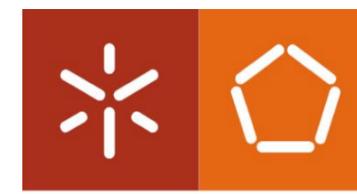




**Termoformabilidade de substratos de Policarbonato
com tintas funcionais para *In-Mold Electronics***

Ana Rita Ferreira Gonçalves

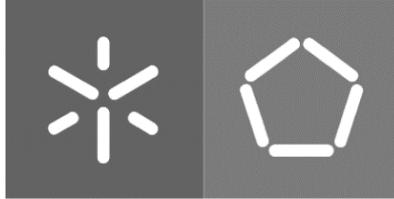
UMinho | 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Rita Ferreira Gonçalves

**Termoformabilidade de substratos de
Policarbonato com tintas funcionais
para *In-Mold-Electronics***



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Rita Ferreira Gonçalves

**Termoformabilidade de substratos de
Policarbonato com tintas funcionais para In-
Mold Electronics**

Projeto de Dissertação

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Fernando Moura Duarte

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND**

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

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação foi um desafio exigente e desafiante tratando-se do culminar de uma etapa iniciada há cinco anos. Por isso, não queria apenas agradecer às pessoas que me apoiaram durante o último ano, mas sim desde o meu primeiro dia na universidade.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais por me apoiarem e por me terem dado esta oportunidade e ao meu irmão que sempre me ajudou e incentivou a ultrapassar todos os desafios. Também gostaria de agradecer ao Marco, à Adriana e ao Gabriel pela dedicação, amizade e palavras de incentivo. À Laidinha pela ajuda e disponibilidade. Aos meus tios e primos, pelo apoio inabalável que demonstram comigo. Aos meus amigos, pelo companheirismo, interajuda, diversão e apoio demonstrado ao longo destes cinco anos.

Ao meu orientador, Professor Fernando Duarte, por toda a disponibilidade, atenção e partilha de conhecimento. À Catarina Ribeiro pela ajuda, paciência e suporte. E a todos os professores da universidade, que fizeram parte do meu percurso académico, pelo conhecimento transmitido.

Muito obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

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

Resumo

In-Mold Electronics (IME) é uma técnica de fabricação que junta componentes eletrônicos com os processos de termoformação e de moldação por injeção. Assim, esta tecnologia permite a incorporação de circuitos eletrônicos no produto plástico durante o processo de moldação eliminando etapas de pós-processamento e reduzindo o tempo e os custos de produção. Desta forma, o trabalho realizado tem como principal objetivo estudar a termoformabilidade dos substratos poliméricos com linhas condutoras, impressas através da serigrafia. Deste modo, o trabalho focou-se na análise de substratos de Policarbonato com espessuras distintas (0,25 mm, 0,3 mm e 0,5 mm) onde foram impressos circuitos com tinta funcional, à base de prata ou carbono. Para além disso, também se testaram diferentes temperaturas do molde e parâmetros geométricos. O trabalho experimental iniciou com a impressão dos circuitos que foram analisados antes (teste de adesão e medição da espessura das linhas) e após (verificação das condições de processamento, cálculo do estiramento das linhas e medição da espessura do substrato) a termoformação. A observação das linhas na lupa e a medição da resistência elétrica e da largura das trilhas foi realizada antes e após a termoformação. Além disso, realizou-se ensaios eletromecânicos e simulações (T-SIM). Os testes de adesão (*Cross Cut*) das tintas funcionais nos substratos mostraram que a adesão é boa em ambas as tintas. A caracterização eletromecânica permitiu perceber que a tinta à base de prata resiste menos à deformação do que a tinta à base de carbono. No entanto, a tinta de prata permite uma maior condutividade elétrica do que a de carbono. Para além disto, com a termoformação dos substratos percebeu-se que estes reproduzem eficazmente os contornos do molde quando a temperatura deste é de, aproximadamente, 75°C. Ao observar as peças na lupa estereoscópica, verificou-se que os raios de curvatura e a profundidade dos moldes influenciam negativamente o estado das linhas condutoras. Além disso, a caracterização elétrica mostrou que há perda de condutividade elétrica após a termoformação e com a medição da distribuição de espessuras percebeu-se que a zona dos raios de curvatura é a que apresenta menor espessura.

