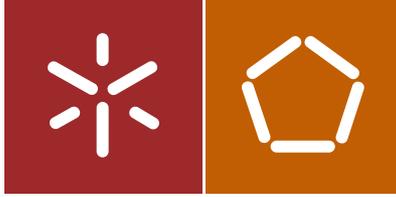




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Madalena Martins da Silva

Monitorização da fusão de polímeros
em extrusoras de duplo-fuso



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Madalena Martins da Silva

Monitorização da fusão de polímeros
em extrusoras de duplo-fuso

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José António Colaço Gomes Covas

Outubro de 2014

Nome:

Sara Madalena Martins da Silva

Endereço eletrónico: a58713@alunos.uminho.pt

Telefone: 910496733

Número do Bilhete de Identidade: 13741523

Título Tese:

Monitorização da fusão de polímeros em extrusoras de duplo-fuso.

Orientador (es):

Prof. Dr. José António Colaço Gomes Covas

Ano de conclusão: 2014

Designação do Mestrado:

Mestrado integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER
PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____



AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação foi possível devido ao apoio, compreensão e trabalho de várias pessoas, às quais pretendo deixar uma palavra de apreço por toda a disponibilidade e apoio prestado.

Ao meu orientador, Dr. António Covas, pela oportunidade em desenvolver este projeto extremamente apelativo e interessante. Gostaria também de agradecer a sua disponibilidade para resolver todos os problemas que foram aparecendo durante este projeto.

Ao João Paulo Peixoto, técnico que auxiliou no desenvolvimento desta dissertação, pela constante troca de informação e conhecimentos, permitindo-me adquirir novos saberes e desenvolver este projeto de forma muito mais eficaz.

À minha família pelo apoio ao longo destes 5 anos e fundamentalmente ao longo destes últimos meses cruciais ao desenvolvimento desta dissertação. Sem o seu apoio, incentivo, sacrifício e confiança seria para mim impossível realizar este curso e esta dissertação. Ao meu namorado pelo constante incentivo e compreensão ao longo destes meses em que a dissertação foi uma prioridade constante.

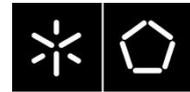
À empresa CASFIL, especial apreço ao Eng.º Miguel Pinto pela oportunidade oferecida, na altura em que a a tese se iniciava. Assim como pelo apoio a concretizar este trabalho e pela sua compreensão ao longo da realização deste.



RESUMO

No âmbito da unidade curricular Dissertação de Engenharia de Polímeros, desenvolve-se um estudo que consiste na monitorização da fusão de polímeros em extrusoras duplo fuso, com vista à melhor compreensão fenomenológica deste processo. Para o efeito, é utilizado um dispositivo protótipo que permite a recolha rápida de amostras em diversas localizações, no sentido axial e radial da extrusora. Nessas localizações é possível medir a temperatura média do material e estimar o tempo local de residência. A conjugação da informação disponibilizada (temperatura e estado físico do material) permite perceber o percurso efetuado pelo material ao longo do parafuso, bem como a sequência e possivelmente o mecanismo de fusão. São igualmente estudados os efeitos das condições operatórias e da geometria dos parafusos nestes processos.

Palavras-chave: Extrusora de duplo fuso co rotativa, fusão de polímeros, dispositivo de monitorização, temperatura interna e estado físico.



ABSTRACT

This thesis reports a study involving monitoring of polymer melting in twin screw extruders, with a view to a better understanding of this process. For this purpose, a prototype device that allows fast sampling in various radial and axial locations in the extruder is used. Moreover, in these locations it is possible to measure the average material temperature and to estimate the local residence time. The combination of this data (temperature and physical state of the material) allows us to identify the material flow path along the screw, as well as the sequence and possibly the melting mechanism of. The effects of operating conditions and screw geometry are also studied.

Key words: Co rotating twin screw extruders, melting, process monitoring.



MOTIVAÇÃO

As extrusoras de duplo-fuso são provavelmente o tipo de máquinas mais utilizado para operações contínuas de composição de polímeros. Embora as suas características de funcionamento e operação sejam razoavelmente compreendidas, continua a existir necessidade de realizar estudos de modo a aprofundar o conhecimento sobre certos aspetos destas máquinas.

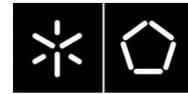
O desenvolvimento de ferramentas que permitem estudar os fenómenos físicos que ocorrem nas extrusoras de duplo-fuso representa um desafio interessante.

Neste projeto pretende-se obter uma melhor compreensão da fusão em extrusoras de duplo-fuso, uma vez que a maior parte dos estudos sobre fusão de polímeros foram efetuados com extrusoras monofuso. Para o efeito utiliza-se um dispositivo de monitorização protótipo que permite recolher dados em tempo real sobre a fusão, bem como estudar a sua evolução. Trata-se de um dispositivo com características únicas, pelo que este projeto tem um elevado grau de inovação. Isto permite compreender o processo de fusão e possibilitará a obtenção de informação (temperaturas de fusão e estado físico) a tempo real do processo, algo que não era possível até ao momento.

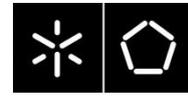


ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
<i>Abstract</i>	v
Motivação.....	vii
Lista de abreviaturas e acrónimos.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas.....	xv
1. Introdução.....	17
1.1. Conteúdo.....	17
1.2. Objetivos.....	18
2. Fusão em extrusoras de duplo-fuso.....	19
2.1. Enquadramento.....	19
2.2. Extrusoras de duplo fuso.....	19
2.3. Mecanismo de fusão de polímeros.....	24
3. Dispositivo de monitorização.....	27
4. Procedimento experimental.....	29
4.1. Material.....	29
4.2. Equipamento.....	29
4.3. Planeamento experimental.....	33
4.4. Identificação de amostras.....	35
4.5. Método de recolha.....	36
5. Resultados e discussão.....	39



5.1.	Mecanismo geral de fusão	41
5.2.	Estudo da influência do débito	43
5.3.	Estudo da influência da velocidade de rotação dos fusos	47
5.4.	Estudo da influência das temperaturas do cilindro.....	51
6.	Conclusão.....	55
7.	Dificuldades e Trabalho Futuro	57
8.	Referências.....	59
Anexos		61
Anexo 1 – Cronograma da dissertação.....		62
Anexo 2 – Planeamento de experiências		63
Anexo 3 – Ficha técnica ISPLEN PP 040 C1E [30].....		68
Anexo 4 - Confirmação dos resultados da experiência 1		69
Anexo 5 - Confirmação dos resultados da experiência 2		70
Anexo 6 - Confirmação dos resultados da experiência 3		71
Anexo 7 - Confirmação dos resultados da experiência 4		72
Anexo 8 - Confirmação dos resultados da experiência 5		73
Anexo 9 - Confirmação dos resultados da experiência 6		74
Anexo 10 - Confirmação dos resultados da experiência 7		75



LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

PP – Polipropileno

MFI – Índice de fluidez

T_m – Temperatura de fusão

T_g – Temperatura de transição vítrea

mm – Milímetros

D – Diâmetro interno do fuso

L – Comprimento da extrusora

DOE – *Design of Experiments*



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Secção de uma extrusora convencional e de duplo-fuso [3].	20
Figura 2 - Configurações: A) contra rotativa, B) co rotativa, C) contra rotativa, D) co rotativa.	20
Figura 3 - Zonas de uma extrusora de duplo-fuso [3].	21
Figura 4 - Visualização do fluxo [13].	22
Figura 5 - Tipos de módulos de fuso. A – elementos de fuso co rotativos B – elementos de fuso contra rotativos C - elementos de fusos reversos [20].	23
Figura 6 - Representação esquemática da aplicação dos módulos [22].	23
Figura 7 - Mecanismo de fusão em extrusoras de duplo-fuso [23].	24
Figura 8 - Processo de fusão numa extrusora de duplo-fuso [3].	24
Figura 9 - Configuração do dispositivo de monitorização.	27
Figura 10 - Extrusora de duplo-fuso co rotativa <i>LEISTRITZ</i> .	30
Figura 11 - Cilindro da extrusora <i>LEISTRITZ</i> e as respetivas zonas de aquecimento.	31
Figura 12 - Dispositivo de monitorização inserido na zona de aquecimento 2.	31
Figura 13 - Configuração do fuso.	32
Figura 14 - Identificação dos cilindros existentes no dispositivo de monitorização.	35
Figura 15 - Utensílios utilizados durante a realização das experiências.	36
Figura 16 - Procedimento de recolha de amostras (A – recolha de amostra com a espátula e rotação do cilindro com a chave. B – demonstração de recolha da amostra).	37
Figura 17 - Evolução da temperatura de fusão ao longo das cavidades.	42
Figura 18 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros no dispositivo de monitorização.	45
Figura 19 - Grau de enchimento ao longo das cavidades do cilindro B.	46
Figura 20 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros do dispositivo de monitorização.	49



Figura 21 - Grau de enchimento ao longo das cavidades do cilindro B.	50
Figura 22 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros no dispositivo de monitorização.	53
Figura 23 - Grau de enchimento ao longo das cavidades no cilindro B.	54
Figura 24 - Cronograma da dissertação.	62
Figura 25 - Ficha técnica do polipropileno ISPLEN PP 040 C1E	68



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos do polipropileno a utilizar no estudo da fusão (Anexo 3).....	29
Tabela 2 - Configuração do fuso.	32
Tabela 3 - Experiências a realizar e respetivos fatores.....	33
Tabela 4 - Experiências a realizar.	34
Tabela 5 - Avaliação do estado físico dos polímeros.....	39
Tabela 6 - Avaliação do enchimento das cavidades.	40
Tabela 7 - Resultados obtidos na experiência 1.	41
Tabela 8 - Resultados obtidos na experiência 2	43
Tabela 9 - Resultados obtidos na experiência 3.	44
Tabela 10 - Resultados obtidos na experiência 4.	47
Tabela 11 - Resultados obtidos na experiência 5.	48
Tabela 12 - Resultados obtidos na experiência 6.	51
Tabela 13 - Resultados obtidos na experiência 7.	52
Tabela 14 - Fatores e respetivos níveis.	64
Tabela 15 - Matriz de Taguchi.	65
Tabela 16 - Tabela triangular L8 (interações).....	65
Tabela 17 - Matriz de Taguchi L ₈	66
Tabela 18 - Ordem de realização das experiências.	67
Tabela 19 - Confirmação dos resultados da experiência 1.....	69
Tabela 20 - Confirmação dos resultados da experiência 2.....	70
Tabela 21 - Confirmação dos resultados da experiência 3.....	71
Tabela 22 - Confirmação dos resultados da experiência 4.....	72



Tabela 23 - Confirmação dos resultados da experiência 5.....	73
Tabela 24 - Confirmação dos resultados da experiência 6.....	74
Tabela 25 - Confirmação dos resultados da experiência 7.....	75



1. INTRODUÇÃO

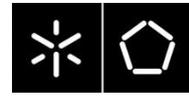
A utilização de extrusoras de duplo-fuso tem vindo aumentar, uma vez que estas se adequam a operações de composição e mistura de materiais poliméricos. As extrusoras de duplo-fuso co rotativas têm como principal característica a elevada capacidade de mistura. Possibilitam por norma a manipulação dos diferentes módulos do fuso, o que permite ao utilizador configurações específicas de acordo com os objetivos pretendidos.

Existem ainda algumas dúvidas sobre alguns fenómenos que ocorrem neste tipo de equipamento. A obtenção de conhecimento sobre a etapa de fusão é um dos objetivos desta dissertação. Trata-se de uma etapa difícil de estudar, uma vez que o cilindro é opaco e portanto o processo não pode ser visualizado, além disso não existe acesso fácil em tempo real ao material no cilindro. O desenvolvimento de procedimentos e tecnologias de recolha rápida de amostras que possam ser inseridos na extrusora representa uma alternativa para responder a estas questões.

O projeto a desenvolver ao longo desta dissertação tem como finalidade a monitorização da fusão do material numa extrusora de duplo-fuso, através da utilização de um dispositivo que torne possível a recolha de pequenas amostras tanto no sentido radial como axial. As amostras são estudadas em função da temperatura de fusão e estado físico.

1.1. Conteúdo

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos. Numa primeira fase é efetuado um estudo bibliográfico sobre extrusoras de duplo-fuso e feita uma apresentação de estudos sobre fusão de polímeros. No capítulo seguinte apresenta-se o protótipo de monitorização que permitirá o estudo da fusão do material. De seguida, é elaborado o planeamento de experiências. São identificados, o material e a configuração do fuso. Neste capítulo é ainda apresentado o procedimento experimental utilizado, no qual é explicado o método de recolha de amostras e como estas são caracterizadas. A sua caracterização é feita a nível de temperaturas de fusão, estado físico do material e grau de enchimento das cavidades do dispositivo de monitorização. Mediante estes resultados, torna-se possível analisar com mais pormenor o fenómeno da fusão e



o modo como este evolui. Assim sendo, o capítulo 5 dedica-se à apresentação destes resultados e da discussão dos mesmos.

