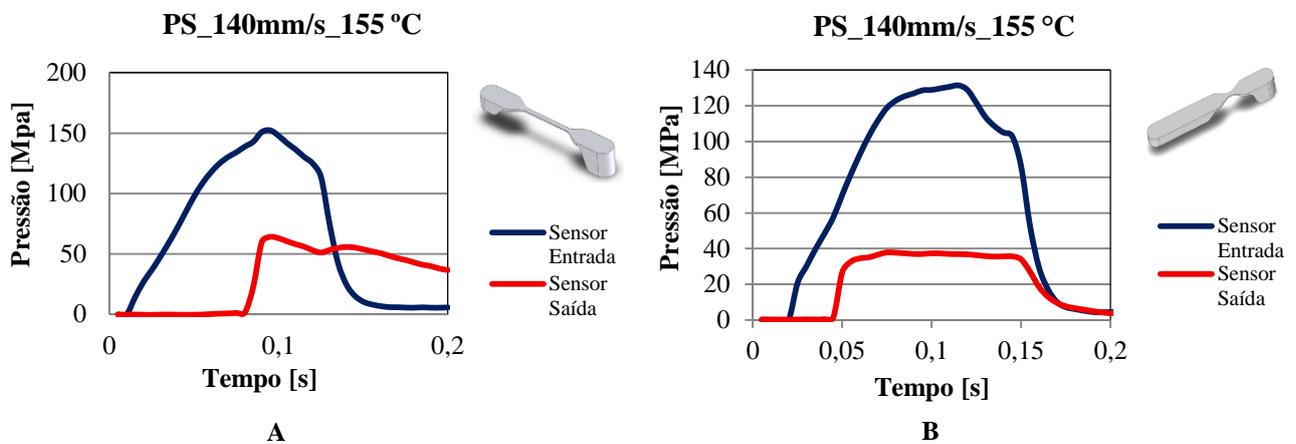


Figura 56. Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 155°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0

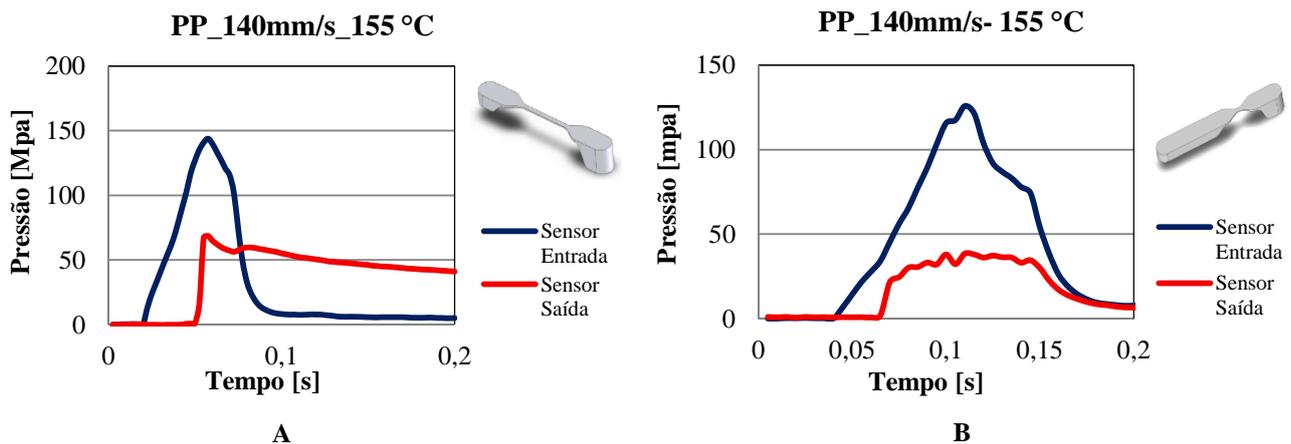
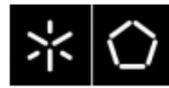
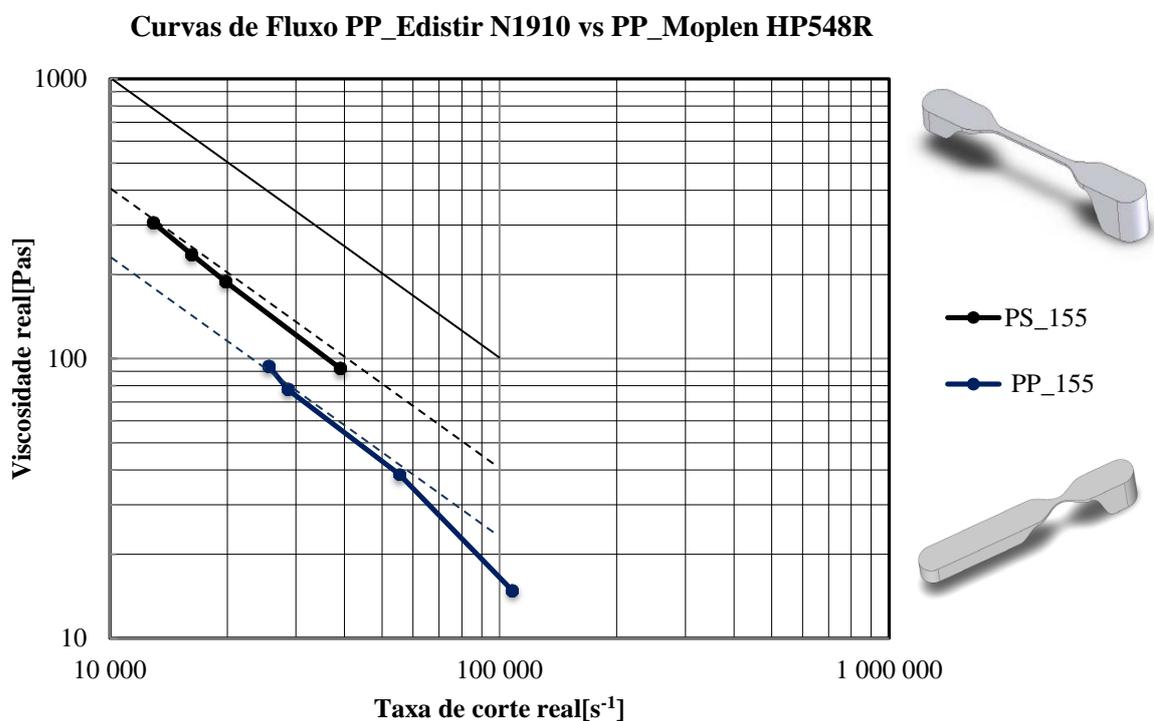


Figura 57. Gráficos para o PS\_Edistir N1910 com temperatura do molde 155°C e velocidade de injeção de 200 mm/s; A- microcanal L=5, B- microcanal L=0



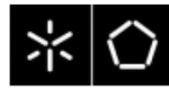
Os gráficos de pressão vs tempo ilustrados nas figuras 56 e 57, demonstram valores diferentes para a mesma velocidade de injeção. O caso do PS\_Edistir N1910 apresenta valores de pressão superiores quer no microcanal L=5 quer no L=0 em relação ao PP\_MoplenHP548R, apresenta valores inferiores de pressão. No que diz respeito ao  $\Delta t$ , verifica-se o mesmo, pois o toque entre  $t_1$  e  $t_2$  para microcanal L=5, é superior para o caso do PS\_Edistir N1910, já para o  $\Delta t$  no microcanal L=0 o valor entre  $t_1$  e  $t_2$  é similar.

### 6.4.3 Curvas de Fluxo microcanal 100 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$



**Figura 58.** Comparação dos dois materiais com a  $T_{\text{Molde}}$  a  $155^\circ\text{C}$  para a secção de  $100 \mu\text{m}$  x  $400 \mu\text{m}$ .

Na figura 58 estão ilustradas as duas curvas de fluxo obtidas para o PP\_Molplen HP548R e PS\_Edistir N1910, ambos os materiais foram sujeitos a uma temperatura de fundido de  $220^\circ\text{C}$  e uma temperatura do molde de  $155^\circ\text{C}$ . Para o microcanal de  $100 \mu\text{m}$  x  $400 \mu\text{m}$  utilizou-se uma temperatura do molde mais elevada porque só assim foi possível encher na totalidade o microcanal. Apesar de ambos os microcanais terem a mesma área de secção transversal  $400 \mu\text{m}^2$ , o microcanal de  $100 \mu\text{m}$  x  $400 \mu\text{m}$  apresenta uma espessura inferior, metade comparada com o microcanal de  $200 \mu\text{m}$  x  $200 \mu\text{m}$ .



Isto reflete-se na frente do fluxo, pois vai arrefecer muito mais rapidamente que a do microcanal com 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ . Por este motivo é que para o enchimento do microcanal de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , não foi necessário utilizar-se temperaturas no molde muito elevadas, enquanto para o caso do microcanal de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  foi necessário aumentar a temperatura consideravelmente.

Realizando-se uma análise de ambas as curvas de fluxo obtidas para o microcanal de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , verifica-se que ambas as curvas possuem uma inclinação superior á da reta a tracejado, Figura 58, verificando-se assim, que ambos os materiais apresentaram escorregamento ao longo do microcanal. No entanto não se consegue visualizar uma zona de transição, para a qual as materiais passam de um regime de fluxo em fonte para o regime do escorregamento.