Palavras-chave: *In Mold-Electronics*, Substrato, Termoformação

Abstract

The In-Mold Electronics (IME) is an innovative technique of manufacturing that integrates electronic components with thermoforming and injection molding processes. This technology enables the incorporation of electronic circuits into plastic products during the molding process, eliminating the post-processing steps and reducing the production time and costs. The main goal of this work is to study the thermoformability of polymer substrates with conductive lines that were impressed using the serigraphy technique. This work focused on the analysis of Polycarbonate substrates with different thicknesses (0.25 mm, 0.3 mm, and 0.5 mm), where circuits were printed with functional ink, based on silver or carbon. In addition, different mold temperatures and geometric parameters were also tested. The experimental work start with the printing of the circuits, which were analyzed both before (adhesion test and line thickness measurement) and after (verification of processing conditions, calculation of line stretch, and substrate thickness measurement) thermoforming. The observation of the lines under a magnifying glass and the measurement of electrical resistance and track width were carried out before and after thermoforming. Furthermore, electromechanical tests and simulations (T-SIM) were conducted. The adhesion tests (Cross Cut) of the functional inks (ME201 and ME614) on the substrates showed a good adhesion for both inks. On the other hand, the electromechanical characterization demonstrated that the silver-based ink is less resistant to deformation than the carbon-based ink. However, the electrical conductivity of the silver ink is higher than the carbon ink. Furthermore, with the thermoforming of the substrates, it was observed that they effectively replicate the mold contours when the mold temperature is approximately 75°C. The analysis of the substrates with a stereoscopic microscope, showed that the curvature radii and mold depth negatively affect the condition of the conductive lines. Additionally, the electrical characterization demonstrated a loss of electrical conductivity after thermoforming. Finally, the thickness distribution revealed that the area around the curvature radii has the lowest thickness.

Keywords: In Mold-Electronics, Substrate, Thermoforming

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação.....	1
1.2	Objetivos da dissertação	2
1.3	Organização da dissertação	2
2.	Estado de arte.....	3
2.1	<i>In-Mold Electronics</i> (IME)	3
2.2	Técnica de impressão.....	4
2.3	Termoformação	6
2.4	Métodos de caracterização.....	10
3.	Ferramentas produtivas	12
3.1	Molde.....	12
3.2	Sistema de encastramento.....	16
3.3	Placa de aquecimento do molde.....	18
4.	Procedimento experimental	21
4.1	Materiais	21
4.2	Métodos	22
4.2.1	Serigrafia – impressão dos circuitos.....	22
4.2.2	Teste de adesão	24
4.2.3	Medição da espessura das linhas	26
4.2.4	Testes eletromecânicos.....	26
4.2.5	Calibração do tempo de aquecimento	30
4.2.6	Termoformação.....	31
4.2.7	Microscopia	32
4.2.8	Medição elétrica	32

4.2.9	Razão de estiramento e distribuição de espessuras	33
4.3	Simulação do processo de termoformação: T-SIM.....	34
5.	Apresentação e discussão dos resultados	37
5.1	Teste de adesão.....	37
5.2	Medição da espessura das linhas	38
5.3	Testes eletromecânicos	39
5.3.1	Provetes de tinta.....	39
5.3.2	Provetes de substrato	41
5.4	Calibração do tempo de aquecimento.....	43
5.5	Termoformação	43
5.6	Microscopia	46
5.6.1	Observação das trilhas.....	46
5.6.2	Medição da largura das trilhas.....	51
5.7	Medição da resistência elétrica.....	56
5.8	Estiramento e distribuição de espessuras.....	58
5.8.1	Estiramento	58
5.8.2	Distribuição de espessuras.....	60
5.9	Simulação do processo de termoformação: T-SIM.....	64
5.9.1	Tamanho da malha	64
5.9.2	Enformação	65
5.9.3	Distribuição de espessuras.....	67
5.9.4	Resultados experimentais vs simulação	73
6.	Conclusões	74
7.	Referências Bibliográficas.....	76
8.	Anexos.....	79

