

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Miguel Simões Dias

Moldação por injeção de
componentes com gradiente de
transparência

Moldação por injeção de componentes com
gradiente de transparência

Rui Miguel Simões Dias

UMinho | 2025

Janeiro de 2025



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Miguel Simões Dias

Moldação por injeção de componentes com gradiente de transparência

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Dr.^a Olga Machado Sousa Carneiro

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual
CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste projeto representa um marco significativo na minha vida académica e pessoal, e não poderia ter sido alcançada sem o apoio de diversas pessoas que, de diferentes formas, contribuíram para este percurso.

Em primeiro lugar quero agradecer à Professora Doutora Olga Carneiro pela orientação incansável, o conhecimento partilhado e a paciência ao longo do desenvolvimento deste projeto. O seu profissionalismo e dedicação foram fundamentais para o meu crescimento académico. Ao Professor Doutor Fernando Duarte, expresso também a minha gratidão pelo apoio constante, disponibilidade e auxílio em todas as fases do projeto.

Expresso a minha mais profunda gratidão à minha família – ao meu pai, à minha mãe e aos meus irmãos pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento constante.

Aos meus companheiros de universidade, os “Turtles”, agradeço por transformarem os últimos cinco anos numa experiência inesquecível. O vosso companheirismo, sentido de humor e amizade tornaram esta jornada numa das mais memoráveis da minha vida.

Um agradecimento especial aos meus amigos de Joane, aqueles que partilham comigo o dia a dia e que, de forma tão natural, tornam cada momento mais leve e especial.

Acima de tudo, quero agradecer à minha namorada, Carolina, por todo o carinho, compreensão e apoio. Acreditaste sempre em mim, estiveste presente nos bons e maus momentos, e ajudaste-me a manter o foco e a determinação.

Agradeço ainda a todos os colegas, professores e funcionários da Universidade do Minho que, de alguma forma, contribuíram para o meu percurso académico.

Por fim, agradeço a Deus pela bênção de ter conhecido todas estas pessoas e pela oportunidade de ter vivido todas as experiências e aprendizagens que moldaram este capítulo da minha vida.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio, nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Moldação por injeção de componentes com gradiente de transparência

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de facilitar a reciclagem de produtos plásticos motivaram o desenvolvimento deste projeto. Este visa a produção, através de moldação por injeção, de componentes com gradiente de transparência, utilizando um único material. O objetivo principal é reduzir a utilização de componentes multimaterial, simplificando o processo de reciclagem e promovendo uma economia circular. O estudo focou-se na utilização do polipropileno (PP). A técnica proposta baseia-se na introdução de gradientes térmicos durante o processo de injeção, utilizando um molde protótipo com zonas de refrigeração independentes. Esta abordagem permite controlar a taxa de arrefecimento em diferentes zonas das peças injetadas, induzindo variações na cristalização e resultando em peças com diferentes níveis de opacidade. As amostras injetadas foram submetidas a ensaios de turbidez, calorimetria diferencial de varrimento (DSC) e microscopia de luz polarizada. Os resultados indicaram que o tipo de material dos insertos da cavidade moldante (aço ou alumínio), bem como a espessura dos provetes, influenciam o gradiente de turbidez. A investigação demonstrou que o arrefecimento rápido, induzido pelos insertos de alumínio, resultou numa menor cristalização e, consequentemente, maior transparência, enquanto os insertos de aço promoveram maior opacidade devido ao arrefecimento mais lento. Este projeto proporciona uma nova abordagem para a produção de componentes plásticos com propriedades óticas diferenciadas, contribuindo para o design sustentável de produtos monomaterial, com benefícios claros na eficiência de reciclagem e redução do desperdício.

Palavras-chave: Cristalização; Gradiente de transparência; Moldação por injeção; Polipropileno.

ABSTRACT

Injection molding of components with a transparency gradient

The growing concern with sustainability and the need to facilitate the recycling of plastic products motivated the development of this project, which aims to inject components with a transparency gradient, using a single material. The primary objective is to reduce the use of multi-material components, promoting a circular economy and simplifying the recycling process.

The study focused on the use of polypropylene (PP). The proposed technique is based on inducing thermal gradients during the injection process, using a prototype mold with independent cooling zones. This approach allows controlling the cooling rate in different areas of the injected parts, inducing variations in crystallization and resulting in parts with different levels of opacity.

The injected samples were subjected to haze tests, differential scanning calorimetry (DSC), and polarized light microscopy. The results indicated that the type of material used in the molding inserts (steel or aluminum), as well as the thickness of the specimens, influenced the haze gradient. The investigation demonstrated that rapid cooling induced by aluminum inserts resulted in lower crystallization and, consequently, greater transparency, while steel inserts promoted greater opacity due to slower cooling. This project provides a new approach to producing plastic components with differentiated optical properties, contributing to the sustainable design of mono-material products, with clear benefits for recycling efficiency and waste reduction.

Keywords: Crystallization; Injection molding; Polypropylene; Transparency gradient.

ÍNDICE

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de Integridade	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
1. Introdução	12
1.1 Enquadramento.....	12
1.2 Objetivos	13
1.3 Estrutura da dissertação	13
2. Estado da arte	15
2.1 Polipropileno (PP) e Cristalização	15
2.2 Efeitos da cristalinidade nas propriedades óticas e de processamento	17
3. Materiais selecionados e Molde Protótipo	18
4. Metodologia e Procedimento Experimental	22
4.1 Metodologia.....	22
4.2 Produção de provetes	23
4.2.1 Calibração da câmara térmica e do molde	23
4.2.2 Injeção de provetes	25
4.3 Caracterização dos provetes	27
5. Apresentação e discussão dos resultados.....	30
5.1 Calibração da câmara térmica e do molde	30
5.2 Injeção	34

5.3	Caracterização.....	40
6.	Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.....	50
	Referências	53
	Anexos	55

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Unidade repetitiva do PP</i>	15
<i>Figura 2 - Configurações espaciais do PP [2]</i>	15
<i>Figura 3 - Formas existentes do polipropileno</i>	16
<i>Figura 4 - Estruturas dos copolímeros de PP: P - Polipropileno; E – Etileno</i>	16
<i>Figura 5 - Molde protótipo: (a) parte fixa; (b) parte móvel</i>	19
<i>Figura 6 - Insertos centrais maquinados para a parte fixa (a, b, c) e parte móvel (d, e, f) do molde: (a) e (d) insertos em aço; (b) e (e) insertos em alumínio; (c) e (f) insertos em cobre berílio.</i>	20
<i>Figura 7 - Insertos laterais em aço: (a) parte móvel do molde; (b) parte fixa do molde</i>	20
<i>Figura 8 - Fluxograma geral da metodologia</i>	22
<i>Figura 9 - FLIR i7 Thermal Imaging Camera</i>	23
<i>Figura 10 - Setup da calibração da câmara térmica: 1- placa de aquecimento; 2- termopar embutido; 3- termopar de contacto; 4 câmara térmica; 5- fita mate</i>	23
<i>Figura 11 - Parte fixa do molde preparada para calibração</i>	24
<i>Figura 12 - Priamus DAQ</i>	26
<i>Figura 13 - Esquema das diferentes zonas consideradas na caracterização dos provetes: E – Zona esquerda;</i>	27
<i>Figura 14 - Ilustração do corte dos provetes e preparação das amostras: azul - amostras para DSC; vermelho - amostras para microscopia ótica.</i>	28
<i>Figura 15 - Curva típica de um ensaio de DSC [3]</i>	28
<i>Figura 16 - Comparação da temperatura da fita lida com o termopar com a lida pela câmara térmica</i>	32
<i>Figura 17 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço 1mm 30-90-30)</i>	35
<i>Figura 18 - Imagens térmicas correspondentes à configuração Aço 1mm 90-30-90: (a) imediatamente depois de desmoldar; (b) 2 minutos depois de desmoldar; (c) 4 minutos depois de desmoldar; (d) após atingir uma temperatura máxima de 30 °C.</i>	37
<i>Figura 19 - Variação da temperatura das zonas identificadas nos provetes em função do tempo: (a) Aço 1mm 90-30-90; (b) Alumínio 2mm 90-30-90; (c) Aço 1mm 30-90-30; (d) Alumínio 2mm 30-90-30.</i>	39

<i>Figura 20 - Turbidez média dos provetes: (a) Inserto de Aço, Espessura 1 mm; (b) Inserto de Aço, Espessura 2 mm; (c) Inserto de Alumínio, Espessura 1 mm; (d) Inserto de Alumínio, Espessura 2 mm</i>	42
<i>Figura 21 - Efeito do valor de turbidez no desempenho ótico dos provetes injetados</i>	45
<i>Figura 22 - Curvas de DSC dos provetes selecionados: (a) Provetes A e B; (b) Provetes B e C</i>	47
<i>Figura 23 - Imagens obtidas por microscopia de luz polarizada: (a) PP_B_e Ampliação: 10x; (b) PP_D_c Ampliação: 4x; (c) PP_D_c Ampliação: 40x; (d) PP_B_c Ampliação: 4x. Nota: 1- casca orientada; 2- sobre-casca; 3- zona de esferulites bem desenvolvidas; 4- marcas promovidas pelo micrótomo</i>	49
<i>Figura 24 - Efeito da turbidez no desempenho ótico dos provetes: Aço 1mm 30-90-30</i>	57
<i>Figura 25 - Efeito da turbidez no desempenho ótico dos provetes: Aço 1mm 90-30-90</i>	57
<i>Figura 26 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_A_c</i>	58
<i>Figura 27 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_A_d</i>	58
<i>Figura 28 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_B_c</i>	59
<i>Figura 29 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_B_e</i>	59
<i>Figura 30 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_C_c</i>	60
<i>Figura 31 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_C_e</i>	60
<i>Figura 32 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_D_c</i>	61
<i>Figura 33 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_D_d</i>	61
<i>Figura 34 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço 1mm 90-30-90)</i>	62
<i>Figura 35 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio 2mm 90-30-90)</i>	62
<i>Figura 36 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio 2mm 30-90-30)</i>	63
<i>Figura 37 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço 2mm 90-30-90)</i>	63
<i>Figura 38 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço 2mm 30-90-30)</i>	64
<i>Figura 39 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio 1mm 90-30-90)</i>	64
<i>Figura 40 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio 1mm 30-90-30)</i>	65

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Parâmetros do processo de injeção</i>	25
<i>Tabela 2 – Configuração dos insertos e suas temperaturas</i>	26
<i>Tabela 3 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (3º ensaio)</i>	30
<i>Tabela 4 – Média das diferenças entre $T_{\text{câmara}}$ e T_{fita} para diferentes intervalos de temperatura.</i>	31
<i>Tabela 5 - Resultados da Calibração Térmica do Molde</i>	33
<i>Tabela 6 - Temperatura média de T_1 e T_2 durante o processo de injeção.....</i>	35
<i>Tabela 7 - Diferença média de turbidez, considerando apenas a maior diferença para cada condição</i>	43
<i>Tabela 8 - Grau de cristalinidade das amostras e respetiva diferença entre provetes</i>	48
<i>Tabela 9 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (2º ensaio)</i>	55
<i>Tabela 10 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (3º ensaio)</i> <i>.....</i>	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente os plásticos desempenham um papel crucial na sociedade, proporcionando inovações e melhorias na qualidade de vida. A sua versatilidade e disponibilidade levaram a um aumento significativo no uso de produtos plásticos, impulsionando setores diversos. Este aumento do consumo resultou numa crescente preocupação ambiental devido à poluição gerada. Assim, a gestão responsável dos resíduos plásticos tornou-se uma prioridade. No entanto, a complexidade de produtos multimaterial e a falta de infraestruturas adequadas, verificada em muitas regiões, têm dificultado a eficácia da reciclagem, levando a um aumento da acumulação de plásticos em ambientes inadequados. A procura por soluções inovadoras e práticas, juntamente com uma consciencialização global, é essencial para enfrentar os desafios ambientais provocados pelo uso abundante de plásticos na sociedade atual. Neste sentido, este projeto visa facilitar a reciclagem e contribuir para uma economia circular, estudando a viabilidade de utilizar um único material na produção de peças com um gradiente de transparência, moldadas por injeção.

O projeto para dissertação de mestrado "Moldação por injeção de componentes com gradiente de transparência" surge no seguimento de uma investigação focada na redução do número de materiais distintos utilizados em componentes multifuncionais, na qual se avaliou o potencial de graus de polipropileno (PP) para moldação por injeção na produção de peças com gradientes de transparência. Este efeito é obtido através do uso de um molde de injeção desenvolvido com 3 zonas de refrigeração e controlo de temperatura independentes, de modo a induzir taxas de arrefecimento diferentes em zonas diferentes das peças moldadas.

Este trabalho surge na sequência de um anterior em que foram identificados vários tipos de polipropileno (homopolímeros e copolímeros) e injetados sob diversas condições térmicas de processamento, nomeadamente, temperatura de injeção e temperatura do molde, num molde convencional. O intuito foi variar a taxa de arrefecimento, variando assim a taxa de crescimento das esferulites e, eventualmente, a presença/ausência de zonas cristalinas [1]. As propriedades óticas das peças injetadas foram posteriormente caracterizadas, sendo os graus de PP mais promissores identificados e selecionados para trabalhos subsequentes, nomeadamente o grau DR 7037.01 (um copolímero), que apresentou a gama de turbidez mais ampla, e o PP070G2M (um homopolímero), que exibiu o valor mais elevado de turbidez

[1]. Os resultados dessa investigação deram origem ao artigo “From Transparent to Opaque: A Route towards Multifunctional Parts Injected with a Single Material”.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade da utilização de um único material na produção de peças moldadas por injeção realçando um gradiente de transparência. Para alcançar este objetivo, serão conduzidos ensaios experimentais sob diversas condições de processamento, com recurso a um molde protótipo já desenvolvido, visando avaliar os efeitos destas variáveis nas propriedades finais das amostras produzidas. A análise sistemática e detalhada das amostras obtidas permitirá identificar as condições mais promissoras para uma produção eficiente e consistente de peças com gradiente de transparência. Desta forma, este estudo contribuirá para o avanço do conhecimento na área de moldação por injeção, fornecendo detalhes valiosos para a otimização do processo, aprimoramento das propriedades dos produtos finais e, principalmente, contribuirá para a melhoria do fim de vida de produtos que de outro modo seriam constituídos por dois materiais distintos, incitando uma economia circular.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação organiza-se em sete capítulos, abordando de forma sistemática as diferentes fases e objetivos do estudo desenvolvido.

O Capítulo 1, "Introdução", contextualiza o trabalho, descrevendo a motivação para a realização deste projeto, os objetivos a atingir, bem como o enquadramento do tema no contexto da moldação por injeção de componentes com gradiente de transparência e a estrutura da dissertação. No Capítulo 2, "Estado da Arte", é apresentada uma revisão detalhada das temáticas relevantes para o estudo. São explorados tópicos como as propriedades do polipropileno (PP) e os efeitos da cristalinidade nas mesmas. O Capítulo 3, "Materiais selecionados e Molde Protótipo", descreve as características dos materiais selecionados e as especificações técnicas do molde protótipo utilizado no estudo. O Capítulo 4, "Metodologia e Procedimento Experimental", detalha as metodologias aplicadas ao longo do estudo, incluindo o processo de produção dos provetes, a calibração dos equipamentos e as técnicas de caracterização térmica, ótica e estrutural. No Capítulo 5, "Apresentação e discussão dos resultados", são analisados os dados obtidos, incluindo os efeitos das condições de processamento nas propriedades dos provetes e a influência das configurações do molde na obtenção de gradientes de transparência. O Capítulo 6, "Conclusões e

sugestões de trabalhos futuros", sintetiza os principais resultados alcançados, destacando o impacto do estudo e propondo direções para investigações futuras no âmbito da moldação por injeção monomaterial. Por fim, o Capítulo 7, "Referências", apresenta a lista completa das fontes consultadas e utilizadas ao longo da dissertação.[1]

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Polipropileno (PP) e Cristalização

O polipropileno é uma poliolefina obtida através de polimerização por adição do propileno, um hidrocarboneto saturado composto por átomos de hidrogênio e carbono e um grupo funcional metilo (figura 1).

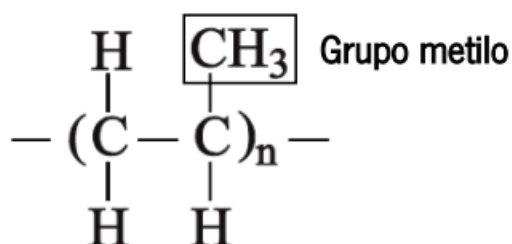


Figura 1- Unidade repetitiva do PP

Dependendo do mecanismo e das condições de polimerização, o PP pode adotar três tipos de configuração espacial das unidades repetitivas (taticidade): isotática, sindiotática e atática (figura2).

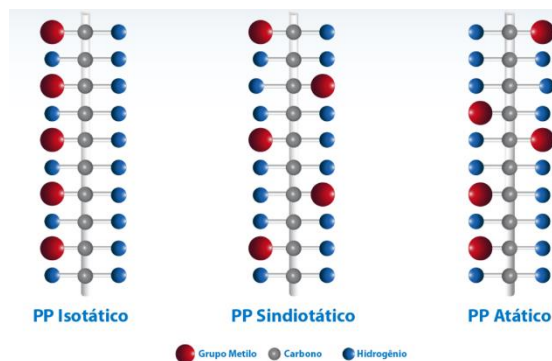


Figura 2 - Configurações espaciais do PP [2]

A disposição do grupo metilo na cadeia polimérica influencia diretamente as características do material, nomeadamente a sua cristalinidade e viscosidade. A cristalização é um fenómeno fundamental no comportamento do polipropileno e desempenha um papel crucial na determinação das propriedades finais do produto moldado. A cristalização refere-se à organização molecular de uma estrutura cristalina, resultante da transição de uma fase amorfa para uma fase ordenada e regular estando então diretamente relacionada à estrutura molecular.

Comercialmente, o PP existe sobre as seguintes formas esquematizadas:

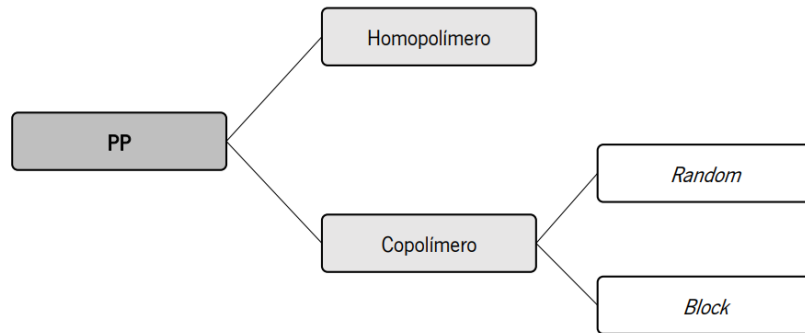


Figura 3 - Formas existentes do polipropileno

O homopolímero é a forma mais comum e utilizada por ser a mais barata, representando a forma mais convencional do PP. Possui esta designação por apenas resultar da polimerização de monómeros propileno. Por outro lado, o copolímero possui a inserção de grupos etileno na sua constituição. A presença deste grupo funcional nas cadeias poliméricas reduz o nível de compactação entre estas, aquando do arrefecimento, reduzindo o grau de cristalização do polímero e o tamanho das esferulites formadas. Assim, e comparativamente com o homopolímero, o copolímero possui menor módulo, dureza, Tg, ponto de fusão e maior transparência [3].

O copolímero existe sob duas formas: aleatório (random) ou bloco (block), cujas estruturas se encontram representadas na figura 4.

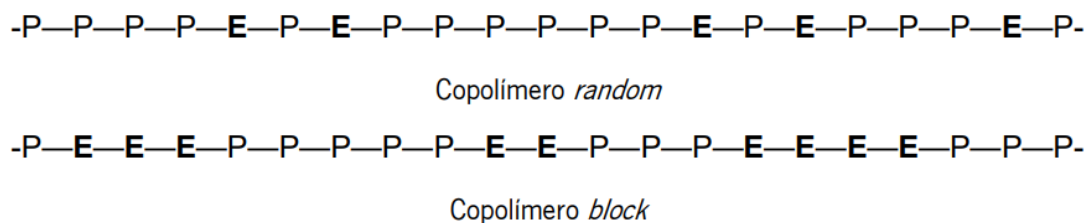


Figura 4 - Estruturas dos copolímeros de PP: P - Polipropileno; E - Etileno.

O copolímero aleatório tem grupos de etileno dispersos aleatoriamente na sua cadeia, traduzindo-se numa diminuição da cristalização e melhor resistência ao impacto. Já o copolímero em bloco possui dispersos na sua constituição grupos etileno agrupados, ou em blocos, fazendo com que apresente mais grupos etileno que o aleatório. Isto torna o material mais rígido e menos frágil, demonstrando ótima resistência ao impacto.

2.2 Efeitos da cristalinidade nas propriedades óticas e de processamento

A relação entre cristalinidade e transparência em polímeros é inversamente proporcional. Polímeros amorfos, com baixa cristalinidade, geralmente apresentam maior transparência, pois a falta de uma estrutura cristalina ordenada permite que a luz seja transmitida através do material de maneira mais eficiente. Por outro lado, polímeros semi-cristalinos, com maior organização molecular, tendem a ser menos transparentes devido à dispersão da luz na região cristalina. A estrutura cristalina do PP é afetada não só pela taxa de arrefecimento, ou pelas condições de processamento no geral, mas também por parâmetros moleculares como a massa molecular (M_w). As diferentes configurações (isotacticidade) ou a adição de pequenas unidades monoméricas e agentes nucleantes podem também influenciar a estrutura final [4]. De acordo com a literatura, podem ser usadas diversas abordagens para otimizar a transparência do polipropileno controlando a sua cristalização. Estas incluem o aumento da fase amorfa por síntese química e a redução do tamanho das esferulites através da incorporação de agentes nucleantes. Esta última destaca-se como a abordagem mais eficaz para conferir transparência ao PP, com estudos indicando uma redução significativa de turbidez com apenas 0,1–1,0% de incorporação desses agentes [5].