Por fim são retiradas conclusões, apresentadas as principais dificuldades encontradas ao longo do projeto e anunciadas sugestões de trabalho para o futuro.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a monitorização da fusão de um material polimérico numa extrusora de duplo-fuso co rotativa. O processo engloba a validação do dispositivo de monitorização, o estudo do comportamento do material durante a fase de fusão e compreensão dos fenómenos que possam ocorrer. Os principais objetivos deste trabalho são:

- Recolha de amostras do cilindro para um conjunto de condições operatórias;
- Compreensão do mecanismo de fusão;
- Compreensão do efeito das condições operatórias no mecanismo de fusão.



2. FUSÃO EM EXTRUSORAS DE DUPLO-FUSO

2.1. Enquadramento

Este capítulo tem como objetivo reunir a informação disponível referente a extrusão de duplo-fuso co rotativa e em particular sobre a etapa de fusão. Inicialmente é apresentada a informação relativa às extrusoras de duplo-fuso co rotativas, abordando-se o mecanismo de funcionamento e as vantagens e desvantagens na utilização deste tipo de extrusoras. Por fim, reúne-se a informação existente sobre a fusão de polímeros neste tipo de máquinas.

2.2. Extrusoras de duplo fuso

A extrusão é um processo de transformação de polímeros, que consiste na passagem forçada de um material através de um canal com secção transversal específica, adquirindo a sua geometria [1].

A extrusão de polímeros é realizada através de uma linha de produção, sendo composta pela extrusora, a fieira e equipamento acessório. Na tremonha é inserida a composição de matérias-primas, sendo esta transportada ao longo do parafuso aquecido. Deste modo, numa fase inicial o material ainda se encontra no estado sólido, sendo que posteriormente inicia a fusão, fundindo totalmente e ganhando pressão suficiente para ser bombeado através de um filtro e de uma fieira [2].

A maioria das extrusoras utilizadas na indústria pode ser classificada como sendo monofuso ou duplo-fuso (Figura 1), sendo que esta classificação reflete mecanismos de escoamento muito diferentes.

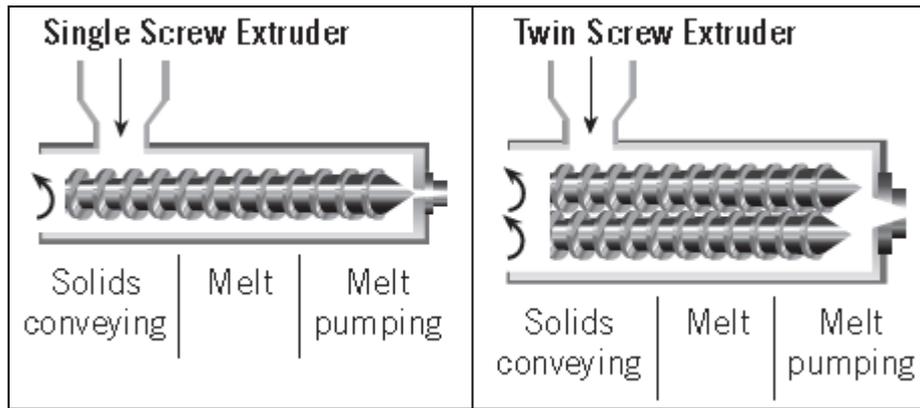
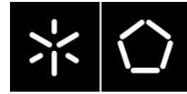


Figura 1 - Secção de uma extrusora convencional e de duplo-fuso [3].

As extrusoras de duplo-fuso apresentam um conjunto de várias tecnologias sendo que os parafusos a utilizar nestas tecnologias podem ser do tipo, ilustrado na Figura 2 [4][5].

- Co rotativas: movimento dos parafusos na mesma direcção (tecnologia a utilizar para o estudo);
- Contra rotativas: movimentos dos parafusos em direcções opostas.

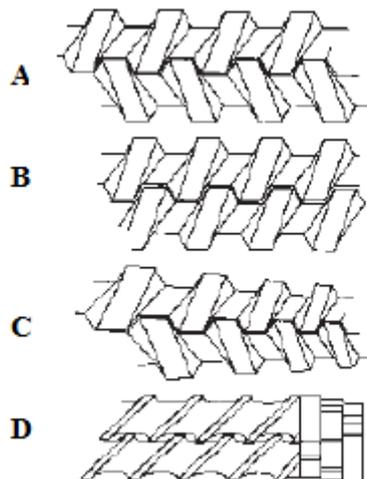


Figura 2 - Configurações: A) contra rotativa, B) co rotativa, C) contra rotativa, D) co rotativa [6].

As extrusoras convencionais constituídas por um só parafuso possuem limitações a nível de processamento, por exemplo polímeros sensíveis a temperaturas e capacidade limitada de



mistura [7]. Uma forma de ultrapassar estas limitações é a utilização de extrusoras de duplo-fuso[8].

A utilização de extrusoras de duplo-fuso tem vindo a aumentar, uma vez que a sua versatilidade se adequa a diferentes objetivos. Especificamente, a diminuição da dissipação viscosa, tornando-se adequada para materiais sensíveis à temperatura, de difícil processamento ou composição (extrusora de duplo-fuso contra rotativa) [9].

A extrusora de duplo-fuso co rotativa está configurada para fornecer uma quantidade certa de polímeros (alimentadores) no lugar certo em várias zonas da extrusora, Figura 3 no tempo correto (distribuição de tempos de residência estreita) [10]. O processo é controlado o que possibilita reações químicas, a fim de se obter produtos com propriedades únicas [11].



Figura 3 - Zonas de uma extrusora de duplo-fuso [3].

As extrusoras de duplo-fuso co rotativas tornaram-se a tecnologia mais importante das máquinas de extrusão de duplo-fuso [4][12]. Isto deve-se ao facto destas possuírem vantagens, tais como:

- Elevada capacidade de mistura em função da geometria do parafuso utilizado;
- Maior liberdade na alimentação do material, sendo esta possível em vários pontos ao longo do cilindro;
- Flexibilidade e capacidade de processar uma grande variedade de materiais poliméricos;
- Modularidade dos fusos possibilita diferentes construções.

Os padrões de fluxo existentes nas extrusoras de duplo-fuso co rotativas são complexos devido às geometrias definidas neste tipo de máquinas. O material fundido neste tipo de extrusoras move-se segundo uma trajetória em forma de um “8” à volta da periferia dos dois parafusos (Figura 4) [13]. Esta trajetória favorece a mistura dos componentes e é propícia a reações químicas [14].

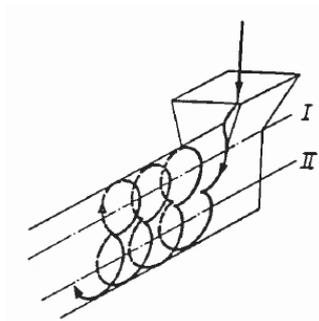
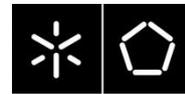


Figura 4 - Visualização do fluxo [13].

A principal desvantagem deste tipo de tecnologia é o elevado custo, no entanto a elevada capacidade de mistura e a boa produtividade são tidas em maior conta [15][16].

A principal variável neste tipo de processo é a configuração do parafuso, uma vez que cada tipo de dimensionamento é efetuado para um objetivo específico, determinado pelo tipo de material, mistura ou processo [17]. A manipulação dos módulos possibilita diferentes tipos de fluxos e fenómenos no processamento do material [4][18]. Na Figura 5 são apresentados alguns exemplos de módulos existentes com diferentes ângulos e passos, que podem ser ajustados com o intuito de realizar composições poliméricas [19][20]:

- Transporte: são utilizados com o objetivo de arrastar o material ao longo do perfil do parafuso.
- Mistura: módulos usados com o intuito de realizar mistura dos componentes
- Reverso: trata-se de módulos que criam mistura intensiva.

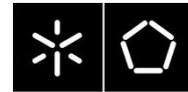


Figura 5 - Tipos de módulos de fuso. **A** – elementos de fuso co rotativos **B** – elementos de fuso contra rotativos **C** - elementos de fusos reversos [21].

Na Figura 6 está representado um esquema para uma possível posição dos módulos referidos anteriormente.

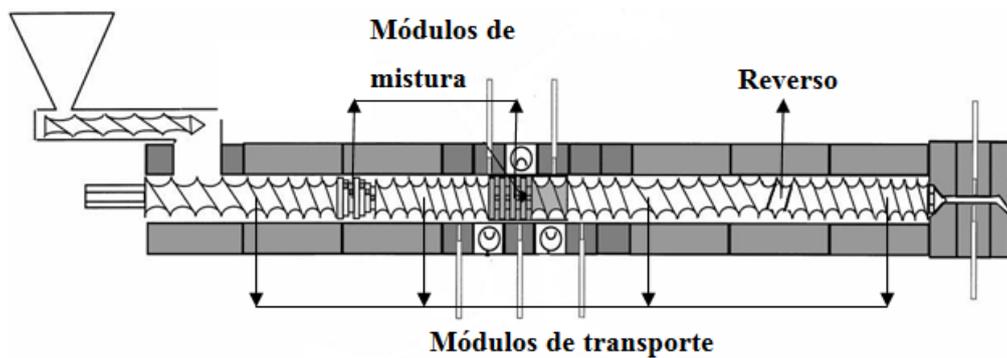
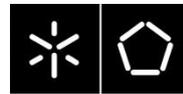


Figura 6 - Representação esquemática da aplicação dos módulos [22]. ~



2.3. Mecanismo de fusão de polímeros

Na maior parte dos estudos efetuados até ao momento foram utilizadas extrusoras monofuso, através da extração do fuso após interrupção do funcionamento do processo, sendo subsequente feita a análise da amostra de material obtida. O processo de fusão em extrusora duplo-fuso tem sido muito menos estudado, não tendo sido ainda possível estabelecer um mecanismo de fusão universalmente reconhecido.

No artigo de Lee e Dae Han [23] foi possível prever o fenómeno da fusão de polímeros (Figura 7).

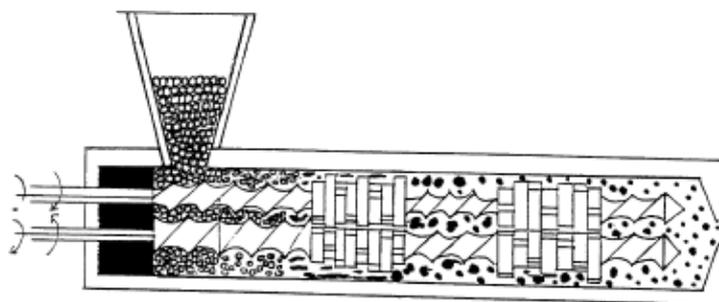


Figura 7 - Mecanismo de fusão em extrusoras de duplo-fuso [23].

Após introdução dos grânulos na tremonha, estes são transportados na parte inferior do cilindro, entre os fusos e apenas uma pequena percentagem é transportada sobre a parte superior dos fusos. O material é aquecido pelo cilindro e arrastado pela fricção. Com estes movimentos é fundido, tornando-se numa mistura homogénea. [11]

O mecanismo da fusão em extrusoras de duplo-fuso é complexo, sendo que na Figura 8 se visualiza o esquema representativo do processo de fusão em extrusoras de duplo-fuso com rotativas.

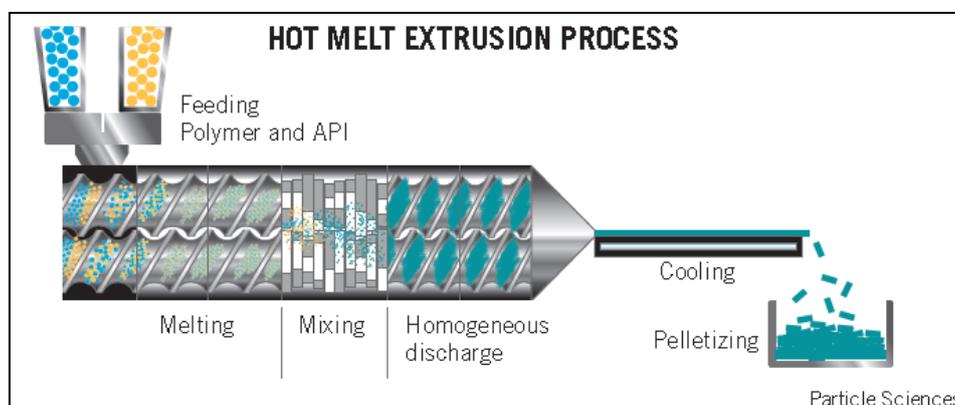


Figura 8 - Processo de fusão numa extrusora de duplo-fuso [3].



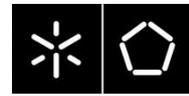
Após a entrada do material na extrusora, este é forçado a avançar pelo movimento rotativo dos fusos. O passo dos módulos que constituem os fusos diminui ao longo do comprimento dos mesmos, sendo o material continuamente comprimido. Conforme este avança ao longo do cilindro, é fundido por transferência de calor com as paredes do mesmo. À medida que o material entra no cilindro da extrusora é afetado pelas condições físicas do ambiente que o rodeia, o que aumenta gradualmente a sua mobilidade. Os movimentos dos fusos obrigam a que este se desloque entre os mesmos e entre estes e as paredes do cilindro, existindo um movimento similar à forma de um “8”. Quando este atinge a zona de mistura, o deslocamento é dificultado pela existência de módulos que criam elevada pressão. Partículas de material em estado sólido são arrastadas e juntam-se ao material fundido, deste modo a fusão do material dá-se principalmente por fricção de polímero-polímero.