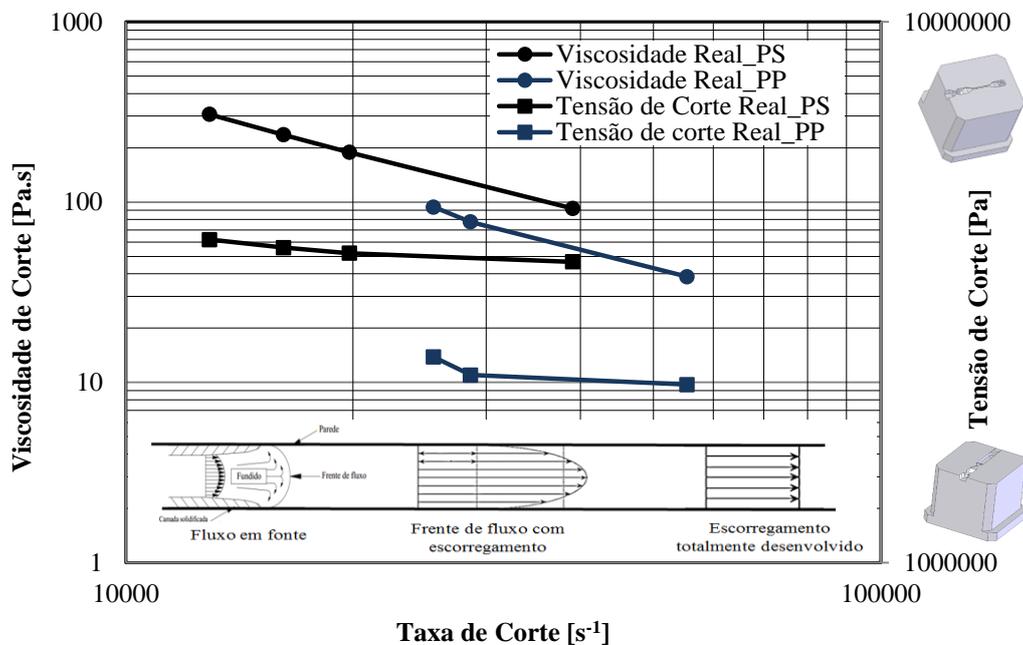
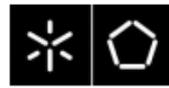


Figura 59. Curvas de fluxo e tensão corte vs taxa de corte obtidas para o microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ .

A figura 59 ilustra, ilustra a sobreposição das curvas de viscosidade vs taxa de corte vs tensão de corte para ambos os materiais estudados, durante a caracterização do fluxo para microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ . Como já foi referido anteriormente na figura 58, ambos os materiais encontram-se em regime de escorregamento. Contudo não está representada a zona de transição, ou zona de inflexão da curva, aos quais os materiais apresentam um valor de taxa de corte crítica, para depois dar-se início o escorregamento.



Pode-se sim comprovar através da figura 59 que o poliestireno apresentará uma zona de transição para um valor inferior de taxa de corte  $12910 \text{ s}^{-1}$ , visto que nesta zona da curva já apresenta escorregamento.

Para o polipropileno, pode-se afirmar de igual forma que apresentará uma zona de transição para um valor inferior de taxa de corte  $25573 \text{ s}^{-1}$ , sendo que nesta zona também já se encontra numa fase de escorregamento. Ou seja não se conseguiu visualizar a diferença entre o fluxo em fonte para o desenvolvimento do efeito de escorregamento. Na figura 59 demonstra-se também as curvas obtidas para tensão de corte vs taxa de corte, dos materiais. Observa-se que ambas as curvas aproximam-se de um declive próximo do valor zero, no entanto não é possível verificar-se quais os valores de tensão de corte e taxa de corte para os quais os materiais começam a escorregar, porque para a construção destas curvas os valores utilizados já são reprodutivos do escorregamento.

## 6.5 Microcanal 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$ vs Microcanal 100 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$

Na realização desta dissertação a escolha de cada um dos microcanaís utilizados para a caracterização reológica dos materiais, teve influência na obtenção dos resultados obtidos.

### 6.5.1 Reometria Vs Microinjeção no microcanal 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$

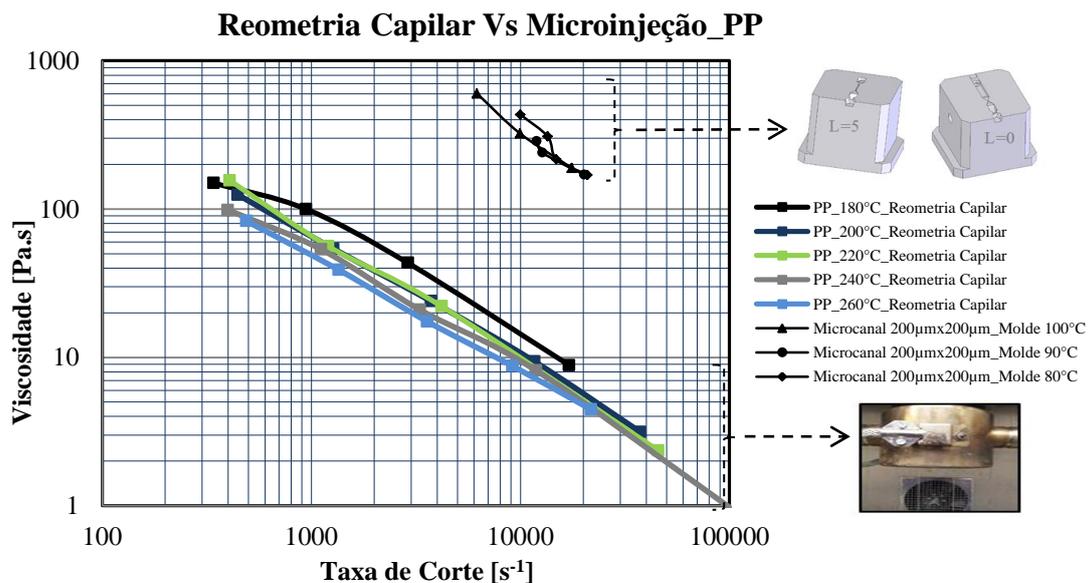
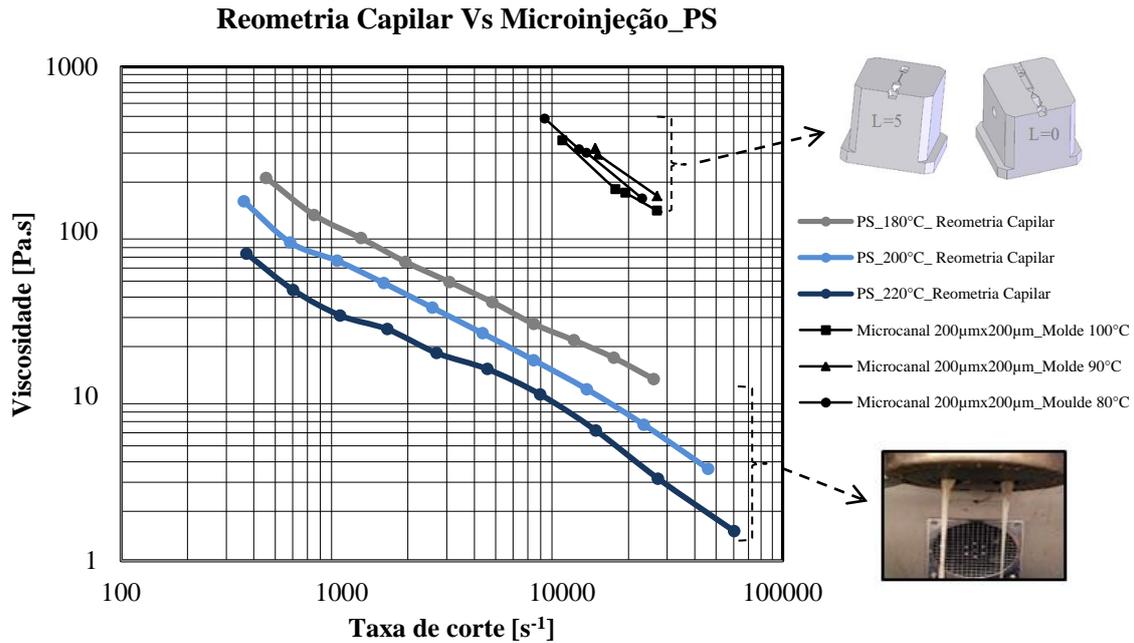
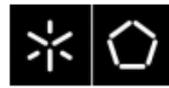
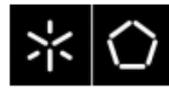


Figura 60. Resultados obtidos para o PP\_Moplen HP548R, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , injetado para uma  $T_{\text{Molde}} = 80^\circ\text{C}$ ;  $90^\circ\text{C}$ ; e  $T_{\text{Fundido}} = 240^\circ\text{C}$ .,  $T_{\text{Molde}} = 100^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^\circ\text{C}$

