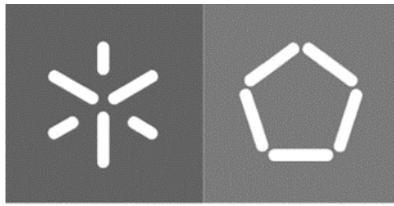




Márcia Dinis Albuquerque

**Estudo do efeito das condições de processamento da moldação por injeção e da soldadura por laser de transmissão usando polímeros com fibras de vidro**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Márcia Dinis Albuquerque

**Estudo do efeito das condições de  
processamento da moldação por injeção  
e da soldadura por laser de transmissão  
usando polímeros com fibras de vidro**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Gestão de Projetos de Engenharia

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor António Gaspar Cunha  
Doutora Agnieszka Rocha

Outubro 2023



## **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-SemDerivações**

**CC BY-NC-ND**

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



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, sou eternamente grata aos meus pais por todo o esforço que fizeram para poder realizar e terminar este grande passo da minha vida e por todo o incentivo e apoio prestado.

Ao meu irmão e à Rafaela, por estarem sempre disponíveis a aconselhar e a ajudar quando precisei.

Ao Pedro, por toda a compreensão, paciência e apoio dado, não me deixando cair nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Professor António Gaspar, pela orientação, pela disponibilidade e pelas sugestões fornecidas.

A todos os professores envolvidos pelas ideias e apoios.

Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos que estiveram presentes e me acompanharam ao longo destes 5 anos. Agradeço-lhes pelos momentos inesquecíveis partilhados e pela ajuda.

A todos um genuíno obrigado, com a vossa presença esta etapa tornou-se mais fácil.



## **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 ou falsificação de informação ou resultados em nenhuma das etapas conducentes à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.



## Resumo

Este trabalho apresenta o estudo da influência das condições de processamento da moldação por injeção e da soldadura por laser de transmissão usando um material com fibra de vidro. Para a soldadura por laser são necessárias duas peças, uma peça transparente à radiação e uma opaca. O material usado para ambas foi o mesmo, a poliamida 66, mas possuem diferentes percentagens de fibras de vidro.

Para retirar conclusões a metodologia usada foi: primeiramente injetar placas com diferentes espessuras e com diferentes condições de processamento, para posteriormente caracterizar termicamente e microestruturalmente. Com os resultados da injeção selecionaram-se as peças com maior transmitância, e foram estas as usadas para a soldadura. Na soldadura por laser estuda-se a influência das condições de processamento e faz-se a caracterização mecânica e física das peças. Recorre-se a um software de inteligência artificial baseado em exploração de dados para estabelecer uma relação entre todos os dados envolvidos no processo, tanto de moldação por injeção como de soldadura por laser. O resultado na injeção indica que as variáveis que têm mais influência na transmitância e na cristalinidade são a espessura e a 2ª pressão. Na soldadura, o resultado mostra que as variáveis que têm mais influência na força máxima são a espessura total do conjunto, o diâmetro do laser e o número de passagens na mesma peça.

Após a realização deste trabalho e a obtenção dos resultados concluiu-se que as condições do laser têm mais influência do que a moldação por injeção.

A força máxima mais alta foi atingida para um diâmetro de 1mm, uma espessura total de 5,5mm e uma dupla passagem do laser na peça.

**Palavras-chave:** moldação por injeção, soldadura por laser



## **Abstract**

This work presents the study of the influence of processing conditions in injection moulding and transmission laser welding using a glass fibre material. As laser welding requires two pieces, a piece transparent to radiation and an opaque piece. The material used for both was the same, polyamide 66, but they have different percentages of glass fibres. To draw conclusions the methodology used was: firstly inject plates with different thicknesses and with different processing conditions, to later characterize thermally and microstructurally. With the results of the injection the parts with the highest transmittance were selected and these were used for welding. In laser welding the influence of the processing conditions is studied and the mechanical and physical characterization of the parts is carried out. Artificial intelligence software based on data exploration is used to establish a relationship between all the data involved in the process, both injection moulding and laser welding. The injection results indicates that the variables that have the most influence on transmittance and crystallinity are the thickness and 2<sup>a</sup> pressure. In welding, the result shows that the variables that have the most influence on maximum force are the total thickness of the assembly, the laser diameter and number of passes on the same part.

After carrying out this work and obtaining the results, it was concluded that laser conditions have more influence than injection moulding.

The highest maximum force was reached for a diameter of 1mm, a total thickness of 5,5mm and a double pass of the laser on the part.

**Keywords:** injection molding, laser welding



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Declaração de Integridade .....	iv
Resumo .....	v
Abstract .....	vi
Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	ix
Lista de abreviaturas .....	x
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Soldadura de peças em plástico .....</b>	<b>2</b>
2.1. Técnicas de soldadura .....	2
2.2. Soldadura a laser por transmissão.....	4
2.4. Moldação por Injeção .....	6
2.5. Modelação numérica.....	11
2.6. Metodologia para análise de dados.....	11
<b>3. Estado de arte.....</b>	<b>12</b>
<b>4. Trabalho realizado .....</b>	<b>16</b>
4.1. Material.....	16
4.2. Plano de trabalho .....	16
<b>5. Procedimento Experimental .....</b>	<b>17</b>
5.1. Moldação por injeção .....	17
5.2. Caracterização das peças injetadas .....	18
5.3. Simulação computacional.....	21
5.4. Processo de soldadura .....	22
5.5. Caracterização mecânica da solda.....	25
5.6. Caracterização física da solda.....	26
5.7. Análise de dados .....	26
<b>6. Apresentação e discussão dos resultados .....</b>	<b>45</b>
6.1. Moldação por injeção .....	45
5.2. Caracterização das peças injetadas .....	47
6.3. Simulação computacional.....	52



6.4. Processo de soldadura.....	54
6.5. Caracterização mecânica da solda.....	60
6.6. Caracterização física da solda.....	65
6.7. Análise de dados .....	68
7. Conclusão .....	73
8. Bibliografia .....	75
9. Anexos .....	78

## Índice de Figuras

Figura 1: Temas de trabalho.....	3
Figura 2: Esquema do processo de soldadura laser por transmissão .....	4
Figura 3: Fenómenos da radiação numa peça .....	5
Figura 4: Injetora, retirado de [5].....	7
Figura 5: Ciclo de moldação [5].....	8
Figura 6: Microestrutura da moldação [5].....	11
Figura 7: Placas injetadas para estudo .....	17
Figura 8: Espessuras das placas.....	17
Figura 9: : a) corte das amostras; b) amostras no molde; c) enchimento do molde c/ resina; d) moldes c/ resina .....	20
Figura 10: Resíduo de calcinação .....	20
Figura 11: a) peça 1,5-2mm; b) peça 2,5-3mm .....	22
Figura 12: instrumentos usados para a soldadura laser .....	23
Figura 13: a) placa de PLA; b) peças posicionadas para a soldadura.....	24
Figura 14: Gráfico transmitância vs espessura .....	24
Figura 15: Peças colocadas nas amarras.....	26
Figura 16: Gráfico da posição do fuso em função da pressão .....	45
Figura 17: Gráfico de DSC .....	47
Figura 18: Vista das fibras ao microscópio .....	49
Figura 19: Orientação das fibras.....	50
Figura 20: Valores da transmitância para cada espessura .....	51



Figura 21:a) orientação das fibras na direção x da peça de maior espessura; b) orientação das fibras na direção x da peça de menor espessura .....	53
Figura 22: Gráfico da soldadura para peças com menor espessura.....	55
Figura 23: Gráfico da soldadura para peças com espessura intermédia.....	56
Figura 24: Gráfico da soldadura para peças com maior espessura .....	57
Figura 25: Emissão de fumo durante a soldadura .....	58
Figura 26: a) peça queimada; b) peça com boa solda .....	60
Figura 27: Esquema do comportamento do diâmetro do laser .....	61
Figura 28: Rotação com peça transparente de espessura: a)1,5mm; b)2mm; c)2,5mm; d)3mm .....	63
Figura 29: Solda das placas.....	64
Figura 30: Gráfico força máxima vs deformação .....	65
Figura 31: Dimensão da solda.....	65
Figura 32: Solda analisada na lupa.....	66
Figura 33: Comportamento da distância de afastamento das peças e da cabeça do laser.....	67
Figura 34: Filograma .....	69
Figura 35: Filograma .....	71
Figura 36: Filograma .....	73

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Influência na transmitância [12], [13] .....	13
Tabela 2: Influência da força máxima com robô Motoman HP20 e Motoman SIA20 [12], [13].....	13
Tabela 3: Influência da resistência e da largura da solda .....	13
Tabela 4: Variáveis de estudo e respetiva identificação.....	17
Tabela 5: Dados da injeção.....	40
Tabela 6: Tabela completa.....	41
Tabela 7: Continuação da Tabela 6 .....	42
Tabela 8: Condições de processamento .....	46
Tabela 9: Condições de processamento para as espessuras de 2,5 e 3mm.....	46



Tabela 10: Valores da entalpia de fusão e do grau de cristalinidade das peças para as diferentes espessuras.....	48
Tabela 11: Perda de massa por calcinação .....	49
Tabela 12: Comparação dos resultados .....	53
Tabela 13: Condições e resultados da soldadura .....	59
Tabela 14: Resultados Força máxima .....	60
Tabela 15: Resultados da largura da solda .....	66
Tabela 16: Distância entre variáveis de decisão e objetivos.....	68
Tabela 17: Distância entre objetivos .....	68
Tabela 18: Distância entre variáveis de decisão e objetivos.....	70
Tabela 19: Distância entre objetivos .....	70
Tabela 20: Distância entre variáveis de decisão e objetivos.....	72
Tabela 21: Distância entre objetivos .....	72

## **Lista de abreviaturas**

PA 66- poliamida 66

DSC- calorimetria diferencial de varredura

T<sub>m</sub>- temperatura do molde

T<sub>inj</sub>- temperatura de injeção

V<sub>inj</sub>- Velocidade de injeção



## 1. Introdução

A versatilidade dos plásticos permite a sua aplicação numa vasta gama de produtos nas diversas áreas e com uma grande variedade de formas e dimensões, e.g., indústria automóvel, eletrónica, médica, entre outras... Para esse efeito são usadas técnicas de processamento que se revelam adequadas para cada tipo de produto, destacando-se de entre estas a extrusão, a injeção, a moldação-sopro, a termoformação e a moldação rotacional. No entanto, apesar desta grande versatilidade, em muitas situações não é possível obter o produto adequado, principalmente quando esse produto deverá ser constituído por dois materiais diferentes e/ou pelo mesmo material, mas com características diversas. Exemplos desta situação poderão ser a fabricação de produtos com cores diferentes ou de um produto constituído por um material simples e outro com fibra de vidro.

Todavia, apesar de existir a possibilidade de adaptar as técnicas de processamento referidas a esta produção, poderá ser conveniente que as partes sejam fabricadas separadamente e depois ligadas entre si. Para este efeito, uma das técnicas mais usadas é a soldadura que tem como objetivo a ligação efetiva entre duas peças produzidas individualmente. De entre as técnicas de soldadura existentes destaca-se a soldadura por laser, processo que será o alvo de estudo neste trabalho.

A característica mais importante na soldadura por laser está relacionada com a transparência de um dos materiais a soldar, uma vez que é necessário que o laser seja capaz de atravessar uma das peças a soldar, mas, simultaneamente, a segunda peça terá de ser opaca para absorver a energia do laser. A soldadura efetiva-se pela fusão do material opaco que ao ser pressionado contra o material transparente produz a ligação entre as duas peças. Para que esta operação seja possível é necessário ter em conta quatro aspetos essenciais, as propriedades dos materiais poliméricos, a geometria das peças a soldar, as condições de processamento da técnica usada para processar as peças e as condições de processamento do laser.

Por conseguinte, o objetivo principal deste trabalho é estudar o processo de soldadura por laser de transmissão de duas peças produzidas por moldação por injeção em poliamida com fibra de vidro, sendo uma delas transparente e a outra opaca. Neste estudo serão tidos em conta os aspetos referidos anteriormente, ou



seja, os efeitos das propriedades dos materiais, da geometria das peças e das condições de processamento nas fases de injeção e de soldadura.

Para a concretização deste trabalho foram realizadas as tarefas seguinte: i) injeção das placas em poliamida, ii) avaliar a transmitância, a orientação das fibras e a cristalinidade das mesmas, recorrendo aos aparelhos de medidas adequados ao efeito, iii) simulações no software *Moldex3D*, iv) soldadura a laser das placas, v) medição da resistência e da largura da solda.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: i) na secção 2 descrevem-se as técnicas usadas para a realização do mesmo, moldação por injeção e soldadura por laser, ii) na secção 3 apresentam-se os resultados obtidos em cada teste.

## **2. Soldadura de peças em plástico**

### **2.1. Técnicas de soldadura**

Como referido, o objeto de estudo deste trabalho é o processo de soldadura de peças em plástico, que pode ser efetuada por diferentes técnicas. As técnicas de soldadura mais comuns são:

#### **I. Soldadura térmica**

Este processo varia com o tipo de peça a soldar. Soldadura topo-a-topo para peças rígidas em que as duas partes são fixas e as suas interfaces são aquecidas por uma placa quente. Quando o material estiver fundido essa placa recua para que a sob pressão se unam.

No caso de filmes/embalagem a técnica apropriada é a selagem, em que o filme é colocado entre os “rails” de contacto que o aquece e pressiona.

#### **II. Soldadura laser**

Este processo tem duas variantes, soldadura direta e soldadura laser por transmissão. Na soldadura direta a superfície do polímero é aquecida até fundir os componentes e ocorre a união. Na soldadura por transmissão as peças possuem transparências diferentes e a radiação que atravessa a peça transparente é absorvida pela peça opaca, sendo transformada em calor permitindo a fusão do material da peça, que sobre pressão provoca a união.



### III. Soldadura por ultrassons

A junção de peças é feita pela conversão de energia elétrica em vibrações mecânicas de alta frequência localizada na interface. O calor resultante da fricção funde o material na junta.

### IV. Soldadura por vibração

Duas peças são colocadas em contacto, e uma parte é posta em movimento horizontal sob pressão gerando calor por fricção. Forma-se uma película de material fundido que solda ao arrefecer.

Por conseguinte, uma vez que o objetivo deste trabalho é estudar o processo de soldadura de peças plásticas injetadas, é necessário ter em conta os quatro aspetos ilustrados na Figura 1, nomeadamente o processo de soldadura, injeção de peças, modelos de transferência de calor e as técnicas de análise de dados. Ou seja, a soldadura depende do processamento das peças na injeção e dos modelos de transferência de luz e calor através destas. Por fim, é importante analisar eficientemente os resultados obtidos. Estes quatro temas serão discutidos a seguir.

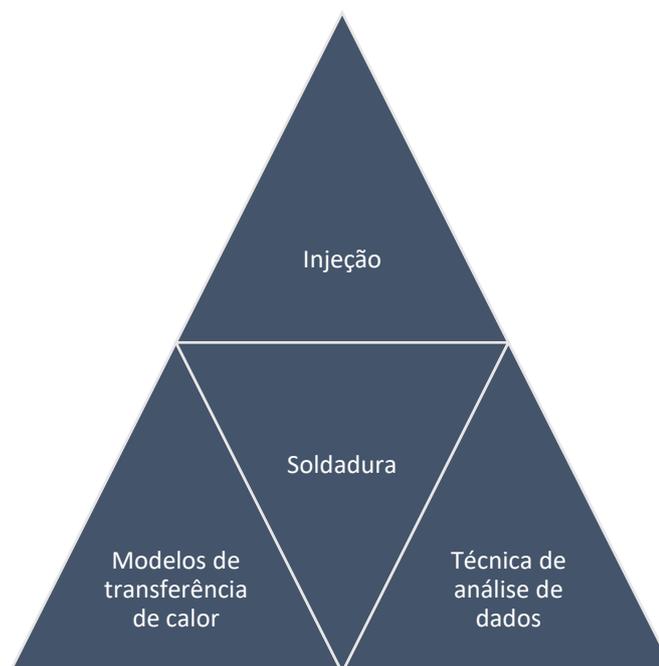


Figura 1: Temas de trabalho



## 2.2. Soldadura a laser por transmissão

A técnica de soldadura usada neste trabalho é a soldadura por laser por ser um processo rápido e preciso. No entanto, há duas variantes na soldadura laser: soldadura direta e por transmissão, como referido anteriormente.

Devido à espessura da peça foi escolhida a soldadura por laser de transmissão, sendo o processo mais comumente usado. A Figura 2 ilustra o processo de soldadura por laser de transmissão [1].

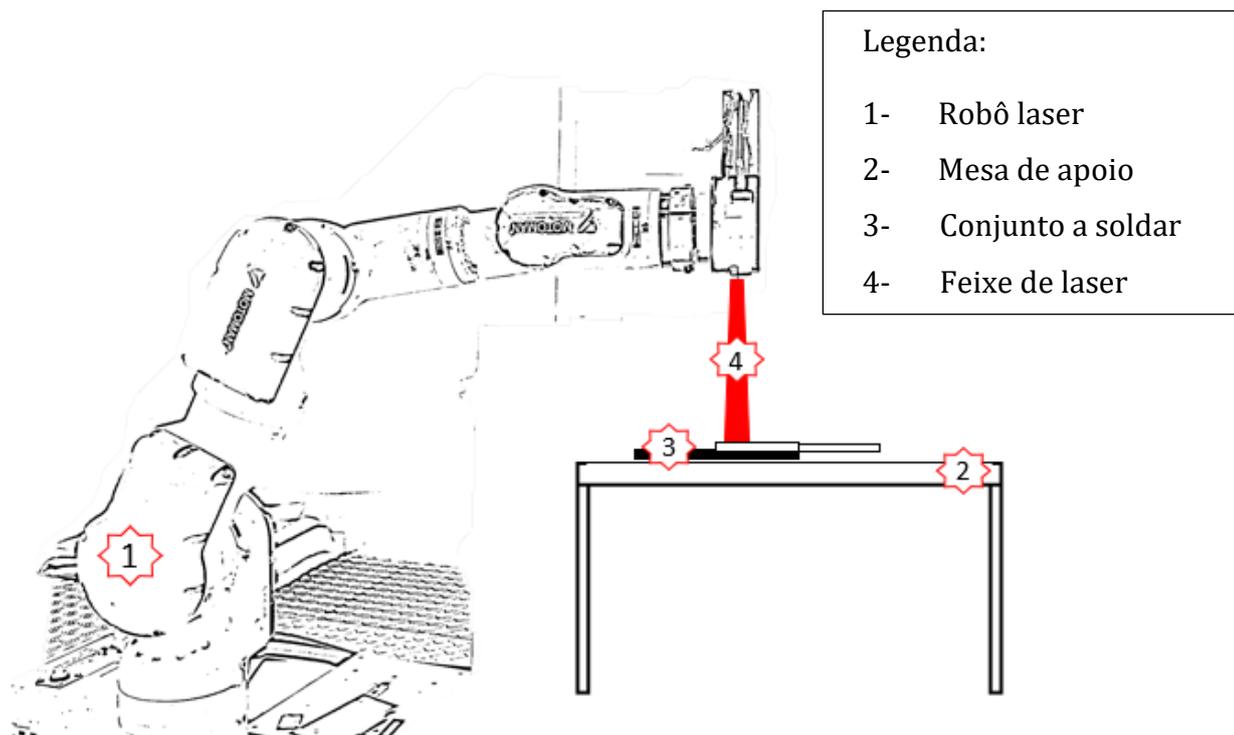


Figura 2: Esquema do processo de soldadura laser por transmissão

Antes de se iniciar o processo de soldadura é necessário ter em conta alguns aspetos importantes, como a compatibilidade entre os materiais, uma vez que as temperaturas de fusão devem ser semelhantes, o contacto entre ambas para que a condução de calor seja eficiente e a existência de uma parte transparente e outra opaca à radiação laser.

Assim sendo, neste processo, há duas partes para se unirem, onde a parte superior (lado do laser) é transparente ao laser e a parte inferior é opaca à mesma radiação, de forma a absorvê-la. Colocam-se em contacto com uma determinada pressão e o feixe é transmitido, atravessando a peça superior até à peça inferior, que absorve a radiação convertendo-a em calor que é conduzido por condução para a peça



superior. Deste modo, ocorre a fusão dos materiais e posteriormente a união dos mesmos [2]–[4].

A radiação que incide a partir do laser pode ser refletida, transmitida e absorvida pela peça, como ilustra na Figura 3.

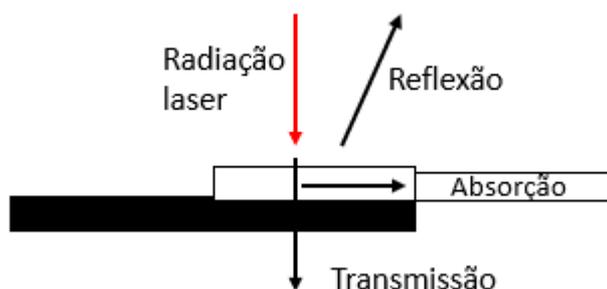


Figura 3: Fenómenos da radiação numa peça

No caso de ocorrer transmissão da radiação, esta passa para a peça opaca à radiação e o processo de soldadura ocorre normalmente. Se eventualmente ocorrer absorção, a peça transparente fica queimada. Se houver reflexão da radiação, esta não penetra na peça transparente. Assim sendo, nos últimos dois casos descritos, a intensidade do feixe que chega à peça opaca é baixa ou nula não permitindo que os materiais fundam e, conseqüentemente, não há união de ambas as partes.

O processo de soldadura pode ser influenciado na eficiência por quatro parâmetros [3].

- Potência do laser – uma potência excessiva pode levar à degradação do material, e uma potência baixa implica que o material não funda devidamente traduzindo-se numa união fraca dos materiais.
- Pressão de fixação – a pressão também deve ser adequada, visto que elevada pressão irá transportar o material fundido para fora da zona de união e uma pressão baixa não permite um bom contacto entre as diferentes partes.
- Velocidade de varrimento do laser/ tempo de exposição ao laser – estas duas variáveis estão diretamente relacionadas, uma vez que velocidade do laser maior implica menor tempo de exposição da peça ao laser e vice-versa. Se a velocidade de varrimento do laser for baixa pode leva a uma degradação do



material porque vai incidir radiação durante mais tempo no mesmo local e pelo contrário, uma velocidade elevada não permite a fusão dos materiais.

- Distância de afastamento do laser - da mesma forma, uma elevada distância entre o laser e a peça pode implicar uma fusão fraca, ao invés de uma curta distância.

As vantagens deste processo são [3]:

- Permite maior resistência mecânica da junta soldada;
- Permite a soldadura de formas complexas;
- Tem tempos de soldadura rápidos;
- Não tem vibração;
- Tem elevada precisão;
- Permite solda de elevada qualidade.

e as desvantagens são [3]:

- Tem preço mais elevado;
- Sensível ao material polimérico;
- A união entre duas partes tem de ser de qualidade;
- A fixação da peça superior e inferior deve ser tida em conta para garantir um bom contacto na interface ao longo da soldadura.