Durante o processamento os materiais são influenciados por elevadas pressões e temperaturas, o que afeta as propriedades reológicas dos mesmos, sendo que esta influência pode retardar ou adiantar o processo de fusão [24]. Diversos estudos permitiram tirar importantes conclusões sobre a influência dos alguns dos principais parâmetros de processamento (como a velocidade de rotação do fuso e pressões) nos valores de temperatura e do tempo de residência, e influência na fusão.

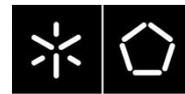
Sbarski [25] investigou o efeito da velocidade de rotação do fuso na variação da temperatura do material, e concluiu que o aumento da velocidade de rotação acelera a fusão do material, o que promove um aumento da temperatura durante o escoamento do fluido.

Sombatsompop e Panapoy [26] investigaram a relação entre a velocidade de rotação de fuso e os perfis de temperatura. Concluíram que os perfis de temperatura não eram uniformes em torno do diâmetro do cilindro [27]. Por outro lado, a temperatura altera-se de acordo com a velocidade de rotação do parafuso imposta. Com o aumento desta velocidade maior a quantidade de material fundido, verificando-se o aumento da temperatura de fusão. Nesta investigação foi possível identificar outros parâmetros de influência na viscosidade tais como taxas de corte, dissipação viscosa e comprimento do canal da extrusora [28].

Tendo em conta os estudos apresentados é possível dizer que na prática a conjugação do atrito e da transferência de calor por condução do cilindro deverão potenciar a fusão. Nas extrusoras de duplo-fuso, os materiais são submetidos as tensões elevadas quando fluem nos elementos de



mistura e nas folgas entre os fusos e entre estes e o cilindro. As temperaturas impostas ao cilindro são geralmente otimizadas de modo que a viscosidade seja baixa o suficiente para permitir uma boa mistura dos polímeros e consequentemente evitar a degradação dos mesmos [19]



3. DISPOSITIVO DE MONITORIZAÇÃO

O protótipo de monitorização é um dispositivo que permite observar em tempo real o que ocorre no interior da extrusora através da recolha de pequenas amostras. Este dispositivo apresenta a configuração ilustrada na Figura 9.

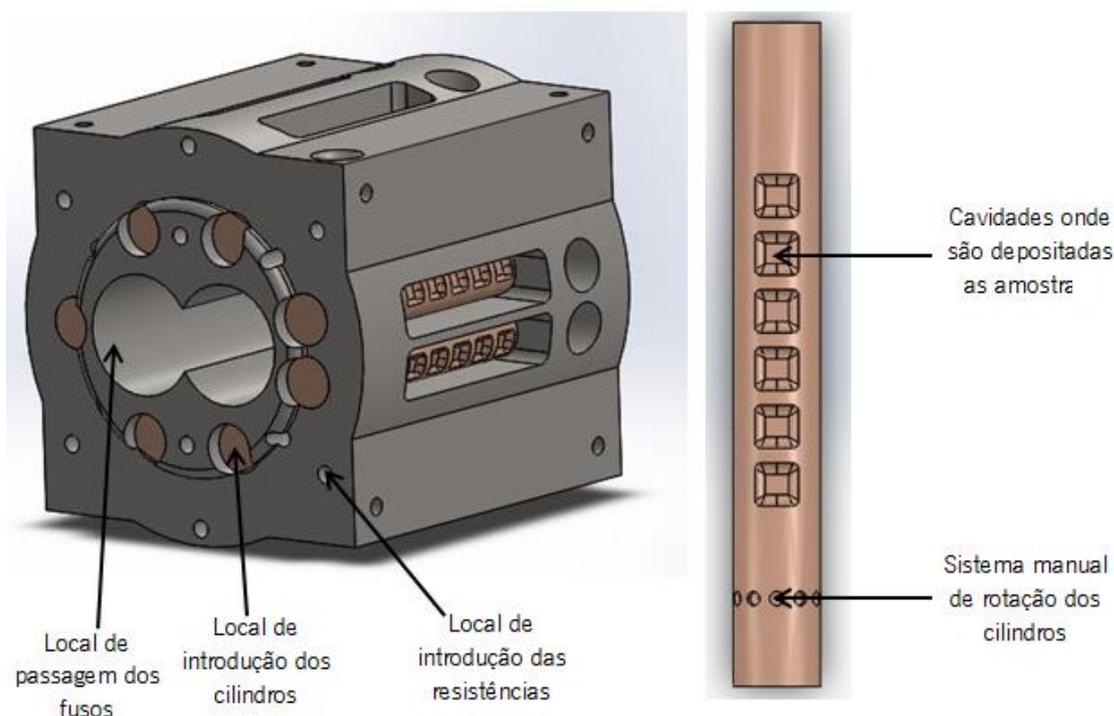
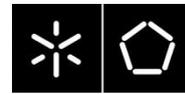


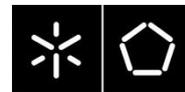
Figura 9 - Configuração do dispositivo de monitorização.

Trata-se de um protótipo desenvolvido para ser inserido entre os módulos do cilindro da extrusora de duplo-fuso a utilizar neste estudo. O dispositivo de monitorização é constituído por 7 cilindros, que são inseridos como ilustrado na Figura 9.

O bloco da extrusora contém sete cavidades onde estão alojados cilindros que podem rodar axialmente por ação manual. Cada cilindro apresenta seis cavidades onde serão depositadas as amostras recolhidas do interior da extrusora. Quando estas cavidades estão viradas na direção dos fusos, podem comunicar com o interior da extrusora através de pequenas cavidades. Se houver pressão no interior da extrusora o material flui para as cavidades; ao rodar o cilindro porta-cavidades, as amostras podem ser recolhidas. No caso de não existir pressão suficiente no



interior do cilindro as cavidades tendem a ficar quase vazias, o que nos permite também obter informação sobre o grau de enchimento dos fusos. Se a recolha de amostras for feita com rapidez, é possível utilizar um termopar de resposta rápida para estimar a temperatura real do material. A temperatura do bloco é controlada por cartuchos de aquecimento, localizados como ilustrado na Figura 9. A localização do bloco porta-cilindros na extrusora depende da configuração dos fusos. Em princípio este estará localizado junto da primeira zona de mistura a montante.



4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Material

Neste estudo não existem restrições para o material a utilizar, sendo que foi selecionado o polipropileno homopolímero, PP (ISPLEN PP 040 C1E, produzido pela REPSOL), foi utilizado. Trata-se de um polímero de uso comum que é utilizado em larga escala. Uma vez que é um grau apropriado para extrusão, é ideal para a realização deste estudo. As principais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos do polipropileno a utilizar no estudo da fusão (Anexo 3).

PP (ISPLEN PP 040 C1E)		
Propriedades físicas	Massa volúmica (g/cm ³)	0.905
	MFI a 230°C/ 2,16 Kg (g/10 min)	3,0
Extrusão	Temperaturas de processamento (°C)	190-250
	Temperatura de fusão (°C)	170

4.2. Equipamento

O estudo foi realizado no equipamento laboratorial *LEISTRITZ, LSM 30.34* (Figura 10), extrusora de duplo-fuso co rotativa (fuso com diâmetro de 30 mm e L/D = 29 mm).

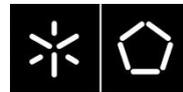


Figura 10 - Extrusora de duplo-fuso co rotativa *LEISTRITZ*.

A seleção dos módulos a utilizar na configuração do fuso é extremamente importante, uma vez que influencia o escoamento e o ambiente termomecânico que se desenvolve dentro da máquina e portanto o tipo de mistura o nível de dissipação viscosa e as pressões geradas [22]. Para que seja possível a observação da fusão do polipropileno, a configuração a utilizar deve assegurar o transporte do material sólido até à localização do dispositivo de monitorização. Nessa zona, o parafuso deve criar suficiente pressão para forçar a acumulação de material polimérico. Esta definição permite a observação de material ainda em estado sólido e acompanhar a evolução do seu estado físico, até á fusão completa (Figura 11).

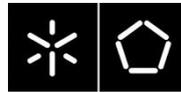


Figura 11 - Cilindro da extrusora *LEISTRITZ* e as respetivas zonas de aquecimento.

O dispositivo de monitorização foi inserido na zona 2 (Figura 12).

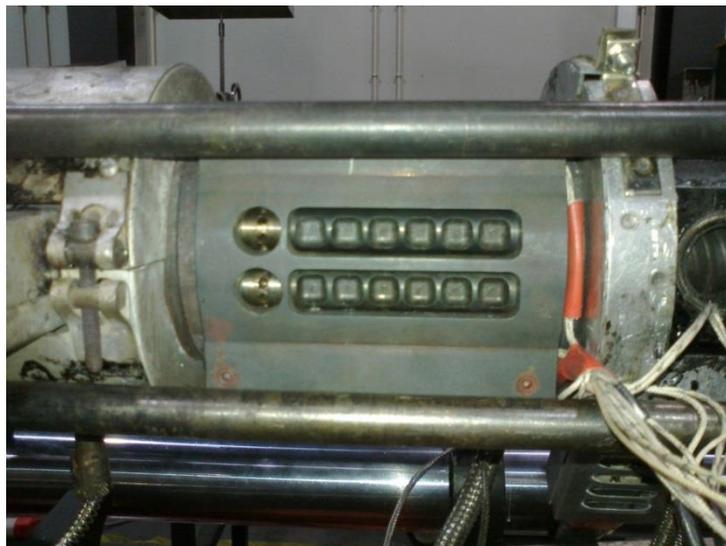


Figura 12 - Dispositivo de monitorização inserido na zona de aquecimento 2.



A Tabela 2 apresenta configuração dos módulos seleccionados que compõe o fuso.

Tabela 2 - Configuração do fuso.

Módulos	Designação	Comprimento (mm)	Passo (mm)	Ângulo (°)	Quantidade
Transporte	60R	120	60		1
	60R ₄	30	60		1
	45R	120	45		1
	30R	120	30		2
	20R ₂	60	20		2
	30R ₂	60	30		2
	30R ₄	30	30		1
	30R ₄ L	30	30		1
	20R ₄ L	30	20		1
Reverso	5KB	7,5		-30	1
	7KB	7,5		90	2

R = Comprimento do módulo = 120 mm (R₂= 60 mm e R₄= 30mm)

L= Left handed helix (passo de rosca esquerda)

KB= Kneading blocks (blocos reversos)

Assim os fusos utilizados no trabalho experimental têm a geometria ilustrada na Figura 13, onde se identifica também a localização do protótipo de monitorização.

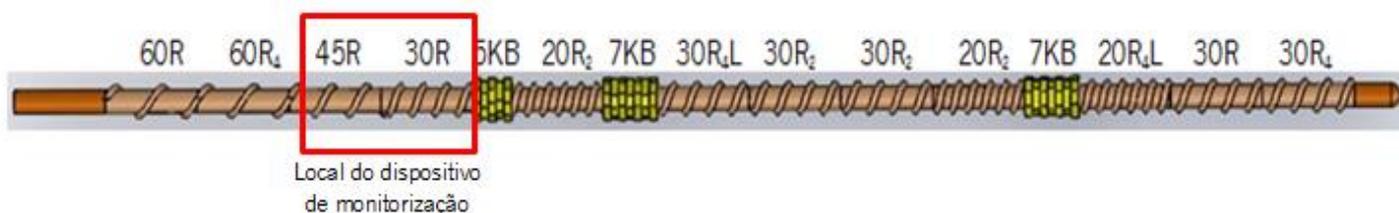


Figura 13 - Configuração do fuso.



4.3. Planeamento experimental

O estudo da fusão do material será feito através da realização de várias experiências para diferentes condições de processamento.

A fusão é influenciada por parâmetros operacionais e geométricos. Contudo o estudo do mecanismo da fusão apenas foi feito para os seguintes parâmetros operacionais:

- Velocidade de rotação dos fusos (variável designada por A),
- Débito (B)
- Temperaturas do cilindro (C).

As experiências a realizar foram identificadas recorrendo a um DOE e ao método de Taguchi, sendo que a construção destes se encontra no Anexo 2. A gama de variação dos parâmetros operacionais está identificada na Tabela 3.

Tabela 3 - Experiências a realizar e respetivos fatores.

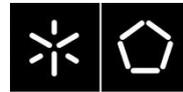
Experiências	Nível														
	--					Experiência de referência					+				
A	100 rpm					150 rpm					200 rpm				
B	1,5 kg/h					3 kg/h					6 kg/h				
C	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5, 6, 7, 8	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5, 6, 7, 8	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5, 6, 7, 8
	190	200	210	220	220	180	190	190	200	220	200	210	220	220	220



As experiências a realizar estão identificadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Experiências a realizar.

Experiência	Condição							
1	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
2	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 1,5 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
3	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 6 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
4	Velocidade do parafuso: 100 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
5	Velocidade do parafuso: 200 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
6	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 190	Zona 2 200	Zona 3 210	Zona 4 220	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
7	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 200	Zona 2 210	Zona 3 220	Zona 4 220	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220



4.4. Identificação de amostras

Durante a realização das experiências é recolhido um elevado número de amostras, por isso é necessário um método que possibilite a sua organização assim como a identificação das mesmas.