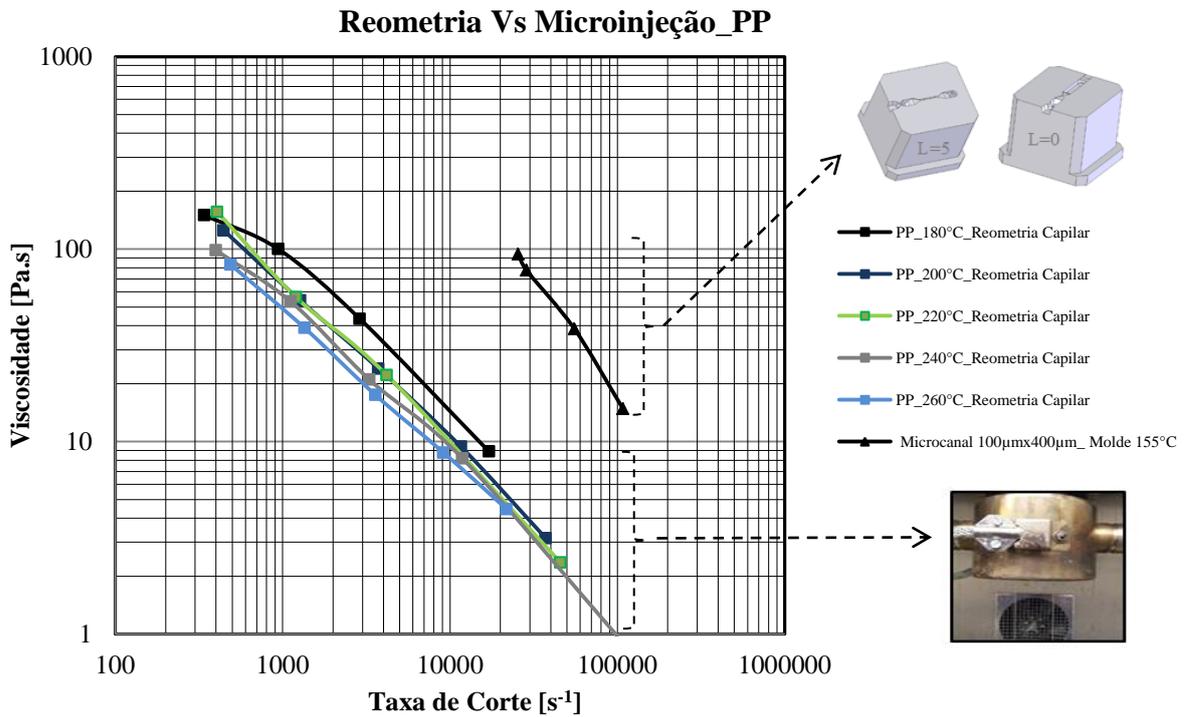


**Figura 61.** Resultados obtidos para o PS\_Edistir 1910, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 200 µm x 200 µm, injetado para uma  $T_{Molde} = 80^{\circ}C$ ;  $90^{\circ}C$ ; e  $T_{Fundido} = 240^{\circ}C$ .,  $T_{Molde} = 100^{\circ}C$  e  $T_{Fundido} = 220^{\circ}C$

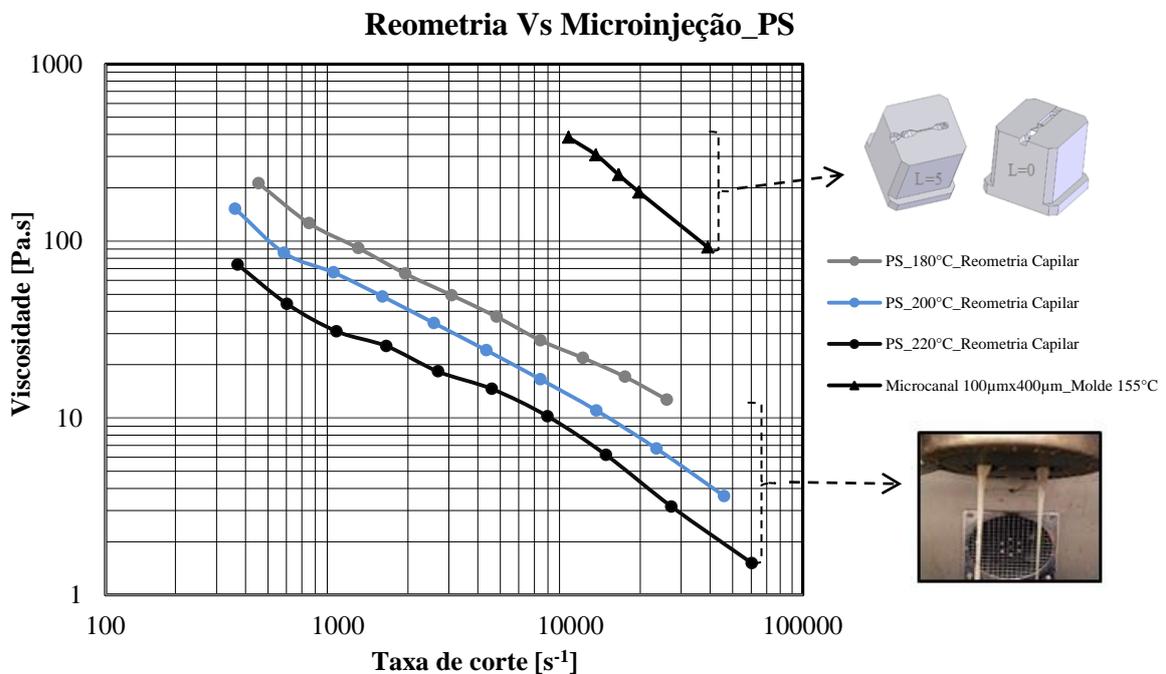
As figuras 60 e 61, apresentam a comparação dos resultados obtidos, na reometria capilar e na microinjeção dos microcanais com secção 200 µm x 200 µm, para  $L=5$  e  $L=0$ . Os resultados de reometria capilar representam as curvas de fluxo obtidas para o Edistir N1910, para  $T_{Cilindro} = 180^{\circ}C$ ;  $200^{\circ}C$ ; e  $220^{\circ}C$ , figura 61, e para o Molplen HP548R, de  $T_{Cilindro} = 180^{\circ}C$ ;  $200^{\circ}C$ ;  $220^{\circ}C$ ;  $240^{\circ}C$ ; e  $260^{\circ}C$ , figura 60. Para a microinjeção representa-se os valores da curva de fluxo para uma  $T_{Molde} = 80^{\circ}C$ ;  $90^{\circ}C$ ; e  $T_{Fundido} = 240^{\circ}C$  e  $T_{Molde} = 100^{\circ}C$  e  $T_{Fundido} = 220^{\circ}C$ . Pretende-se confrontar os resultados obtidos, no entanto pode-se verificar que as curvas de fluxo obtidas na microinjeção possuem valores de viscosidade superiores, em relação aos da reometria capilar como também o início das curvas para microinjeção possuem valores de taxa de corte superiores, devido á secção do microcanal. Observa-se também que quer as curvas de fluxo para o Moplen HP548R como para o Edistir N1910, obtiveram valores de viscosidade e taxa de corte muito similares. Realizando-se a análise a todas as curvas de fluxo verifica-se que na reometria capilar atingiram-se valores de taxa de corte superiores em relação aos valores de taxa de corte obtidos na microinjeção, pois seria necessário valores de taxa de corte superiores na microinjeção para obter-se a inflexão das curvas para reproduzirem o efeito de escorregamento, no entanto não foi possível demonstrar este efeito.



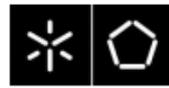
### 6.5.2 Reometria Vs Microinjeção no microcanal 100 μm x 400 μm



**Figura 62.** Resultados obtidos para o PP\_Moplen HP548R, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 100 μm x 400 μm, injetado para uma  $T_{\text{Molde}} = 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 63.** Resultados obtidos para o PS\_Edistir 1910, comparando os ensaios de reometria capilar com a microinjeção do material no microcanal com 100 μm x 400 μm, injetado para uma  $T_{\text{Molde}} = 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ .



As figuras 62 e 63, demonstram a comparação dos resultados obtidos, na reometria capilar e na microinjeção dos microcanais, mas neste caso trata-se da secção com 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , para os microcanais com  $L=5$  e  $L=0$ . Os resultados de reometria capilar representam as curvas de fluxo obtidas para o Edistir N1910, para  $T_{\text{Cilindro}} = 180^{\circ}\text{C}$ ;  $200^{\circ}\text{C}$ ; e  $220^{\circ}\text{C}$ , figura 63, e para o Moplen HP548R de  $T_{\text{Cilindro}} = 180^{\circ}\text{C}$ ;  $200^{\circ}\text{C}$ ;  $220^{\circ}\text{C}$ ;  $240^{\circ}\text{C}$ ; e  $260^{\circ}\text{C}$ , figura 62. Para a microinjeção representa-se os valores da curva de fluxo para uma  $T_{\text{Molde}} = 155^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{Fundido}} = 220^{\circ}\text{C}$ . Na microinjeção e para microcanal com 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  observa-se que a curva obtida para o Edistir N1910, figura 63 possui valores de viscosidade superiores e taxa de corte inferiores, quando comparado com os valores observados na curva de fluxo do Molplen HP548R, figura 62, que apresenta uma curva com valores de viscosidade menores e valores de taxa de corte superiores. Em ambas as figuras 62 e 63 ocorre o efeito de escorregamento dos materiais para esta secção.