## 2.4. Moldação por Injeção

Devido ao facto de as peças a soldar serem produzidas por moldação por injeção, torna-se relevante referir o processamento uma vez que as condições de produção das peças podem influenciar decisivamente a soldadura. Como se sabe, as peças produzidas por injeção podem sofrer alterações na sua microestrutura induzidas pelas condições de processamento, desenho do molde e geometria da peça.

Uma máquina de injeção é constituída por quatro unidades funcionais: unidade de potência, unidade de injeção, unidade de controlo e unidade de fecho, como mostrado na Figura 4 [5].

- **Unidade de potência:** fornece energia aos vários atuadores da máquina;



- **Unidade de injeção:** encarrega-se do processo de injeção, isto é, transporta o material desde a tremonha até ao bico de injeção, aquece, plasticiza e homogeneiza o material.
- **Unidade de fecho:** garante a fixação e movimentação do molde, tendo a capacidade de manter o molde fechado na injeção e pressurização, e aciona a extração da peça.
- **Unidade de comando:** encontram-se nesta unidade as operações e os dispositivos para a monitorização e controlo do processo.

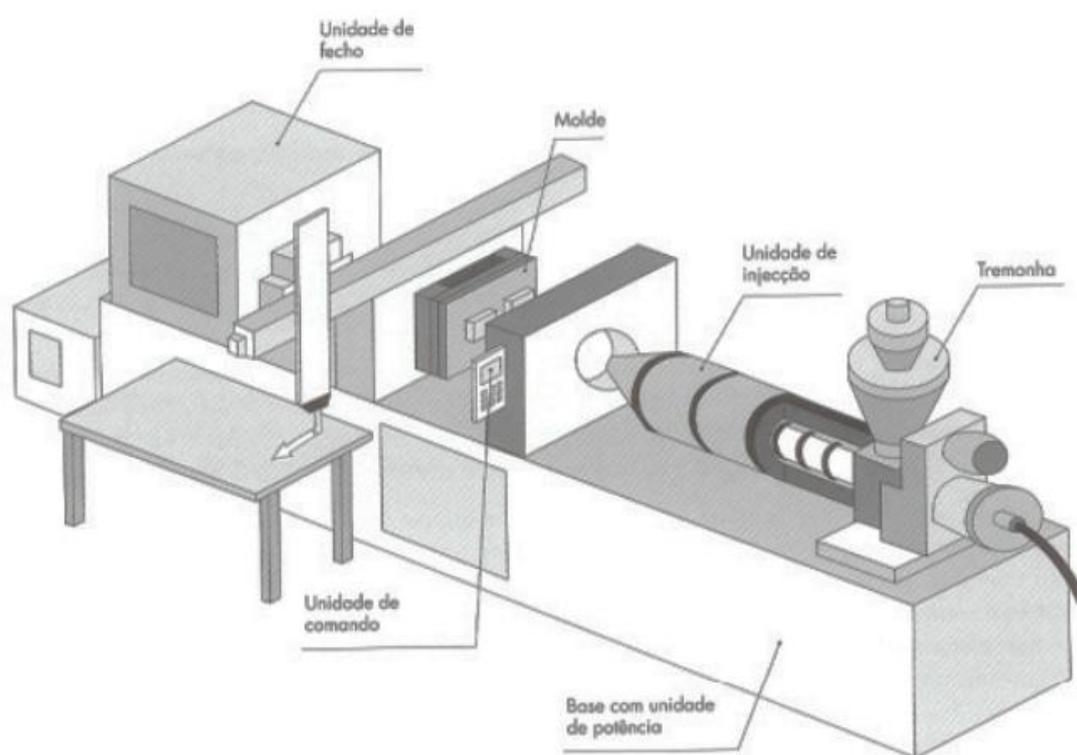


Figura 4: Injetora, retirado de [5]

A moldação por injeção é um processo cíclico, como se ilustra na Figura 5, com algumas ações a ocorrer em simultâneo nas unidades referidas.

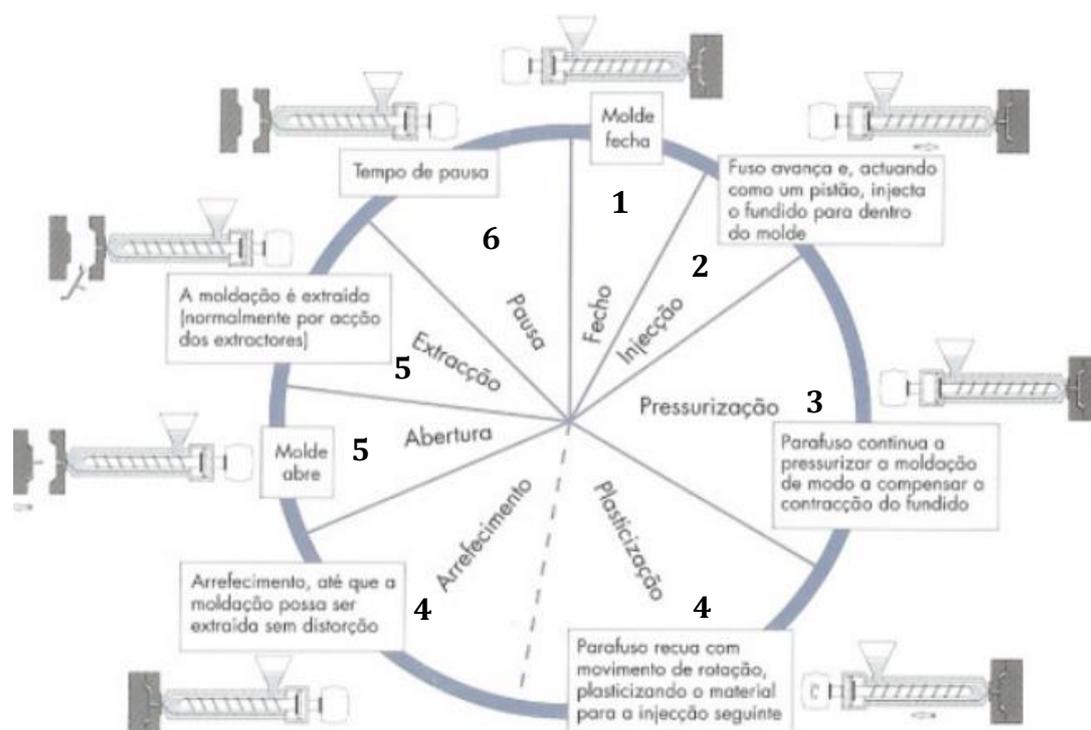


Figura 5: Ciclo de moldação [5]

### **Ação 1- Fecho e trancamento**

O ciclo inicia-se com esta ação e deve ser o mais rápido possível. O tempo desta operação depende das capacidades da máquina, características do molde e da distância a percorrer (curso de fecho) [5].

### **Ação 2- Injeção**

Esta fase começa pelo avanço do fuso, onde o material fundido é pressionado e entra no molde, adquirindo a estrutura da peça. Esta ação termina quando a peça possuir 95% do seu volume. A velocidade de injeção e pressão são definidos assegurando a qualidade do produto final [5].

### **Ação 3- Pressurização**

Após a injeção, tem que se continuar a exercer pressão (2ª pressão) de forma a evitar o refluxo de material e para reduzir o efeito da contração causada pelo arrefecimento [5].

### **Ação 4- Arrefecimento**

Esta ação é simultânea com a plasticização, isto é, enquanto a peça arrefece o parafuso recua a rodar, plasticizando o material para o próximo ciclo. O



arrefecimento termina quando a peça obter uma temperatura que permita a desmoldação sem distorção [5].

#### **Ação 5- Abertura e extração**

A penúltima ação é a abertura do molde seguida da extração da peça. A extração ocorre com o auxílio dos extratores e atualmente utiliza-se dispositivos robô para agarrar na peça e a colocar numa estrutura externa [5].

#### **Ação 6- Tempo de pausa**

O tempo de pausa ou tempo morto é o tempo que resulta entre o fim da extração e o início de um novo ciclo. Aspira-se que seja muito curto ou nulo para que não afete a produção [5].

O funcionamento do processo depende de algumas variáveis operatórias que são aquelas sobre as quais o operador atua. Existem também um conjunto de parâmetros de processo, onde a sua alteração é mais difícil [5].

As variáveis operatórias são:

- Temperatura do molde
- Temperatura de injeção
- Velocidade de injeção
- Pressão de injeção
- 2ª pressão
- Tempo de arrefecimento
- Tempo de pressurização
- Velocidade de rotação do fuso
- Almofada
- Contrapressão

Os parâmetros de processo são:

- Geometria da moldação (volume, espessura, comprimento de fluxo)
- Sistema de alimentação (localização e geometria dos ataques, espessura e comprimento dos alimentadores)
- Capacidade de injeção da máquina
- Geometria do bico de injeção
- Distribuição de temperaturas na superfície moldante



De entre as variáveis operatórias referidas anteriormente foram selecionadas cinco para serem estudadas: temperatura do molde, temperatura de injeção, velocidade de injeção, pressão e 2ª pressão.

- Temperaturas de injeção mais elevadas aumentam, como era de esperar, o tempo de ciclo e o consumo de energia, porém melhora a transparência, o brilho e a contração. Pelo contrário, temperaturas baixas complicam o enchimento e fazem salientar as linhas de soldadura [6].
- A temperaturas de molde altas o material tem os mesmos comportamentos que a temperatura de injeção, ou seja, aumenta o brilho, a transparência e a contração, no entanto para temperaturas de molde baixas aumentam as tensões residuais. Esta variável tem, ainda, influencia na microestrutura das moldações, denotando-se uma maior espessura da casca em temperaturas de molde menores [6].
- Velocidades de injeção altas proporcionam baixa viscosidade do fundido, minimizando as perdas de calor no enchimento. Todavia, velocidades mais elevadas produzem defeitos na moldação, sendo por essa razão necessário conjugar a velocidade com a pressão [6].
- A pressão é a força necessária para o enchimento da cavidade do molde. Depende da viscosidade do material e, como referido anteriormente, com a velocidade de injeção, uma vez que maior viscosidade do material implica menor fluidez [6].
- A 2ª pressão é a pressão aplicada após o enchimento mantendo o material compacto até que solidifique, não permitindo que ocorra o refluxo [6].

Como mencionado, a microestrutura é influenciada pelas variáveis operatórias. A microestrutura da moldação é constituída por duas camadas, casca e núcleo como representado na Figura 6.

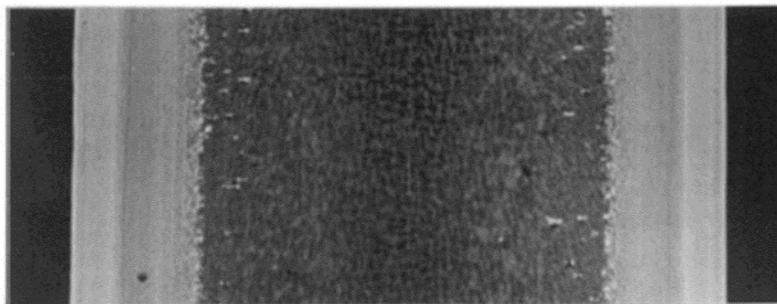


Figura 6: Microestrutura da moldação [5]

A formação destas duas camadas é devida ao arrefecimento brusco e lento, respetivamente. O material entra no molde e a orientação é “congelada” devido a um arrefecimento mais rápido junto às paredes. Essa camada exterior é designada por casca, apresenta elevada orientação e valores de taxa de corte maiores. A camada interna denomina-se núcleo, contém um arrefecimento lento pois o material da parede do molde para o interior vai aumentando a temperatura. Como o arrefecimento é lento, propícia a formação de esferulites. Esta estrutura é influenciada pela injeção, pois maior temperatura do molde e maior temperatura de injeção implicam uma menor espessura da casca e maior espessura do núcleo. A microestrutura, pode, ainda, influenciar no processo de soldadura, porque uma maior espessura do núcleo faz com que a peça perca a transparência, limitando a passagem da radiação até à peça opaca [5]–[7].

## 2.5. Modelação numérica

A modelação numérica serve para comparar os valores que foram introduzidos pelo utilizador na máquina com os valores dados pelo software, tendo em conta que a máquina introduzida no software tem as mesmas características que a usada no estudo.

## 2.6. Metodologia para análise de dados

Considerando o número de variáveis identificadas o processo será analisado recorrendo a técnicas de inteligência artificial baseadas em exploração de dados ("Data Mining") [8]–[11]. Estas técnicas permitem em termos práticos analisar grandes quantidades de dados para gerar novas informações. A maioria dos problemas reais, tal como o estudado aqui, são caracterizados por um grande número de variáveis e estas técnicas permitem organizar os dados de forma a possibilitar a determinação das variáveis de decisão que influenciam o desempenho do processo.



Existem dois tipos de dados: i) as variáveis de decisão que correspondem às variáveis que se podem alterar, neste caso as variáveis operatórias da moldação por injeção e da soldadura a laser; e ii) os objetivos que correspondem a dados que medem o desempenho do processo, ou seja, os valores que obtemos nas medições consoante a mudança das variáveis.

Assim, neste trabalho pretende-se aplicar uma técnica de exploração de dados designada por DAMICORE para estabelecer de forma eficiente relações entre todos os dados envolvidos no processo [9]–[11]. Para isso serão usadas rotinas computacionais existentes no DEP.

### **3. Estado de arte**

Neste capítulo apresenta-se, em três tabelas distintas, os resultados dos artigos que estão diretamente relacionados com o estudo a realizar. Vão ser apresentados alguns detalhes sobre estes artigos, uma vez que são importantes para o presente trabalho.

Na Tabela 1 encontram-se os resultados da influência das variáveis na transmitância para dois estudos diferentes, na qual um deles se usa um PP de modo a ver o comportamento para algumas variáveis operatórias e outro que estuda a influência da cristalinidade (usando um PE com diferentes percentagens de cristalinidade) e do teor de fibras.

Na Tabela 2 os resultados são expressos da mesma forma que na Tabela 1, porém reportam coisas diferentes. Esta indica-nos a influência de dois robôs diferentes, Motoman HP20 e Motoman SIA20, na soldadura, alterando variáveis de injeção e soldadura.

Por fim, na Tabela 3 mostra-se os resultados do efeito das variáveis operatórias na resistência e na largura da solda. A apresentação destes resultados mostra se as variáveis aumentam ou diminuem e qual a consequência na resistência ou largura da solda.



Tabela 1: Influência na transmitância [12], [13]

Variáveis	Transmitância
Espessura	Diminui
Temperatura do molde	Aumenta
Temperatura de injeção	Aumenta
Velocidade de injeção	Aumenta
Tempo de arrefecimento	Diminui
Agente de nucleação	Diminui
Teor de fibras	Diminui
Cristalinidade	Diminui

Tabela 2: Influência da força máxima com robô Motoman HP20 e Motoman SIA20 [12], [13]

Variáveis	Motoman HP20	Motoman SIA20
Temperatura do molde	Diminui	Diminui
Tempo de arrefecimento	Diminui	Diminui
Potência do laser	Aumenta	----
Velocidade do laser	Diminui	----
Diâmetro do laser	Diminui	----
Temperatura de injeção	----	Diminui
Velocidade de injeção	----	Aumenta
Espessura	----	Aumenta
Agente de nucleação	----	Aumenta

Tabela 3: Influência da resistência e da largura da solda

Variáveis		Resistência da solda	Largura da solda
Potência laser ↑	Velocidade de varrimento ↓	↑	----
Potência laser ↑	Distância de afastamento ↓	↓	----
Potência laser ↓	Pressão de fixação ↑	↑	----
Velocidade de varrimento ↓	Distância de afastamento ↑	↑	----
Velocidade de varrimento ↓	Pressão de fixação ↑	↓	----
Velocidade de varrimento ↓	Potência laser ↑	----	↑
Potência laser ↑	Distância de afastamento ↑	----	↑
Velocidade de varrimento ↓	Distância de afastamento ↑	----	↑
Distância de afastamento ↑	Pressão de fixação ↑	----	↑



Foi também examinado um artigo de revisão cujo foco é a soldadura por laser de transmissão. De entre os vários temas tratados no mesmo, o mais relevante para este tópico é a composição de polímeros e os seus efeitos, o qual aborda assuntos como: cargas/reforços, cristalinidade e espessura da peça [14].

❖ **Cargas/ reforços:** neste caso reforços são as fibras de vidro incorporadas no polímero. Estas melhoram as propriedades mecânicas, mas afetam as propriedades óticas do polímero. Por essa razão, a transmissão do laser diminui com a inserção destes reforços uma vez que as fibras tendem a propagar a luz por reflexão interna e refração. Em testes feitos com placas de PA66 com 3,2mm de espessura a transmissão do laser diminui, linearmente, de 70% para 20%, e o seu peso aumenta de 0% para 45%. Testou com PA6 e o comportamento foi o mesmo, mas aumentou de 0% em peso para 63% em peso. Ao adicionar 18% em peso de fibras em PC amorfo verifica-se que a dispersão de luz é maior.

Estes reforços também intervêm na absorção e na reflexão do laser. A absorção em PA6 aumenta 2 a 3 vezes ao aumentar a percentagem em peso de fibras, de 15 para 50. A reflexão no PA6 também sofre um aumento de 12-31% para 50-63% em peso.

Aumentar as fibras até 45% em peso provoca um aumento da resistência à tração do PA6 de 82MPa para 208MPa, mas diminui na solda de 82MPa para 70 MPa.

Para o PA6 reforçado com fibras curtas, ocorre um aumento linear da largura da solda devido ao aumento da dispersão e a eficiência da solda é menor. As fibras mais longas e mais largas têm uma maior secção transversal, resultando uma dispersão ainda maior [14].

❖ **Cristalinidade:** em polímeros semicristalinos a reflexão aparente aumenta consoante a cristalinidade. Devido ao facto de os polímeros semicristalinos conterem zonas amorfas e cristalinas, estes dispersam mais quantidade de luz que os polímeros amorfos. Esta dispersão gera um caminho do laser maior, levando a um aumento da probabilidade de existir absorção ou reflexão do laser.

❖ **Espessura:** a espessura em polímeros amorfos não tem muita influência, no entanto, nos semicristalinos verifica-se o oposto. Com o aumento da espessura denota-se um aumento da absorção, da reflexão e da dispersão, diminuindo



significativamente a intensidade do laser. Realizaram-se vários testes com diferentes materiais para comprovar o que está referido em cima, entre eles a PA6. Aumentou-se a espessura de 1 para 3 mm e a transmissão diminuiu de 80% para 70%.

## **4. Trabalho realizado**

### **4.1. Material**

Neste estudo usou-se dois *grades* de PA66, Zytel® LT70G35HSL NC010 e Zytel® 70G25EF BK538LM, do fabricante DuPont, cujas fichas técnicas se apresentam em anexo. O Zytel® LT70G35HSL NC010 tem 35% de fibras de vidro e é transparente enquanto o Zytel® 70G25EF BK538LM tem 25% de fibras de vidro e é opaco.

As propriedades mais relevantes para o estudo realizado são a temperatura de fusão (260°C e 295°C, respetivamente), a temperatura do molde (100°C para ambas) e a pressão de injeção (50-100 MPa para ambas).

A incorporação de fibras de vidro aumenta a resistência mecânica e reduz os efeitos negativos da plasticização, pois a integração de fibra reduz a quantidade de polímero [15]-[16].

### **4.2. Plano de trabalho**

- I. Preparação do material
- II. Injeção de peças
- III. Caracterização das peças- caracterização térmica, perda de massa, transmitância e caracterização microestrutural
- IV. Simulação computacional
- V. Soldadura por laser
- VI. Caracterização da soldadura- caracterização mecânica
- VII. Análise de dados

Devido ao carácter higroscópico da PA foi necessário secar o material na estufa a 80°C durante cerca de 4h. nas subsecções seguintes referem-se os detalhes mais importantes das etapas deste trabalho.

## 5. Procedimento Experimental

### 5.1. Moldação por injeção

Para a produção das placas usou-se a injetora *Boy22A*, caracterizada por uma força de fecho de 220kN e uma pressão máxima de injeção de 160 bar.

Serão injetadas placas (Figura 7) com as geometrias identificadas na Figura 8 cujas dimensões são 30x60mm. ou seja, placas com espessuras de 1,5 e 2mm e com 2,5 e 3mm.



Figura 7: Placas injetadas para estudo

2mm  1,5mm  3mm  2,5mm 

Figura 8: Espessuras das placas

Na Tabela 4 estão apresentadas as variáveis de estudo e a respetiva identificação para as diferentes espessuras.

Tabela 4: Variáveis de estudo e respetiva identificação

Espessura (mm)	Identificação	Variável	Espessura (mm)	Identificação	Variável alterada
1,5-2,0	Ci1/Ci2	Condições iniciais	1,5-2,0	Tm1/Tm2	Temperatura do molde
	P1/P2	Pressão		Ci3/Ci4	Condições iniciais
	Va1/Va2	Velocidade de injeção		Tm3/Tm4	Temperatura do molde
	Vd1/Vd2	Velocidade de injeção		Ti3/Ti4	Temperatura de injeção
	2Pd1/2Pd2	2ª pressão		P3/P4	Pressão
	2Pa1/2Pa2	2ª pressão		V3/V4	Velocidade de injeção
	Ti1/Ti2	Temperatura de injeção		2P3/2P4	2ª pressão
2,5-3,0			2,5-3,0		

Tendo em conta as espessuras possíveis nas placas, nas identificações contém quatro versões, 1,2,3,4. Onde 1 refere-se à espessura menor de 1,5mm, 2 à espessura



a seguir de 2mm, 3 é relativa à espessura de 2,5mm e 4 é para a espessura maior de 3mm. A identificação foi feita de forma que se perceba qual a variável alterada, colocando-se as letras iniciais de cada variável, ou seja, P é a inicial de pressão, 2P é a inicial de 2ª pressão, V é a inicial de velocidade, sendo este o comportamento para todas as variáveis presentes na Tabela 4. Algumas identificações têm presente a letra d ou a, que indica se o valor dessa variável aumentou ou diminuiu, ou seja, Va1 significa que o valor da velocidade de injeção para a placa de espessura 1,5mm aumentou e Vd1 indica que o valor da velocidade da placa com 2mm de espessura diminuiu. Caso não tenha a ou d quer dizer que essa variável só tem uma mudança, isto é, para além do valor inicial só se altera uma vez. Então a identificação é composta pela inicial da variável, pela letra a ou d (caso possua) e por um número entre 1 e 4.

## 5.2. Caracterização das peças injetadas

### Caracterização térmica

Os ensaios de DSC foram realizados tendo em conta a norma ASTM E1356, no equipamento NETZSCH. O DSC é uma técnica de análise térmica, que mostra a variação da energia entre a amostra e a referência. A partir dos resultados obtidos (gráfico) mede-se a variação da entalpia que ocorre entre a amostra e a referência durante o processo de aquecimento e pela Equação 1 apresentada calcula-se o grau de cristalinidade. É importante fazer uma linha de base, pois esta determina a existência de processos durante o aquecimento [17][18].

$$\chi = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{100\%}} \quad (1)$$

Para se obterem os resultados desejados faz-se a tara da cápsula de alumínio, coloca-se a amostra dentro desta com o auxílio de uma pinça e pesa-se na balança. A amostra deve ter uma base plana para que o contacto com a cápsula seja bom, de modo que a transferência de calor seja eficiente.

