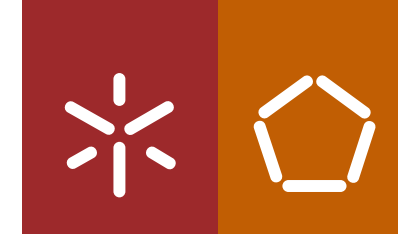




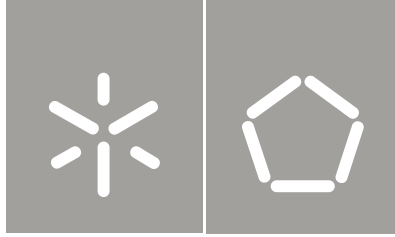
Válter Carvalho Pinto Ferreira

Soldadura por laser de placas de polipropileno produzidas por moldação por injeção

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Válter Carvalho Pinto Ferreira

Soldadura por laser de placas de polipropileno  
produzidas por moldação por injeção

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Fernando Moura Duarte  
Engenheiro Nelson Duarte Mendes Oliveira



## **AGRADECIMENTOS**

Esta tese de mestrado não seria possível sem o apoio de algumas pessoas, às quais quero agradecer a ajuda prestada.

Ao meu pai Alberto Ferreira e à minha mãe Cândida Carvalho por todo o encorajamento e apoio dado ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus avós por todo o auxílio e alento dado ao longo de todo o meu percurso académico.

À Alexandra Prata pelo apoio e motivação nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Fernando Moura Duarte, pela disponibilidade e apoio dado ao longo desta tese.

Ao Engenheiro Nelson Duarte Mendes Oliveira pela disponibilidade, apoio, e conhecimentos técnicos fornecidos ao longo da minha tese.

Por último aos técnicos do departamento de Engenharia de Polímeros por todo o apoio na fase experimental.

A todos os meus sinceros agradecimentos.





## RESUMO

A soldadura a laser subdivide-se em duas técnicas, soldadura directa e soldadura por transmissão. Sendo a última a mais utilizada na soldadura a laser. A técnica baseia-se no princípio que uma das peças do conjunto é transparente à radiação emitida pelo laser e a outra absorve o feixe do laser emitido na interface.

A qualidade final de soldadura para além de ser influenciada pelas variáveis de soldadura pode ser influenciada pela fase da moldação das peças e consequentemente afetar o desempenho mecânico das peças soldadas.

O trabalho apresentado neste documento teve como principal objetivo estudar a influência das variáveis operatórias da moldação por injeção e do laser no desempenho mecânico de peças unidas por esta técnica.

De modo a atingir o objetivo foi utilizada a seguinte metodologia, primeiramente foi elaborado um plano de experiências com as várias variáveis relevantes para o estudo. Seguidamente foram produzidas as peças por moldação por injeção seguindo esse plano. Finalmente foi realizada a soldadura a laser sendo posteriormente as peças submetidas a ensaios de tração.

Para analisar a influência das variáveis, presentes no plano de trabalhos, no desempenho mecânico das peças foi utilizada a metodologia de tratamento de dados do DOE (*design of experiments*) onde os valores obtidos nos testes de tração foram utilizados como respostas.

Após a realização deste estudo concluiu-se que a soldadura a laser é bastante influenciada pelas variáveis operatórias da moldação por injeção e também pelas variáveis operatórias do laser.

As melhores propriedades mecânicas da soldadura foram obtidas utilizando uma espessura de 3mm, temperatura do molde de 25°C, temperatura de injeção de 220°C, concentração do agente de nucleação de 0.15%, velocidade de injeção de 50mm/s e tempo de arrefecimento de 15s.





## **ABSTRACT**

The laser welding can be divided in two processes. In this case, it is possible weld by transmission or directly. The first technique is the most widely used technique. The transmission process is based on a main basic principle. In this case, one of the components must be transparent to the laser beam. The other component must have the capability of absorbing the laser beam energy.

The injection process needed to be also considered. Since the process has the capability of influence, the final optical properties of the different plastics that will be part of the join. This influence can increase or diminish the mechanical resistance of the seam.

This research project had the objective of study the injection and laser welding variables. In this case, determine the variable that has more influence in obtain a good seam.

To achieve the main objective, it was used the Taguchi methodology. Firstly, was made the design of experiments with the main variables of the two processes. Following was produced the specimens through the injection process. Then each group of specimens was laser welded and then where mechanical tested.

To verified the influence that each variable has on the final quality of the seam. It was used the design of experiments methodology. This methodology used the results obtained in the mechanical tests to determine the variables with more influence.

The tests showed that the seam quality is influenced by the two processes. It was possible seen influence from the injection process and laser welding in the final results.

The seam with the higher resistance was produced with the following injections conditions. In this case a mold temperature of 25°C, an injection temperature of 220°C an injection velocity of 50 mm/s and a cooling time of 15s. The study showed that other variables can also influence the seam quality. The results showed that the nucleation agent with a percentage of 0.15 can also influence the final quality. The specimens with the higher thickness also showed the higher seam resistance.







## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Enquadramento .....	16
1.2. Motivação/Objetivos.....	21
1.3. Organização da tese.....	22
2. ESTADO DA ARTE .....	23
2.1. Influência das variáveis operatórias do laser na resistência mecânica da união das peças ..	24
2.1.1. Potência do laser .....	24
2.1.2. Velocidade do feixe de laser .....	26
2.2. Materiais.....	27
2.2.1. Interação da luz com os polímeros .....	29
3. MATERIAIS e MÉTODOS.....	31
3.1. Materiais.....	32
3.2. Procedimento experimental .....	32
3.2.1. Planos de experiências.....	32
3.2.2. Injeção.....	37
3.2.3. Preparação de amostras.....	41
3.2.4. Soldadura a laser .....	43
3.2.5. Ensaio de tração .....	45
3.2.6. Near-infrared spectroscopy (NIR).....	46
3.2.7. Filtros.....	47
3.3. Design Of Experiments (DOE) .....	48
4. APRESENTAÇÃO/DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	49
4.1. NIR Transmitância.....	50
4.2. NIR Refletância difusa .....	55
4.3. NIR Refletância especular .....	61



4.4.	Passagem do laser usando os provetes como filtros.....	67
4.5.	Tração 1 .....	71
4.5.1.	Força máxima.....	71
4.5.2.	Deslocamento máximo.....	73
4.6.	Tração 2 .....	78
4.6.1.	Força máxima.....	78
4.6.2.	Deslocamento máximo.....	80
5.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	87
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
	BIBLIOGRAFIA .....	91
	ANEXOS .....	93
	Anexo 1 – Dados dos ensaios de NIR transmitância .....	93
	Anexo 2 – Dados dos ensaios de NIR refletância difusa .....	95
	Anexo 3 – Dados dos ensaios de NIR refletância especular.....	97
	Anexo 4 – Gráficos NIR Transmitância .....	99
	Anexo 5 – Gráficos NIR Refletância Difusa.....	101
	Anexo 6 – Gráficos NIR Refletância Especular .....	103
	Anexo 7 – Gráficos Tração 1 .....	105
	Anexo 8 – Gráficos Tração 2 .....	107
	Anexo 9 – Imagens Soldadura 1 .....	109
	Anexo 10 – Imagens Soldadura 2 .....	111



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldadura directa [1] .....	16
Figura 2 - Processo de soldadura por transmissão [3] .....	17
Figura 3 - Soldadura hibrida [4]. .....	18
Figura 4 - “Globo welding” [3].....	18
Figura 5 - Tarefas realizadas para atingir os objetivos da tese .....	22
Figura 6 - Influência da potência e da velocidade do laser na temperatura atingida pelo material [6].	24
Figura 7 - Influência da potência do laser para diferentes velocidades na resistência da união [8] .....	25
Figura 8 - Influência da potência do laser na resistência da união para várias distâncias entre o laser e a junta [8]. .....	26
Figura 9 - Testes mecânicos para duas as diferentes morfologias de PEEK estudadas (A-amorfo, B-semi-cristalino) [5] .....	27
Figura 10 - Quantidade de energia absorvida para diferentes concentrações negro de carbono [10]... 28	
Figura 11 - Comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um policarbonato com 2 mm de espessura aditivado com Lumogen® e com Clearweld® [9] .....	28
Figura 12 - Quantidade energia transmitida por um policarbonato com 0.5 mm de espessura nos diferentes comprimentos de onda do laser [1].....	29
Figura 13 - Injetora Ferromatik-Milacron K85 .....	37
Figura 14 - Esquema da placa injetada .....	37
Figura 15 - Discos injetados para o estudo (a) com 3mm de espessura e (b) com 1.5mm de espessura .....	39
Figura 16- Zona de corte dos provetes .....	41
Figura 17 - Zona de corte do provete.....	42
Figura 18 - Zona de corte da amostra para o ensaio de NIR.....	42
Figura 19 - Unidade produtora de laser e o sistema que controla a saída de potência (LM100 100W aircooled $\lambda=938\text{nm}$ fiberdia.400 $\mu\text{m}$ ) .....	43
Figura 20 - Esquema da cabeça do laser.....	43
Figura 21 - Robot Motoman HP20 [11] e Robot Motoman SIA20 [12] respetivamente .....	44
Figura 22 - Peça soldada .....	44
Figura 23 - Diagrama tensão deformação (a) material frágil e (b) dúctil. [13].....	45
Figura 24 - Shimadzu Precision Universal Tester (shimadzu autograph ag-x 50 kn). [14].....	46
Figura 25 - Equipamento de NIR (shimadzu UV-3101PC) .....	46
Figura 26 - Esquema utilizado para a realização desta experiência .....	47
Figura 27 - Valores da média da transmitância obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	51
Figura 28 - Efeito da espessura no valor da transmitância e os valores médios de transmitancia para as duas espessuras estudadas.....	52
Figura 29 - Efeito da temperatura do molde na transmitância e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas .....	53



Figura 30 - Efeito do tempo de arrefecimento na transmitância e os valores médios obtidos para as dois tempos de arrefecimento estudados.....	53
Figura 31 - Efeito do agente de nucleação na transmitância do e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas .....	54
Figura 32 - Efeito da velocidade de injeção na transmitância e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas .....	55
Figura 33 - Efeito da temperatura de injeção na transmitância e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas.....	55
Figura 34 - Valores da média da refletância difusa obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	57
Figura 35 - Efeito da espessura na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas .....	58
Figura 36 - Efeito da temperatura do molde na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde obtidas. ....	59
Figura 37 - Efeito do tempo de arrefecimento na refletância difusa e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados .....	59
Figura 38 - Efeito da velocidade de injeção na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas.....	60
Figura 39 - Efeito do agente de nucleação na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas.....	60
Figura 40 - Efeito da temperatura de injeção na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas.....	61
Figura 41 - Valores da média da refletância especular obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	62
Figura 42 - Efeito da espessura na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas .....	64
Figura 43 - Efeito do tempo de arrefecimento na refletância especular e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados.....	64
Figura 44 - Efeito da velocidade de injeção na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas.....	65
Figura 45 - Efeito do agente de nucleação na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas.....	65
Figura 46 - Efeito da temperatura do molde na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas .....	66
Figura 47 - Efeito da temperatura de injeção na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas .....	66
Figura 48 - Sem filtro, laser directamente na peça absorvente .....	67
Figura 49 - Filtro experiência 1.....	68
Figura 50 - Filtro experiência 2.....	68
Figura 51 - Filtro experiência 3.....	69

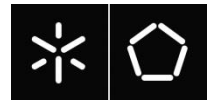


Figura 52 - Filtro experiência 4.....	69
Figura 53 - Filtro experiência 5.....	70
Figura 54 - Filtro experiência 6.....	70
Figura 55 - Filtro experiência 7.....	70
Figura 56 - Filtro experiência 8.....	71
Figura 57 - Valores da média da força máxima atingida em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	73
Figura 58 - Valores da média do deslocamento máximo obtido em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	74
Figura 59 - Efeito do material na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois materiais estudados.....	75
Figura 60 - Efeito da temperatura do molde na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas .....	76
Figura 61 - Efeito do tempo de arrefecimento na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimentos estudados.....	76
Figura 62 - Efeito da potência do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas potências do laser estudadas .....	77
Figura 63 - Efeito velocidade do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas velocidades do laser estudadas .....	78
Figura 64 - Efeito do diâmetro do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois diâmetros do laser estudados.....	78
Figura 65 - Valores da média da força máxima atingida em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	80
Figura 66 - Valores da média do deslocamento máximo obtido em cada experiência e respectivos desvios padrão .....	82
Figura 67 - Efeito da espessura na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas.....	83
Figura 68 - Efeito do tempo de arrefecimento na na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados .....	84
Figura 69 - Efeito da velocidade de injeção na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas.....	84
Figura 70 - Efeito do agente de nucleação na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente estudadas.....	85
Figura 71 - Efeito da temperatura do molde na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas .....	86
Figura 72 - Efeito da temperatura de injeção na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas de injeção estudadas.....	86



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação das variáveis e valores máximos e mínimos.....	33
Tabela 2 - Plano de experiências.....	33
Tabela 3 - Apresentação das variáveis e valores máximos e mínimos.....	35
Tabela 4 - Plano de experiências.....	35
Tabela 5 - Plano de experiência para potência do laser.....	36
Tabela 6 - Parâmetros de injeção utilizado na injeção das placas.....	38
Tabela 7 - Perfil de temperaturas da injeção.....	38
Tabela 8 - Parâmetros de injeção dos discos com espessura de 1.5 mm.....	39
Tabela 9 - Parâmetros de injeção dos discos com espessura de 3 mm.....	40
Tabela 10 - Perfis de temperaturas de injeção.....	40
Tabela 11 - Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Transmitância.....	50
Tabela 12 - Variáveis em estudo e valores máximos e mínimos.....	51
Tabela 13 - Plano de experiências com a resposta obtida nos ensaios de NIR Transmitância e o efeito das variáveis na resposta.....	52
Tabela 14- Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Refletância difusa.....	56
Tabela 15 - Variáveis estudadas e valores máximos e mínimos.....	57
Tabela 16 - Plano de experiências, respostas obtidas no ensaio de NIR Refletância difusa e os efeitos das variáveis na resposta.....	58
Tabela 17 - Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Refletância especular.....	61
Tabela 18 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos.....	63
Tabela 19 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de NIR Refletância especular e os efeitos das variáveis na resposta.....	63
Tabela 20 - Força máxima atingida no ensaio de tração.....	72
Tabela 21 - Valores registados de deslocamento máximo dos provetes estudados, média e desvio padrão.....	73
Tabela 22 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos.....	74
Tabela 23 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de tração (Força máxima) e o efeito das variáveis na resposta.....	75
Tabela 24 - Força máxima atingida no ensaio de tração.....	79
Tabela 25 - Valores registados de deslocamento máximo dos provetes estudados, média e desvio padrão.....	81
Tabela 26 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos.....	82
Tabela 27 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de tração (Força máxima) e o efeito das variáveis na resposta.....	83



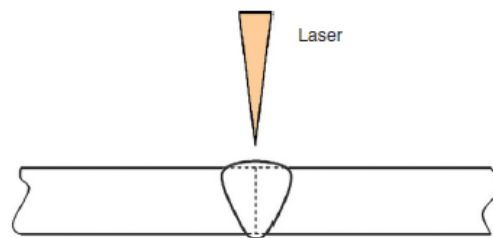
## **1. INTRODUÇÃO**





## 1.1. Enquadramento

A tecnologia de soldadura por laser foi implementada em meados de 1970, mas só cerca de 20 anos mais tarde começou a ser utilizada na produção em serie. Devido às suas excelentes características, nomeadamente o reduzido tempo de processo, a fácil automatização e a forma de aquecimento, que, ao ocorrer sem contacto físico com as peças, minimiza as contaminações da interface de união. Começou a ser utilizada num vasto ramo de indústrias em que se destacam a indústria automóvel, médica e embalagens. A soldadura a laser subdivide-se em duas variantes, soldadura directa e por transmissão. A soldadura directa ilustrada na Figura 1 é aplicada principalmente em filmes plásticos, podendo ser aplicada noutras peças. O laser usualmente utilizado neste tipo de técnica é o laser de CO<sub>2</sub> (comprimento de onda 10600 nm). Este comprimento de onda é absorvido por todos os tipos de polímeros, podendo também ser utilizados outros tipos de laser embora implique a utilização de aditivos que aumentem o coeficiente de absorção dos polímeros [1].



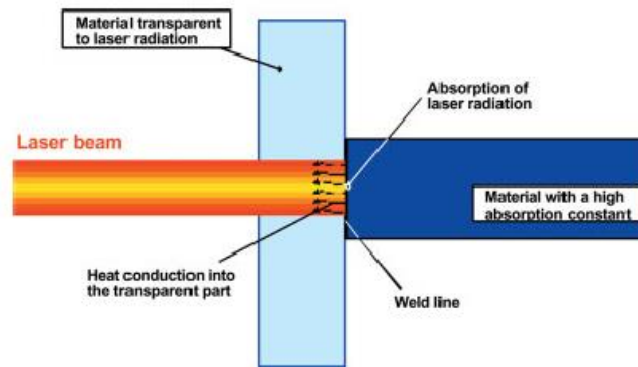
**Figura 1 - Processo de soldadura directa [1]**

A soldadura por transmissão, ilustrada na Figura 2, é o processo mais utilizado na soldadura a laser. É baseada no princípio em que uma das partes do conjunto é transparente à radiação do laser e a outra absorve o feixe de laser emitido. [2]

Devido a esta exigência do processo a fase de moldação dos componentes e a morfologia do material utilizado têm uma grande influência no processo de soldadura. Como a maior parte dos polímeros é transparente à radiação do laser [1] é necessário utilizar aditivos que permitam que o componente inferior do conjunto absorva essa radiação. No caso dos materiais simi-cristalinos as esferulites presentes na sua morfologia fazem com que o feixe de laser quando entra em contacto com a



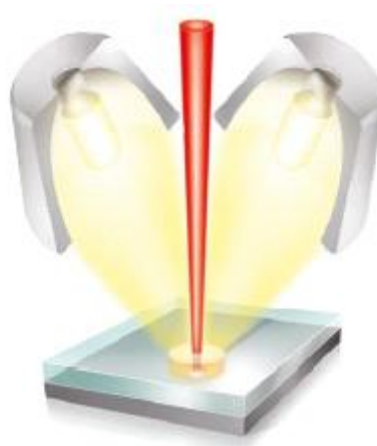
superfície do material seja parcialmente refletida diminuindo deste modo a radiação que é transmitida por este para o componente inferior.



**Figura 2 - Processo de soldadura por transmissão [3]**

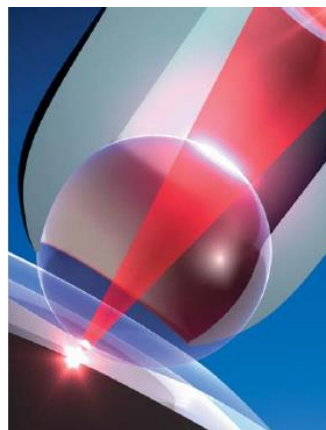
O processo é iniciado quando um feixe de laser incide sobre a parte superior do conjunto e é transmitido para a peça inferior que absorve essa radiação. A radiação absorvida é transformada em calor sendo posteriormente transmitido para a peça superior por condução provocando a fusão do material e posteriormente a união dos componentes. Para que haja condução de calor entre as duas partes do conjunto é necessário assegurar um perfeito contacto entre ambas durante todo o processo de soldadura, sendo por essa razão utilizados sistemas de fixação. As quatro condições fundamentais para que a soldadura ocorra e para que haja uma boa adesão entre as peças são: i) a peça superior do conjunto ser transparente à radiação emitida pelo feixe do laser; ii) peça inferior absorva a radiação; iii) existir compatibilidade entre os materiais utilizados; iv) existir um perfeito contacto entre as peças.

Existem vários métodos de soldadura a laser por transmissão, tais como soldadura por contorno, simultânea, quase simultânea, com máscara, “*Globo welding*” [3] e híbrida [4]. A soldadura híbrida patenteada pela LPKF, ilustrada na Figura 3, utiliza energia de elevada potência proveniente de lâmpadas de halogéneo para auxiliar o laser no processo de soldadura. Essa energia pré aquece o plástico em torno da linha de união o que faz com que seja necessária menos energia proveniente do feixe do laser para fundi-lo. A luz das lâmpadas de halogéneo é policromática e por isso pode ser absorvida pelas duas camadas. [4]



**Figura 3 - Soldadura híbrida [4].**

A “*Globo welding*” ilustrada na Figura 4 é uma variante do processo de soldadura a laser por transmissão que utiliza uma ferramenta que simultaneamente faz pressão e concentra o feixe de laser. Deste modo o feixe de laser só é aplicado no mesmo local onde está a ser exercida pressão. Isso permite que exista um melhor contacto entre as duas partes da peça fazendo com que a mistura entre os componentes seja melhor, melhorando deste modo a união entre eles.



**Figura 4 - “Globo welding” [3].**



As variáveis operatórias deste processo são [1]:

- Potência do laser
- Pressão
- Temperatura
- Velocidade do laser
- Tempo

As vantagens da utilização deste processo são [1]:

- Tempos de ciclo mais rápidos;
- O relevo da solda é mínimo;
- Pode-se ter um elevado controlo do processo e da qualidade;
- Menos tensão resultante no componente;
- Permite soldar componentes com formas complexas;
- Forma uma união de elevada qualidade entre peças;
- Não gera partículas;
- É uma técnica de elevada precisão;
- Pode realizar juntas herméticas;
- Não existe desgaste nas ferramentas;
- O aquecimento é localizado, logo os danos térmicos são minimizados;
- Permite soldar materiais flexíveis e elastómeros;
- É adequado para soldar polímeros com ponto de fusão elevado e para soldar polímeros com viscosidade de fusão baixa;
- Não existe contacto entre os componentes e ferramentas aquecidas;
- Processo automatizado e ciclos de produção elevados.



Tendo como desvantagens [1]:

- Preço do equipamento;
- As superfícies de união devem de ser de boa qualidade;
- As fixações devem ser concebidas com cuidado para assegurarem um contacto perfeito entre as peças a serem soldados durante todo o ciclo de soldagem;
- Tem limitações quando às espessuras das peças especialmente para materiais muito cristalinos como é o caso do PEEK, as questões relacionadas com a saúde e segurança devido à utilização de lasers;
- A parte superior do componente final tem de ser transparente à radiação do laser e a parte inferior tem de ser absorvente a essa radiação, para se poder obter isso tem que se misturar aditivos ou revestir a zona de união das peças com um material absorvente devido à maioria dos termoplásticos serem transparentes a esta radiação;



## 1.2. Motivação/Objetivos

Esta tese teve como principal objetivo estudar a influência das variáveis operatórias da moldação por injeção e do laser na resistência da união das peças de polipropileno moldadas por injeção. Adicionalmente, outros objetivos tiveram de ser alcançados, nomeadamente:

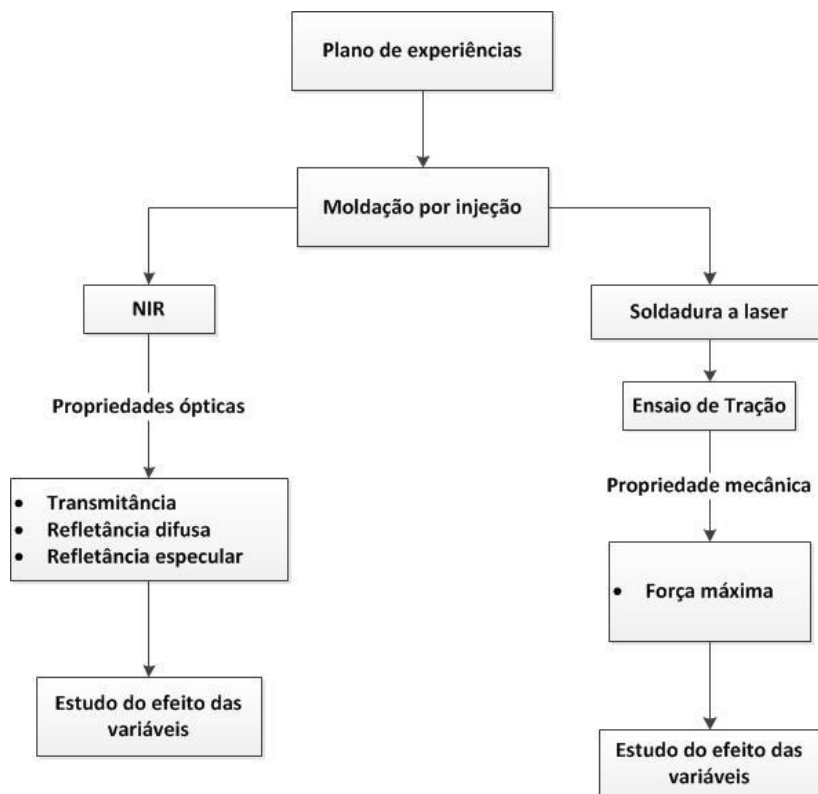
-Estudar a influência das condições de moldação por injeção na transmitância, refletância difusa e refletância especular da energia do laser;

Para tal foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- Moldação por injeção de peças com diferentes condições de processamento, segundo um plano de experiências;
- Soldadura a laser dessas mesmas peças;
- Realização de ensaios de tração para determinar qual a força máxima suportada pelas peças soldadas;
- Realização de ensaios de Near-infrared spectroscopy (NIR) às peças moldadas por injeção, de forma a determinar a quantidade de energia do laser que era transmitida e qual a quantidade que era refletida de forma difusa ou de forma especular;
- Determinação da influência das variáveis operatórias da moldação por injeção na transmitância da energia do laser pelas peças em estudo através do método de Design Of Experiments (DOE);
- Determinação da influência das variáveis operatórias da moldação por injeção na refletância difusa da energia do laser pelas peças em estudo através do método de Design Of Experiments (DOE);
- Determinação da influência das variáveis operatórias da moldação por injeção na refletância especular da energia do laser pelas peças em estudo através do método de Design Of Experiments (DOE);
- Determinação da influência das variáveis operatórias da moldação por injeção e do laser no desempenho mecânico das peças em estudo através do método de Design Of Experiments (DOE);



Na Figura 5 está ilustrado um diagrama com as tarefas realizadas para se atingir os objetivos da tese.



**Figura 5 - Tarefas realizadas para atingir os objetivos da tese**

### 1.3. Organização da tese

De modo a cumprir os objetivos propostos, a tese está organizada em 5 capítulos:

O capítulo 1 incorpora um enquadramento teórico relativo ao tema abordado neste trabalho, para além de que é apresentada a técnica utilizada. Também são apresentados os objetivos que deveriam ser cumpridos na elaboração desta tese.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte, onde são referidos alguns estudos realizados na área em estudo, assim como algumas informações sobre os lasers e a interação da luz com os materiais poliméricos.

Já no capítulo 3 encontra-se exposto o plano experimental onde são apresentados os planos de experiências utilizados, os parâmetros de injeção, os materiais utilizados neste estudo, o laser utilizado para se proceder a soldadura das peças e os ensaios realizados.

No capítulo 4 são abordados os resultados obtidos bem como a discussão desses resultados.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões da tese bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.



## **2. ESTADO DA ARTE**





## 2.1. Influência das variáveis operatórias do laser na resistência mecânica da união das peças

O desempenho da junta soldada por laser é controlado por um conjunto de variáveis operatórias das quais se destacam a potência do laser, a distância entre o laser e a superfície a ser soldada e a velocidade do laser [5]. Estas variáveis controlam de forma directa tanto a energia que atinge a superfície a aquecer como o tempo de aquecimento (relacionado com a velocidade), influenciando de forma directa a temperatura obtida na interface. Na Figura 6 [6] pode-se observar a relação entre a velocidade e a potência do laser com a temperatura atingida pelo material. Tal como esperado, diminuindo a velocidade (aumento do tempo de aquecimento) e aumentando a potência do laser aumenta a temperatura atingida na interface. Verifica-se ainda que a potência tem uma relação aproximadamente linear com a temperatura enquanto a relação temperatura (velocidade é uma função quadrática).

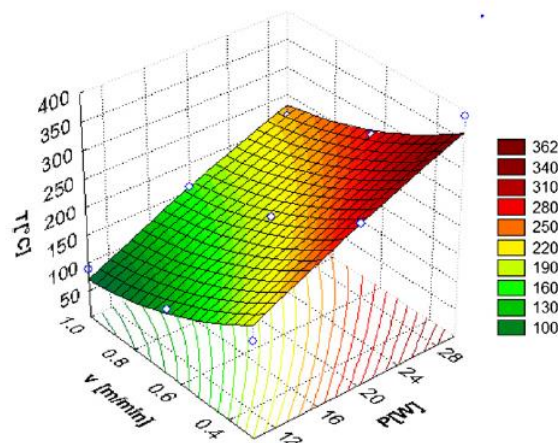


Figura 6 - Influência da potência e da velocidade do laser na temperatura atingida pelo material [6].

### 2.1.1. Potência do laser

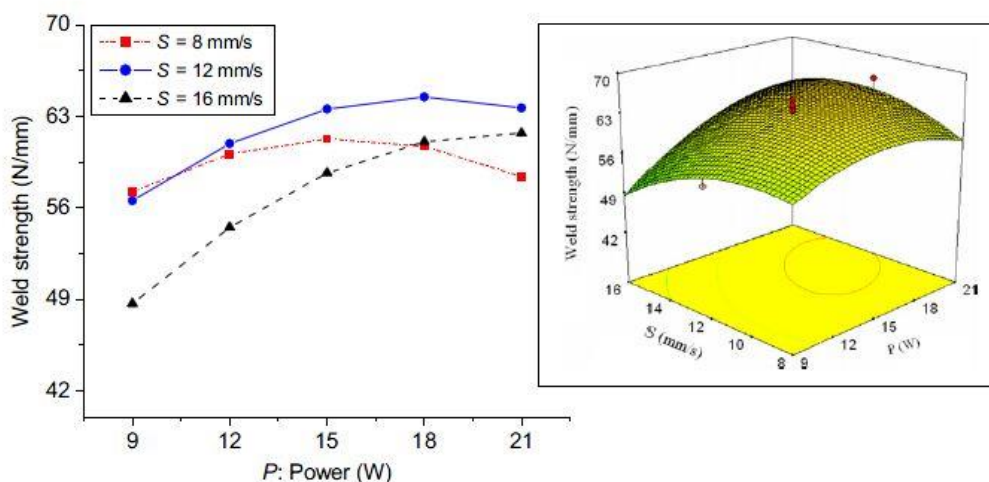
Para uma primeira aproximação à potência necessária ao processo pode ser usada a Equação 1, bastando para tal conhecer algumas propriedades do material a ser utilizado, a velocidade que será utilizada no processo ( $\omega$ ) (rad/s), a profundidade de penetração ( $a$ ), largura da soldadura ( $W$ ), raio da



trajectória rotacional (R). As propriedades do material são a temperatura de fusão ( $T_m$ ), densidade do material ( $\rho$ ), a capacidade térmica específica do material ( $c$ ) e o calor latente da fusão ( $\Delta H_m$ ) [7].

$$P = \frac{\omega R W a (\rho c T_m + \Delta H_m)}{0.484} \quad (1)$$

Bappa Acherjee, *et al* [8] estudaram a influência da potência do laser na resistência mecânica da união usando para isso *response surface methodology* (RSM - conjunto de técnicas matemáticas e de estatística usadas na modelação e análise de problemas em que a resposta é influenciada por diversas variáveis) utilizando o PMMA e o ABS. Neste estudo foram utilizadas cinco potências diferentes, 9, 12, 15, 18, 21 W, e cinco velocidades diferentes 4, 8, 12, 16, 20 mm/s. Na Figura 7 está ilustrado o efeito a influência da potência do laser para diferentes velocidades na resistência da união. Para os valores de velocidade de 8 mm/s e 12 mm/s com um aumento da potência do laser há um aumento da resistência da união até um certo valor de potência. A partir deste, com um aumento da potência do laser, existe um decréscimo da resistência de união. Para o valor máximo de velocidade estudado (16 mm/s) existe um aumento da resistência da união para todos os valores de potência estudados com um aumento da potência.