Os cilindros presentes no dispositivo de monitorização foram identificados com letras, de A a G, como se ilustra na Figura 14, sendo que a identificação foi realizada no sentido anti-horário. As cavidades foram identificadas como se apresenta na Figura 14 de 1 a 6 no sentido do fluxo.

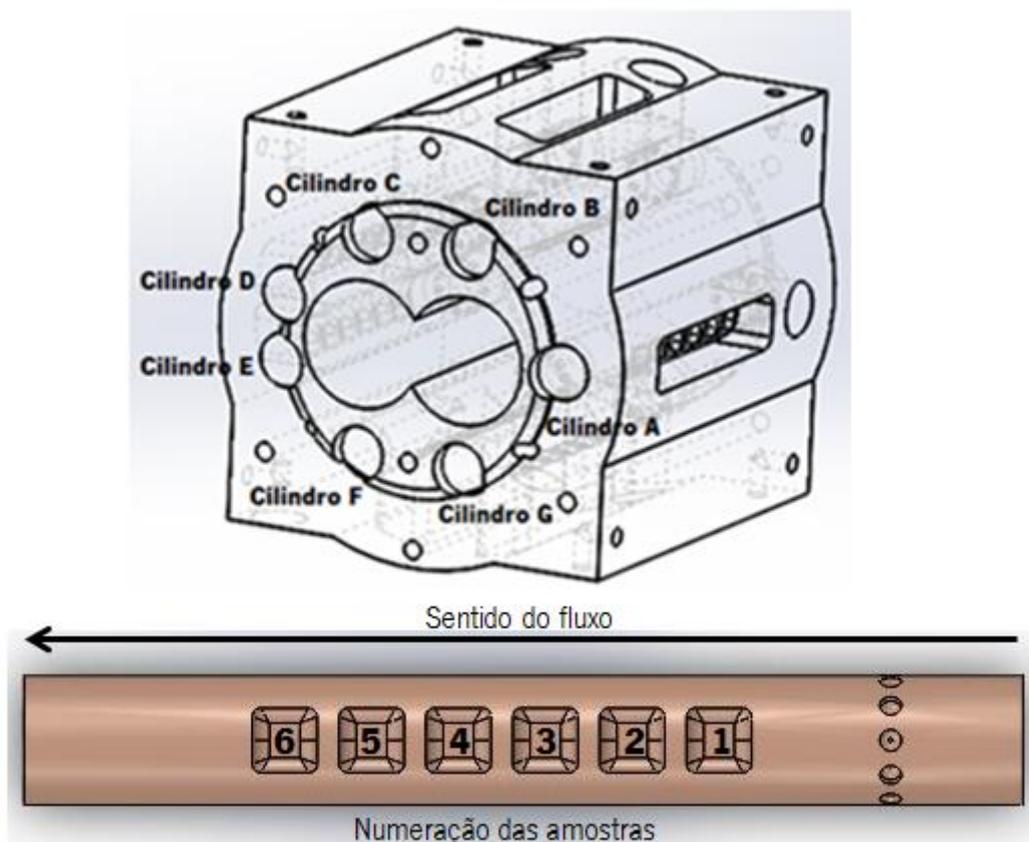
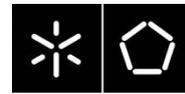


Figura 14 - Identificação dos cilindros existentes no dispositivo de monitorização.



4.5. Método de recolha

O dispositivo de monitorização possibilita a recolha de inúmeras amostras no sentido radial e axial, por isso a organização foi essencial para evitar a troca de amostras.

Para que as experiências fossem realizadas de modo correto foi necessário o seguinte material auxiliar, sendo apresentado na Figura 15.

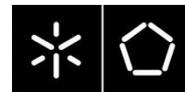
- Copo de alumínio (A);
- Espátula (B);
- Pinça (C);
- Chave de rotação do dispositivo (D);
- Caixas identificadas, para a separação das amostras (E);
- Termopar com sistema de leitura (F), sendo que este tem a seguinte designação:
Modelo: HFT 80 (K: -200 a 1200 °C).



Figura 15 - Utensílios utilizados durante a realização das experiências.

O procedimento experimental adotado foi o seguinte:

1. Deixar que o fluido atravessasse o cilindro até atingir o regime estacionário de funcionamento da extrusora;
2. Rodar o cilindro A (Figura 14), até que as cavidades de recolha contactem os orifícios de ligação ao interior do dispositivo de monitorização;
3. Observar as cavidades e verificar a existência de material (quantidade e estado físico);



4. Medir a temperatura da amostra presente na primeira cavidade com o auxílio do termopar. É necessário ter cuidado para evitar que o termopar toque nas paredes da cavidade;
5. Recolher a amostra com o auxílio da espátula e da pinça (Figura 16);
6. Colocar água no copo de alumínio para que seja possível arrefecer rapidamente a amostra;
7. Colocar a amostra na caixa e na correspondente identificação;
8. Anotar temperatura, estado físico da amostra e preenchimento da cavidade;
9. Limpar as restantes cavidades; para evitar que a amostra recolhida esteja demasiado tempo exposta ao meio ambiente e vá arrefecendo, fornecendo informação errada sobre temperatura e estado físico;
10. Recolher as amostras das cavidades seguintes e seguindo os procedimentos do ponto 3 até ao 9;
11. Repetir processo do ponto 3 até ao 9 para os restantes cilindros B, C, D e E.

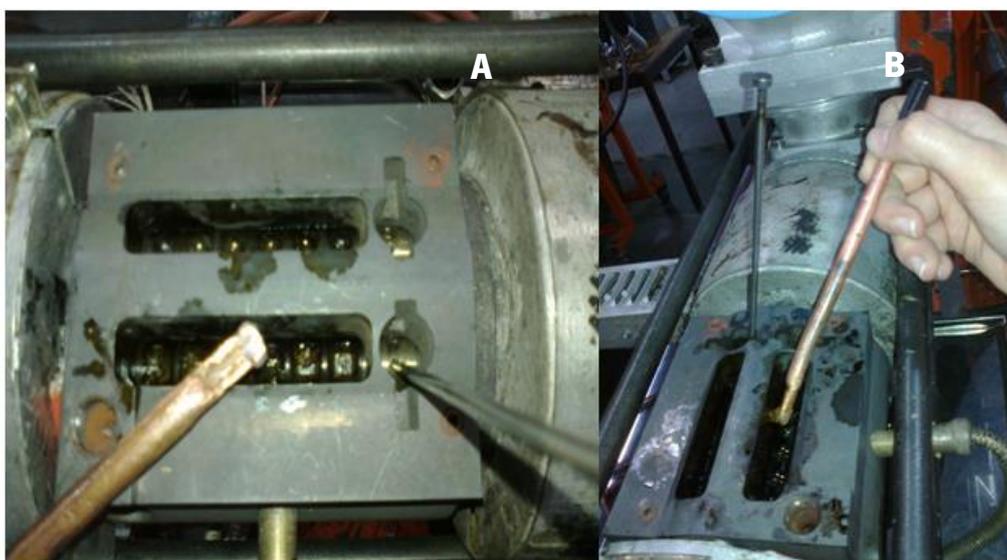
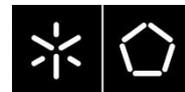


Figura 16 - Procedimento de recolha de amostras (**A** – recolha de amostra com a espátula e rotação do cilindro com a chave. **B** – demonstração de recolha da amostra).



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados tendo em conta três variáveis determinantes para a compreensão da fusão: temperatura do material, estado físico das amostras e grau de enchimento das cavidades. Um quarto fator igualmente importante é o tempo médio de residência, que não foi medido por o intervalo de tempo necessário para este estudo se estender muito para além do previsto.

Como se explicou no capítulo anterior, a temperatura foi medida com um termopar inserido na massa da amostra recolhida. O estado físico das amostras recolhidas foi avaliado de acordo com os critérios apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Avaliação do estado físico dos polímeros.

Estado físico dos polímeros	
Sólido	O polímero encontra-se no estado sólido
Parcialmente fundido	A camada exterior do material está fundida, sendo que o seu interior ainda permanece sólido
Fundido	O polímero está completamente fundido, sem vestígios de material sólido



O grau de enchimento foi caracterizado de acordo com as definições contidas na Tabela 6:

Tabela 6 - Avaliação do enchimento das cavidades.

Grau de enchimento das cavidades		Identificação Gráfica *
Vazio	A cavidade está completamente vazia	0%
Parcialmente vazio	A cavidade contém pouco material	25%
Parcialmente cheio	A amostra têm um tamanho razoável, ocupando de uma forma parcial a cavidade	50%
Cheio	A cavidade encontra-se completamente cheia de material	100%

* Valores indicativos para a representação gráfica dos resultados obtidos

Não foi possível recolher amostras nos cilindros F e G (Figura 14), porque estão localizados na parte inferior do dispositivo de monitorização, muito próximos do suporte da extrusora. Como a proximidade entre o dispositivo de monitorização e o suporte da extrusora é considerável, tornou-se uma dificuldade na recolha das amostras. A má visibilidade e a dificuldade na introdução do sistema de rotação nos cilindros tornaram o processo de recolha muito difícil e demorado.

É importante salientar que as experiências apresentadas foram repetidas, de modo a garantir a veracidade dos resultados. Deste modo, ao longo da análise dos resultados é possível verificar a sua validade através da comparação da repetição das experiências.



5.1. Mecanismo geral de fusão

A experiência 1 reúne os valores de referência para as condições de processamento, sendo que estes irão variar nas restantes experiências. Assim o principal objetivo desta experiência é verificar qual o mecanismo de fusão do material na extrusora de duplo-fuso.

Os resultados obtidos nesta experiência são apresentados na Tabela 7 e na Figura 17.

Tabela 7 - Resultados obtidos na experiência 1.

Resultados_Experiência 1										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		145,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	155,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
2	156,4 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		156,7 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	152,5 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
3	159,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	159,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	158,9 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		Sem amostras	
4	166,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	165,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		160,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
5	173,7 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	167,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		161,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
6	174,8 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	175,3 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		163,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	159,1 °C	material fundido, cavidade parcialmente vazia

As amostras obtidas possuíam dimensões consideráveis pelo que cobriam parcialmente as cavidades. No cilindro E as amostras recolhidas apresentavam pequenas dimensões, não sendo possível a recolha em todas as cavidades. No cilindro C só foi possível a recolha em duas cavidades pelo que na Figura 17 a temperatura para as restantes foi obtida por extrapolação

Na cavidade 1 para os cilindros A, B e C não foram recolhidas quaisquer amostras, para os cilindros D e E foram recolhidas amostras de material em estado sólido, o que nos indica que nesta zona a temperatura ainda não tem influência no estado físico do material.

Com os resultados obtidos foi possível verificar o percurso do material na extrusora. Quando este entra no cilindro o movimento dos fusos, no sentido horário, impele o mesmo a progredir atravessando os espaços livres entre os fusos e as paredes do cilindro. À medida que o material



avança em torno do dispositivo observa-se que o estado físico do mesmo evolui de sólido para fundido, o que é evidenciado pelo perfil de temperaturas ilustrado na Figura 17. Pela mesma figura é possível verificar que a partir da zona 3 e 4 o processo de fusão do material começa a ser evidente. Quando o material chega à cavidade 6 já se encontra em estado fundido.

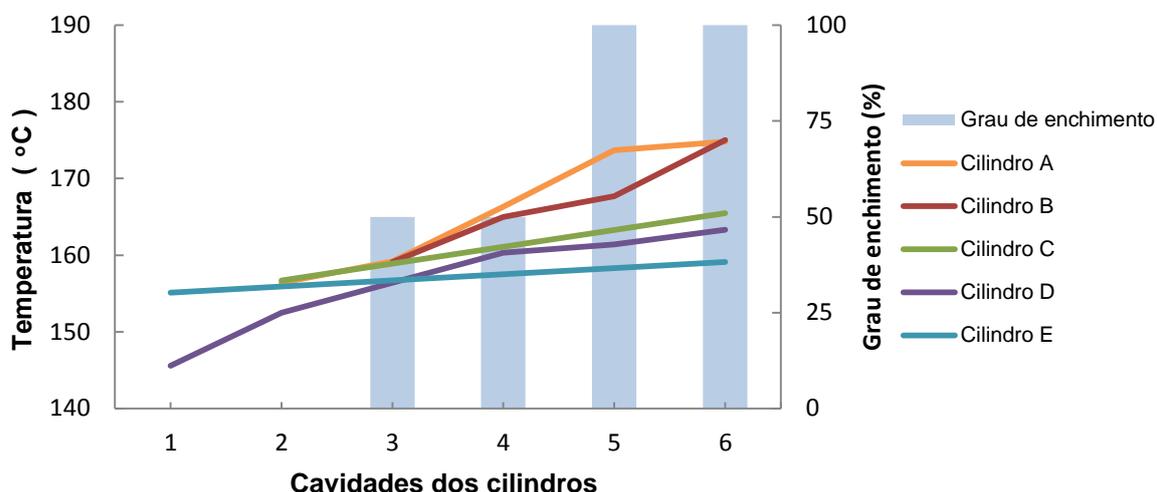


Figura 17 - Evolução da temperatura de fusão ao longo das cavidades.