Na moldação por injeção, compreender os fatores que influenciam a cristalização é essencial para alcançar os resultados desejados. A temperatura desempenha um papel crucial no fenómeno de cristalização, pois influencia a mobilidade das moléculas e o desenvolvimento da estrutura cristalina. A taxa de arrefecimento desempenha um papel crucial nesse processo. Taxas de arrefecimento rápidas promovem uma solidificação rápida, levando à formação de uma estrutura cristalina pouco organizada [6, 7]. Isto deve-se ao facto de, a baixas temperaturas, a mobilidade molecular ser mais reduzida dificultando o arranjo das moléculas. Estudos prévios [1] mostraram que, para polipropileno injetado, as diferenças de turbidez observadas podem ser atribuídas não apenas ao tamanho das esferulites, mas também à presença de camadas internas com diferentes birrefringências e índices de refração. Estas camadas, formadas durante o arrefecimento, evidenciam o impacto das condições de processamento, como a temperatura do molde e a taxa de arrefecimento, na estrutura interna final e, consequentemente, nas propriedades óticas do material.

A temperatura de injeção e a espessura da peça influenciam positivamente o grau de cristalinidade à medida que os seus valores aumentam [6, 8]. O aumento da temperatura de injeção favorece a mobilidade das moléculas e o aumento da espessura implica um prolongamento do tempo de arrefecimento. Todos estes fatores permitem que a fase cristalina fique mais desenvolvida traduzindo-se num maior grau de cristalinidade.

3. MATERIAIS SELECIONADOS E MOLDE PROTÓTIPO

Os dois graus de polipropileno destacados para o desenvolvimento deste projeto foram o PP070G2M e o DR 7037.01, no entanto, de modo a simplificar o estudo, apenas um deles foi selecionado para avançar para realização do projeto. PP070G2M é um polipropileno homopolímero (hPP) produzido pela empresa Repsol e é o tipo de PP mais utilizado para fins gerais. Na sua constituição apresenta apenas monómeros de propileno. As principais aplicações incluem a indústria da embalagem alimentar. Apresenta uma fluidez média, apresentando um valor de MFI de 12 g/10min, e é caracterizado por boas propriedades de fluidez que permitem encher o molde mais facilmente. Os produtos fabricados com este grau de PP têm uma excelente resistência química [9]. O material eleito para prosseguir o estudo foi o DR7037.01, uma vez que este apresenta a mais vasta gama de variação de turbidez quando comparado com o outro polipropileno selecionado para o projeto [1]. Este é caracterizado por uma boa rigidez e resistência ao impacto e principalmente pelas suas ótimas propriedades óticas e processabilidade [10]. O DR 7037.01 é um polipropileno copolímero aleatório (rPP), fabricado pela empresa Braskem. Este possui um valor de MFI de 23 g/10min e foi desenvolvido para moldação por injeção de parede fina [10]. As diferenças nas propriedades destes dois tipos de polipropileno refletem-se em diferentes comportamentos aquando do processo de cristalização. Daí ser possível observar, em estudos já realizados, que o homopolímero evidenciou o valor mais elevado de turbidez e o copolímero, a gama de turbidez mais ampla [1].

Para o desenvolvimento do presente estudo, foi concebido e utilizado um molde de injeção protótipo especialmente projetado para a produção de provetes com gradiente de transparência. Este molde, ilustrado na figura 5, desempenha um papel crucial na investigação, permitindo a introdução de diferentes condições térmicas durante o processo de injeção, fator essencial para alcançar as variações óticas desejadas nas peças.

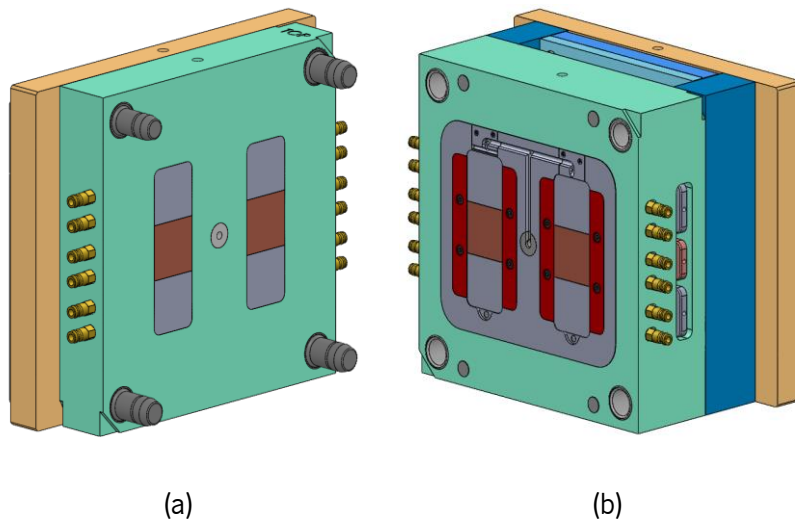
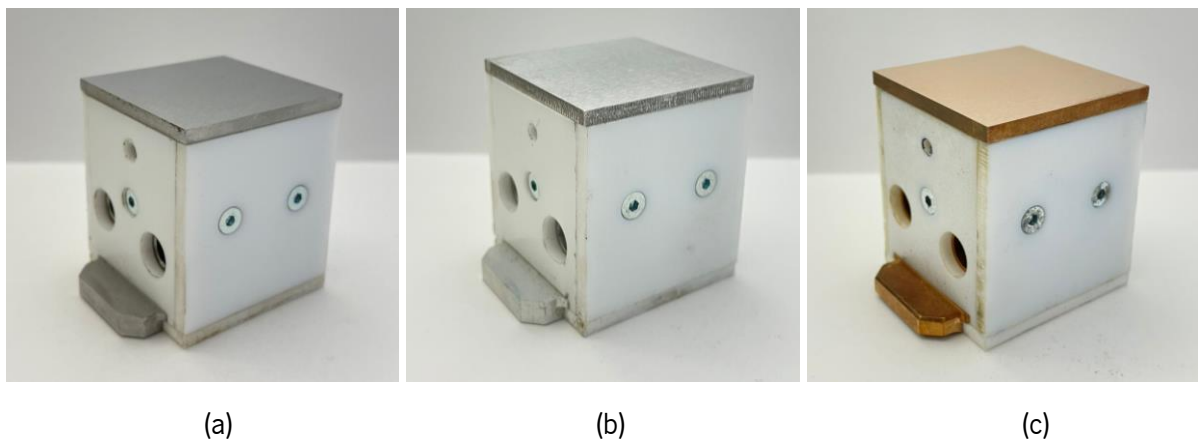


Figura 5 - Molde protótipo: (a) parte fixa; (b) parte móvel.

O molde foi desenvolvido com três zonas de refrigeração independentes, o que possibilita a indução de taxas de arrefecimento diferenciadas em distintas regiões das peças injetadas. Esta abordagem permite manipular a taxa de crescimento das esferulites, resultando em zonas com diferentes graus de cristalinidade.

Foram fabricados insertos centrais do molde (figura 6) em três materiais distintos: aço, alumínio e cobre-berílio. Esta diversidade material foi escolhida com o propósito de explorar como diferentes condutividades térmicas afetam o processo de arrefecimento e, consequentemente, as propriedades óticas dos provetes. Os insertos localizados nas extremidades do molde (esquerda e direita) foram apenas fabricados em aço como se pode observar na figura 7.



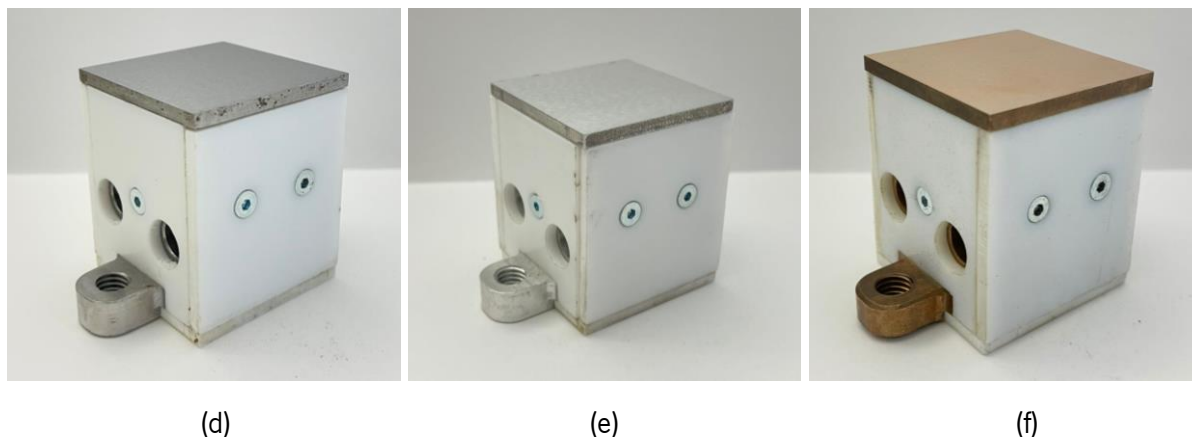


Figura 6 - Insertos centrais maquinados para a parte fixa (a, b, c) e parte móvel (d, e, f) do molde: (a) e (d) insertos em aço; (b) e (e) insertos em alumínio; (c) e (f) insertos em cobre berílio.

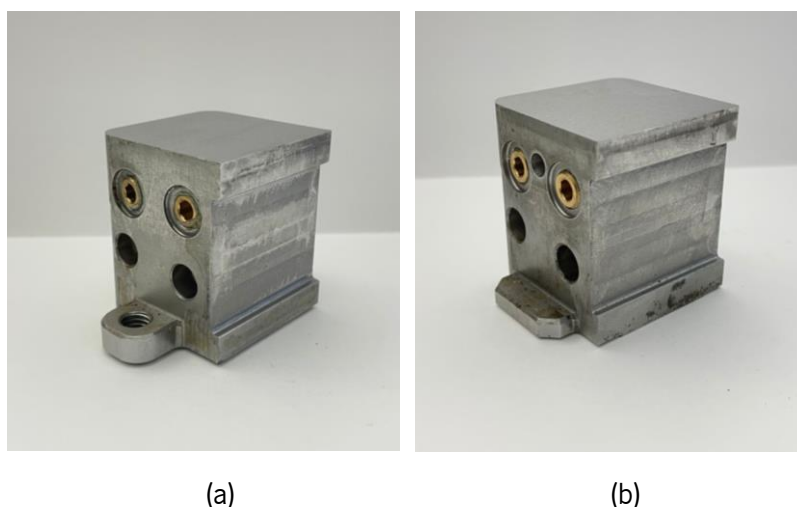


Figura 7 - Insertos laterais em aço: (a) parte móvel do molde; (b) parte fixa do molde.

O aço apresenta a menor condutividade térmica, aproximadamente 45 W/mK [11], promovendo um arrefecimento mais lento e favorecendo uma maior cristalização, enquanto o alumínio, com a condutividade térmica a rondar os 237 W/mK [12], conduz a um arrefecimento mais rápido, esperando-se que resulte numa menor cristalização e maior transparência. O cobre-berílio, por sua vez, apresenta uma condutividade térmica intermédia, variando entre os 105 e os 133 W/mK [13]. Os insertos centrais foram adicionalmente envolvidos por placas de teflon, com o objetivo de reduzir a transferência de calor com as restantes partes do molde, maximizando assim o gradiente térmico e as diferenças de temperatura entre os insertos. De modo a simplificar o estudo e maximizar a diferença nas condições de arrefecimento, o trabalho prosseguiu apenas com os insertos centrais fabricados em aço e alumínio, representando os extremos das condutividades térmicas disponíveis.

O design do molde permite uma rápida substituição dos insertos centrais e, além disso, o molde foi concebido para a produção de provetes com duas espessuras distintas (1 mm e 2 mm) graças à

existência de umas placas que permitem alterar a altura dos insertos da parte móvel do molde, permitindo estudar o efeito da espessura no arrefecimento e na distribuição do gradiente de transparência. Para assegurar a monitorização térmica, o molde foi desenvolvido com pequenas cavidades laterais, tanto na parte móvel como nos próprios insertos. Estas cavidades foram especificamente projetadas para a inserção dos termopares, garantindo um contacto direto e eficiente com as superfícies metálicas, o que permitiu a recolha de dados térmicos em tempo real. Esta abordagem foi fundamental para assegurar a calibração do sistema, verificar a uniformidade do aquecimento e validar as condições experimentais definidas ao longo dos ensaios.

4. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

Ao longo da dissertação será seguida a metodologia apresentada na figura abaixo de modo a cumprir os objetivos do projeto.

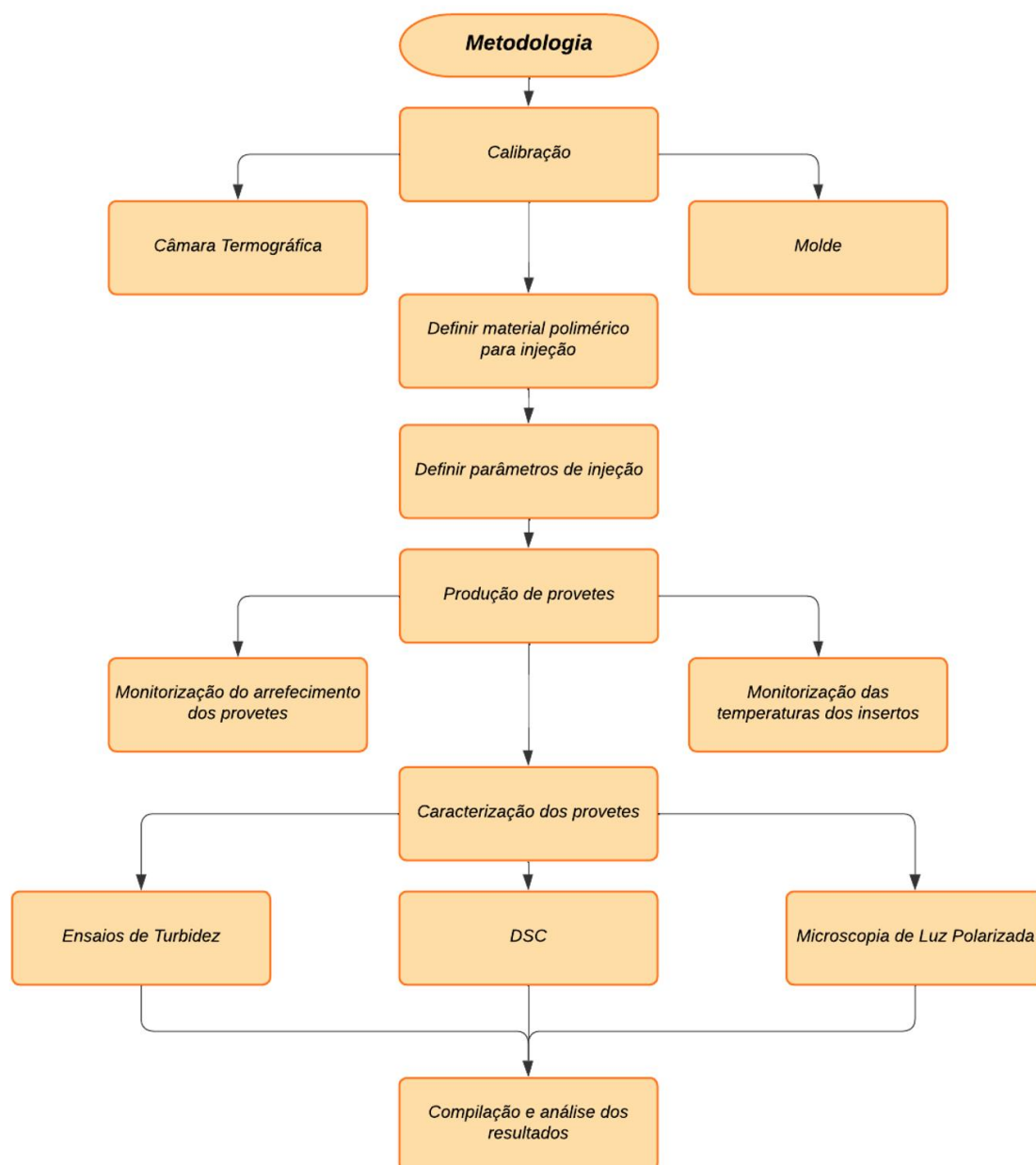


Figura 8 - Fluxograma geral da metodologia

4.2 Produção de provetes

4.2.1 Calibração da câmara térmica e do molde

A calibração da câmara térmica e do molde é uma etapa crítica para o estudo. A análise dos resultados obtidos nas calibrações permite avaliar a consistência e a precisão dos sistemas de medição utilizados. Estes dados são importantes para assegurar a fiabilidade dos parâmetros de temperatura, garantindo a solidez das medições essenciais para a caracterização dos provetes. Neste estudo foi realizada, primeiramente, a calibração da câmara térmica. Na figura 9 encontra-se o equipamento em questão e na figura 10 é possível observar um esquema do setup experimental.



Figura 9 - FLIR i7 Thermal Imaging Camera

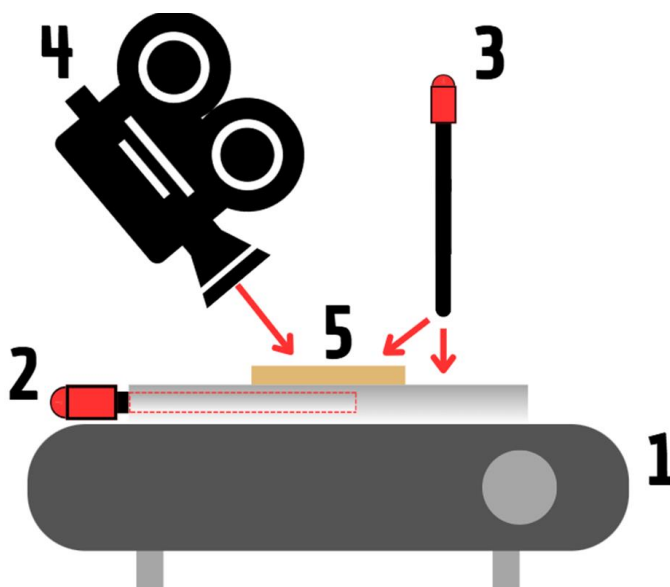


Figura 10 - Setup da calibração da câmara térmica: 1- placa de aquecimento; 2- termopar embutido; 3- termopar de contacto; 4 câmara térmica; 5- fita mate

A metodologia usada consistiu na medição de uma gama de temperaturas, entre os 30 °C e os 110 °C, induzidas numa placa de aquecimento. Esta foi revestida com fita adesiva de papel mate, uma vez que superfícies brilhantes ou polidas, como a superfície da placa ou do molde, apresentam uma emissividade muito baixa dificultando medições na gama dos infravermelhos como as da câmara térmica [14]. A emissividade programada na câmara para realizar as leituras foi de 0,95. Esta foi definida com base no valor médio de emissividade para o polipropileno, que pode variar conforme a transparência das peças e a sua temperatura.

Durante o processo de calibração, as medições de temperatura foram realizadas utilizando simultaneamente três instrumentos: um termopar embutido na placa de aquecimento, a câmara térmica, e um termopar de contacto. Esta abordagem foi adotada para garantir maior precisão na comparação entre as temperaturas medidas pela câmara térmica e as registadas diretamente nas superfícies da placa e da fita mate. O termopar embutido monitorizava a temperatura interna da placa de aquecimento, enquanto o termopar de contacto registava as temperaturas superficiais da fita mate e da placa. Paralelamente, a câmara térmica captava as emissões infravermelhas da superfície da fita, permitindo assim a comparação direta entre as diferentes medições. Para cada temperatura de referência, variando entre 28 °C e 100 °C, foram realizadas quatro medições independentes, de modo a garantir a consistência dos valores obtidos e assegurar que os valores captados pela câmara térmica estivessem devidamente calibrados em relação às temperaturas reais da superfície.

No que toca à calibração do molde esta é também uma etapa fundamental para garantir a precisão e a consistência do processo de injeção. Este procedimento foi realizado com o molde aberto, utilizando apenas a parte fixa e o lado com os insertos todos em aço, ilustrado abaixo na figura 11. Para controlar as temperaturas do molde, este foi conectado a um termorregulador, permitindo controlar a temperatura da água de refrigeração do molde.

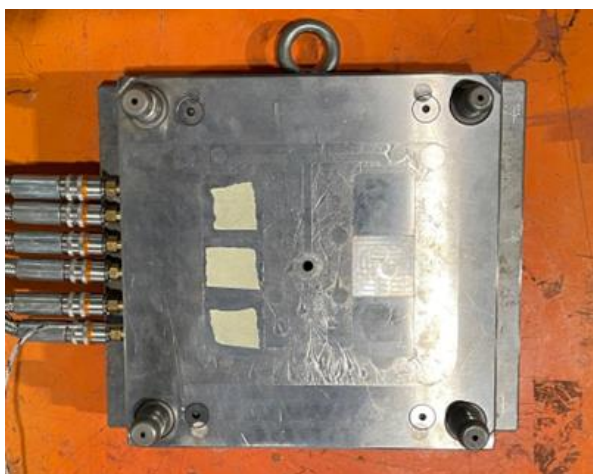


Figura 11 - Parte fixa do molde preparada para calibração

De modo a facilitar a leitura das temperaturas com a câmara térmica, foi colocada fita mate nas superfícies dos insertos, diminuindo os reflexos e interferências que poderiam comprometer as medições. Além disso, um termopar de contacto foi colocado no interior de cada inserto, mais especificamente numa cavidade projetada para esse fim, possibilitando a medição da temperatura interna do mesmo.