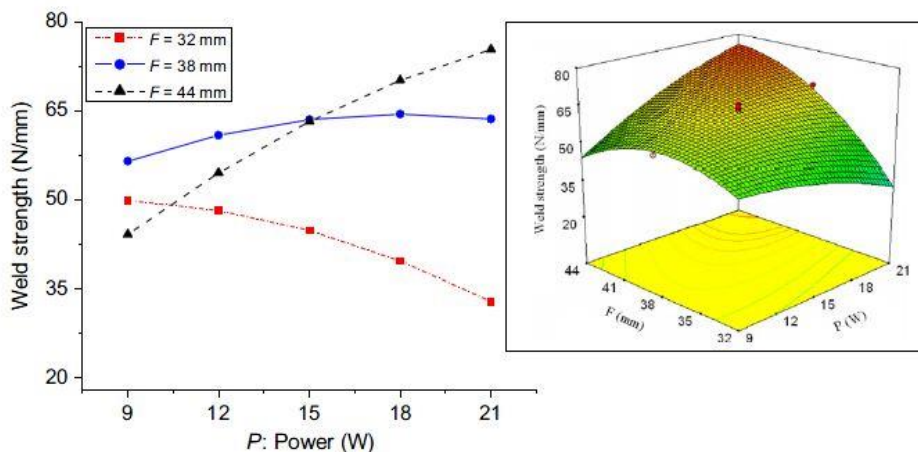


**Figura 7 - Influência da potência do laser para diferentes velocidades na resistência da união [8]**



A influência da potência do laser na resistência da união em função da distância do laser e a junta a soldar é ilustrada na Figura 8. Para este estudo foram utilizadas distâncias fora da distância focal do feixe do laser porque deste modo com um aumento da distância do laser ao conjunto existe um aumento do diâmetro do feixe. Verifica-se que para além de não haver uma relação linear entre a potência e a distância na resistência da junta, existem comportamentos distintos. De facto, para a menor distância ( $F=32\text{mm}$ ) verifica-se que um aumento da potência do laser leva a uma diminuição da resistência da junta enquanto se a distância for de  $F=44\text{mm}$  um aumento da potência do laser leva a um aumento da resistência da união.

Quanto à distância intermédia, pode-se observar que com o aumento da potência do laser até ao seu valor central existe um aumento da resistência da união. A partir desse valor inicia-se um decréscimo da resistência da união quando se aumenta a potência.



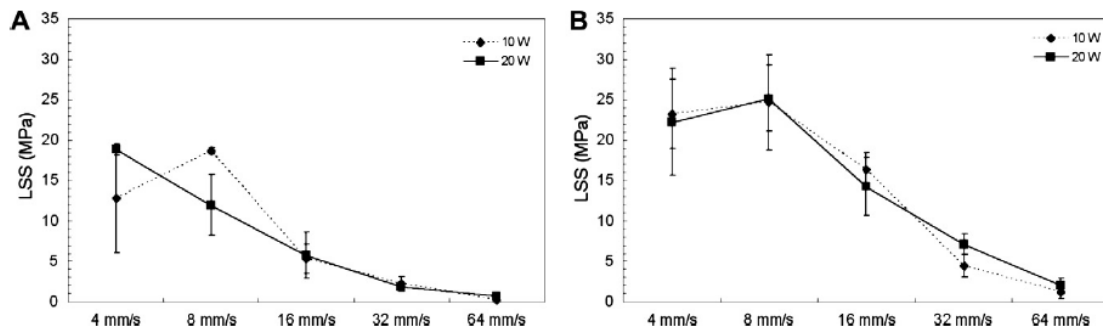
**Figura 8 - Influência da potência do laser na resistência da união para várias distâncias entre o laser e a junta [8].**

### 2.1.2. Velocidade do feixe de laser

A velocidade do laser é a variável que controla o tempo de interação entre o feixe do laser e as peças a soldar, isto é, quanto maior for a sua velocidade menos tempo de contacto existe entre o feixe do laser e as peças.



No estudo realizado por Negin Amanat, *et al* [5] foi analisada a influência da velocidade do laser na resistência da união em duas morfologias de PEEK (poly-ether-ether-ketone), semi-cristalino e amorfo. Para a realização deste estudo foram utilizadas cinco velocidades do laser 4, 8, 16, 32, 64 mm/s e duas potências 10 e 20 W. Os resultados mostraram que para as duas morfologias os maiores valores relativos à resistência da união foram obtidos com as velocidades mais baixas, independentemente da potência da laser utilizada (Figura 9).



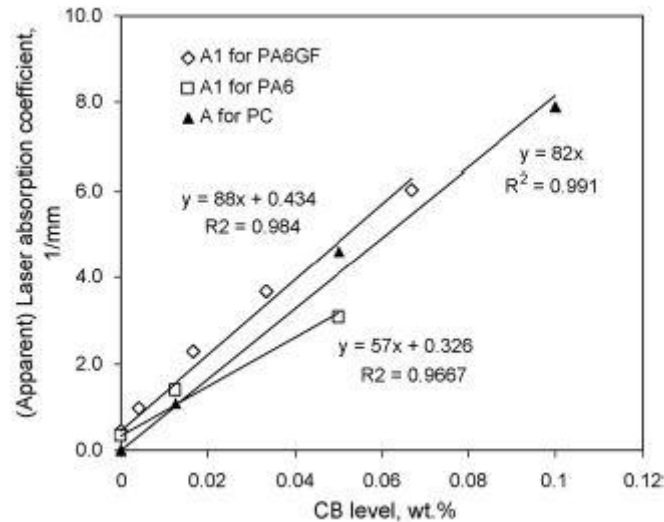
**Figura 9 - Testes mecânicos para duas as diferentes morfologias de PEEK estudadas (A-amorfo, B-semi-cristalino) [5]**

O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 7 relativo ao trabalho de Bappa Acherjee, *et al* [8].

## 2.2. Materiais

No seu estado natural a maioria dos termoplásticos são transparentes à radiação proveniente do laser o que respeita um dos requisitos do processo. No entanto para que o processo ocorra é necessário que uma das partes do conjunto absorva a radiação, havendo por isso a necessidade de aditivar o polímero [9].

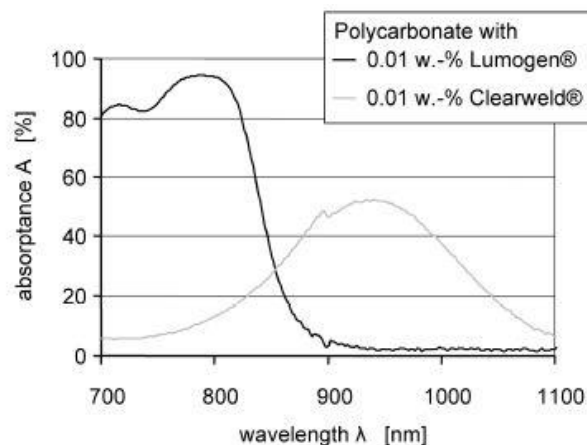
O negro de fumo é o aditivo mais utilizado pelas indústrias devido ao seu baixo custo e boas propriedades de absorção. Apesar disso, o seu uso faz com que a peça onde é utilizado fique com uma coloração negra impedindo a sua utilização em componentes para certas indústrias, como por exemplo a indústria médica [9]. Na Figura 10 pode-se observar a influência de várias concentrações de negro de fumo na absorção de energia quando aditivado a alguns polímeros utilizados na soldadura a laser [10].



**Figura 10 - Quantidade de energia absorvida para diferentes concentrações negro de carbono [10]**

Devido ao facto do negro de fumo induzir uma tonalidade negra as peças onde é adicionado, foram desenvolvidos novos aditivos que permitem soldar peças com colorações diferentes da cor negra no campo da luz visível ou mesmo transparentes. Alguns desses aditivos são o Lumogen® da BASF AG, e o Clearweld® da Gentex Corporation [9].

A Figura 11, ilustra uma comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um policarbonato com 2 mm de espessura aditivado com Lumogen® e com Clearweld® nos vários comprimentos de onda do laser [9].



**Figura 11 - Comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um policarbonato com 2 mm de espessura aditivado com Lumogen® e com Clearweld® [9]**

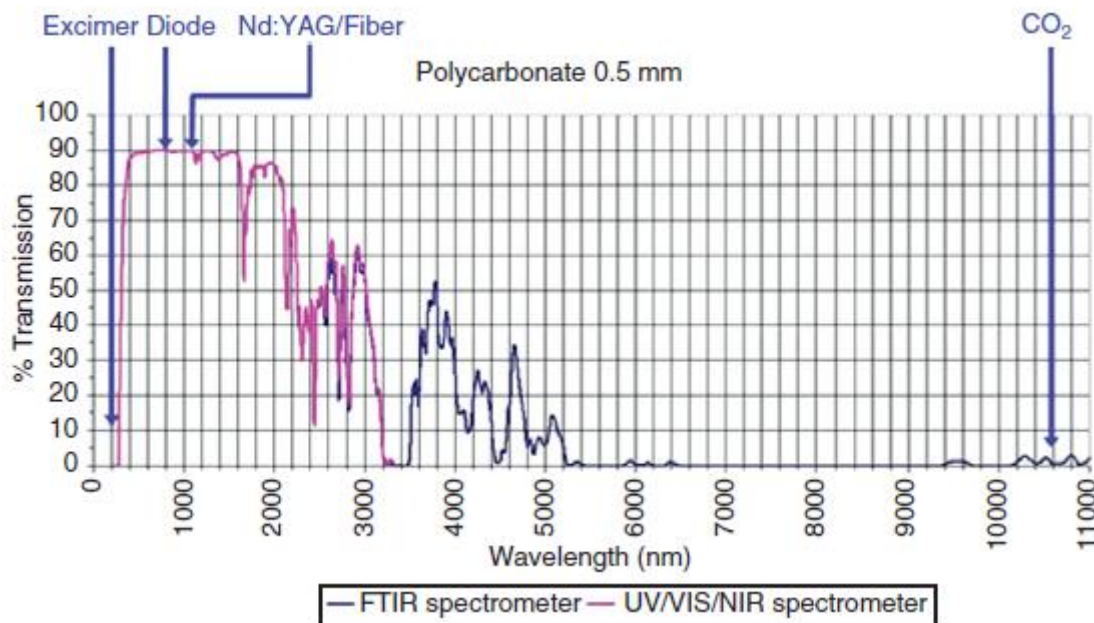


### 2.2.1. Interação da luz com os polímeros

Quando a radiação do feixe de laser atinge a superfície do material alguma dessa radiação será reflectida, parte será transmitida e outra parte será absorvida pelo material. Para que haja aquecimento dos materiais a energia do feixe tem de ser absorvida no local adequado, isto é, na interface das partes a unir. A interação do feixe do laser com o material depende dos seguintes fatores:

- Tipo de material e tipo de aditivo que se encontra presente no material;
- Comprimento de onda do laser;
- A intensidade do laser (potência, forma do feixe do laser e distância focal);
- Velocidade do feixe do laser sobre a superfície do material;[1]

Na Figura 12 mostra-se a quantidade de energia transmitida por um policarbonato com 0.5 mm de espessura nos diferentes comprimentos de onda do laser.



**Figura 12 - Quantidade energia transmitida por um policarbonato com 0.5 mm de espessura nos diferentes comprimentos de onda do laser [1]**





### **3. MATERIAIS e MÉTODOS**





### **3.1. Materiais**

Para a realização deste estudo foram utilizados dois polipropilenos homopolímeros, um com o grade PP 579s e outro com o grade moplen HP500N, e um polipropileno copolímero com o grade moplen RP348U .

Neste estudo também foi usado um agente de nucleação (benzoato de sódio H319).

Também foi utilizado o aditivo negro de fumo.

### **3.2. Procedimento experimental**

#### **3.2.1. Planos de experiências**

Com o objetivo de estudar o efeito das variáveis do processo de injeção e de soldadura no desempenho mecânico de uma peça soldada foi desenvolvido um plano de experiências.

Para a realização deste plano foi utilizada a metodologia de Taguchi. A metodologia define o número de experiências a serem realizadas de acordo com o número de variáveis a serem estudadas. Esta metodologia foi utilizada porque permite estudar um grande número de variáveis sem que para isso seja necessário realizar um grande número de experiências.

As variáveis escolhidas para a realização deste estudo foram:

- Temperatura do molde
- Tempo de arrefecimento
- Materiais
- Velocidade do laser
- Potência do laser
- Diâmetro do feixe do laser



Na Tabela 1 e Tabela 2 estão apresentadas as variáveis estudadas, bem como os seus valores máximos e mínimos, e o plano de experiências respetivamente.

**Tabela 1 - Apresentação das variáveis e valores máximos e mínimos**

		<b>Nível +</b>	<b>Nível -</b>	<b>Unidades</b>
<b>A</b>	Materiais	Homopolimero	Copolimero	
<b>B</b>	Temperatura do molde	40	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Potência do laser	30	15	w
<b>E</b>	Velocidade do laser	40	20	Cm/min
<b>F</b>	Diâmetro do feixe do laser	2	1	mm

**Tabela 2 - Plano de experiências**

<b>Exp.</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>1</b>	+	+	+	+	+	+
<b>2</b>	+	+	+	-	-	-
<b>3</b>	-	+	-	+	+	+
<b>4</b>	-	+	-	-	-	-
<b>5</b>	+	-	-	+	-	-
<b>6</b>	+	-	-	-	+	+
<b>7</b>	-	-	+	+	-	-
<b>8</b>	-	-	+	-	+	+

O material utilizado neste estudo foi um polipropileno, um material semi-cristalino. Este material foi estudado devido à sua morfologia ter influência na transmissão da radiação do laser. As esferulites presentes no material fazem com que parte da radiação que entra em contacto com o material seja parcialmente refletida. Foram utilizados dois tipos de polipropileno um homopolimero e um copolímero para se verificar quais das morfologias teria um melhor desempenho mecânico.



Foram escolhidas as variáveis temperatura do molde e o tempo de arrefecimento porque estas variáveis permitem controlar o crescimento das esferulites.

A velocidade do laser foi uma das variáveis escolhidas porque de forma directa controla o tempo de soldadura e de uma maneira indirecta controla a temperatura atingida na zona de união dos componentes que formaram o produto final. O tempo de soldadura e a temperatura atingida na zona de união têm uma grande influência na mistura dos dois materiais e quanto melhor for essa mistura melhor será a soldadura.

A potência do laser têm influência directa na temperatura atingida na zona de união dos componentes e como foi referido anteriormente essa temperatura tem influência directa na mistura entre os materiais e deste modo alterando a resistência mecânica dos provetes soldados.

O diâmetro do feixe do laser foi uma das variáveis escolhidas para o estudo porque esta variável permite aumentar ou diminuir a zona que será soldada e devido a isso controla a área resistente da peça.

Com o intuito de estudar a influência de algumas variáveis relevantes na transmissão e reflexão da luz por parte do material em estudo realizou-se um plano de experiências. As variáveis utilizadas neste plano de experiências foram:

- Espessura
- Temperatura do molde
- Tempo de arrefecimento
- Velocidade de injeção
- Agente de nucleação
- Temperatura de injeção



Na Tabela 3 e Tabela 4 estão apresentadas as variáveis estudadas, bem como os seus valores máximos e mínimos, e o plano de experiências respetivamente.

**Tabela 3 - Apresentação das variáveis e valores máximos e mínimos**

		<b>Nível +</b>	<b>Nível -</b>	<b>Unidades</b>
<b>A</b>	Espessuras	3	1.5	mm
<b>B</b>	Temperatura do molde	40	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Velocidade de injeção	50	30	mm/s
<b>E</b>	Agente de nucleação	0.15	0	%
<b>F</b>	Temperatura de injeção	260	220	°C

**Tabela 4 - Plano de experiências**

<b>Exp.</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>1</b>	-	-	-	-	-	-
<b>2</b>	-	-	-	+	+	+
<b>3</b>	-	+	+	-	-	+
<b>4</b>	-	+	+	+	+	-
<b>5</b>	+	-	+	-	+	-
<b>6</b>	+	-	+	+	-	+
<b>7</b>	+	+	-	-	+	+
<b>8</b>	+	+	-	+	-	-

Estas mesmas variáveis também foram utilizadas com o objetivo de estudar a influência destas quanto ao desempenho mecânico dos provetes soldados por soldadura a laser.



Para se proceder à soldadura a laser foi utilizada uma velocidade do laser de 20 mm/s e duas potências do laser, uma de 30W e outra de 15W. Na Tabela 5 esta apresentado o plano de experiências para a variável potência do laser.

**Tabela 5 - Plano de experiência para potência do laser**

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

A variável espessura foi introduzida neste estudo devido a ter influência na interação da luz com material. Como neste estudo queria-se observar qual a quantidade de energia que era transmitida, e qual a quantidade de luz que era refletida de forma difusa e de forma especular foram utilizadas duas espessuras, uma de 3mm e outra de 1.5mm.

A temperatura do molde e o tempo de arrefecimento foram introduzidas neste estudo devido a estas influenciarem a morfologia do polímero, neste caso como o material em estudo é um material semi-cristalino verifica-se a presença de esferulites e estas variáveis influenciam o seu crescimento, deste modo alterando como a luz interage com o material.

Neste estudo foi utilizado um agente de nucleação pois este afeta o crescimento das esferulites durante a fase de moldação por injeção.

A velocidade de injeção e a temperatura de injeção foram utilizadas como variáveis neste estudo, uma vez que, interferem na morfologia do polímero.



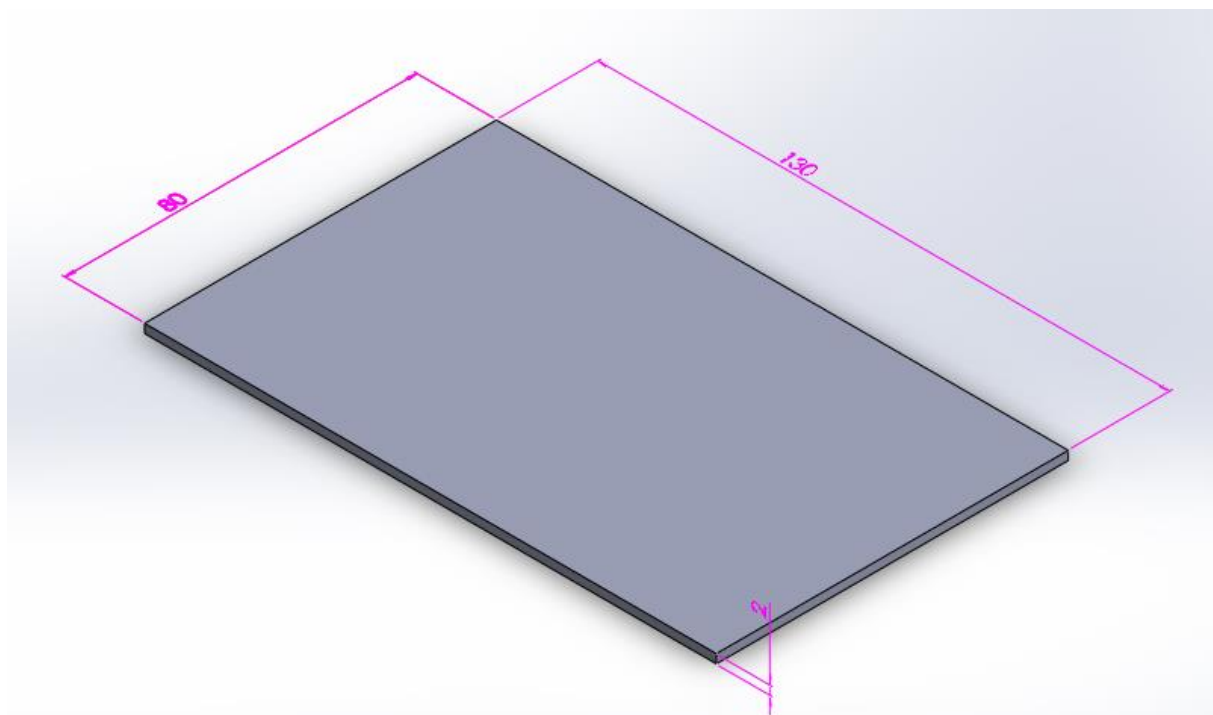
### 3.2.2. Injeção

Para a injeção dos componentes que seriam usados posteriormente na soldadura a laser, foi utilizada a máquina de injeção Ferromatik-Milacron K85 ilustrada na Figura 13.



**Figura 13 - Injetora Ferromatik-Milacron K85**

Os componentes injetados foram placas com 2 mm de espessura, 130mm de comprimento e 80mm de largura. Após a estabilização do processo em causa foram retiradas trinta placas de cada experiência.



**Figura 14 - Esquema da placa injetada**



Para além dos parâmetros de injeção presentes no primeiro plano de experiências apresentado, tais como, a temperatura do molde e tempo de arrefecimento foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 6, e o perfil de temperaturas de injeção descrito na Tabela 7.

**Tabela 6 - Parâmetros de injeção utilizado na injeção das placas**

		Valores	Unidades
Pressão de injeção	P1	50	bar
Tempo de injeção	t1	5	s
Velocidade de injeção	V1	40	m/s
Pressão de comutação	Pu	160	bar
Pressão de injeção	P2	20	bar
Tempo de injeção	t2	5	s
Velocidade de injeção	V2	30	m/s
Ponto de comutação	s1	9	mm
Curso de plastificação		40	mm

**Tabela 7 - Perfil de temperaturas da injeção**

Perfil de temperaturas	220	200	180	160	140	40
------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	----

Na injeção do componente absorvente do conjunto foram injetadas placas, utilizaram-se os parâmetros de injeção e o perfil de temperaturas expostos na Tabela 6 e na Tabela 7, respetivamente. Além destes, foi utilizada uma temperatura de molde de 25°C e um tempo de arrefecimento de 15 segundos. Para tornar o componente absorvente à radiação debitada pelo laser que posteriormente iria ser utilizado para soldar os provetes foi necessário utilizar negro de fumo como aditivo. O polímero utilizado na injeção deste componente foi o polipropileno (PP) homopolímero.

De modo ser possível estudar a influência da espessura no desempenho mecânico da peça soldada e na transmissão, reflexão difusa e especular do componente responsável pela transmissão da radiação do laser foram injetados discos com espessuras de 1.5 mm e de 3 mm. Os discos injetados tinham um diâmetro de 100mm. Na Figura 15 estão apresentados os discos injetados para este estudo.



**Figura 15 - Discos injetados para o estudo (a) com 3mm de espessura e (b) com 1.5mm de espessura**

Quando o processo estabilizou, foram retirados trinta discos de cada experiência.

Na injeção dos componentes foram utilizados os parâmetros descritos no segundo plano de experiências apresentado, tais como a temperatura do molde e o tempo de arrefecimento, além destes foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 8 para os discos de 1.5 mm de espessura e os parâmetros apresentados na Tabela 9 para os discos de 3mm.

**Tabela 8 - Parâmetros de injeção dos discos com espessura de 1.5 mm**

		<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
<b>Pressão de injeção</b>	P1	100	bar
<b>Tempo de injeção</b>	t1	5	s
<b>Velocidade de injeção</b>	V1	-	mm/s
<b>Pressão de comutação</b>	Pu	150	bar
<b>Pressão de injeção</b>	P2	20	bar
<b>Tempo de injeção</b>	t2	3	s
<b>Velocidade de injeção</b>	V2	20	mm/s
<b>Ponto de comutação</b>	s1	12	mm
<b>Curso de plastificação</b>		30	mm



**Tabela 9 - Parâmetros de injeção dos discos com espessura de 3 mm**

		<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
<b>Pressão de injeção</b>	P1	100	bar
<b>Tempo de injeção</b>	t1	5	s
<b>Velocidade de injeção</b>	V1	-	mm/s
<b>Pressão de comutação</b>	Pu	150	bar
<b>Pressão de injeção</b>	P2	20	bar
<b>Tempo de injeção</b>	t2	5	s
<b>Velocidade de injeção</b>	V2	20	mm/s
<b>Ponto de comutação</b>	s1	10	mm
<b>Curso de plastificação</b>		40	mm

Na Tabela 10 estão descritos os perfis de temperatura de injeção correspondentes aos níveis (+) e (-) do plano de experiências deste estudo.

Quanto ao componente responsável pela absorção da radiação do laser foram utilizados os parâmetros de injeção apresentados anteriormente.

**Tabela 10 - Perfis de temperaturas de injeção**

<b>Nível (+)</b>	<b>260</b>	<b>240</b>	<b>220</b>	<b>200</b>	<b>140</b>	<b>40</b>
<b>Nível (-)</b>	220	200	180	160	140	40



### 3.2.3. Preparação de amostras

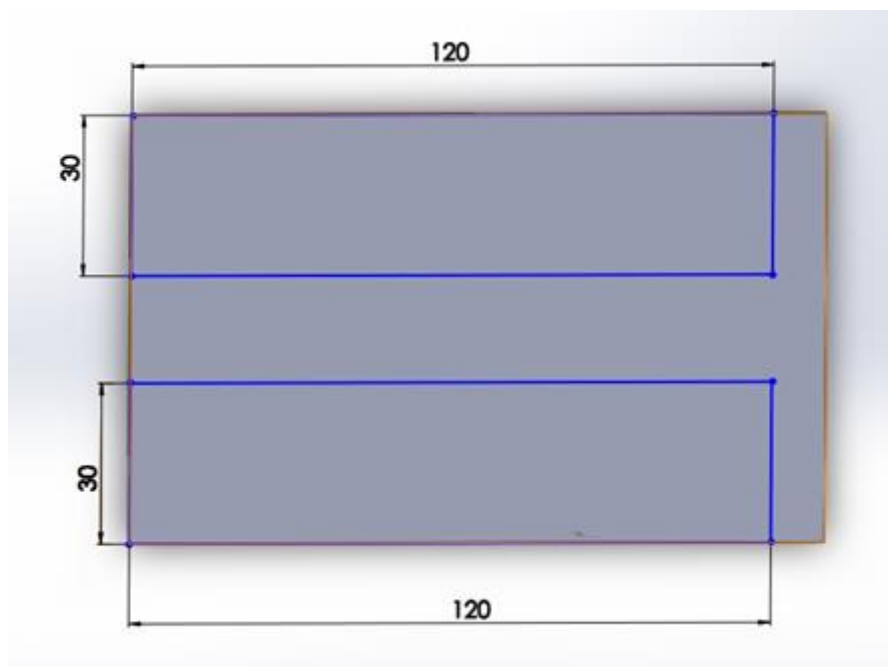
Para se proceder ao corte das amostras foi utilizada uma serra de fita (DEWALT DW876).

- Soldadura a laser

Após a injeção das peças foi necessário cortar provetes para depois se proceder à soldadura.

De cada placa injetada foram retirados dois provetes com as seguintes dimensões, 120mm de comprimento, 30 mm de largura.

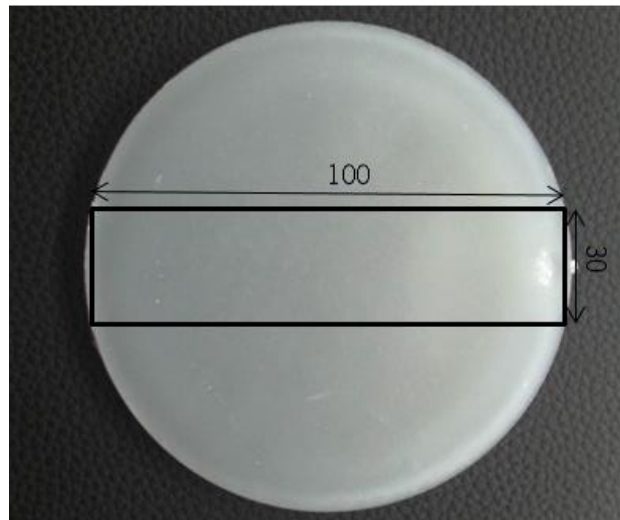
Na Figura 16 encontra-se ilustrada as zonas onde foram retirados os provetes.



**Figura 16- Zona de corte dos provetes**

De cada disco injetado foi retirado um provete com as seguintes dimensões 100 mm de comprimento e 30 mm de largura.

Na Figura 17 encontra-se ilustrada a zona onde foi cortado o provete.



**Figura 17 - Zona de corte do provete**

- Near-infrared spectroscopy (NIR)

Para a realização do ensaio de NIR foi necessário cortar amostras com as seguintes dimensões, 40 mm de comprimento e 30 mm de largura, a partir do ataque.

Na Figura 18 esta ilustrada a zona onde foi cortada a amostra.