Seguidamente, fecha-se a cápsula com uma tampa de alumínio, utilizando uma prensa manual. Faz-se um furo na tampa antes de se fechar a cápsula, pois o material pode libertar voláteis. Antes de colocar a amostra no forno é necessário verificar se



as tampas e os fornos estão limpos, e em caso afirmativo coloca-se a amostra no forno para que se inicie o ensaio. O ensaio foi iniciado a uma temperatura de 30°C até uma temperatura de 300°C a uma taxa de 10°C/min.

### **Determinação do conteúdo de fibra**

Os ensaios para determinar a perda de massa por calcinação foram realizados segundo a norma portuguesa 2216. Para a execução deste ensaio usou-se a mufla, para queimar o provete e o exsiccador, para o arrefecimento dos cadinhos. Esta técnica permite verificar se o material usado no ensaio contém apenas fibras de vidro e resina combustível ou se contém cargas incombustíveis para além da fibra de vidro [19]. Esta análise é possível usando a Equação 2.

$$\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2)$$

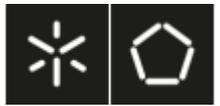
Para este ensaio é necessário colocar os cadinhos na mufla a 625°C cerca de 20 minutos e depois deixá-lo arrefecer no exsiccador durante o mesmo tempo. Posteriormente pesa-se o cadinho e tem de se repetir o processo até que duas pesagens consecutivas não difiram mais do que 1mg.

Atingindo os valores corretos coloca-se o material dentro do cadinho e pesa-se. Coloca-se o conjunto na mufla até o provete queimar. Por fim deixa-se arrefecer no exsiccador até à temperatura ambiente e pesa-se.

### **Caracterização microestrutural**

A análise das fibras presentes nos materiais foi realizada usando um microscópio de transmissão e reflexão.

No microscópio de transmissão, a microscopia usada é a de luz polarizada para estudar o tamanho das fibras obtidas pelo resíduo após a calcinação. O microscópio de reflexão é usado para medir as fibras contidas nas amostras que estão embutidas em resina e para ver a sua orientação. Antes do microscópio é usado um polidor, de modo que as imagens visualizadas no microscópio não contenham riscos e sejam perfeitas.



Este estudo teve início com o corte das peças, obtendo-se uma amostra em cada espessura e colocou-se num molde para embeber em resina como mostra na Figura 9b). Para a mistura colocou-se 75ml de resina e 9ml de endurecedor. Após estarem embebidas teve de se esperar 8h para que esta curasse e foi necessário lixar para eliminar todos os riscos visíveis.

Com esta técnica só foi possível visualizar as fibras de vidro, e não permitiu visualizar as esferulites nem as camadas da injeção devido as propriedades do material usado.

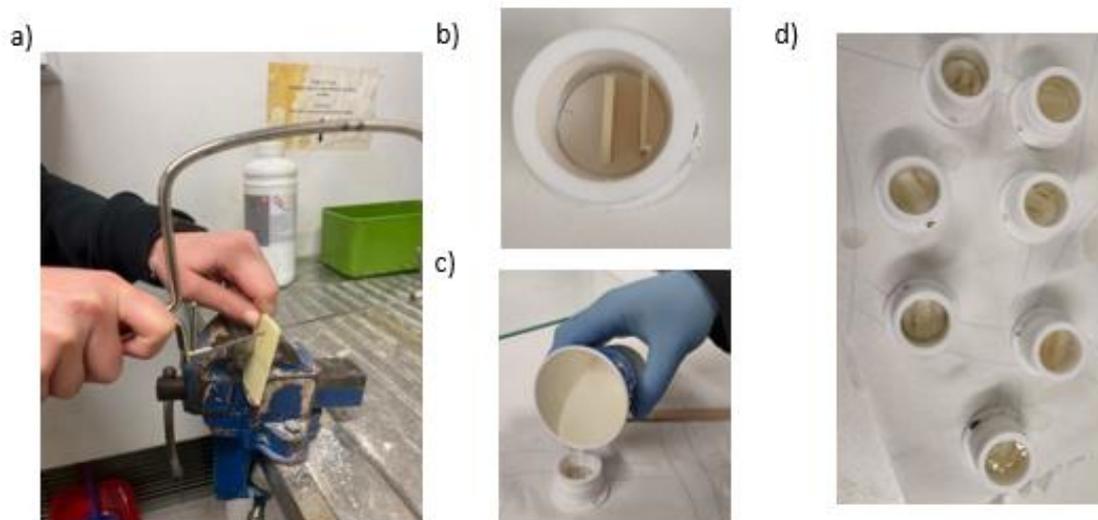


Figura 9: : a) corte das amostras; b) amostras no molde; c) enchimento do molde c/ resina; d) moldes c/ resina

Também foi preparada uma amostra com os resíduos da calcinação, que são as fibras de vidro. Colocaram-se numa lamela e espalhadas e foram colocadas no prato do microscópio.



Figura 10: Resíduo de calcinação



### **Transmitância**

A transmitância é a fração de luz com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra. Para medir a transmitância foi usado um espectrofotômetro *SHIMADZU* que permite trabalhar numa gama de comprimento de onda de 190nm a 1100nm. Este aparelho mede a intensidade da luz em diferentes comprimentos de onda. Pode ser usado para medir a quantidade de luz transmitida, absorvida ou refletida numa amostra.

A medição da transmitância é feita, segundo a norma ASTM D1003, por dois feixes, onde um feixe é de referência e o outro incide na amostra, observando a diferença de intensidade entre ambos [20][21]. Os resultados são apresentados através de espectros, onde nos mostra a intensidade de luz transmitida por comprimento de onda.

Começa-se por ligar o equipamento e conectar ao *software* do computador. Verifica-se se o aparelho tem o devido suporte para as placas em estudo e depois de fazer a linha de base coloca-se a peça no espectrofotômetro para se iniciarem os ensaios. Definiu-se a gama de comprimento de onda que se pretendia trabalhar, começando em 1100nm e terminando em 900nm. Estas medições foram executadas 10 vezes para cada uma das condições de processamento realizadas na injeção.

### **5.3. Simulação computacional**

Para a referida análise do fluxo e das fibras de vidro, usou-se o *software Moldex3D*. Esta ferramenta 3D tem alta capacidade analítica e tem elevada precisão de cálculo, permitindo cálculos mais rápidos de peças mais complexas. Neste projeto foi usada para a injeção convencional, mas pode ser usada para vários processos e tecnologias. O objetivo do uso desta ferramenta é comparar os valores dados pelo *software* com os valores usados na injetora.

Antes de colocar o programa a simular tem de se executar alguns procedimentos. Em *CAD*, neste caso usou-se o *Solidworks*, terá de se desenhar a peça, o sistema de alimentação e os canais de refrigeração. Posteriormente, e já no *Moldex* o primeiro passo é importar a peça previamente feita e corrigi-la caso tenha erros identificados no *software*. Seguidamente faz-se o mesmo para o sistema de



alimentação e logo a seguir para os canais de refrigeração. Posto isto, o passo seguinte é fazer o molde e colocar a entrada e saída da água no sistema de refrigeração. Estando estes pontos definidos e sem erros faz-se a malha, escolhe-se o material usado na injeção e coloca-se as condições de processamento, sendo estes parâmetros desbloqueados pelo *software* conforme se vão preenchendo. Por fim estamos em condições de executar a simulação. Na Figura 11 encontram-se as peças feitas para a simulação. Está apenas uma peça e parte do sistema de alimentação porque, como referido anteriormente, não se injetaram todas as espessuras então o que na realidade foi injetado é o que se encontra ilustrado.

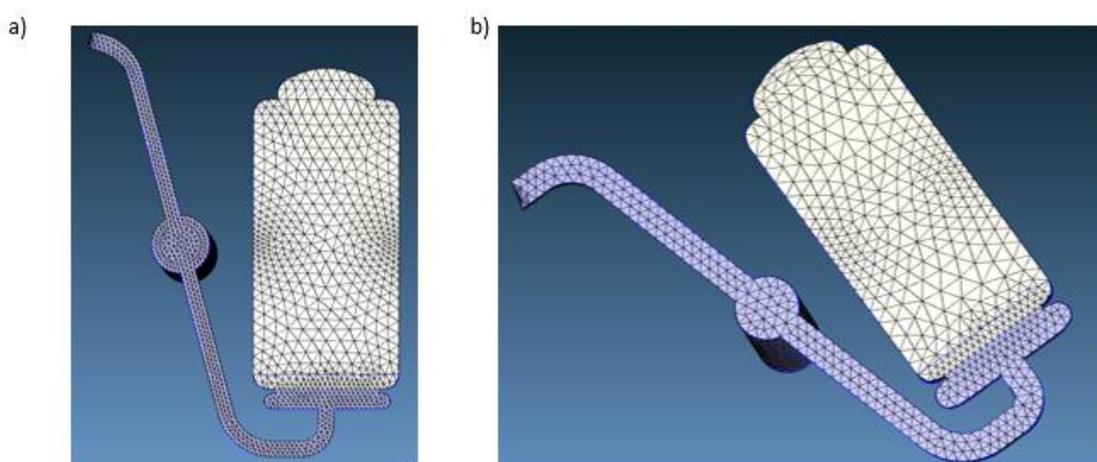
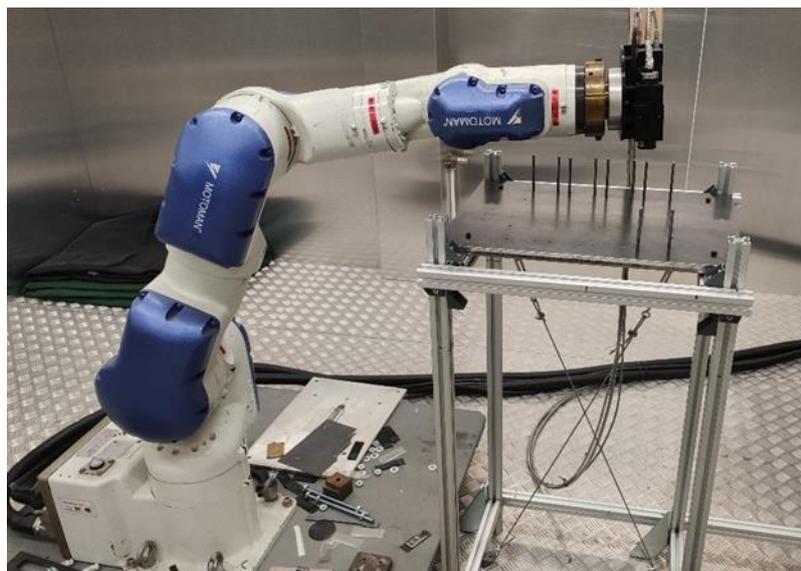


Figura 11: a) peça 1,5-2mm; b) peça 2,5-3mm

#### 5.4. Processo de soldadura

Após ter as placas produzidas e os ensaios realizados procede-se à soldadura dos provetes. Para a soldadura usou-se um laser de iodo com comprimento de onda de 940 nm, acoplado a um robô *Motoman NX100* que permite executar os movimentos definidos pelo utilizador.

Na Figura 12 é possível ver, o braço do robô, a cabeça do laser e uma mesa de apoio. Esta mesa foi feita para que as peças sejam soldadas sobre ela, conferindo mais estabilidade no laser e permitir que a vibração seja menor no seu deslocamento.



*Figura 12: instrumentos usados para a soldadura laser*

Sobre a mesa coloca-se uma placa de PLA feita à medida, presente na Figura 13a), que serve para colocar as peças de força independente, mantendo a uniformidade em todas elas. Permite também que não haja o contacto direto do laser com o aço, e assim melhores resultados na soldadura. Isto é, como o aço tem muita reflexão, o que acontece caso haja contacto do laser é oscilações da potência, atingindo valores de potência muito elevados e quando encontra a peça vai queimá-la. Então a solução é colocar um polímero para que essa reflexão não aconteça. O material das peças em estudo e o material da placa não tem de ser o mesmo, e assim já não vai provocar as oscilações que sucediam caso esta placa não existisse. Estes problemas conseguem-se perceber através dos gráficos que o software nos mostra em tempo real.



Colocam-se os quatro conjuntos a soldar simultaneamente, como mostra a Figura 13b). Por cima dos conjuntos leva pesos para haver pressão de fixação. Posteriormente define-se os pontos de soldadura e as condições de processamento e procede-se a soldadura.

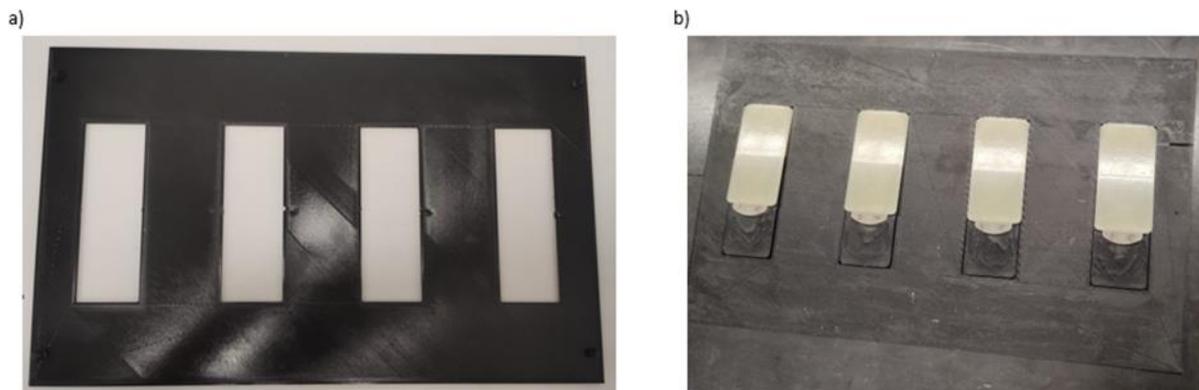


Figura 13: a) placa de PLA; b) peças posicionadas para a soldadura

Através da análise dos resultados das peças injetadas foram feitos gráficos iguais ao da Figura 14 incluindo todas as peças, onde se introduziu a espessura, a cristalinidade, a pressão e a 2ª pressão em função da transmitância.

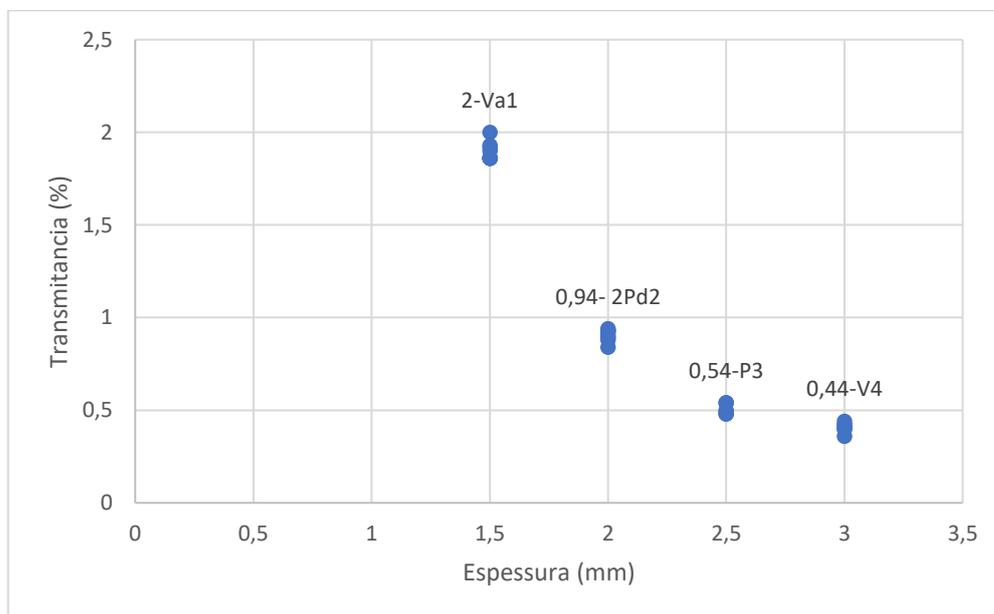


Figura 14: Gráfico transmitância vs espessura



A partir dos resultados visualizou-se quais as peças com maior valor de transmitância, uma vez que é expectável que seja esta propriedade que terá mais influência na soldadura. Assim, concluímos que as peças que vão ser analisadas são: Va1, 2Pd2, P3, V4.

Como já foi referido anteriormente, o objetivo é estudar a influência das condições operatórias do laser para, posteriormente, caracterizar a soldadura.

Dadas as características do laser usado para o estudo, as condições serão: velocidade de varrimento do laser, diâmetro do laser, temperatura que influencia a potência, nº de passagens do laser em cada peça. No laser usado para o estudo não se altera a potência diretamente. Esta é definida pela temperatura, ou seja, estabelece-se uma temperatura e a máquina determina a potência necessária para atingir a temperatura imposta. O diâmetro foi medido recorrendo a um paquímetro, uma vez que a máquina não permite esta mudança, ficando por isso com valores aproximados. Para ocorrer uma mudança no diâmetro altera-se a distância da cabeça do laser à mesa. No entanto, como a espessura dos conjuntos das peças é diferente, o diâmetro da solda também vai ser diferente, devido ao ponto focal do laser.

### **5.5. Caracterização mecânica da solda**

Após a soldadura das placas, prossegue-se o estudo com o ensaio de tração para a caracterização mecânica da soldadura. Os ensaios de tração foram realizados com uma máquina *Zwick/Roell* a uma velocidade de 10 mm/min e uma distância entre amarras de 35 mm. Colocaram-se as peças nas amarras da máquina de forma que toda a área ocupada pela amarra esteja em contacto com a peça, como mostra a Figura 15.

De seguida, dá-se início ao ensaio sendo necessário colocar a espessura e a largura das peças no *software*. A largura colocada foi 30mm (largura de uma placa) e a espessura foi a soma das espessuras das peças transparente e opaca, variando de 4 a 5,5mm.

Inserindo todos os dados o ensaio começa, e termina quando a solda parte, dando indicação de qual a força máxima atingida aquando desse feito.

Estes procedimentos foram feitos para todas as peças soldadas e agruparam-se os resultados.



*Figura 15: Peças colocadas nas amarras*

## **5.6. Caracterização física da solda**

Para se realizar a caracterização física da solda é usada uma lupa estereoscópica Leica DMS 1000, que permite uma visualização das placas com maior ampliação. O objetivo em usar este instrumento é medir a largura da solda, após as peças serem submetidas aos ensaios de tração. Também se usou esta ferramenta para analisar as peças transparentes que na soldadura ficaram queimadas e mediu-se a largura desse defeito.

A caracterização física da solda consiste em medir a sua largura com o auxílio de uma lupa.

## **5.7. Análise de dados**

Para que seja possível obter resultados do DAMICORE, foi necessário fazer uma tabela que incluía as variáveis de decisão, ou seja, as que foram estudadas e os objetivos que é o que desejamos melhorar. No entanto, foram feitas 3 tabelas, uma só com os dados da injeção, uma tabela completa (com os dados da injeção e da soldadura) e uma terceira onde se usou apenas 13 linhas da tabela completa. A Tabela 5, 6 e 7 mostram os valores das condições operatórias usadas, onde a Tabela 5 é referente aos dados da injeção e as Tabelas 6 e 7 englobam os dados da injeção e da soldadura.