Foram realizadas um total de sete medições de temperatura. Nas cinco medições iniciais, os três insertos foram aquecidos simultaneamente a temperaturas de 30 °C, 45 °C, 60 °C, 75 °C e 90 °C, até que as mesmas estabilizassem. Nas duas últimas medições foram testadas diferentes configurações de temperaturas, na sexta medição o inserto central foi aquecido a 90 °C, enquanto os insertos exteriores foram mantidos a 30 °C e na última realizou-se o inverso, com os insertos exteriores a 90 °C e o inserto do meio a 30 °C.

As medições realizadas permitem uma análise detalhada da distribuição da temperatura pelos insertos. Esta abordagem metódica assegura a eficácia do processo e contribui para um melhor controlo do processo de injeção.

4.2.2 Injeção de provetes

A escolha das variáveis do processo e o controlo das mesmas é essencial para assegurar uma produção estável. Alguns dos parâmetros selecionados para a injeção apresentados na tabela 1 variaram conforme a espessura dos provetes a ser injetados (1mm e 2 mm). A configuração dos insertos e temperaturas de arrefecimento também variaram com o objetivo de identificar a opção mais eficaz para induzir o maior gradiente de transparência possível. Essas condições estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 1 - Parâmetros do processo de injeção

Parâmetro	Espessura - 1mm	Espessura - 2mm
T_{inj}(°C)	210	210
P_{inj}(bar)	700	700
Dosagem (cm^3)	12,5	16
$t_{segunda\ pressão}$(s)	3	5
$t_{arrefecimento}$(s)	25	25

Tabela 2 – Configuração dos insertos e suas temperaturas

Configuração dos insertos	Inserto esquerdo (°C)	Inserto central (°C)	Inserto direito (°C)	Material do inserto central	Espessura (mm)
Configuração 1	90	30	90	Aço	1
Configuração 2	30	90	30	Aço	1
Configuração 3	90	30	90	Alumínio	1
Configuração 4	30	90	30	Alumínio	1
Configuração 5	90	30	30	Aço	2
Configuração 6	30	90	30	Aço	2
Configuração 7	90	30	30	Alumínio	2
Configuração 8	30	90	30	Alumínio	2

Procedeu-se então à injeção dos provetes com todas as configurações descritas. Foram injetados um mínimo de 30 provetes por condição. Após extração do molde, 15 destes provetes continuaram a ser arrefecidos submersos em água e outros 15 arrefecidos ao ar (exposição ao ambiente). A implementação destes dois tipos de arrefecimento resultou num total de 16 conjuntos de provetes produzidos em diferentes condições. O arrefecimento controlado (no interior do molde) dos provetes foi monitorizado com o auxílio de uma ferramenta de aquisição de dados (figura 12), conectada aos insertos através de termopares, registando a temperatura dos mesmos durante os ciclos de injeção. O arrefecimento dos provetes após a sua extração do molde também foi monitorizado com o auxílio de uma câmara termográfica colocada num tripé em posição fixa. Esta monitorização foi realizada para todos os provetes produzidos. Foram capturadas imagens térmicas de 10 em 10 segundos até se observar a uniformização da temperatura ao longo da amostra.



Figura 12 - Priamus DAQ

4.3 Caracterização dos provetes

Sendo o objetivo deste projeto estudar a viabilidade da injeção monomaterial para conseguir peças com gradiente de transparência, foram realizados ensaios de modo a caracterizar as propriedades óticas dos provetes produzidos, e tentar compreender as mesmas a partir das suas propriedades térmicas e estruturais. Assim, deu-se particular ênfase à relação entre as condições de processamento, cristalização e transparência do material. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- **Ensaio de turbidez**

Estes ensaios foram realizados com o medidor de turbidez 'Byk Gardner al-211 a', para avaliar e quantificar a opacidade dos provetes nas suas 3 zonas, esquema representado na figura 13, seguindo a norma ASTM D 1003 [15]. Em seguida as amostras foram colocadas no local de medição onde interceptam o percurso da luz e são então retirados os valores das transmitâncias difusa (T_d) e total (T_t) de cada zona das amostras. A transmitância difusa refere-se à quantidade de luz que atravessa um material mas é dispersa em várias direções, enquanto a total representa toda a luz que atravessa a amostra, independentemente de ser transmitida diretamente ou dispersa. Através da equação abaixo (equação 1) é possível obter o valor de turbidez das superfícies medidas.

$$Haze = \frac{T_d}{T_t} \times 100 (\%) \quad (1)$$



*Figura 13 - Esquema das diferentes zonas consideradas na caracterização dos provetes: **E** – Zona esquerda; **C** – Zona central; **D** – Zona direita*

Foram selecionados quatro provetes para os ensaios subsequentes, de acordo com os resultados obtidos. Cada um destes foi cortado a meio, na direção longitudinal. Uma metade foi utilizada para os ensaios de DSC e a outra para a análise microscópica, permitindo uma caracterização detalhada e facilitando a associação entre cristalização e estrutura. Apenas as zonas dos provetes que representam a maior

variação de turbidez é que foram utilizadas. Este procedimento está ilustrado abaixo na figura 14, assumindo que as zonas assinaladas apresentaram a maior diferença de turbidez no provete.

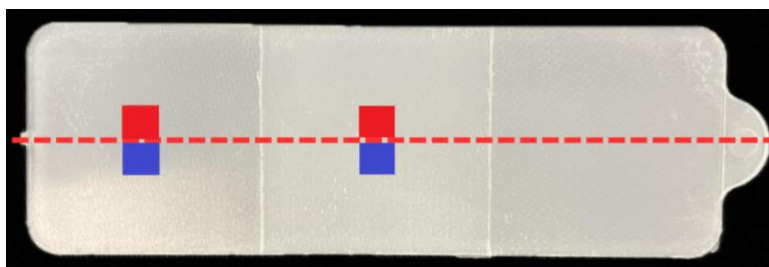


Figura 14 - Ilustração do corte dos provetes e preparação das amostras: **azul** - amostras para DSC; **vermelho** - amostras para microscopia ótica.

• Calorimetria Diferencial de Varrimento

O ensaio de DSC foi realizado para avaliar as propriedades térmicas dos provetes. Este método permite uma análise detalhada das transições térmicas do material, como a temperatura de fusão e a temperatura de transição vítrea. O principal objetivo desta análise foi determinar o grau de cristalinidade das amostras selecionadas. Para tal, foram analisadas oito amostras de quatro provetes diferentes, ou seja, duas amostras por cada provete. Estes provetes foram selecionados com base na maior diferença de turbidez entre duas zonas distintas.

O ensaio de DSC consiste na colocação de uma amostra numa cápsula que por sua vez é colocada no equipamento em simultâneo com uma cápsula vazia usada como referência. As amostras são sujeitas simultaneamente a determinados fluxos de calor. A diferença na energia necessária para igualar a temperatura da amostra à da referência representa a quantidade de calor extra absorvido ou libertado pela amostra na cápsula (num processo endotérmico ou exotérmico, respetivamente)[16]. O resultado de um ensaio de DSC é a curva de fluxo de calor em função do tempo ou temperatura como está representada na figura 15.

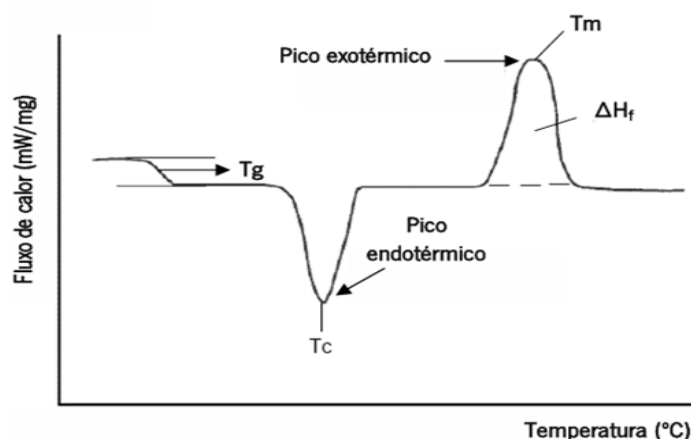


Figura 15 - Curva típica de um ensaio de DSC [3]

Esta curva pode ser usada para calcular entalpias de transições, integrando o pico correspondente à determinada transição. A área correspondente ao pico exotérmico permite a determinação da entalpia de fusão (ΔH_f) [17], que por sua vez foi usada para o cálculo do grau de cristalinidade (χ) das amostras através da equação 2, onde ΔH_f° corresponde à entalpia de fusão do material em estudo 100% cristalino.

$$\chi = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^\circ} \times 100 (\%) \quad (2)$$

O equipamento utilizado para os ensaios foi o Netzsch DSC 200 F3 Maia seguindo a norma ASTM E1356. O ensaio foi realizado dos 30 °C aos 200 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto. Foi apenas realizado um aquecimento dado que o objetivo foi obter a entalpia de fusão de modo a ser possível calcular o grau de cristalinidade. O valor utilizado para o ΔH_f° do PP foi 207J/Kg [18-20].

• Microscopia Ótica de Luz Polarizada

A análise da estrutura interna dos provetes foi complementada com ensaios de microscopia ótica de luz polarizada, tendo como objetivo observar as esferulites formadas durante o processo de cristalização do material. A microscopia de luz polarizada é uma técnica baseada na utilização de filtros polarizadores que permitem captar informações relevantes sobre as propriedades óticas do material em observação [21]. Este método baseia-se na birrefringência das regiões cristalinas do polímero que alteram a polarização da luz permitindo observar padrões característicos da organização interna do material. Materiais com esta característica têm a capacidade de dividir a luz em dois componentes de onda individuais polarizados em planos mutuamente perpendiculares (refração). Estes dois componentes de onda possuem diferentes velocidades e direções de propagação através do material [22]. Ao sair do material estes dois componentes de onda são recombinados ao passar pelo analisador podendo resultar em efeitos de cor como anéis e iluminação de estruturas [23].

Para a realização desta análise, primeiro foi necessário preparar as amostras para a sua observação ao microscópio. Foram cortados excertos do centro da zona do provete em estudo com o auxílio de uma lâmina e posteriormente foram fixos no micrótomo de lâmina de vidro para extrair um perfil transversal. O perfil transversal permite observar a estrutura da amostra ao longo da espessura facilitando o estudo da influência do arrefecimento. As amostras retiradas do micrótomo tinham uma espessura de 15 micrómetros. De seguida essas amostras foram colocadas nas lâminas previamente revestidas com

bálsamo do Canadá e, após a colocação da lamela, as amostras foram deixadas sob pesos durante 24h. Para observação e análise das amostras foi utilizado o Microscópio de Transmissão Leica DM 1500P.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Calibração da câmara térmica e do molde

Na tabela 3 estão apresentados os resultados de medição de um dos ensaios realizados. Os valores das leituras foram apresentados em função da temperatura interna da placa. As designações utilizadas foram as seguintes: “T_placa” representa a temperatura superficial da placa medida com o termopar de contacto, “T_embutido” corresponde à temperatura interna da placa de aquecimento, “T_fita” refere-se à temperatura da fita medida com o termopar de contacto e “T_câmara” indica a temperatura da fita registada pela câmara. A temperatura lida pelos instrumentos foi registada, permitindo a identificação de discrepâncias entre os métodos de medição.

Tabela 3 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (3º ensaio)

T_embutido (°C)	T_placa (°C)	T_fita (°C)	T_câmara (°C)
29,7	31,2	29,7	31,8
35,9	36,1	35,8	35,9
39,8	41,2	39,2	39,8
43,6	45,1	42,1	42,8
49,0	50,3	48,8	50,4
51,2	52,2	50,8	52,8
57,4	58,1	57,1	59,7
64,3	64,9	63,2	65,2
70,3	70,7	69,9	71,2
76,4	77,3	75,7	78
82,4	82,7	81,3	83,7
88,9	89,7	88,1	90,4
94,1	95,1	93,7	97,4

A Tabela 3 apresenta uma visão geral das leituras obtidas pelos diversos instrumentos para diferentes valores de temperatura da placa, demonstrando que estas se mantêm estáveis e com uma variação reduzida em torno dos valores dos setpoints. No entanto, para este procedimento, o parâmetro determinante para avaliar se a câmara térmica está devidamente calibrada e apta a avançar para a calibração do molde é a diferença entre a temperatura da fita medida pelo termopar e a registada pela câmara térmica, uma vez que essa discrepância reflete a precisão da leitura da câmara e permite verificar se há necessidade de ajustes na emissividade ou na metodologia de medição. Na Tabela 4 são apresentados os valores desta diferença para os ensaios realizados. É importante salientar que os setpoints de temperatura tiveram de ser segmentados em intervalos, uma vez que não foram uniformes em todos os ensaios. A figura 16 ilustra a dispersão das leituras registadas pela câmara térmica em relação à da superfície da fita medida pelo termopar de contacto, permitindo uma análise visual da consistência das medições.

Tabela 4 – Média das diferenças entre $T_{\text{câmara}}$ e T_{fita} para diferentes intervalos de temperatura

Intervalo de temperatura (°C)	Média da diferença (°C)	Desvio padrão (°C)
25-35	1,95	0,50
35-45	0,76	0,49
45-55	1,85	0,83
55-65	1,78	0,86
65-75	2,02	1,74
75-85	1,67	0,78
85-95	2,42	1,25
95-105	4,03	0,60

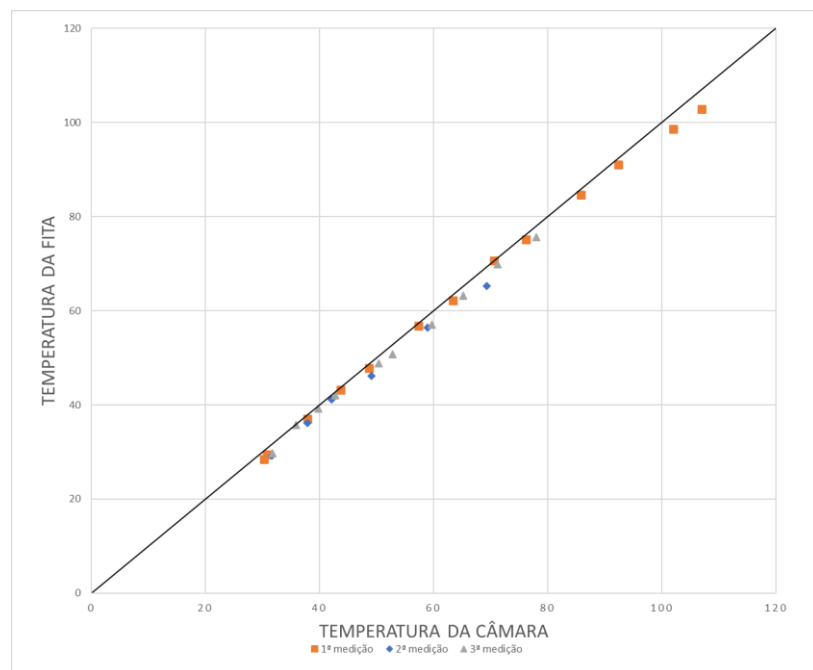


Figura 16 - Comparação da temperatura da fita lida com o termopar com a lida pela câmara térmica

A análise da tabela 4 revela uma tendência clara, a diferença entre a temperatura medida pela câmara térmica e a registada pelo termopar de contacto na fita aumenta progressivamente com a subida da temperatura. Nos intervalos de temperatura mais elevados, essa discrepância atinge valores próximos de 4,6°C, evidenciando um desvio mais significativo em temperaturas mais altas. Este comportamento sugere que, embora a câmara térmica seja sensível às variações da emissividade da superfície, a sua capacidade de replicar as leituras do termopar de contacto torna-se mais desafiadora à medida que a temperatura aumenta. Apesar desta tendência, é importante destacar que os valores das diferenças e dos desvios padrão se mantêm relativamente baixos, considerando as temperaturas envolvidas, ou seja, embora haja um aumento da discrepância com a temperatura, a medição com a câmara térmica ainda apresenta uma boa consistência global.

O gráfico da figura 16 permite avaliar a linearidade e a consistência entre os valores da câmara e os valores de referência na superfície da fita mate. É observável uma boa concordância geral entre as leituras da câmara e os valores de temperatura da fita, indicada pela proximidade dos pontos em relação à linha de referência de 45° (que representa o alinhamento perfeito entre os dois valores). São perceptíveis alguns desvios em alguns pontos, especialmente a temperaturas mais elevadas, o que é expectável devido às limitações de precisão da câmara em condições mais extremas e possíveis variações da emissividade com o aumento da temperatura. Este gráfico evidencia a eficácia da fita mate como superfície de medição, confirmando que a calibração da câmara térmica foi bem-sucedida. As diferenças observadas entre as medições são mínimas e consistentes, mesmo ao longo de uma ampla faixa de

temperaturas testadas. Desta forma, a câmara térmica demonstra-se capaz de medir as temperaturas da superfície do molde de injeção nos intervalos relevantes para este estudo, garantindo a fiabilidade e precisão dos dados recolhidos.

Quanto à calibração do molde, os resultados obtidos foram transcritos na tabela abaixo, onde estão organizados por combinação de temperaturas e onde estão apresentadas as respetivas temperaturas dos insertos medidas com a câmara termográfica.

Tabela 5 - Resultados da Calibração Térmica do Molde

Combinação de temperaturas (°C)	Inserto esquerdo (°C)	Inserto central (°C)	Inserto direito (°C)	Diferença máxima de temperatura entre insertos (°C)
30-30-30	27.7	29.4	28	1.7
45-45-45	40.1	43	40.4	2.9
60-60-60	50.3	56.6	50.5	6.3
75-75-75	67.9	72.1	68	4.2
90-90-90	80.4	85.7	80.7	5.3
30-90-30	42.6	80.8	39.4	-
90-30-90	79.4	46.4	80.6	-

Os resultados obtidos com a calibração do molde indicam que o sistema de controlo térmico foi eficaz e consistente, tanto em condições de aquecimento homogéneo quanto em configurações de arrefecimento assimétrico. Inicialmente, as medições de temperatura foram realizadas com os três insertos aquecidos simultaneamente a 30 °C, 45 °C, 60 °C, 75 °C e 90 °C. Durante este processo, pode-se observar uma boa uniformidade nas temperaturas registadas após a estabilização térmica, corroborada pela diferença máxima de temperatura entre os insertos ser de 6.3 °C para a temperatura de 60 °C, embora nos outros essa diferença seja menor. É também possível observar que os insertos centrais, nas 5 primeiras configurações, tendem a registar temperaturas ligeiramente mais altas que os restantes. Este comportamento é compreensível, dado que o inserto central está rodeado por outras fontes de calor, sofrendo uma transferência térmica adicional e/ou perdendo menos calor para zonas vizinhas. Nas medições finais, foi aplicada uma configuração de temperaturas diferenciadas, com o inserto central a ser aquecido a 90 °C enquanto os laterais se mantinham a 30 °C, e, posteriormente, o inverso. Estas configurações visam avaliar a capacidade do sistema em criar gradientes térmicos controlados, que são

relevantes para a investigação dos efeitos de arrefecimento assimétrico na cristalização e, consequentemente, nas propriedades finais dos provetes. Mais uma vez, a transferência de calor entre zonas causa uma ligeira diferença nas temperaturas pré-configuradas, a rondar os 10 °C. No entanto, os resultados evidenciam que o molde é capaz de manter temperaturas diferenciadas nos insertos de forma estável e sem variações significativas após a estabilização.

Mesmo com algumas diferenças de temperatura, o sistema provou ser suficientemente robusto e confiável para assegurar que os provetes produzidos são reprodutíveis. Esta capacidade de minimizar os gradientes térmicos indesejados é essencial para garantir um processo de injeção consistente e uma cristalização controlada do material.

5.2 Injeção

Monitorização da temperatura dos insertos (priamus)

O objetivo principal desta análise foi verificar a fiabilidade do sistema de controlo de temperatura, conferindo se as temperaturas programadas se estão a refletir corretamente na prática. Além disso, pretende-se identificar e compreender as condições que apresentaram as maiores diferenças em relação às temperaturas programadas, e quais os fatores que contribuem para essas mesmas variações. O sistema de aquisição de dados “PRIAMUS” permitiu a recolha de 8000 valores de temperatura por ciclo de injeção, para cada termopar ligado ao sistema. Isto possibilitou a obtenção de gráficos que ilustram a variação da temperatura ao longo dos múltiplos ciclos de injeção, como exemplificado na Figura 17.

A Tabela 6 contém os valores médios de temperatura, T1 e T2, medidos nos insertos durante o processo de injeção, para diferentes condições de material do inserto, espessura, configuração térmica e método de arrefecimento. T1 e T2 representam os dois termopares utilizados para monitorizar a temperatura interior dos insertos com temperaturas diferentes durante a produção dos provetes, ou seja, um para o inserto central e outro para um dos insertos laterais. Apenas foram considerados os valores que se encontravam dentro do intervalo definido por dois desvios padrão acima e abaixo da média, garantindo a exclusão de valores atípicos que pudessem comprometer a fiabilidade da análise.