**Figura 18 - Zona de corte da amostra para o ensaio de NIR**



### 3.2.4. Soldadura a laser

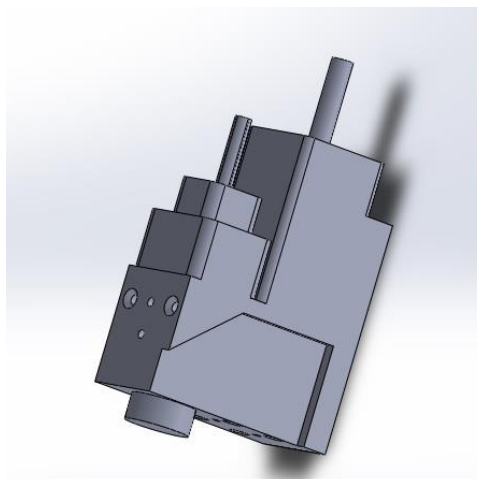
Com a produção dos provetes foram iniciados os testes de soldadura a laser.

Para se proceder à soldadura dos provetes foi utilizado um laser de diodo, LM100 100W aircooled  $\lambda=938\text{nm}$  fibra.400 $\mu\text{m}$  que se encontra ilustrado na Figura 19. Na Figura 19 são apresentadas a unidade produtora de laser e o sistema que controla a saída de potência.



**Figura 19 - Unidade produtora de laser e o sistema que controla a saída de potência (LM100 100W aircooled  $\lambda=938\text{nm}$  fibra.400 $\mu\text{m}$ )**

Além dos componentes anteriormente apresentados foi utilizada uma cabeça de soldadura e um pirómetro. O pirómetro teve como objetivo a medição da temperatura ao longo do caminho da soldadura. A cabeça de laser utilizada para a união dos diferentes materiais, encontra-se ilustrada na Figura 20.



**Figura 20 - Esquema da cabeça do laser**

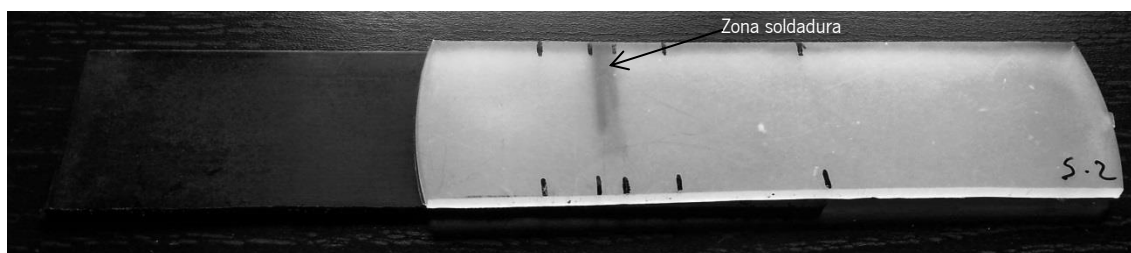


Neste estudo foram utilizados dois tipos de robots. Primeiramente foi utilizado o robot Motoman HP20. Com este robot foram efetuadas as soldaduras dos provetes do primeiro plano de experiências apresentado. Posteriormente foi utilizado um robot Motoman SIA20 para soldar os provetes do segundo plano de experiências apresentado. Os dois robots encontram-se ilustrados na Figura 21.



**Figura 21 - Robot Motoman HP20 [11] e Robot Motoman SIA20 [12] respetivamente**

Na Figura 22 esta ilustrada uma peça soldada. Na figura é possível observar linha de união dos dois componentes que a constituem. A placa branca/transparente é a placa transparente à radiação do laser. A placa de preta absorve a radiação.



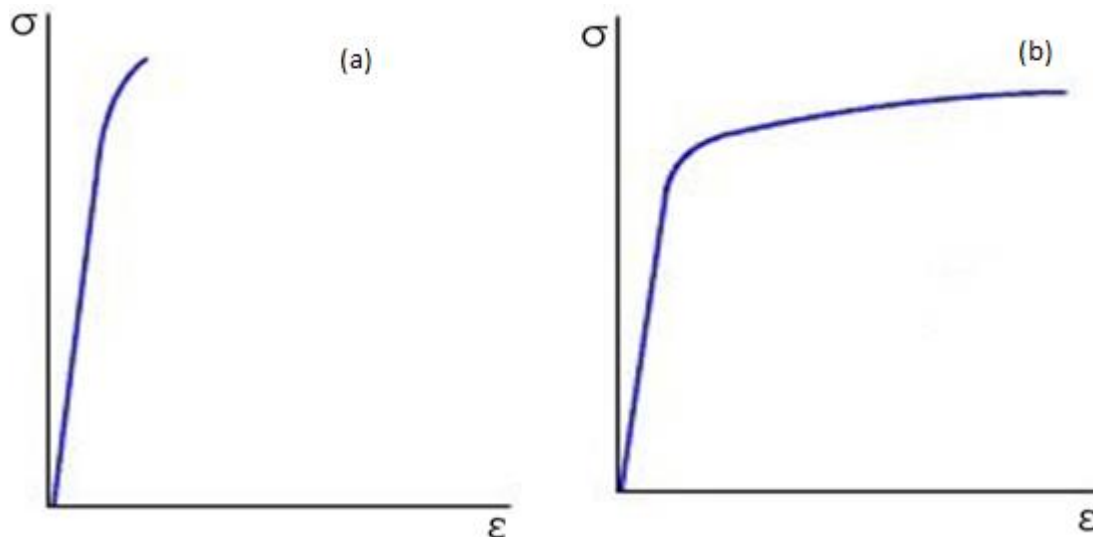
**Figura 22 - Peça soldada**



### 3.2.5. Ensaio de tração

Num ensaio de tração, um corpo de prova ou provete é fixado pelas extremidades às garras da máquina de tração e submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à rutura. Trata-se de um tipo de teste destrutivo porque após o ensaio é impossível usar novamente os provetes uma vez que estes ficam deformados.

Este ensaio permite determinar como os materiais reagem a esforços de tração e qual a tensão ou força que suportam antes da rutura. Mediante o seu comportamento os materiais dividem-se em duas categorias, em frágeis e dúcteis.



**Figura 23 - Diagrama tensão deformação (a) material frágil e (b) dúctil. [13]**

Os gráficos acima representados permitem verificar que os materiais frágeis, fraturam sem que os provetes cedam, já os materiais dúcteis cedem e só depois fraturam.

Neste estudo a máquina de tração utilizada foi a shimadzu autograph ag-x 50 kn que se encontra ilustrada na Figura 24, e a velocidade do ensaio foi de 1mm/min.



**Figura 24 - Shimadzu Precision Universal Tester (shimadzu autograph ag-x 50 kn). [14]**

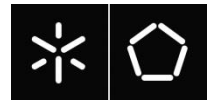
### **3.2.6. Near-infrared spectroscopy (NIR)**

O Near-infrared spectroscopy (NIR) é uma técnica não destrutiva muito importante na caracterização de materiais. Permitindo determinar propriedades ópticas do material tais como transmitância, refletância difusa e refletância especular.

Para a realização deste estudo foi utilizada uma amplitude de comprimento de onda de 1160nm a 800nm. O equipamento utilizado para a realização do estudo foi o shimadzu UV-3101 PC uv-vis-nir Scanning spectrophotometer que é ilustrado na Figura 25.



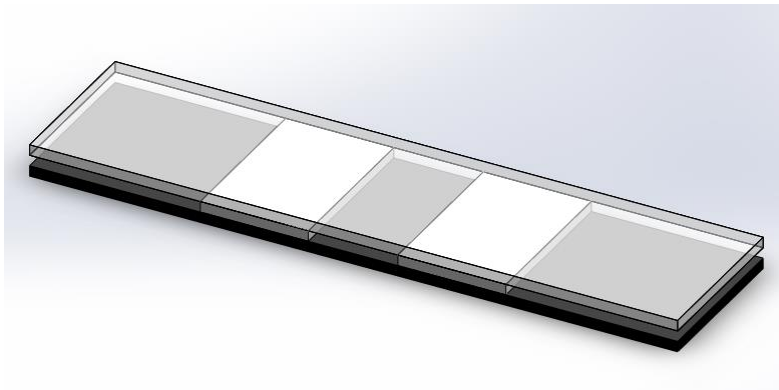
**Figura 25 - Equipamento de NIR (shimadzu UV-3101PC)**



### 3.2.7. Filtros

Neste estudo pretendia-se perceber como a transmissão da radiação afetava a quantidade de energia que chegava à parte absorvente e o que acontecia em termos de profundidade da marca deixada pela passagem do laser pelos provetes.

Para a realização deste teste foi usado o esquema apresentado na Figura 26. Foi utilizado este esquema para não haver ligação entre as placas quando fosse aplicado o laser. Para separar as placas foram utilizadas placas com 2 mm de espessura. O laser foi aplicado no meio das placas de separação ao longo da largura dos componentes.



**Figura 26 - Esquema utilizado para a realização desta experiência**





### 3.3. Design Of Experiments (DOE)

O Design Of Experiments (DOE) é uma metodologia que auxilia o planeamento de experiências de modo eficiente, permitindo definir quais os fatores, níveis e em que quantidade devem ser utilizados durante uma experiência. Tem como vantagem uma grande precisão estatística, menor custo e menor tempo na identificação dos fatores críticos, que otimizam a resposta média de um processo. O fator é uma variável do produto ou do processo que é modificada na experiência. Devem existir pelo menos dois níveis pois este estabelece o valor do fator na experiência. No final de serem realizadas as experiências são obtidas as respostas, isto é, a caracterização do funcionamento de um processo ou de um produto. [15]

Após se obter as respostas é necessário calcular a influência das variáveis em estudo na resposta para isso é necessário calcular o Efeito dessa variável.

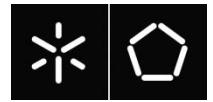
Para calcular o Efeito é usada a fórmula apresentada na Equação 2.

$$Efeito = Média(+) - Média(-) \quad (2)$$

Mas como é possível observar pela fórmula do Efeito é necessário calcular primeiramente a Média (+) e a Média (-) estas duas médias são calculadas segundo a, Equação 3 e Equação 4 respetivamente.

$$Média (+) = \frac{\sum resultados(+)}{n^{\circ} de experiencias(+)} \quad (3)$$

$$Média (-) = \frac{\sum resultados(-)}{n^{\circ} de experiencias(-)} \quad (4)$$



## **4. APRESENTAÇÃO/DISCUSSÃO DE RESULTADOS**



#### 4.1. NIR Transmitância

Este estudo foi realizado para um intervalo de comprimento de onda entre 937.5nm e 938.5.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores da média e do desvio padrão obtidos no ensaio de NIR transmitância, os valores obtidos para cada provete estudado por experiência estão apresentados no anexo 1.

Na Figura 27 estão ilustrados os valores médios da transmitância obtida em cada experiência bem como os respectivos desvios padrão.

**Tabela 11 - Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Transmitância**

Experiência	Média	Desvio padrão
1	84	0,57
2	82	1,99
3	81	1,19
4	79	2,61
5	58	1,60
6	73	0,39
7	69	1,58
8	72	0,61

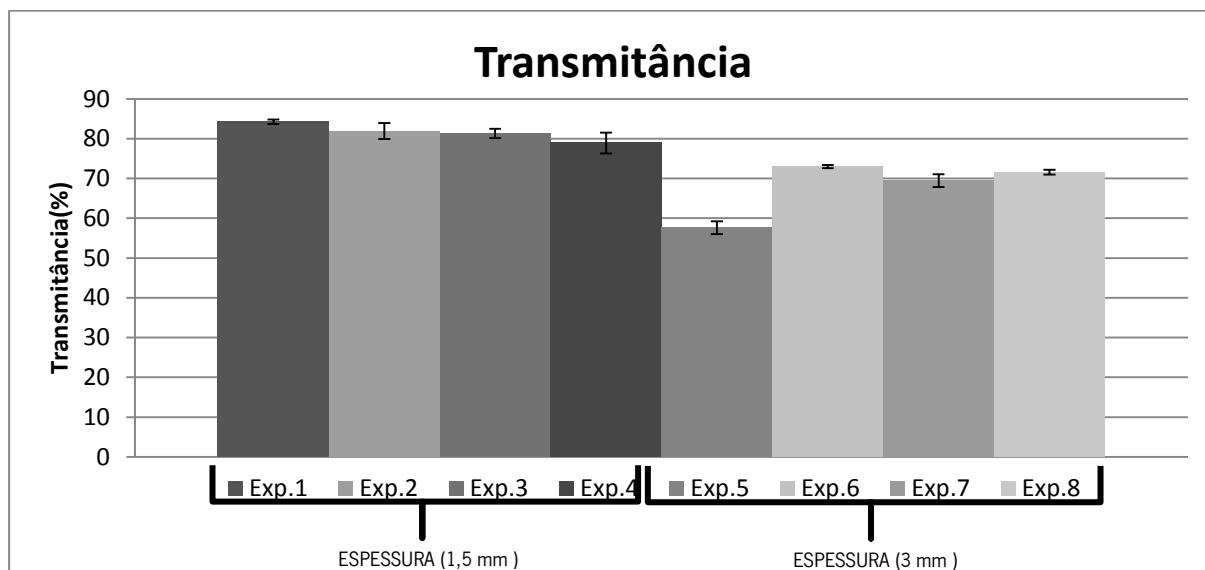
Pelos resultados obtidos nos ensaios de NIR relativos à transmitância é possível observar que as experiências 1,2,3 e 4 onde a espessura dos provetes era de 1.5 mm os valores registados eram na ordem de 80%.E que nas experiências 5,6,7 e 8 onde a espessura era de 3mm registou-se valores na ordem dos 70%.

Logo é possível verificar que existiu uma diminuição de 10% na quantidade de luz transmitida pelos provetes em estudo para o comprimento de onde 938nm, quando se aumentou a espessura dos provetes para o dobro.



Os valores mais elevados de desvios padrão foram registados nas experiências onde os provetes forma aditivados com o agente de nucleação e para além disso também registaram os piores resultados em termos de transmissão de luz com o comprimento de 938nm.

O facto de estas experiências registarem valores de desvio padrão mais elevados que as outras experiências deve-se ao difícil controlo desta variável.



**Figura 27 - Valores da média da transmitância obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão**

Na Tabela 12 estão apresentadas as variáveis em estudo bem como os seus valores máximos e mínimos.

**Tabela 12 - Variáveis em estudo e valores máximos e mínimos**

		Nível +	Nível -	Unidades
<b>A</b>	Espessuras	3	1.5	mm
<b>B</b>	Temperatura do molde	40s	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Velocidade de injeção	50	30	mm/s
<b>E</b>	Agente de nucleação	0.15	0	%
<b>F</b>	Temperatura de injeção	260	220	°C



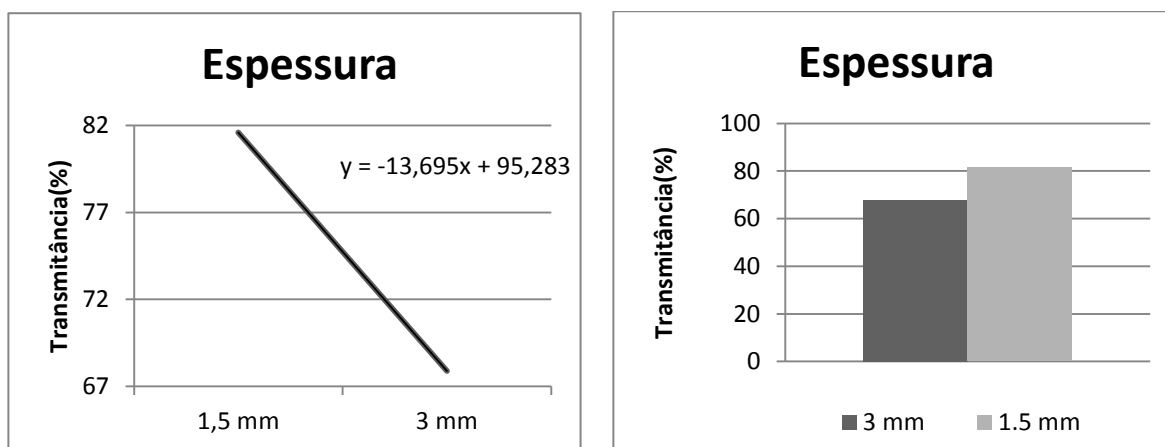
Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de NIR Transmitância (resposta) para cada experiência e os efeitos de cada variável na resposta.

**Tabela 13 - Plano de experiências com a resposta obtida nos ensaios de NIR Transmitância e o efeito das variáveis na resposta**

Exp	A	B	C	D	E	F	Resposta
1	-	-	-	-	-	-	84,229
2	-	-	-	+	+	+	81,907
3	-	+	+	-	-	+	81,303
4	-	+	+	+	+	-	78,912
5	+	-	+	-	+	-	57,595
6	+	-	+	+	-	+	72,967
7	+	+	-	-	+	+	69,443
8	+	+	-	+	-	-	71,564
Média -	81,588	74,175	76,786	73,143	77,516	73,075	
Média +	67,893	75,306	72,695	76,338	71,965	76,405	
Efeito	-13,695	1,131	-4,091	3,195	-5,551	3,330	

A variável que teve maior influência na transmissão da luz por parte dos provetes estudados foi a espessura. Quanto maior a espessura dos provetes menor foi a percentagem de luz transmitida por estes no comprimento de onda em estudo. Esta variável teve um efeito negativo de 13.7%, isso quer dizer que em média quando se aumentou a espessura houve uma diminuição de 13.7% da radiação transmitida por esses provetes no comprimento de onda estudado.

O efeito desta variável deve-se ao facto de que com a diminuição da espessura da peça existe menos energia perdida por refração e por essa razão existe mais energia transmitida.

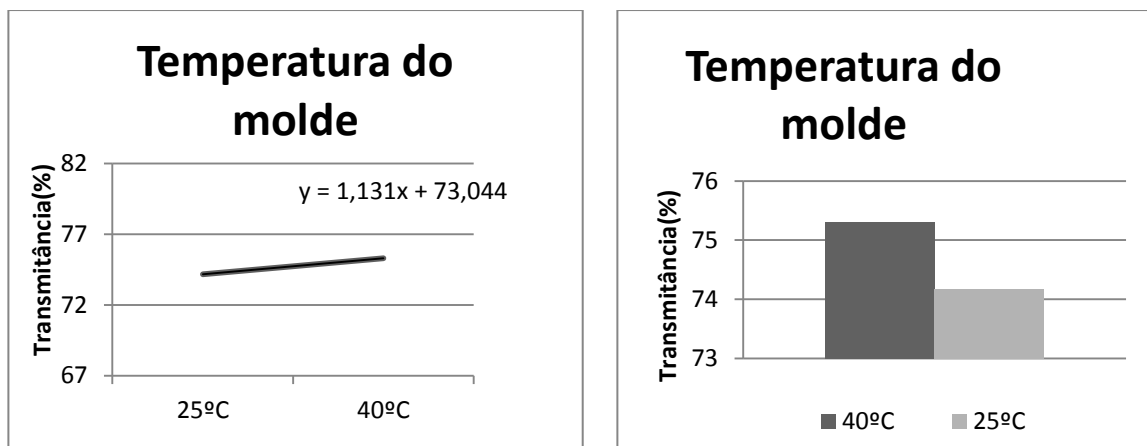


**Figura 28 - Efeito da espessura no valor da transmitância e os valores médios de transmitancia para as duas espessuras estudadas**



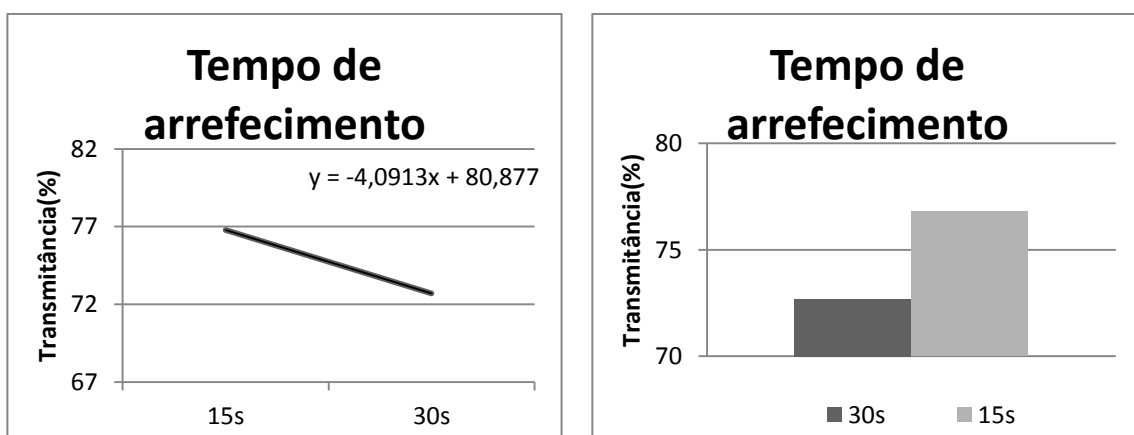
A temperatura do molde foi a variável em estudo que verificou a menor influência na resposta em estudo, transmissão de luz. Esta variável teve um efeito positivo. Foi observado um aumento de 1.13% em média na percentagem de luz transmitida nos provetes em que a temperatura do molde utilizada era mais elevada em relação aos provetes onde foi utilizada uma temperatura do molde mais baixa.

O efeito desta variável deve-se ao facto de que com o aumento da temperatura do molde existe uma diminuição da casca e um aumento da transparência e por essa razão um aumento da quantidade de energia transmitida.



**Figura 29 - Efeito da temperatura do molde na transmitância e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas**

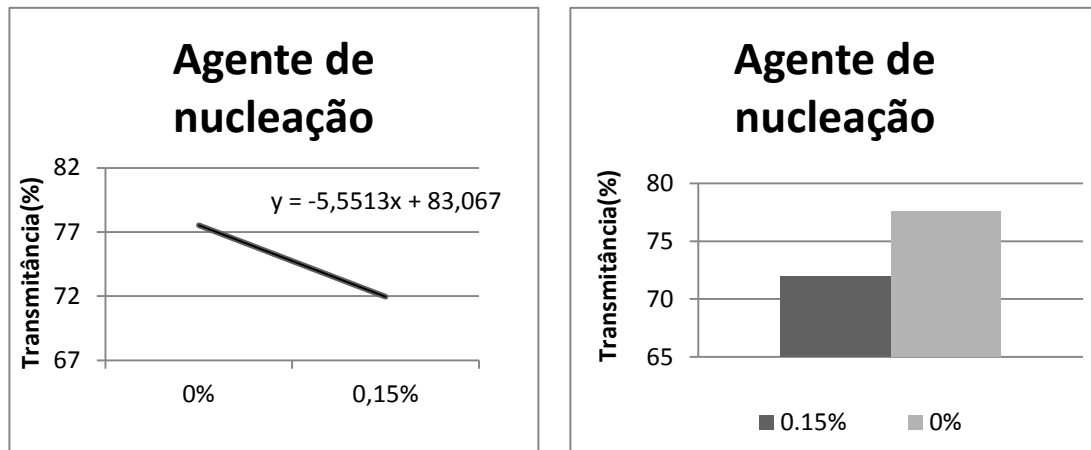
O tempo de arrefecimento teve um efeito negativo na transmissão da luz por parte dos provetes em estudo. Quanto maior foi o tempo de arrefecimento estudado menor foi a percentagem de luz transmitida. Verificou-se um decréscimo de 4.09% em média de luz transmitida entre o tempo de arrefecimento mais elevado e o mais baixo em estudo.



**Figura 30 - Efeito do tempo de arrefecimento na transmitância e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados**



O agente de nucleação teve um efeito negativo na transmissão da luz por parte dos provetes estudados. Nos provetes onde foi utilizado o agente foi verificado uma diminuição de 5.6% em média da percentagem de luz transmitida para o comprimento de onda em estudo.

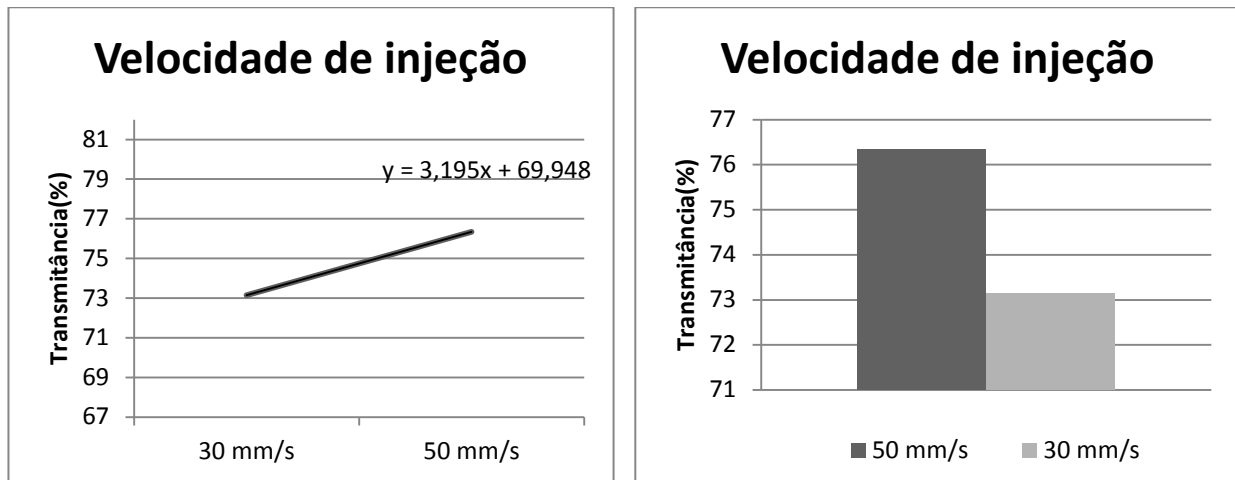


**Figura 31 - Efeito do agente de nucleação na transmitância do e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas**

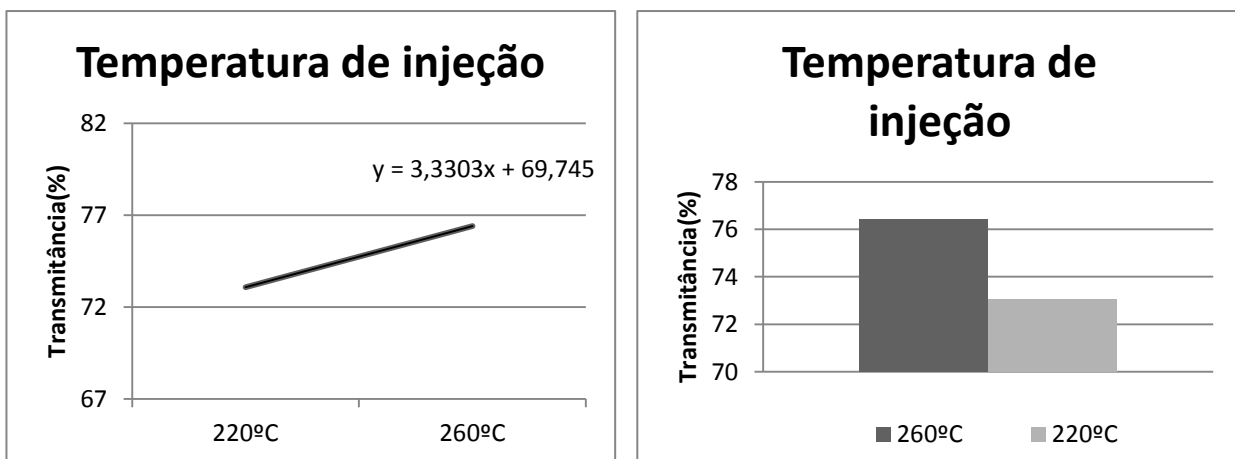
A velocidade de injeção e a temperatura de injeção também tiveram um efeito positivo na transmissão de luz pelos provetes estudados. Verificando-se um aumento de 3.2% e 3.3% em média quando utilizado o valor mais elevado destas variáveis respetivamente.

O efeito da velocidade de injeção deve-se ao facto de que com o aumento da velocidade de injeção existe um aumento da orientação molecular, e por isso há um aumento da luz transmitida.

O efeito da temperatura de injeção deve-se ao facto de que com o aumento da temperatura de injeção existe um aumento da transparência da peça e conseqüentemente um aumento da quantidade de luz transmitida.



**Figura 32 - Efeito da velocidade de injeção na transmitância e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas**



**Figura 33 - Efeito da temperatura de injeção na transmitância e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas**

## 4.2. NIR Refletância difusa

Na Tabela 14 estão apresentados os valores da média e do desvio padrão obtidos no ensaio de NIR refletância difusa, os valores obtidos para cada provete estudado por experiência estão apresentados no anexo 2.

Na Figura 34 estão ilustrados os valores médios da refletância difusa obtida em cada experiência bem como os respectivos desvios padrão.



**Tabela 14- Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Refletância difusa**

Experiência	Média	Desvio padrão
1	5,3	0,75
2	5,4	0,47
3	5,7	0,32
4	5,8	0,56
5	8,3	0,72
6	6,0	0,55
7	6,2	0,52
8	5,4	0,70

Os valores mais elevados de refletância difusa foram observados nas experiências 5,6,7 e 8 onde a espessura era de 3 mm no comprimento de onda de 938nm.

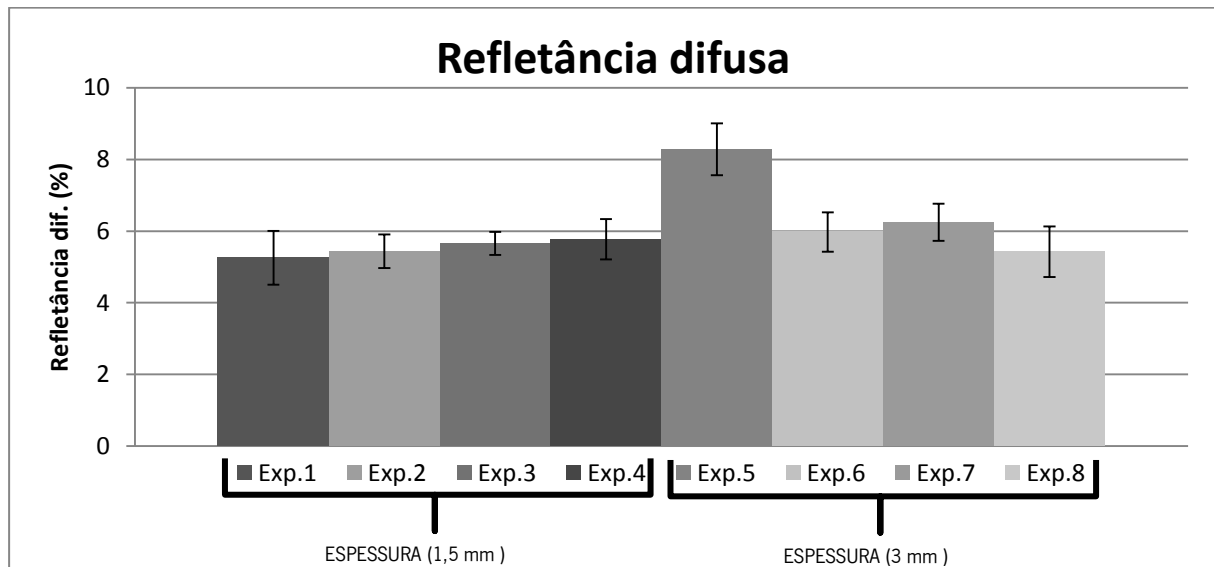
O que era um valor já esperado devido ao facto de quanto maior for a espessura de uma peça maior será a energia refratada por esta.