Tabela 5: Dados da injeção

exp	Tmolde	P1	P2	Tinj	Vinj	2P	Esp_cav	Tans	DPTrans	Crist	esp	larg	comp	peso
Ci1	80	60	80	300	50	50	1,5	1,86	0,28	17	1,5	30,08	59,93	4,34
Ci2	80	60	80	300	50	50	2	0,89	0,09	17	1,96	30,08	59,93	4,34
P1	80	50	70	300	50	50	1,5	1,93	0,52	18	1,51	30,06	39,94	4,34
P2	80	50	70	300	50	50	2	0,93	0,05	17	1,97	30,06	39,94	4,34
Va1	80	60	80	300	60	50	1,5	2	0,15	16	1,51	29,95	39,96	4,34
Va2	80	60	80	300	60	50	2	0,93	0,04	17	1,96	29,95	59,96	4,34
Vd1	80	60	80	300	40	50	1,5	1,86	0,07	16	1,51	29,92	59,95	4,33
Vd2	80	60	80	300	40	50	2	0,88	0,04	18	1,96	29,92	59,95	4,33
2Pd1	80	60	80	300	50	40	1,5	1,86	0,04	17	1,52	20,74	59,94	4,28
2Pd2	80	60	80	300	50	40	2	0,94	0,09	17	1,96	20,74	59,94	4,28
2Pa1	80	60	80	300	50	60	1,5	1,86	0,09	16	1,52	29,95	59,96	4,40
2Pa2	80	60	80	300	50	60	2	0,84	0,31	17	1,96	29,95	59,96	4,40
Ti1	80	60	80	310	50	50	1,5	1,92	0,09	17	1,51	29,94	59,94	4,34
Ti2	80	60	80	310	50	50	2	0,92	0,07	18	1,96	29,94	59,94	4,34
Tm1	90	60	80	300	50	50	1,5	1,9	0,08	17	1,51	29,85	59,95	4,33
Tm2	90	60	80	300	50	50	2	0,9	0,06	18	1,96	29,85	59,95	4,33
Ci3	90	100	110	300	130	60	2,5	0,48	0,03	15	2,5	29,64	59,95	6,70
Ci4	90	100	110	300	130	60	3	0,36	0,02	16	2,98	29,64	59,95	6,70
Tm3	100	100	110	300	130	60	2,5	0,5	0,04	17	2,47	29,49	59,94	6,71
Tm4	100	100	110	300	130	60	3	0,4	0,04	15	2,97	29,49	59,94	6,71
Ti3	90	100	110	310	130	60	2,5	0,54	0,03	15	2,52	29,64	59,97	6,71
Ti4	90	100	110	310	130	60	3	0,42	0,04	17	2,99	29,64	59,97	6,71
P3	90	110	120	300	130	60	2,5	0,54	0,04	16	2,51	29,68	59,97	6,70
P4	90	110	120	300	130	60	3	0,4	0,04	16	2,99	29,68	59,97	6,70



<b>V3</b>	90	100	110	300	140	60	2,5	0,48	0,03	15	2,51	29,71	59,96	6,70
<b>V4</b>	90	100	110	300	140	60	3	0,44	0,03	15	2,99	29,71	59,96	6,70
<b>2P3</b>	90	100	110	300	130	50	2,5	0,49	0,03	17	2,51	29,69	59,95	6,69
<b>2P4</b>	90	100	110	300	130	50	3	0,42	0,02	17	2,99	29,69	59,95	6,69

Tabela 6: Tabela completa

<b>exp</b>	<b>Tmolde</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>Tinj</b>	<b>Vinj</b>	<b>2P</b>	<b>Esp_cav</b>	<b>Tlaser</b>	<b>VVlaser</b>	<b>Dlaser</b>	<b>Nvarr</b>	<b>esp_total</b>
<b>Ci1</b>	80	60	80	300	50	50	1,5					
<b>Ci2</b>	80	60	80	300	50	50	2					
<b>P1</b>	80	50	70	300	50	50	1,5					
<b>P2</b>	80	50	70	300	50	50	2					
<b>Va1</b>	80	60	80	300	60	50	1,5	200	4	1	1	4
<b>Va1</b>	80	60	80	300	60	50	1,5	200	8	1	1	4
<b>Va1</b>	80	60	80	300	60	50	1,5	160	8	1	2	4
<b>Va1</b>	80	60	80	300	60	50	1,5	200	8	3	1	4
<b>Va2</b>	80	60	80	300	60	50	2					
<b>Vd1</b>	80	60	80	300	40	50	1,5					
<b>Vd2</b>	80	60	80	300	40	50	2					
<b>2Pd1</b>	80	60	80	300	50	40	1,5					
<b>2Pd2</b>	80	60	80	300	50	40	2	200	8	1	1	4,5
<b>2Pd2</b>	80	60	80	300	50	40	2	160	8	1	2	4,5
<b>2Pd2</b>	80	60	80	300	50	40	2	200	8	3	1	4,5
<b>2Pa1</b>	80	60	80	300	50	60	1,5					
<b>2Pa2</b>	80	60	80	300	50	60	2					
<b>Ti1</b>	80	60	80	310	50	50	1,5					



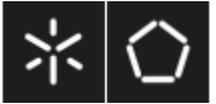
<b>Ti2</b>	80	60	80	310	50	50	2					
<b>Tm1</b>	90	60	80	300	50	50	1,5					
<b>Tm2</b>	90	60	80	300	50	50	2					
<b>Ci3</b>	90	100	110	300	130	60	2,5					
<b>Ci4</b>	90	100	110	300	130	60	3					
<b>Tm3</b>	100	100	110	300	130	60	2,5					
<b>Tm4</b>	100	100	110	300	130	60	3					
<b>Ti3</b>	90	100	110	310	130	60	2,5					
<b>Ti4</b>	90	100	110	310	130	60	3					
<b>P3</b>	90	110	120	300	130	60	2,5	200	8	1	1	5
<b>P3</b>	90	110	120	300	130	60	2,5	160	8	1	2	5
<b>P3</b>	90	110	120	300	130	60	2,5	200	8	3	1	5
<b>P4</b>	90	110	120	300	130	60	3					
<b>V3</b>	90	100	110	300	140	60	2,5					
<b>V4</b>	90	100	110	300	140	60	3	200	8	1	1	5,5
<b>V4</b>	90	100	110	300	140	60	3	160	8	1	2	5,5
<b>V4</b>	90	100	110	300	140	60	3	200	8	3	1	5,5
<b>2P3</b>	90	100	110	300	130	50	2,5					
<b>2P4</b>	90	100	110	300	130	50	3					

Tabela 7: Continuação da Tabela 6

<b>exp</b>	<b>Tans</b>	<b>DPTrans</b>	<b>Crist</b>	<b>esp</b>	<b>larg</b>	<b>comp</b>	<b>peso</b>	<b>Fmáx</b>	<b>DPfm</b>	<b>L_solda</b>	<b>DP_I_solda</b>
<b>Ci1</b>	1,86	0,28	17	1,5	30,08	59,93	4,34				
<b>Ci2</b>	0,89	0,09	17	1,96	30,08	59,93	4,34				
<b>P1</b>	1,93	0,52	18	1,51	30,06	59,94	4,34				
<b>P2</b>	0,93	0,05	17	1,97	30,06	59,94	4,34				



<b>Va1</b>	2	0,15	16	1,51	29,95	59,96	4,34	1548,84	125,73	0,75	0,03
<b>Va1</b>	2	0,15	16	1,51	29,95	59,96	4,34	1410,18	92,09	0,76	0,03
<b>Va1</b>	2	0,15	16	1,51	29,95	59,96	4,34	1414,21	53,54	0,65	0,03
<b>Va1</b>	2	0,15	16	1,51	29,95	59,96	4,34	2216,88	411,19	1,91	0,27
<b>Va2</b>	0,93	0,04	17	1,96	29,95	59,96	4,34				
<b>Vd1</b>	1,86	0,07	16	1,51	29,92	59,95	4,33				
<b>Vd2</b>	0,88	0,04	18	1,96	29,92	59,95	4,33				
<b>2Pd1</b>	1,86	0,04	17	1,52	20,74	59,94	4,28				
<b>2Pd2</b>	0,94	0,04	17	1,96	20,74	59,94	4,28	1817,07	145,19	0,92	0,16
<b>2Pd2</b>	0,94	0,08	17	1,96	20,74	59,94	4,28	1833,87	64,21	0,8	0,07
<b>2Pd2</b>	0,94	0,09	17	1,96	20,74	59,94	4,28	2421,23	438,97	2,07	0,1
<b>2Pa1</b>	1,86	0,09	16	1,52	29,95	59,96	4,40				
<b>2Pa2</b>	0,84	0,31	17	1,96	29,95	59,96	4,40				
<b>Ti1</b>	1,92	0,09	17	1,51	29,94	59,94	4,34				
<b>Ti2</b>	0,92	0,07	18	1,96	29,94	59,94	4,34				
<b>Tm1</b>	1,9	0,08	17	1,51	29,85	59,95	4,33				
<b>Tm2</b>	0,9	0,06	18	1,96	29,85	59,95	4,33				
<b>Ci3</b>	0,48	0,03	15	2,5	29,64	59,95	6,70				
<b>Ci4</b>	0,36	0,02	16	2,98	29,64	59,95	6,70				
<b>Tm3</b>	0,5	0,04	17	2,47	29,49	59,94	6,71				
<b>Tm4</b>	0,4	0,04	15	2,97	29,49	59,94	6,71				
<b>Ti3</b>	0,54	0,03	15	2,52	29,64	59,97	6,71				
<b>Ti4</b>	0,42	0,04	17	2,99	29,64	59,97	6,71				
<b>P3</b>	0,54	0,04	16	2,51	29,68	59,97	6,70	1776,47	181,63	1,49	0,09
<b>P3</b>	0,54	0,04	16	2,51	29,68	59,97	6,70	1933,21	145,79	1,07	0,15
<b>P3</b>	0,54	0,04	16	2,51	29,68	59,97	6,70	1993,86	784,34	1,86	0,07
<b>P4</b>	0,4	0,04	16	2,99	29,68	59,97	6,70				



<b>V3</b>	0,48	0,03	15	2,51	29,71	59,96	6,70				
<b>V4</b>	0,44	0,03	15	2,99	29,71	59,96	6,70	2130,58	110,7	1,37	0,09
<b>V4</b>	0,44	0,03	15	2,99	29,71	59,96	6,70	2699,66	78,76	1,36	0,14
<b>V4</b>	0,44	0,03	15	2,99	29,71	59,96	6,70	1829,65	281,5	1,34	0,12
<b>2P3</b>	0,49	0,03	17	2,51	29,69	59,95	6,69				
<b>2P4</b>	0,42	0,02	17	2,99	29,69	59,95	6,69				



## 6. Apresentação e discussão dos resultados

### 6.1. Moldação por injeção

Na Tabela 8 e 9 mostram-se as condições operatórias usadas, tendo sido injetadas 60 peças para cada condição. Nestas tabelas encontram-se todas as condições de processamento usadas em cada espessura, bem como os valores de cada uma. Na coluna da pressão aparecem dois valores de posição do fuso, porque a pressão não é a mesma ao longo do curso. Ou seja, o que acontece, no caso das peças de maior espessura (Tabela 9), é que à posição de 40mm, o fuso avança e a pressão desce, linearmente, de 110 até 100 bar. Atinge os 100 bar na posição de 10mm, que é a posição definida para o fuso parar, e onde se aplica a 2ª pressão. A Figura 16 mostra o gráfico que foi descrito. Para as peças de menor espessura (Tabela 8) o comportamento da pressão é o mesmo, apenas muda os valores da posição do fuso e da pressão.

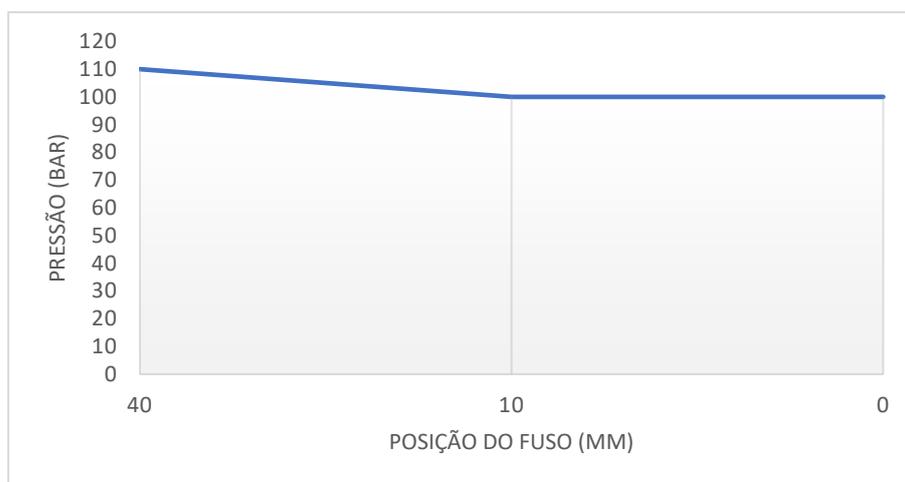


Figura 16: Gráfico da posição do fuso em função da pressão



Tabela 8: Condições de processamento

Condição	Tm (°C)	Pressão (bar)		Tinj (°C)	Vinj (mm/s)	2ª pressão (bar)	Peso (g)	Desvio padrão
		7mm	26mm					
Ci1/Ci2	80	60	80	300	50	50	4,344	0,01
P1/P2	80	50	70	300	50	50	4,342	0,01
Va1/Va2	80	60	80	300	60	50	4,340	0,01
Vd1/Vd2	80	60	80	300	40	50	4,334	0,00
2Pd1/2Pd2	80	60	80	300	50	40	4,277	0,00
2Pa1/2Pa2	80	60	80	300	50	60	4,400	0,01
Ti1/Ti2	80	60	80	310	50	50	4,339	0,01
Tm1/Tm2	90	60	80	300	50	50	4,329	0,00

Tabela 9: Condições de processamento para as espessuras de 2,5 e 3mm

Condição	Tm (°C)	Pressão (bar)		Tinj (°C)	Vinj (mm/s)	2ª pressão (bar)	Peso (g)	Desvio padrão
		10mm	40mm					
Ci3/Ci4	90	100	110	300	130	60	6,696	0,13
Tm3/Tm4	100	100	110	300	130	60	6,705	0,01
Ti3/Ti4	90	100	110	310	130	60	6,714	0,13
P3/P4	90	110	120	300	130	60	6,701	0,02
V3/V4	90	100	110	300	140	60	6,698	0,00
2P3/2P4	90	100	110	300	130	50	6,694	0,01

Relacionando apenas os valores de peso das peças de Ci1/Ci2 a Tm1/Tm2 (menor espessura) verifica-se que as peças 2Pd1/2Pd2 e 2Pa1/2Pa2 onde a 2ª pressão é menor e maior, respectivamente, tornam-se mais leves no primeiro caso e mais pesadas no segundo, isto porque a 2ª pressão compensa a contração da peça e evita o refluxo do material [5]. Portanto, se diminui a 2ª pressão, a quantidade de material introduzido para compensar a contração foi menor ficando a peça mais leve, e o contrário acontece quando a 2ª pressão aumenta. Analisando agora os valores do peso das peças de Ci3/Ci4 a 2P3/2P4 (maior espessura) apresentam menos variação do que as peças de menor espessura, sendo que o maior valor apresentado é a condição Ti3/Ti4 correspondente à alteração da temperatura de injeção. O menor valor do peso encontra-se na letra correspondente à diminuição da 2ª pressão, verificando-se o mesmo que aconteceu nas peças de menor espessura, como esperado.

As restantes condições de processamento que foram estudadas não tiveram grande influência no peso. O tempo de injeção manteve-se constante nas diferentes condições



e a almofada (quantidade de material que fica no fuso após a fase de pressurização) permaneceu constante em quase todas as condições, variou apenas na alteração dos valores da 2ª pressão. Quando esta diminui a almofada aumentou e quando a 2ª pressão aumentou a almofada diminuiu consideravelmente.

Concluimos que a 2ª pressão é a variável que tem maior influência no peso das peças.

## 5.2. Caracterização das peças injetadas

### Caracterização térmica

Como foi referido anteriormente, primeiro realizou-se um ensaio de DSC à matéria virgem para posteriormente comparar o grau de cristalinidade com as peças injetadas nas diferentes condições de processamento.

Os valores da entalpia de fusão obtiveram-se a partir da integração da curva, cujos limites são definidos pelo utilizador que manteve o critério para todas as amostras, isto é, há uma cristalização a frio, como se pode visualizar na Figura 17, e o que está a fundir é a cristalização que tinha mais a que se formou no DSC. Então a integração é feita desde o pico da cristalização até à temperatura de 277 °C para todas as amostras.

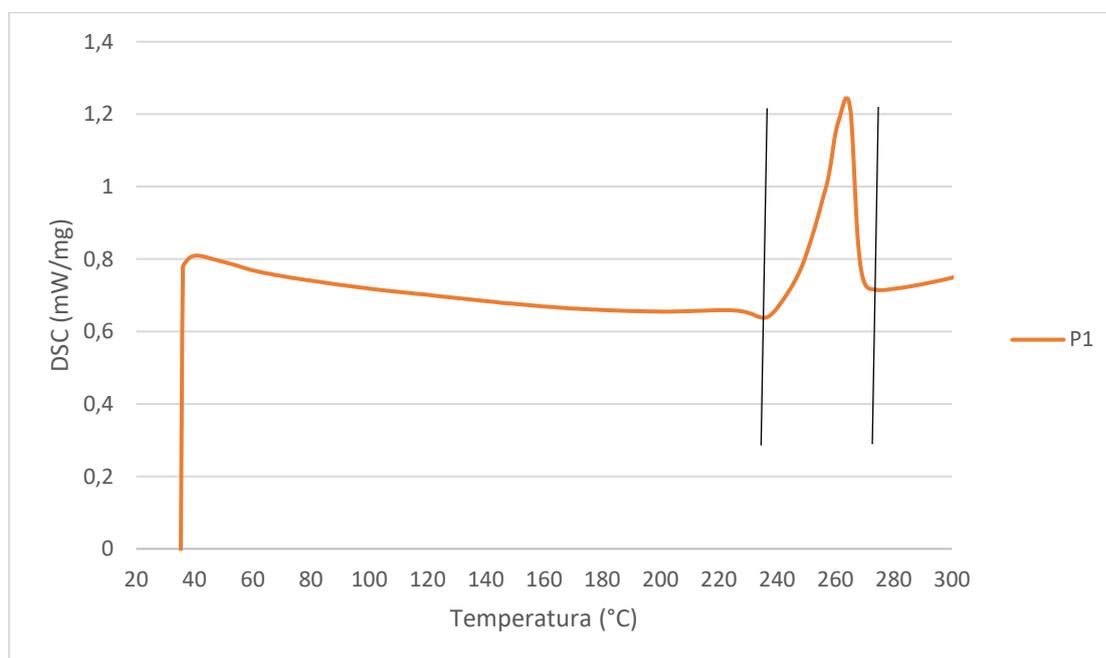


Figura 17: Gráfico de DSC

Na Tabela 10 encontram-se os valores da entalpia de fusão de cada peça para as diferentes espessuras, bem como grau de cristalinidade. Para o cálculo do grau de



cristalinidade usou-se o valor da entalpia de fusão do material 100% cristalino, que se encontra na literatura, cujo valor é 255 J/g [22].

Tabela 10: Valores da entalpia de fusão e do grau de cristalinidade das peças para as diferentes espessuras

Espessura	1,5mm		2mm			2,5mm		3mm	
	$\Delta h$ (J/g)	$\chi$ (%)	$\Delta h$ (J/g)	$\chi$ (%)		$\Delta h$ (J/g)	$\chi$ (%)	$\Delta h$ (J/g)	$\chi$ (%)
<b>Ci</b>	45,41	18	43,57	17	<b>Ci</b>	39,52	15	41,86	16
<b>P</b>	44,4	17	46,02	18	<b>P</b>	41,92	16	39,67	16
<b>Va</b>	41,65	16	42,5	17	<b>V</b>	39,54	15	41,09	16
<b>Vd</b>	40,96	16	45,03	18	<b>2P</b>	43,4	17	43,35	17
<b>2Pd</b>	43,57	17	42,91	17	<b>Ti</b>	38,25	15	43,22	17
<b>2Pa</b>	40,3	16	43,27	17	<b>Tm</b>	44,57	17	39,23	15
<b>Ti</b>	42,66	17	44,93	18					
<b>Tm</b>	44,25	17	46,28	18					

O material virgem apresenta uma entalpia de fusão de 40,26 J/g e um grau de cristalinidade de 24%. Tendo em conta a Tabela 10 e analisando os resultados verificamos que do material virgem para os provetes injetados houve uma diminuição do grau de cristalinidade, podendo dever-se ao facto de o material ao ser processado perde algumas propriedades e as condições de processamento permitem que a cristalização seja maior ou menor. Relacionando apenas os valores das peças podemos inferir que a alteração das condições operatórias não tem grande influência no grau de cristalinidade, com uma variação máxima de 3%. Assim, a cristalinidade das amostras é baixa, sendo esse um dos objetivos a serem alcançados na injeção.

### Determinação do conteúdo de fibra

Após efetuar o procedimento descrito anteriormente, colocaram-se os valores da massa numa tabela no Excel e calculou-se a perda de massa por calcinação. A Tabela 11 apresenta os valores correspondentes a cada ensaio.



Tabela 11: Perda de massa por calcinação

	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Média (%)	D. padrão
<b>Matéria virgem</b>	64	64,2	64,1	0,11
<b>Ci1/Ci2</b>	65,45	65,02	65,23	0,21
<b>P1/P2</b>	65,35	65,29	65,31	0,02
<b>Va1/Va2</b>	65,04	65,23	65,14	0,04
<b>Vd1/Vd2</b>	64,59	65,29	64,65	0,06
<b>2Pd1/2Pd2</b>	65,25	65,16	65,21	0,04
<b>2Pa1/2Pa2</b>	64,02	64,66	64,34	0,32
<b>Ti1/Ti2</b>	65,15	65,52	65,33	0,19

O material usado no estudo contém, segundo o fabricante, 35% de fibras de vidro, portanto, a perda de massa tem de ser 65% para que sobrem os 35% das fibras. Segundo a Tabela 11 isso verifica-se em todas amostras, estando todas dentro do erro. Devido aos resultados obtidos serem constantes, não foi realizado este ensaio para as restantes peças e assume-se que o comportamento será semelhante ao apresentado.

### Caracterização microestrutural

Utilizando o software *Leica Application Suite (LAS)* que está ligado a uma câmara da *Leica* colocada no microscópio de transmissão foi possível medir o tamanho das fibras que se encontram na Figura 18.

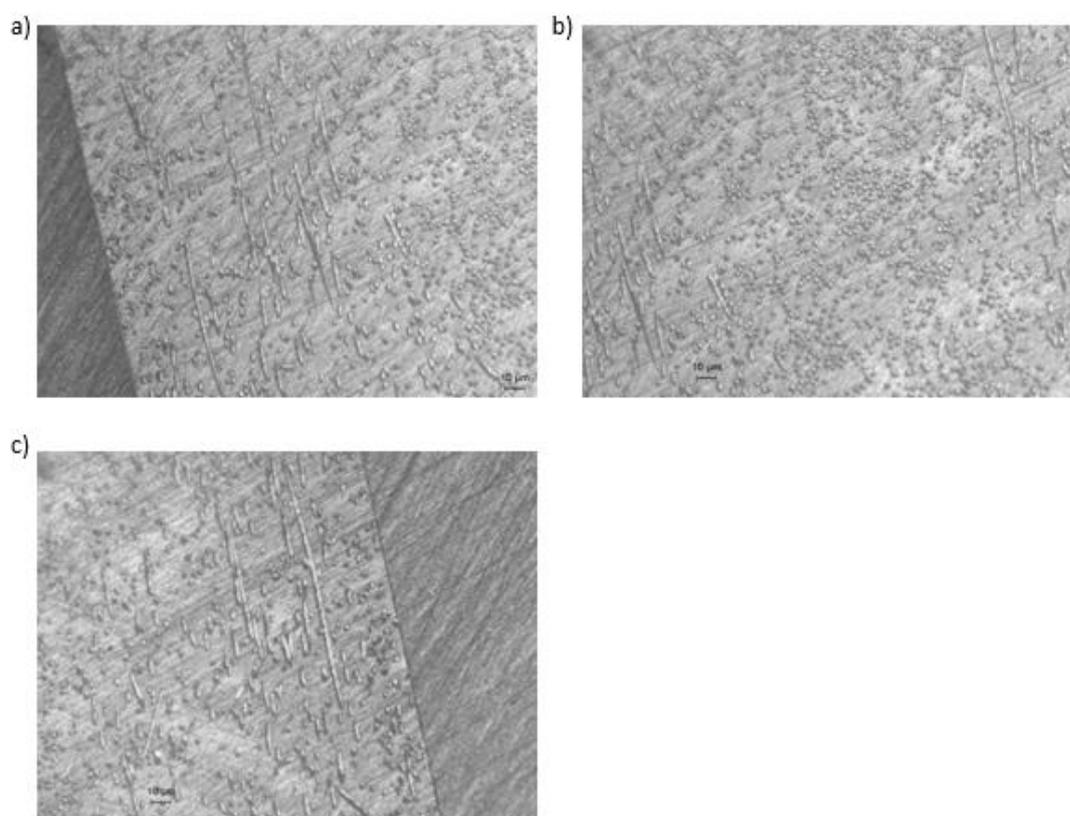


Figura 18: Vista das fibras ao microscópio



As fibras, como é possível ver na imagem anterior, têm diversos tamanhos, podendo ser de elevadas ou de reduzidas dimensões. No Anexo 6 encontram-se tabeladas as medidas das fibras apresentadas na Figura 18.

Através do microscópio de reflexão observaram-se as peças embebidas em resina e analisou-se apenas a orientação das fibras, devido ao facto de este método não permitir mais que a observação das fibras. Nas Figura 19a), 19b) e 19c) encontram-se as imagens obtidas no microscópio das peças que foram analisadas. As paredes da peça localizam-se em a) e c), e o núcleo em b).