Índice de figuras

Figura 1. Principais processos IME adaptado de [2]	3
Figura 2. Equipamento de serigrafia adaptado de [5].....	5
Figura 3. Processo de serigrafia adaptado de [5].....	6
Figura 4. Etapas do processo de termoformação.....	6
Figura 5. Esquema do molde de termoformação adaptado de [7]	7
Figura 6. Tipo de moldes: a) fêmea; b) macho adaptado de [8]	8
Figura 7. Molde em forma de cone adaptado de [9]	9
Figura 8. Variáveis em estudo adaptado de [10].....	9
Figura 9. Dimensões da abertura da máquina	12
Figura 10. Projeto do molde.....	12
Figura 11. Dimensões da placa do molde	13
Figura 12. Projeto da cavidade e respectivas dimensões	13
Figura 13. Cavidade com 10 mm de profundidade.....	14
Figura 14. Cavidade com 20 mm de profundidade.....	14
Figura 15. Raios de curvatura: a) 0,5mm; b) 2,5 mm; c) 5mm.....	15
Figura 16. Disposição dos furos de vácuo: a) Vista superior; b) Vista inferior.....	16
Figura 17. Encastramento da folha	16
Figura 18. Projeto do contramolde	17
Figura 19. Sistema elevatório do contramolde	17
Figura 20. Dimensionamento e projeto da placa de aquecimento	18
Figura 21. Sistema de linhas de vácuo e de água.....	19
Figura 22. Ligação do termorregulador à placa de aquecimento	19
Figura 23. Placa de aquecimento, molde e contramolde.....	20
Figura 24. Telas de impressão	22
Figura 25. Circuitos impressos: a) Trilhas; b) Quadrados.....	23
Figura 26. KIT de Teste de Adesão Cross Cut TQC CC2000	24
Figura 27. Classificação dos resultados do teste de adesão adaptado de [24].....	25
Figura 28. Teste eletromecânico: a) Leitura das resistências no software; b) Circuito elétrico; c) Ensaio de tração; d) Placa SBC; e) Breadboard	27

Figura 29. Provetes	28
Figura 30. Colocação dos fios nas extremidades das trilhas.....	28
Figura 31. Processo da formação dos provetes de tinta	29
Figura 32. Provetes de tinta: a) Colocação dos fios; b) Colocação da fita isoladora.....	29
Figura 33. Câmara IR ThermaCAM SC640.....	30
Figura 34. Disposição da box na câmara IR ThermaCAM SC640	31
Figura 35. Lupa estereoscópica e respetivo software	32
Figura 36. Medição da resistência elétrica na extremidade das linhas.....	33
Figura 37. a) Corte da peça e respetivas direções; b) Colocação da peça no micrómetro	34
Figura 38. Definição da folha	35
Figura 39. Moldes utilizados nas simulações: a) Profundidade de 10 mm; b) Profundidade de 20 mm.....	36
Figura 40. Cortes transversais: a) Antes da colocação da fita (tinta de prata); b) Após a colocação da fita (tinta de prata); c) Antes da colocação da fita (tinta de carbono); d) Após a colocação da fita (tinta de carbono);	37
Figura 41. Variação da espessura da linha condutora com tinta de prata	38
Figura 42. Variação da espessura da linha condutora com tinta de carbono	38
Figura 43. Relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica (tinta de prata).....	40
Figura 44. Relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica (tinta de carbono) ..	40
Figura 45. Relação entre a tensão e a resistência elétrica (tinta de prata)	41
Figura 46. Relação entre a tensão e a resistência elétrica (tinta de carbono).....	42
Figura 47. Dados obtidos na calibração dos tempos de aquecimento	43
Figura 48. Vista lateral das peças termoformadas com profundidade de 10 mm: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C	44
Figura 49. Vista lateral das peças termoformadas com profundidade de 20 mm: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C	44
Figura 50. Vista lateral das peças termoformadas com linhas condutoras: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C	44
Figura 51. Vista lateral das peças termoformadas com diferentes tintas: a) tinta de prata; b) tinta de carbono.....	45
Figura 52. Exemplo do estado dos raios de curvatura: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C.....	46
Figura 53. Linhas antes da termoformação	46