Também é possível observar que a experiência 5 foi a experiência que registou o valor mais elevado de refletância difusa com um valor de 8.3% e um desvio padrão de 0.72 e a experiência que registou o valor mais baixo foi a experiência 1 com um valor de 5.3% e um desvio padrão de 0.75.

Pelos resultados obtidos verificou-se que nas experiências 2,4,5 e 7, onde foi utilizado um agente de nucleação como aditivo os valores registados de refletância difusa foram superiores aos valores registados nas experiências 1,3,6,e 8 onde não se utilizou esse agente.

As experiências 1,2,3, e 4 obtiveram um valor de refletância difusa na ordem dos 5%, a experiência 2 obteve um valor de 5.4% e um desvio padrão de 0.47, a experiência 3 obteve um valor de 5.7% e um desvio padrão de 0.32, e a experiência 4 obteve um valor de 5.8% e um desvio padrão de 0.56.

A experiência 6 obteve um valor de 6% e um desvio padrão 0.55,a experiência 7 obteve um valor de 6.2% e um desvio padrão 0.52 e a experiência 8 obteve um valor de 5.4% e um desvio padrão de 0.70.



**Figura 34 - Valores da média da refletância difusa obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão**

Na Tabela 15 estão apresentadas as variáveis em estudo bem como os seus valores máximos e mínimos.

**Tabela 15 - Variáveis estudadas e valores máximos e mínimos**

		<b>Nível +</b>	<b>Nível -</b>	<b>Unidades</b>
<b>A</b>	Espessuras	3	1.5	mm
<b>B</b>	Temperatura do molde	40s	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Velocidade de injeção	50	30	mm/s
<b>E</b>	Agente de nucleação	0.15	0	%
<b>F</b>	Temperatura de injeção	260	220	°C

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de NIR Refletância difusa (resposta) para cada experiência e os efeitos de cada variável na resposta.

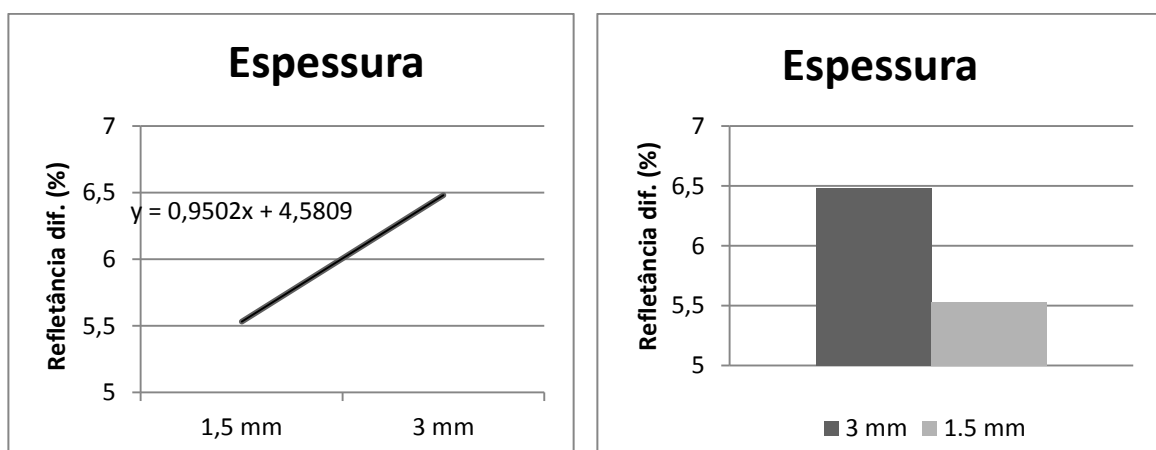


**Tabela 16 - Plano de experiências, respostas obtidas no ensaio de NIR Refletância difusa e os efeitos das variáveis na resposta**

Exp	A	B	C	D	E	F	Resposta
1	-	-	-	-	-	-	5,256
2	-	-	-	+	+	+	5,441
3	-	+	+	-	-	+	5,655
4	-	+	+	+	+	-	5,773
5	+	-	+	-	+	-	8,282
6	+	-	+	+	-	+	5,975
7	+	+	-	-	+	+	6,246
8	+	+	-	+	-	-	5,423
<b>Média -</b>	5,531	6,238	5,591	6,360	5,577	6,183	
<b>Média +</b>	6,481	5,774	6,421	5,653	6,435	5,829	
<b>Efeito</b>	0,950	-0,464	0,830	-0,707	0,858	-0,354	

A espessura foi a variável com maior influência nos valores de refletância difusa por parte dos provetes em estudo, verificando-se um efeito de 0.95%. Este valor significa que houve um aumento em média de 0.95% da percentagem de radiação refletida de forma difusa nos provetes em estudo, deste modo é possível concluir que quanto maior for a espessura dos provetes maior será a radiação refletida.

O efeito desta variável deve-se ao facto de com o aumento da espessura existe menos transmissão e por essa razão um aumento da reflexão da luz.

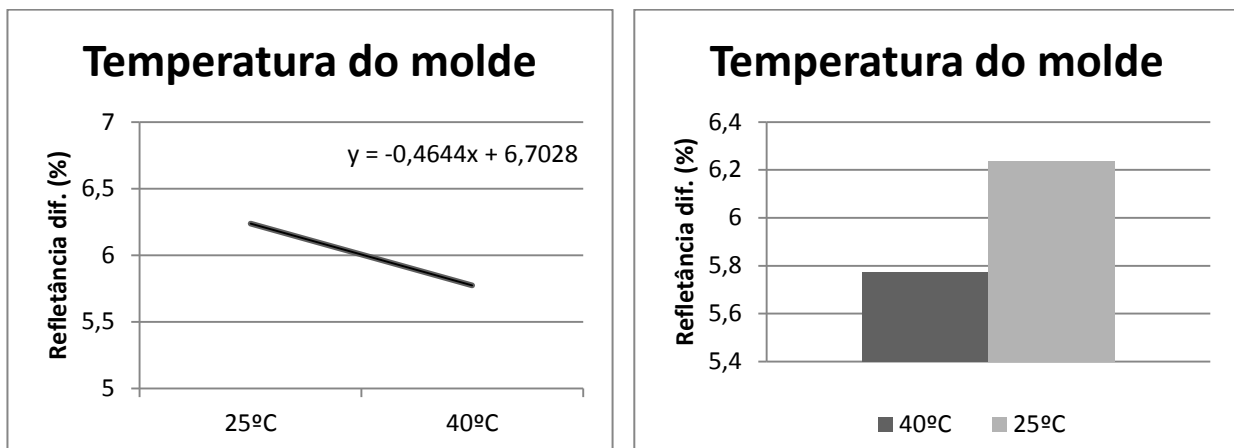


**Figura 35 - Efeito da espessura na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas**



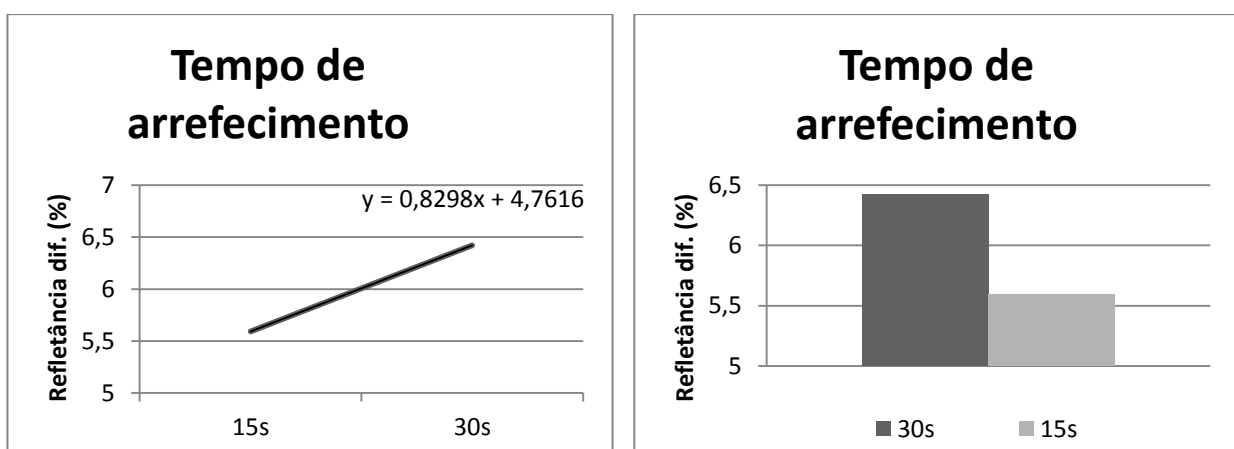
A temperatura do molde teve um efeito negativo de 0.46% em média nos valores registados para a refletância difusa. Verificando-se uma diminuição em média de 0.46% da radiação refletida de forma difusa quando se utilizou uma temperatura do molde de 25°C em vez de uma temperatura de 40°C.

O efeito desta variável deve-se ao facto de com a diminuição da temperatura do molde existe um aumento da casca e com isso um menor número de cadeias disponíveis para criar esferulites. Levando a que as cadeias que se encontram no núcleo produzam esferulites com um maior diâmetro e consequentemente existe perda de transparência e por essa razão mais radiação é refletida.



**Figura 36 - Efeito da temperatura do molde na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde obtidas.**

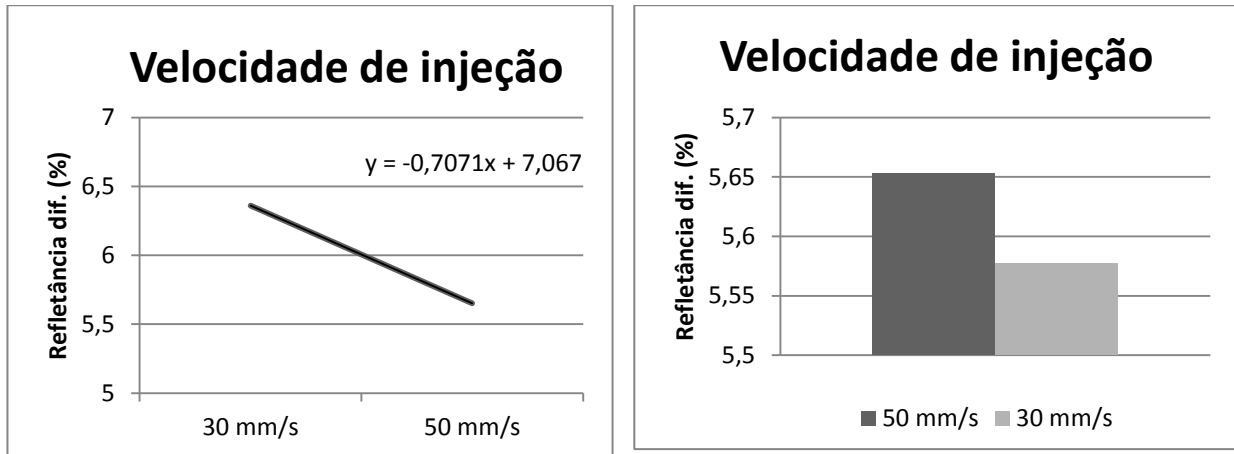
Neste estudo verificou-se que houve um aumento de 0.83% em média na percentagem da radiação refletida de forma difusa nos provetes onde o tempo de arrefecimento utilizado foi de 30s em relação aos provetes onde esse tempo foi de 15s.



**Figura 37 - Efeito do tempo de arrefecimento na refletância difusa e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados**

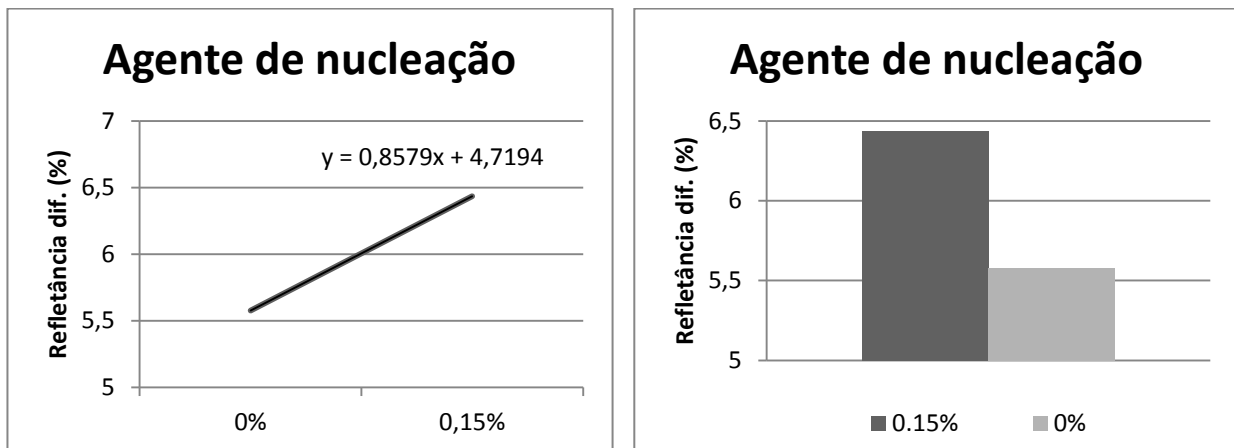


A velocidade de injeção teve uma influência negativa na radiação refletida de forma difusa, tendo sido obtido um efeito de 0.71%. Verificando-se uma diminuição em média dos valores registados quando se utilizou uma velocidade de injeção de 30 mm/s em vez de 50 mm/s.



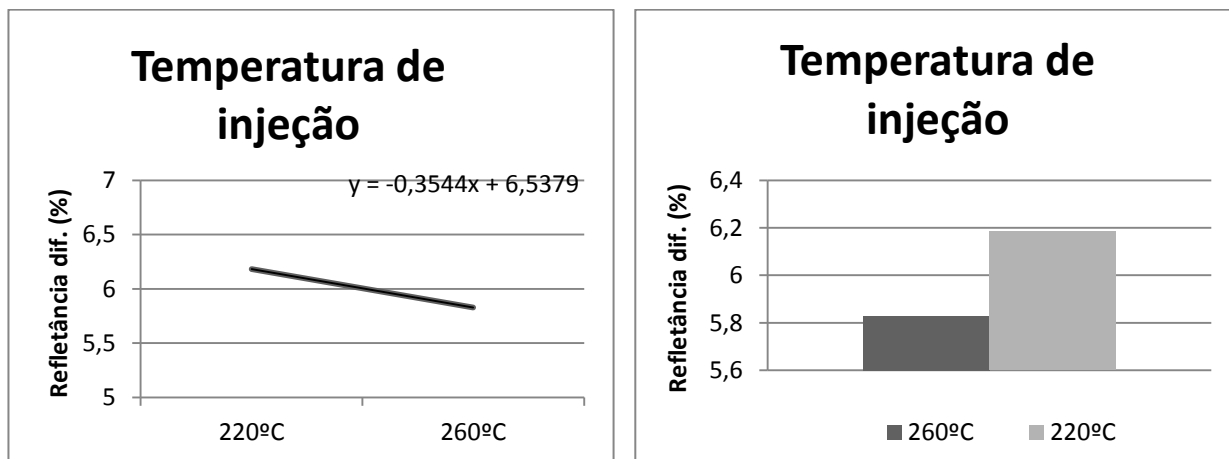
**Figura 38 - Efeito da velocidade de injeção na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas**

O agente de nucleação teve um efeito de 0.86% na resposta. Este valor significa que se obteve um aumento de 0.86% em média na percentagem de radiação refletida de forma difusa nos provetes onde foi utilizado o agente de nucleação em relação aos provetes onde não foi utilizado este agente.



**Figura 39 - Efeito do agente de nucleação na refletância difusa e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas.**

Verificou-se que a temperatura de injeção foi a variável com menor influência nos valores registados quando se estudou a refletância difusa. Esta variável teve um efeito negativo na resposta de 0.35%. Podendo-se concluir que em média usando o valor mais elevado de temperatura de injeção que foi de 260°C iremos obter uma diminuição da percentagem de radiação refletida de forma difusa.



**Figura 40 - Efeito da temperatura de injeção na reflêtância difusa e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas**

### 4.3. NIR Reflêtância especular

Na Tabela 17 estão apresentados os valores da média e do desvio padrão obtidos no ensaio de NIR reflêtância especular, os valores obtidos para cada provete estudados por experiência estão apresentados no anexo 3.

Na Figura 41 estão ilustrados os valores médios da reflêtância especular obtida em cada experiência bem como os respectivos desvios padrão.

**Tabela 17 - Valores da média e desvio padrão obtidos nos ensaios de NIR Reflêtância especular**

Experiência	Média	Desvio padrão
1	8,9	0,66
2	10,2	0,79
3	9,3	0,53
4	9,7	0,61
5	13,3	0,60
6	8,9	0,84
7	9,8	0,49
8	9,9	0,68

Quanto a reflêtância especular os valores de registados foram superiores aos valores registados na reflêtância difusa.



Também é possível observar pelos resultados obtidos que as experiências com maior espessura, experiências 5,6,7 e 8, registaram valores superiores às experiências 1,2,3 e 4 onde a espessura era menor.

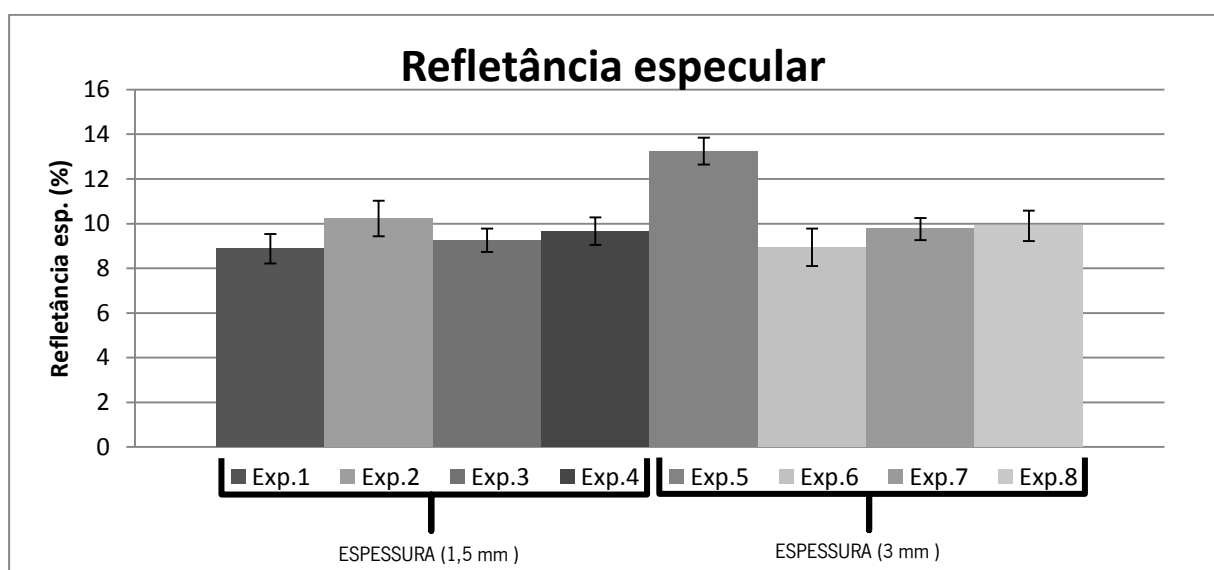
E também como se tinha observado pelos valores de refletância difusa, os valores registados relativos a refletância especular também foram superiores nos provetes onde se utilizou o agente de nucleação em relação aos que não foi utilizado agente nenhum.

A experiência que obteve o valor mais alto de refletância especular foi a experiência 5 com um valor de 13.3% e um desvio padrão de 0.60, e contrariamente a experiência que obteve o valor mais baixo de quantidade de radiação refletida de forma especular foi a experiência 1 com um valor de 8.9% e um desvio padrão de 0.66.

A experiência 6 obteve um valor de 8.9% e um desvio padrão de 0.84, que foi o desvio padrão mais elevado de entre os desvios padrão obtidos.

A experiência 2 obteve o segundo valor mais alto dos valores registados com um valor de 10.2% e um desvio padrão de 0.79.

As experiências 3,4,7 e 8 registaram valores na ordem do 9% de luz refletida de forma especular.



**Figura 41 - Valores da média da refletância especular obtida em cada experiência e respectivos desvios padrão**

Na Tabela 18 estão apresentadas as variáveis em estudo bem como os seus valores máximos e mínimos.

**Tabela 18 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos**

		<b>Nível +</b>	<b>Nível -</b>	<b>Unidades</b>
<b>A</b>	Espessuras	3	1.5	mm
<b>B</b>	Temperatura do molde	40s	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Velocidade de injeção	50	30	mm/s
<b>E</b>	Agente de nucleação	0.15	0	%
<b>F</b>	Temperatura de injeção	260	220	°C

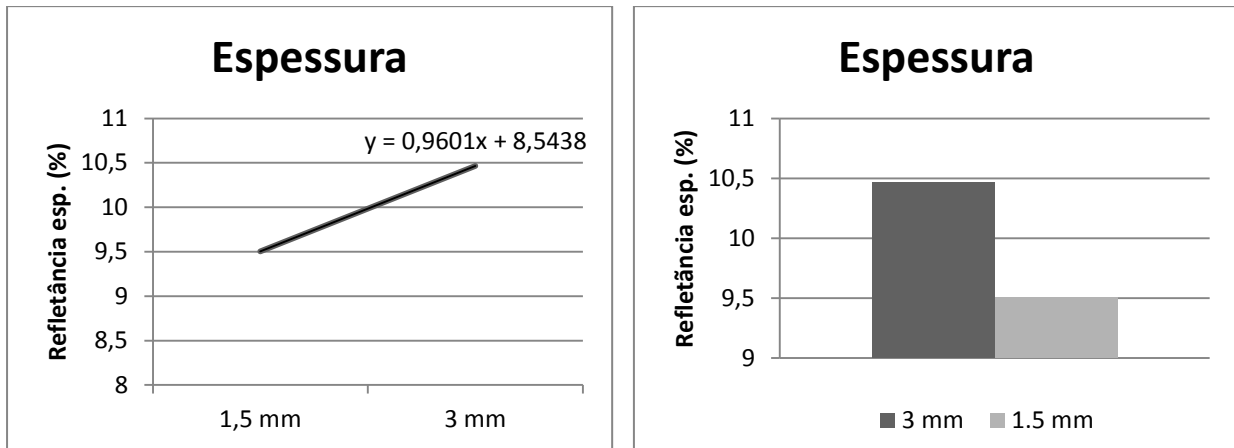
Na Tabela 19 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de NIR Refletância especular (resposta) para cada experiência e os efeitos de cada variável na resposta.

**Tabela 19 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de NIR Refletância especular e os efeitos das variáveis na resposta**

<b>Exp</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>Resposta</b>
<b>1</b>	-	-	-	-	-	-	8,871
<b>2</b>	-	-	-	+	+	+	10,229
<b>3</b>	-	+	+	-	-	+	9,253
<b>4</b>	-	+	+	+	+	-	9,663
<b>5</b>	+	-	+	-	+	-	13,252
<b>6</b>	+	-	+	+	-	+	8,937
<b>7</b>	+	+	-	-	+	+	9,763
<b>8</b>	+	+	-	+	-	-	9,904
<b>Média -</b>	9,504	10,322	9,692	10,285	9,241	10,423	
<b>Média +</b>	10,464	9,646	10,276	9,683	10,727	9,545	
<b>Efeito</b>	0,960	-0,676	0,584	-0,601	1,486	-0,877	

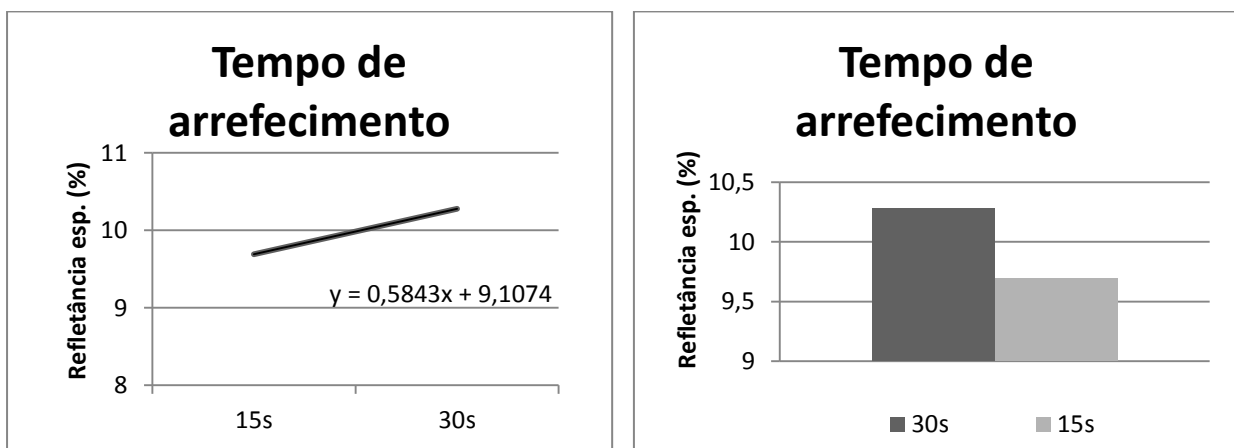
A espessura teve um efeito positivo sobre a resposta de 0.96%. Deste modo os provetes com maior espessura que neste estudo eram de 3 mm registaram uma percentagem de luz refletida de forma especular superior aos provetes que tinham uma espessura de 1.5 mm.





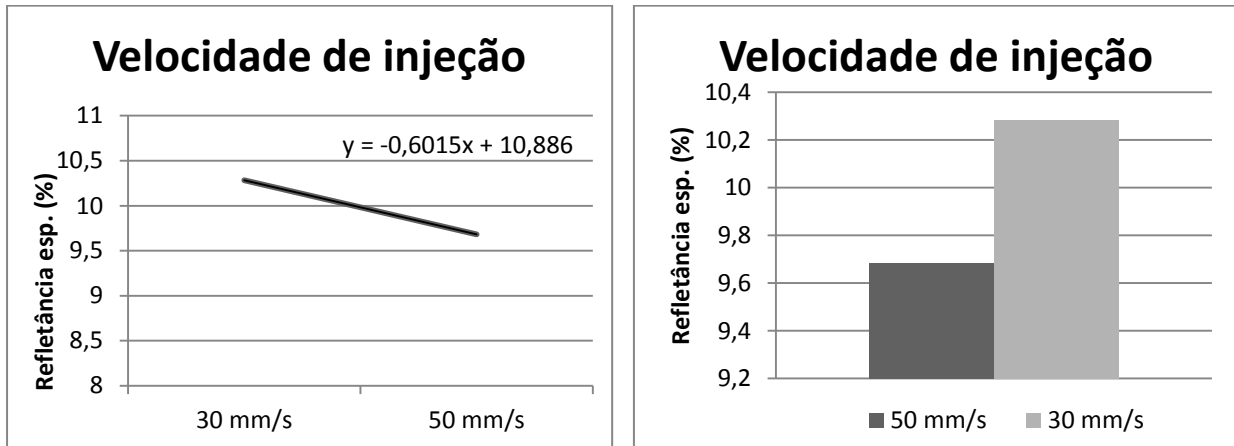
**Figura 42 - Efeito da espessura na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas**

Verificou-se que a variável que teve menor influência na refletância especular nos provetes estudados foi o tempo de arrefecimento registando um efeito sobre a resposta de 0.59%. Isto significa que se registou um aumento de 0.59% em média na percentagem refletida de forma especular nos provetes onde foi utilizado um tempo de arrefecimento de 30 segundos em relação aos provetes onde se utilizou um tempo de arrefecimento de 15 segundos.



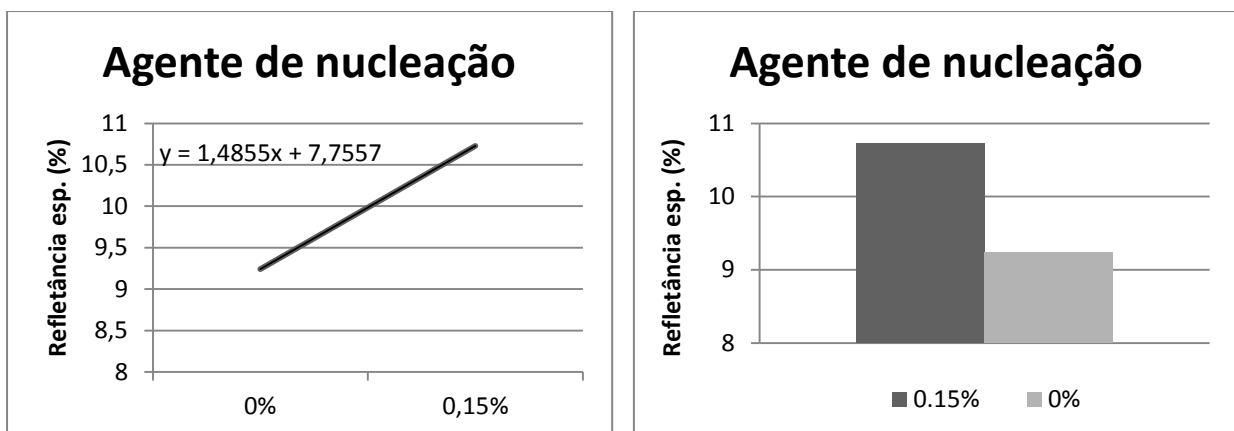
**Figura 43 - Efeito do tempo de arrefecimento na refletância especular e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados**

Em relação a velocidade de injeção, registou-se um aumento de 0.60% em média na percentagem de luz refletida pelos provetes onde foi utilizada uma velocidade de 30 mm/s em relação aos provetes onde foi utilizada uma de 50 mm/s.