*Figura 19: Orientação das fibras*

Como se pode notar, na imagem b) as fibras apresentam-se como pontos esbranquiçados em grandes quantidades, já nas imagens a) e c) as fibras apresentam-se como traços, uns mais curtos e outros mais longos. A presença deste acontecimento deve-se ao facto de em a) e c) o material estar orientado pois o material arrefeceu muito rapidamente por estar contacto direto com o molde. Em b) isso não se verifica, uma vez que o material tem tempo para relaxar devido ao arrefecimento mais lento.



## Transmitância

Através do *software* obtemos os valores em excel, o que permitiu calcular a média dos valores da transmitância para cada comprimento de onda, espessura e peça. Após estes cálculos, e apenas para o comprimento de onda de 940 nm (uma vez que o laser usado tem este comprimento de onda) agruparam-se num gráfico todas as condições/variáveis operatórias, e os resultados estão presentes na Figura 20.

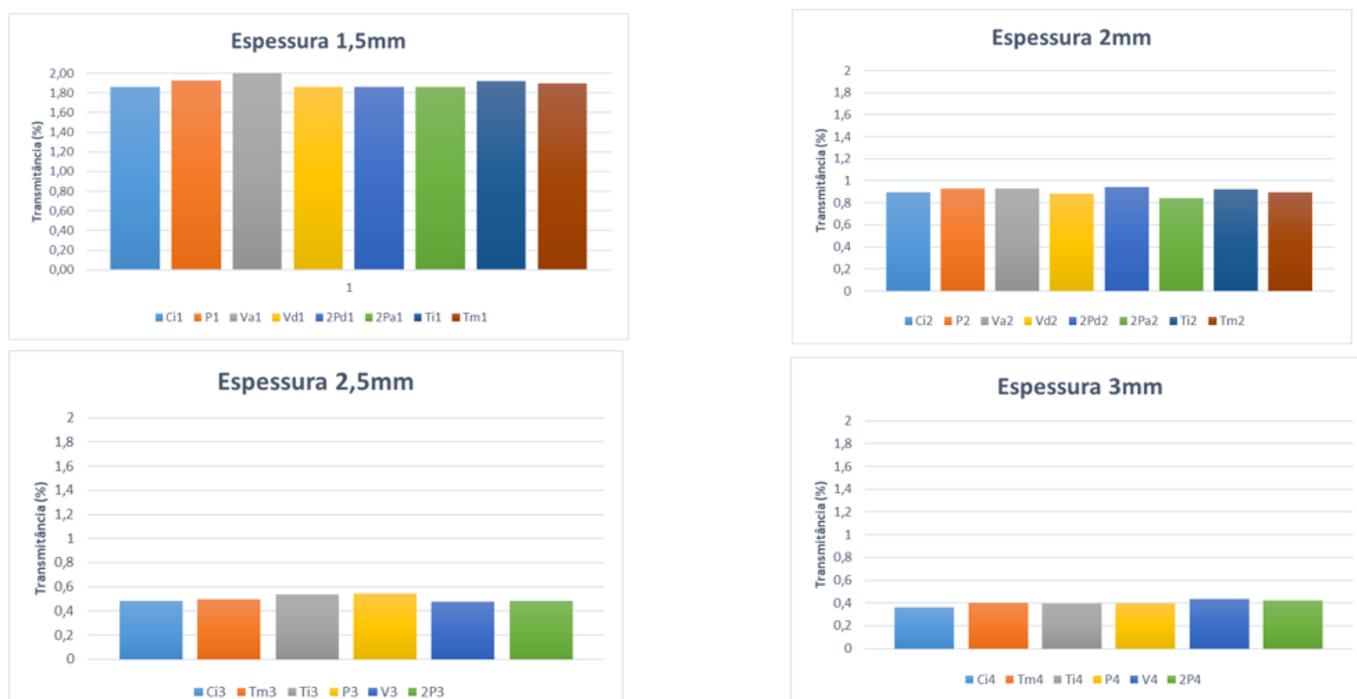


Figura 20: Valores da transmitância para cada espessura

Examinando os resultados da figura 20a), podemos ver um destacamento das peças Va1, onde se aumentou a velocidade de injeção. As peças Vd1 que se procedeu à diminuição da velocidade de injeção verifica-se um valor mais baixo, sendo mesmo o menor de todas as peças. Assim, é possível referir que a velocidade de injeção tem um grande impacto na transmitância, pois uma maior orientação molecular permite maior passagem de radiação do que uma orientação menor.

As peças P1 e Ti1, diminuição da pressão e aumento da temperatura de injeção, respetivamente, também apresentam resultados mais altos e muito semelhantes. Nestes dois casos o efeito é oposto, isto é, a pressão tem um efeito negativo na transmitância, mas a temperatura de injeção tem efeito positivo. O aumento da temperatura de injeção tem efeito na morfologia, ou seja, no aumento do grau de cristalinidade do núcleo e na diminuição do tamanho da casca. Assim percebemos que



o aumento do grau de cristalinidade tem menor impacto na transmitância de luz do que o tamanho da casca. A pressão de injeção permite o enchimento da cavidade do molde, uma vez que combate a resistência ao fluxo do material durante o processo. Uma pressão maior, mantendo-se todas as outras condições, leva a uma maior compactação do material e o arrefecimento é mais rápido, o que faz com que o desenvolvimento das esferulites seja menor.

No gráfico b), onde a espessura das peças já passa a 2mm, verifica-se uma diminuição geral dos valores de transmitância, tal como era esperado. A amostra que apresenta maior valor de transmitância é a 2Pd2, onde se diminuiu a 2ª pressão. No entanto, tem mais 3 amostras muito próximas P2, Va2 e Ti2 tal como aconteceu no gráfico a). Passando para os resultados das amostras de espessura maior, gráfico c), há novamente uma redução geral da percentagem de transmitância. As peças que se destacam por apresentar melhores valores são as Ti3 e P3, na qual se aumentou a temperatura de injeção e a pressão, respetivamente, pelas mesmas razões que foram referidas anteriormente.

Por fim, no gráfico d) a transmitância é muito semelhante em todas as peças, apresentando valores muito baixos, menores que 0,5%. Isto deve-se à espessura da peça pois não permitindo a passagem de luz.

### **6.3. Simulação computacional**

A Figura 21 mostra a orientação das fibras, tanto na peça de maior como na de menor espessura. O que exhibe o diagrama é uma orientação das fibras na direção do fluxo em ambos os casos, que era o esperado e o observado no microscópio.

Obtemos uma lista de resultados relativos ao enchimento da peça, à compactação, ao arrefecimento e ainda ao empeno. Os resultados aparecem como mostra a Figura 21, em que barra do lado direito nos indica um intervalo de valores onde apresenta o valor mínimo e o máximo atingidos pela peça.

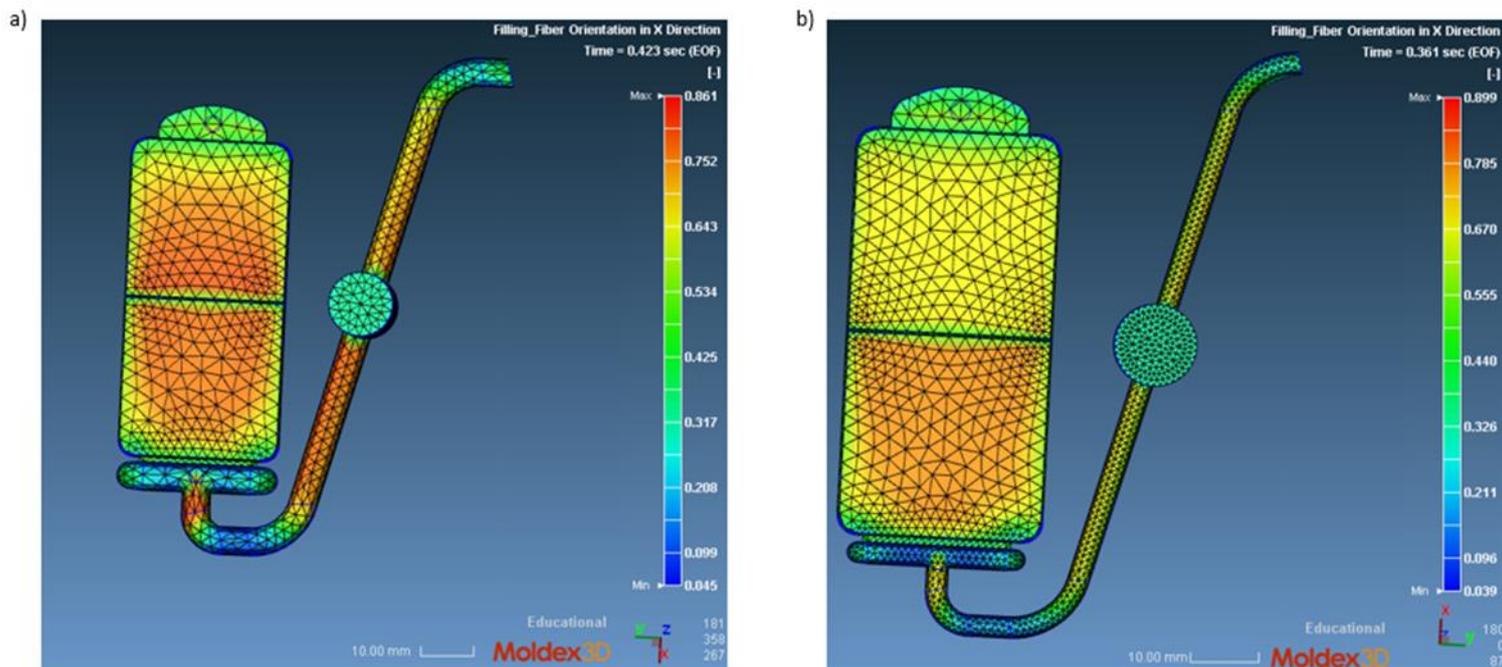


Figura 21: a) orientação das fibras na direção x da peça de maior espessura; b) orientação das fibras na direção x da peça de menor espessura

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados da peça de maior e menor espessuras.

Tabela 12: Comparação dos resultados

Espessura	Diagramas	Software	Injetora	Variação
1,5-2mm	Quantidade de material	25mm	26mm	1mm
1,5-2mm	Tempo de enchimento	0,36s	0,5s	0,14s
1,5-2mm	Temperatura da frente de fundido	307°C	300°C	7°C
1,5-2mm	Tempo de compactação	3,38s	3s	0,38
1,5-2mm	Pressão de enchimento	48 MPa	6/8 MPa	42/40MPa
1,5-2mm	Tempo de arrefecimento	18,38s	15s	3,38s
2,5-3mm	Quantidade de material	24mm	40mm	16mm
2,5-3mm	Tempo de enchimento	0,42s	1s	0,18s
2,5-3mm	Temperatura da frente de fundido	302°C	300°C	2°C



2,5-3mm	Tempo de compactação	4s	3s	1s
2,5-3mm	Pressão de enchimento	21 MPa	10/11 MPa	11/10MPa
2,5-3mm	Tempo de arrefecimento	19s	15s	4s

Analisando os resultados da peça de menor espessura, presentes na Tabela 12, podemos inferir que os valores da pressão são os que apresentam uma maior discrepância e os restantes são muito semelhantes aos definidos na injetora.

Esta diferença pode-se dever a alguma das especificações da máquina do departamento ser diferente daquilo que se encontra na máquina escolhida no *software*.

Quanto às peças de maior espessura, a diferença não é tao elevada nas pressões, mas sim na quantidade de material a injetar. A razão pela qual este facto acontece pode ser o mesmo que no caso anterior, pois basta uma característica da máquina ser maior ou menor que na realidade e é o suficiente para esta diferenciação de resultados.

#### **6.4. Processo de soldadura**

O *software* da soldadura mostra-nos um gráfico de tempo em função da temperatura que cada provete atinge. O gráfico pode ser, aproximadamente, linear ou com maiores oscilações como será apresentado um exemplo na Figura 22, 23 e 24.

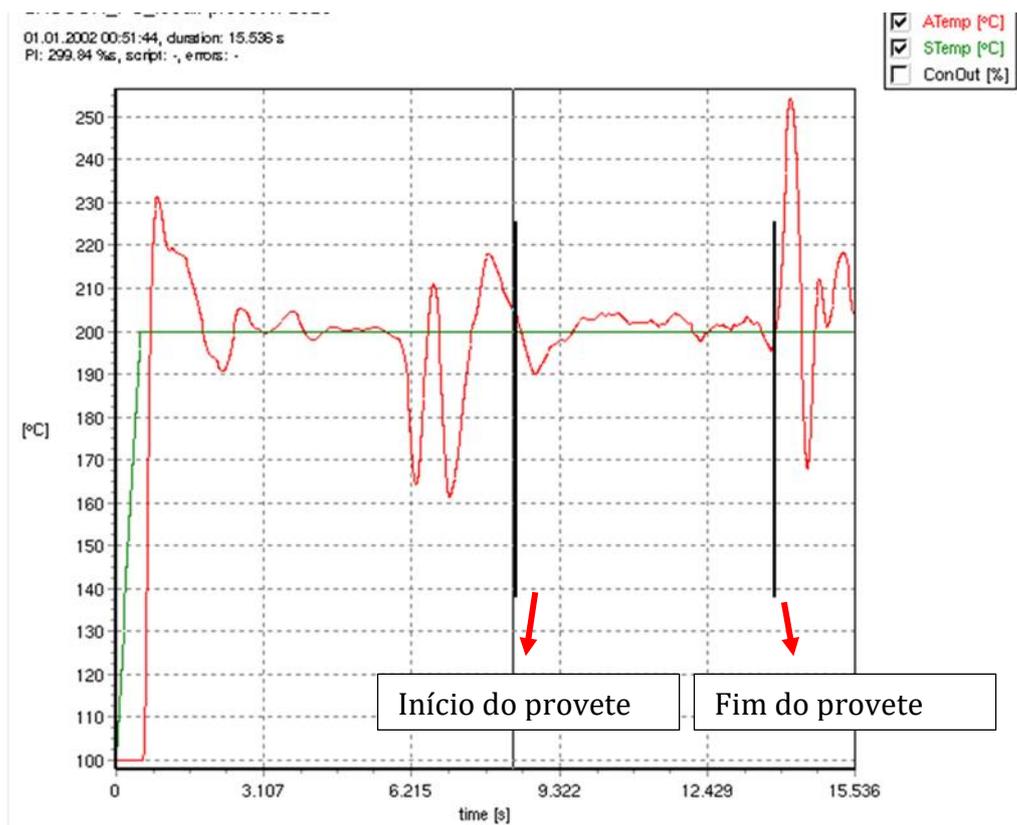


Figura 22: Gráfico da soldadura para peças com menor espessura

Na Figura 22 é um exemplo de um gráfico quase linear, onde as oscilações são mínimas. A soldadura do provete encontra-se entre os traços assinalados e com a respetiva identificação de início e fim de provete. O que está antes é a estabilização da radiação laser. Quando apresenta baixas oscilações o laser é acionado e isso verifica-se pelos picos elevados. A radiação atinge a peça e volta a estabilizar. O pico elevado após o segundo traço indica que atingiu outro material sem ser o da peça, e aqui o laser é desligado.

Na Figura 23 apresenta-se o gráfico com as mesmas indicações, mas com um comportamento diferente.

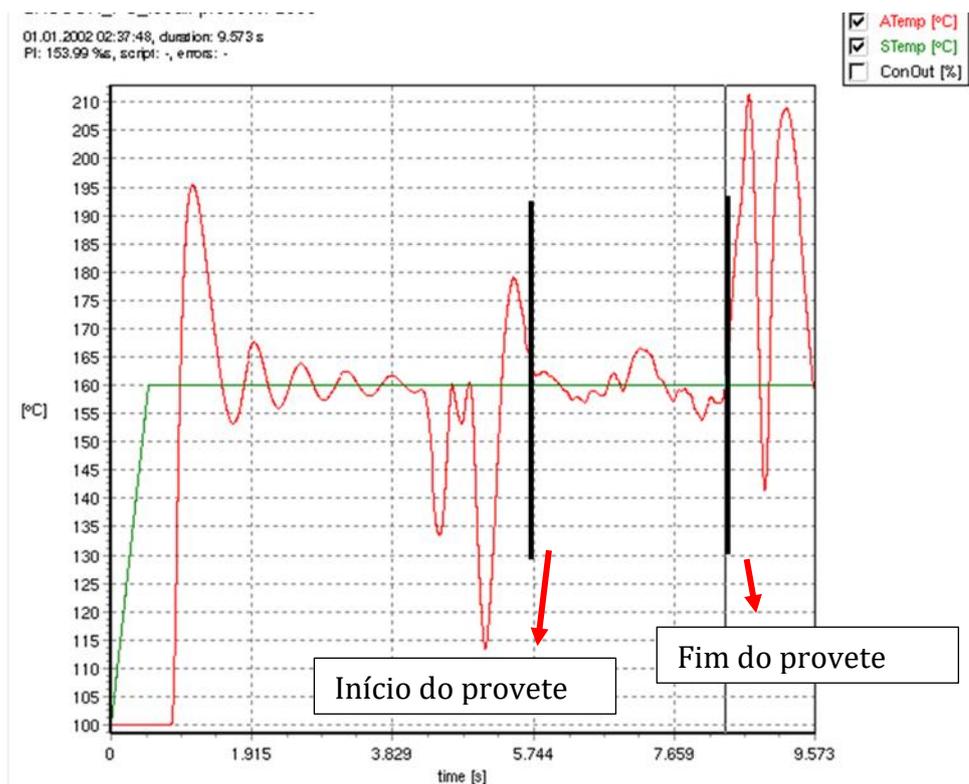


Figura 23: Gráfico da soldadura para peças com espessura intermédia

Na Figura 23 o gráfico apresenta uma maior instabilidade que no caso anterior, isto é, na primeira parte onde há a estabilização do laser ficou quase linear, mas quando a radiação é acionada verifica-se que não consegue estabilizar como no gráfico da Figura 22. Embora o material das peças seja todo igual, a espessura varia, e é este fator que tem influência para apresentar mais oscilação.

No caso das peças com 3mm de espessura, estas soldam, mas o que mostram os gráficos é uma incapacidade de atingir a temperatura definida, como demonstrado na Figura 24.

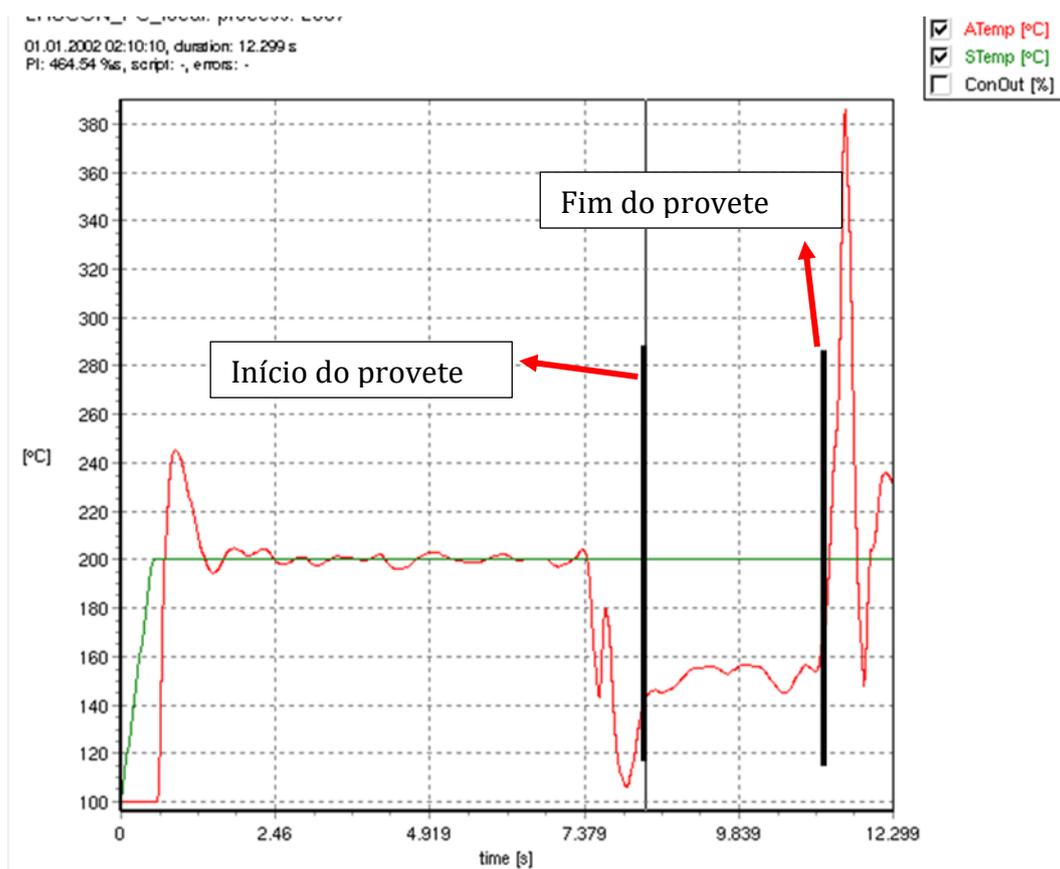
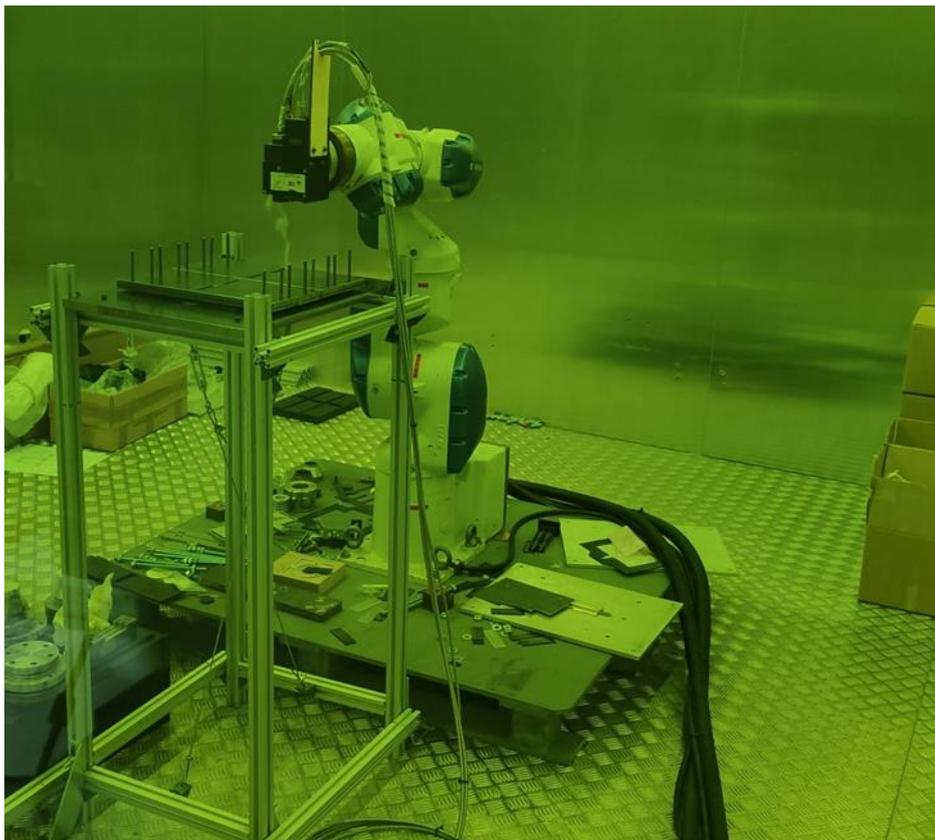


Figura 24: Gráfico da soldadura para peças com maior espessura

Há uma estabilização da radiação na primeira parte do gráfico e depois há a soldadura das peças entre os traços. Nessa zona de soldadura verifica-se que a temperatura atingida é inferior à estabelecida (200°C). A razão para isso acontecer é a espessura da peça, a estrutura cristalina e também as fibras de vidro não permitem que a radiação seja toda transmitida e que haja absorção da mesma.