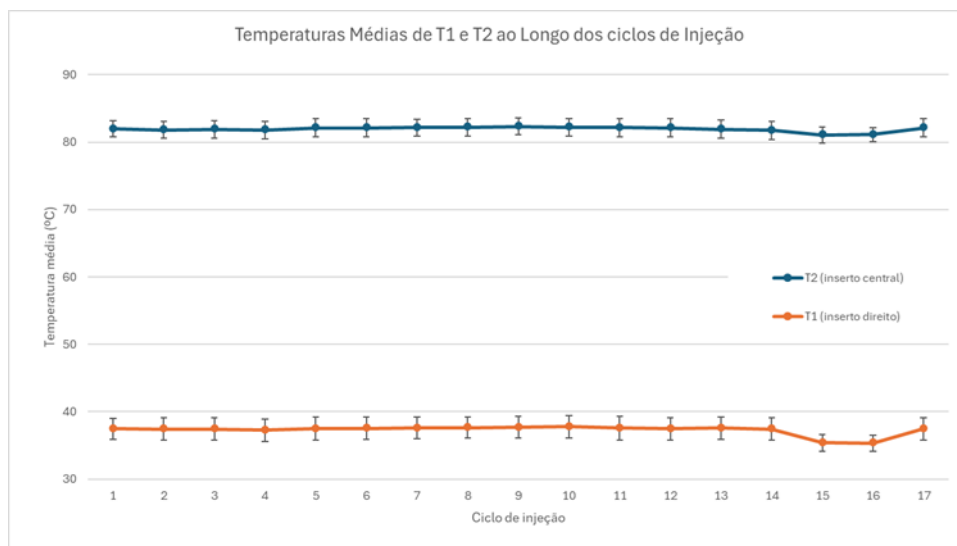


Figura 17 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço / 1mm / 30-90-30)

Tabela 6 - Temperatura média de T1 e T2 durante o processo de injeção

MAT. DO INSERTO	ESPESSURA (mm)	CONFIGURAÇÃO DE TEMPERATURA	TEMPERATURA MÉDIA T1 (DRT) (°C)	TEMPERATURA MÉDIA T2 (CNTR) (°C)
AÇO	1mm	30-90-30	37,27	81,94
		90-30-90	80,64	37,55
	2mm	30-90-30	50,91	92,37
		90-30-90	90,61	49,78
ALUMÍNIO	1mm	30-90-30	52,68	93,81
		90-30-90	86,62	72,92
	2mm	30-90-30	38,59	77,79
		90-30-90	82,13	48,89

De forma geral, os valores médios para as configurações com o inserto central em aço demonstraram uma maior proximidade em relação às temperaturas programadas, com desvios relativamente pequenos, tanto em T1 quanto em T2. Este efeito verifica-se para ambas as espessuras, com a espessura de 2mm a exibir uma maior temperatura tanto para T1 como para T2. Estas variações de temperatura menos pronunciadas podem ser justificadas pela condutividade térmica mais baixa do aço (relativamente ao alumínio), garantindo que, assim que atinge a temperatura desejada, esta não varia acentuadamente.

Isto sugere que o sistema de controlo térmico é estável para este material, possibilitando a obtenção das temperaturas definidas.

Por outro lado, nos insertos de alumínio, observam-se desvios mais acentuados, especialmente nas configurações em que os insertos das extremidades se encontram a 90 °C. Nestes casos é notória a condutividade térmica superior do alumínio que se reflete numa maior uniformização de temperaturas pelos insertos. Estes desvios revelam que a alta condutividade térmica do alumínio influencia o sistema, resultando numa maior redistribuição de calor, dificultando a estabilização exata das temperaturas pré-definidas. Para a espessura de 1mm registou-se a maior diferença de temperatura em relação à pré-definida, com o inserto central de alumínio a atingir uma média de 72,92 °C quando o ideal seria 30 °C. Esta diferença de 42,92 °C pode ter sido provocada, para além da alta condutividade térmica do alumínio, por alguns danos no equipamento de regulação da temperatura de arrefecimento, que acabaram por provocar uma má regulação da temperatura da água que arrefecia o molde.

Monitorização do arrefecimento (fotos térmicas)

Com o intuito de investigar melhor a influencia da temperatura na opacidade das peças, o arrefecimento não controlado (fora do molde) foi monitorizado com a utilização de uma câmara termográfica. A figura 18 exemplifica uma sequência típica das imagens obtidas e a figura 19 mostra a evolução da temperatura em função do tempo.

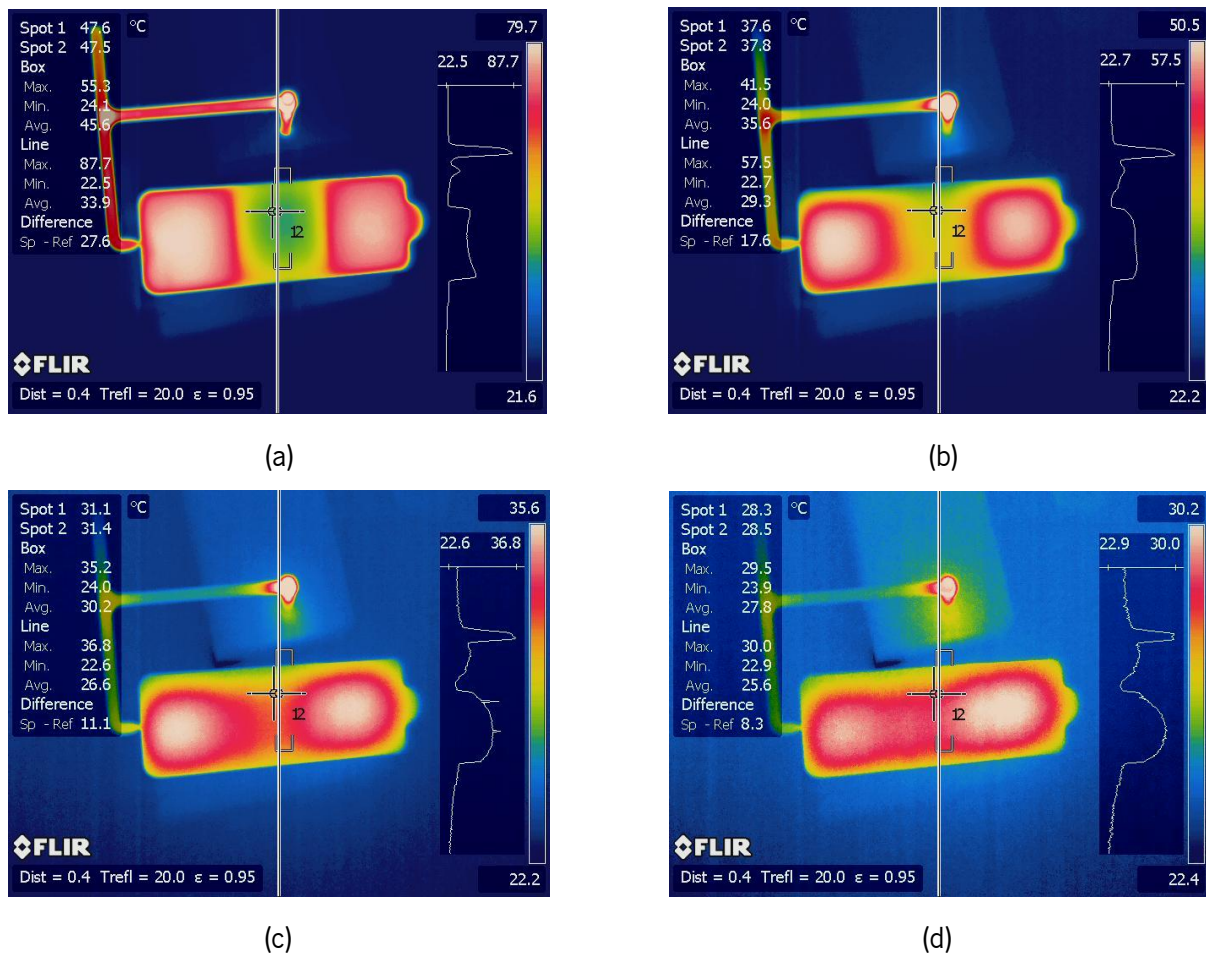
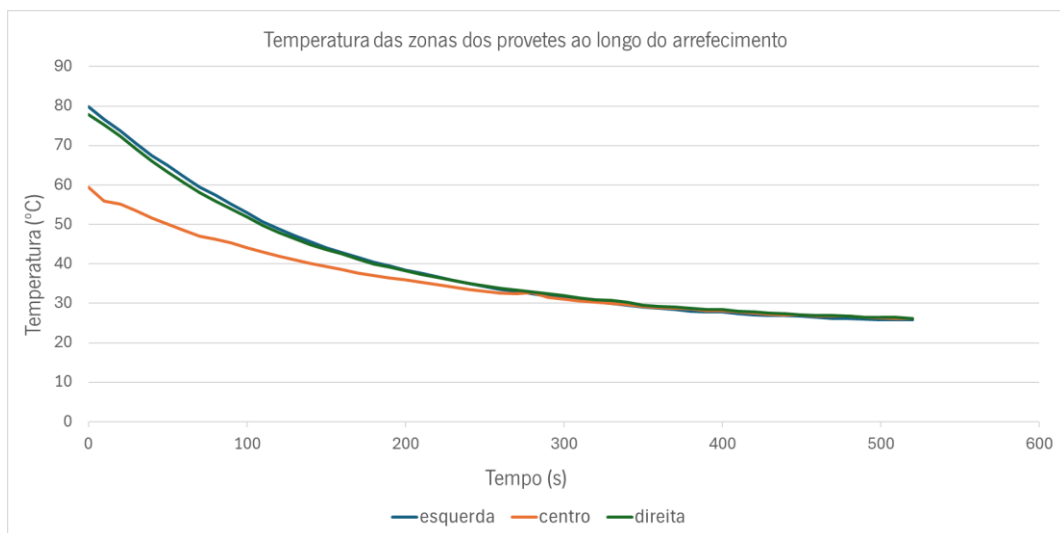
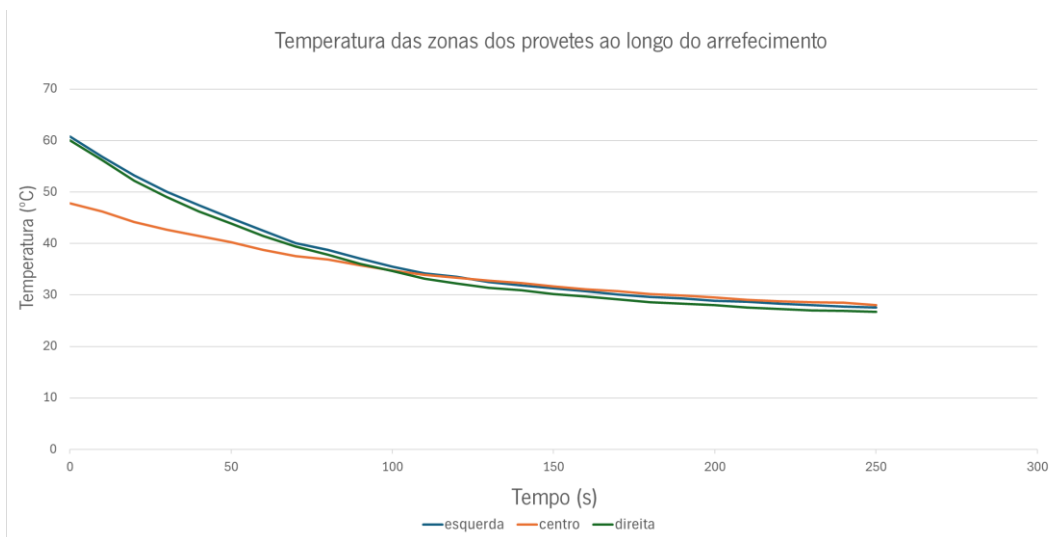


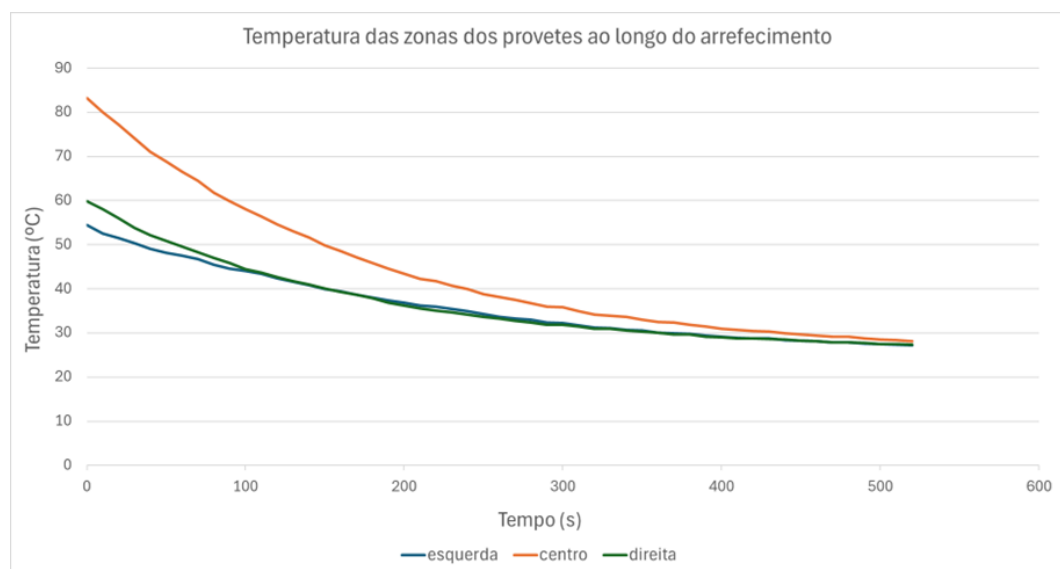
Figura 18 - Imagens térmicas correspondentes à configuração Aço / 1mm / 90-30-90: (a) imediatamente depois de desmoldar; (b) 2 minutos depois de desmoldar; (c) 4 minutos depois de desmoldar; (d) após atingir uma temperatura máxima de 30 °C.



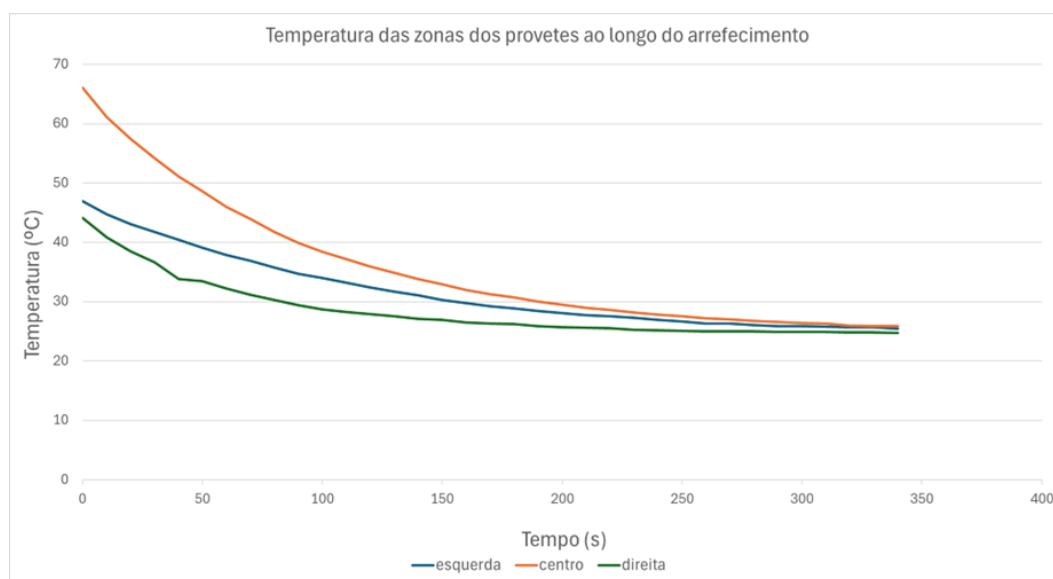
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 19 - Variação da temperatura das zonas identificadas nos provetes em função do tempo: (a) Aço / 1mm / 90-30-90; (b) Alumínio / 2mm / 90-30-90; (c) Aço / 1mm / 30-90-30; (d) Alumínio / 2mm / 30-90-30.

Observando as imagens térmicas é possível verificar que os valores de temperatura variam ao longo do tempo de arrefecimento. Após desmoldar, o provete mantém, durante algum tempo, uma boa diferença entre as temperaturas das várias zonas. Após 2 minutos já se verifica o efeito da convecção natural que arrefece mais facilmente o contorno exterior da peça, e da transferência por condução, entre zonas, que tende a uniformizar as temperaturas. No final do tempo de arrefecimento monitorizado, e pela mesma razão, a temperatura máxima continua a ocorrer no centro das zonas das peças e a uniformidade de temperaturas ao longo da peça continua a aumentar. Este comportamento é comum em todas as amostras analisadas.

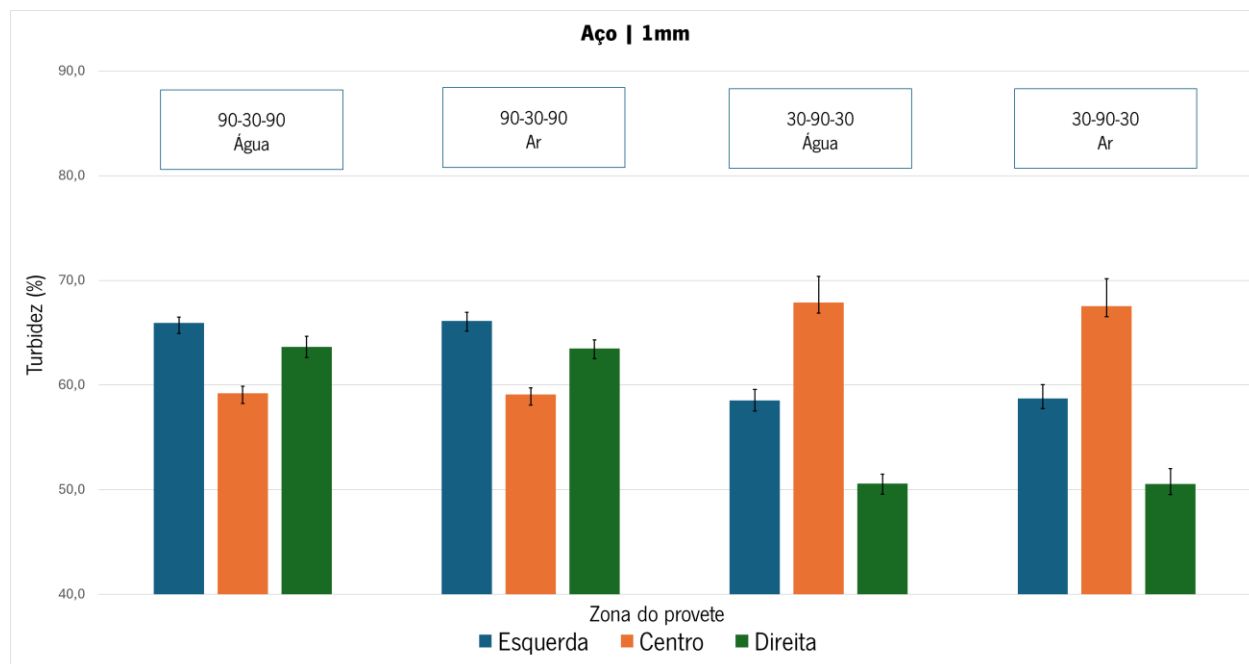
Com base nos dados obtidos durante a monitorização do arrefecimento, foi possível identificar diferenças máximas de temperatura entre as zonas dos provetes para as diferentes condições de temperatura e materiais dos insertos. As maiores diferenças foram registadas para as configurações de 30-90-30 °C em ambos os materiais, aço e alumínio, com valores de 28,7 °C e 22,0 °C, respetivamente (figuras 19c e 19d). Esta diferença de temperatura é particularmente relevante no contexto do processo, uma vez que valores mais elevados estão diretamente associados a maiores variações no tempo de arrefecimento, contribuindo assim para diferenças mais acentuadas na turbidez entre as diferentes zonas do provete. Como está demonstrado na figura 19 (a), são necessários mais de 5 minutos para a temperatura máxima do provete atingir 30 °C assim que este é desmoldado. Para os provetes arrefecidos com insertos em alumínio, apesar de terem o dobro da espessura, o tempo que demoraram a atingir uma temperatura máxima de 30 °C foi de pouco mais de 3 minutos.

O tempo que as diferentes zonas dos provetes demoram a atingir a uniformidade térmica durante o arrefecimento é também um fator de estudo relevante, pois influencia diretamente o gradiente de cristalização e, consequentemente, a turbidez final do provete. As condições configuradas para 30-90-30 °C, apresentadas nas imagens 19 (c) e (d), demonstraram um tempo superior a 6 minutos para a uniformização térmica, para ambos os materiais do inserto central. Esta diferença prolongada permite um gradiente térmico mais acentuado, favorecendo variações na cristalização das várias zonas e um gradiente de turbidez mais acentuado. Por outro lado, na condição apresentada na figura 19 (b), a uniformização ocorreu em apenas 1 minuto e meio, limitando o desenvolvimento de diferenças significativas na cristalização das diferentes zonas do provete. Assim, as condições com a configuração 30-90-30 °C apresentam maior potencial para alcançar os objetivos do projeto, pois o prolongamento do tempo até à uniformização térmica favorece um gradiente de cristalização mais acentuado.