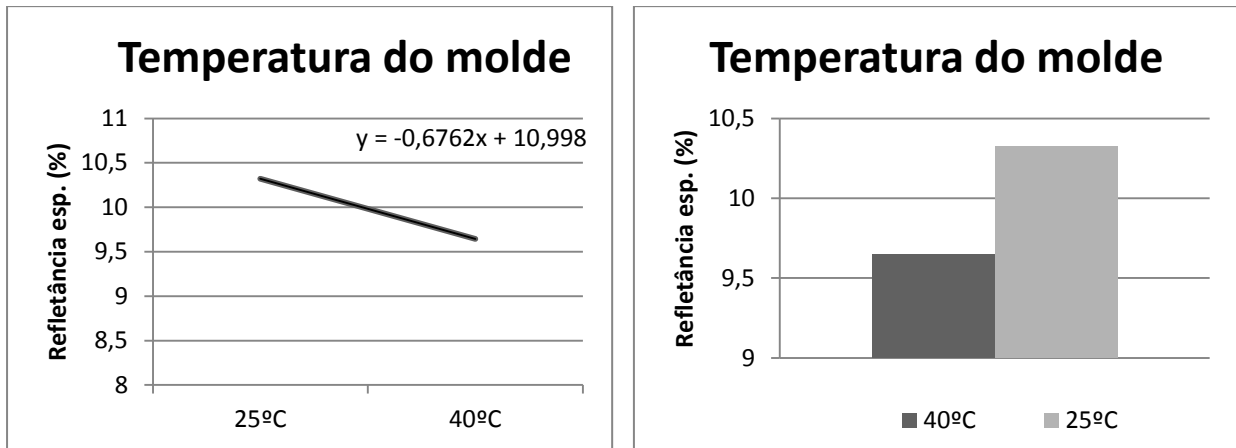
**Figura 44 - Efeito da velocidade de injeção na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas**

A variável que teve maior influência na refletância especular foi o agente de nucleação, esta variável teve um efeito de 1.49% sobre a resposta. Este valor significa que se registou um aumento em média na percentagem de luz que foi refletida de forma especular nos provetes onde foi utilizado o agente de nucleação em relação aos provetes onde não foi utilizado esse agente.

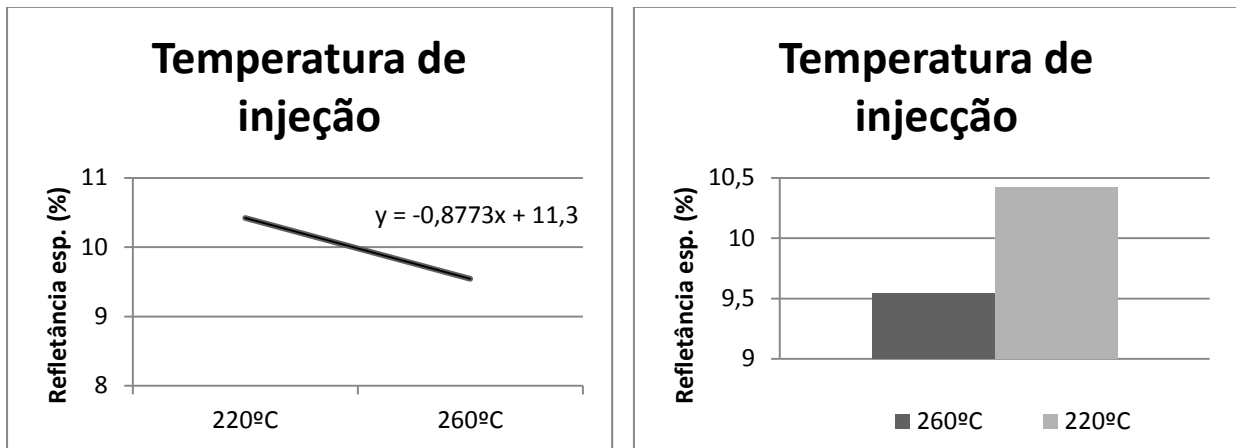


**Figura 45 - Efeito do agente de nucleação na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente de nucleação estudadas.**

A temperatura do molde e a temperatura de injeção registaram efeitos negativos sobre a resposta, de 0.68% e 0.88% respetivamente. Deste modo podemos concluir que se usarmos as temperaturas mais altas iremos ter uma diminuição da luz refletida. No caso da temperatura do molde registou-se um aumento de 0.68% em média na percentagem de luz refletida pelos provetes onde foi utilizada a temperatura do molde de 25°C em relação aos provetes onde se utilizou uma de 40°C.



**Figura 46 - Efeito da temperatura do molde na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas**



**Figura 47 - Efeito da temperatura de injeção na refletância especular e os valores médios obtidos para as duas temperaturas estudadas**



#### 4.4. Passagem do laser usando os provetes como filtros

O trabalho apresentado neste ponto teve como objetivo perceber como a transmissão da radiação afetava a quantidade de energia que chegava à parte absorvente. Neste sentido foram comparados os diâmetros finais do feixe de laser quando existe ou não material transparente. Nestes testes foram posicionados diferentes provetes injetados com as condições da Tabela 3. Estes provetes ficaram posicionados a uma distância de 2 mm do material absorvente.

Para a obtenção das imagens foi utilizada a lupa Estereoscópica Olympus com uma ampliação 0.67x1.67 e a máquina Digital Leica.

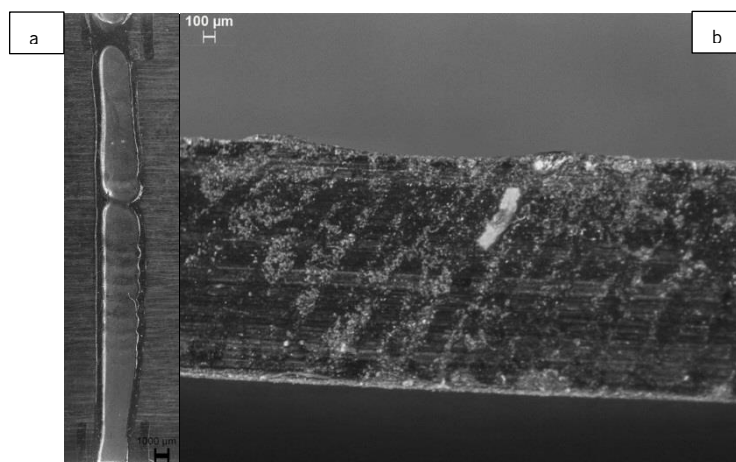
As imagens obtidas foram utilizadas para uma comparação qualitativa ente experiências.

Nas imagens que se seguem estão apresentadas as marcas da passagem do laser sobre o componente absorvente do conjunto sem e com filtro (material transparente).

Na Figura 48 é apresentada a marca deixada pela passagem do laser na placa absorvente (a), bem como a secção transversal do provete onde é possível observar a deformação da placa devido a passagem do laser (b).

Pela imagem obtidas através dos ensaios foi possível observar que quando o laser é aplicado diretamente no componente absorvente a marca deixada por este é superior quando comparado com a utilização de filtros.

Isto deveu-se ao facto de não ter havido perda de energia por reflexão no componente responsável pela transmissão da energia para o componente inferior.

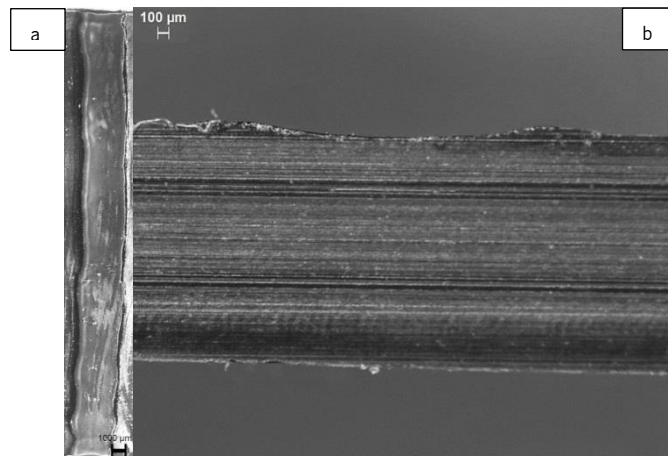


**Figura 48 - Sem filtro, laser directamente na peça absorvente**



Na Figura 49 é apresentada a marca deixada pela passagem do laser na placa absorvente (a), bem como a secção transversal do provete onde é possível observar a deformação da placa devido a passagem do laser (b).

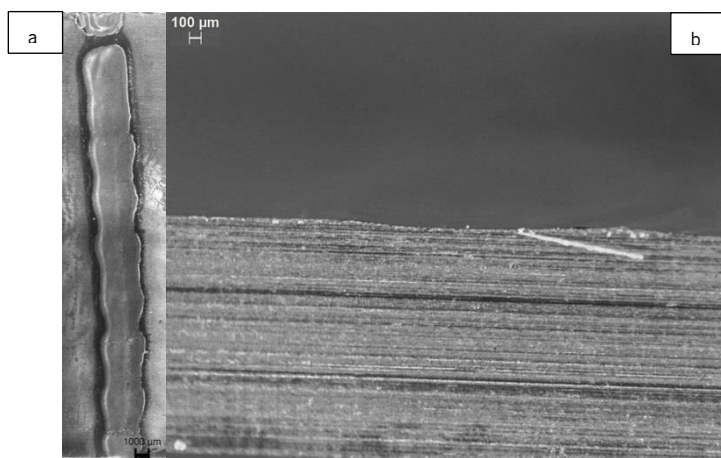
Também foi possível observar que a marca é menor nos provetes onde o filtro tinha uma espessura de 3 mm, Figura 53 e Figura 56, em relação à utilização de um filtro com uma espessura de 1.5 mm, Figura 49 e Figura 50. Facto já esperado devido à diminuição em 13% da quantidade de energia transmitida registada nos ensaios de NIR quando se aumentou a espessura.



**Figura 49 - Filtro experiência 1**

Na Figura 50 é apresentada a marca deixada pela passagem do laser na placa absorvente (a), bem como a secção transversal do provete onde é possível observar a deformação da placa devido a passagem do laser (b).

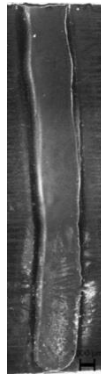
Tendo em conta os resultados obtidos pode-se observar que quando se aditivou os provetes usados como filtro, com agente de nucleação, a marca observada foi de menor profundidade. Este facto era esperado devido aos valores registados no ensaio de NIR. Este resultado é apresentado na Figura 50, Figura 53.



**Figura 50 - Filtro experiência 2**



Na Figura 51 foi possível observar que a marca deixada pelo laser tem uma largura de 3 mm.



**Figura 51 - Filtro experiência 3**

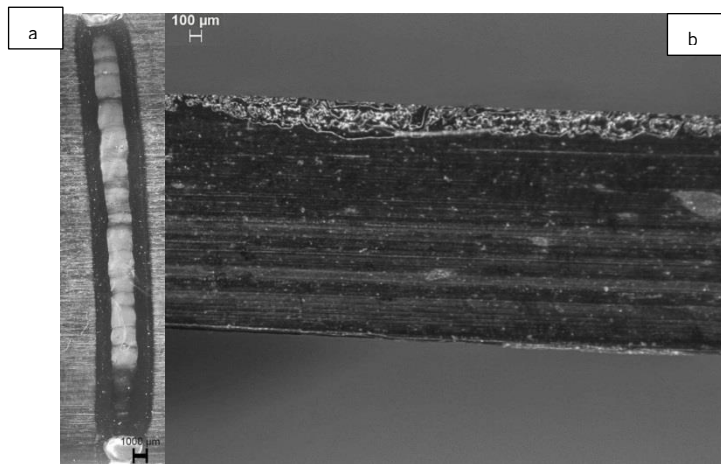
Na Figura 52 foi possível observar que a marca deixada pelo laser tem uma largura de 3.5 mm



**Figura 52 - Filtro experiência 4**

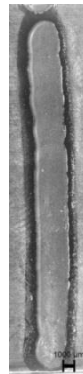
Na Figura 53 é apresentada a marca deixada pela passagem do laser na placa absorvente (a), bem como a secção transversal do provete onde é possível observar a deformação da placa devido a passagem do laser (b).

Também foi possível observar na Figura 53 que não existe qualquer profundidade deixada pela passagem do laser. Este resultado deve-se ao facto de a energia que chegou o componente absorvente ser insuficiente. Um resultado já esperado devido a esta experiência ter registado uma reduzida transmitância nos ensaios de NIR e valores de refletância mais elevados que as outras experiências.



**Figura 53 - Filtro experiência 5**

Na Figura 54 foi possível observar que a marca deixada pelo laser tem uma largura de 4 mm.



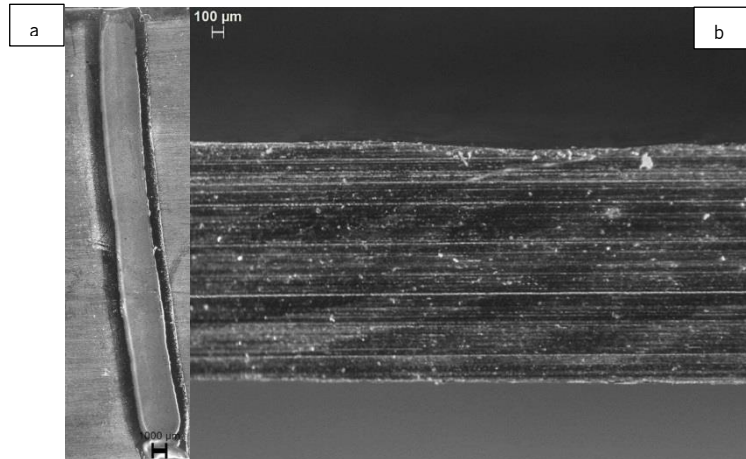
**Figura 54 - Filtro experiência 6**

Na Figura 55 foi possível observar que a marca deixada pelo laser tem uma largura de 4.2 mm.



**Figura 55 - Filtro experiência 7**

Na Figura 56 é apresentada a marca deixada pela passagem do laser na placa absorvente (a), bem como a secção transversal do provete onde é possível observar a deformação da placa devido a passagem do laser (b).



**Figura 56 - Filtro experiência 8**

## **4.5. Tração 1**

### **4.5.1. Força máxima**

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados do ensaio de tração realizado aos provetes soldados por soldadura a laser. Os valores apresentados referem-se à força máxima atingida em cada ensaio. São apresentados apenas três valores de desempenho mecânico, para cada experiência, devido aos valores obtidos de alguns provetes serem demasiados dispares dos restantes.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 1 mm/min.

No Figura 57 estão ilustrados os valores médios da força máxima atingida em cada experiência bem como os respetivos desvios padrão.

As experiências estudadas neste ensaio de tração são relativas ao primeiro plano de experiências apresentado.



**Tabela 20 - Força máxima atingida no ensaio de tração**

Exp	.1	.2	.3	.4	.5	Média	Desvio Padrão
1		326,896	275,525		283,384	295	28
2	267,307		273,291	194,335		245	44
3		316,652		219,115	328,390	288	60
4			307,337	356,309	234,501	299	61
5		483,966	527,430		450,881	487	38
6		261,378	306,368	351,207		306	45
7		405,033	409,627		404,501	406	3
8	411,058			331,712	220,768	321	96

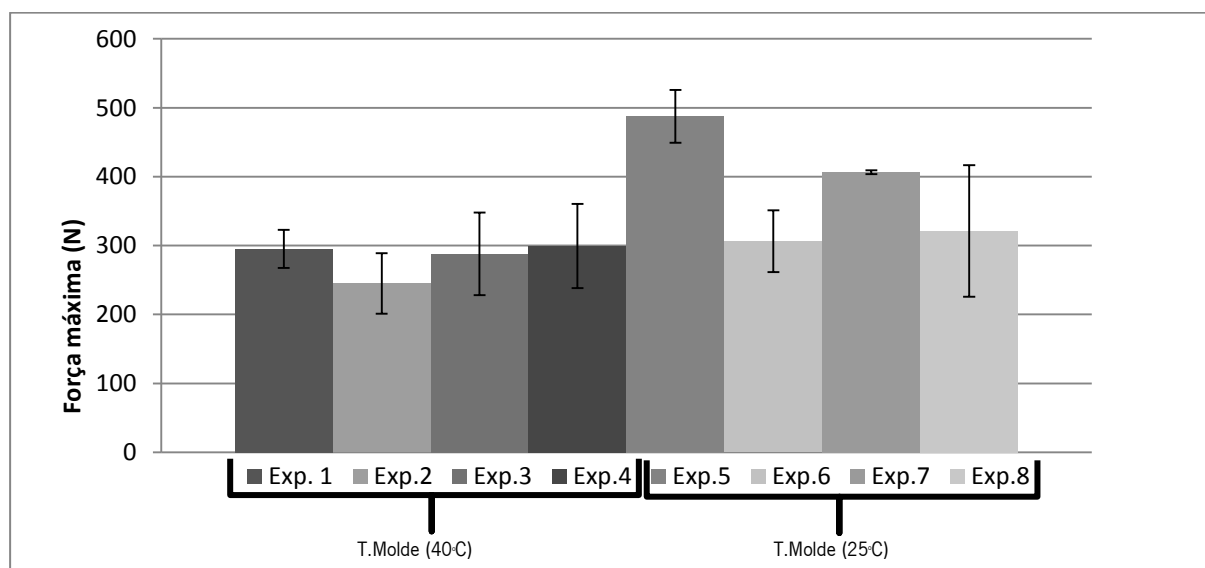
A experiência que registou os melhores valores em termos de força máxima obtida nos ensaios de tração realizados foi a experiência 5. Esta experiência registou um valor de 487N, com um desvio padrão de 38.

Por outro lado a experiência que registou os piores resultados foi a experiência 2 com um valor de força máxima de 245N e um desvio padrão de 44.

A experiência 1 registou um valor de força máxima de 295N e um desvio padrão de 28, a experiência 3 registou um valor de força máxima de 288N e um desvio padrão de 60, a experiência 4 registou um valor de força máxima de 299N e um desvio padrão de 61, a experiência 6 registou uma força máxima de 306N e um desvio padrão de 45, a experiência 7 registou uma força máxima de 406N e um desvio padrão de 3 e a experiência 8 registou uma força máxima de 321N e um desvio padrão de 56.

Os desvios padrão registados deveram-se ao facto de este tipo de soldadura ser influenciada por vários fatores. Desde as variáveis operatórias da moldação por injeção das peças que são soldadas, às variáveis operatórias do laser que são utilizadas para se proceder a soldadura.

Com base nestes resultados obtidos também é possível observar que as experiências 5,6,7 e 8 onde foi utilizado uma temperatura do molde mais baixa registaram valores de força máxima obtida nos ensaios de tração realizados superiores às experiências 1,2,3 e 4 onde a temperatura do molde era mais elevada.



**Figura 57 - Valores da média da força máxima atingida em cada experiência e respectivos desvios padrão**

#### 4.5.2. Deslocamento máximo

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados do ensaio de tração realizado aos provetes soldados por soldadura a laser. Os valores apresentados referem-se ao deslocamento máximo atingido em cada ensaio.

No Figura 58 estão ilustrados os valores médios do deslocamento máximo atingido em cada experiência bem como os respetivos desvios padrão.

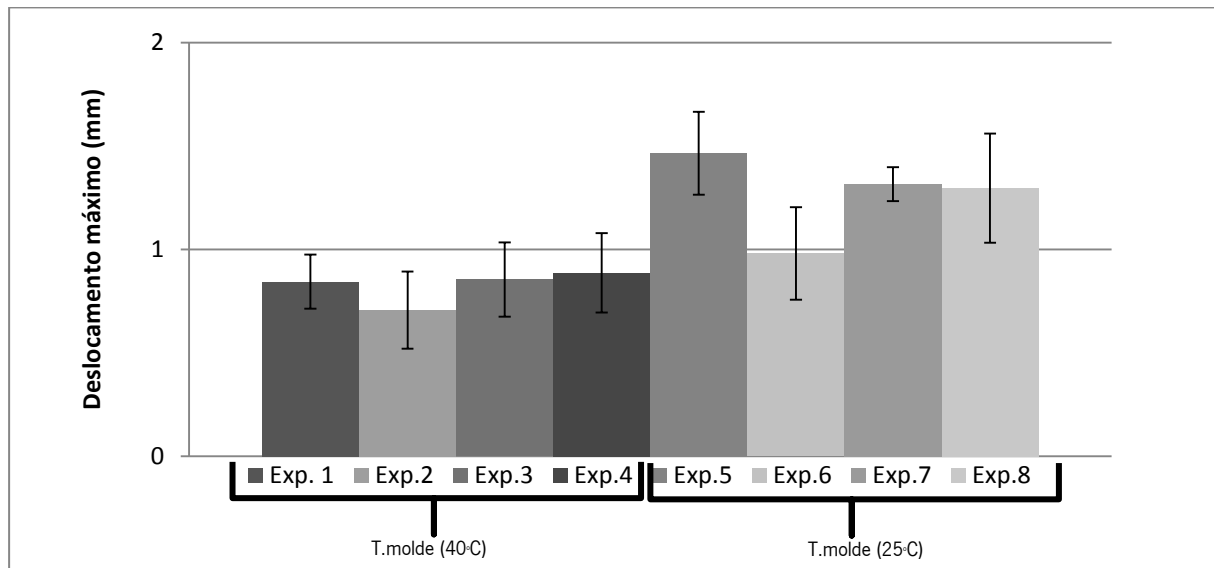
**Tabela 21 - Valores registados de deslocamento máximo dos provetes estudados, média e desvio padrão**

Exp	.1	.2	.3	.4	.5	Média	Desvio Padrão
1		0,791	0,748		0,993	0,844	0,131
2	0,864		0,756	0,501		0,707	0,187
3		0,989		0,651	0,924	0,855	0,180
4			0,904	1,069	0,686	0,887	0,192
5		1,449	1,674		1,274	1,466	0,201
6		0,851	0,853	1,239		0,981	0,224
7		1,253	1,409		1,288	1,317	0,082
8	1,586			1,068	1,238	1,297	0,264

Também como nos valores registados para a força máxima obtida as experiências que registaram os valores mais elevados de deslocamento máximo foram as experiências 5,6,7 e 8 onde a temperatura



do molde era mais baixa. Estes valores eram espectáveis tendo em conta que a quanto maior for a força máxima obtida em ensaios com o mesmo material maior será o deslocamento obtido.



**Figura 58 - Valores da média do deslocamento máximo obtido em cada experiência e respectivos desvios padrão**

Na Tabela 22 estão apresentadas as variáveis em estudo bem como os seus valores máximos e mínimos.

**Tabela 22 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos**

		Nível +	Nível -	Unidades
<b>A</b>	Materiais	Homopolimero	Copolimero	
<b>B</b>	Temperatura do molde	40	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Potência do laser	30	15	w
<b>E</b>	Velocidade do Laser	40	20	Cm/min
<b>F</b>	Diâmetro do laser	2	1	mm

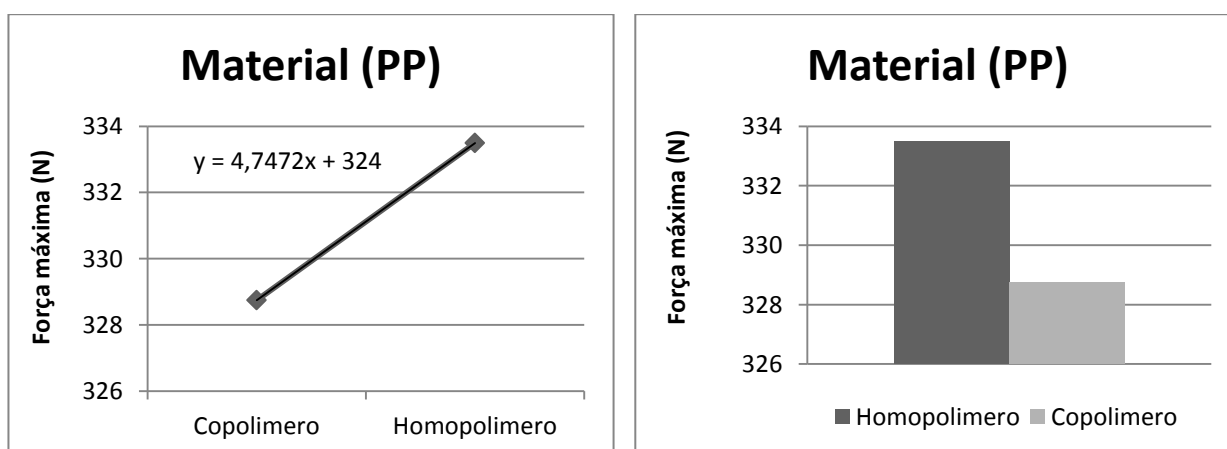


Na Tabela 23 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio Tração, força máxima (resposta) para cada experiência e os efeitos de cada variável na resposta.

**Tabela 23 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de tração (Força máxima) e o efeito das variáveis na resposta**

Exp	A	B	C	D	E	F	Resposta
1	+	+	+	+	+	+	295,268
2	+	+	+	-	-	-	244,978
3	-	+	-	+	+	+	288,052
4	-	+	-	-	-	-	299,382
5	+	-	-	+	-	-	487,426
6	+	-	-	-	+	+	306,318
7	-	-	+	+	-	-	406,387
8	-	-	+	-	+	+	321,179
Média -	328,750	380,327	345,294	292,964	359,543	359,543	
Média +	333,497	281,920	316,953	369,283	302,704	302,704	
Efeito	4,747	-98,407	-28,341	76,319	-56,839	-56,839	

A variável que teve menor influência no desempenho mecânico nos provetes estudados neste estudo foi a variável material. Neste estudo foram utilizados dois tipos de polipropileno (PP), um homopolímero e um copolímero com o intuito de se verificar qual das duas morfologias registava um melhor desempenho mecânico, como está ilustrado na Figura 59 observou-se um aumento de 4.75N no desempenho mecânico em média nos provetes de PP homopolímero em relação aos de PP copolímero. Mas também é possível verificar na Tabela 23 que esse efeito não é muito significativo em relação aos efeitos registados por outras variáveis.

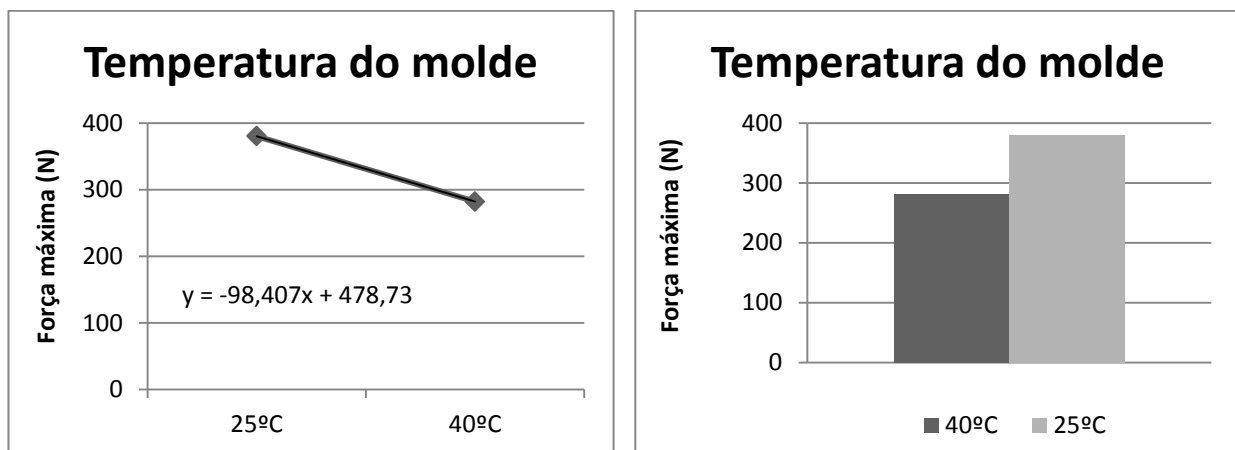


**Figura 59 - Efeito do material na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois materiais estudados**



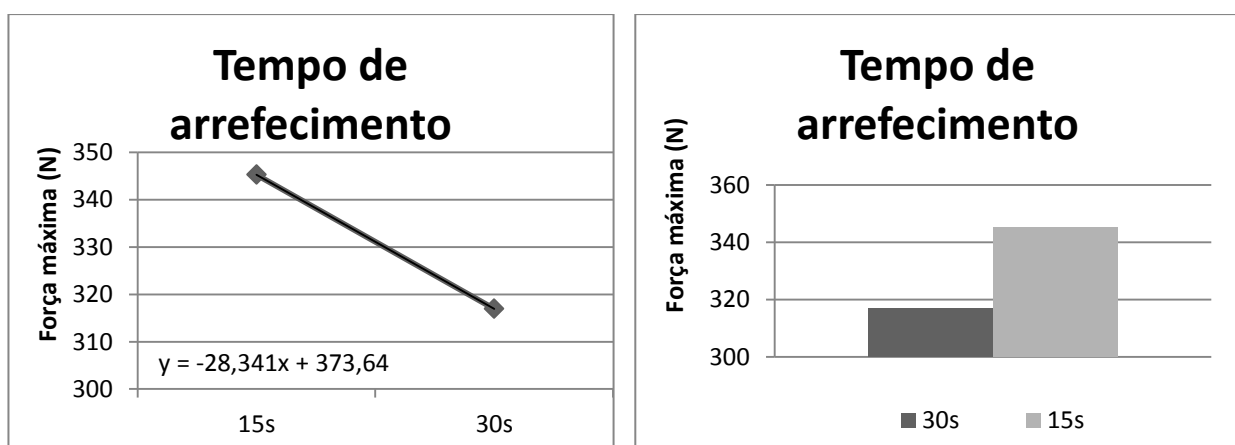
A variável que teve maior influência sobre o desempenho mecânico dos provetes estudados foi a temperatura do molde, onde se obteve um efeito negativo de 98.42N. Como é possível observar na Figura 60 registou-se uma diminuição do desempenho mecânico quando se aumentou a temperatura do molde de 25°C para 40°C.

O efeito desta variável deve ao facto de com a diminuição da temperatura do molde, o arrefecimento do material é mais brusco o que leva a um aumento da casca, logo mais área disponível para a união das peças e por essa razão uma melhor mistura entre os dois materiais e consequentemente um aumento do desempenho mecânico.



**Figura 60 - Efeito da temperatura do molde na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas**

O tempo de arrefecimento registou um efeito negativo sobre a resposta, de 28.34N. O que quer dizer que observou-se um aumento de 28.34N em média nos valores registados para os provetes onde esse tempo foi de 15 segundos em oposição aos provetes onde esse tempo foi de 30 segundos.