Figura 54. Estado das linhas de tinta de prata nos raios de curvatura: a) 0,5 mm; b) 2,5 mm; c) 5 mm.....	47
Figura 55. Estado das linhas de prata em peças com profundidade de 10 mm.....	48
Figura 56. Estado das linhas de prata em peças com profundidade de 20 mm.....	49
Figura 57. Trilhas com tinta de carbono observadas na lupa antes da termoformação	49
Figura 58. Estado das linhas de tinta de carbono nos raios de curvatura: (a) 0,5 mm, (b) 2,5 mm, (c) 5 mm.....	50
Figura 59. Estado das linhas de carbono em peças com profundidade de 10 mm	50
Figura 60. Estado das linhas de carbono em peças com profundidade de 20 mm	51
Figura 61. Exemplo das medições da largura das linhas dos circuitos.....	52
Figura 62. Largura média inicial das linhas condutoras	52
Figura 63. Largura média das linhas de tinta de prata, após a termoformação.....	53
Figura 64. Largura média das linhas de tinta de prata diferentes condições.....	54
Figura 65. Deformação: a) Uniaxial para uma razão de estiramento de 1,5; b) Biaxial para uma razão de estiramento de 2	55
Figura 66. Largura média das linhas de tinta de carbono	56
Figura 67. Estiramento médio das linhas de tinta de prata	58
Figura 68. Estiramento média das linhas dos circuitos para diferentes condições operatórias (ME614).....	59
Figura 69. Perfil de espessuras para substratos com espessuras distintas.....	61
Figura 70. Distribuição de espessuras na direção x	62
Figura 71. Distribuição de espessuras na direção y	62
Figura 72. Distribuição de espessuras tendo em conta a temperatura do molde na direção x...	63
Figura 73. Distribuição de espessuras tendo em conta a temperatura do molde na direção y...	63
Figura 74. Simulação do processo para uma malha com 1000 elementos	64
Figura 75. Simulação do processo para uma malha com 5000 elementos	65
Figura 76. Simulação do processo para uma malha com 40000 elementos	65
Figura 77. Sequência de enformação.....	66
Figura 78. a) Simulação de uma folha com 0,3 mm de espessura; b) Legenda de cores.....	67
Figura 79. Distribuição de espessuras: a) Direção x; b) Direção y	68
Figura 80. Perfil de espessuras na direção x	69
Figura 81. Perfil de espessuras na direção y	69

Figura 82. Simulação do perfil de espessuras: a) Profundidade de 10 mm; b) Profundidade de 20 mm.....	70
Figura 83. Perfil de espessuras para moldes com 10 mm de profundidade na direção x.....	71
Figura 84. Perfil de espessuras para moldes com 20 mm de profundidade na direção x.....	71
Figura 85. Perfis de espessura tendo em conta as temperaturas do molde.....	72

Índice de Tabelas

Tabela 1. Técnicas de impressão.....	5
Tabela 2. Propriedades dos substratos [17], [18].....	21
Tabela 3. Especificações das tintas e do adesivo [19]–[21].....	21
Tabela 4. Diferença de pesos das tintas após os testes cross-cut e classificação final das tintas.....	38
Tabela 5. Espessuras das linhas.....	39
Tabela 6. Resistências elétricas médias (antes da termoformação).....	56
Tabela 7. Valores percentuais da resistência elétrica.....	57
Tabela 8. Valores médios do estiramento das linhas condutoras, após termoformação.....	60
Tabela 9. Comparação percentual das espessuras inicial e final para diferentes substratos.....	61