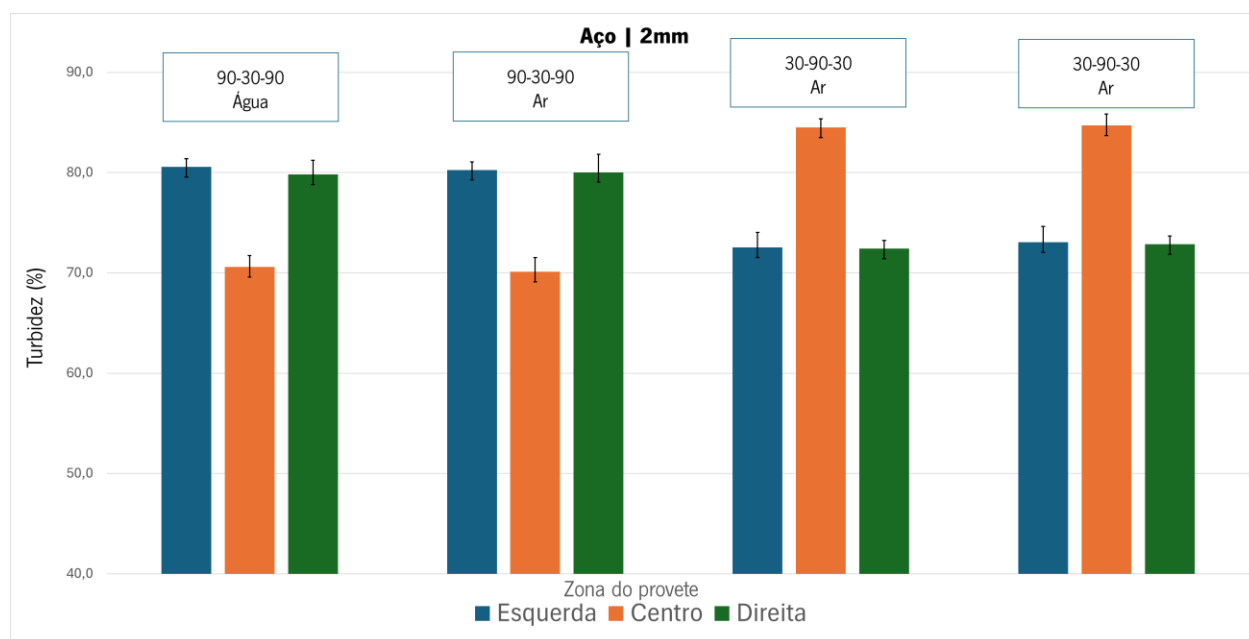
5.3 Caracterização

Turbidez

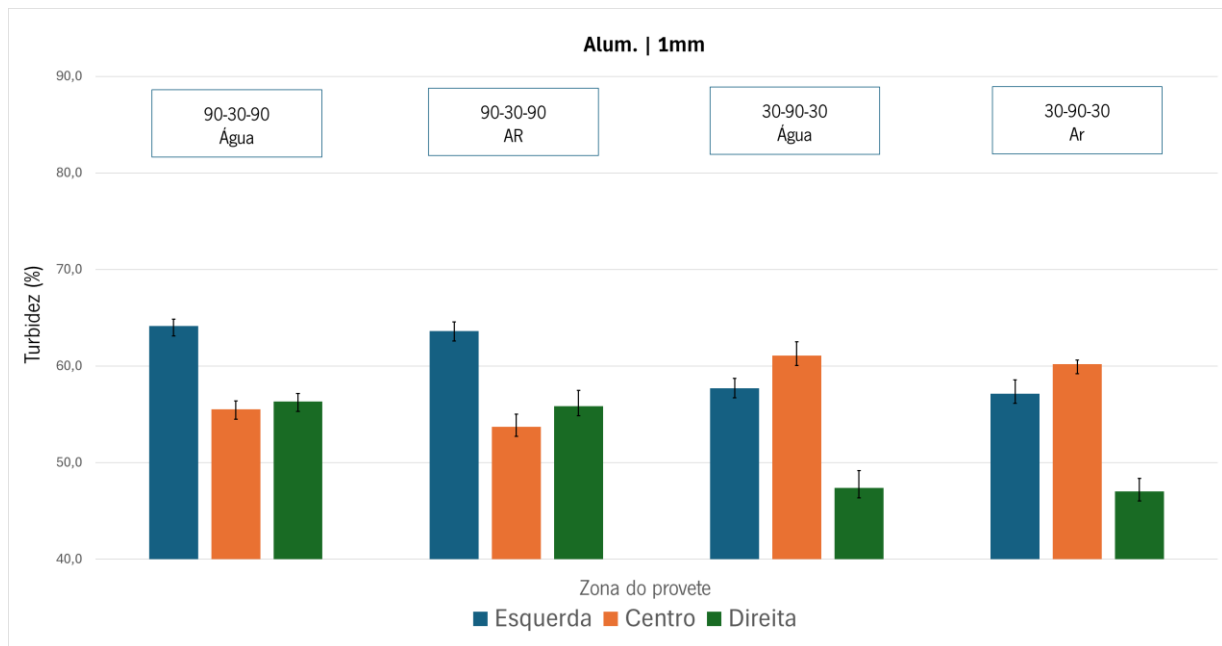
Os provetes foram divididos em três zonas distintas: esquerda, centro e direita, sendo que cada uma delas foi submetida à medição da turbidez. Esta abordagem permitiu avaliar a variação da turbidez ao longo do provete e identificar se as condições de processamento conduzem a um gradiente de transparência bem definido. Na figura 20 estão apresentados os resultados dos ensaios de turbidez. Em cada gráfico estão representados os resultados para as condições com o respetivo material do inserto central e a espessura referida no título, e por cima de cada “proвете” a respetiva configuração de temperatura dos insertos e o meio de arrefecimento a que foi sujeito fora do molde (água ou ar). Para garantir a precisão dos resultados, foram excluídos valores fora do intervalo de dois desvios padrão a cima e a baixo da média.



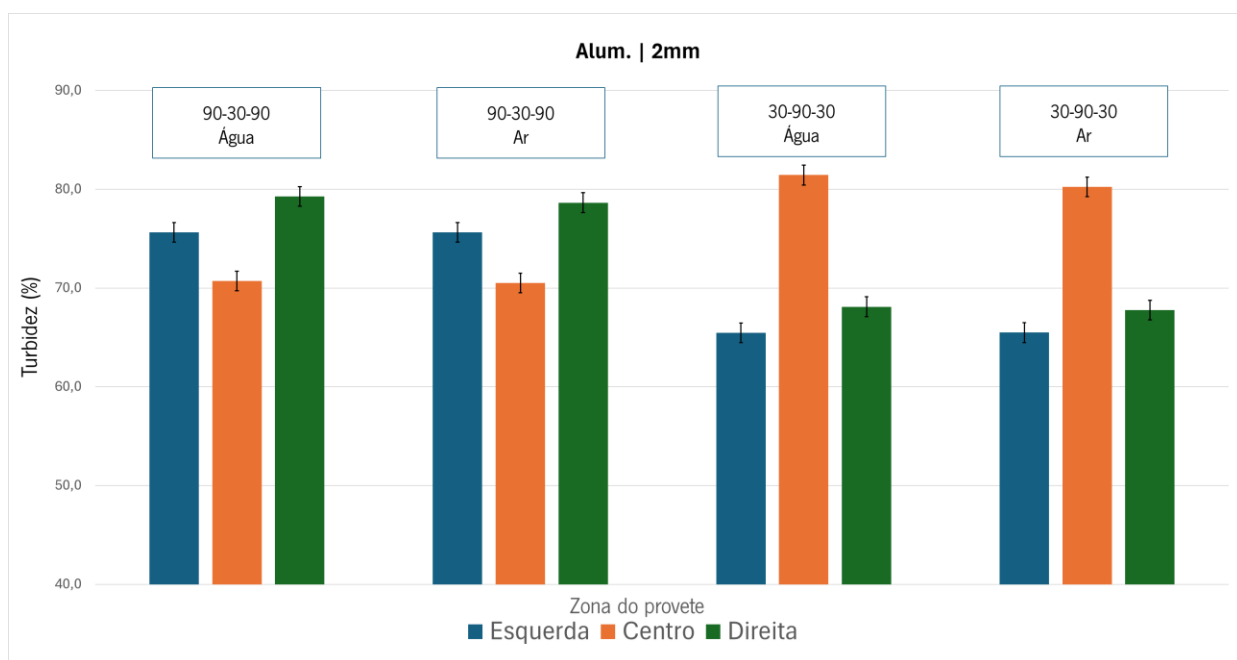
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20 - Turbidez média dos provetes: (a) Inserto de Aço, Espessura 1 mm; (b) Inserto de Aço, Espessura 2 mm; (c) Inserto de Alumínio, Espessura 1 mm; (d) Inserto de Alumínio, Espessura 2 mm

Os gráficos de turbidez revelam uma clara correlação entre a temperatura dos insertos, o meio de arrefecimento, a espessura dos provetes e a distribuição da turbidez nas três zonas dos provetes. De uma forma geral, as zonas submetidas a uma menor taxa de arrefecimento, aquelas em contacto com insertos a temperaturas mais elevadas, apresentaram maiores valores de turbidez, indicando um maior grau de cristalização.

Comparando os insertos de aço e alumínio, verificou-se que o alumínio proporcionou, em média, menores valores de turbidez nas amostras. Esta diferença está relacionada com a maior condutividade térmica do alumínio, que promove uma transferência de calor mais eficiente e um arrefecimento mais rápido, resultando numa menor cristalização e, consequentemente, numa maior transparência das amostras.

A influência da espessura dos provetes também foi significativa. Observou-se que os provetes com 2 mm de espessura apresentaram, em geral, maiores valores de turbidez em comparação com os de 1 mm. Esta diferença pode ser atribuída ao maior tempo necessário para o arrefecimento de provetes mais espessos, permitindo um crescimento mais prolongado das esferulites e, portanto, um maior grau de cristalização. Contudo, a maior diferença de turbidez foi registada para a espessura de 1 mm na configuração com o inserto central em aço a 90 °C.

Na tabela abaixo encontra-se a diferença de turbidez média para cada condição injetada.

Tabela 7 - Diferença média de turbidez, considerando apenas a maior diferença para cada condição

MATERIAL DO INSERTO	ESPESSURA	CONFIGURAÇÃO DO INSERTO	MEIO DE ARREFECIMENTO	DIFERENÇA DE TURBIDEZ MÉDIA
AÇO	1mm	90-30-90	Água	6,7
			Ar	7,3
		30-90-30	Água	17,32
			Ar	16,98
	2mm	90-30-90	Água	9,97
			Ar	10,16
		30-90-30	Água	12,07
			Ar	11,84
ALUMÍNIO	1mm	90-30-90	Água	8,62
			Ar	9,89
		30-90-30	Água	13,69
			Ar	13,17
	2mm	90-30-90	Água	8,57
			Ar	8,13
		30-90-30	Água	15,97
			Ar	14,76

Outro aspeto relevante é a comparação entre os dois meios de arrefecimento utilizados: água e ar. No geral, os dois tipos de arrefecimento demonstraram um desempenho idêntico, visível em todos os gráficos, observando-se valores idênticos para todas as condições de injeção.

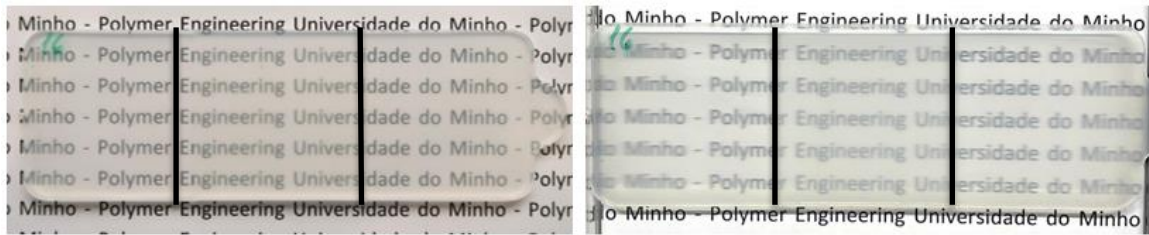
No que toca às configurações de temperatura dos insertos, conclui-se que as configurações com o inserto central a 90 °C proporcionaram as maiores diferenças de turbidez registadas em todos os provetes injetados. Isto deve-se ao facto de haver uma menor uniformização da temperatura nas configurações em que há apenas uma fonte de calor mais elevada, ou seja, 30-90-30.

Em alguns casos notou-se também uma tendência para a zona direita do provete apresentar valores de turbidez ligeiramente inferiores à zona esquerda. Isto deve-se ao facto da zona direita estar mais afastada do ponto de injeção e pelo que o fundido arrefece mais até a encher, levando a um arrefecimento mais rápido.

Feita a análise dos resultados, decidiu-se avançar com quatro condições específicas (salientadas na tabela 5) para uma caracterização mais detalhada. Escolheram-se os provetes que foram injetados com insertos de aço com 1 mm de espessura e arrefecidos a ar em ambas as configurações de temperatura, assim como os provetes com insertos de alumínio com 2 mm de espessura, também arrefecidos a ar em ambas as configurações. Optou-se por estas condições porque, para cada material de inserto, foi na espessura escolhida que se observaram as maiores diferenças de turbidez entre as zonas dos provetes. Além disso, seleccionou-se o arrefecimento a ar porque é o método mais amplamente utilizado na indústria, sendo, portanto, o mais relevante para este estudo.

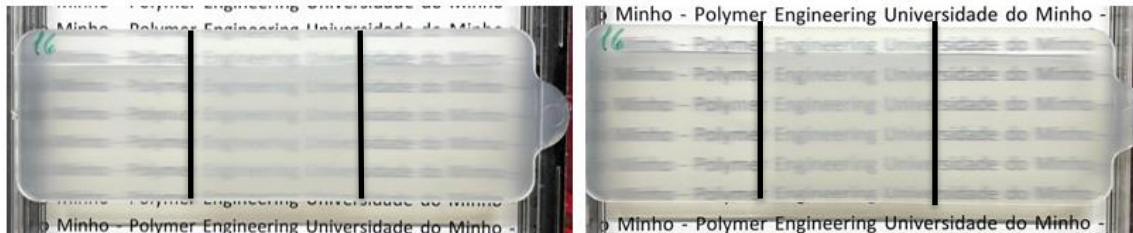
As amostras injetadas foram posicionadas em frente a um texto impresso, a distâncias entre 0 e 2 cm e foram capturadas fotografias destas experiências com as condições previamente destacadas (observar tabela 5). Na Figura 21 estão apresentadas as condições que revelaram os resultados mais notórios, as restantes encontram-se no anexo B. Esta abordagem permite o estudo do efeito das condições de processamento e da distância no efeito ótico final.

Alumínio 2 mm 30-90-30



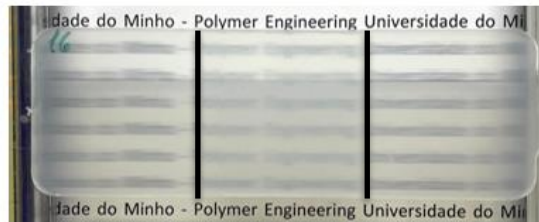
Distância provete-texto: 0 mm

Distância provete-texto: 5 mm



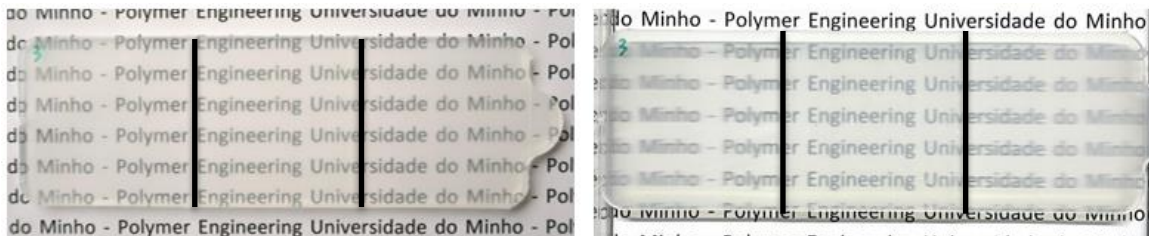
Distância provete-texto: 10 mm

Distância provete-texto: 15 mm



Distância provete-texto: 20 mm

Alumínio 2 mm 90-30-90



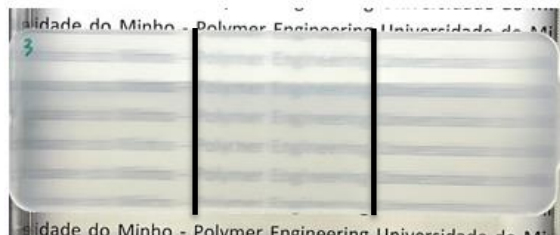
Distância provete-texto: 0 mm

Distância provete-texto: 5 mm



Distância provete-texto: 10 mm

Distância provete-texto: 15 mm



Distância provete-texto: 20 mm

Figura 21 - Efeito do valor de turbidez no desempenho ótico dos provetes injetados

Numa primeira análise, com a amostra pousada diretamente sobre o texto, verifica-se em todas as condições fotografadas que não se evidenciam diferenças óticas significativas entre as zonas dos provetes. Contudo, à medida que a distância entre a amostra e o texto aumenta, a nitidez do texto através dos provetes diminui progressivamente. Nos dois casos apresentados na Figura 21, é perceptível uma diferença na turbidez entre as zonas dos provetes, que se traduz em distintos níveis de nitidez do texto. Este efeito torna-se mais pronunciado para distâncias provete-texto de 10 mm ou superiores, sendo que, para os 20 mm, a perda de nitidez geral do texto é considerável. Assim, pode concluir-se que, para a espessura de 2 mm e com o inserto central de alumínio, são visíveis efeitos práticos em ambas as combinações de temperatura testadas. No entanto, este fenómeno não se verifica nos provetes produzidos com o inserto central em aço, sugerindo que a condutividade térmica do material do inserto e a espessura do mesmo desempenham um papel determinante na variação ótica observada.

DSC

Para os ensaios de DSC e microscopia ótica as amostras foram preparadas e identificadas da seguinte forma:

- **Proвете A:** Aço / 1mm / Ar / 30-90-30

PP_A_c (zona centro);

PP_A_d (zona direita).

- **Proвете B:** Aço / 1mm / Ar / 90-30-90

PP_B_c (zona centro);

PP_B_e (zona esquerda).

- **Proвете C:** Alumínio / 2mm / Ar / 30-90-30

PP_C_c (zona centro);

PP_C_e (zona esquerda).

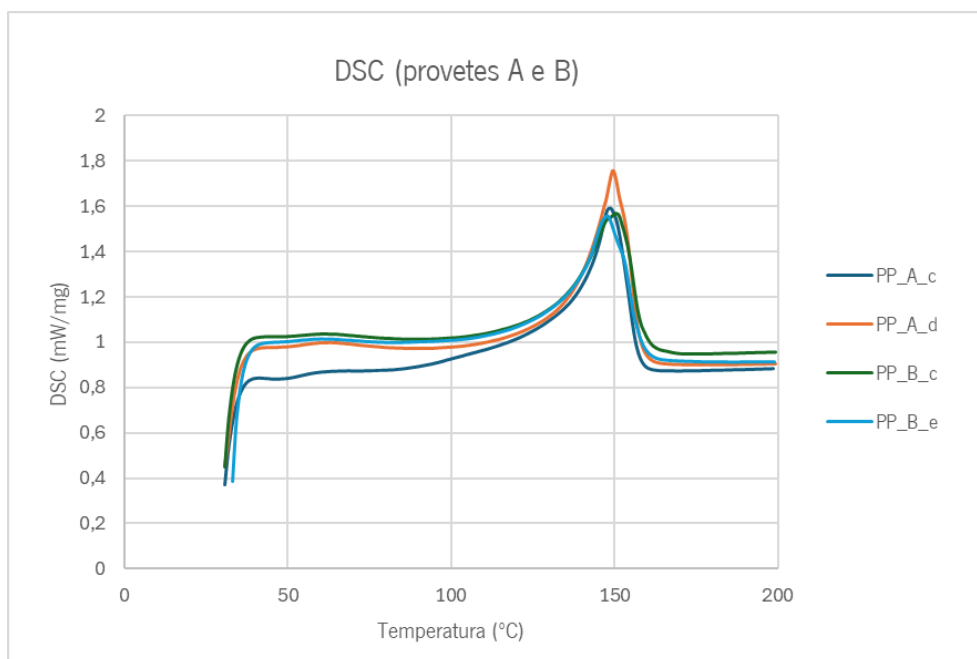
- **Proвете D:** Alumínio / 2mm / Ar / 90-30-90

PP_D_c (centro);

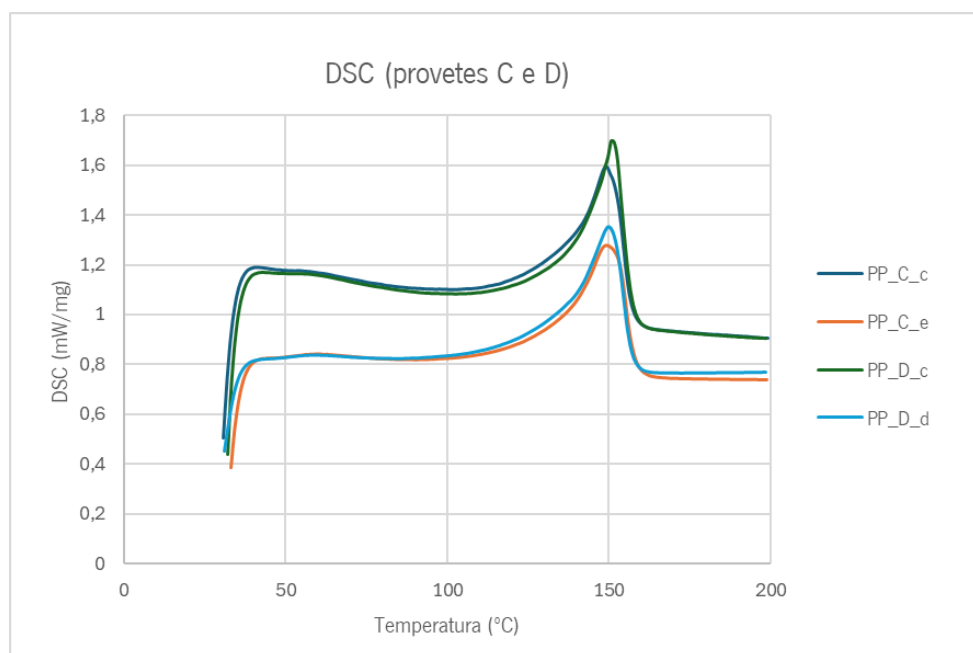
PP_D_d (direita).