Realizando-se uma análise geral á sobreposição de ambas as curvas de fluxo pode-se referir que para os resultados da reometria capilar do Edistir N1910, obteve-se curvas de fluxo que á medida que se aumentava a  $T_{\text{Cilindro}}$  do reómetro verificou-se um aumento da taxa de corte e diminuição da referida viscosidade. Já para o caso das curvas obtidas para os ensaios de reometria capilar para o Molplen HP548R, observa-se que no geral á medida que se aumentava a  $T_{\text{Cilindro}}$  também verificou-se um aumento da taxa de corte e diminuição da viscosidade, no entanto é possível observar a sobreposição de algumas curvas, e a curva de fluxo a  $260^{\circ}\text{C}$  apesar de apresentar valores de viscosidade inferiores, não obteve valores de taxa de corte superiores. O ensaio de reometria capilar demonstrou que á medida que se aumentou a  $T_{\text{Cilindro}}$  verifica-se para ambos os materiais, que começam a fluir melhor devido a um aumento da temperatura e consequente diminuição de viscosidade, sendo que estes termoplásticos apresentam caracteristicamente um comportamento pseudoplástico.

Nas curvas de fluxo obtidas para a microinjeção, e como já referido anteriormente só é possível verificar o efeito de escorregamento no microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , e verifica-se que o Molplen HP548R, apresenta uma curva com um declive mais acentuado em comparação com a curva de fluxo para o Edistir N1910.



Com estes resultados afirma-se que para a secção 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  o Molplén HP548R, demonstrou escorregar mais ao longo do microcanal do que o PS, podendo explicar o facto de o Edistir N1910, possuir a sua estrutura molecular mais complexa pois possui os dois grupos  $\text{CH}_2$  com um anel benzénico unido lateralmente que acaba por prejudicar a liberdade molecular durante o escoamento do material. Enquanto que o Molplén HP548R, não teve esse problema pois apresenta uma estrutura molecular muito mais simples composta por grupos  $\text{CH}_3$  ligados aos átomos de carbono ao longo da sua cadeia molecular.

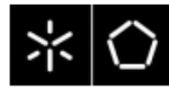
Para as curvas de fluxo obtidas no microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , os valores observados são diferentes pois, não ocorreu o efeito de escorregamento, no entanto verifica-se também nesta secção que o declive das curvas de fluxo para o Molplén HP548R, é superior em relação aos declives das curvas de fluxo para o Edistir N1910, devendo-se mais uma vez á estrutura molecular assim como a própria história reológica que os materiais possuem, verificando-se posteriormente a consequência destes fatores durante o escoamento nos microcanais.

### 6.5.3 Influência da Secção dos Microcanais

Comprimento [mm]	Largura [ $\mu\text{m}$ ]	Espessura [ $\mu\text{m}$ ]	Diâmetro hidráulico [ $\mu\text{m}$ ]	Área de secção [ $\text{mm}^2$ ]	Volume [ $\text{mm}^3$ ]	Área de superfície [ $\text{mm}^2$ ]	Razão entre área de superfície e volume
L=5	200,00	200,00	200,00	0,040	0,020	4,00	20
	400,00	100,00	160,00	0,040	0,020	5,00	25

**Tabela 8.** Características dos microcanais 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ .

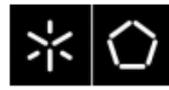
A Tabela 8, ilustra as principais características dos microcanais utilizados, analisando-se os microcanais pode-se verificar que apesar de geometricamente apresentarem secções transversais diferentes., o microcanal de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  tem uma secção quadrada e o microcanal de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  tem a secção retangular, ambos têm a mesma área de secção 0,04  $\text{mm}^2$  e conseqüente valor de volume 0,020  $\text{mm}^3$ . Nomeadamente o microcanal 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$  possui um diâmetro hidráulico, (avalia o desenvolvimento fluxo nos microcanais), superior, (cerca de 20%), em relação ao microcanal 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ .



Pois exemplo disso vamos obter uma maior taxa de arrefecimento para o microcanal de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  porque possui um diâmetro hidráulico inferior, explicando assim o facto de não ter sido possível o enchimento do microcanal para as temperaturas do molde utilizadas durante o enchimento do microcanal 200  $\mu\text{m}$  x 200. Enquanto no microcanal 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , as temperaturas utilizadas no molde de 80°C, 90°C, 100°C, foram suficientes para o enchimento do microcanal, apesar que no final as curvas de fluxo obtidas não demonstraram o escorregamento dos materiais.

Outro fator importante está na razão da área de superfície e volume para o microcanal 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , porque como o diâmetro hidráulico do fluxo é inferior ainda é sujeito ao contato com maior área de superfície, continua-se a favorecer a taxa de arrefecimento e como existe maior quantidade de área de superfície entre a interação da frente do fluxo com o as tensões de superfície características do microcanal, torna-se mais complicado encher o microcanal. Devido a estas razões foi necessário aumentar significativamente a temperatura do molde.

No entanto os resultados finais obtidos para as curvas de fluxo dos materiais demonstraram uma excelente resposta pois observou-se o efeito de escorregamento, mas não a zona de transição para a qual os materiais atingiram um valor de taxa de corte crítica, para se verificar o início do efeito de escorregamento ao longo do microcanal.



## **CONCLUSÃO**

Com a elaboração desta dissertação pretendia-se estudar como se desenvolveria o fluxo ao longo dos diferentes microcanais utilizando-se o processo de microinjeção. De seguida enuncia-se alguns pontos importantes a reter como conclusão do trabalho realizado.

Durante a monitorização da pressão durante o fluxo nos microcanais, realizada pelos sensores incorporados no interior do molde, verificou-se que existe um pequeno erro na leitura devido aos sensores possuírem dimensões físicas superiores às dos microcanais. Os sensores são piezoeléctricos e avaliam a pressão em toda a área de contacto, podendo obter-se picos de pressão que são um pouco diferentes daqueles que na realidade se obteriam se tivessem menor dimensão.

O molde utilizado como ferramenta para caracterizar reologicamente o desenvolvimento do fluxo em microcanais foi acoplado a uma unidade de microinjeção, que permitiu caracterizar o comportamento do fluxo dos dois materiais de morfologia diferente, um amorfo e outro semicristalino.

No microcanal com secção de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ , não foi possível observar o efeito de escorregamento apesar de durante a realização dos ensaios se variar a temperatura no molde. Os valores de temperatura não foram suficientes altos para que as curvas de fluxo dos materiais estudados apresentassem o efeito de escorregamento.

Para o microcanal com secção de 100  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ , foi possível observar a presença de escorregamento nos dois materiais estudados, quando se aumentou a temperatura do molde. No entanto neste microcanal não se observou uma zona de transição, ao qual o fluxo no interior do microcanal passa de um regime fluxo em fonte, para o regime de escorregamento. Comprovou-se também neste microcanal que o polipropileno apresentou mais escorregamento comparado com o poliestireno, devido á sua estrutura molecular, que permite um melhor deslizamento ao longo do microcanal, enquanto o poliestireno pelo simples facto de ser amorfo e apresentar um grupo benzénico na sua estrutura molecular, torna o escorregamento ao longo do microcanal mais complexo.





## **TRABALHO FUTURO**

Durante a realização deste trabalho verificou-se que o facto de o molde ter apenas a capacidade de registar valores de pressão para um único inserto torna o trabalho de caracterização do fluxo mais complexo. Porque para se realizar a caracterização é necessário substituir o inserto com o microcanal  $L=5$  e repetir novamente os ensaios para o microcanal  $L=0$ .

Para trabalhos futuros de caracterização reológica seria necessário e pertinente inserir mais dois sensores no interior do molde para que ao realizarem-se os ciclos de injeção com diferentes velocidades, o sistema de aquisição de dados regista-se logo os valores quer no microcanal  $L=5$  quer para o microcanal  $L=0$ .

Avaliar o fluxo com uma área de secção que possui uma razão elevada torna-se muito difícil entender e explicar, mesmo com o uso da bibliografia citada, pois dever-se-ia aprofundar conhecimentos relacionados com o processo de transferência de calor presentes nestes casos.

Desenvolver novos insertos com diferentes acabamentos superficiais, por exemplo com maior rugosidade, ou com revestimentos capazes de diminuir o coeficiente de atrito entre o material e a superfície do postigo para se verificar o efeito do acabamento superficial no desenvolvimento do fluxo ao longo do microcanal.

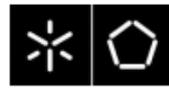
Comparar simulações de fluxo usando-se softwares comerciais com os dados obtidos experimentalmente.



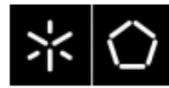


## BIBLIOGRAFIA

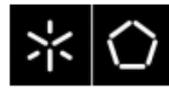
- [1] B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths & M. S. Packianather, "Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality," *Journal of Materials Processing Technology*, March, 2007, vol. 183, no. 2–3, p. 284–296.
- [2] S. Dimov, W. Menz, B. Fillon, "A roadmapping study in Multi-Material Micro Manufacture," *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Elsevier, Oxford: The Boulevard Langford Lane Kidlington, 2006. ISBN-13: 978-3-527-31493-5.
- [3] D. Löhe, J. Haubelt, "Microengineering of Metals and Ceramics," *Part I, Design Tooling and Injection Molding, Volume 3*, WILEY - VCH, Weinheim: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN- 978-3-527-31208-5.
- [4] L. Xie, L. Shen & B. Jiang, "Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process," *Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications*, Prof. Igor Minin & Oleg V. Minin, InTech 2011. ISBN: 978-953-307-169-5.
- [5] V. Piottter, T. Hanemann, R. Ruprecht, J. Haubelt "Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures," *Microsystem Technologies*, May 1997, vol. 3, no. 3, p. 129-133.
- [6] U. Attia, S. Marson & J. Alcock, "Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices," *Microfluidics and nanofluidics*, July 2009, vol. 7, no. 1, p. 1-28.
- [7] D. Zhang, L. Men & Q. Chen, "Microfabrication and applications of opto-microfluidic sensors," *Sensors (Basel, Switzerland)*, January 2011, vol. 11, no. 5, p. 5360–82.
- [8] J. Vasco, "A study on the performance of microinjection moulds obtained using additive manufacturing," Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, 2010.
- [9] R. D. E. Materiais, "Apostila de Processos 4. EMC 5744", Parte 1, *Fundamentos de reologia e Materiais poliméricos*, p. 1–68.
- [10] I. Papautsky, J. Brazzle, T. Ameal & A. B. Frazier, "Laminar fluid behavior in microchannels using micropolar fluid theory," *Sensors and Actuators A: Physical*, March 1999, vol. 73, no. 1–2, p. 101–108.
- [11] M. Hecke, W. K. Schomburg, "Review on micro molding of thermoplastic polymers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, March 2004, vol. 14, no. 3, p. R1–R14.