Quando o laser passa no PLA, antes e depois de soldar as peças, consegue-se ver chama e fumo a sair do local onde está a passar o laser, como se observa na Figura 25. Isto deve-se ao facto de o PLA ter propriedades diferentes do PA66 e a temperatura ser muito elevada para o PLA, começando a queimar.



*Figura 25: Emissão de fumo durante a soldadura*

Em cada soldadura é possível soldar 4 peças, sendo realizados vários testes e verificando se a peça sai queimada ou não queimada, designando-se na Tabela 10 como Q ou NQ, respetivamente. Na Tabela 13 encontram-se as condições usadas e os respetivos resultados de soldadura. Como pode ser observado na tabela, todas as peças soldadas com uma velocidade de 4 mm/s ficaram queimadas quando comparadas com as restantes pelas cuja velocidade de varrimento foi de 8 mm/s, exceto o caso Va1 com peso de 2400g. De notar que a peça queimada é aquela que fica na parte superior, ou seja, é a peça transparente que devia transmitir a luz incidente. Isto pode ser explicado pelo fato de a uma velocidade de varrimento menor corresponder um maior tempo de incidência. Como a transmitância da peça é baixa e o tempo de incidência é maior neste caso, comparando com a velocidade de varrimento de 8 mm/s, resulta uma maior absorção de energia que se transforma em energia térmica e degrada o material.

Em todas as condições em que a velocidade de varrimento foi de 8 mm/s, nomeadamente condições de temperatura, de diâmetro e de número de varrimentos, as peças não queimaram.



Tabela 13: Condições e resultados da soldadura

peça	Temperatura (°C)	vel. Varr (mm/s)	Diâmetro (mm)	Peso (g)	nº varr	resultado
Va1	240	4	1	2400	1	Q
	240	4	1	2640	1	Q
	240	4	1	2880	1	Q
	240	4	1	3320	1	Q
Va1	200	4	1	2400	1	NQ
	200	4	1	2640	1	Q
	200	4	1	2880	1	Q
	200	4	1	3320	1	Q
2Pd2	200	4	1	2400	1	Q
P3	200	4	1	2400	1	Q
V4	200	4	1	2400	1	Q
Va1	200	8	1	2400	1	NQ
2Pd2	200	8	1	2400	1	NQ
P3	200	8	1	2400	1	NQ
V4	200	8	1	2400	1	NQ
Va1	160	8	1	2400	2	NQ
2Pd2	160	8	1	2400	2	NQ
P3	160	8	1	2400	2	NQ
V4	160	8	1	2400	2	NQ
Va1	200	8	3	2400	1	NQ
2Pd2	200	8	3	2400	1	NQ
P3	200	8	3	2400	1	NQ
V4	200	8	3	2400	1	NQ

Na Figura 26 a) e b) estão apresentados, respetivamente, exemplos de peças queimadas e peças com boa solda obtidas nos ensaios de soldadura.

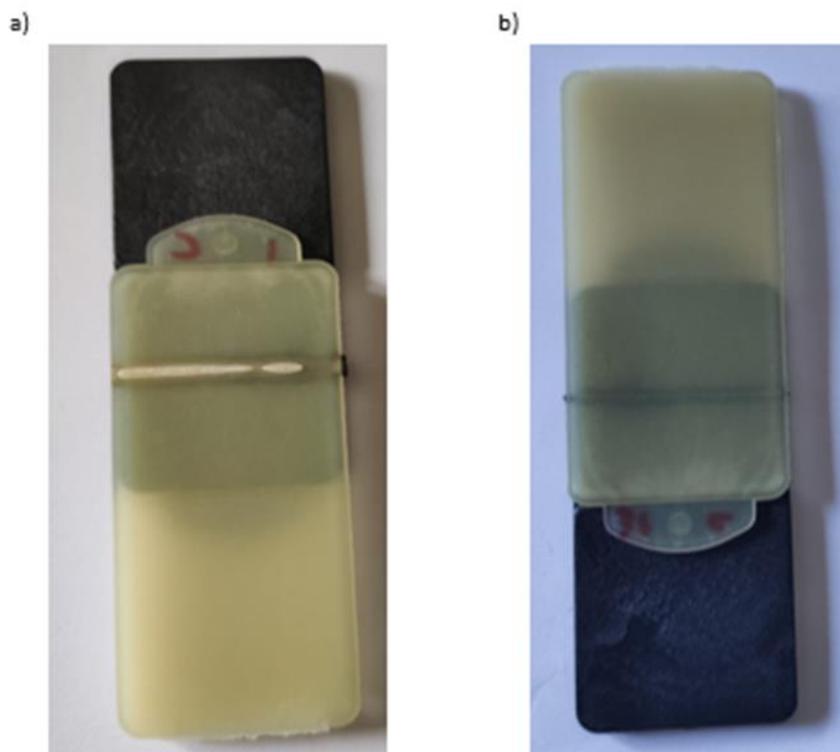


Figura 26: a) peça queimada; b) peça com boa solda

## 6.5. Caracterização mecânica da solda

Neste tópico agruparam-se os resultados do ensaio de tração realizados para a solda das peças com diferentes espessuras.

Na Tabela 14 encontram-se os resultados da força máxima obtidos para as diferentes condições de processamento do laser.

Tabela 14: Resultados Força máxima

Peça	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Diâmetro (mm)	Nº passagens	Espessura total (mm)	Força Máxima (KN)
Va1	200	4	1	1	4	1548,84
Va1	200	8	1	1	4	1410,18
2Pd2	200	8	1	1	4,5	1817,07
P3	200	8	1	1	5	1776,47
V4	200	8	1	1	5,5	2130,58
Va1	160	8	1	2	4	1414,21
2Pd2	160	8	1	2	4,5	1833,87
P3	160	8	1	2	5	1944,21
V4	160	8	1	2	5,5	2699,66
Va1	200	8	3	1	4	2216,88
2Pd2	200	8	3	1	4,5	2421,23



<b>P3</b>	200	8	3	1	5	1993,86
<b>V4</b>	200	8	3	1	5,5	1829,65

Pela análise dos valores da última coluna da tabela constata-se que quando o diâmetro aumenta, para as espessuras menores aumenta e, pelo contrário, para as espessuras maiores diminui. Este acontecimento deve-se à distância de afastamento entre a mesa e a cabeça do laser. Isto é, como o diâmetro se define alterando a distância de afastamento entre a mesa e a cabeça do laser, ao aumentar a espessura total, vai aproximar as peças da cabeça do laser e, assim, o diâmetro do laser fica diferente. Então, quanto mais próximo estiver o conjunto da cabeça do laser, maior o diâmetro e, portanto, mais força é necessário exercer para que ocorra a rotura da solda.

Todavia, o laser tem uma particularidade, pois o seu comportamento no diâmetro do laser é em X. Isto significa que há um ponto onde há inversão da dimensão do diâmetro, ou seja, normalmente se aumentar a distância de afastamento o diâmetro diminui, mas há um ponto intermédio que começa a ocorrer o contrário, e com o aumento da distância de afastamento o diâmetro aumenta. A Figura 27 representa um esquema do que foi referido, onde a distância de afastamento entre a mesa e a cabeça do laser, de a) para b), diminui ( $a_1 > a_2$ ) e o diâmetro também diminui ( $d_1 > d_2$ ). Se diminuirmos ainda mais a distância de afastamento entre a mesa e a cabeça do laser, de b) para c), passa o ponto focal e o diâmetro do laser aumenta ( $d_2 < d_3$ ). É este facto que determina o diâmetro da soldadura observado nas peças soldadas e referido no texto.

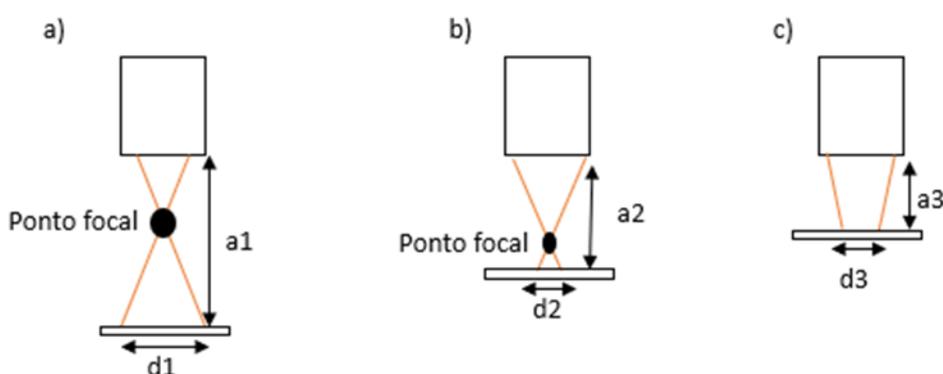
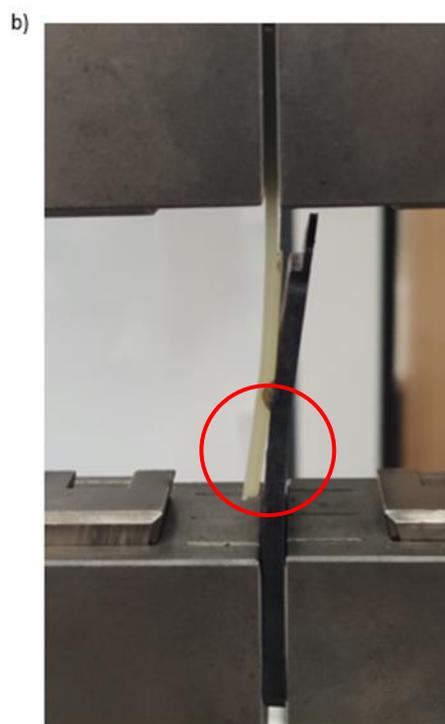
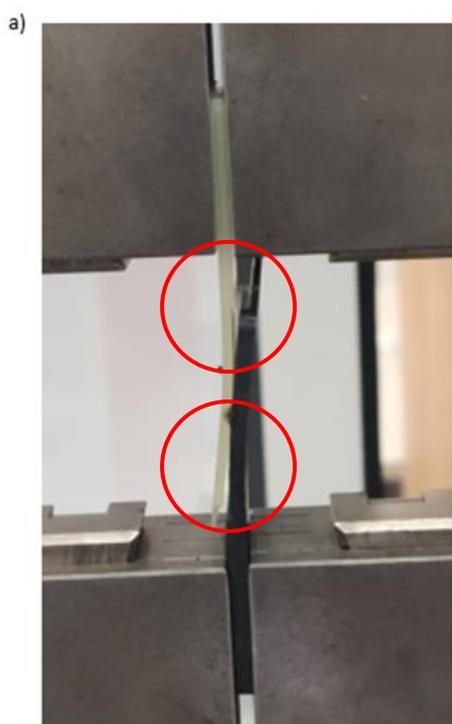


Figura 27: Esquema do comportamento do diâmetro do laser



Assim, concluímos que o diâmetro e a espessura total têm mais influência nos resultados da força máxima.

Na Figura 28 é visível uma pequena rotação das peças, devido à diferença de espessuras nas amarras. Isto é, a amarra superior pode ter uma peça com espessura de 1,5, 2, 2,5 ou 3mm e a amarra inferior possui sempre uma peça com 3mm de espessura. Apesar da ocorrência dessa rotação, não há influência nos resultados.





c)



d)



Figura 28: Rotação com peça transparente de espessura: a)1,5mm; b)2mm; c)2,5mm; d)3mm

Comparando as quatro figuras é possível identificar que na imagem c) a rotação é mínima, quase imperceptível, enquanto nos restantes casos, particularmente em a) observa-se esse feito com bastante clareza. Como mencionado, a razão para isso é a diferença entre espessuras. Como a espessura da peça opaca é 2,5 mm e a da peça transparente varia de 1,5 a 3mm faz com que a rotação seja tanto maior quanto maior a diferença de espessuras entre as duas placas. Em c) a espessura das peças é a mesma e por isso não se visualiza com a mesma facilidade que em a).

Seguiu-se a observação da solda partida das várias peças.

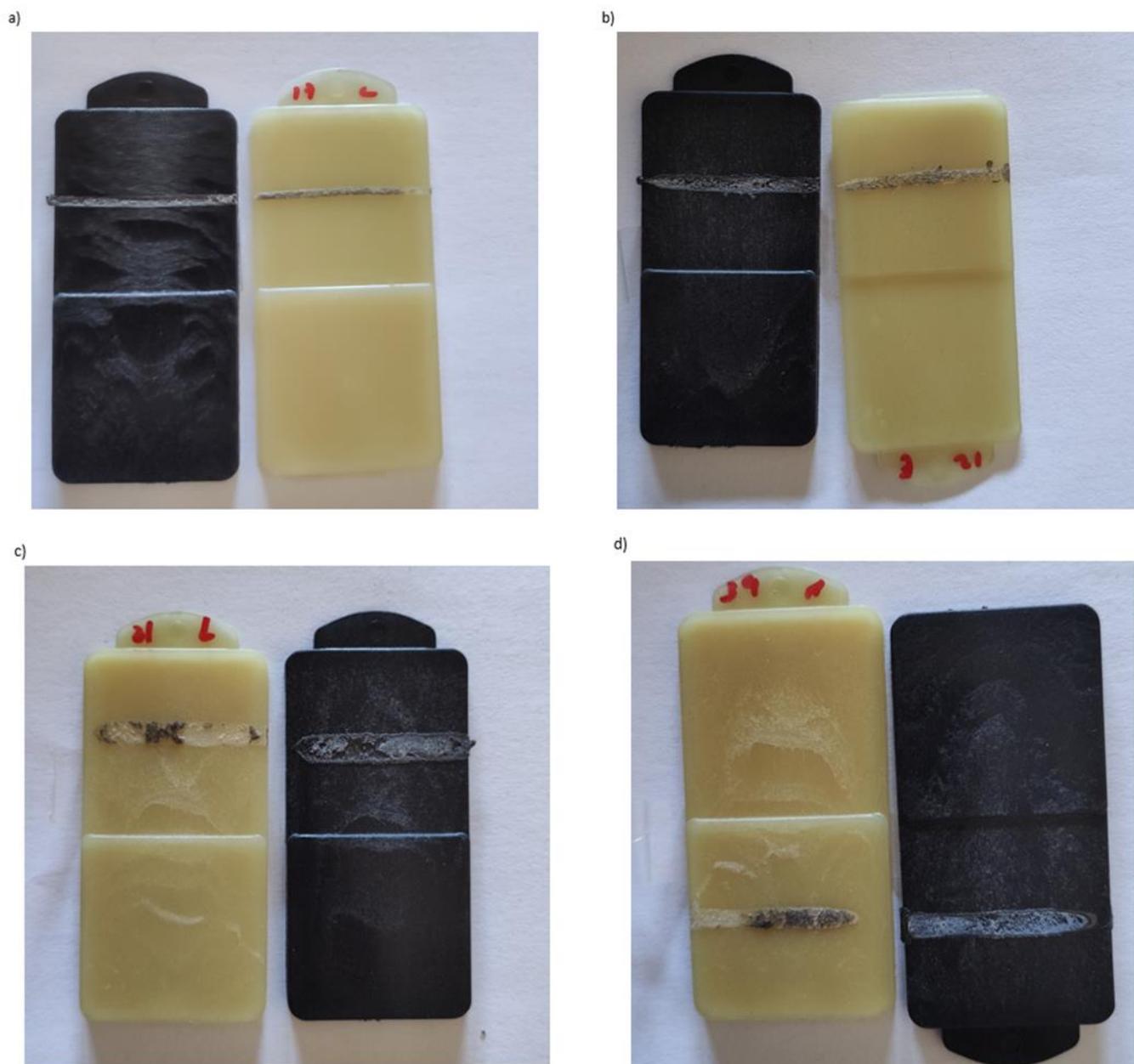


Figura 29: Solda das placas

A Figura 29, demonstra que em a) e b) a linha de soldadura foi contante, ambas as peças fundiram e houve junção de material, e isso é visível nas peças transparentes que contêm resíduos da peça opaca e vice-versa. No caso de c) e d), nota-se que o diâmetro da solda já é maior, continua a haver a fusão dos dois materiais nas duas imagens, mas em d) nota-se que as peças não soldaram até ao fim, ou seja, o laser foi desligado antes de chegar ao fim da peça.

A fratura da solda é frágil, uma vez que a deformação que sofre é reduzida. Os gráficos obtidos têm todos o comportamento do apresentado na Figura 30.

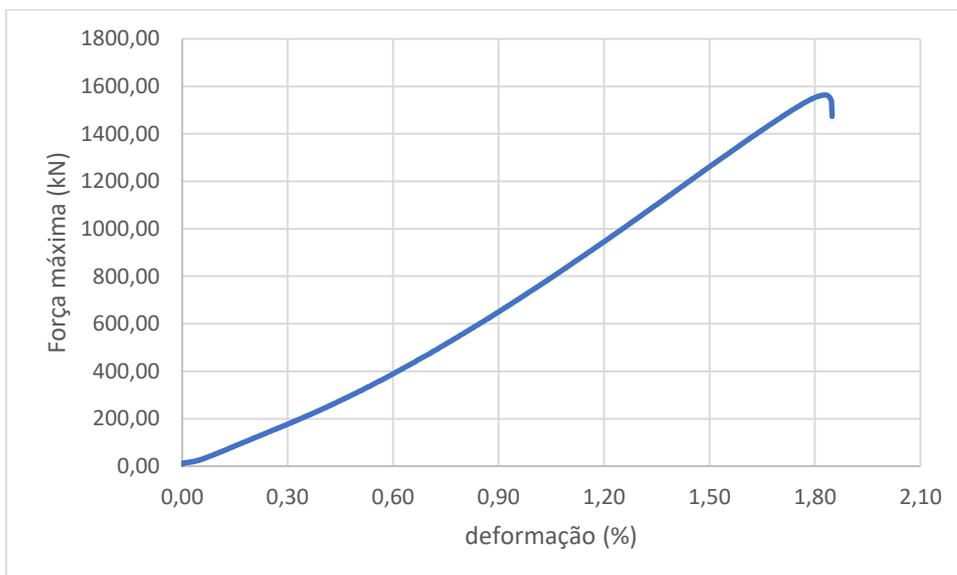


Figura 30: Gráfico força máxima vs deformação

## 6.6. Caracterização física da solda

A Figura 31 mostra um esquema da dimensão da largura da solda. no entanto, verificou-se que esta largura era dependente somente da distância efetiva da placa à cabeça do laser. Esta medição é feita após a solda ser partida no ensaio de tração, e o resultado dessa rotura está presente na Figura 32.

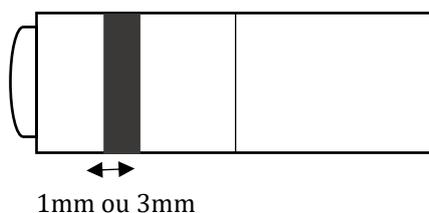


Figura 31: Dimensão da solda

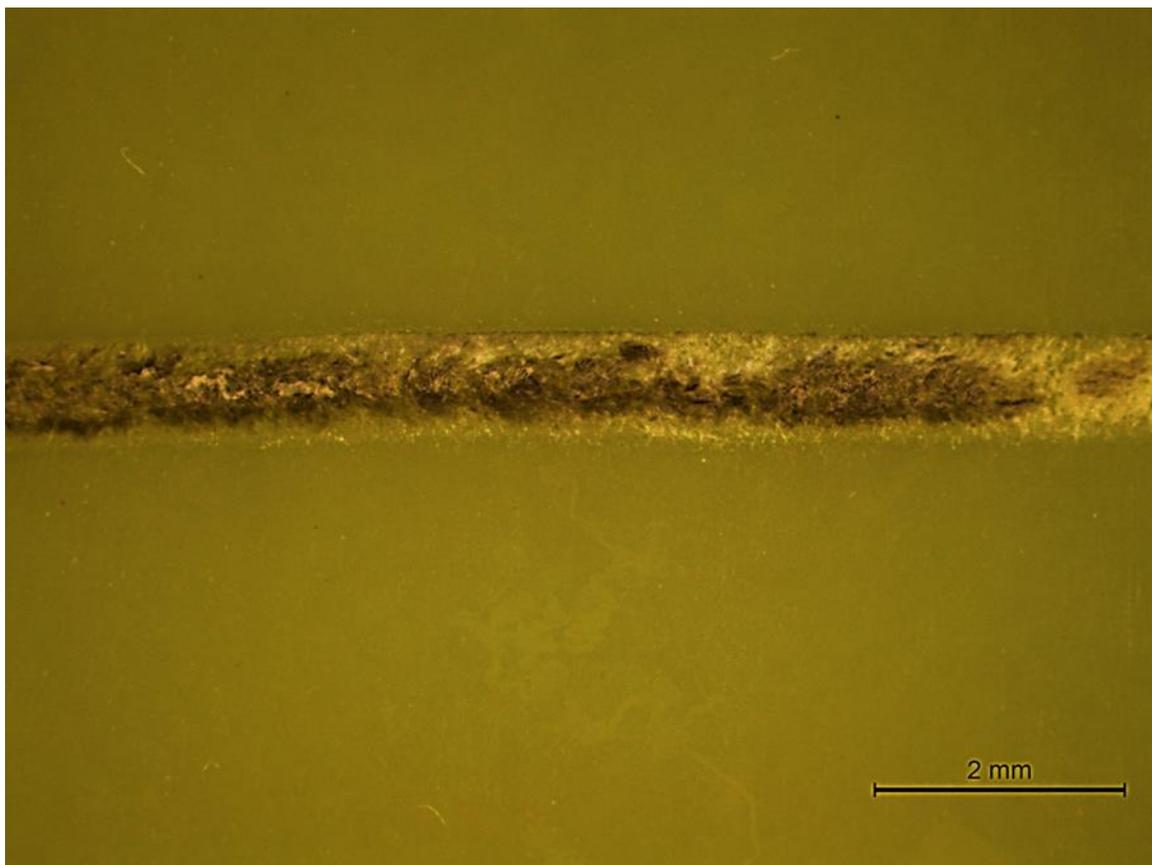


Figura 32: Solda analisada na lupa

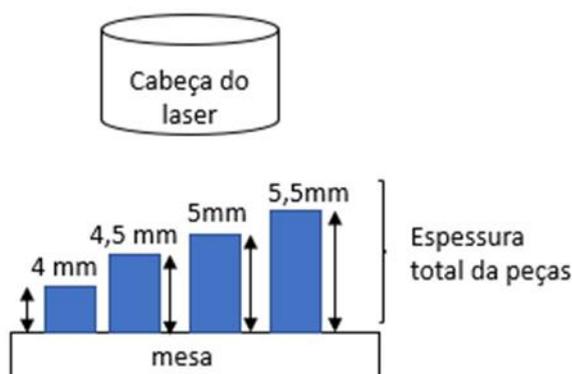
Os resultados das medições foram agrupados e estão presentes na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados da largura da solda

Peça	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	Diâmetro (mm)	Nº passagens	Espessura total (mm)	Largura solda
Va1	200	4	1	1	4	0,75
Va1	200	8	1	1	4	0,76
2Pd2	200	8	1	1	4,5	0,92
P3	200	8	1	1	5	1,49
V4	200	8	1	1	5,5	1,37
Va1	160	8	1	2	4	0,65
2Pd2	160	8	1	2	4,5	0,80
P3	160	8	1	2	5	1,07
V4	160	8	1	2	5,5	1,36
Va1	200	8	3	1	4	1,91
2Pd2	200	8	3	1	4,5	2,07
P3	200	8	3	1	5	1,86
V4	200	8	3	1	5,5	1,34



Como o diâmetro foi definido com um paquímetro, esse valor torna-se apenas uma aproximação ao valor que desejávamos, como se consta na tabela (não há nenhum valor com largura de, precisamente, 1mm). Na tabela, para as peças onde o diâmetro é 1 mm, verifica-se que a largura da solda aumenta com o aumento da espessura total. Este feito deve-se ao facto de a distância de afastamento ser menor à medida que a espessura das peças aumenta, ou seja, embora não se altere a distância entre a mesa e a cabeça do laser, a distância entre a cabeça do laser e a peça vai ser tanto menor quanto maior a espessura das peças. A Figura 33 é um esquema daquilo que foi referido anteriormente, onde está representado um aumento da espessura total das peças e a cabeça do laser mantem-se sempre no mesmo sítio, levando a uma diminuição da distância de afastamento entre a peça e a cabeça do laser.