Os gráficos da análise de DSC obtida dos provetes A, B, C e D (figura 22) permitiu determinar os respetivos graus de cristalização, que fornecem informações cruciais sobre como as condições de processamento influenciam a estrutura cristalina do material. Os valores de cristalinidade de cada uma

das oito amostras foram calculados utilizando a área dos picos exotérmicos extraídos das curvas dos respectivos ensaios de cada amostra e apresentados na tabela 8.



(a)



(b)

Figura 22 - Curvas de DSC dos provetes selecionados: (a) Provetes A e B; (b) Provetes B e C.

Tabela 8 - Grau de cristalinidade das amostras e respetiva diferença entre provetes

AMOSTRA	ÁREA DO PICO DE FUSÃO (J/G)	GRAU DE CRISTALINIDADE (%)	DIFERENÇA DE CRISTALINIDADE (%)
PP_A_c	90,28	43,61	0,25
PP_A_d	89,75	43,36	
PP_B_c	78,63	37,99	0,25
PP_B_e	79,16	38,24	
PP_C_c	76,72	37,06	4,11
PP_C_e	68,21	32,95	
PP_D_c	76,24	36,82	2,65
PP_D_d	70,71	34,17	

Pela observação dos resultados apresentados na tabela, podemos concluir que os graus de cristalinidade foram consistentemente mais elevados nas amostras produzidas com os insertos de aço em comparação com os de alumínio. Este resultado alinha-se com o que foi constatado anteriormente atendendo ao arrefecimento mais eficaz promovido pelo alumínio, que resulta em amostras com menores graus de cristalização. No entanto, nos provetes produzidos com insertos de alumínio, apesar dos valores do grau de cristalização serem mais baixos, observou-se uma maior diferença de cristalização entre as zonas analisadas.

Este facto é particularmente relevante, pois está diretamente relacionado com as variações de turbidez observadas anteriormente. Os provetes C e D (alumínio), que exibiram as maiores diferenças de cristalinidade, coincidiram com aqueles que apresentaram as maiores diferenças de turbidez, no entanto, para os provetes A e B (aço), nos quais se registaram valores de diferenças de turbidez semelhantes, a diferença no grau de cristalinidade foi bem mais reduzida. A diferença de cristalinidade não se traduz diretamente numa diferença de turbidez, uma vez que esta depende não apenas do grau de cristalinidade, mas também de fatores como o tamanho, a distribuição e a orientação das esferulites, que influenciam a passagem da luz. Assim, mesmo com diferenças menores de cristalinidade, outros fatores estruturais podem justificar este fenómeno.

Microscopia

A microscopia de luz polarizada foi o método utilizado para avaliar as alterações morfológicas induzidas nos provetes, tanto pelo processamento como pelo meio de arrefecimento. Esta análise pretende caracterizar a estrutura interna dos provetes de modo a compreender os resultados obtidos nos ensaios de turbidez. Para efeitos de análise de resultados foram seleccionadas e abordadas as imagens que se seguem, uma vez que são as que melhor ilustram os resultados observados.

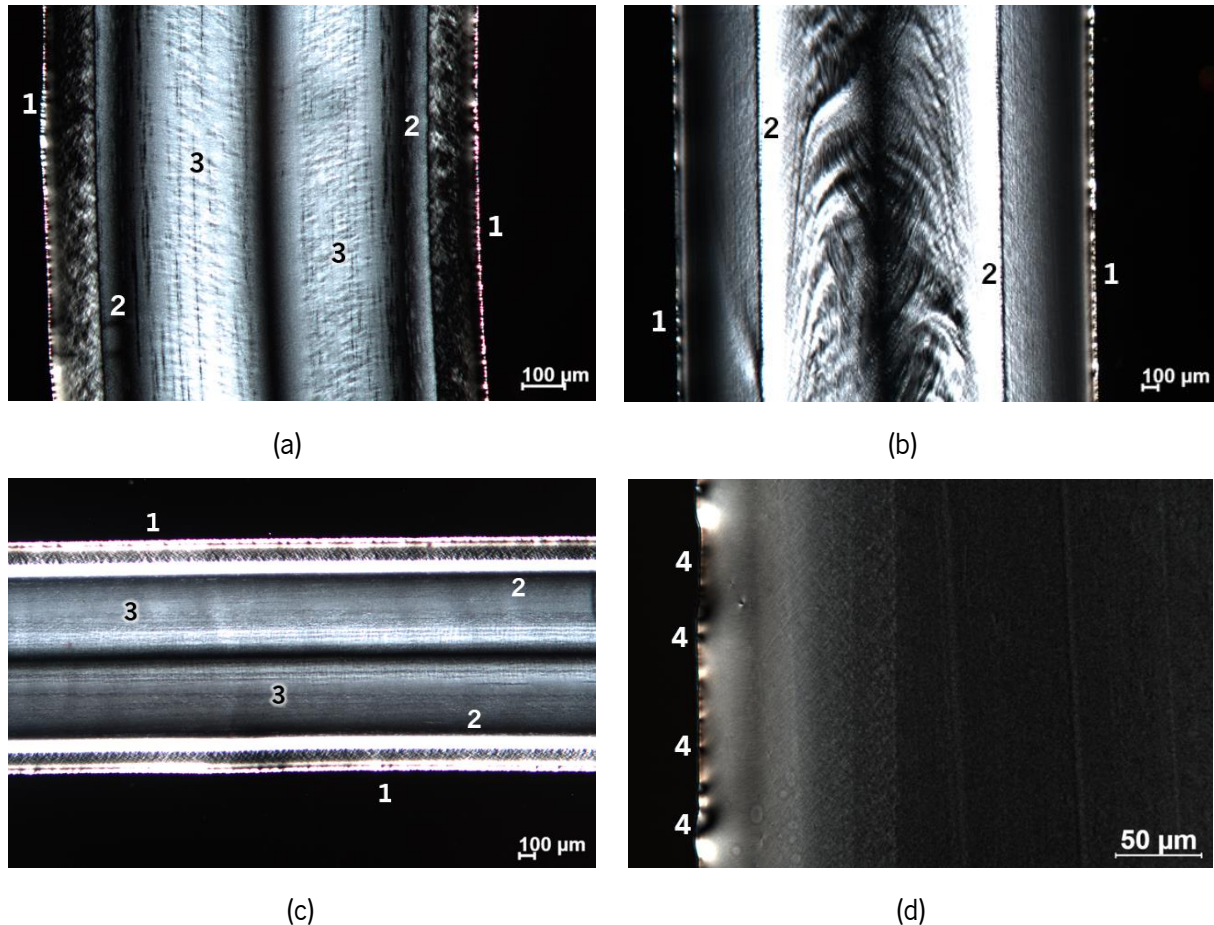


Figura 23 - Imagens obtidas por microscopia de luz polarizada: (a) PP_B_e Ampliação: 10x; (b) PP_D_c Ampliação: 4x; (c) PP_B_c Ampliação: 4x; (d) PP_D_c Ampliação: 40x. Nota: 1- casca orientada; 2- sobre-casca; 3- zona de esferulites bem desenvolvidas; 4- marcas promovidas pelo micrótomo.

As imagens evidenciam diferentes zonas estruturais dentro dos provetes, que refletem as dinâmicas de arrefecimento e fluxo do material durante a moldação por injeção.

Nas regiões externas dos provetes, observa-se uma **casca orientada** (1), uma camada fina onde a orientação molecular é mais pronunciada devido às elevadas taxas de corte desenvolvidas junto à parede das cavidades moldantes durante a injeção, e ao arrefecimento mais rápido nesta mesma zona. Logo após esta camada, a **sobre-casca** (2) surge como uma região de transição, onde o arrefecimento menos

abrupto permite o início do desenvolvimento de esferulites, embora ainda limitado pela proximidade à superfície do molde. No "núcleo" dos provetes, é visível uma **zona de maior desenvolvimento de esferulites** (3), onde as condições são mais favoráveis a um arrefecimento mais lento. Este arrefecimento gradual promove o crescimento de esferulites maiores e mais definidas, resultando numa estrutura mais densa e cristalina. A partir destas observações, fica evidente que as diferentes taxas de arrefecimento e orientações induzidas durante o processo de injeção originam camadas bem distintas dentro do material. Espera-se que essas camadas apresentem índices de refração diferentes, desviando a propagação da luz ao atravessar os provetes. Quanto maior for o número de camadas desenvolvidas, mais vezes a luz é refratada, promovendo um aumento da turbidez.

Por fim, observam-se algumas marcas nas zonas exteriores das amostras, sendo essas, **marcas promovidas pelo micrótomo** (4) no momento de preparação das amostras. Embora estas sejam visíveis na periferia das amostras, não interferem na observação e caracterização das camadas internas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste projeto foi explorada a viabilidade da produção de componentes monomaterial com gradiente de transparência através do processo de moldação por injeção, com foco no Polipropileno (PP). Através da utilização de um molde protótipo capaz de gerar gradientes térmicos durante o processo de injeção, foi possível induzir variações de cristalinidade nas peças produzidas, resultando em peças com variações de opacidade entre diferentes zonas.

O trabalho experimental iniciou-se pela calibração da câmara térmica. Este processo foi bem-sucedido, com o gráfico de dispersão das temperaturas medidas a evidenciar consistência nas medições realizadas nos intervalos relevantes para o estudo. Esta etapa permitiu avançar para a calibração térmica do molde. Durante essa fase, cujo objetivo foi verificar a eficácia do sistema de controlo térmico, todos os valores de temperatura definidos apresentaram resultados práticos semelhantes. Apesar das ligeiras variações observadas, com a diferença máxima de 6,3 °C (para a temperatura de 60 °C), que eram expectáveis devido à inevitável transferência de calor entre insertos e zonas vizinhas, o sistema demonstrou ser confiável.

O material selecionado para a fase de injeção foi o DR7037.01 (polipropileno copolímero), por apresentar a gama mais ampla de variação de turbidez em comparação com as outras opções de polipropileno consideradas no projeto.

Alguns parâmetros de injeção variaram conforme a espessura dos provetes (1 mm e 2 mm). A configuração dos insertos, o esquema de arrefecimento, as temperaturas e os meios de arrefecimento fora do molde (ar e água) foram combinados em diversas condições para maximizar o gradiente de transparência.

Durante a produção de provetes, a monitorização das temperaturas dos insertos revelou oscilações, especialmente nas configurações com inserto central de alumínio onde, para a espessura de 1mm foi registada uma temperatura de 72,92 °C, significativamente acima dos 30 °C definidos como ideais. Este fenómeno pode ser atribuído à elevada condutividade térmica do alumínio, que facilita o arrefecimento dos provetes.

A monitorização da temperatura dos provetes após a sua retirada do molde indicou uma taxa de arrefecimento no molde mais elevada no caso dos insertos de alumínio. A elevada condutividade do material permitiu que os provetes saíssem do molde a temperaturas mais baixas do que aqueles arrefecidos com insertos de aço, mesmo para espessuras superiores. Esta fase do arrefecimento fora do molde pode ter uma grande influência na cristalinidade e turbidez dos provetes dado que o tempo que estes demoram a arrefecer é bastante significativo e pode ser um fator determinante no desenvolvimento da estrutura cristalina.

Nos ensaios de turbidez, provetes produzidos com insertos de alumínio apresentaram, em média, menores valores de turbidez, devido aos menores valores do grau de cristalinidade provocados por uma elevada taxa de arrefecimento. A espessura dos provetes também influenciou os resultados, com provetes mais espessos a apresentarem valores superiores de turbidez, uma vez que o arrefecimento mais lento favorece o desenvolvimento das esferulites. A maior diferença de turbidez foi registada em provetes de 1 mm com inserto central de aço a 90 °C. Os diferentes meios de arrefecimento não demonstraram diferenças significativas nos resultados, pelo que foram seleccionadas quatro condições para avançar numa caracterização detalhada:

- Aço (ar): 1mm - 90-30-90 e 30-90-30;
- Alumínio (ar): 2mm - 90-30-90 e 30-90-30.

Os ensaios de DSC permitiram calcular os graus de cristalização das diferentes zonas dos provetes analisados. Os resultados revelam que os provetes fabricados com insertos de alumínio apresentam variações mais acentuadas no grau de cristalinidade entre as zonas medidas, enquanto nos provetes produzidos com insertos de aço, as diferenças de cristalinidade são mínimas.

A análise microscópica revelou zonas de maior desenvolvimento da estrutura cristalina, com camadas distintas dentro dos provetes, resultantes das diferentes taxas de arrefecimento e orientações induzidas

durante o processo de injeção. Estas camadas apresentam índices de refração variados, influenciando a propagação da luz através dos provetes.

Futuramente seria interessante explorar novas formas de isolamento dos insertos de forma a diminuir a transferência de calor entre os mesmos e até mesmo explorar outras opções de materiais para os mesmos de modo a otimizar a diferença de turbidez nos provetes. A implementação de modelação computacional poderia também ser uma técnica vantajosa na otimização das condições de injeção, ajudando a prever a distribuição da temperatura e cristalinidade dos provetes. Por fim, seria relevante o aprofundamento do estudo do arrefecimento fora do molde, uma vez que este representa a maior parte do arrefecimento dos provetes.

REFERÊNCIAS

- [1] L. D. Pedroso, A. J. Pontes, A. Alves, F. M. Duarte, and O. S. Carneiro, “From Transparent to Opaque: A Route towards Multifunctional Parts Injected with a Single Material,” *Materials*, vol. 16, no. 18, Sep. 2023, doi: 10.3390/ma16186219.
- [2] J. Karger-Kocsis and T. Bárány, *Polypropylene Handbook*. Budapest, Hungary: Springer, 2018.
- [3] R. Pereira, “Desenvolvimento e Controlo do Processo de Produção de Discos em PET e PP para Termoformação,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2020. [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/70520/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Ruben%20Pereira.pdf>
- [4] V. La Carrubba, S. Piccarolo, and V. Brucato, “Crystallization kinetics of iPP: Influence of operating conditions and molecular parameters,” *J Appl Polym Sci*, vol. 104, no. 2, pp. 1358–1367, Jan. 2007.
- [5] Shanshan Luo *et al.*, “Crystallization behavior and optical properties of isotactic polypropylene filled with α -nucleating agents of multilayered distribution,” *RSC Adv*, vol. 10, no. 1, pp. 387–393x, Jan. 2020.
- [6] V. Speranza, R. Salomone, and R. Pantani, “Effects of Pressure and Cooling Rates on Crystallization Behavior and Morphology of Isotactic Polypropylene,” *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/cryst13060922.
- [7] Y. Hu *et al.*, “Influence of Cooling Rate on Crystallization Behavior of Semi-Crystalline Polypropylene: Experiments and Mathematical Modeling,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173646.
- [8] R. S. J. A., “Effect of injection molding parameters on crystallinity and mechanical properties of isotactic polypropylene,” *International Journal of Plastics Technology*, vol. 21, pp. 404–426, 2017, doi: 10.1007/s12588-017-9194-3.
- [9] Repsol, “ISPLEN PP070G2M,” 2013. [Online]. Available: www.chemicals.repsol.com
- [10] Braskem, “Polypropylene DR7037.01,” 2023. [Online]. Available: www.braskem.com
- [11] K. Wilson, “Thermal Conductivity of Steel: Carbon, Alloys and Stainless Steels,” Thermtest Inc.
- [12] M. C. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho, and P. G. Klemens, *Thermophysical Properties of Matter - The TPRC Data Series*, vol. 1. Purdue Research Foundation, 1970.
- [13] AZO MATERIALS, “Beryllium Copper UNS C17200 – Copper Alloy.”

- [14] FLIR Systems, "Use Low-Cost Materials to Increase Target Emissivity." Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.flir.eu/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-target-emissivity/>
- [15] ASTM International, "ASTM D1003-21 Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics," 2021, *West Conshohocken, PA, USA*. doi: 10.1520/D1003.
- [16] P. Gill, T. T. Moghadam, and B. Ranjbar, "Interacting Strain and Electric Fields in Multilayered Ferroelectric Ceramics," *Journal of Biomolecular Techniques*, vol. 21, pp. 167–193, Dec. 2010.
- [17] K. Kv, A. Sr, Y. Pr, P. Ry, and B. Vu, "Differential Scanning Calorimetry: A Review," May 2014.
- [18] Ruiz Orta; Carolina, Fernández Blázquez; Juan P, Anderson Wile; Amelia M, Coates; Geoffrey, and Alamo; R. G., "Isotactic polypropylene with (3,1) chain-walking defects: Characterization, crystallization, and melting behaviors," *Macromolecules*, vol. 44, pp. 3436–3451, Apr. 2011. doi: 10.1021/ma200231a.
- [19] Ehrenstein; Georg W. and Theriault; Richard P., *Polymeric Materials: Structure, Properties, Applications*. Munich, Germany, 2001.
- [20] D. W. Van Der Meer, "Structure-Property Relationships in Isotactic Polypropylene," University of Twente, Enschede, 2003. [Online]. Available: <http://www.tup.utwente.nl/>
- [21] A. F. Frandsen, "FRANDSEN, ATHELA F. (KSC-BAD00) GS-07," 2016.
- [22] S. Bradbury, M. Abramowitz, and M. W. Davidson, "Polarized Light Microscopy - Microscope Configuration," Olympus Life Science.
- [23] W. Ockenga, "Polarization Contrast - An Introduction," Leica Microsystems.