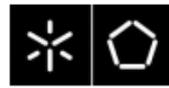
- [12] B.Sha, S.Dimov, C.A.Griffiths & S.Packianather “Micro-injection moulding: Factors affecting the achievable aspect ratios,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, May 2006, vol.33, no.1-2, p.147-156.
- [13] D.Yao, B.Kim, “Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, September 2002, vol. 12, no. 5, p. 604–610.
- [14] R.D.Chien, W.R. Jong & S.C.Chen, “Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, August 2005, vol. 15, no. 8, p. 1389–1396.
- [15] A.L.Kelly, T.Gough, B. R.Whiteside & P.D.Coates, “High shear strain rate rheometry of polymer melts,” *Journal of Applied Polymer Science*, October 2009, vol. 114, no. 2, p. 864–873.
- [16] J.Dealy, T.Broadhead, “Process rheometers for molten plastics: A survey of existing technology,” *Polymer Engineering and Science*, Decembre 1993, vol.23, no. 23, p. 1513–1523.
- [17] J.Aho, S.Syrjälä, “Shear viscosity measurements of polymer melts using injection molding machine with adjustable slit die,” *Polymer Testing*, September 2011, vol. 30, no. 6, p. 595–601.
- [18] P.Bariani, M.Salvador & G.Lucchetta, “Development of a test method for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions,” *Journal of Materials Processing Technology*, August 2007, vol. 191, no. 1–3, p. 119–122.
- [19] G.Gou, P.Xie, W.Yang & Y.Ding, “Online measurement of rheological properties of polypropylene based on an injection molding machine to simulate the injection-molding process,” *Polymer Testing*, December 2011, vol. 30, no. 8, p. 826–832.
- [20] A.Pabedinkas, W.R.Cluet & S.T.Balke, “Development of an in-line rheometer suitable for reactive extrusion processes,” *Polymer Engineering and Science*, March 1991, vol.31, p. 365–375.
- [21] A.C.Eringen, K.Okada, “A Lubrication Theory for Fluids with Microstructure,” *International Journal of Engineering Science*, December 1995, vol. 33, no. 15, pp. 2297–2308.
- [22] K.M.Awati, Y.Park, E.Weisser & M.E.Mackay, “Wall slip and shear stresses of polymer melts at high shear rates without pressure and viscous heating effects,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, February 2000, volume 89, no. 1-2, p. 117-131.



- [23] K.Lee, M.R.Mackey, "The significance of slip in matching polyethylene processing data with numerical simulation," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, November 2000, vol. 94,no. 2-3, p. 159-177.
- [24] S.G.Hatzikiriakos, J.M.Dealy, "Wall slip of molten high density polyethylenes. II. *Capillary rheometer studies*," *Journal of Rheology*, May 1992,vol. 36, no. 4, p. 703-741.
- [25] E.Mitsoulis, I.B. Kazatchkov & S.G.Hatzikiriakos, "The effect of slip in the flow of a branched PP melt: experiments and simulations," April 2005, vol.44, no. 4, p. 418-426.
- [26] R.I.Tanner, " *Engineering Rheology*," Hardback, 2nd revised edition, Oxford University Press, 2000, ISBN: 9780198564737.
- [27] N. Zhang, M.D.Gilchrist, "Characterization of thermo-rheological behavior of polymer melts during the micro injection moulding process," *Polymer Testing*, September 2012, vol. 31, no. 6, p. 748–758.
- [28] J. C. Vasco, J.M.Maia, & A.S.Pouzada, "Thermo-rheological behaviour of polymer melts in microinjection moulding," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, October 2009, vol. 19, no. 10, p. 105012.
- [29] D.Yao , B.Kim, "Scaling issues in miniaturization of injection molded parts," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, May 2004, vol. 126, no. 4, p. 733–739.
- [30] J.Zhao, R.Mayes, G.Chen, "Effects of process parameters on the micro molding process," *Polymer Engineering & Science*, September 2003, vol. 43, no. 9, p. 1542–1554.
- [31] K.Monkkonen, T.Pakkanen, J.Hietala, E.Paakkonen P.Paakkonen, T.Jaaskelainen & T.Kaikuranta "Replication of sub-micron features using amorphous thermoplastics," *Polymer Engineering & Science*, July 2004, vol. 42, no.7, p. 1600-1608.
- [32] Y.K.Shen, S.L.Yeh, & S.H.Chen "Three-Dimensional Non-Newtonian Computations of Micro-Injection Molding With The Finite Element Method," July 2002, vol. 29, no. 5, p. 643– 652.
- [33] N.Zhang, M.D.Gilchrist, "Characterization of thermo-rheological behavior of polymer melts during the micro injection moulding process," *Polymer Testing*, September 2012, vol. 31, no. 6, p. 748–75.
- [34] C.Chun-Sheng, C.Shia-Chung, L.Wei-Lianq & C. Rean-Der, "Rheological behavior of POM polymer melt flowing through micro-channels," *European Polymer*, June 2008, vol. 44, no. 6, p. 1891-1898.



- [35] J.Vasco, J.M.Maia & A.S.Pouzada, “Microinjection moulding wall-slip evaluation of POM flow in microchannels,” *PPS 26th Annual Meeting of the Polymer Processing Society*, Banff, Canada, Jul. 2010.
- [36] P.J.Carreau, D.R.Kee & R.P.Chhabra, “Rheology of polymeric systems - Principles and applications,” *AICHE Journal*, August 1999, vol. 45, no.8, p. 1836-18.
- [37] E.Rosenbaum, S.Hatazziriakos, “Wall slip in the capillary flow of molten polymers subject to viscous heating,” *AICHE Journal*, March 1997, vol. 43, p. 598–608.
- [38] C.Mnekbi, M.Vincent & F.Agassant, “Polymer Rheology at High Shear Rate for Microinjection Moulding,” *International Journal of Material Forming*, April 2010, vol 3, no.1, p. 539-542.
- [39] M.H. Wagner, V.Schulze, & A.Gottfert “Rheotens - Mastercurves and drawability of polymer melts. Polymer,” *Polymer Engineering and Science*, April 1996, vol. 36, no. 7, p. 925–935.



# ANEXOS

## ANEXO 1

### Ficha técnica polipropileno

#### **Moplen HP548R**

##### **Polypropylene, Homopolymer**

##### **Product Description**

Moplen HP548R is a nucleated homopolymer with antistatic addition used for injection moulding applications. Moplen HP548R exhibits a good stiffness combined with a good flowability. The main applications of Moplen HP548R are caps, closures, furniture and housewares.

Moplen HP548R is suitable for food contact.

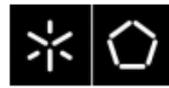
##### **Product Characteristics**

<b>Status</b>	Commercial: Active
<b>Test Method used</b>	ISO
<b>Availability</b>	Europe, Africa-Middle East
<b>Processing Method</b>	Injection Moulding
<b>Features</b>	Antistatic, Good Flow, Nucleated, Good Stiffness
<b>Typical Customer Applications</b>	Furniture, Caps & Closures, Housewares, Opaque Containers

<b>Typical Properties</b>	<b>Method</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
<b>Physical</b>			
Density	ISO 1183	0.9	g/cm <sup>3</sup>
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	23	g/10 min
Melt volume flow rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	31	cm <sup>3</sup> /10min
<b>Mechanical</b>			
Tensile Modulus	ISO 527-1, -2	1650	MPa
Tensile Stress at Yield	ISO 527-1, -2	35	MPa
Tensile Strain at Break	ISO 527-1, -2	>50	%
Tensile Strain at Yield	ISO 527-1, -2	8	%
<b>Impact</b>			
Charpy unnotched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise)	ISO 179	110	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy notched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	ISO 179	2.5	kJ/m <sup>2</sup>
<b>Hardness</b>			
Ball indentation hardness (H 358/30)	ISO 2039-1	78	MPa
<b>Thermal</b>			
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	95	°C
Vicat softening temperature	ISO 306		
(A50 (50°C/h 10N))		154	°C
(B50 (50°C/h 50N))		94	°C

##### **Notes**

Typical properties; not to be construed as specifications.



## ANEXO 2

Ficha técnica poliestireno



**Edistir<sup>®</sup>**  
Polystyrene

**N 1910**

### TECHNICAL DATA SHEET

---

#### *Product description*

---

Very easy flow general purpose polystyrene.