*Figura 33: Comportamento da distância de afastamento das peças e da cabeça do laser*

Nas peças onde o diâmetro foi alterado para aproximadamente 3 mm, a distância de afastamento entre a mesa e a cabeça do laser aumentou. Pela análise da tabela, para as espessuras maiores a largura diminui. Neste caso já se verifica o descrito anteriormente, e ultrapassa-se o ponto médio quando se coloca as peças com maior espessura e por essa razão o comportamento é o contrário ao que se observa nas peças de 1 mm, diminuindo a largura da solda.



## 6.7. Análise de dados

A aplicação do *DAMICORE* produz os resultados da Figura 34, onde se podem observar as distâncias normalizadas entre os dados (variáveis de decisão e objetivos). As distâncias representadas nesta árvore, medidas como o caminho do deslocamento entre uma variável e outra, indicam o grau de interação entre as variáveis. De notar que as variáveis de decisão e os objetivos não representam nenhuma diferença para o programa usado.

Assim, com esta árvore foi possível determinar as distâncias entre os objetivos e as variáveis de decisão, Tabela 16, e as distâncias entre os objetivos, Tabela 17. Na tabela 16 os nomes que se encontram na primeira coluna são as variáveis de decisão e a primeira linha são os objetivos da Tabela 13. A média da distância entre as variáveis de decisão e os objetivos (Tabela 16) indica o grau de proximidade ou influência. Note-se que os resultados das Tabelas 16 e 17 e da Figura 34 são referentes apenas à fase de injeção.

Tabela 16: Distância entre variáveis de decisão e objetivos

	'trans'	'cris'	'esp'	'larg'	'comp'	'peso'	media
'Esp_molde'	0,28	0,28	0,28	0,71	0,71	0,71	0,5
'2P'	0,86	0,86	0,56	0,43	0,43	0,71	0,64
'P2'	0,86	0,86	0,56	0,71	0,71	0,43	0,69
'Tinj'	1	1	0,71	0,56	0,56	0,86	0,78
'Vinj'	1	1	0,71	0,56	0,56	0,86	0,78
'P1'	1	1	0,71	0,86	0,86	0,56	0,83
'Tmolde'	1	1	0,71	0,86	0,86	0,56	0,83

Tabela 17: Distância entre objetivos

	'trans'	'cris'	'esp'	'larg'	'comp'	'peso'	Average
'esp'	0,43	0,43	0	0,56	0,56	0,56	0,42
'cris'	0,14	0	0,43	0,86	0,86	0,86	0,52
'trans'	0	0,14	0,43	0,86	0,86	0,86	0,52
'comp'	0,86	0,86	0,56	0,14	0	0,71	0,52
'larg'	0,86	0,86	0,56	0	0,14	0,71	0,52
'peso'	0,86	0,86	0,56	0,71	0,71	0	0,61

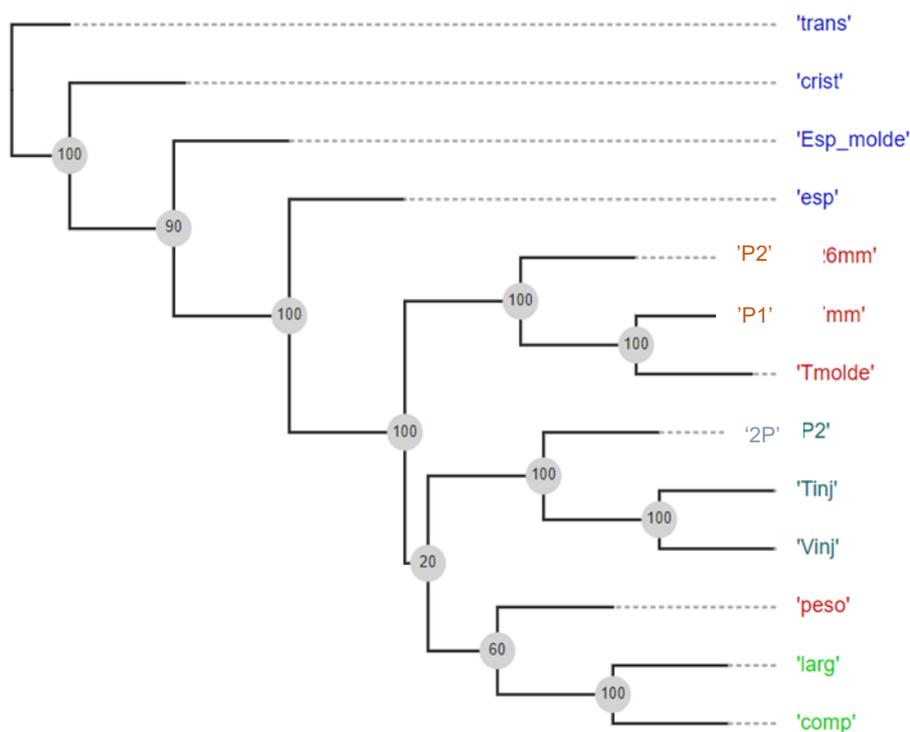


Figura 34: Filograma

A informação que podemos retirar da Tabela 16 e 17 e da Figura 34 é que as variáveis que têm mais influência na transmitância e na cristalinidade é a 2ª pressão. Antes da 2ª pressão verificamos que antes se encontra a espessura da cavidade do molde, com mais influência do que a 2ª pressão, porém a espessura não é uma variável da injeção. Apesar disso, os valores da média dessas duas variáveis são altos, e das restantes já estão muito próximos de 1, o que significa que têm menos influência. No Filograma da Figura 32 é visível que P2 tem uma distância menor que a 2ªP. A razão para isso acontecer é que são feitas 10 corridas do programa para evitar o enviesamento dos dados, obtendo-se 10 filogramas, sendo que os resultados das tabelas correspondem à média desses valores.

Os resultados da Tabela 18 apresentam a distância entre as variáveis de decisão e os objetivos, a Tabela 19 a distância entre objetivos e a Figura 35 o Filograma dos dados presentes na Tabela 6 e 7.



Tabela 18: Distância entre variáveis de decisão e objetivos

	Trans	DPTrans	Crist	esp	larg	comp	peso	Fmax	Dpymax	L_solda	DP_l_solda	Average
<b>Dlaser</b>	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5	0,62
<b>Nvarr</b>	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5	0,62
<b>esp_total</b>	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5	0,62
<b>P2</b>	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,63
<b>Tlaser</b>	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,5	0,7	0,7	0,6	0,72
<b>VVlaser</b>	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,5	0,7	0,7	0,6	0,72
<b>P1</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73
<b>Tmolde</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73
<b>2P</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73
<b>esp_cav</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73
<b>Tinj</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73
<b>Vinj</b>	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1	0,9	0,73

Tabela 19: Distância entre objetivos

	Trans	DPTrans	Crist	esp	larg	comp	Peso	Fmax	Dpymax	L_solda	DP_l_solda	Average
<b>Fmax</b>	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0	0,3	0,3	0,2	0,44
<b>DPtrans</b>	0,1	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,45
<b>Trans</b>	0	0,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,45
<b>Peso</b>	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,7	0,7	0,6	0,48
<b>DP_l_sol da</b>	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,2	0,2	0,2	0	0,49
<b>Crist</b>	0,6	0,6	0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,51
<b>esp</b>	0,6	0,6	0,1	0	0,3	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,51
<b>comp</b>	0,6	0,6	0,3	0,3	0,1	0	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,51
<b>larg</b>	0,6	0,6	0,3	0,3	0	0,1	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,51
<b>Dpymax</b>	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,3	0	0,1	0,2	0,55
<b>L_solda</b>	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,3	0,1	0	0,2	0,55

7.

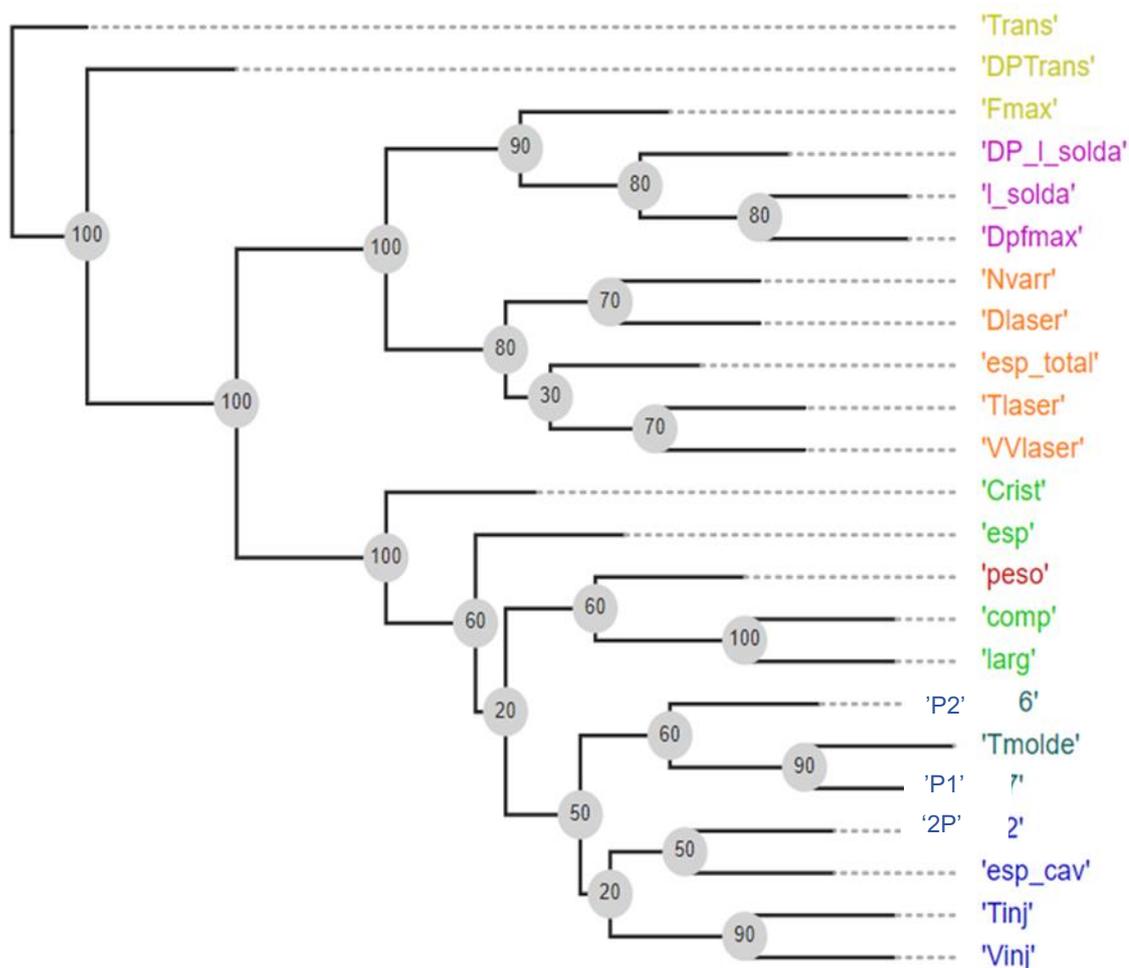


Figura 35: Filograma

Sobre estes resultados concluímos que, espessura total do conjunto, o diâmetro do laser e o número de passagens do laser são as variáveis que têm mais influência na força máxima. Na tabela 19 pudemos testemunhar que a média entre a força máxima e a transmitância é a mesma, o que significa que estão fortemente ligadas, concluindo assim que relativamente à injeção a transmitância é o fator mais importante e a ter em conta para a força máxima.

Uma vez que a Tabela 6 e 7 é extensa, testou-se usar apenas 13 linhas para verificar se os resultados eram semelhantes aos da Tabela 18 e 19.



Tabela 20: Distância entre variáveis de decisão e objetivos

	Trans	DPTrans	Crist	esp	larg	comp	peso	Fmax	Dpfmax	l_solda	DP_l_solda	Average
<b>esp_total</b>	0,33	0,33	0,42	0,42	0,5	0,5	0,25	0,25	0,42	0,42	0,33	0,37
<b>Dlaser</b>	0,33	0,33	0,57	0,57	0,67	0,67	0,42	0,42	0,42	0,42	0,33	0,47
<b>Nvarr</b>	0,33	0,33	0,57	0,57	0,67	0,67	0,42	0,42	0,42	0,42	0,33	0,47
<b>Tlaser</b>	0,75	0,75	0,33	0,33	0,25	0,25	0,5	0,5	0,83	0,83	0,75	0,55
<b>VVlaser</b>	0,75	0,75	0,33	0,33	0,25	0,25	0,5	0,5	0,83	0,83	0,75	0,55
<b>2P</b>	0,67	0,67	0,42	0,42	0,5	0,5	0,42	0,42	0,75	0,75	0,67	0,56
<b>esp_cav</b>	0,67	0,67	0,42	0,42	0,5	0,5	0,42	0,42	0,75	0,75	0,67	0,56
<b>P1</b>	0,83	0,83	0,57	0,57	0,67	0,67	0,57	0,57	0,92	0,92	0,83	0,72
<b>Tmolde</b>	0,83	0,83	0,57	0,57	0,67	0,67	0,57	0,57	0,92	0,92	0,83	0,72
<b>P2</b>	0,83	0,83	0,57	0,57	0,67	0,67	0,57	0,57	0,92	0,92	0,83	0,72
<b>Tinj</b>	0,92	0,92	0,67	0,67	0,75	0,75	0,67	0,67	1	1	0,92	0,81
<b>Vinj</b>	0,92	0,92	0,67	0,67	0,75	0,75	0,67	0,67	1	1	0,92	0,81

Tabela 21: Distância entre objetivos

	'Trans'	'DPTrans'	'Crist'	'esp'	'larg'	'comp'	'peso'	'Fmax'	'Dpfmax'	'l_solda'	'DP_l_solda'	Average
<b>'Fmax'</b>	0,5	0,5	0,42	0,42	0,5	0,5	0,08	0	0,57	0,57	0,5	0,41
<b>'peso'</b>	0,5	0,5	0,42	0,42	0,5	0,5	0	0,08	0,57	0,57	0,5	0,41
<b>'DP_l_solda'</b>	0,25	0,25	0,67	0,67	0,75	0,75	0,5	0,5	0,17	0,17	0	0,42
<b>'DPTrans'</b>	0,08	0	0,67	0,67	0,75	0,75	0,5	0,5	0,33	0,33	0,25	0,43
<b>'Trans'</b>	0	0,08	0,67	0,67	0,75	0,75	0,5	0,5	0,33	0,33	0,25	0,43
<b>'Crist'</b>	0,67	0,67	0	0,08	0,33	0,33	0,42	0,42	0,75	0,75	0,67	0,46
<b>'esp'</b>	0,67	0,67	0,08	0	0,33	0,33	0,42	0,42	0,75	0,75	0,67	0,46
<b>'Dpfmax'</b>	0,33	0,33	0,75	0,75	0,83	0,83	0,57	0,57	0	0,08	0,17	0,47
<b>'l_solda'</b>	0,33	0,33	0,75	0,75	0,83	0,83	0,57	0,57	0,08	0	0,17	0,47
<b>'comp'</b>	0,75	0,75	0,33	0,33	0,08	0	0,5	0,5	0,83	0,83	0,75	0,51
<b>'larg'</b>	0,75	0,75	0,33	0,33	0	0,08	0,5	0,5	0,83	0,83	0,75	0,51

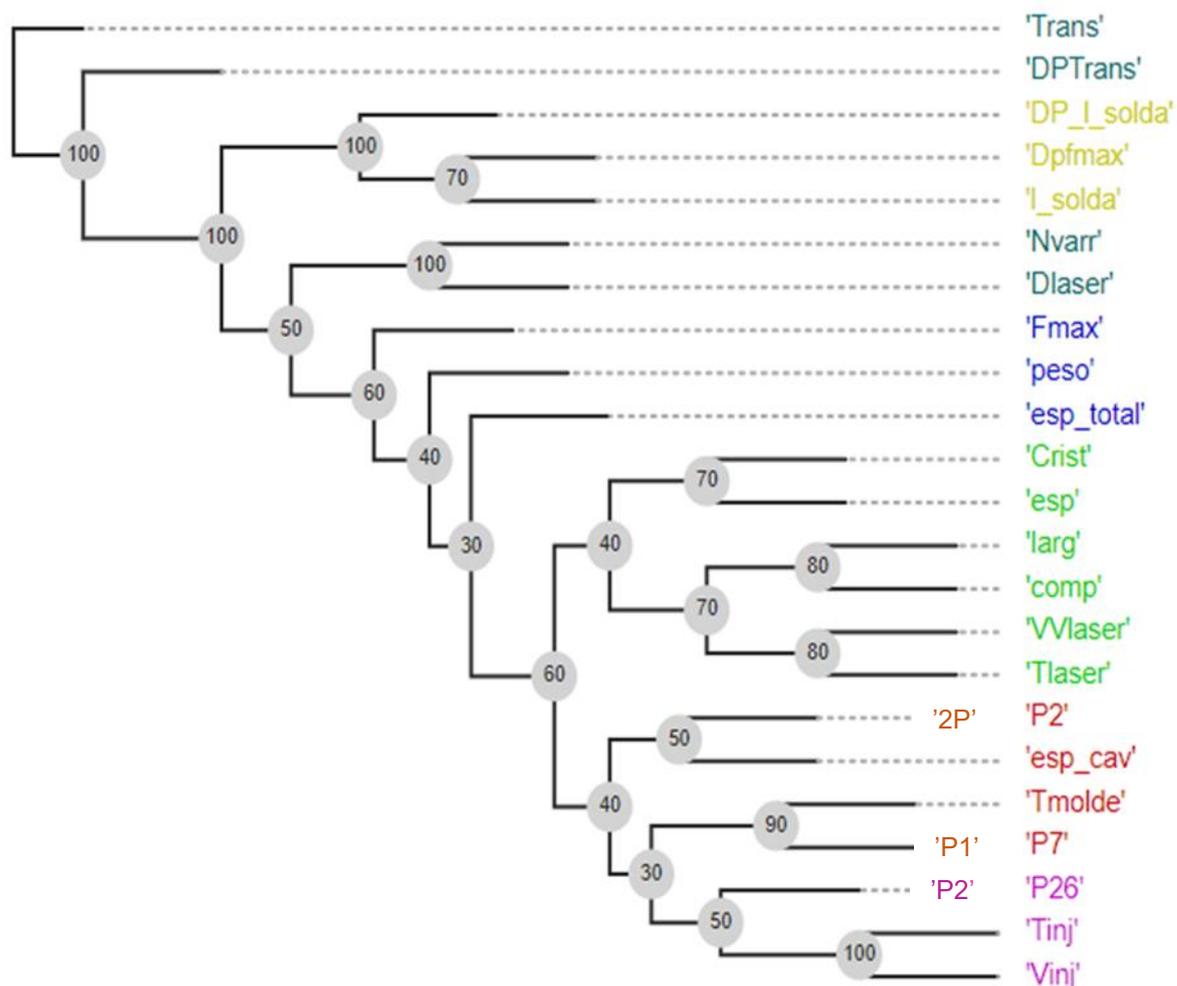


Figura 36: Filograma

O que retiramos dos resultados é que apenas uma parte da Tabela 6 e 7 nos dá os mesmos resultados que usando a tabela completa. As médias obtidas não são as mesmas, porque a quantidade de dados é menor, mas as variáveis que têm mais influência no processo são as mesmas. Na Tabela 21 a disposição dos objetivos não é a mesma, pois não possui tantos valores para a média, no entanto, pode-se analisar que os valores da média são todos próximos, levando a uma conclusão semelhante da Tabela 19.

## 7. Conclusão

Neste trabalho foi realizado um estudo que visa analisar a influência das condições de processamento da moldação por injeção e da soldadura por laser de transmissão nas diferentes propriedades das peças. O material usado foi a poliamida



66 com 30% de fibras de vidro para as peças transparente e 35% de fibras de vidro para as peças opacas.

Pelos resultados obtidos na moldação por injeção, o *software damicore* indica-nos que as variáveis com mais influência na transmissão de luz, com um comprimento de onda de 940 nm, é a 2ª pressão. A espessura da cavidade do molde também aparece como uma grande influência da transmitância, porém esta não é uma variável da injeção.

As peças com menor espessura são as que possuíam melhor transmitância, mas mesmo assim, com valores de transmitância muito baixos (máx 2%). Previa-se que os valores de refração e reflexão fossem bastante elevados e não houvesse soldadura das placas.