ANEXOS

Anexo A - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica

Tabela 9 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (2º ensaio)

T_embutido (°C)	T_placa (°C)	T_fita (°C)	T_câmara (°C)
28,3	29,4	28,4	30,3
29,5	30,5	29,5	30,8
38,2	38,9	37,1	37,9
44,1	44,8	43,2	43,7
51,0	51,8	47,8	48,7
57,5	57,7	56,8	57,4
63,7	64,2	62,2	63,4
71,8	71,9	70,6	70,6
76,9	77,3	75,2	76,2
85,5	86,1	84,7	85,8
92,1	92,6	91,1	92,4
99,5	100,2	98,6	102
104,3	104,4	102,9	107

Tabela 10 - Temperaturas registadas pelos instrumentos na calibração da câmara térmica (3º ensaio)

T_embutido (°C)	T_placa (°C)	T_fita (°C)	T_câmara (°C)
30,1	31,2	29,2	31,7
36,4	37,3	36,2	37,9
42,2	43,4	41,2	42,1
47,0	47,9	46,2	49,1
57,3	58,1	56,4	58,9
66,7	67,6	65,3	69,3
74,1	74,8	73,1	75,9
82,0	82,9	81,4	82,4
90,8	91,7	88,6	92,3
99,2	99,7	97,4	102

Anexo B – Efeito da turbidez no desempenho ótico dos provetes

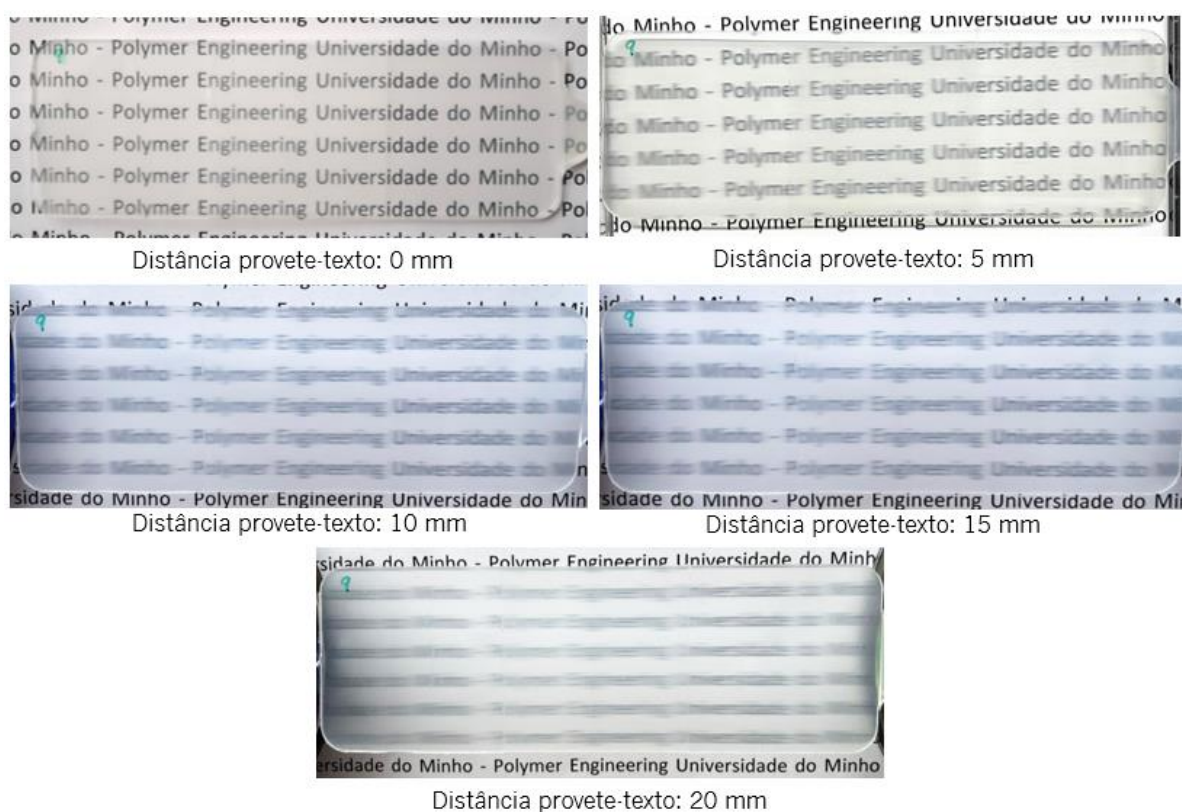


Figura 24 - Efeito da turbidez no desempenho ótico dos provetes: Aço/1mm/30-90-30

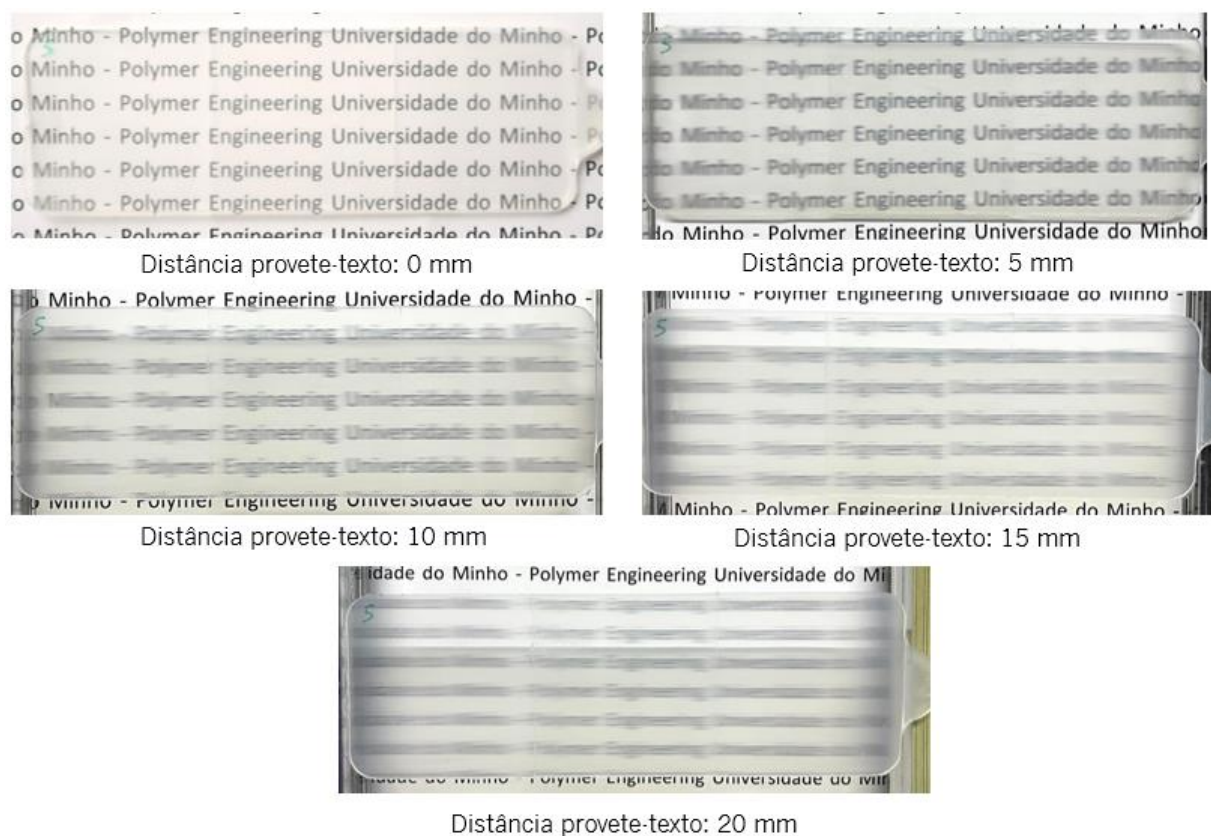


Figura 25 - Efeito da turbidez no desempenho ótico dos provetes: Aço/1mm/90-30-90