A temperatura das amostras recolhidas nos cilindros A e B é superior à temperatura dos restantes, o que pode ser justificado com o movimento dos fusos. As zonas C e D são os locais onde o material entra em contacto com o dispositivo pela primeira vez, este ainda se encontra em estado sólido ou parcialmente fundido, sendo a sua temperatura mais baixa.

No anexo 4 é apresentado os resultados obtidos pela experiência de confirmação, apresentados estes valores muito semelhantes à experiência demonstrada, o que nos permite corroborar análise efetuada. Existe alguma diferença entre as duas experiências, que foi verificada nas temperaturas medidas e no número de amostras recolhidas. Da experiência apresentada para a experiência de confirmação foram medidas temperaturas ligeiramente mais altas (1 a 2 °C), provavelmente devido à maior estabilidade do processo aquando da recolha de amostras. Apesar desta pequena diferença o comportamento do material foi muito semelhante à experiência apresentada. Analisando a Tabela 7 e a Tabela 19 verifica-se que a dispersão de valores medidos é bastante reduzida sendo os resultados apresentados bastante precisos.



5.2. Estudo da influência do débito

O débito é um dos parâmetros de processamento em estudo, tendo sido realizadas experiências para dois valores diferentes, experiência 2 com 1,5 kg/h e experiência 3 com 6 kg/h. Utilizou-se a temperatura medida na cavidade 6 para comparação entre experiências. Para verificar o enchimento das cavidades é utilizado como exemplo o cilindro B.

A experiência 2 consiste no estudo da influência de um débito de 1,5 kg/h na fusão do material, sendo os valores obtidos comparados com a experiência de referência (débito de 3 kg/h) e a experiência 3. Os resultados obtidos nesta experiência foram os seguintes.

Tabela 8 - Resultados obtidos na experiência 2

Resultados_Experiência 2														
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E					
1	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		151,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras				
2	Sem amostras		158,9 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia		Sem amostras		158,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras			
3	162,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		167,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia		Sem amostras		161,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras		
4	163,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		170,5 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia		Sem amostras		163,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras		
5	169,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		140,5 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia			
6	172,6 °C	material fundido, cavidade parcialmente vazia		172,1 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia		164,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		166,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia		Sem amostras	

Na experiência 2 o processamento ocorreu sem dificuldades, contudo a recolha de amostras revelou-se complicada uma vez que estas tinham dimensões muito reduzidas. A utilização de débitos mais baixos não permite a recolha de amostras em todas as cavidades e as amostras recolhidas têm dimensões muito reduzidas.

A experiência 3 consistiu no estudo da influência do débito de 6 kg/h na viscosidade do material. Os resultados obtidos nesta experiência foram os seguintes:



Tabela 9 - Resultados obtidos na experiência 3.

Resultados_Experiência 3										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	159,2 °C	material sólido, cavidade cheia	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras	
2	161,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		145,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	152,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	149,5 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
3	163,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	175,3 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		155,4 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	150,7 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
4	167,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	176,6 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		159,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
5	169,1 °C	material fundido, cavidade cheia	177,6 °C	material fundido, cavidade cheia	148,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	163,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
6	172,7 °C	material fundido, cavidade cheia	179,1 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		170,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	153,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia

Ao contrário da experiência anterior, na experiência 3 não se encontraram grandes dificuldades no processamento do material. As amostras recolhidas possuíam dimensões elevadas, o que facilita a sua recolha e análise. Foi possível obter amostras na maior parte das cavidades.

Pela análise da Tabela 8 verifica-se que a temperatura registada na experiência 2 é muito similar à registada na experiência 1. A diminuição do caudal permite que o material se desloque com maior facilidade entre os fusos, o esforço mecânico exercido pelo movimento dos fusos tem menor ordem de grandeza pelo que não influencia severamente a viscosidade do material.

Na Figura 18 verifica-se que nesta experiência ocorre um ligeiro aumento da temperatura em relação à experiência 1 e à experiência 2. Na experiência 3, o débito influencia o comportamento do material, nesta experiência para além do calor transferido do cilindro por condução, os esforços mecânicos tem um papel preponderante no aumento da temperatura. Um caudal maior proporciona o aumento da taxa de corte o que faz com que o processo de fusão seja acelerado, o que é possível comprovar com o enchimento completo dos cilindros.

À semelhança da experiência 1, as amostras recolhidas nestas experiências permitiram verificar que a temperatura é superior nos cilindros A e B.

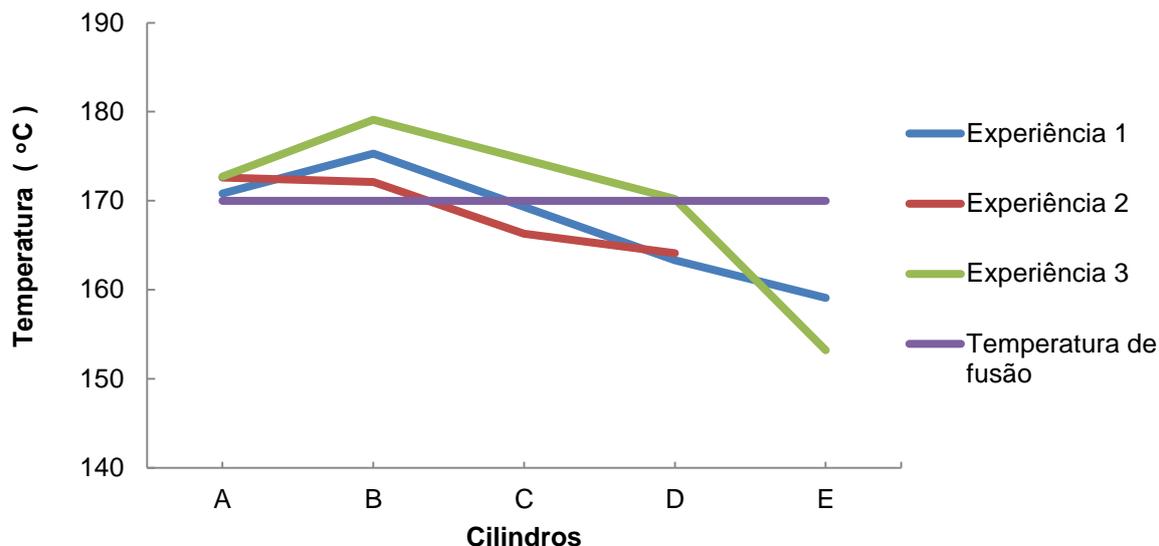


Figura 18 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros no dispositivo de monitorização.

Como se verifica na Figura 19, a diminuição do débito atrasa o processo de fusão o que dificulta o enchimento das cavidades. As amostras recolhidas nesta experiência encontravam-se quase todas no estado sólido ou parcialmente fundido. Nesta experiência devido à reduzida quantidade de material, a fusão ocorre mais tarde não sendo possível observar a mesma na área em que se encontra o dispositivo. Na experiência 3 ao definir-se um maior débito o processo de fusão ocorre na zona do dispositivo, o que resulta na obtenção de amostras com dimensões superiores às recolhidas na experiência 1. Nesta experiência os cilindros estavam completamente cheios de material como se verifica na Figura 19, o que facilita a recolha das amostras e a medição das temperaturas.

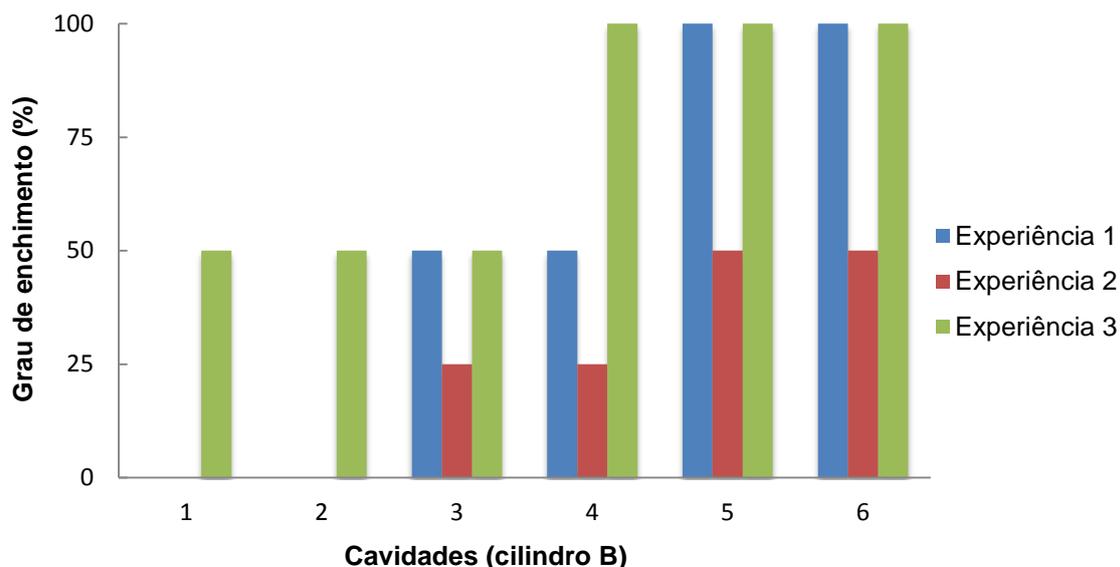
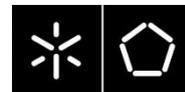


Figura 19 - Grau de enchimento ao longo das cavidades do cilindro B.

É importante salientar que tanto na experiência 1 como na experiência 2 e 3 se obtiveram poucas amostras ao longo do cilindro E, o que pode significar a existência de uma anomalia do dispositivo nesta zona. Do mesmo modo as experiências de confirmação presentes no anexo 5 e 6 apresentam resultados semelhantes. Apesar da experiência 2 não permitir a obtenção de muitas amostras, o cilindro E é o cilindro que tem a menor quantidade de amostras a recolher (uma amostra).

A utilização do débito mais baixo, 1,5 kg, para esta velocidade de rotação do parafuso não foi a mais adequada. A diminuição do débito não permite um estudo aprofundado ao mecanismo de fusão, pois são obtidas poucas amostras. Isto deve-se ao facto da fusão do material se iniciar mais tarde, pois o material existente no estado sólido dificilmente é recolhido pelos cilindros.

O aumento do débito origina maiores esforços mecânicos, que aceleram o mecanismo de fusão e conseqüentemente permite um melhor enchimento das cavidades. As amostras recolhidas nesta experiência apresentavam-se sobretudo num estado parcialmente fundido, o que significa que embora o processo de fusão seja acelerado pelas elevadas taxas de corte, nesta zona do cilindro nem todo material se encontra no estado fundido.



5.3. Estudo da influência da velocidade de rotação dos fusos

A velocidade de rotação dos fusos é um dos parâmetros de processamento em estudo, sendo estudados dois valores diferentes de velocidade, apresentados como experiências 4 a 100 rpm e 5 a 200 rpm.

A experiência 4 consistiu no estudo da influência de uma menor velocidade de rotação dos fusos, 100 rpm, sendo comparada com os resultados da experiência 1 (150 rpm) e 5. Os resultados obtidos nesta experiência foram os seguintes:

Tabela 10 - Resultados obtidos na experiência 4.

Resultados Experiência 4										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	167,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	171,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	161,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	163,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	157,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
2	169,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	173,7 °C	material fundido, cavidade cheia	163,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	165,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	159,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
3	173,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	175,8 °C	material fundido, cavidade cheia	165,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	170,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
4	174,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	176,6 °C	material fundido, cavidade cheia	167,3 °C	material fundido, cavidade cheia	173,6 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	177,5 °C	material fundido, cavidade cheia	180,1 °C	material fundido, cavidade cheia	172,2 °C	material fundido, cavidade cheia	174,4 °C	material fundido, cavidade cheia	162,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia
6	179,3 °C	material fundido, cavidade cheia	182,3 °C	material fundido, cavidade cheia	174,4 °C	material fundido, cavidade cheia	176,7 °C	material fundido, cavidade cheia	164,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia

O processamento na experiência 4 foi realizado sem dificuldades. As amostras obtidas tinham grandes dimensões, sendo que se recolheram amostras em todas as cavidades.

Na experiência 5 estudou-se a influência de uma maior velocidade de rotação dos fusos, 200 rpm, na fusão do polipropileno, sendo os resultados obtidos os seguintes:

**Tabela 11** - Resultados obtidos na experiência 5.

Resultados_Experiência 5										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		161,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
2	157,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	160,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	161,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	164,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	161,7 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
3	161,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	163,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	165,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	165,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
4	162,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	166,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	166,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	166,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
5	165,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras	
6	174,8 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	167,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		172,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	163,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia

O processamento do polipropileno sob estas condições ocorreu sem grandes dificuldades no entanto, a elevada quantidade desperdício e obtenção de amostras de reduzidas dimensões foram uma constante nesta experiência

Analisando a Figura 20 verifica-se que a experiência 4 possui para todos os cilindros temperaturas superiores às experiências 1 e 5. Este fenómeno contradiz a literatura encontrada uma vez que velocidades mais rápidas devem acelerar o processo de fusão, por aumento da pressão e taxas de corte no interior do cilindro. Nesta experiência o aumento do tempo de residência no cilindro promove o aumento da temperatura do material por condução de calor.