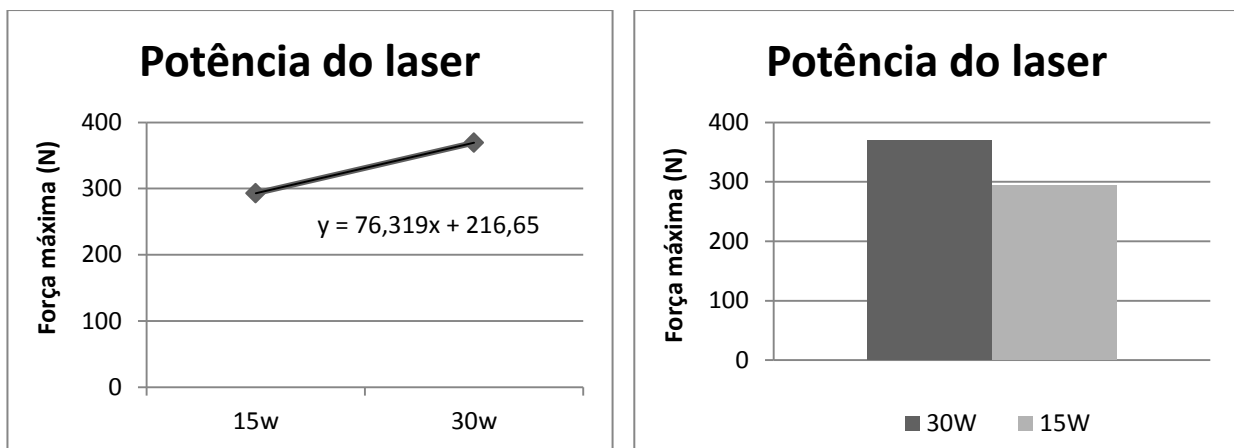


**Figura 61 - Efeito do tempo de arrefecimento na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as dois tempos de arrefecimentos estudados**



Através dos dados obtidos do ensaio de tração pode-se verificar que houve um aumento de 76.32N entre os valores registados para os provetes que foram soldados com uma potência do laser de 30W em relação onde essa potência foi de 15W, o que significa que esta variável teve um efeito positivo sobre a resposta. Quando se aumentou o valor da potência obteve-se melhores resultados.

O efeito desta variável deve ao facto de que com o aumento da potência, é emitida mais energia para as peças o que provoca um aumento da temperatura na interface de ligação que leva a uma melhor mistura dos dois materiais e consequentemente um melhor do desempenho mecânico do conjunto.

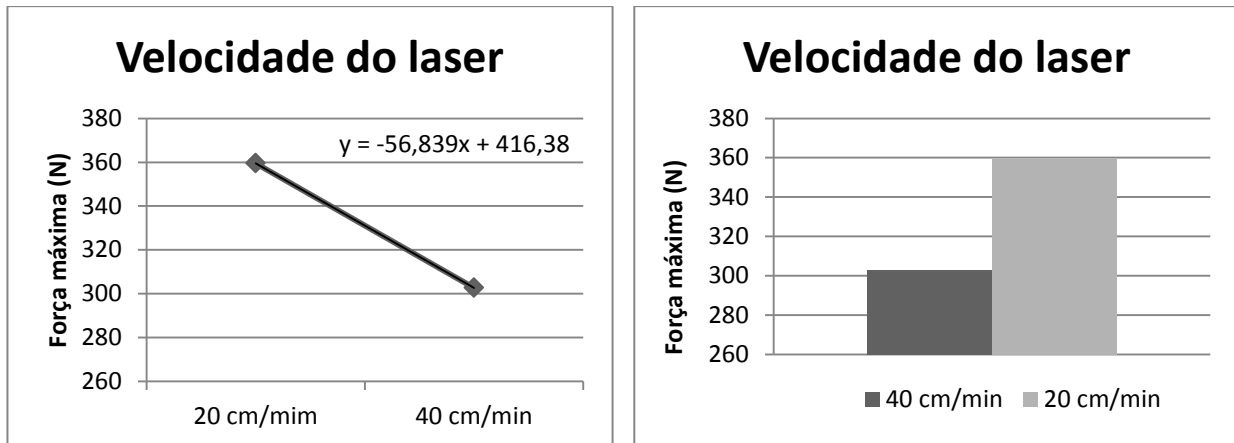


**Figura 62 - Efeito da potência do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas potências do laser estudadas**

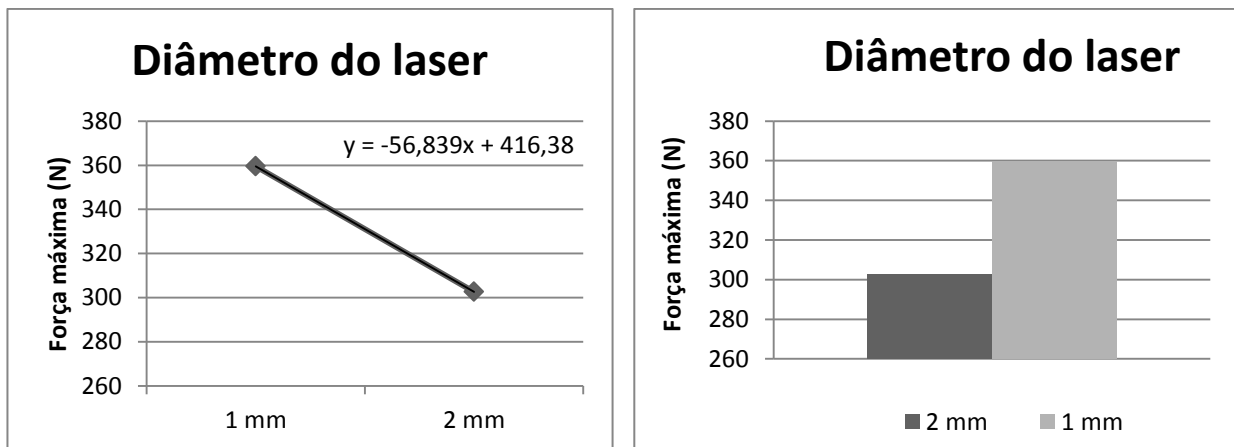
O diâmetro do laser e velocidade do laser tiveram a mesma influência sobre a resposta. Registou-se um efeito negativo de 56.84N. O que significa que os provetes onde foi utilizado o menor diâmetro do laser e a menor velocidade apresentaram valores superiores aos registados para os provetes onde o valor destas variáveis foi mais elevado.

O efeito da velocidade do laser deve-se ao facto de com a diminuição da velocidade do laser se aumentar o tempo de soldadura, o que leva a uma melhor mistura dos dois materiais logo um aumento do desempenho mecânico do conjunto.

Por sua vez o efeito do diâmetro do laser deve ao facto de que com a diminuição do diâmetro, existe maior débito de energia por área o que melhora a união dos dois materiais e consequentemente um aumento do desempenho mecânico do conjunto.



**Figura 63 - Efeito velocidade do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas velocidades do laser estudadas**



**Figura 64 - Efeito do diâmetro do laser na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois diâmetros do laser estudados**

## 4.6. Tração 2

### 4.6.1. Força máxima

Na Tabela 24 estão apresentados os resultados do ensaio de tração realizado aos provetes soldados por soldadura a laser. Os valores apresentados referem-se à força máxima atingida em cada ensaio. São apresentados apenas quatro valores de desempenho mecânico, para cada experiência, devido aos valores que não são apresentados serem demasiado díspares dos restantes.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 1 mm/min.



Na Figura 65 estão ilustrados os valores médios da força máxima atingida em cada experiência bem como os respetivos desvios padrão.

As experiências estudadas neste ensaio de tração são relativas ao segundo plano de experiências apresentado.

**Tabela 24 - Força máxima atingida no ensaio de tração**

Exp	.1	.2	.3	.4	.5	.6	Média	Desvio Padrão
1		390,887	356,142	310,381	218,582		319	75
2	656,788			561,976	586,089	430,266	559	95
3	266,624	333,595			410,223	308,196	330	60
4	194,287	233,467	370,646		368,023		292	91
5	439,111	613,181		607,038	514,404		543	83
6	271,678	421,143	426,579		435,631		389	78
7			406,273	356,102	328,287	299,247	347	46
8	603,517		658,178	585,747	596,380		611	32

A experiência que registou o melhor desempenho mecânico, em relação a força máxima atingida durante os ensaios de tração foi a experiência 8 como se pode observar na Figura 65, com uma força máxima de 611N. Esta experiência também foi a experiência que registou o menor desvio padrão, com um valor de 38.

Estes resultados deveram-se ao facto de nos provetes desta experiência terem sido obtidas soldaduras de boa qualidade e com muita semelhança entre elas.

Por outro lado a experiência 4 foi a que registou o pior resultado e com o pior desvio padrão, o valor registado para a força máxima foi de 292N e o desvio padrão de 91.

A experiência 1 registou um valor de força máxima de 319N e um desvio padrão de 75, a experiência 2 registou um valor de força máxima de 559N e um desvio padrão de 95, a experiência 3 registou um valor de força máxima de 330N e um desvio padrão de 60, a experiência 5 registou um valor de força máxima de 543N e um desvio padrão de 83, a experiência 6 registou um valor de força máxima de 389 e um desvio padrão de 78, a experiência 7 registou um valor de força máxima de 347N e um desvio padrão de 46.

É possível observar pelos resultados obtidos nos ensaios de tração efetuados que nas experiências 5,6,7 e 8 onde os provetes tinham espessura mais elevada (3mm) registaram-se valores em média

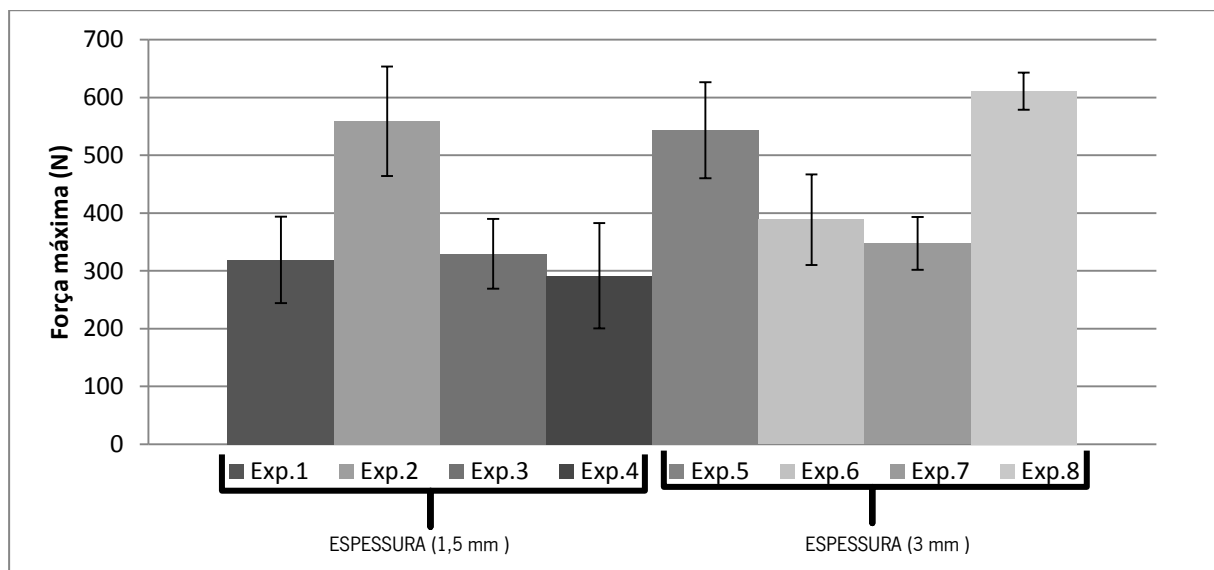




superiores aos valores registados nas experiências onde os provetes tinham apenas 1.5 mm de espessura.

Apenas a experiência 2 em que os provetes tinham 1.5 mm de espessura apresentou um valor superior as experiência 5, 6 e 7 em que os provetes tinham 3 mm de espessura.

Os desvios padrão registados nos ensaios de tração devem-se ao facto de este tipo de soldadura depender de vários fatores desde as variáveis operatórias da moldação por injeção às variáveis operatórias do laser e como é possível observar nas imagens no anexo 10 as soldaduras entre provetes com as mesmas condições não eram semelhantes.



**Figura 65 - Valores da média da força máxima atingida em cada experiência e respectivos desvios padrão**

#### 4.6.2. Deslocamento máximo

Na Tabela 25 estão apresentados os resultados do ensaio de tração realizado aos provetes soldados por soldadura a laser. Os valores apresentados referem-se ao deslocamento máximo atingido em cada ensaio.

Na Figura 66 estão ilustrados os valores médios do deslocamento máximo atingido em cada experiência bem como os respetivos desvios padrão.

**Tabela 25 - Valores registados de deslocamento máximo dos provetes estudados, média e desvio padrão**

Exp	.1	.2	.3	.4	.5	.6	Média	Desvio Padrão
1		2,379	1,868	1,841	1,094		1,796	0,529
2	3,273			2,876	2,849	1,666	2,666	0,694
3	0,964	1,516			2,058	1,436	1,494	0,448
4	0,653	0,963	2,254		2,898		1,692	1,062
5	1,546	2,001		1,966	1,634		1,787	0,230
6	2,646	1,231	1,463		1,538		1,719	0,631
7			3,063	2,579	2,768	2,469	2,720	0,260
8	2,296		2,031	2,211	2,794		2,333	0,327

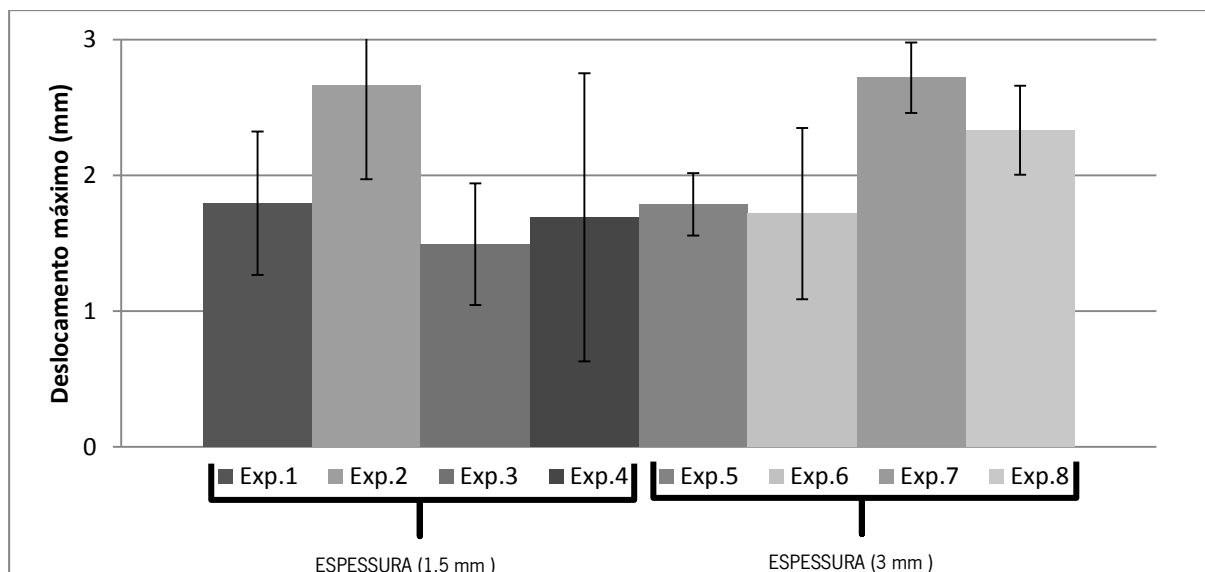
Como é possível observar pela Figura 66 a experiência que registou o deslocamento máximo maior foi a experiência 7 com um valor de 2.72mm e um desvio padrão 0.26 apesar de não ter sido a experiência que registou o valor mais elevado de força máxima obtida,

As experiências com espessura de 3 mm, experiências 5,6,7 e 8, foram as que registaram em média os valores mais elevados de deslocamento máximo.

A experiência que registou o valor mais baixo de deslocamento máximo os ensaios realizados foi a experiência 3 com um valor médio de 1.49 mm e um desvio padrão de 0.448.

A experiência 1 registou um valor de 1.8 mm, a experiência 2 obteve um valor de 2.7 mm, e a experiência 4 obteve um valor de 1.7mm.

As experiências 5 e 6 registaram valores de 1.8mm e 1.7 mm respetivamente, enquanto a experiência 8 registou um valor de 2.33 mm.



**Figura 66 - Valores da média do deslocamento máximo obtido em cada experiência e respectivos desvios padrão**

Na Tabela 26 estão apresentadas as variáveis em estudo bem como os seus valores máximos e mínimos.

**Tabela 26 - Variáveis estudadas e os valores máximos e mínimos**

		Nível +	Nível -	Unidades
<b>A</b>	Espessuras	3	1.5	mm
<b>B</b>	Temperatura do molde	40	25	°C
<b>C</b>	Tempo de arrefecimento	30	15	s
<b>D</b>	Velocidade de injeção	50	30	mm/s
<b>E</b>	Agente de nucleação	0.15	0	%
<b>F</b>	Temperatura de injeção	260	220	°C

Na Tabela 27 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio Tração, força máxima (resposta) para cada experiência e os efeitos de cada variável na resposta.

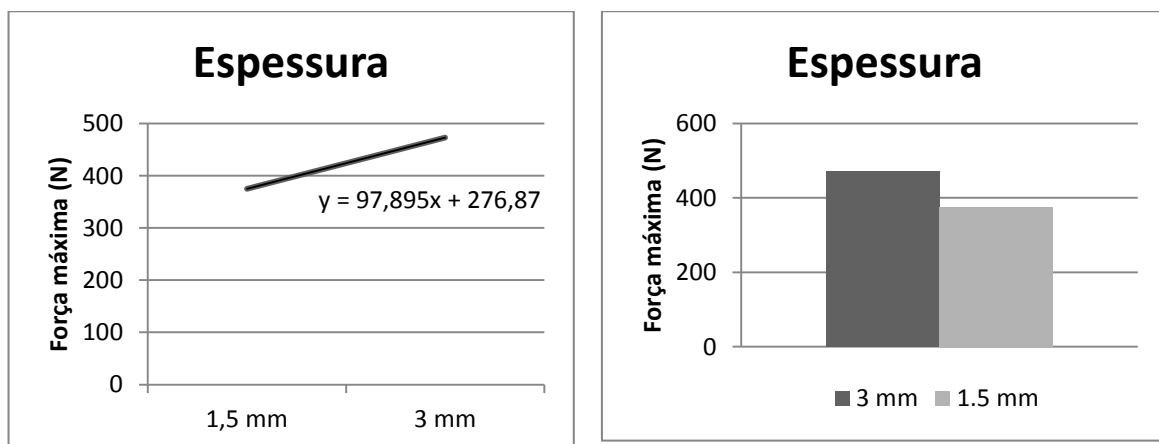


**Tabela 27 - Plano de experiências e a resposta obtida nos ensaios de tração (Força máxima) e o efeito das variáveis na resposta**

Exp	A	B	C	D	E	F	Resposta
1	-	-	-	-	-	-	318,998
2	-	-	-	+	+	+	558,780
3	-	+	+	-	-	+	329,660
4	-	+	+	+	+	-	291,606
5	+	-	+	-	+	-	543,434
6	+	-	+	+	-	+	388,758
7	+	+	-	-	+	+	347,477
8	+	+	-	+	-	-	610,956
<b>Média -</b>	374,761	452,492	459,053	384,892	412,093	441,248	
<b>Média +</b>	472,656	394,925	388,364	462,525	435,324	406,169	
<b>Efeito</b>	97,895	-57,568	-70,689	77,633	23,231	-35,080	

A variável que teve maior influência no desempenho mecânico (força máxima atingida) nos provetes estudados neste estudo foi a espessura. Esta variável teve um efeito positivo sobre a resposta, de 97.89N. O que quer dizer se registou um aumento de 97.87N entre os valores registados para os provetes com espessura mais elevada (3mm) e os provetes com espessura mais baixa (1.5mm). Como é possível observar no Figura 67 a força máxima em média registada para a espessura de 3 mm foi de 472.66N e para a 1.5 mm foi de 374.76N.

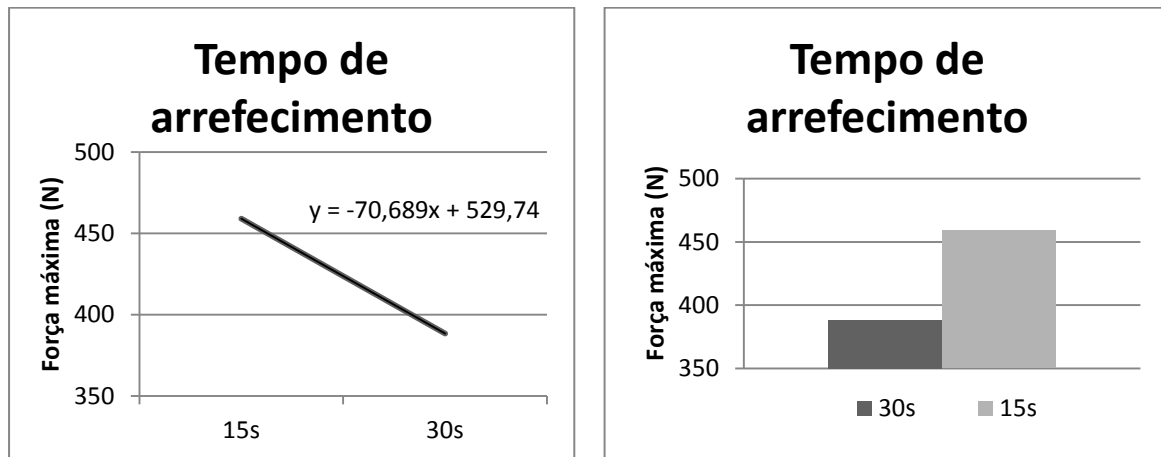
O efeito desta variável deve-se ao facto de com o aumento da espessura existe maior refração da luz e por essa razão um aumento da área resistente e consequentemente um aumento do desempenho mecânico.



**Figura 67 - Efeito da espessura na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas espessuras estudadas**



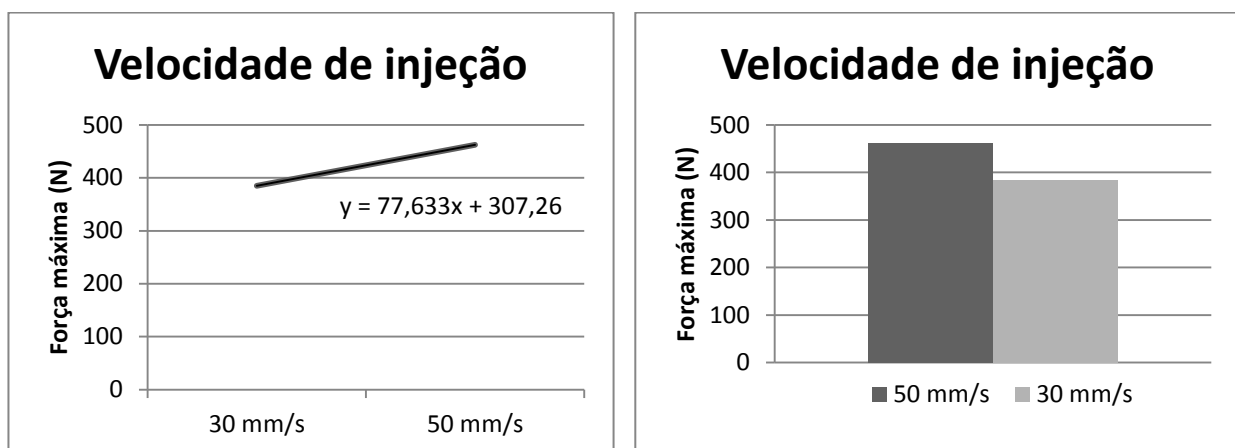
O tempo de arrefecimento também obteve um efeito negativo sobre a resposta. Este efeito foi de 70.69N, o que indica que se registaram melhores valores nos provetes onde foi utilizado um tempo de arrefecimento de 15 segundos em relação aos provetes onde o tempo de arrefecimento utilizado foi de 30 segundos.



**Figura 68 - Efeito do tempo de arrefecimento na na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para os dois tempos de arrefecimento estudados**

A velocidade de injeção por sua vez teve um efeito positivo no desempenho mecânico dos provetes estudados. Registou-se um aumento no desempenho mecânico de 77.63N em média nos provetes onde a velocidade de injeção foi de 50 mm/s em vez de 30 mm/s.

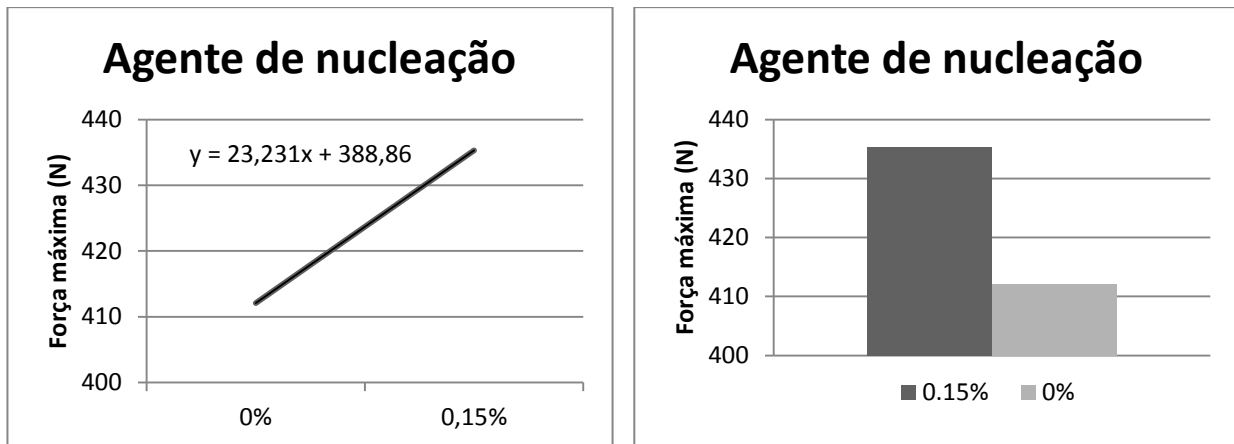
O efeito desta variável deve-se ao facto de que com o aumento da velocidade de injeção existe uma maior orientação molecular e consequentemente uma maior percentagem de energia que atravessa este componente sem ser refletida ou refratada. Levando assim a uma melhor união entre os dois materiais logo um melhor desempenho mecânico.



**Figura 69 - Efeito da velocidade de injeção na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas velocidades de injeção estudadas**



A variável que neste estudo teve menos influência na resposta foi o agente de nucleação. Foi registado um efeito positivo desta variável no desempenho mecânico dos provetes, de 23,23N. Este valor significa que se obteve um aumento em média da resposta nos provetes onde foi utilizado este agente em relação aos que não se utilizou agente nenhum.

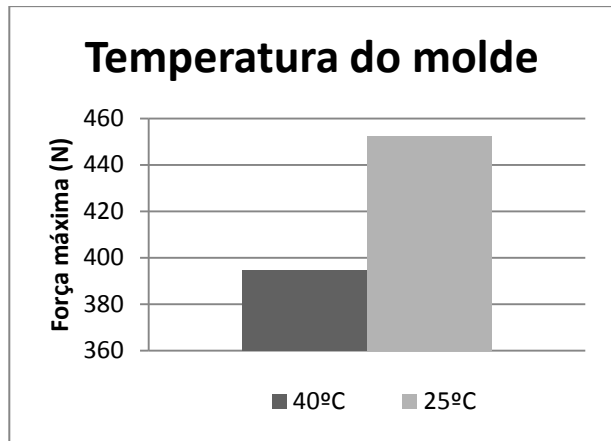
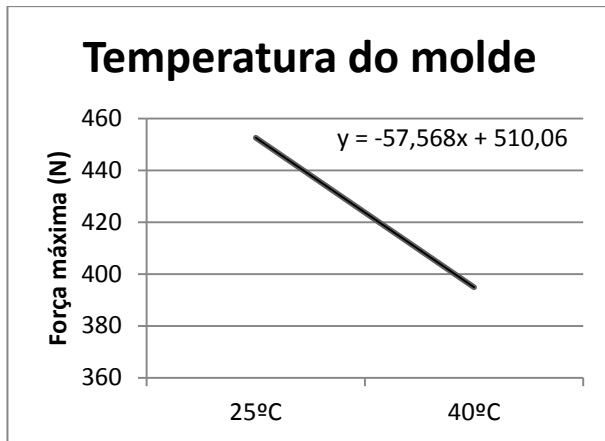


**Figura 70 - Efeito do agente de nucleação na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas concentrações de agente estudadas**

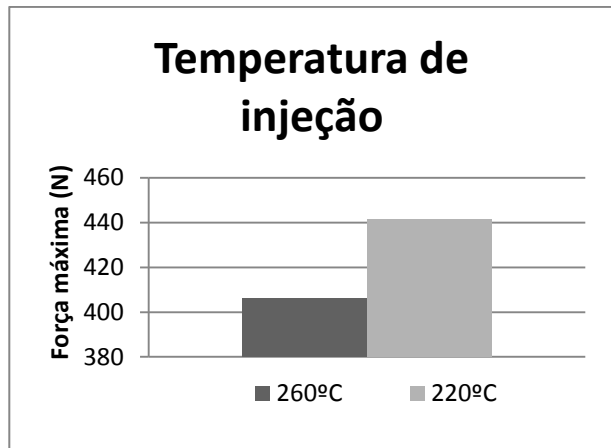
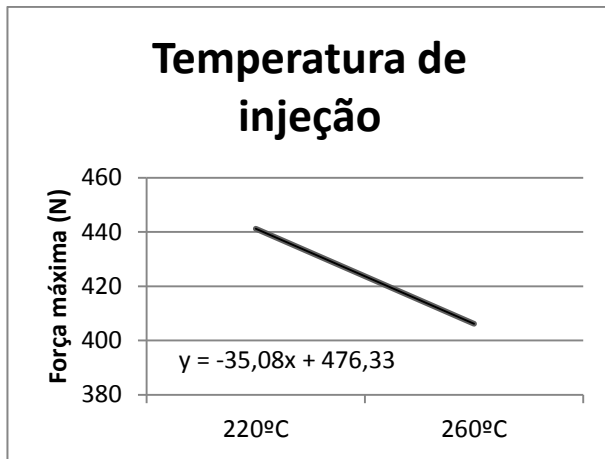
A temperatura do molde e a temperatura de injeção tiveram um efeito negativo de 57,57N e 35,09N respetivamente na resposta, força máxima obtida nos ensaios de tração. Estes valores mostram que se registaram melhores valores de força máxima nos provetes onde foram utilizados as temperaturas mais baixas.