Used for injection of thin-wall, multi-cavity, very fast-cycle mouldings and for sheet extrusion in glossy capping of HIPS and in blend with HIPS or clear SBS.

Designation: Thermoplastics ISO 1622-PS,G,085-20

---

#### *Applications*

---

Typical uses include cups, packaging containers for foods and cosmetics, toys, medical articles.

Thanks to its high flow it is particularly suitable as carrier for master batches.

---

#### *Typical processing data*

---

Injection moulding: • predrying normally not required  
• melt temperature 200-250°C  
• mould temperature 10-50°C

Extrusion: • melt temperature 210-240°C

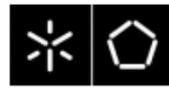
---

#### *General information*

---

N 1910 is certified UL94 HB "all colors" at 1.5 mm (UL file E83071).

This grade in its natural version complies by composition with the requirements set by the main Regulations for plastic materials intended for food contact (including the EEC Directive 90/128 and subsequent amendments).



**Edistir®**  
Polystyrene

**N 1910**

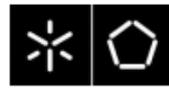
Properties	Test conditions	Test methods	Units	Values
<b>General</b>				
Density		ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	<b>1.05</b>
Bulk density		ISO 60	g/cm <sup>3</sup>	<b>0.65</b>
Water absorption	24 h - 23°C	ISO 62	%	<b>&lt;0.1</b>
<b>Rheological</b>				
Melt flow rate	200°C - 5 kg	ISO 1133	g/10 min	<b>27</b>
<b>Mechanical</b>				
Tensile stress at yield	5 mm/min	ISO 527	MPa	<b>-</b>
Tensile stress at break	5 mm/min	ISO 527	MPa	<b>37</b>
Tensile strain at break	5 mm/min	ISO 527	%	<b>1.3</b>
Tensile modulus	1 mm/min	ISO 527	MPa	<b>3200</b>
Flexural strength	2 mm/min	ISO 178	MPa	<b>67</b>
Izod impact strength, notched	+23°C - thickness 3.2 mm	ISO 180/4A	J/m	<b>-</b>
	+23°C - thickness 4 mm	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	<b>1.7</b>
	-30°C - thickness 4 mm	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	<b>1.5</b>
Rockwell hardness	L/M scale	ISO 2039/2	-	<b>M80</b>
<b>Thermal</b>				
Vicat softening temperature	10 N - 50°C/h	ISO 306/A	°C	<b>89</b>
	50 N - 50°C/h	ISO 306/B	°C	<b>83</b>
Deflection temperature under load (annealed)	1.8 MPa - 120°C/h	ASTM D 648	°C	<b>82</b>
Coefficient of linear thermal expansion		ASTM D 696	10 <sup>-5</sup> /°C	<b>7</b>
Thermal conductivity		ISO 8302	W/(K·m)	<b>0.17</b>
Moulding shrinkage		internal method	%	<b>0.3 - 0.6</b>
<b>Flammability</b>				
Flame behaviour	thickness 1.5 mm	UL 94	class	<b>HB</b>
Glow wire test (GWT)	thickness 1.6 mm	IEC 60695-2-1	°C	<b>650</b>
<b>Electrical</b>				
Surface resistivity		IEC 60093	ohm	<b>&gt;1.5·10E+15</b>
Volume resistivity		IEC 60093	ohm·cm	<b>&gt;7·10E+15</b>
Comparative tracking index (CTI)	solution A	IEC 60112	-	<b>375</b>
Dielectric strength		IEC 60243	kV/mm	<b>70</b>
Dielectric constant (relative permittivity)	50 Hz	IEC 60250	-	<b>2.5</b>
Dissipation factor	50 Hz	IEC 60250	-	<b>2·10E-4</b>

Issue 01/02

All indicated data refer to natural grades.  
The data, information and suggestions are provided for guidance purposes only.  
The Company accepts no responsibility for the results obtained therefrom, as neither for their utilization in infringement of possible patent rights.  
However the Company will provide the guaranteed values for each product on demand.

**Polimeri Europa S.p.A.**  
**Divisione Elastomeri e Stirenici**  
Piazza Boldrini, 1  
I-20097 San Donato Milanese - Milano  
e-mail: stir.pst@polimerieuropa.com  
www.polimerieuropa.com





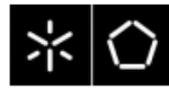
## ANEXO 3

### Microinjetora

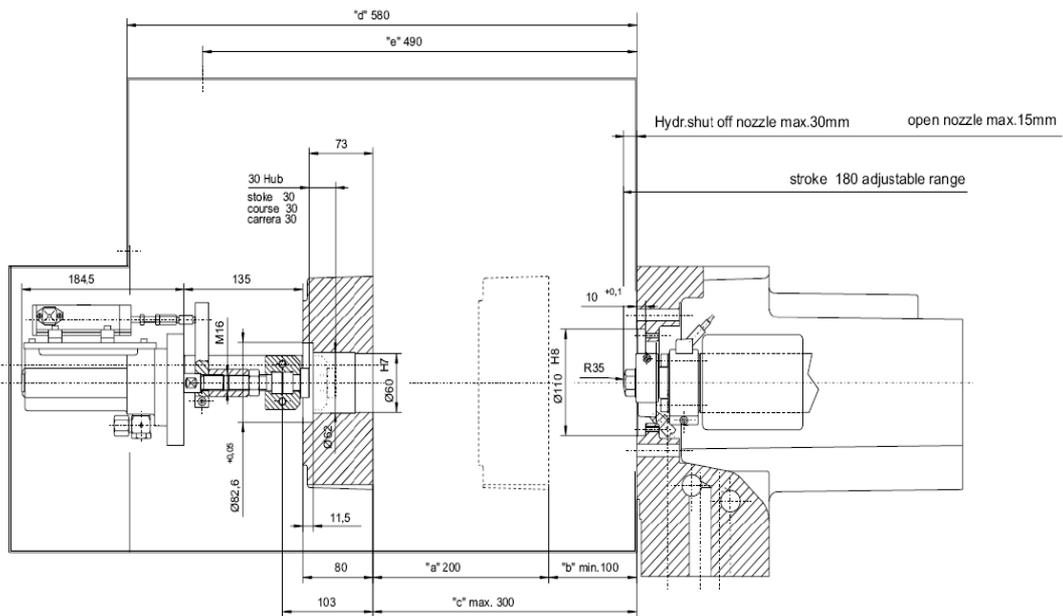
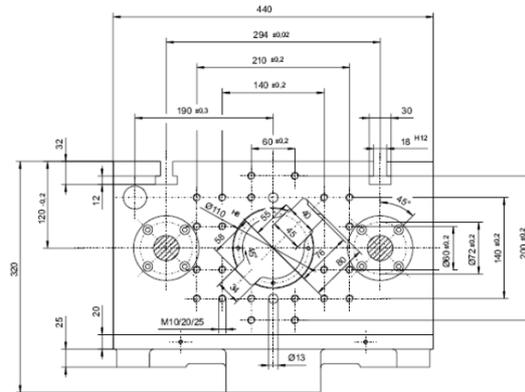
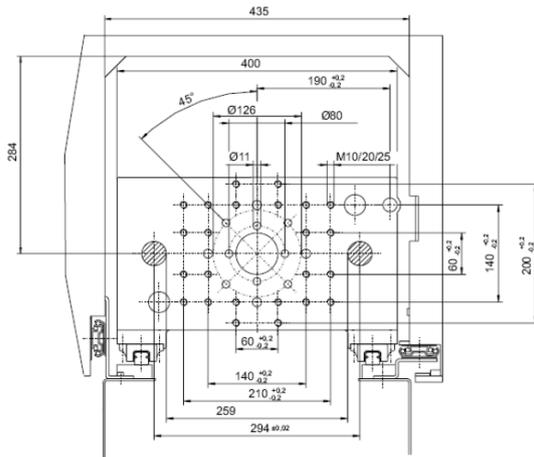
#### BOY 12



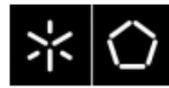
Euromap Size		129-11	129-15	129-18
<b>Injection unit for processing thermoplastics</b>				
Screw diameter	mm	12	14	18
Screw- L/D-ratio		18	18	20
Max. stroke volume (theoretical)	cm <sup>3</sup>	4,5	6,1	10,1
Max. shot weight in PS	g	4,45	5,6	9,6
Injection force	kN	27,7	37,1	45,7
Injection flow	g/s	18,5	30,6	45,1
Max. spec. injection pressure	bar	2450	2413	1795
Max. screw stroke	mm	40	40	40
Nozzle force / contact pressure	kN	36 (120 bar)	36 (120 bar)	36 (120 bar)
Nozzle retraction stroke	mm	180	180	180
Screw torque	Nm	50 (40 bar)	75 (68 bar)	130 (120 bar)
Screw speed (infinitely variable)	U / min. standard alternatively	max. 500	max. 500	max. 500
Screw pullback force	kN	34,3	34,3	34,3
Heating power (Nozzle + Cylinder)	W	235+465+2x450+850	235+465+2x450+850	235+465+650+700+1200
Hopper capacity	litre	7,5	7,5	7,5
<b>Clamping unit</b>				
Clamping force	kN	129	129	129
Tie bar clearance	mm (h x v)	259	259	259
Max. platen daylight	mm	300	300	300
Max. opening stroke (adjustable)	mm	200	200	200
Min. mould height	mm	100	100	100
Mould opening force	kN	23	23	23
Mould closing force	kN	15	15	15
Ejector stroke (max.)	mm	80	80	80
Ejector force pushing / pulling	kN	13,5 / 9	13,5 / 9	13,5 / 9
<b>General</b>				
Installed driving power	kW	5,5	5,5	5,5
Installed total power	kW	7,95 / 400 V	7,95 / 400 V	8,70 / 400 V
Hydraulic system pressure	bar	160	160	160
Oil tank capacity	litre	115	115	115
<b>Dimensions and weights</b>				
Dimensions (LxWxH) / Footprint	mm / m <sup>2</sup>	2280 x 810 x 1648 / 1,85		
Total weight net (without oil)	kg	760		