Na experiência 5 não foi possível a recolha de amostras no estado fundido, sendo que as temperaturas de fusão registadas eram mais baixas quando comparadas com a experiência 1. A fusão do material iniciou-se mais tarde, o que impossibilitou a visualização da evolução do comportamento do material na zona de recolha de amostras.

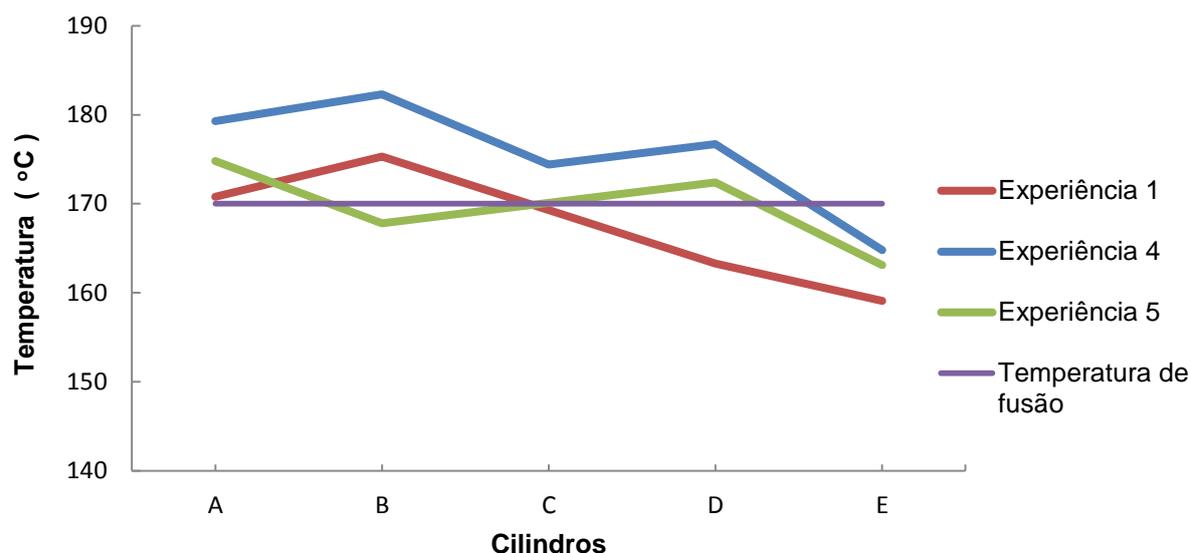


Figura 20 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros do dispositivo de monitorização.

A diminuição da velocidade dos fusos, 100 rpm, aumenta o tempo de residência do material na extrusora o que potencia a sua fusão, esta diminuição origina também um melhor enchimento das cavidades como ilustrado na Figura 21. As amostras recolhidas têm uma dimensão considerável o que permite uma medição mais precisa da temperatura das amostras.

O aumento da velocidade dos fusos para 200 rpm diminui o tempo de residência do material na extrusora atrasando o mecanismo de fusão. Existe assim uma maior dificuldade na recolha de amostras, uma vez que estas se encontram no estado sólido e parcialmente fundido.

Através da Figura 21 é possível verificar que a utilização desta velocidade impossibilita o enchimento das cavidades. Isto deve-se ao atraso no processo de fusão que ocorre mais tarde, não no interior do dispositivo. Pela mesma figura é possível verificar que para a velocidade mais baixa quando o material atinge a cavidade 1 já se encontra no estado fundido ou parcialmente fundido. Para a velocidade intermédia só é possível encontrar material neste estado físico a partir da cavidade 3 e para a velocidade mais alta a fusão ocorre ainda mais tarde na cavidade 5.

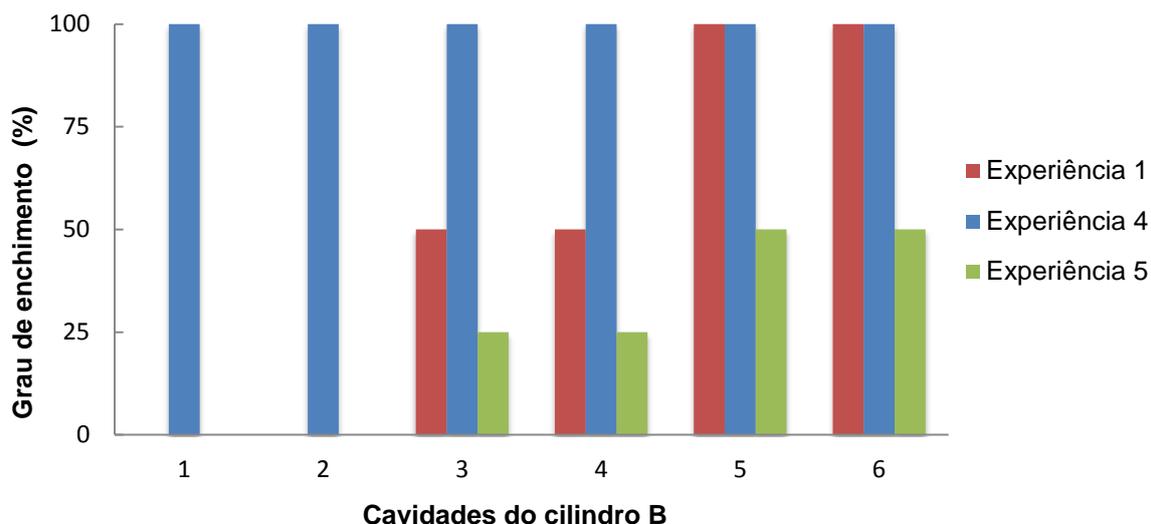


Figura 21 - Grau de enchimento ao longo das cavidades do cilindro B.

De forma semelhante às experiências anteriores existiram algumas dificuldades na recolha de amostras no cilindro E, mesmo para velocidades mais baixas, onde o avançado estado de fusão permitiu fácil recolha de amostras em todos os cilindros, a recolha foi difícil ou inexistente para este cilindro o que valida a hipótese de existir alguma anomalia no mesmo

A experiência 5 foi bastante morosa, uma vez que o processo de medição de temperatura foi bastante minucioso devido às dimensões bastantes reduzidas das amostras. Quanto mais pequena a dimensão da amostra, maior a probabilidade do sistema de leitura ser influenciado pela temperatura das paredes envolventes. Na experiência de confirmação apresentada no anexo 8 obtêm-se resultados semelhantes para as temperaturas de fusão e de graus de enchimento de cavidades.



5.4. Estudo da influência das temperaturas do cilindro

O perfil de temperaturas do cilindro é um dos parâmetros de processamento em estudo, sendo estudado para dois perfis de temperaturas, apresentados como experiências 6 (+ 10 °C) e 7 (+ 20 °C).

Na experiência 6 estudou-se a influência de temperaturas do cilindro 10 °C mais altas, comparando os resultados obtidos com a experiência 1 e 7. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 12 - Resultados obtidos na experiência 6.

Resultados_Experiência 6										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	156,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		Sem amostras		158,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	148,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
2	158,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	167,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	176,3 °C	material fundido, cavidade cheia	161,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	152,5 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
3	162,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	170,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	177,1 °C	material fundido, cavidade cheia	171,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
4	165,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	173,3 °C	material fundido, cavidade cheia	178,3 °C	material fundido, cavidade cheia	178,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	174,2 °C	material fundido, cavidade cheia	180,9 °C	material fundido, cavidade cheia	180,2 °C	material fundido, cavidade cheia	180,1 °C	material fundido, cavidade cheia	166,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia
6	178,7 °C	material fundido, cavidade cheia	187,7 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		183,6 °C	material fundido, cavidade cheia	171,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia

O processamento desta experiência realizou-se sem dificuldades, sendo verificada uma mudança das temperaturas do cilindro para as primeiras zonas do dispositivo. As amostras obtidas nesta experiência tinham dimensões elevadas e o seu estado físico apresentava-se de um modo geral parcialmente fundido.

Na experiência 7 estudou-se a influência de um aumento temperatura do cilindro em 20 °C quando comparado com a experiência 1. Os resultados obtidos nesta experiência foram os seguintes:



Tabela 13 - Resultados obtidos na experiência 7.

Resultados_Experiência 7										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	168,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	177,8 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		169,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
2	170,2 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	179,3 °C	material fundido, cavidade cheia	178,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	173,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	168,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia
3	171,7 °C	material fundido, cavidade cheia	182,7 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		175,6 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
4	175,1 °C	material fundido, cavidade cheia	188,8 °C	material fundido, cavidade cheia	184,8 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	179,9 °C	material fundido, cavidade cheia	175,3 °C	material fundido, cavidade parcialmente vazia
5	180,2 °C	material fundido, cavidade cheia	190,1 °C	material fundido, cavidade cheia	186,7 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	187,6 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
6	182,3 °C	material fundido, cavidade cheia	195,8 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		193,6 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	

Nesta experiência o processamento ocorreu sem grandes dificuldades. De forma similar à experiência anterior as amostras obtidas apresentavam grandes dimensões e encontravam-se no estado fundido e parcialmente fundido.

Na experiência 6, em comparação com a experiência 1 é possível acompanhar a evolução da fusão do material de uma forma completa (sólido – parcialmente fundido - fundido), Tabela 12.

Através da Figura 22 é possível observar que um aumento de 10 °C na temperatura do cilindro se traduz num aumento considerável da temperatura das amostras recolhidas. Com um aumento de 20 °C na experiência seguinte verifica-se um aumento considerável em relação à experiência de referência, mas não em relação à experiência 6.

Na experiência 7 a análise da Tabela 13 evidência que com o aumento da temperatura do cilindro, a temperatura de fusão do material aumenta de uma forma significativa. Quando o material alcança a zona onde se encontra o dispositivo de monitorização já apresenta uma temperatura substancialmente alta, Figura 22, quando comparada com as experiências anteriores.

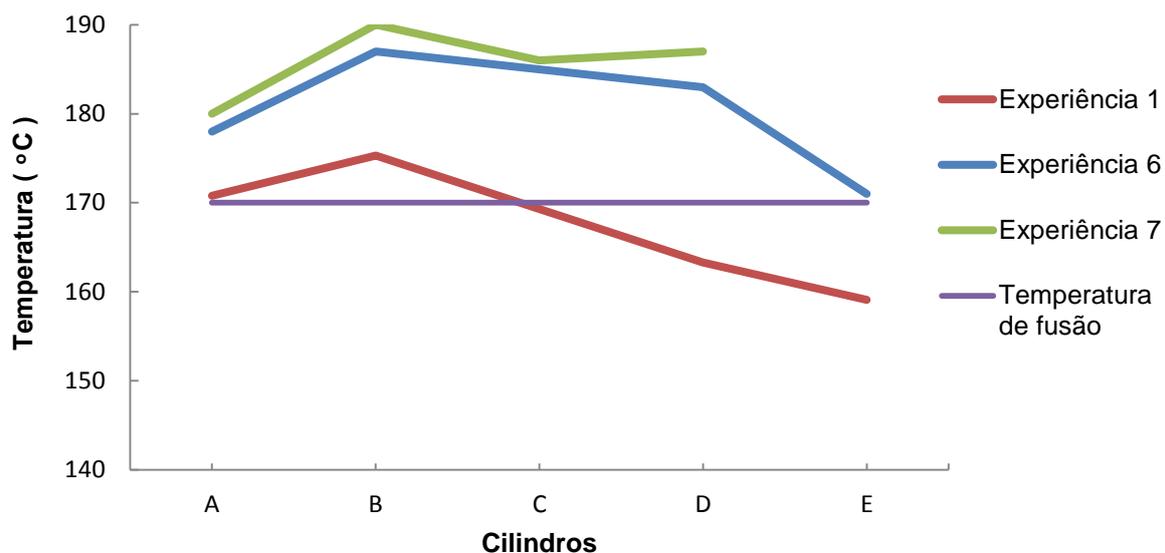


Figura 22 - Evolução da temperatura ao longo dos cilindros no dispositivo de monitorização.

O aumento de 10 °C nas primeiras zonas de aquecimento do cilindro origina mudanças no estado físico do material, sendo que o estado fundido ou parcialmente fundido possibilita um melhor enchimento das cavidades. Nas primeiras cavidades verificam-se de forma imediata enchementos praticamente completos, como se evidencia na Figura 23.

Como ilustrado na mesma figura, o material recolhido nas cavidades 1 e 2 em todos os cilindros já se encontra num estado parcialmente fundido ou completamente fundido, para as experiências 6 e 7, para a experiência de referência só se verifica o mesmo a partir da cavidade 3.