O efeito da temperatura do molde deve-se ao facto de com a diminuição da temperatura do molde existir um aumento da do número de cadeias alinhadas. Por essa razão existe um aumento de cadeias disponíveis para executar a união dos dois materiais, o que leva a uma melhor mistura e consequentemente a um aumento do desempenho mecânico.

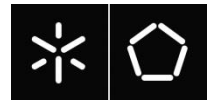
O efeito da temperatura de injeção deve-se ao facto de com a diminuição da temperatura de injeção existe um aumento da casca e pela mesma razão citada anteriormente existe um melhor desempenho mecânico.



**Figura 71 - Efeito da temperatura do molde na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas do molde estudadas**



**Figura 72 - Efeito da temperatura de injeção na força máxima atingida durante o ensaio e os valores médios obtidos para as duas temperaturas de injeção estudadas**



## **5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**





## 5.1. Conclusão

O trabalho científico apresentado teve como principal objetivo compreender a influência das variáveis operatórias do laser e da moldação por injeção no desempenho mecânico das peças unidas por um laser.

Nos ensaios de NIR realizados aos provetes verificou-se que a variável com maior influência na transmissão da luz com um comprimento de onda de 938nm foi a espessura.

Das espessuras estudadas verificou-se que as peças que tinham uma espessura de 1.5 mm apresentaram valores de transmissão de luz 13% superiores aos valores registados pelas peças com 3 mm. Este facto deveu-se à menor quantidade luz perdida por refração e reflexão.

A variável que teve menor influência foi a temperatura do molde, mesmo assim, verificou-se que os provetes onde a temperatura do molde utilizada foi de 40°C registaram valores de transmissão superiores aos registados pelos provetes onde a temperatura do molde utilizada foi de 25°C.

Nos ensaios de tração verificou-se que a variável que apresentou a maior influência no desempenho mecânico dos provetes estudados foi a espessura. Ao contrário do que foi registado nos ensaios de NIR relativos à transmitância, os provetes que registaram os melhores valores de desempenho mecânico foram os provetes com espessura de 3 mm.

Este resultado deveu-se ao facto de com o aumento da espessura, aumentar a refração da luz e consequentemente aumento da área soldada e com isso um melhor desempenho mecânico.

Por outro lado, a variável que registou a menor influência no desempenho mecânico foi o agente de nucleação

De entre as variáveis do laser estudadas, potência do laser; velocidade do laser; diâmetro do laser, a variável que registou maior influência no desempenho mecânico dos provetes foi a potência do laser.

O conjunto ótimo de fatores para a moldação por injeção das peças obtido através do DOE, para maximizar o desempenho mecânico, foi espessura de 3mm, temperatura do molde de 25°C, temperatura de injeção de 220°C, concentração do agente de nucleação de 0.15%, velocidade de injeção de 50mm/s e tempo de arrefecimento de 15s.

Após a realização deste estudo concluiu-se que a soldadura a laser é bastante influenciada pelas variáveis operatórias da moldação por injeção e pelas variáveis operatórias do laser.



## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Nesta secção estão apresentadas algumas sugestões pra trabalhos futuros.

- Estudar a influência da pressão exercida na fase de soldadura no desempenho mecânico das peças soldadas
- Utilizar um material amorfo e comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos para o PP.





## BIBLIOGRAFIA

- [1] – Troughton, Michael. Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide. William Andrew Inc., 2008, pp. 78-93, ISBN: 9780815515814
- [2] – Ilie, M., *et al.* “Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling”. Optics & Laser Technology, Elsevier Ltd, vol.41, 2009, pp. 608–614
- [3] – Potente, H., *et al.* “Laser and Microwave Welding – The Applicability of New Process Principles”. Macromol. Mater. Eng., vol. 287, 2002, pp. 734–744
- [4] – Brown; Josh; Laser Plastic Welding Design Guidelines Manual, 2011
- [5] – Amanat N., *et al.* “Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry”. Materials & design, vol. , 31, 2010, pp. 4823–4830
- [6] – Ilie, M., *et al.* “Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling”. Optics & Laser Technology, vol. 41, 2009, pp. 608–614
- [7] – Casalino, G., *et al.* “Numerical model of CO2 laser welding of thermoplastic polymers”. journal of materials processing technology, vol. 207, 2008, pp. 63–71
- [8] – Acherjee, B., *et al.* “Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling”. Optics & Laser Technology, vol. 44, 2012, pp. 1372–1383
- [9] – Haberstroh, E., *et al.* “Laser transmission welding of transparent plastics parts in micro technology”. Institute of Plastics Processing (IKV), RWTH Aachen University, Aachen, Germany
- [10] – Chen, M., *et al.* “Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics”. Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, 2011, pp. 43–47
- [11]- MECALUX logismarket, Robôs de carga de maquina, visto no dia 20 de Outubro de 2013, no web site:  
<http://www.logismarket.pt/yaskawa-iberica/robot-industrial/1790746075-1411665633-p.html>
- [12]- MECALUX logismarket, Robôs de carga de maquina, visto no dia 20 de Outubro de 2013, no web site:  
<http://www.logismarket.pt/yaskawa-iberica/robot-industrial/1790746047-1411665633-p.html>
- [13] – CIMM, A Curva Tensão Deformação visto no dia 17 de Outubro de 2013, no web site:  
[http://www.cimm.com.br/porta1/material\\_didatico/6537-a-curva-tenso-deformao#.UnOzV\\_mGpic](http://www.cimm.com.br/porta1/material_didatico/6537-a-curva-tenso-deformao#.UnOzV_mGpic)



[14] –BARA SCIENTIFIC,Shimadzu testing machine,visto no dia 17 de Outubro de 2013,no web site:<http://www.barascientific.com/products/shimadzu/testing/eng/Universal/AG-X.php>

[15] – Maria Clara Cramez “DOE (Design of Experiments)”. Departamento de Engenharia de Polímeros



## ANEXOS

### Anexo 1 – Dados dos ensaios de NIR transmitância

Comprimentos de onda	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
938,5	84,69	84,07	84,67	83,36	83,88
938	84,83	84,18	84,77	83,47	83,85
937,5	84,83	84,54	84,86	83,55	83,88
Média	84,78333	84,26333	84,76667	83,46	83,87
Média Total	84				
Desvio padrão	0,57				

Comprimentos de onda	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
938,5	80,53	81,32	83,7	79,79	84
938	80,53	81,16	83,74	79,75	84,35
937,5	80,48	81,11	83,9	79,85	84,4
Média	80,51333	81,19667	83,78	79,79667	84,25
Média Total	82				
Desvio padrão	1,99				

Comprimentos de onda	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
938,5	81,93	81,47	81,72	82,26	79,23
938	81,89	81,53	81,72	82,04	79,16
937,5	81,93	81,55	81,92	81,97	79,23
Média	81,91667	81,51667	81,78667	82,09	79,20667
Média Total	81				
Desvio padrão	1,19				

Comprimentos de onda	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
938,5	80,93	81,22	80,51	76,3	75,8
938	80,92	80,98	80,47	76,47	75,73
937,5	80,93	80,94	80,3	76,56	75,62
Média	80,92667	81,04667	80,42667	76,44333	75,71667
Média Total	79				
Desvio padrão	2,61				



Comprimentos de onda	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
938,5	57,79	56,69	56,72	56,54	60,4
938	57,84	56,62	56,77	56,56	60,37
937,5	57,64	56,63	56,56	56,59	60,21
Média	57,75667	56,64667	56,68333	56,56333	60,32667
Média Total	58				
Desvio padrão	1,60				

Comprimentos de onda	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
938,5	72,89	73,13	73,72	72,91	72,95
938	72,57	73,07	73,6	72,81	72,82
937,5	72,48	72,99	73,48	72,5	72,59
Média	72,64667	73,06333	73,6	72,74	72,78667
Média Total	73				
Desvio padrão	0,39				

Comprimentos de onda	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5
938,5	68,68	71,9	69,9	69,72	67,39
938	68,65	71,67	69,68	69,6	67,45
937,5	68,7	71,72	69,52	69,48	67,59
Média	68,67667	71,76333	69,7	69,6	67,47667
Média Total	69				
Desvio padrão	1,58				

Comprimentos de onda	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5
938,5	72,04	71,88	70,59	71,77	71,88
938	71,85	71,97	70,51	71,58	71,85
937,5	71,61	71,97	70,37	71,7	71,89
Média	71,83333	71,94	70,49	71,68333	71,87333
Média Total	72				
Desvio padrão	0,61				



## Anexo 2 – Dados dos ensaios de NIR refletância difusa

Comprimentos de onda	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
938,5	4,663	4,608	4,904	6,39	5,751
938	4,805	4,669	4,887	6,337	5,827
937,5	4,631	4,562	4,875	6,284	5,653
Média	4,699667	4,613	4,888667	6,337	5,743667
Média Total	5,3				
Desvio padrão	0,75				

Comprimentos de onda	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
938,5	5,75	5,566	4,857	6,16	4,945
938	5,699	5,44	5,13	5,951	4,799
937,5	5,812	5,426	5,234	5,936	4,903
Média	5,753667	5,477333	5,073667	6,015667	4,882333
Média Total	5,4				
Desvio padrão	0,47				

Comprimentos de onda	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
938,5	5,432	5,553	5,563	6,026	5,53
938	5,298	5,54	5,74	6,216	5,435
937,5	5,37	5,685	5,87	6,279	5,29
Média	5,366667	5,592667	5,724333	6,173667	5,418333
Média Total	5,7				
Desvio padrão	0,32				

Comprimentos de onda	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
938,5	5,493	5,589	5,276	6,66	5,986
938	5,368	5,412	5,301	6,703	5,894
937,5	5,637	5,315	5,373	6,703	5,879
Média	5,499333	5,438667	5,316667	6,688667	5,919667
Média Total	5,8				
Desvio padrão	0,56				





Comprimentos de onda	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
938,5	8,472	8,995	7,877	8,864	7,32
938	8,545	8,847	7,999	9,062	7,207
937,5	8,409	8,841	7,915	8,792	7,086
Média	8,475333	8,894333	7,930333	8,906	7,204333
Média Total	8,3				
Desvio padrão	0,72				

Comprimentos de onda	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
938,5	5,374	5,33	6,546	6,271	6,305
938	5,396	5,263	6,628	6,171	6,329
937,5	5,585	5,457	6,68	6,123	6,165
Média	5,451667	5,35	6,618	6,188333	6,266333
Média Total	6,0				
Desvio padrão	0,55				

Comprimentos de onda	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5
938,5	5,797	6,335	6,187	5,923	7,057
938	5,948	6,232	6,218	5,698	7,138
937,5	5,931	6,23	6,079	5,794	7,12
Média	5,892	6,265667	6,161333	5,805	7,105
Média Total	6,2				
Desvio padrão	0,52				

Comprimentos de onda	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5
938,5	5,936	4,988	5,284	4,66	6,323
938	5,882	4,884	5,305	4,645	6,36
937,5	5,873	4,861	5,2	4,712	6,43
Média	5,897	4,911	5,263	4,672333	6,371
Média Total	5,4				
Desvio padrão	0,70				



### Anexo 3 – Dados dos ensaios de NIR refletância especular

Comprimentos de onda	1,1	1,2	1,3	1,4
938,5	9,395	9,589	8,29	8,449
938	9,28	9,433	7,988	8,607
937,5	9,132	9,605	7,959	8,727
Média	9,269	9,542333	8,079	8,594333
Média Total	8,87			
Desvio padrão	0,66			

Comprimentos de onda	2,1	2,2	2,3	2,4
938,5	10,71	10,81	9,087	10,45
938	10,72	10,67	9,073	10,48
937,5	10,61	10,7	9,012	10,42
Média	10,68	10,72667	9,057333	10,45
Média Total	10,23			
Desvio padrão	0,79			

Comprimentos de onda	3,1	3,2	3,3	3,4
938,5	8,644	9,445	9,302	9,634
938	8,495	9,354	9,241	9,903
937,5	8,521	9,233	9,315	9,944
Média	8,553333	9,344	9,286	9,827
Média Total	9,25			
Desvio padrão	0,53			

Comprimentos de onda	4,1	4,2	4,3	4,4
938,5	9,372	9,668	9,27	10,54
938	9,146	9,66	9,109	10,49
937,5	9,225	9,848	9,152	10,48
Média	9,247667	9,725333	9,177	10,50333
Média Total	9,66			
Desvio padrão	0,61			



Comprimentos de onda	5,1	5,2	5,3	5,4
938,5	13,48	14,05	12,51	13,05
938	13,15	14,05	12,6	13,18
937,5	13,13	14,05	12,68	13,09
Média	13,25333	14,05	12,59667	13,10667
Média Total	13,25			
Desvio padrão	0,60			

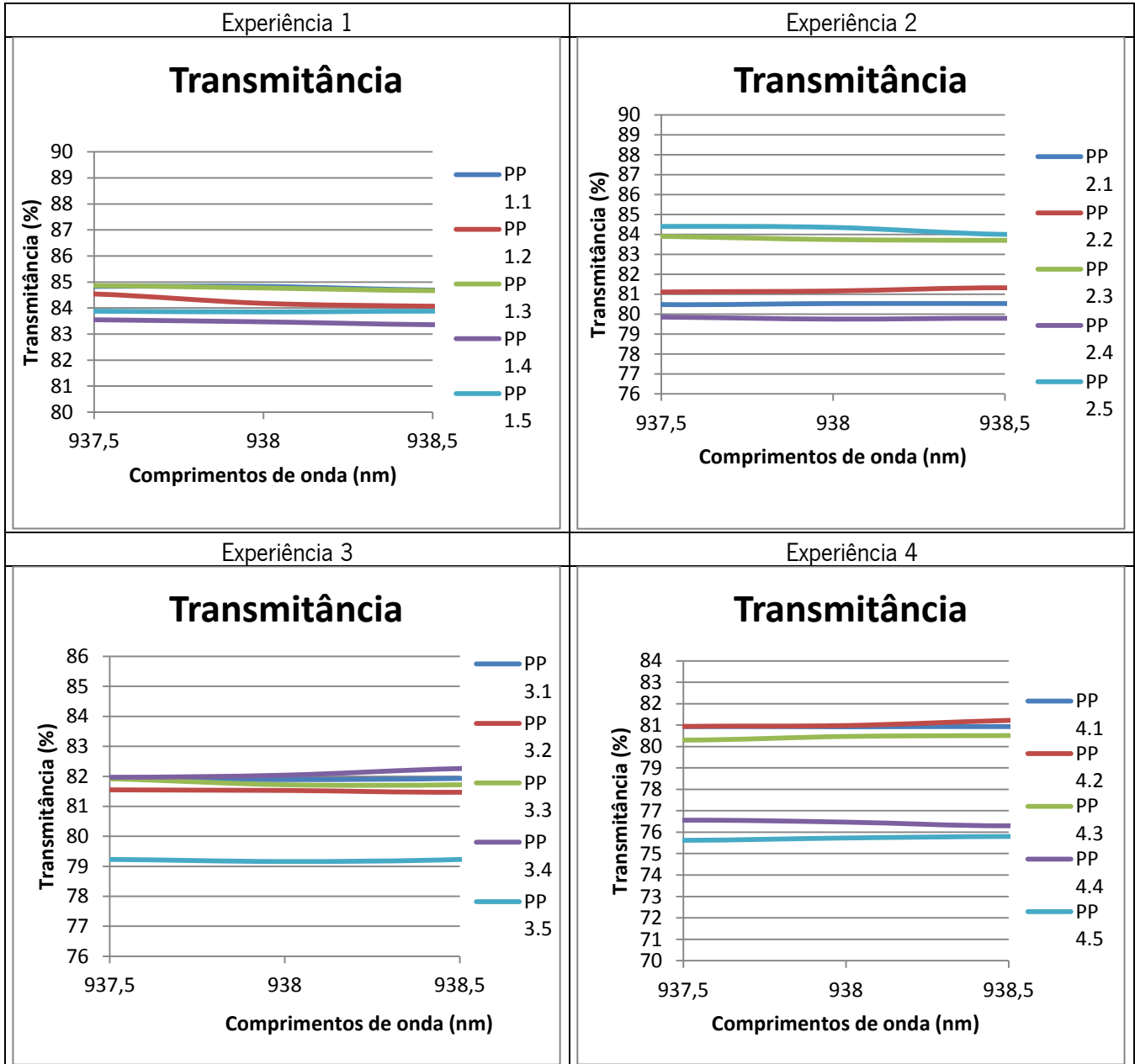
Comprimentos de onda	6,1	6,2	6,3	6,4
938,5	10,04	8,272	8,661	8,487
938	10,22	8,347	8,932	8,284
937,5	10,19	8,469	8,92	8,42
Média	10,15	8,362667	8,837667	8,397
Média Total	8,94			
Desvio padrão	0,84			

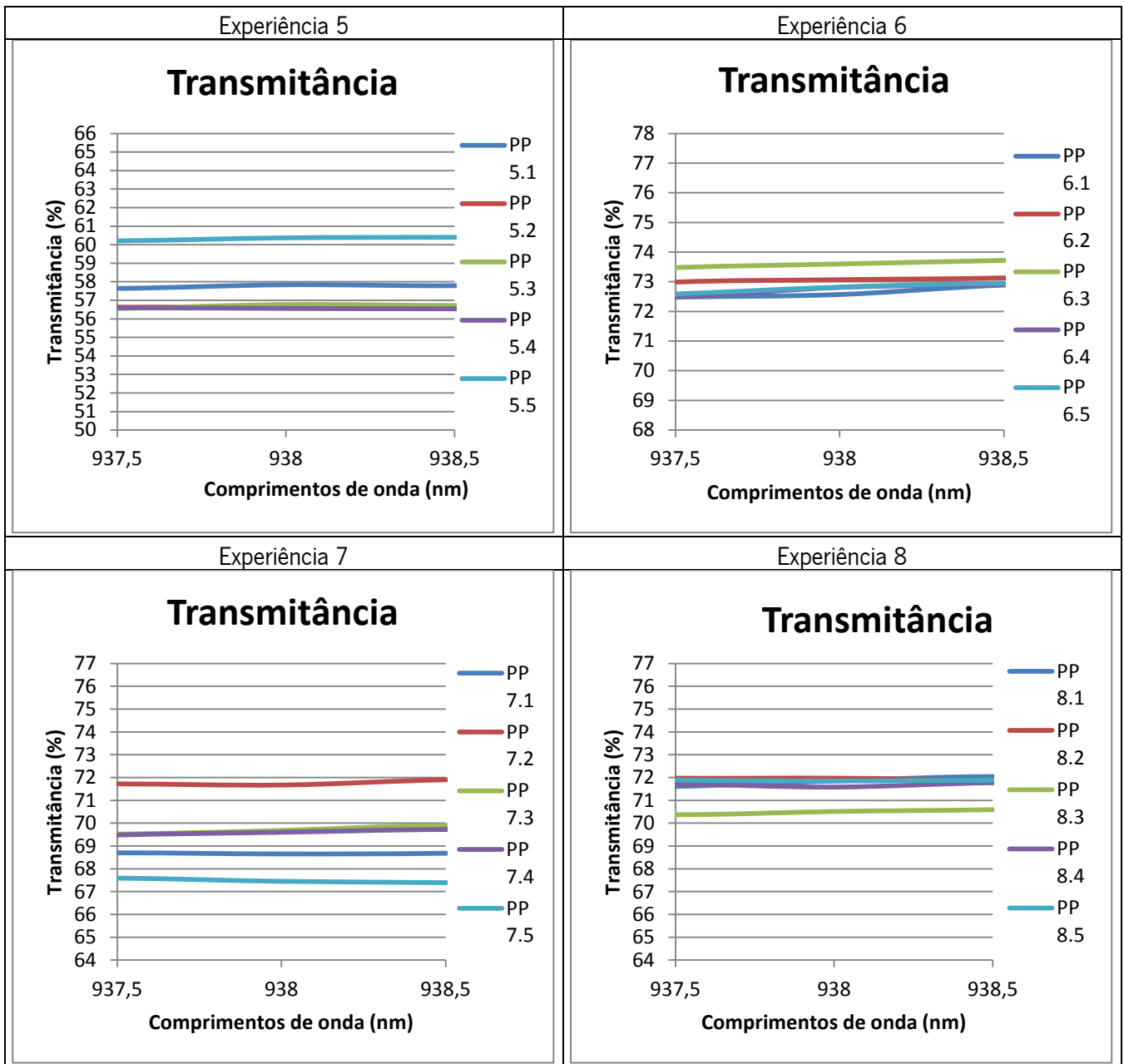
Comprimentos de onda	7,1	7,2	7,3	7,4
938,5	9,57	9,831	10,4	9,302
938	9,677	9,955	10,43	9,152
937,5	9,753	9,595	10,36	9,134
Média	9,666667	9,793667	10,39667	9,196
Média Total	9,76			
Desvio padrão	0,49			

Comprimentos de onda	8,1	8,2	8,3	8,4
938,5	10,45	8,905	9,734	10,55
938	10,13	8,937	9,845	10,53
937,5	10,18	9,105	9,904	10,58
Média	10,25333	8,982333	9,827667	10,55333
Média Total	9,90			
Desvio padrão	0,68			



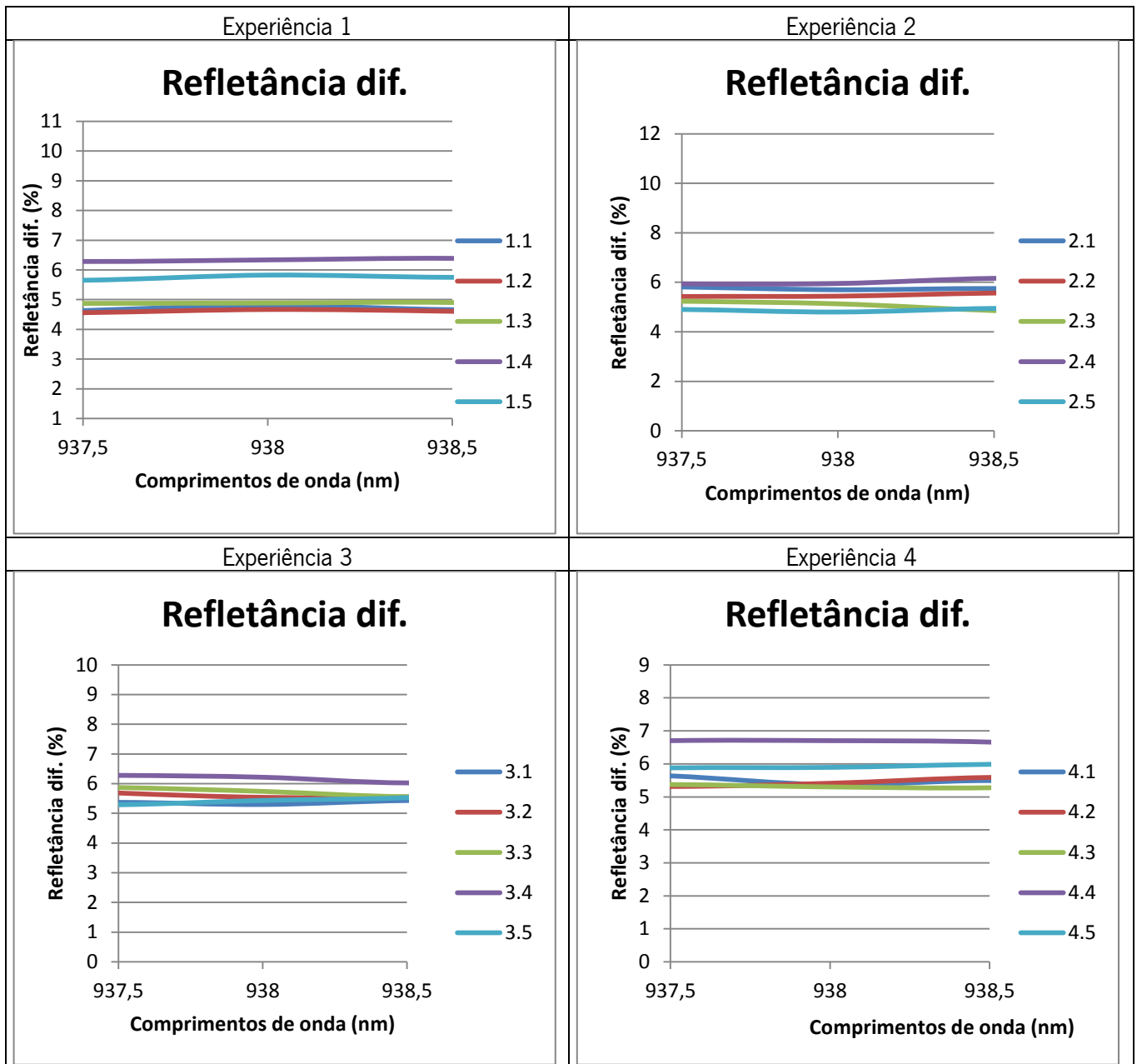
### Anexo 4 – Gráficos NIR Transmitância

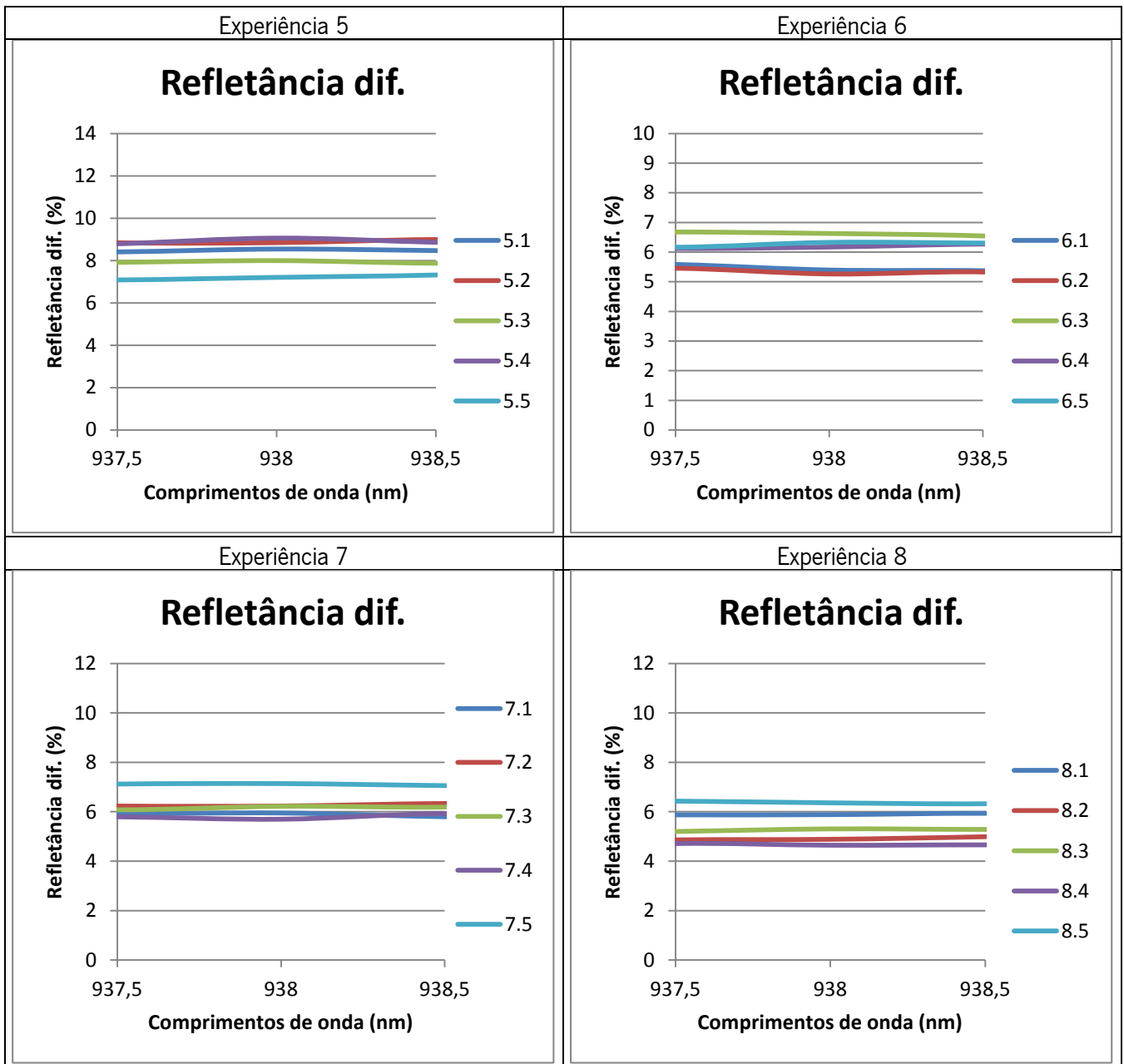






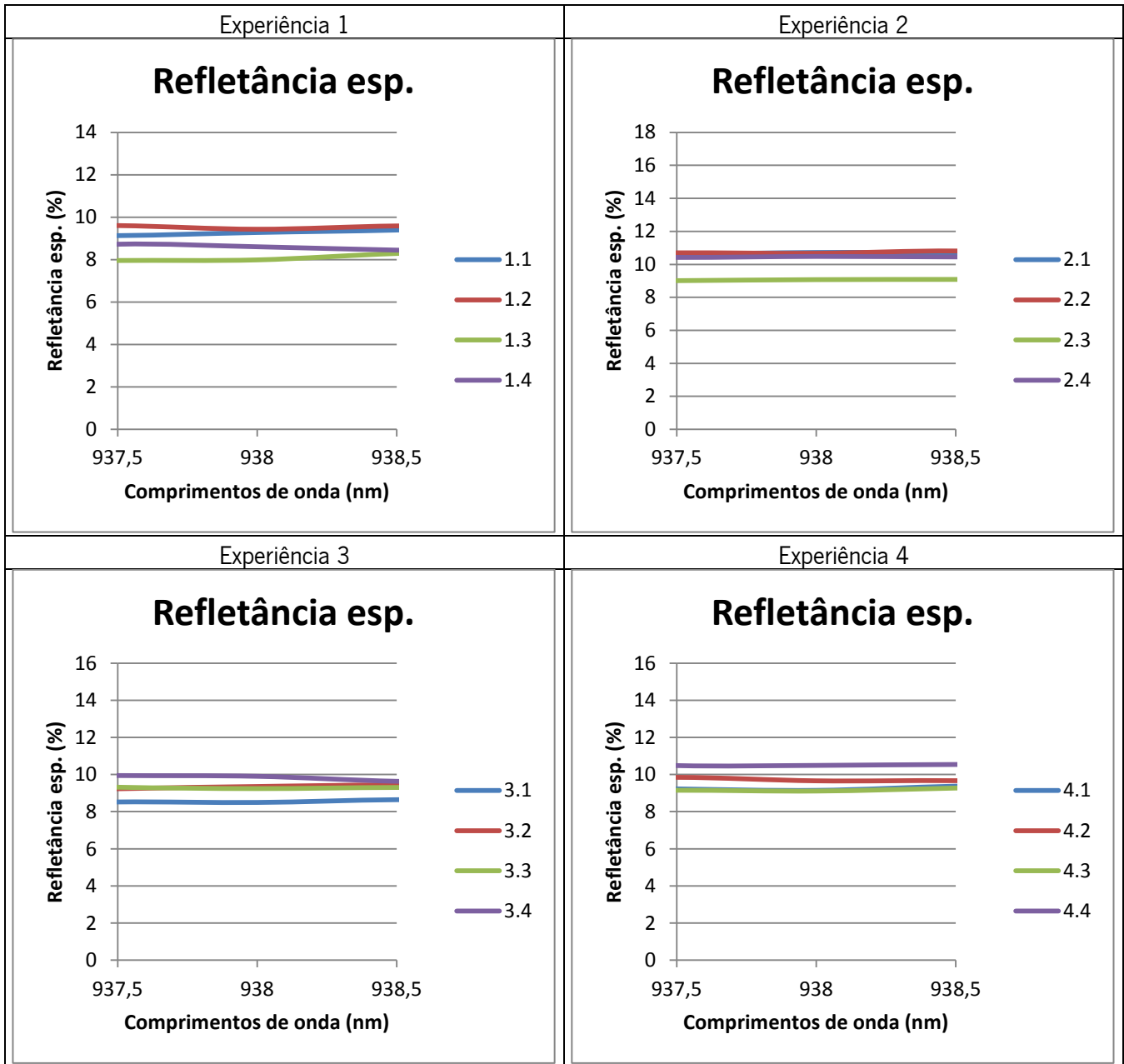
### Anexo 5 – Gráficos NIR Refletância Difusa