Anexo C – Curvas de DSC

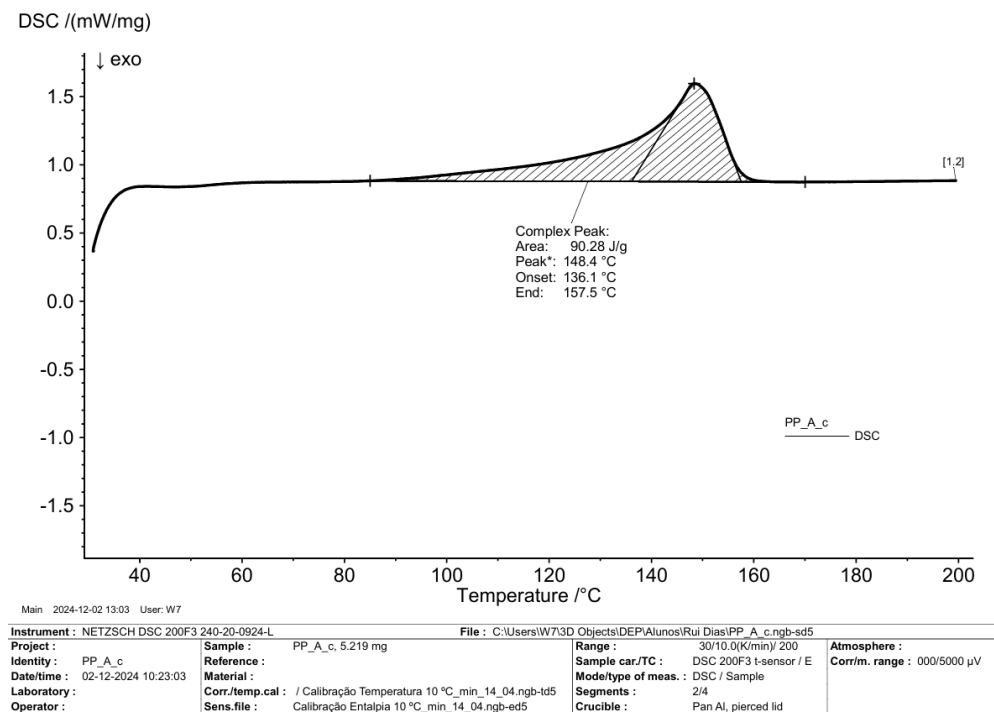


Figura 26 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_A_c

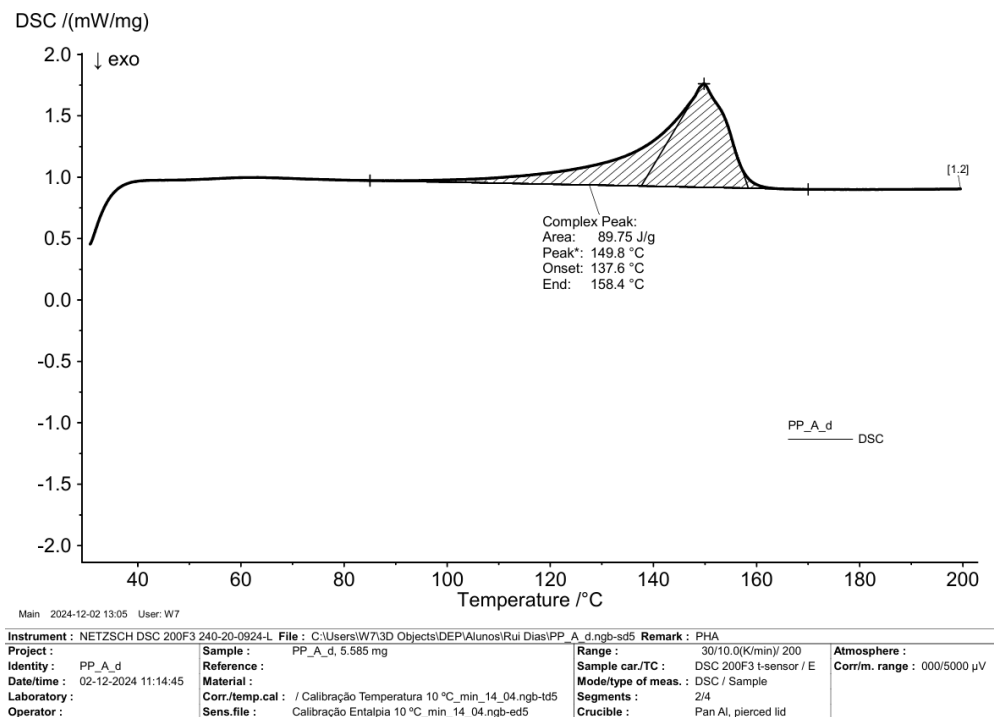


Figura 27 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_A_d

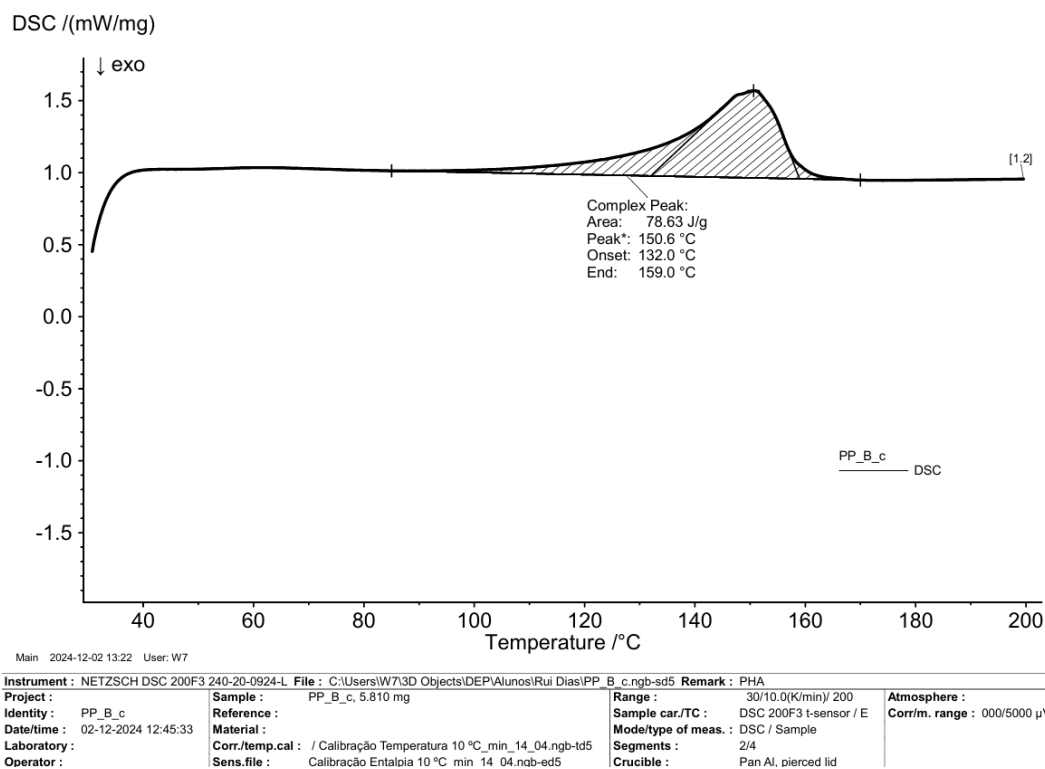


Figura 28 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_B_c

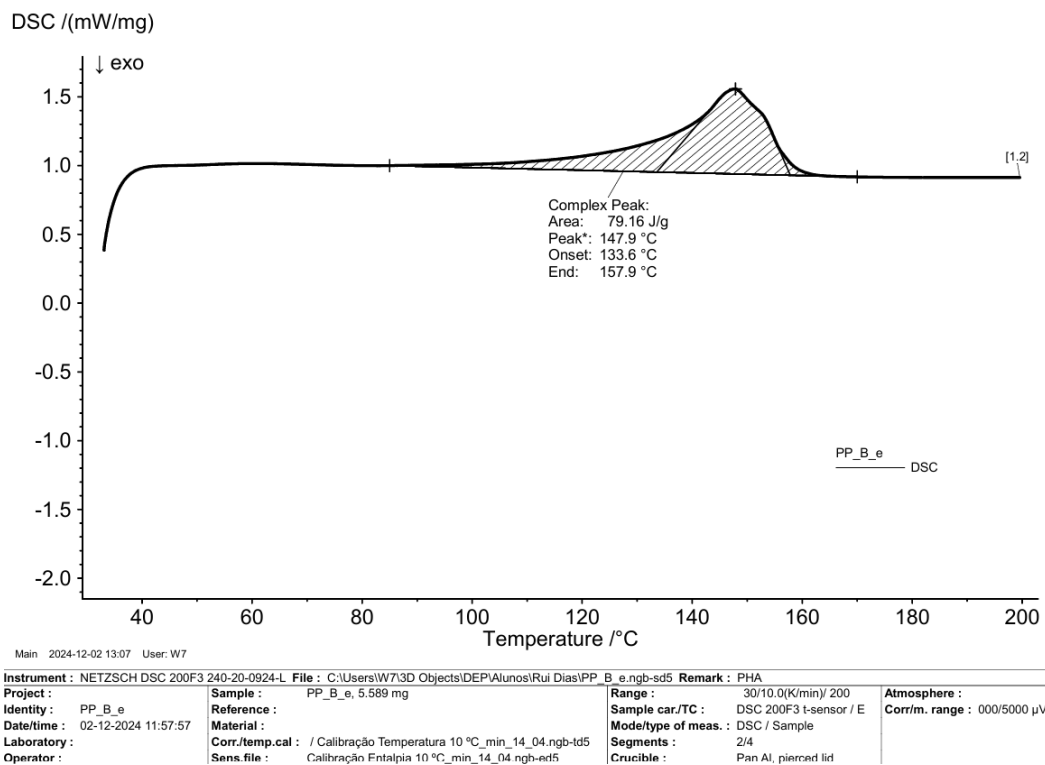


Figura 29 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_B_e

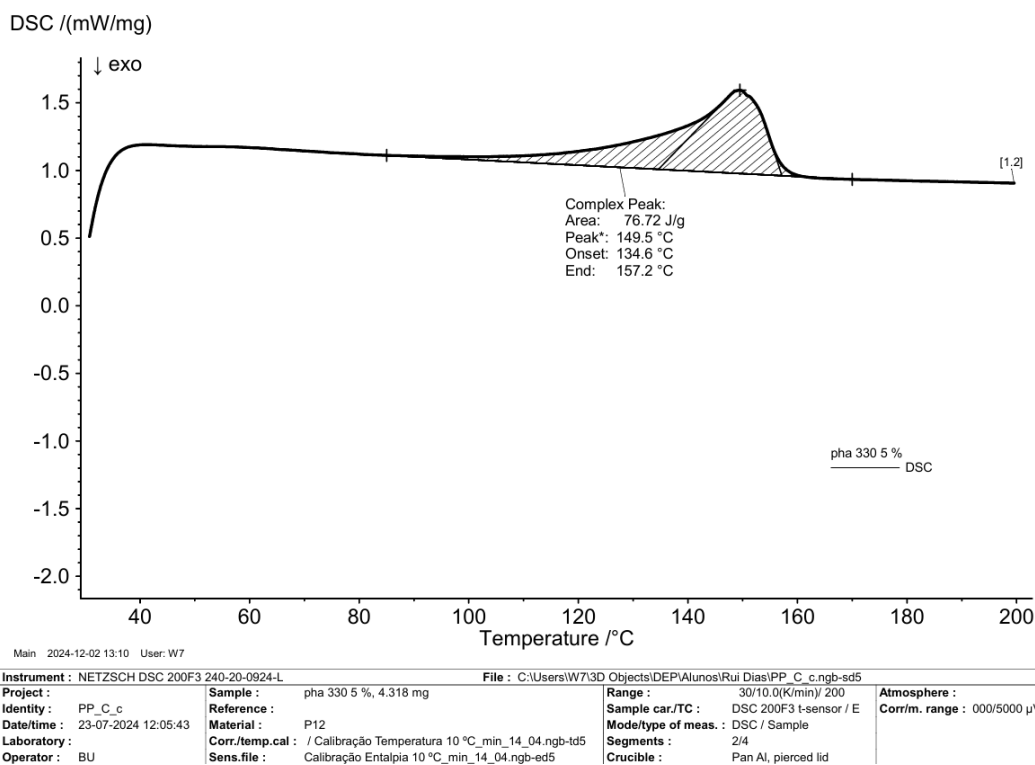


Figura 30 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_C_c

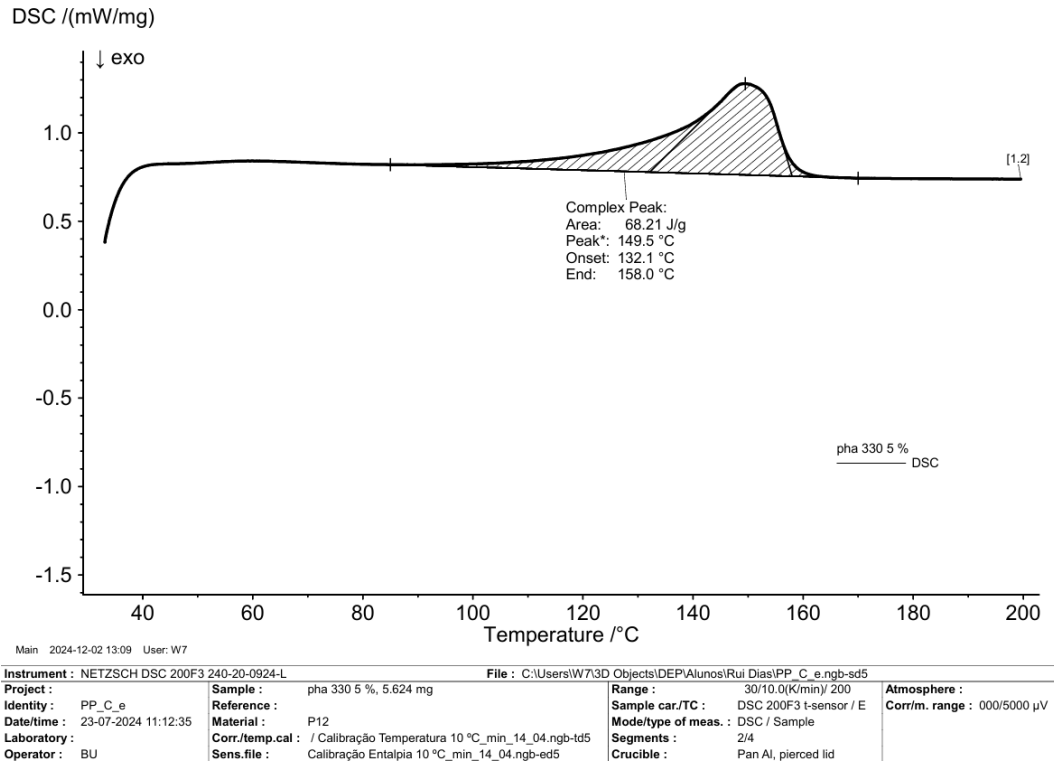


Figura 31 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_C_e

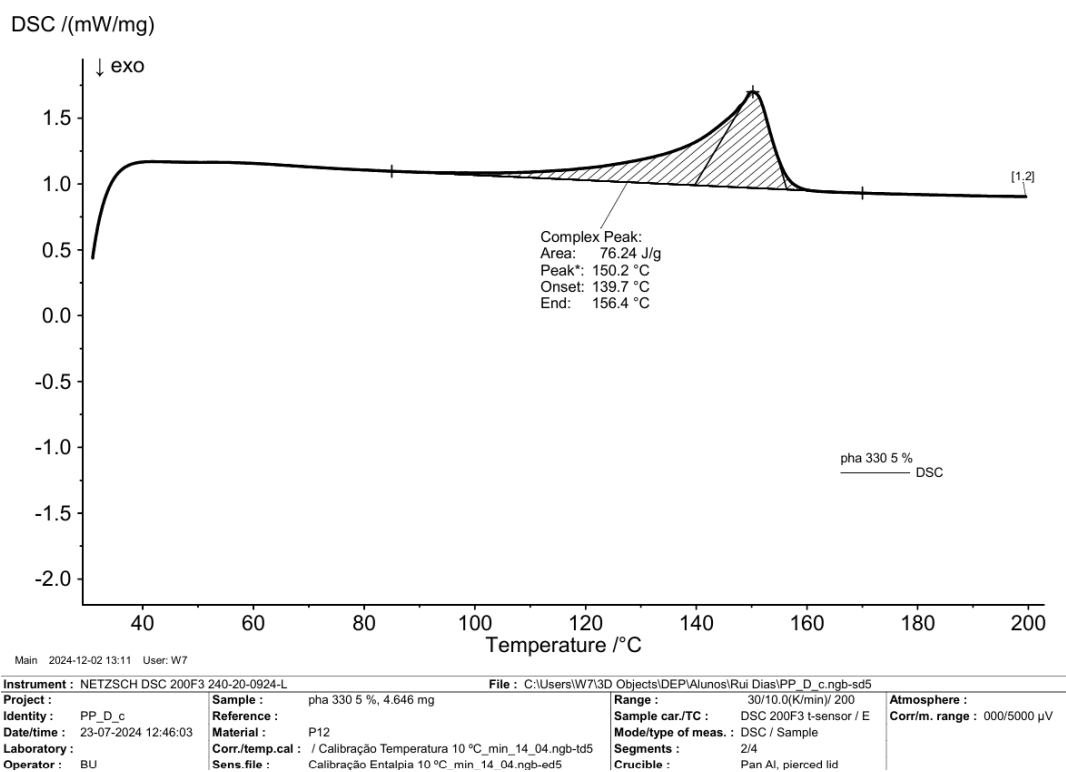


Figura 32 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_D_c

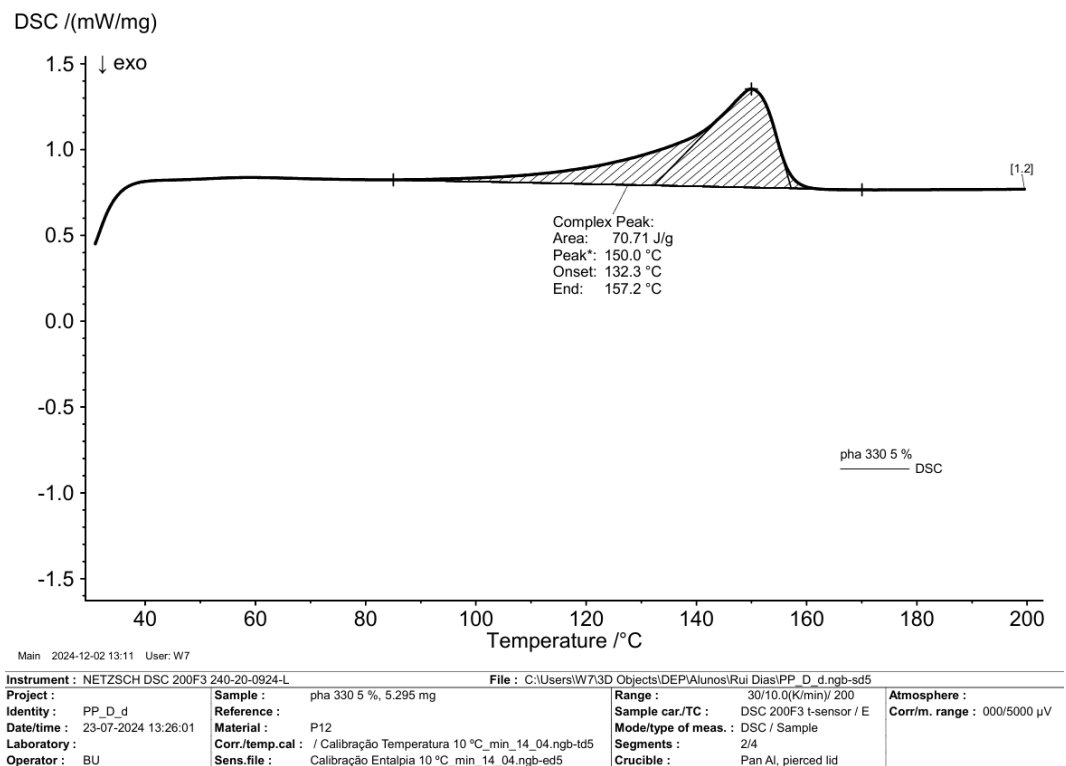


Figura 33 - Primeira curva endotérmica para amostra PP_D_d

Anexo D – Gráficos da variação de temperatura dos insertos (PRIAMUS)

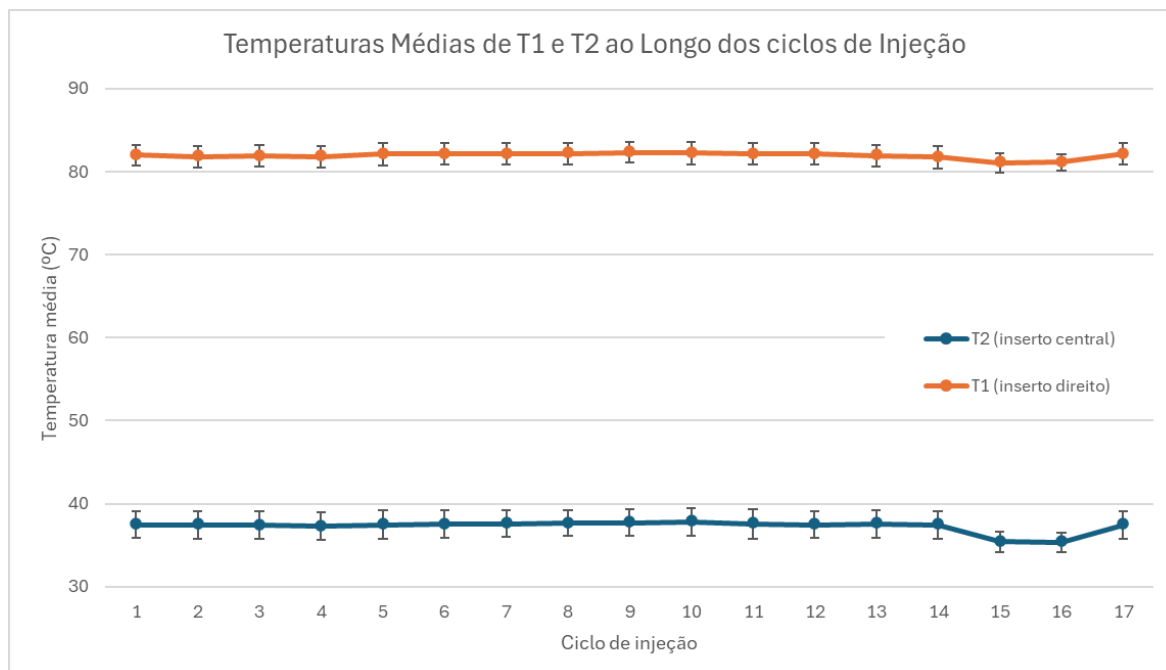


Figura 34 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço / 1mm / 90-30-90)

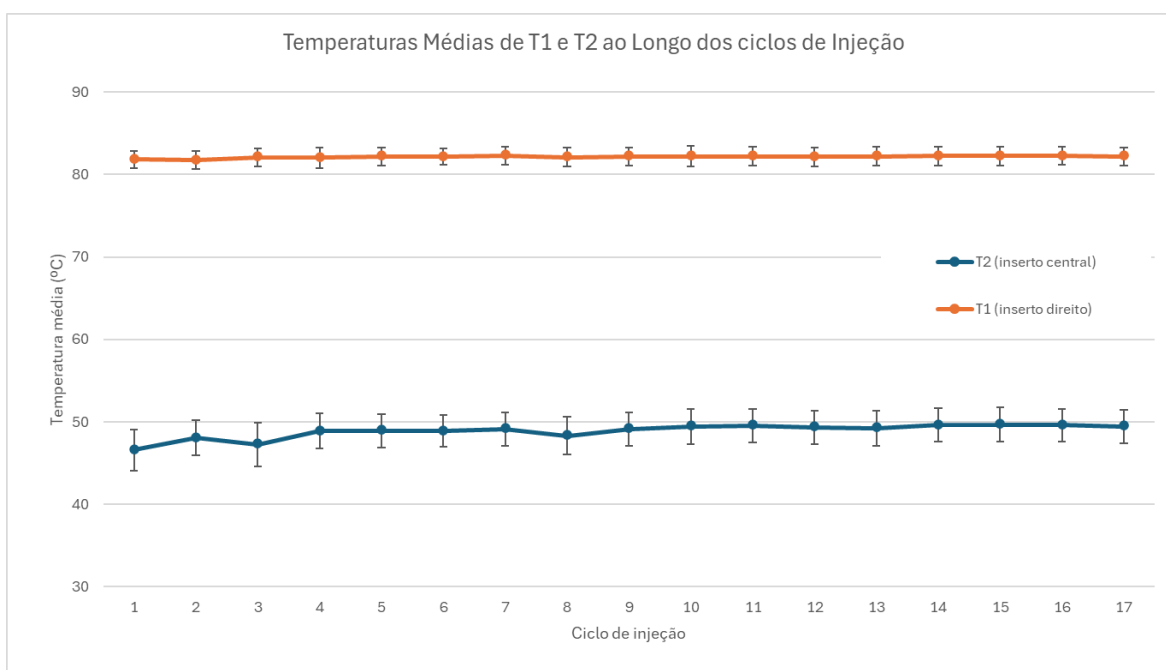


Figura 35 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio / 2mm / 90-30-90)

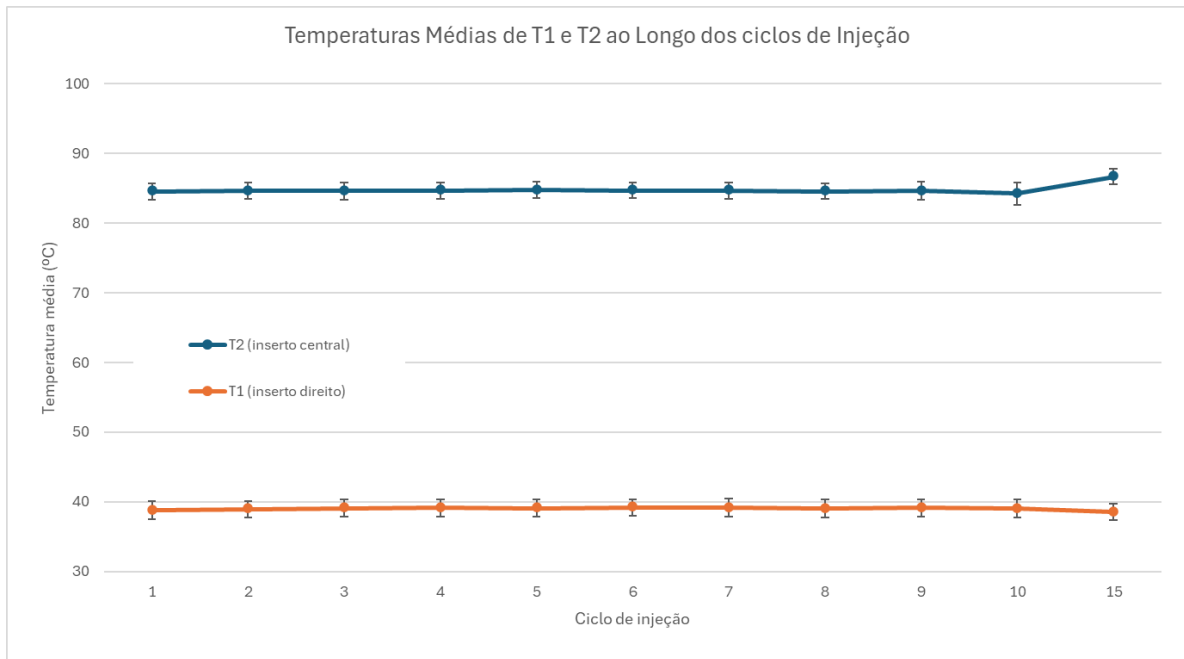


Figura 36 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio / 2mm / 30-90-30)

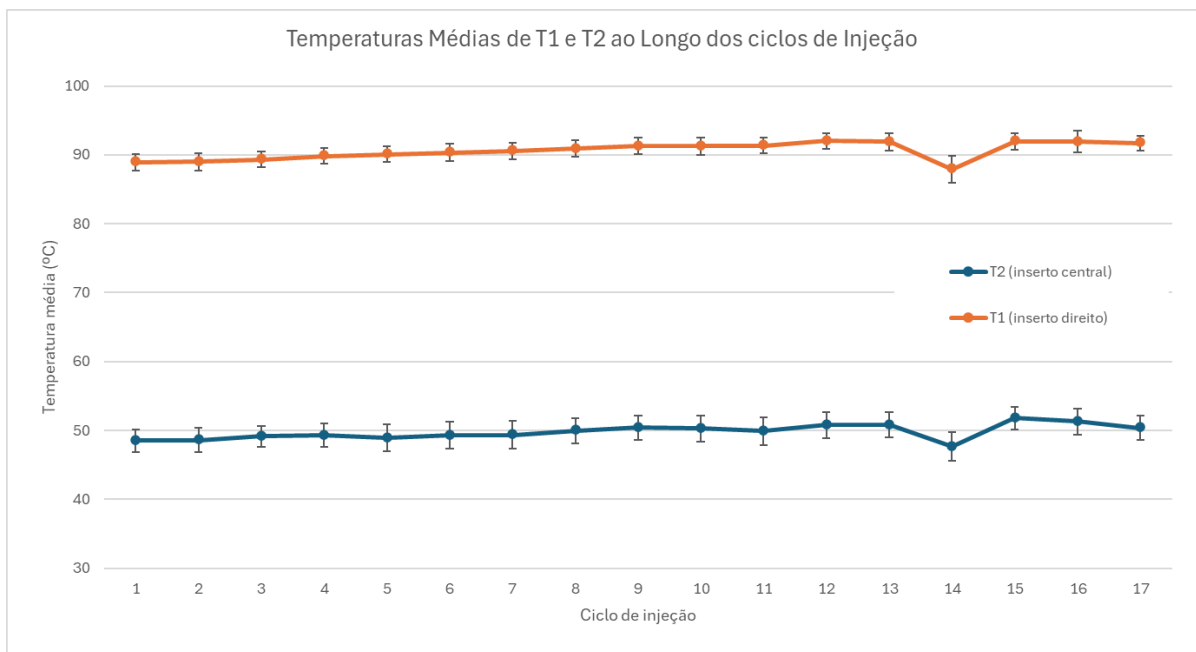


Figura 37 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço / 2mm / 90-30-90)

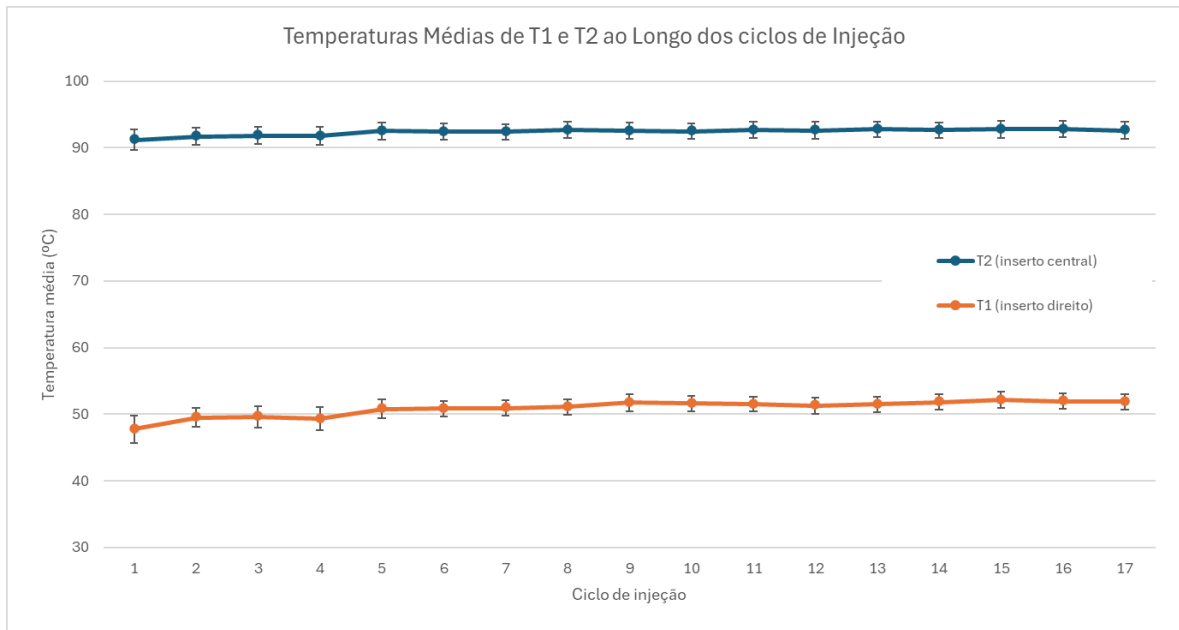


Figura 38 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Aço / 2mm / 30-90-30)

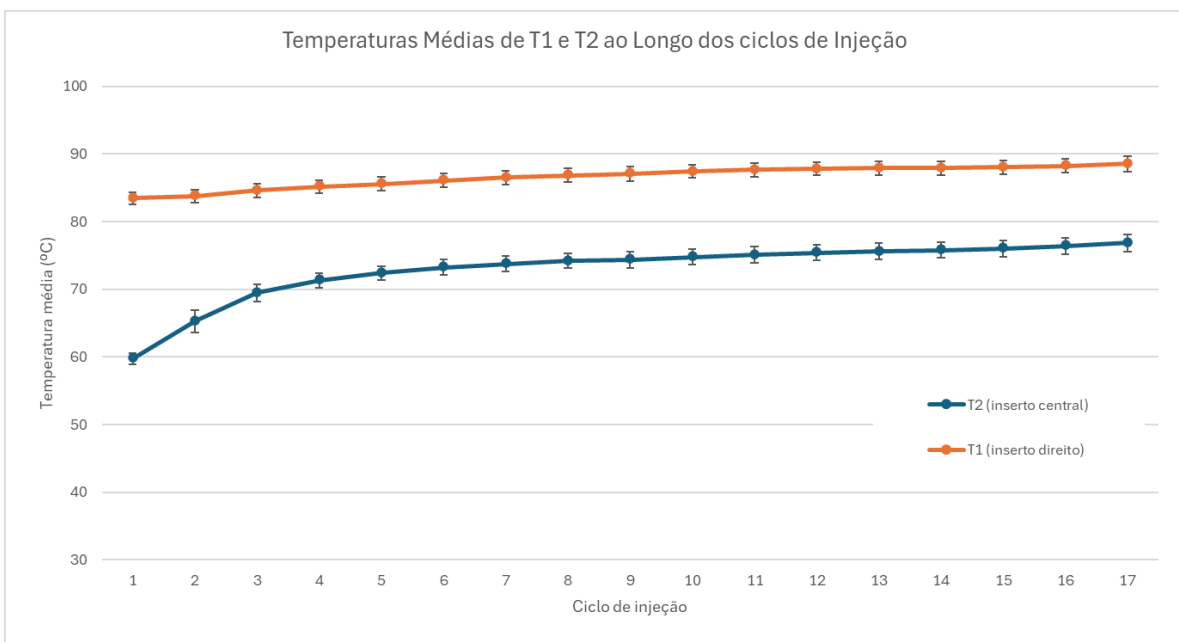


Figura 39 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio / 1mm / 90-30-90)

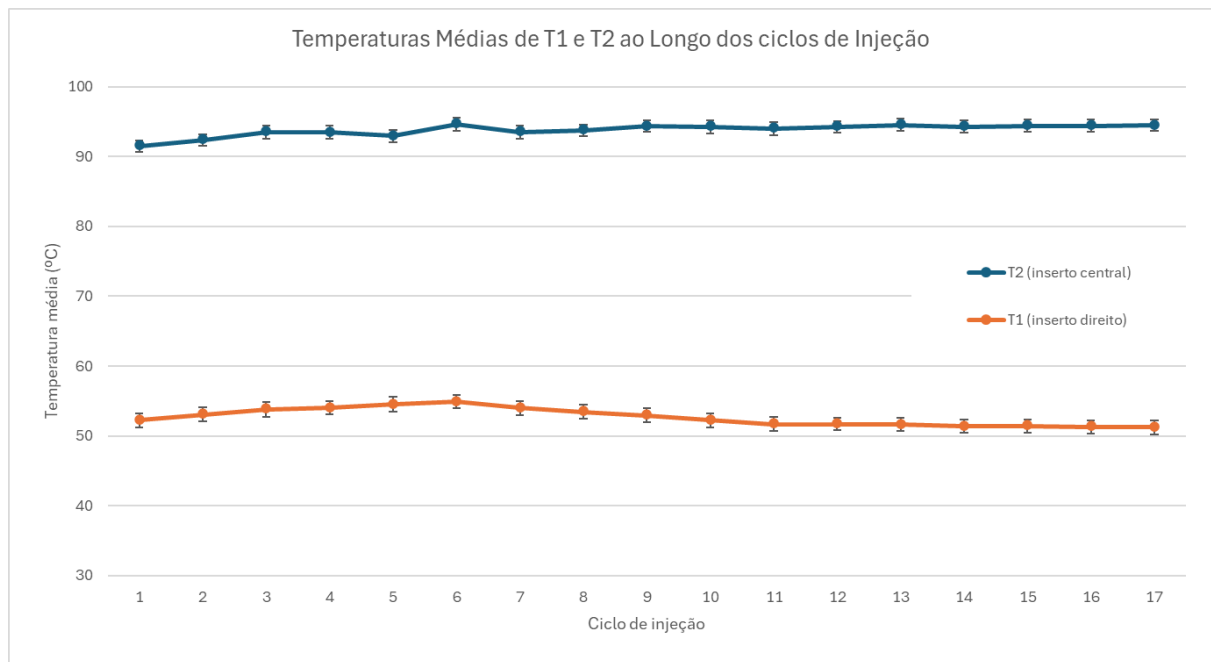


Figura 40 - Temperatura média de T1 e T2 durante os ciclos de injeção (Alumínio / 1mm / 30-90-30)