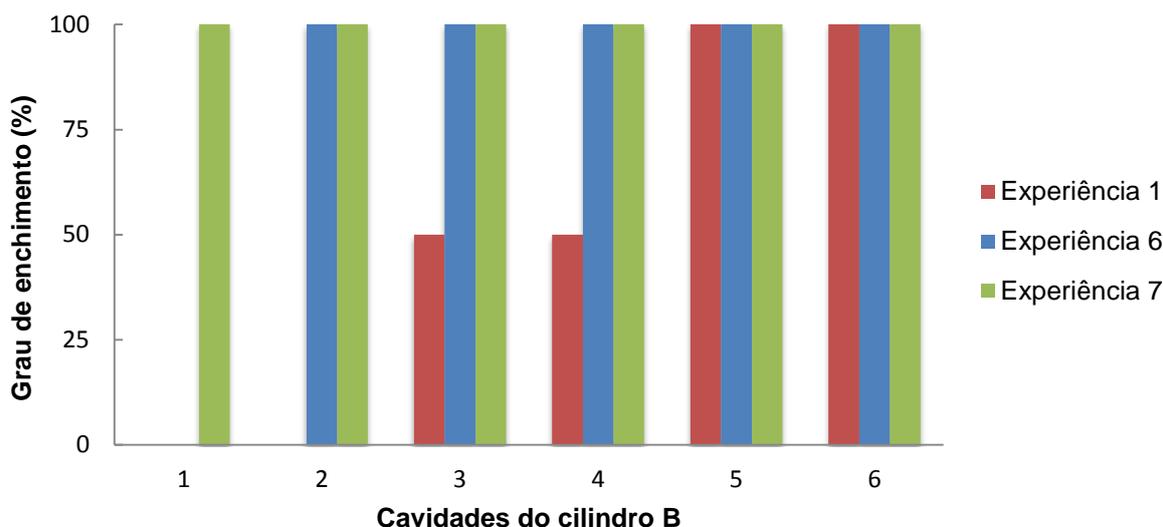


Figura 23 - Grau de enchimento ao longo das cavidades no cilindro B.

O equilíbrio entre as condições de processamento na experiência 6, débito e velocidade de rotação do fuso, em que apenas se verifica o aumento da temperatura permite uma análise completa ao mecanismo de fusão do material. Este inicia-se mais cedo quando comparado com a experiência 1, contudo todo o processo de fusão ainda é acompanhado pelo dispositivo de monitorização. A experiência de confirmação apresentada no anexo 9 permite comprovar a análise feita a estes resultados.

Na experiência 7 o estudo do mecanismo de fusão deste material é incompleto, uma vez que não é possível a observação de todos os estados físicos, pois o material quando entra no dispositivo já se encontra no estado fundido. Assim a utilização de temperaturas dentro desta gama não se adequa a este estudo, visto que o principal objetivo consiste em visualizar o mecanismo de fusão do material ao longo do dispositivo de monitorização.

No anexo 10 são apresentados os resultados obtidos na experiência de confirmação, onde se verifica que processo de fusão se encontra praticamente completo e as temperaturas de fusão lidas representam esse mesmo facto. Nesta experiência evidencia-se também a dificuldade na recolha de amostras no cilindro E, pelos motivos referidos anteriormente.



6. CONCLUSÃO

O principal objetivo desta dissertação foi estudar a fusão de um material polimérico numa extrusora de duplo-fuso. Foi possível através de várias experiências a validação do dispositivo de monitorização utilizado neste estudo.

O dispositivo de monitorização utilizado neste estudo foi criado com o intuito de possibilitar a visualização da fusão do material dentro do cilindro da extrusora. Deste modo, com o auxílio deste dispositivo foi possível observar as diversas fases do mecanismo de fusão do material, tendo em conta a trajetória que este percorre durante o processamento.

A temperatura interna do material aumenta gradualmente ao longo do seu percurso no interior do dispositivo de monitorização. Este sofre mudanças no seu estado físico, de sólido para parcialmente fundido até se encontrar totalmente no estado fundido. O estado físico do material determina o grau de enchimento das cavidades do dispositivo de monitorização, o que nos permite determinar em que zona do dispositivo a fusão está a ocorrer.

O aumento da velocidade de rotação dos fusos diminui o tempo de residência do material, o que provoca uma diminuição na quantidade de calor fornecida por condução com as paredes do cilindro. Mesmo com maior influência dos esforços mecânicos exercidos sobre o material, a fusão ocorre mais tarde, do que quando se utilizam velocidades mais baixas. Com velocidades mais baixas a quantidade de calor fornecido é suficiente para fundir todo material na área em que se encontra o dispositivo.

O aumento do débito favorece o aumento da temperatura interna do material, pois para além do calor fornecido pelo cilindro existem maiores esforços mecânicos sobre material o que promove um aumento da temperatura. Este aumento não é no entanto bastante significativo.

O aumento do perfil de temperaturas do cilindro promove um aumento da condução de calor, uma vez que a diferença entre a temperatura interna do material fundido e a do bloco de sólidos aumenta. Deste modo a fusão do PP é facilitada, sendo que a viscosidade do material diminui. No entanto as experiências que se focam na influência do perfil de temperaturas não são favoráveis para o estudo da fusão, uma vez que a fusão se inicia antes da zona do dispositivo de monitorização, não sendo possível a visualização completa do processo completo de fusão.



Em suma os objetivos pré estabelecidos para esta dissertação foram atingidos, sendo que a utilização do dispositivo de monitorização foi fulcral uma vez que permitiu uma análise/observação em tempo real do que acontece no interior da extrusora. Foi deste modo validada a eficácia deste dispositivo para estudar o mecanismo de fusão numa determinada zona do cilindro da extrusora.



7. DIFICULDADES E TRABALHO FUTURO

A fase inicial do estudo desenvolvido revelou-se complicada, uma vez que existiram limitações no dispositivo de monitorização.

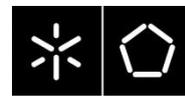
Neste projeto verificou-se que a configuração da extrusora *LEISTRITZ* não é completamente compatível com a do dispositivo de monitorização. A quando a acoplação deste segunda zona da extrusora, verificou-se que não seria possível estudar a fusão do material nos pontos inferiores do dispositivo. O curto espaço entre a localização do dispositivo e o suporte da extrusora não permitiu a observação das cavidades e impediu a recolha de amostras. A solução a este problema obriga a mudanças na montagem da própria extrusora a fim de permitir a utilização completa do dispositivo.

A utilização de temperaturas de processamento muito altas não é indicada para este tipo de dispositivo. Este mecanismo ostentava alguns defeitos, como folgas entre os cilindros existentes e as paredes do mesmo e também no isolamento entre zonas da extrusora. Com o aumento da temperatura ocorre vazamento do material fundido pelas referidas folgas, pelo que o mecanismo de montagem deve ser revisto.

Outra dificuldade deparada neste estudo foi a leitura da temperatura interna do material, sendo que em amostras de pequenas dimensões, a quando da introdução do termopar a leitura poderia induzir erro. Como as amostras eram de reduzidas dimensões, a temperatura interna destas era facilmente influenciada pela temperatura circundante da parede das cavidades. Deste modo este será sempre um problema lidar visto que leitura no material é processo moroso e bastante minucioso, com o objetivo de reduzir ao máximo a percentagem de erro na leitura.

O estudo da fusão em extrusoras de duplo-fuso com rotativas permite responder a várias dúvidas levantadas, sendo que a validação deste protótipo de monitorização nesta dissertação permite alargar a investigação a outros temas. Assim com a reconfiguração do dispositivo de monitorização de modo a reduzir/eliminar as limitações referidas, o estudo em extrusoras de duplo-fuso com rotativas poderá ser mais aprofundado.

Como trabalho futuro, a utilização deste dispositivo de monitorização no estudo do processo de misturas com diferentes polímeros permite verificar como o processo de mistura ocorre neste tipo de extrusoras.



O alargamento do estudo a tempos de residências também se torna fulcral devido à necessidade de conhecimento sobre o comportamento e trajetos percorridos pelos materiais na extrusora.

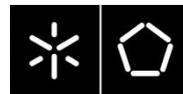


8. REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Covas, "O processo de extrusão e suas aplicações.", Universidade do Minho, Guimarães.
- [2] M. da C. Paiva, "5º Capítulo: Transformação de polímeros Tecnologias de transformação de termoplásticos." Unviversidade do Minho, Guimarães.
- [3] Particle Sciences, "Hot Melt Extrusion." USA, pp. 1–2, 2011.
- [4] J. L. White, "Tecnology of Intermeshing Co-Rotating Twin Screw Extruders," in *Twin Screw Extrusion - Technology and Principles*, Hanser, Ed. Germany, 1991, pp. 196 – 226.
- [5] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion*. Munich, 1990.
- [6] "Janssen, P.B.M. (2007) - Reactive Extrusion Systems. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-4781-X."
- [7] Y. Nakayama, E. Takeda, T. Shigeishi, H. Tomiyama, and Toshihisa Kajiwara, "Melt-mixing by novel pitched-tip kneading disks in a co-rotating twin-screw extruder," *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*; vol. 66, 1, pp. 103–110, 2011.
- [8] J. Hepperle, "Co-rotating twin-screw extruder," *Hanser*, no. 3, pp. 35–45.
- [9] ThermoScientific, "Thermo Scientific Twin-Screw Extruders." 2013.
- [10] N. Sombatsompop and M. Panapoy, "Die geometry effects on the temperature profile measurements of flowing PP melt in a twin-screw extruder." Thailand, pp. 1–9, 2002.
- [11] B. Padmanabhan, "Melting and Mixing Capability Enhancement: Technology Revealed." .
- [12] U. F. de S. Catarina, "PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS," Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 1–47.
- [13] J. L. White, "Experimental Studies of Intermeshing Co-Rotating Twin Screw Extruders," in *Twin Screw Extrusion - Technology and Principles*, Hanser, Ed. Germany, 1991, pp. 254 – 290.
- [14] N. Sombatsompop, M. C. Tan, and A. K. Wood*, "Flow analysis of natural rubber in a capillary rheometer. 1: Rheological behavior and flow visualization in the barrel," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 270–280, 1997.
- [15] R. Haghayeghia, V. Khalajzadehb, M. F. Farahanib, and H. Bahaia, "Experimental and CFD investigation on the solidification process in a co-rotating twin screw melt conditioner," *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 1464–1471, 2010.



- [16] T. Villmow, B. Kretzschmar, and P. Pötschke, "Influence of screw configuration, residence time, and specific mechanical energy in twin-screw extrusion of polycaprolactone/multi-walled carbon nanotube composites," *Composites Science and Technology*, pp. 2045–2055, 2010.
- [17] Y. Wang, *Compounding in co-rotating twin-screw extruders*. UK, 2000.
- [18] D. V. Rosato, *Extruding Plastics - practical processing handbook*. London, 1998.
- [19] B. Mu and M.R.Thompson, "Examining the mechanics of granulation with a hot melt binder in a twin-screw extruder." 2012.
- [20] A. S. Fard and P. D. Anderson, "Simulation of distributive mixing inside mixing elements of co-rotating twin-screw extruders, *Computers & Fluids*, 87, pp. 79–82, 2013.
- [21] Collin, "Laboratory Twin-Screw Kneader." Germany.
- [22] O. S. Carneiro, G. Caldeira, and J. A. Covas, "Flow patterns in twin-screw extruders," *J. Mater. Process. Technol.*, 1999.
- [23] J. K. Lee and C. D. Han, "Evolution of polymer blend morphology during compounding in a twin-screw extruder," *Polymer (Guildf.)*, vol. 41, pp. 1799–1815, 2000.
- [24] T. Nietsch¹, P. Cassagnau¹, and A. Michel¹, "Melt Temperatures and Residence Times in an Extruder by Infrared Spectroscopy," *Int. Polym. Process.*, vol. 12, no. 4, pp. 307–315, 1997.
- [25] Sbarski, Kosior, and Bhattacharya, *Int. Polym. Process.* 1997, pp. 341–345.
- [26] N. Sombatsompop and M. Panapoy, "Effect of screw rotating speed on polymer melt temperature profiles in twin screw extruder," *J. Mater. Sci.* 35, pp. 6131–6137, 2000.
- [27] N. Sombatsompop and A. K. Wood, "Flow analysis of natural rubber in a capillary rheometer. 2: Flow patterns and entrance velocity profiles in the die," in *Polymer Engineering & Science*, 1997, pp. 281–290.
- [28] N. Sombatsompop and M. Panapoy, *Polymer Testing*. 2001, pp. 217–220.
- [29] C. Cramez, "DOE - Introdução ao planeamento de experiências." pp. 1–12, Universidade do Minho, Guimarães.
- [30] ULProspector, "ISPLEN® PP 040 C1E Datasheet." [Online]. Available: <http://plastics.ides.com/datasheet/e158031/isplen-pp-040-c1e>.



ANEXOS



Anexo 1 – Cronograma da dissertação

Tarefas	Duração (semanas)	2014																											
		Janeiro				Fevereiro				Março				Abril				Maio				Junho				Julho			
		1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
1 - Plano de trabalho e estado da arte	6																												
2 - Seleção de materiais poliméricos	1																												
3 - Definição dos parâmetros de processamento	1																												
4 - Inserção do dispositivo de monitorização	1																												
5 - Processamento	6																												
6- Análise das amostras recolhidas	3																												
7 - Elaboração do relatório de tese	12																												

Figura 24 - Cronograma da dissertação.