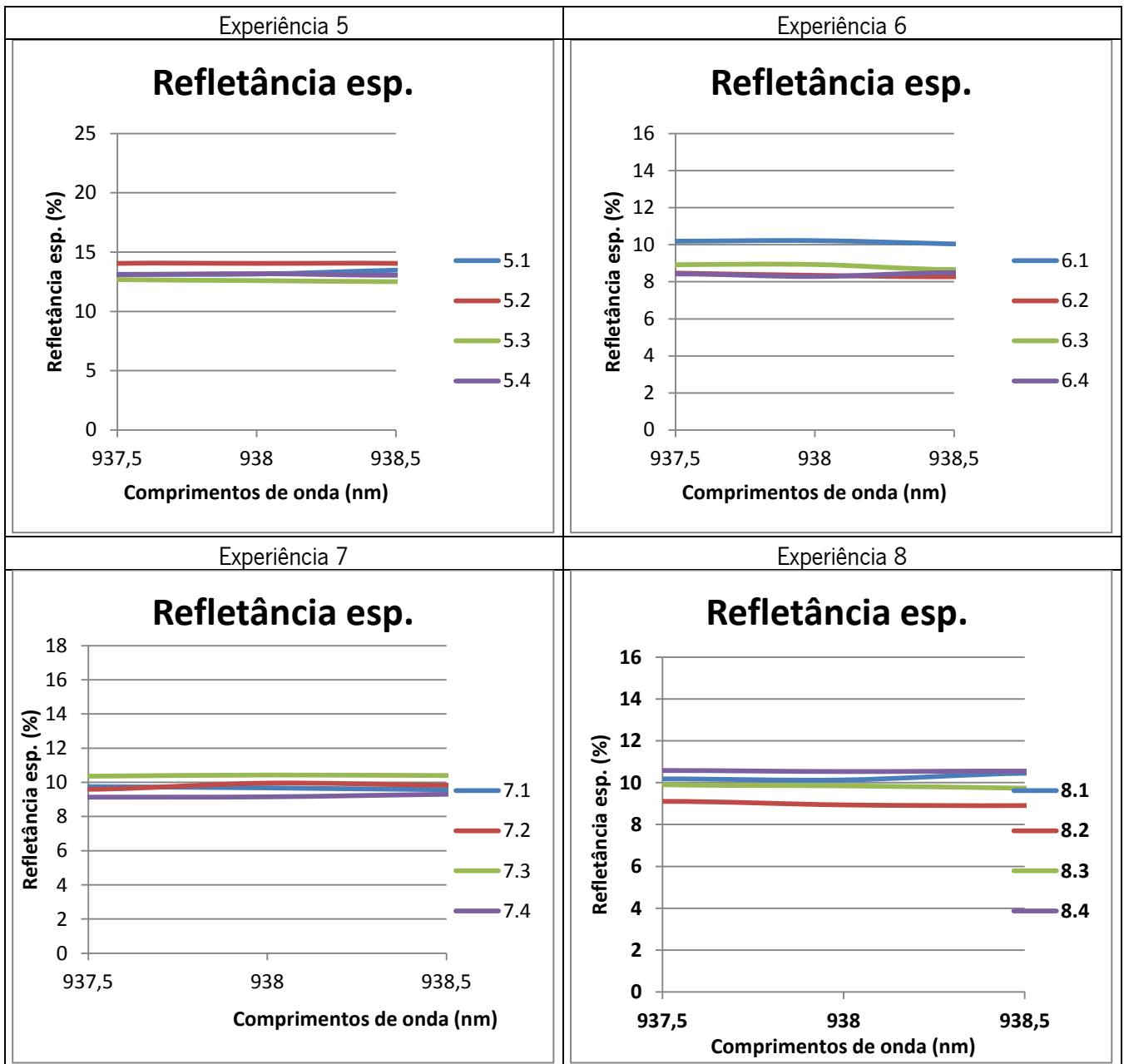




### Anexo 6 – Gráficos NIR Refletância Especular

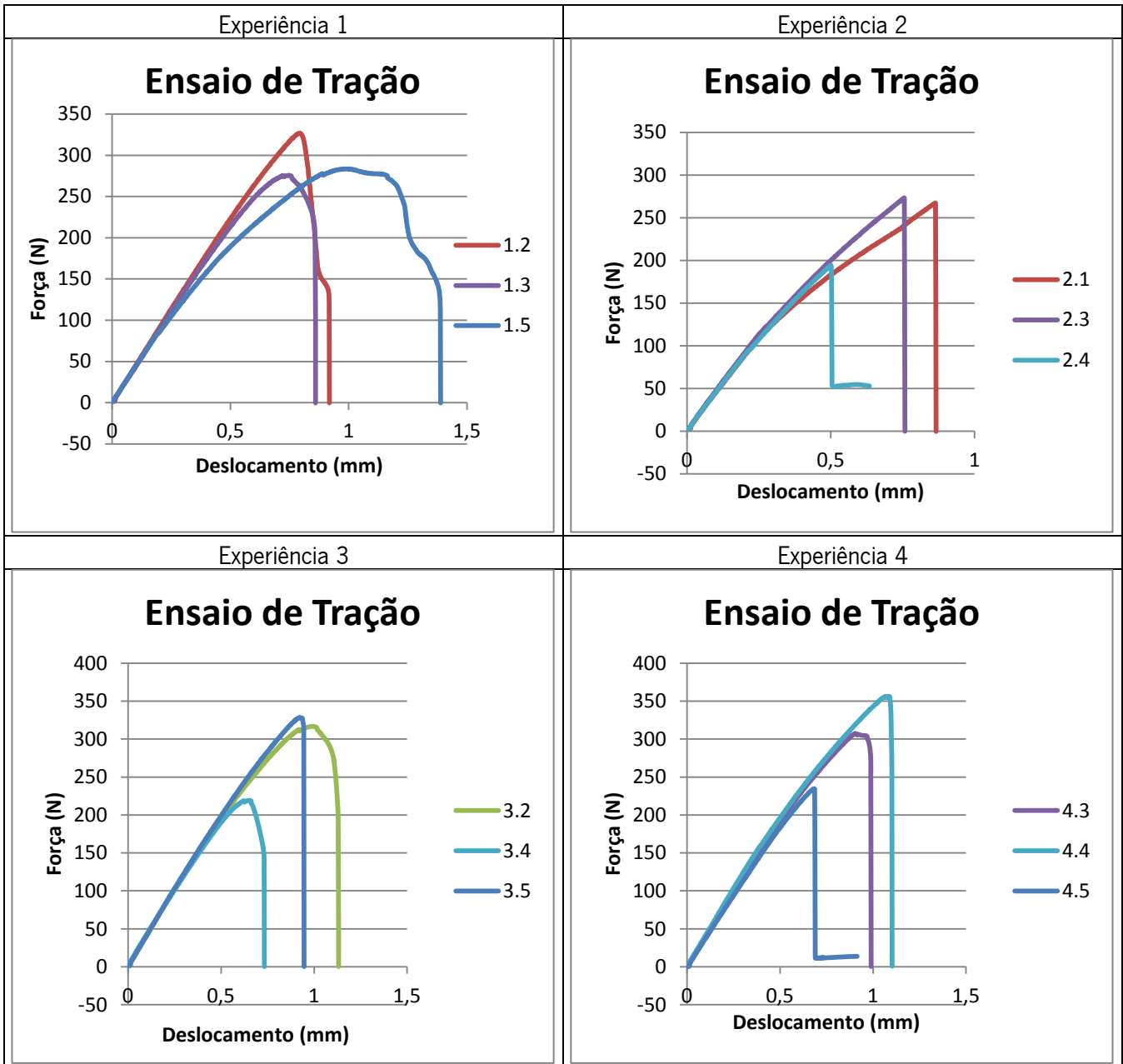


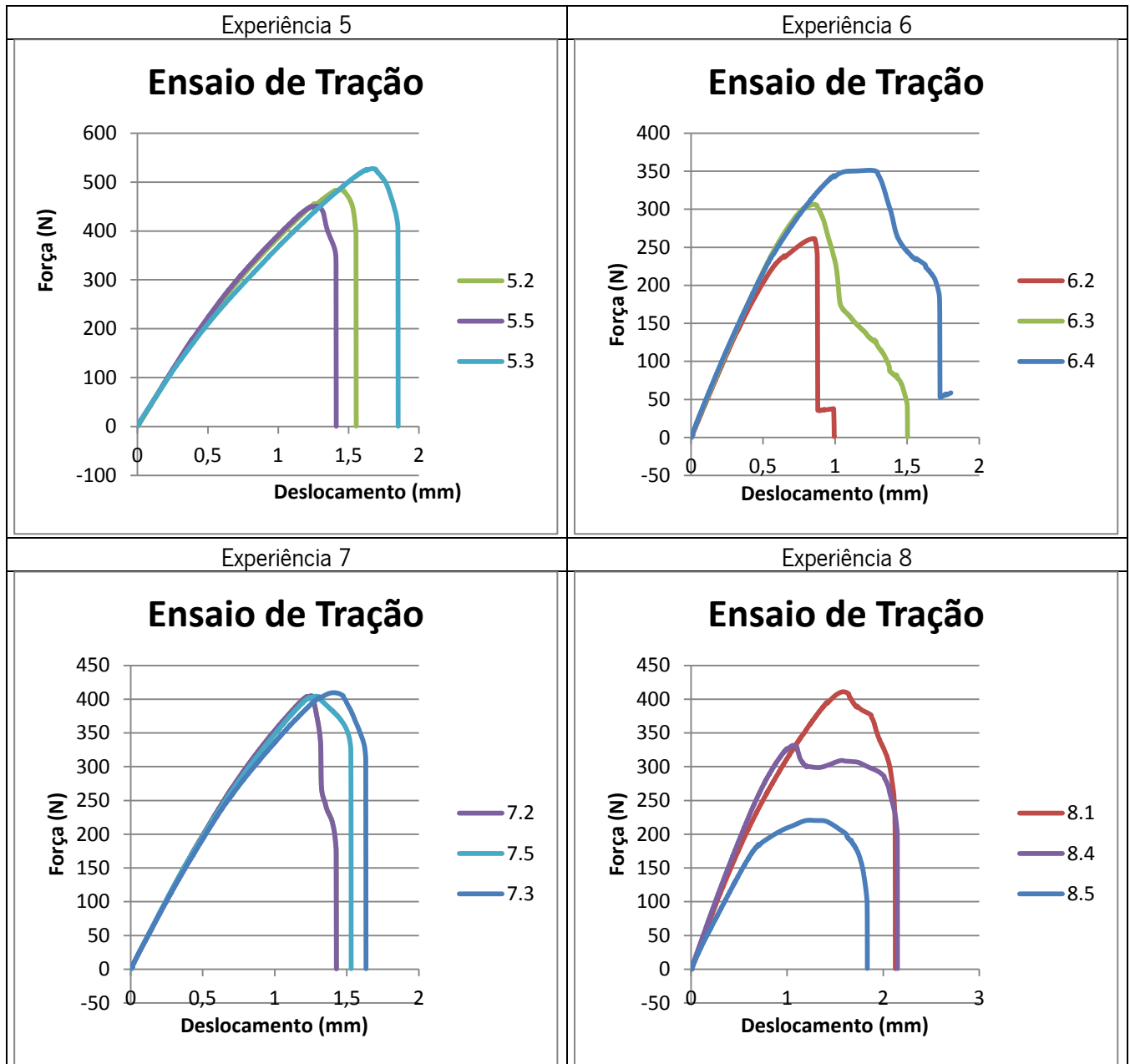






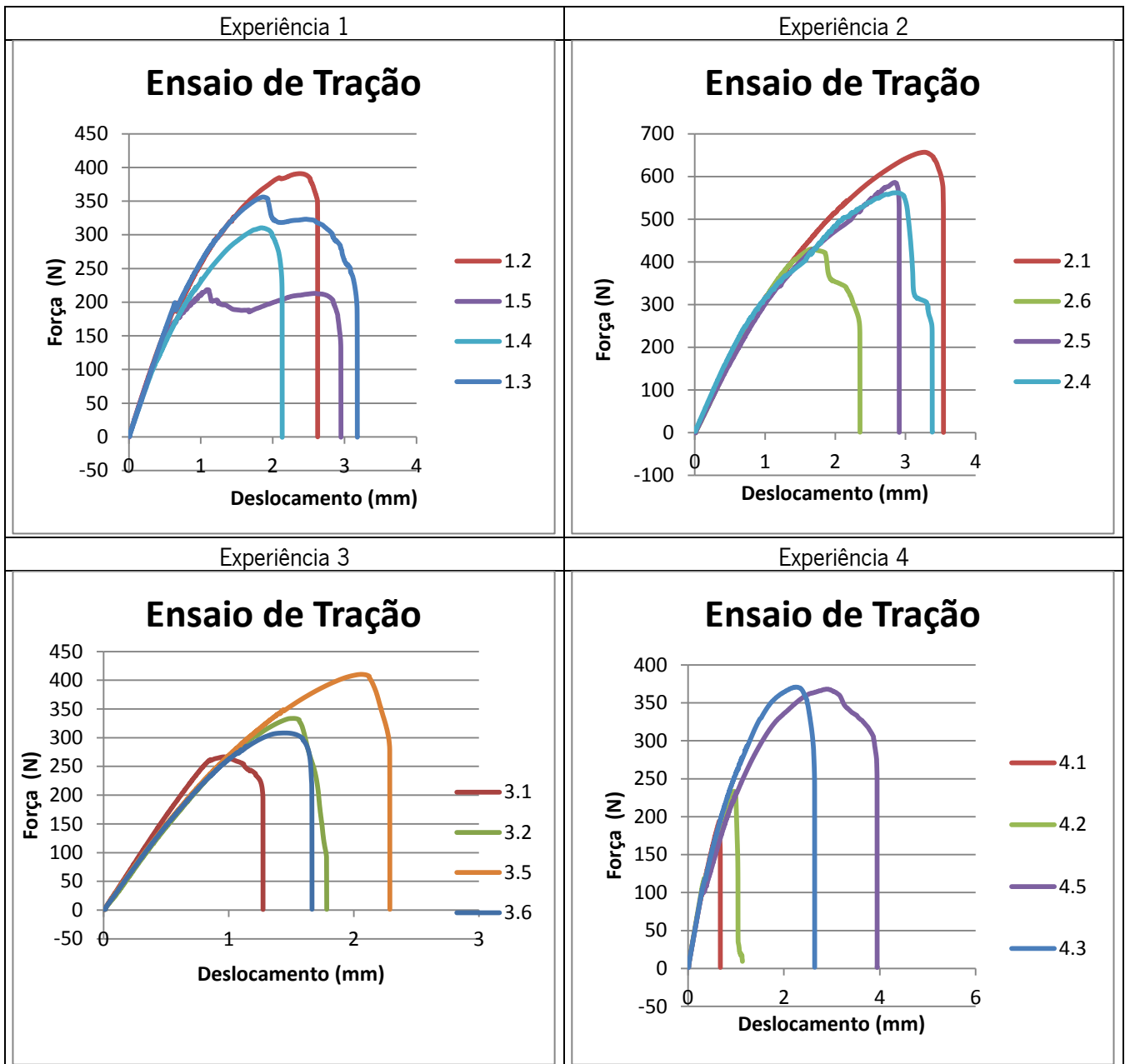
### Anexo 7 – Gráficos Tração 1

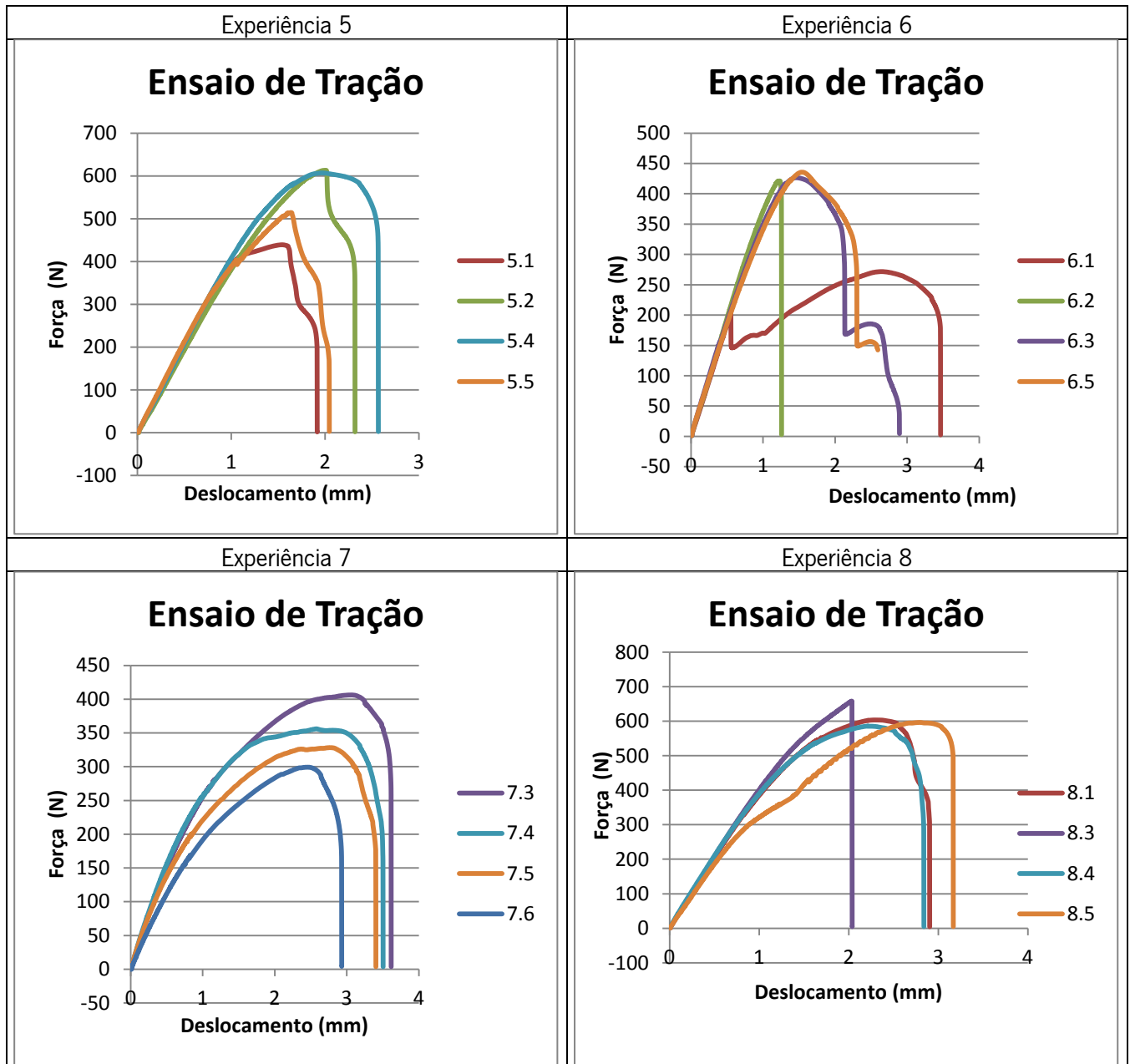






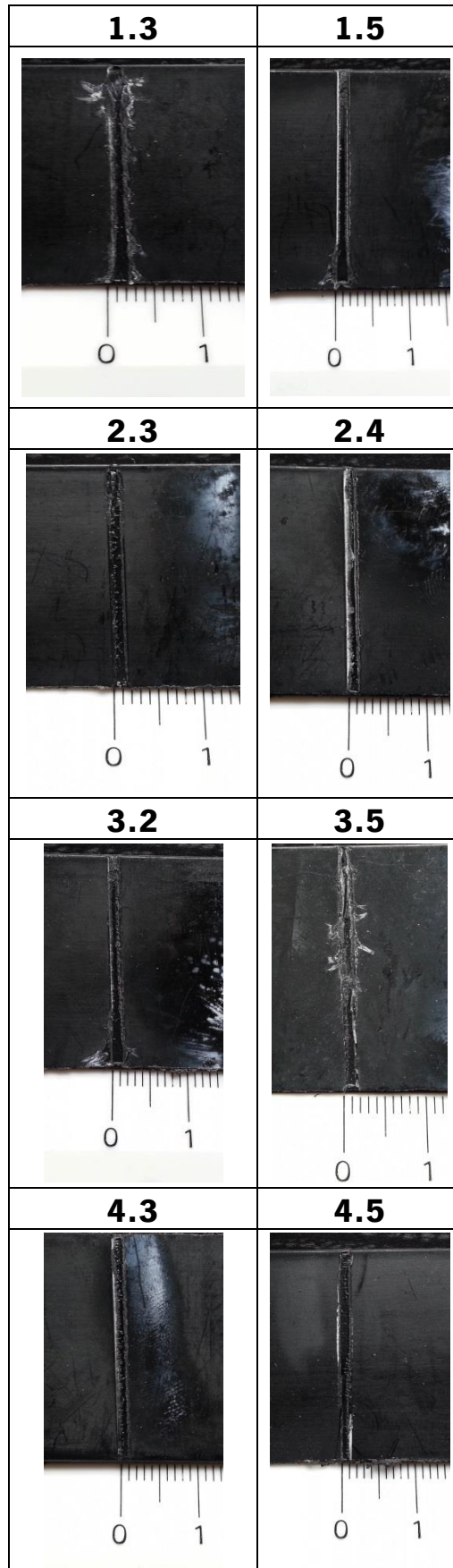
## Anexo 8 – Gráficos Tração 2

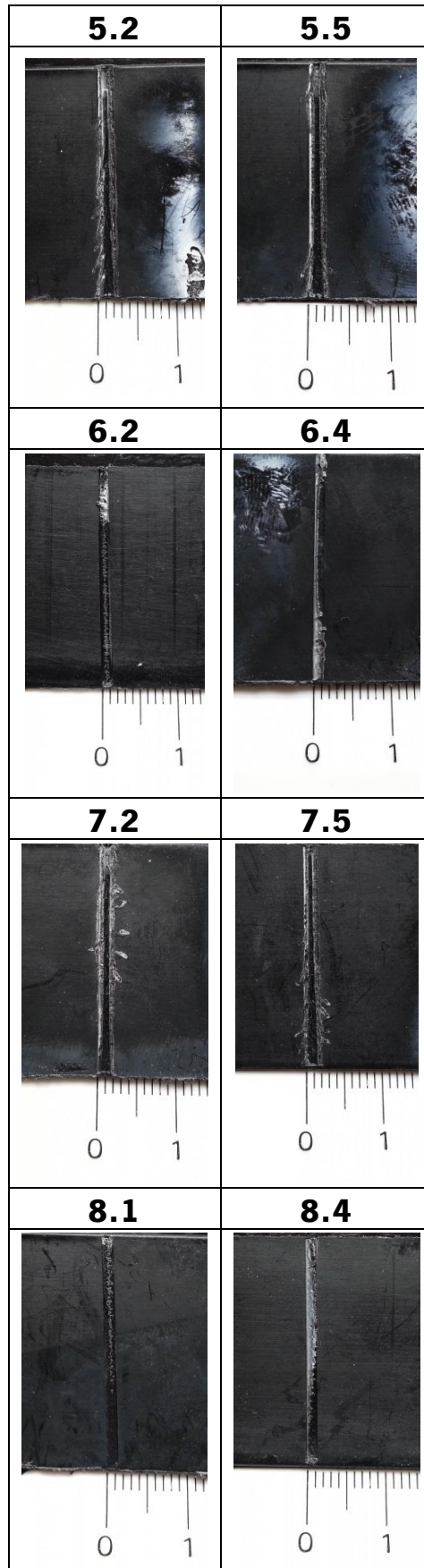






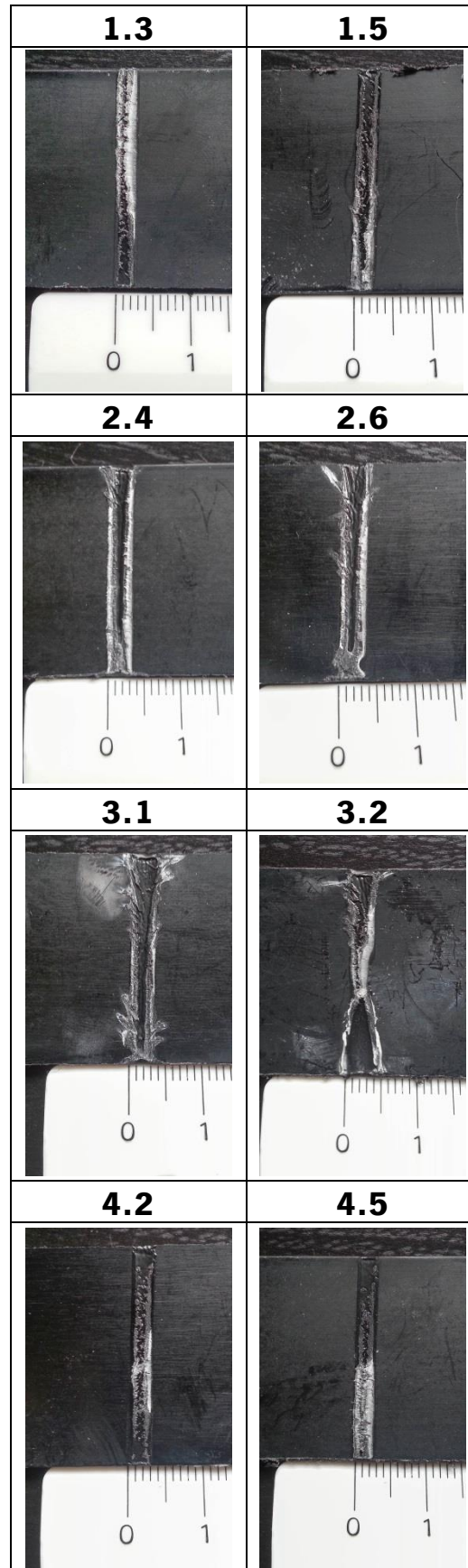
## Anexo 9 – Imagens Soldadura 1



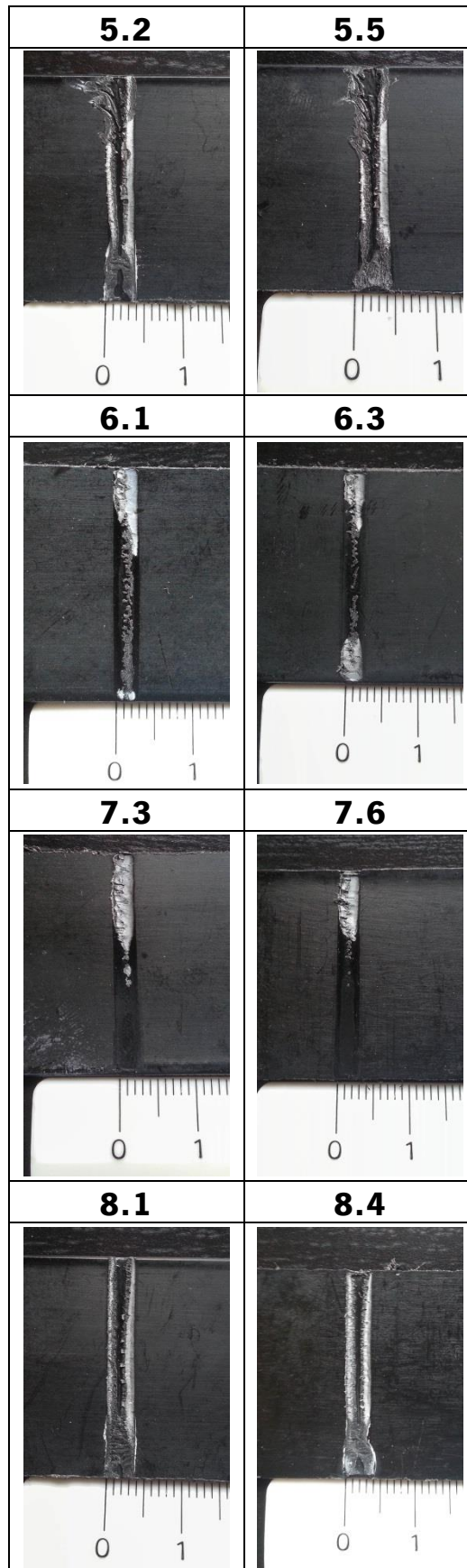




## Anexo 10 – Imagens Soldadura 2







)