As variáveis estudadas no laser foram a velocidade de varrimento do laser, a potência do laser que é dada pela temperatura inserida no programa do laser, o diâmetro do laser e também o número de passagens. Pelos resultados da tração verifica-se que o que tem maior influência no desempenho mecânico é o diâmetro do laser e a espessura que tem de atravessar, pois para o diâmetro de 1mm se aumentar a espessura de 4 para 4,5 verifica-se um aumento significativo da força máxima, na ordem 400KN. Se mantiver a espessura, por exemplo em 4mm, e aumentar o diâmetro para 3mm verifica-se um aumento da força máxima em cerca de 800 KN. Nas restantes variáveis não se verifica tanta distância de valores.

Segundo o *damicore*, das variáveis estudadas as que têm mais influência, apresentando o mesmo valor de média, são o diâmetro do laser, a espessura total do conjunto, tal como se tinha concluído acima, mas também o número de passagens do laser em cada peça.

Assim, após os resultados das duas técnicas e os respetivos ensaios, bem como a análise de dados feita recorrendo ao DAMICORE podemos concluir que para soldar por laser de transmissão tem de se ter em atenção a moldação por injeção, pois estão fortemente ligadas, nomeadamente a transmitância com a força máxima.



## 8. Bibliografia

- [1] L. Gonçalves, F. Duarte, C. Martins, and M. Paiva, "Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality," *Física e tecnologia infravermelha*, vol. 119, Dec. 2021.
- [2] F. Duarte, "Técnicas de União e Acabamento- Soldadura a laser," 2021.
- [3] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*, vol. 41. Cambridge: Woodhead , 2013.
- [4] J. Quintão, "Soldadura laser pulsado Nd:YAG de termoplásticos," Universidade de Aveiro, Aveiro, 2018.
- [5] A. Cunha, A. Pontes, and A. Brito, *Manual do projetista para moldes de injeção de plástico*, vol. 2. 2004.
- [6] Júlio Viana, "Processamento de Polímeros II," Guimarães, 2021.
- [7] molde Matos, "Moldação por Injeção," Moita, 2013.
- [8] A. Gaspar-Cunha, F. Monaco, J. Sikora, and A. Delbem, "Artificial intelligence in single screw polymer extrusion: Learning from computational data," *Engineering Applications of Artificial Intelligence* , vol. 116, pp. 105–397, 2022, doi: doi: 10.1016/j.engappai.2022.105397.
- [9] A. Sanches, J. M. Cardoso, and A. C. Delbem, "Identifying Merge-Beneficial Software Kernels for Hardware Implementation," in *2011 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs* , 2011, pp. 74–79. doi: doi: 10.1109/ReConFig.2011.51.
- [10] A. Soares, R. Râbelo, and A. Delbem, "Optimization based on phylogram analysis," . *Expert Systems with Applications* , vol. 78, pp. 32–50, 2017, doi: doi:10.1016/j.eswa.2017.02.012.
- [11] J.P. Martins, C.M. Fonseca, and A.C.B. Delbem, "On the performance of linkage-tree genetic algorithms for the multidimensional knapsack problem," *Neurocomputing*, vol. 146, pp. 17–29, 2014, doi: doi:10.1016/j.neucom.2014.04.069.



- [12] V. Ferreira, “Soldadura por laser de placas de polipropileno produzidas por moldação por injeção,” Universidade do Minho, Guimarães, 2013.
- [13] X. Xu, P. Bates, and G. Zak, “Effect of glass fiber and crystallinity on light transmission during laser transmission welding of thermoplastics,” *Opt Laser Technol*, vol. 69, pp. 133–139, Jan. 2015.
- [14] B. Acherjee, “Laser transmission welding of polymers – A review on process fundamentals, material attributes, weldability, and welding techniques,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 60, pp. 227–246, 2020.
- [15] Mold Plastic Injection, “Nylon PA6 Vs PA66 – Qual é a diferença entre a moldagem por injeção de nylon 6 e 66.” Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.moldplasticinjection.com/news/nylon-pa6-vs-pa66-what-is-the-difference-between-nylon-6-and-66-injection-molding>
- [16] G. Domingo, “Influência de múltiplos reprocessamentos nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas da blenda poliamida 66/ poliamida 6 contendo talco,” Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2016.
- [17] C. Bernal, A. Couto, S. Breviglieri, and E. Cavalheiro, “Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC,” São Carlos, pp. 849–855, Jan. 03, 2002.
- [18] I. Henriques, “Caracterização térmica de soro de leite caprino e bovino através de calorimetria diferencial de varrimento (DSC) e análises termogravimétricas (TGA) E,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2018.
- [19] P. Teixeira, G. Donagemma, A. Fontana, and W. Teixeira, “Matéria Orgânica,” *Manual de Métodos de Análise de Solo*, Brasília, pp. 397–400, 2017.



- [20] construígil, “Tranmitância.” Accessed: Apr. 15, 2023. [Online]. Available:  
<https://www.construagil.eu/post/transmit%C3%A2ncia>
- [21] SPLABOR, “o que é um espectrofotómetro- informações importantes,” Vila Formosa, Jun. 2018. Accessed: Apr. 15, 2023. [Online]. Available:  
<https://www.splabor.com.br/blog/espectrofotometro-2/o-que-e-um-espectrofotometro-e-para-que-ele-e-usado/>
- [22] mettler toledo, “Thermal Analysis- polymer DSC,” Columbus, Jan. 2008.



## 9. Anexos

Anexo 1: Ficha técnica do PA 66 transparente

### Celanese Zytel® 70G35HSL NC010 PA66-GF35

Categories: [Polymer; Thermoplastic; Nylon \(Polyamide PA\); Nylon 66 \(PA66\); Nylon 66\\_40% Glass Fiber Filled](#)

Material Notes: 35% Glass Reinforced, Heat Stabilized, Polyamide 66  
Former DuPont product acquired by Celanese in 2022.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

[Printer friendly version](#) [Download as PDF](#) [Download to Excel \(requires Excel and Windows\)](#)  
[Export data to your CAD/FEA program](#)

Add to Folder:  My Folder 0/0

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.41 g/cc	0.0509 lb/in <sup>3</sup>	DAM, ISO 1183
Melt Density	1.24 g/cc @Temperature 295 °C	0.0448 lb/in <sup>3</sup> @Temperature 563 °F	
Water Absorption	1.1 % @Time 06400 sec	1.1 % @Time 24.0 hour	Immersion; DAM; Sim. to ISO 62
	5.5 % @Thickness 2.00 mm	5.5 % @Thickness 0.0787 in	DAM; Sim. to ISO 62
Moisture Absorption	1.70 % @Thickness 2.00 mm	1.70 % @Thickness 0.0787 in	DAM; Sim. to ISO 62
Viscosity Number	145 cm <sup>2</sup> /g	1.45 dl/g	sulfuric acid 96%; ISO 307, 1157, 1628
Linear Mold Shrinkage, Flow	0.0030 cm/cm	0.0030 in/in	DAM, ISO 294-4, 2577
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.011 cm/cm	0.011 in/in	DAM, ISO 294-4, 2577

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell M	89	89	50% RH; ISO 2039-2
	105	105	DAM; ISO 2039-2
Hardness, Rockwell R	117	117	50% RH; ISO 2039-2
	125	125	DAM; ISO 2039-2
Ball Indentation Hardness	285 MPa	41300 psi	H 961/30; DAM; ISO 2039-1
Tensile Strength at Break	140 MPa	20300 psi	50% RH; ISO 527-1/-2
	210 MPa	30500 psi	DAM; ISO 527-1/-2
Elongation at Break	3.2 %	3.2 %	DAM; ISO 527-1/-2
	4.6 %	4.6 %	50% RH; ISO 527-1/-2
Tensile Modulus	8.50 GPa	1230 ksi	50% RH; ISO 527-1/-2
	11.0 GPa	1600 ksi	DAM; ISO 527-1/-2
Flexural Strength	230 MPa	33400 psi	50% RH; ISO 178
	300 MPa	43500 psi	DAM; ISO 178
Flexural Modulus	7.50 GPa	1090 ksi	50% RH; ISO 178
	9.50 GPa	1380 ksi	DAM; ISO 178
Poissons Ratio	0.34	0.34	50% RH
	0.34	0.34	DAM
Izod Impact, Notched (ISO)	10.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature -40.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -40.0 °F	DAM; ISO 180/1A
	10.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	50% RH; ISO 180/1A
	10.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 180/1A
	12.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	5.71 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 180/1A
	15.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	7.14 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	50% RH; ISO 180/1A
Izod Impact, Unnotched (ISO)	60.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	28.6 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 180/1L
	60.0 kJ/m <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	28.6 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 180/1L
Charpy Impact Unnotched	8.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	38.1 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	50% RH; ISO 179/1eL
	8.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	38.1 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 179/1eL
	9.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	42.8 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 179/1eL
	10.0 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	47.6 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	50% RH; ISO 179/1eL
Charpy Impact, Notched	1.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	50% RH; ISO 179/1eA
	1.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 179/1eA
	1.50 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	7.14 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 179/1eA
	1.80 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	8.57 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	50% RH; ISO 179/1eA
Puncture Energy	6.00 J @Temperature 23.0 °C	4.43 ft-lb @Temperature 73.4 °F	DAM, ISO 6603-2
Tensile Creep Modulus, 1 hour	8400 MPa	1.22e+6 psi	1h; 50% RH; ISO 899-1
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	6000 MPa	870000 psi	1000h; 50% RH; ISO 899-1



Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	1.00e+11 ohm-cm >= 1.00e+15 ohm-cm	1.00e+11 ohm-cm >= 1.00e+15 ohm-cm	50% RH; IEC 62631-3-1 DAM; IEC 62631-3-1
Surface Resistance	1.00e+13 ohm	1.00e+13 ohm	50% RH; IEC 62631-3-2
Dielectric Strength	31.0 kV/mm 36.0 kV/mm	787 kV/in 914 kV/in	50% RH; IEC 60243-1 DAM; IEC 60243-1
Comparative Tracking Index	400 V	400 V	DAM; IEC 60112
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear, Parallel to Flow	17.0 µm/m-°C	9.44 µin/in-°F	DAM; ISO 11359-1/-2
CTE, linear, Transverse to Flow	85.0 µm/m-°C	47.2 µin/in-°F	DAM; ISO 11359-1/-2
Specific Heat Capacity	2.13 J/g-°C @Temperature 295 °C	0.509 BTU/lb-°F @Temperature 563 °F	Melt
Thermal Conductivity	0.240 W/m-K @Temperature 295 °C	1.67 BTU-in/hr-ft²-°F @Temperature 563 °F	Melt
Melting Point	262 °C	504 °F	10°C/min; DAM; ISO 11357-1/-3
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	261 °C	502 °F	DAM; ISO 75-1/-2
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	252 °C	486 °F	DAM; ISO 75-1/-2
Vicat Softening Point	255 °C	491 °F	50°C/h, 50N; DAM; ISO 306
Glass Transition Temp, Tg	20.0 °C 70.0 °C	68.0 °F 158 °F	10°C/min; 50% RH; ISO 11357-1/-2 10°C/min; DAM; ISO 11357-1/-2
Flammability, UL94	HB @Thickness 0.710 mm	HB @Thickness 0.0200 in	DAM; IEC 60695-11-10
Flame Spread	HB @Thickness 1.50 mm	HB @Thickness 0.0591 in	DAM; IEC 60695-11-10
Oxygen Index	24 %	24 %	ISO 3795 (FMVSS 302) DAM; ISO 4589-1/-2
Processing Properties	Metric	English	Comments
Melt Temperature	295 °C 285 - 305 °C	563 °F 545 - 581 °F	Optimum, Injection Range, Injection
Mold Temperature	70.0 - 120 °C 100 °C	158 - 248 °F 212 °F	Injection Optimum, Injection
Ejection Temperature	210 °C	410 °F	Injection
Drying Temperature	80.0 °C	176 °F	Injection
Dry Time	2.00 - 4.00 hour	2.00 - 4.00 hour	Injection, Dehumidified Dryer
Moisture Content	<= 0.20 %	<= 0.20 %	Injection
Hold Pressure	50.0 - 100 MPa	7250 - 14500 psi	Range, Injection
Descriptive Properties			
Additives		Release agent	
Drying Recommended		yes	Injection
Eff. thermal diffusivity (m²/s)		9.5E-08	
FMVSS Class		B	ISO 3795 (FMVSS 302)
Fogging (mg)		0.5	G-value (condensate); ISO 6452; DAM
ISO designation	ISO 16396-PA66,GF35,M1GHNR,S14-110		
Max. screw tangential speed (m/s)		0.2	Injection
Odor Class		3	VDA 270
Part Marking Code		>PA66-GF35<	ISO 11469
Polymer		PA66-GF35	
Processing Hold Pressure Time (s/mm)		3	Injection
Resin Identification		PA66-GF35	ISO 1043



Anexo 2: Ficha técnica do PA66 opaco

**Celanese Zytel® 70G25EF BK538LM PA66-GF25**

Categories: [Polymer, Thermoplastic: Nylon \(Polyamide PA\)](#), [Nylon 66 \(PA66\)](#), [Nylon 66, 30% Glass Fiber Filled](#)

Material Notes: 25% Glass Reinforced, Heat Stabilized, Laser Markable, Polyamide 66  
Former DuPont product acquired by Celanese in 2022.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

- [Printer friendly version](#)
- [Download as PDF](#)
- [Download to Excel \(requires Excel and Windows\)](#)
- [Export data to your CAD/FEA program](#)

Add to Folder:  My Folder 0/0

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.32 g/cc	0.0477 lb/in <sup>3</sup>	DAM; ISO 1183
Water Absorption	6.40 % @Thickness 2.00 mm	6.40 % @Thickness 0.0787 in	DAM; Sim. to ISO 62
Moisture Absorption	2.00 % @Thickness 2.00 mm	2.00 % @Thickness 0.0787 in	DAM; Sim. to ISO 62
Viscosity	144000 cP @Shear Rate 1000 1/s, Temperature 280 °C	144000 cP @Shear Rate 1000 1/s, Temperature 536 °F	Melt; ISO 11443
Linear Mold Shrinkage, Flow	0.00300 cm/cm	0.00300 in/in	DAM; ISO 294-4, 2577
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.0110 cm/cm	0.0110 in/in	DAM; ISO 294-4, 2577

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Elongation at Break	3.00 %	3.00 %	DAM; ISO 527-1/-2
	5.00 %	5.00 %	50%RH; ISO 527-1/-2
	110 %	110 %	50%RH; ISO 527-1/-2
	165 %	165 %	DAM; ISO 527-1/-2
Tensile Modulus	6.00 GPa	870 ksi	50%RH; ISO 527-1/-2
	8.40 GPa	1220 ksi	DAM; ISO 527-1/-2
Flexural Modulus	5.00 GPa	725 ksi	DS; 50%RH; ISO 178
	7.00 GPa	1020 ksi	DS; DAM; ISO 178
Poissons Ratio	0.340	0.340	DAM
	0.350	0.350	50%RH
Charpy Impact Unnotched	5.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	23.8 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 179/1eU
	5.50 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	26.2 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 179/1eU
	7.50 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	35.7 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	50%RH; ISO 179/1eU
Charpy Impact, Notched	0.700 J/cm <sup>2</sup> @Temperature -30.0 °C	3.33 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature -22.0 °F	DAM; ISO 179/1eA
	0.800 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	3.81 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	DAM; ISO 179/1eA
	1.00 J/cm <sup>2</sup> @Temperature 23.0 °C	4.76 ft-lb/in <sup>2</sup> @Temperature 73.4 °F	50%RH; ISO 179/1eA

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	1.00e+11 ohm-cm	1.00e+11 ohm-cm	DS; 50%RH; IEC 62631-3-1
	>= 1.00e+13 ohm-cm	>= 1.00e+13 ohm-cm	DS; DAM; IEC 62631-3-1
Comparative Tracking Index	525 V	525 V	DAM; IEC 60112

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear, Parallel to Flow	30.0 µm/m-°C	16.7 µin/in-°F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
	19.0 µm/m-°C @Temperature 55.0 - 160 °C	10.6 µin/in-°F @Temperature 131 - 320 °F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
	28.0 µm/m-°C @Temperature -40.0 - 23.0 °C	15.6 µin/in-°F @Temperature -40.0 - 73.4 °F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
CTE, linear, Transverse to Flow	90.0 µm/m-°C	50.0 µin/in-°F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
	73.0 µm/m-°C @Temperature -40.0 - 23.0 °C	40.6 µin/in-°F @Temperature -40.0 - 73.4 °F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
	146 µm/m-°C @Temperature 55.0 - 160 °C	81.1 µin/in-°F @Temperature 131 - 320 °F	DS; DAM; ISO 11359-1/-2
Melting Point	260 °C	500 °F	10°C/min; DAM; ISO 11357-1/-3
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	238 °C	460 °F	DAM; ISO 75-1/-2
Glass Transition Temp, Tg	25.0 °C	77.0 °F	10°C/min; 50%RH; ISO 11357-1/-3
	80.0 °C	176 °F	10°C/min; DAM; ISO 11357-1/-3
Flammability, UL94	HB	HB	DS; DAM; IEC 60695-11-10
	@Thickness 1.50 mm	@Thickness 0.0591 in	
Flame Spread	17.0 mm/min @Thickness 1.00 mm	0.669 in/min @Thickness 0.0394 in	ISO 3795 (FMVSS 302)

Processing Properties	Metric	English	Comments
Melt Temperature	295 °C	563 °F	Optimum
	285 - 305 °C	545 - 581 °F	
Mold Temperature	70.0 - 120 °C	158 - 248 °F	
	100 °C	212 °F	Optimum
Ejection Temperature	210 °C	410 °F	
Dry Time	2.00 - 4.00 hour	2.00 - 4.00 hour	Dehumidified Dryer
Moisture Content	<= 0.200 %	<= 0.200 %	
Hold Pressure	50.0 - 100 MPa	7250 - 14500 psi	



Descriptive Properties	
Additives	Low halide content
Drying Recommended?	Release agent
FMVSS Class	yes
Hold pressure time	B
Part Marking Code	3 s/mm
Polymer	>PA66-GF25<
Resin Identification	PA66-GF25
Screw tangential speed	<0.2 m/s
	ISO 3795 (FMVSS 302)
	ISO 11469

Anexo 3: peça transparente e peça opaca



Anexo 4: a) exsicator; b) mufla

a)



b)





Anexo 5: a) microscópio de transmissão; b) microscópio de reflexão; c) polidor de amostras

a)



b)



c)



Anexo 6: Recomendações para preparação da resina

**MOUNTING**

## RESIN MECAPREX MA2+

**DIRECTIONS FOR USE**

- Add in graduated cup and mix 50 g of resin ( $d = 1.13$ ) to 5 g of hardener weight ( $d = 0.95$ ) or 50 ml of resin to 6 ml of hardener.
- Agitate slowly to homogenize.
- Hardening time is 12 hours at room temperature.

⇒ Resin and hardener are to be kept in a cool place and away from light.

---

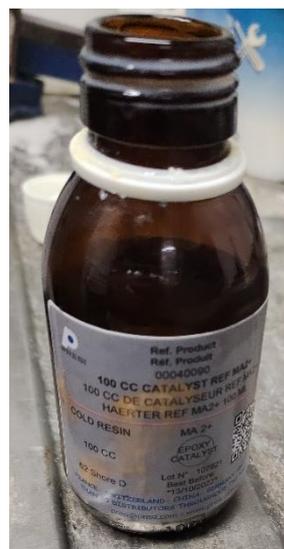
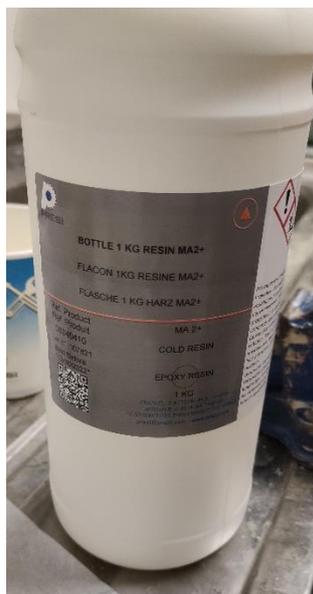
## RESINE MECAPREX MA2+

**MODE D'EMPLOI**

- Ajouter et mélanger dans un godet 50 g de résine ( $d = 1.13$ ) à 5 g en poids de durcisseur ( $d = 0.95$ ) ou 50 ml de résine à 6 ml de durcisseur.
- Agiter doucement pour homogénéiser.
- Le temps de durcissement est de 12 heures à température ambiante.



*Anexo 7: resina e endurecedor*



*Anexo 8: polimento da peça*

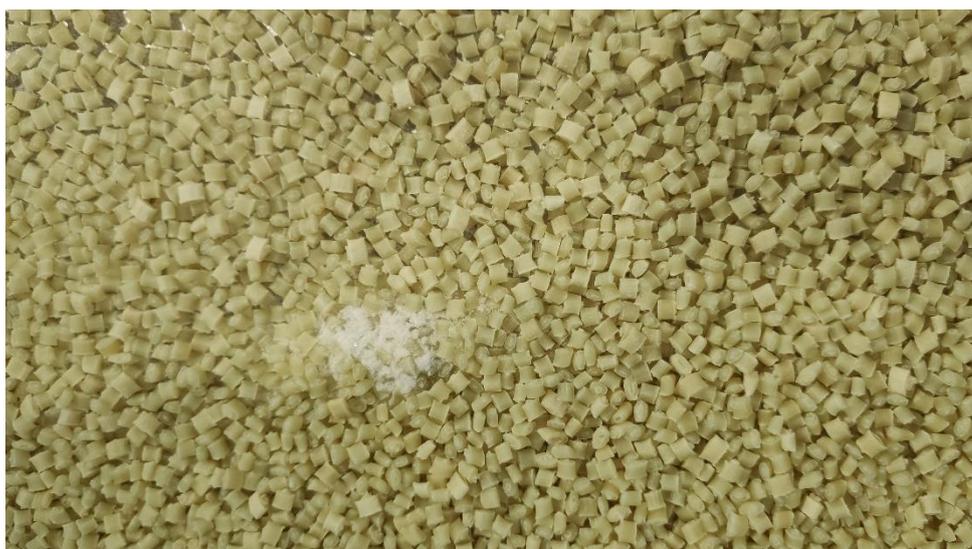


*Anexo 9: medidas das fibras*



Measurement	Line Length (µm)		
1	232,684	30	222,136
2	381,091	31	251,024
3	239,488	32	193,137
4	236,876	33	99,48
5	261,427	34	397,317
6	71,019	35	64,568
7	125,594	36	263,146
8	402,189	37	371,943
9	168,615	38	150,859
10	171,07	39	506,075
11	270,194	40	149,036
12	459,65	41	356,481
13	229,252	42	392,14
14	76,129	43	298,645
15	282,776	44	230,115
16	366,93	45	232,802
17	293,218	46	210,444
18	326,877	47	190,321
19	635,949	48	320,202
20	183,595	49	405,169
21	258,403	50	298,187
22	233,036	51	201,146
23	479,915	52	223,821
24	151,763	53	429,01
25	280,982	media	239,488
26	228,655		
27	132,531		
28	237,136		
29	249,358		

Anexo 10: fibras de vidro acumuladas entre o material



Anexo 11: suporte para amostras no espectrofotômetro