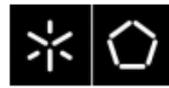
Microinjetora desenhos 2D







Item Nr.	Designation	Qty.	Manufacturer / Part Number
0	Security/transport strap	1	156x20x15
1	Clamping plate injection	1	HASCO K10 100x130x22
2	Cavity plate	1	HASCO K20 100x130x36
3	Core plate	1	HASCO K20 100x130x22
4	Core backing plate	1	HASCO K30 100x130 17
5	Spacer	2	HASCO K40 100x130 36
7	Ejector's plate	1	HASCO K60 100x130x06
8	Ejector's clamping plate	1	HASCO K70 100x130x09
9	Clamping plate ejection	1	HASCO K10 100x130x22
12	Support pillar	2	HASCO Z022/10x36
16A	Locating guide pillar	3	HASCO Z00/36/10x25
16B	Locating guide pillar	1	HASCO Z00/36/09x25
23	Ejection guide pillar	4	HASCO Z03/17/10x30
25A	Guide bushing	3	HASCO Z10/17/10
25B	Guide bushing	1	HASCO Z10/17/09
28	Centering sleeve	4	HASCO Z20/14x60
29	Ejection guide bushing	4	HASCO Z10/12/09
30	Return pin	2	HASCO Z40/5,5x65
30A	Seating washer	2	HASCO Z55/18x3
32A	Centering ring injection	1	HASCO K100/110x12 typeC
32B	Centering ring ejection	1	HASCO K100/060x08 typeA
33	Main injector	1	HASCO Z51/18x36/3,5/40
48	Interlock cavity	2	HASCO Z05/14 female
49	Interlock core	2	HASCO Z05/14 male
201	Core insert microchannel 400x100µm	1	24x22x20,5
202	Core insert microchannel 200x200µm	1	24x22x20,5
220	Core insert spacer	2	24x22x1,5
300	Main ejector	1	HASCO Z40/5,5x058
301	Ejector 1	2	HASCO Z40/1,5x061
302	Ejector 2	2	HASCO Z40/1,5x062
309	Spacer main ejector	1	Ø18x3
340	Piezoelectric pressure sensor	2	PRIAMUS 6006B
341	Sensor mounting plate	1	PRIAMUS 6581A
342	Sensor mounting nut	2	PRIAMUS 6544A
350	Signal housing 4 contacts	2	HASCO Z1087/4
351	Thermocouple cavity	1	RESITEC TC.001 Ø3x20
352	Thermocouple core	1	RESITEC TC.002 Ø1,5x50
353	Cartridge Heater	4	RESITEC Ø6,5x100
P0	Socket head cap screw	2	HASCO Z31 M8x30
P1	Socket head cap screw	4	HASCO Z31 M6x22
P3	Socket head cap screw	4	HASCO Z31 M6x22
P8	Countersunk head cap screw	6	HASCO Z33 M4x16
P9	Socket head cap screw	4	HASCO Z31 M6x60
P12	Socket head cap screw	2	HASCO Z31 M6x55
P30A	Countersunk head cap screw	2	HASCO Z33 M4x10
P32A	Countersunk head cap screw	3	HASCO Z33 M6x20
P32B	Countersunk head cap screw	3	HASCO Z33 M6x12
P48	Socket head cap screw	2	HASCO Z31 M4x25
P49	Socket head cap screw	2	HASCO Z31 M4x25
P341	Socket head cap screw	2	HASCO Z31 M4x12
P350	Socket head cap screw	4	HASCO Z31 M4x8



## ANEXO 5

## CHARACTERIZATION OF POLYMER BEHAVIOR IN MICROCHANNELS

M. P. Costa<sup>1,3</sup>, J.C. Vasco,<sup>1,3</sup> A.S. Pouzada<sup>1,3</sup>, A. J. Pontes<sup>1,3</sup>*1- Institute for Polymer and Composites/ISN, University of Minho, Guimarães, Portugal**2- Department of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute of Leiria, Leiria, Portugal**3- Department of Polymer Engineering, University of Minho, Guimarães, Portugal*

**Abstract** - Microinjection moulding can be used to process monitoring and rheological characterization, can help to understand the behavior of polymer melt flows during the filling of micro cavities. The system used allows a study on characterization of polymer behavior in microchannels.

This approach is appropriate since rheological phenomena such as wall slip, surface tension, melt pressure drop and polymer flow length can be studied. In this system, the data acquisition has made by incorporation of two sensors inside the mould.

**Keywords:** Micro rheology; Microinjection moulding.

**Introduction**

Currently, the ascension of microinjection is associated in many micro technologies, such as micro-optics, micro-fluidic, microelectronics and micro mechanical. A concept of a micro component part is associated with a high ratio of surface area and volume, the lateral walls of the channels and part to replicate with reduced dimensions [1], the presence of a high ratio of appearance, the weight of the part [2], as well as the detail of the microstructures with micrometric dimensions [3]. Microinjection moulding, ( $\mu\text{IM}$ ) is one of the main technologies for micro fabrication and micro replication, this technology has to be studied systematically, in order to determine the limitations of the process. Some of these limitations is understand what happens to the micro flow of a molten polymer in microchannel.

In the presence of microchannels it was associated one raised reason of surface and volume, that in microchannel it can be generate a fast cooling. It appears the importance of the range window of mould temperature and melts temperatures of the polymers. Several studies has been disclosed that the increase of the temperature of the cylinder and the mold as well as an increase of the injection speed provides that the melt polymer has better capacity to fill the final part, [4]. Macroscopically the values obtained to indicate the models flow imposed to forward flow of the molten polymer, are not appropriate to characterize the flow at the micro scale.

Rheological characterization of polymers melts is widely used in process monitoring, quality control, process design and simulation, and troubleshooting applications[5]. Generally, instrumentation based on rotation, capillary or slit flow is used to obtain accurate measurements at a series of set strain rates and temperatures [6]. Some works has been done by using slit/capillary dies embedded into either nozzles or moulds

to test the material rheology with an injection moulding machine or extruder [7].

The concept of wall slip was first addressed by Mooney (1931), who found that certain flow curves depended on the radius of the capillary once the shear stress exceeded a critical value [8]. The effect takes place when the shear stress at the microchannel wall exceeds a critical value, typically, above 0.1 MPa [7, 6]. When wall slip occurs at a critical wall shear stress value the flow curves (wall shear stress versus apparent shear rate) diverge from each other and become dependant on channel dimensions. Usually the boundary conditions at the wall are known and their influence on the flow behavior close to the wall is relevant.[9].

Yao *et al.* [9], studied the effect of viscosity through the slip on the wall, as the surface tension during the filling and verified that the slip should only be considered for channels less than 10  $\mu\text{m}$ . On the surface tension, the authors mentioned that when it comes to the process of not only this is irrelevant, and in relation to heating by action viscous and insignificant for channels smaller than 100  $\mu\text{m}$ . Chien *et al.* [10] have proven that the viscosity over the microchannels is lower than the viscosity measured using a traditional capillary rheometer, also demonstrated that the speed of slip of polymer melts increases with the decrease of the micro channel card, as well as a reduction in the apparent viscosity to canals with lesser dimensions. Vasco *et al.* [11] demonstrated that the temperature of mold is more less than melting temperature of polymer, was observed that the heat transfer analyzed in conventional injection molding does not apply the microinjection, consequence of the presence of high ration reason between surface and volume. Many others researchers studied, Yao *et Kim* [12], Zao *et al.* [13], Shen *et al.* [14], the main conclusions of these studies had been that for high temperatures of casting and the mold the allies to one raised speed injection, observed a positive effect in the flow of polymer.



**Experimental**

*1. Rheometry on microchannels:*

The microchannels were mainly designed for rheological evaluation of polymer flow; therefore, the products of the injection tests with these moulding blocks will provide only useful information on pressure drop along the microchannel, injection pressure and melt front speed. The mould structure consists of standard mould components from HASCO series K, plate dimensions of 130 ×100 mm, as shown in figure 1. The cavity plate (2) thickness can accommodate a variety of moulding blocks. Furthermore, this plate is intended to support the data acquisition system, namely the pressure sensors, as show in figure 2.