Anexo 2 – Planeamento de experiências

O planeamento de experiências é uma abordagem que permite compreender melhor o processo, neste caso a extrusão, e determinar os parâmetros que afetam o desempenho final do filme. Para realizar experiências é importante ter em conta a experimentação fatorial:[29]

Fator: variável ou parâmetro no processo que é modificado numa experiência;

Nível: valor do fator na experiência;

Códigos: símbolos utilizados para representar os níveis (+ e -);

Resposta: medição que caracteriza o funcionamento do processo;

Fatorial completo: experiência projetada que comprova todas as combinações possíveis de fatores ou níveis.

De modo a facilitar o planeamento utiliza-se as matrizes ortogonais uma vez que estuda mais fatores com menos experiências, sendo que a ortogonalidade permite a avaliação independente dos fatores.

O método mais utilizado para o planeamento de experiências é o método de Taguchi. Este método cria um sistema eficiente na condução de experiências uma vez que permite determinar o conjunto ótimo de parâmetros do projeto. Como já referido anteriormente, o método usa matrizes ortogonais, que reduzem significativamente o número de experiências. [29]Nestas matrizes, o número de colunas representa o número máximo de fatores e, o número de linhas representa o número de experiências. Deste modo, o método de Taguchi segue o seguinte procedimento:

Determinação de fatores e níveis da experiência;

Os fatores a ter em conta para este plano de experiências são os seguintes:

A – Velocidade de rotação dos fusos;

B – Débito;

C – Temperaturas do cilindro.



E, os níveis referentes a cada fator são os seguintes:

Tabela 14 - Fatores e respetivos níveis.

Experiências	Nível														
	--					Experiência de referência					+				
A	100 rpm					150 rpm					200 rpm				
B	1,5 kg/h					3 kg/h					6 kg/h				
C	Zona 1 190	Zona 2 200	Zona 3 210	Zona 4 220	Zona 5, 6, 7, 8 220	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5, 6, 7, 8 220	Zona 1 200	Zona 2 210	Zona 3 220	Zona 4 220	Zona 5, 6, 7, 8 220

É de referir que todos os fatores são independentes entre si, deste modo, os valores dos respetivos níveis são determinados em função de acordo com a sua influência na fusão dos polímeros.

Determinação de interações

Consiste em determinar os parâmetros que exercem influência sobre o fenómeno em estudo. Como referido anteriormente, os fatores são independentes, por isso, as interações mais relevantes para o estudo são AxB e AxC.

Seleção da matriz ortogonal

O estabelecimento do plano de experiências relaciona o número de fatores (n) com o número de níveis (k), através da fórmula: k^n . Sendo que são 3 fatores e 2 níveis: $2^3 = 8$ Experiências. A matriz de Taguchi a ser utilizada é a L_8 , em que as colunas (7) são referentes aos fatores e as linhas (8) serão representadas pelo número de experiências.

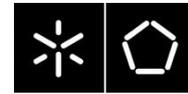


Tabela 15 - Matriz de Taguchi.

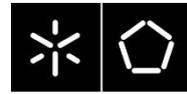
Exp.	1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	-	-	+	-
3	+	-	-	+	-	-	+
4	+	+	-	-	+	-	-
5	-	+	+	+	-	-	-
6	-	-	+	-	+	-	+
7	-	-	-	+	+	+	-
8	-	+	-	-	-	+	+

Atribuição dos fatores e interações às colunas

A atribuição dos fatores e interações dos mesmos é feita através da tabela triangular, uma vez que esta permite determinar a coluna respetiva de cada fator.

Tabela 16 - Tabela triangular L8 (interações).

colunas	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2	-	1	6	7	4	5
3	-	-	7	6	5	4
4	-	-	-	1	2	3
5	-	-	-	-	3	2
6	-	-	-	-	-	1
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-



Deste modo, a atribuição obtida é a seguinte:

Tabela 17 - Matriz de Taguchi L_8 .

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	Erro
Exp.	1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	-	+	+	-	-
4	+	+	+	-	-	-	-
5	-	+	-	+	-	+	-
6	-	-	+	-	+	+	-
7	-	-	+	+	-	-	+
8	-	+	-	-	+	-	+

Execução das experiências

As sete experiências a realizar são as seguintes:

- Experiência de referência;
- Experiência de referência com A+;
- Experiência de referência com A-;
- Experiência de referência com B+;
- Experiência de referência com B-;
- Experiência de referência com C+;
- Experiência de referência com C-;

Com o objetivo de facilitar a realização das experiências de acordo com os parâmetros em estudo, estas têm a seguinte ordem de realização:

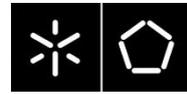


Tabela 18 - Ordem de realização das experiências.

Experiência	Condição							
1	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
2	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 1,5 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
3	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 6 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
4	Velocidade do parafuso: 100 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
5	Velocidade do parafuso: 200 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 180	Zona 2 190	Zona 3 190	Zona 4 200	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
6	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 190	Zona 2 200	Zona 3 210	Zona 4 220	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220
7	Velocidade de parafuso: 150 rpm							
	Débito: 3 kg/h							
	Temperaturas (°C):	Zona 1 200	Zona 2 210	Zona 3 220	Zona 4 220	Zona 5 220	Zona 6 220	Zona 7 220

Interpretação dos resultados – determinação de quais os fatores com maior influência no problema (conjunto ótimos de fatores);

Execução da experiência de confirmação – verifica se os fatores e níveis seleccionados proporcionam os resultados pretendidos.



Anexo 3 – Ficha técnica ISPLEN PP 040 C1E [30]

ISPLEN® PP 040 C1E

Polypropylene Homopolymer
REPSOL YPF

PROSPECTOR®
www.lulu.com.br

Technical Data

Product Description

Isplen® PP 040 C1E is a medium melt flow rate polypropylene homopolymer specially formulated and adapted for extrusion processes and particularly in thermforming due to its high transparency and high stiffness. It is nucleated and the properties remain excellent high rigid fractions. This makes the grade recommendable in barrier sheet packaging application.

TYPICAL APPLICATIONS

- In extrusion processes such as:
- Mainly in sheet extrusion and thermforming.
 - Coextrusion in rigid packaging.
 - Others are monofilament and weaving tapes.

Recommended melt temperature range from 190 to 250°C. Processing conditions should be optimized for each production line.

General

Material Status	• Commercial Active
Literature ¹	• Processing - Injection Molding (English) • Technical Database I (English)
Search for UL Yellow Card	• REPSOL YPF
Availability	• Europe • North America
Additive	• Nucleating Agent
Features	• Food Contact Acceptable • High Stiffness • High Clarity • Medium Flow • Nucleated
Uses	• Monofilaments • Sheet • Packaging • Tape
Agency Ratings	• EU Food Contact, Unspecified Rating
Processing Method	• Coextrusion • Filament Extrusion • Extrusion • Sheet Extrusion • Thermforming

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Density	0.905 g/cm ³	ISO 1183
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16kg)	3.0g/10 min	ISO 1133
Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Flexural Modulus	1800 MPa	ISO 178
Film	Nominal Value Unit	Test Method
Film Thickness - Tested	1000 µm	
Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength (23°C)	3.5 kJ/m ²	ISO 179
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature @ 0.45 MPa, Unannealed	50.0°C	ISO 75-2/B
Wet Softening Temperature	153°C	ISO 305/A
Optical	Nominal Value Unit	Test Method
Haze (1000 µm)	21 %	ASTM D 1003
Extrusion	Nominal Value Unit	Test Method
Melt Temperature	190 to 250°C	

Notes

¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² Typical properties; these are not to be construed as specifications.

1 of 2



UL is the UL logo and trademark of UL LLC ©2019. All Rights Reserved.
UL Prospector | 866-781-4648 or 855-770-6277 | www.ulprospector.com

The information presented on this website is controlled by UL Prospector from the producer of the material. UL Prospector neither assumes nor warrants the accuracy of this data. UL Prospector assumes no responsibility for the accuracy and/or any changes that appear in this material selector, and policies are subject to the material supplier.

Documento Técnico | Setembro de 2019 | 26 p
Criado por Prospector | 14/05/2017
Last Update: 24/09/2019

Figura 25 - Ficha técnica do polipropileno ISPLEN PP 040 C1E



Anexo 4 - Confirmação dos resultados da experiência 1

Tabela 19 - Confirmação dos resultados da experiência 1.

Experiência 1_Confirmação dos resultados										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	158,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		Sem amostras		158,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
2	160,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	160,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	159,7 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	161,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	154,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
3	164,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	166,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	164,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	164,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
4	167,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	170,3 °C	material fundido, cavidade cheia	166,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	171,3 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	
5	171,7 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	171,2 °C	material fundido, cavidade cheia	173,2 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras		Sem amostras	
6	174,9 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	173,9 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		173,1 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	166,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia



Anexo 5 - Confirmação dos resultados da experiência 2

Tabela 20 - Confirmação dos resultados da experiência 2.

Experiência 2_Confirmação dos resultados									
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C	Cilindro D		Cilindro E	
1	Sem amostras		Sem amostras		Sem amostras	158,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
2	155,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	159,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	160,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
3	160,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	162,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	162,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	160,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
4	162,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	165,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	163,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
5	165,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras		Sem amostras	164,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
6	168,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	173,1 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	Sem amostras	171,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	



Anexo 6 - Confirmação dos resultados da experiência 3

Tabela 21 - Confirmação dos resultados da experiência 3.

Experiência 3_Confirmação dos resultados									
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C	Cilindro D		Cilindro E	
1	158,3 °C	material sólido, cavidade cheia	Sem amostras		Sem amostras	156,5 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia	142,1 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
2	160,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	160,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	158,8 °C	material sólido, cavidade cheia	144,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
3	164,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	162,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	161,9 °C	material sólido, cavidade cheia	Sem amostras	
4	166,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	166,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	163,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	170,8 °C	material fundido, cavidade cheia	170,1 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	167,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
6	173,9 °C	material fundido, cavidade cheia	173,4 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	170,5 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	158,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia



Anexo 7 - Confirmação dos resultados da experiência 4

Tabela 22 - Confirmação dos resultados da experiência 4.

Experiência 4_Confirmação dos resultados										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	160,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		Sem amostras		161,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	158,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
2	163,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	160,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		164,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	160,9 °C	material sólido, cavidade parcialmente cheia
3	165,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	162,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	162,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	167,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
4	168,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	165,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	164,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	170,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	170,5 °C	material fundido, cavidade cheia	170,6 °C	material fundido, cavidade cheia	167,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	171,8 °C	material fundido, cavidade cheia	161,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia
6	174 °C	material fundido, cavidade cheia	175,7 °C	material fundido, cavidade cheia	173,2 °C	material fundido, cavidade cheia	173,4 °C	material fundido, cavidade cheia	164,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia



Anexo 8 - Confirmação dos resultados da experiência 5

Tabela 23 - Confirmação dos resultados da experiência 5.

Experiência 5_Confirmação dos resultados										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	Sem amostras		Sem amostras		157,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	159,3 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	154,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
2	160,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	160,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	159,8 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	160,6 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia	156,4 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
3	164,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	163,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	161,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras		Sem amostras	
4	166,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	165,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	162,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	169,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
5	167,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	169,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	163,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	171,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras	
6	173,3 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	174,9 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	164,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia	Sem amostras		172,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia



Anexo 9 - Confirmação dos resultados da experiência 6

Tabela 24 - Confirmação dos resultados da experiência 6.

Experiência 6_Confirmação dos resultados										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	158,3 °C	material sólido, cavidade cheia	162,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras		160,3 °C	material sólido, cavidade cheia	151,2 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
2	161,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	167,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	170,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	162,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	156,7 °C	material sólido, cavidade parcialmente vazia
3	163,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	171,8 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	174,8 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	166,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
4	165,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	177,3 °C	material fundido, cavidade cheia	177,7 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	174,8 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	171,2 °C	material fundido, cavidade cheia	182,8 °C	material fundido, cavidade cheia	181,6 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	179,9 °C	material fundido, cavidade cheia	167,4 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia
6	176,8 °C	material fundido, cavidade cheia	188,6 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		182,8 °C	material fundido, cavidade cheia	172,1 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente vazia



Anexo 10 - Confirmação dos resultados da experiência 7

Tabela 25 - Confirmação dos resultados da experiência 7.

Experiência 7_Confirmação dos resultados										
N.º amostra	Cilindro A		Cilindro B		Cilindro C		Cilindro D		Cilindro E	
1	170,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	175,8 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		171,9 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
2	174,2 °C	material fundido, cavidade cheia	177,4 °C	material fundido, cavidade cheia	165,6 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	175,7 °C	material parcialmente fundido, cavidade cheia	160,3 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia
3	175,7 °C	material fundido, cavidade cheia	185,4 °C	material fundido, cavidade cheia	166,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia	177,8 °C	material fundido, cavidade cheia	161,2 °C	material parcialmente fundido, cavidade parcialmente cheia
4	179,2 °C	material fundido, cavidade cheia	186,5 °C	material fundido, cavidade cheia	174,7 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	178,3 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	
5	183,5 °C	material fundido, cavidade cheia	191,1 °C	material fundido, cavidade cheia	187,3 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia	181,2 °C	material fundido, cavidade cheia	170,5 °C	material fundido, cavidade parcialmente cheia
6	187,4 °C	material fundido, cavidade cheia	196,7 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras		184,2 °C	material fundido, cavidade cheia	Sem amostras	