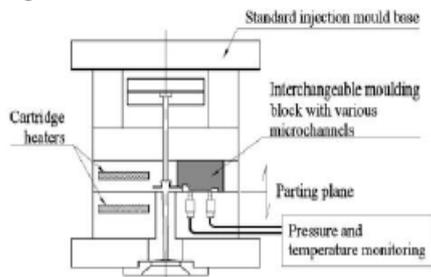


Figure 1 – Concept of a tool for rheometric studies in microchannels, [11]

*1.1. Layout in microchannel*

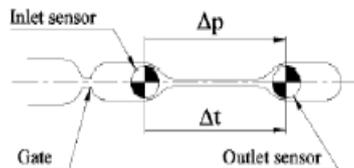


Figure 2 – Variables for the rheological assessment of the flow in microchannels.  $\Delta p$ —pressure drop;  $\Delta t$ —time interval, [11]

*1.2. Microchannel*

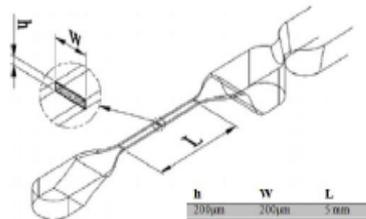


Figure 3 – Variables for the rheological assessment of the flow in microchannels.  $\Delta p$  – pressure drop;  $\Delta t$  – time interval time interval, [11]

The purpose of this microchannel, figure3, its geometry consists basically on a channel with two pressure-relieving zones on the extremities. Figures 4 shows general views of the microchannel. On the gate side, the depth of this relief is higher to enable the full establishment of the flow within the microchannel. On the microchannel itself, it is intended a full established flow that will produces a pressure drop suitable for polymer viscosity evaluation. On the exit side, there is another relief zone where pressure is intended to be as low as possible.

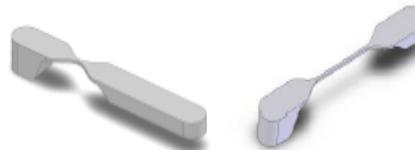


Figure 4 – Zero length microchannels 200µm x 200µm (on the left) and microchannel 200µm x 200µm (on the right), [11]

To determine the entry effects on the microchannel for correction purposes on rheological calculations, a second microchannel with zero length have been designed and manufactured. This geometry have the same entry shape of the other microchannel while the remaining geometry was elongated to enable pressure reading at the exact same location of the original microchannel.

*2. Material*

Thermoplastic materials are used for micro rheometry studies testing are common commercially available grades used in micro parts. Table 1 and 2 summarizes their main properties of materials.

Material	Grade	Morphology
Polypropylene	Moplen HP548R	Semicrystalline
Polystyrene	Edistir N 1910	Amorphous

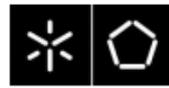
Table 1 – Materials study-case

Material	Melt flow rate (MFR)	Density
Polypropylene	23 g/10min (230°C - 2.16Kg)	0.9(g/cm <sup>3</sup> )
Polystyrene	27 g/10min (200°C - 5Kg)	1.05(g/cm <sup>3</sup> )

Table 2– Main properties

**Results and Discussion**

Figures 5 to 8 shows the typical data acquisition of which samples, expressed by inlet sensor and outlet sensor, the results obtained are reasonable because the curves demonstrated the touch in each sensor of the melt polymer. Figure 9, 10 represents the final flow curve, to the both materials.



	Moplen HP 548R	Edistir N 1910
Mold temperature (°C)	100	100
Melt temperature (°C)	220	240
Injection speed (mm/s)	120-140-160-180-200	120-140-160-180-200-220-240

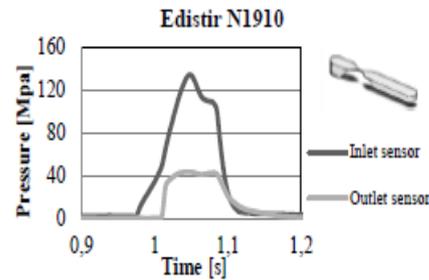


Figure 8- Data acquisition of microchannel, 200µx200µ

Table 3 - Processing Conditions

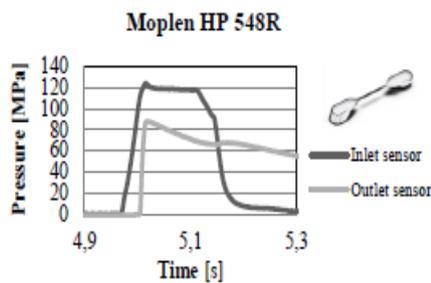


Figure 5 - Data acquisition of microchannel 200µx200µ

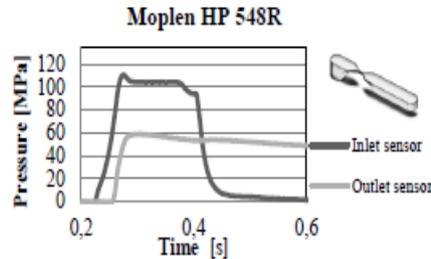


Figure 6 - Data acquisition of zero length microchannel 200µx200µ

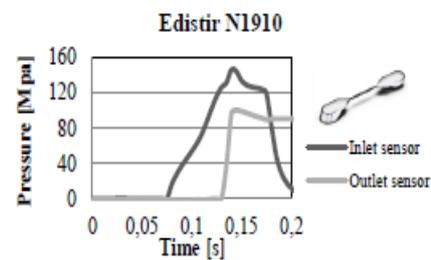


Figure 7 - Data acquisition of microchannel 200µx200µ

Flow Curve\_Moplen HP548R

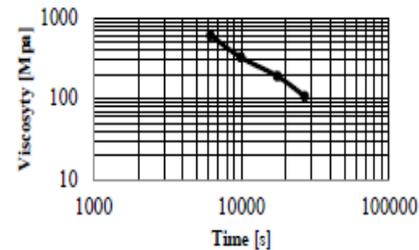


Figure 9 - Flow curve obtained at 100 °C on the mold

Flow curve\_Edistir N1910

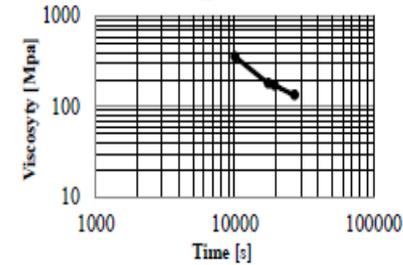


Figure 10- Flow curve obtained at 100 °C on the mold.

In present work both flow curves, figures 9,10, not demonstrated the wall-slip effect As the magnitude of the shear stresses varies, polymer melts flow in a way that is a superposition of slipping at the wall and shearing within the melt,[15].

### Conclusions

An immediate conclusion of this study is that the flow inside the mould is non-isothermal, which means that the data eventually obtained are not to be regarded as quantitatively accurate rheometrical data.



As already stated before, the equipment setup in this study is not a microrheometer, but rather a viscometer that replicates the flow conditions in real flow situations, i.e. it is a process analyzer and simulator.

In present work a tool for the quantitative evaluation of the rheological behavior of polymer melts under typical microinjection moulding conditions was developed. The use of a microinjection moulding tool for rheometry purposes provided the establishment of flow curve for polypropylene, (Moplen HP 548R) and to polystyrene, (Edistir N1910).

#### Acknowledgments

The authors acknowledge the funding support given by ADI through the QREN program in the frame-work of the project Tooling Edge (Project n. ° 13856).

#### References

1. Piotter, V., T. Hanemann, R. Ruprecht, and J. Haufelt, *Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures. Microsystem Technologies*, 1997: p. 129-133.
2. Kukla, C., H. Loibl, and H. Detter, *Micro-Injection Moulding, The aims of a Project Partnership, in Kunststoffe Plastic Europe*. 1998. p. 1331-1336
3. Evans, B. and R. Mehalso, *How Small is Small A Guide to the New Microfabrication Design and Process Techniques*, in *Medical Device & Diagnostic Industry*. 2001.
4. B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths, M.S. Packianather, *Investigation of micro injection moulding: Factors affecting the replication quality*, The Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, United Kingdom
5. J.M. Dealy, T.O. Broadhead, *Process rheometers for molten plastics: a survey of existing technology*, *polymer Engineering & Science* 33 (1993) 1513- 1523
6. A.L. Kelly, T. Gough, B.R. Whiteside, P.D. Coates, *High shear strain rate rheometry of polymer melts*, *journal of applied polymer science* 114 (2009) p.864-873
7. N.Zang, M.D. Gilchrist, *Characterization of thermo-rheological behavior of polymer melts during the micro injection moulding process*.
8. Lee K and Mackley M R. 2000. *The significance of slip in matching polyethylene processing data with numerical simulation* *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 94 159-77
9. D. Yao, B. Kim, *Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials*, *Journal of Micromechanics and microengineering*, 12 (2002) 604-610.
10. R.-D. Chien, W.-R. Jong, S.-C. Chen, *Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wallslip effect*, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005) 1389-1396.
11. J.C. Vasco, J.M. Maia, A.S. Pouzada, *Thermo-rheological behaviour of polymer melts in microinjection moulding*, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 19 (2009) 105012.
12. D. Yao, B. Kim, *Scaling issues in miniaturization of injection molded parts*, *Manuf. Sci. Eng.* 126 (2004) 733-739.
13. J. Zhao, R.H. Mayes, G. Chen, H. Xie, P.S. Chan, *Effects of process parameters on the micro molding process*, *Polym. Eng. Sci.* 43 (9) (2003) 1542-1554.
14. Y.K. Shen, S.L. Yeh, S.H. Chen, *Three-dimensional non-newtonian computations of micro-injection molding with the finite element method*, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 29 (5) (2002) 643 - 652.
15. J.C. Vasco, J.M. Maia, A.S. Pouzada *Microinjection moulding - Wall-slip evaluation of POM in Microchannels*. Proceedings of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting PPS-26, July 4-8, 2010 Banff (Canada)