Lista de abreviaturas

IME – *In-Mold Electronics*

PC – Policarbonato

Tg – Temperatura de Transição Vitrea

IMD – *In-Mold Decoration*

IML – *In-Mold Label*

PET – Polietileno Tereftalato

DSC – Calorimetria de Varredura Diferencial

TGA – Análise Termogravimétrica

SEM – Microscópio Eletrônico de Varredura

mm – Milímetros

min – Minutos

s – Segundos

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Nos dias de hoje, a tecnologia *In-Mold Electronics* (IME) tem ganho cada vez mais relevância na indústria uma vez que permite a interação máquina/utilizador sem o recurso aos convencionais botões. Esta estimula o desenvolvimento da eletrónica flexível combinada com a produção de peças plásticas proporcionando, assim, produtos inovadores, personalizados e com características funcionais. Para obter o seu propósito, a tecnologia de IME combina várias técnicas e processos, nomeadamente: i) a impressão dos circuitos elétricos em filmes poliméricos através de uma técnica de impressão; ii) termoformação dos substratos, de modo a criar a forma tridimensional desejada; iii) sobre injeção da película termoformada através do processo de moldação por injeção. Um dos problemas desta tecnologia é conseguir obter uma janela operatória de termoformação que não comprometa a deformação da folha nem a viabilidade do circuito. Obter o equilíbrio entre estes dois fatores é importante visto que a folha pode romper tanto na fase de aquecimento como na de enformação. Assim, este projeto tem como principal objetivo estudar a termofomabilidade de folhas de policarbonato (PC) contendo circuitos elétricos, previamente, impressos por serigrafia. As tintas funcionais têm como base prata ou carbono para que estes tenham condutividade elétrica. Estas tintas, ao longo do seu processo, são curadas a elevadas temperaturas. Por isso, as folhas utilizadas são de policarbonato pois estes têm uma temperatura de transição vítrea (T_g) elevada, são transparentes, amorfos e permitem uma boa adesão entre a tinta e o substrato. Desta forma, é importante avaliar os limites para esta etapa do processo IME devido à potencial dificuldade do substrato em reproduzir os contornos do molde para uma sobre injeção adequada. Para além disso, o facto da capacidade das tintas funcionais termoformarem ser limitada faz com que o processo de termoformação possa provocar defeitos nas mesmas por causa do estiramento. Deste modo, serão analisados parâmetros geométricos, como raios de curvatura e razões de estiramento dos moldes, e variáveis operatórias, como a temperatura do molde, com a finalidade de se obter uma janela operatório onde os circuitos elétricos não são danificados, após a termoformação.

1.2 Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo determinar quais os limites de termoformabilidade para certas tintas funcionais e relacionar os parâmetros estudados com a distribuição de espessura da peça termoformada e com a integridade das linhas dos circuitos. Deste modo, definiram-se objetivos secundários que são cruciais para a realização do projeto, como:

1. Estudar a influência de parâmetros geométricos do molde (raios de curvatura e razões de estiramento) e de condições de processamento (temperatura do molde) na integridade dos circuitos eletrônicos;
2. Analisar a viabilidade dos circuitos eletrônicos após a termoformação;
3. Averiguar a distribuição de espessura da peça termoformada utilizando moldes fêmea.

1.3 Organização da dissertação

No primeiro capítulo, Introdução, são apresentados o enquadramento e a motivação para a realização deste projeto, e os objetivos que se pretende alcançar. Posteriormente, no capítulo 2, aborda-se o Estado de Arte que envolve alguns conceitos teóricos fundamentais para a compreensão desta dissertação, nomeadamente, sobre a técnica de processamento e impressão. Para além disto, ao longo do texto também se mencionam artigos relacionados com o tema. No capítulo 3 são apresentadas e descritas as ferramentas produtivas usadas durante o processo de termoformação, como o molde, o contramolde e a placa de aquecimento. De seguida, no capítulo 4, é explicado o procedimento experimental de cada um dos processos realizados, como o processo de impressão por serigrafia e de termoformação, os testes realizados e o *software* de simulação, T-SIM. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e no capítulo 6 são enumeradas as principais conclusões do trabalho. Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos.

2. Estado de arte

2.1 *In-Mold Electronics* (IME)

A *In-Mold Electronics* (IME) é uma tecnologia que combina a impressão gráfica com a termoformação e moldação por injeção de modo a obter produtos de plástico funcionais. Desta forma, o processo IME permite o desenvolvimento da eletrónica funcional imprimindo tintas condutoras, semicondutoras e dielétricas num filme polimérico. Esta tecnologia acarreta inúmeras vantagens como o facto de os produtos finais serem 70 % mais leves uma vez que exclui botões e fios, do custo de produção ser mais baixo visto que torna a produção mais simples (não são produzidas tantas peças) e de haver uma maior liberdade do design porque não há a necessidade de adequar os circuitos [1]. O IME abrange um conjunto de técnicas já existentes como materiais funcionais, tecnologias de impressão, *In-Mold Decoration* (IMD) e *In-Mold Label* (IML), [2]. Assim, a tecnologia IME não é um processo novo, mas sim uma evolução do IMD, onde há a necessidade de termoformar a película antes da sobre injeção [3]. Esta técnica é composta, essencialmente, por cinco etapas:

- Impressão do circuito: ocorre a impressão de tintas funcionais num substrato polimérico;
- *Pick and place SMD*: os componentes eletrónicos são colocados com precisão na folha;
- Termoformação: o substrato é termoformado até ganhar uma forma tridimensional;
- *Trimming Connector*: a folha é cortada com as ferramentas adequadas para facilitar a sua colocação no molde de injeção;
- Moldação por injeção: é injetado material sob o filme termoformado de forma que este adquira a sua geometria final possuindo uma maior resistência [4].

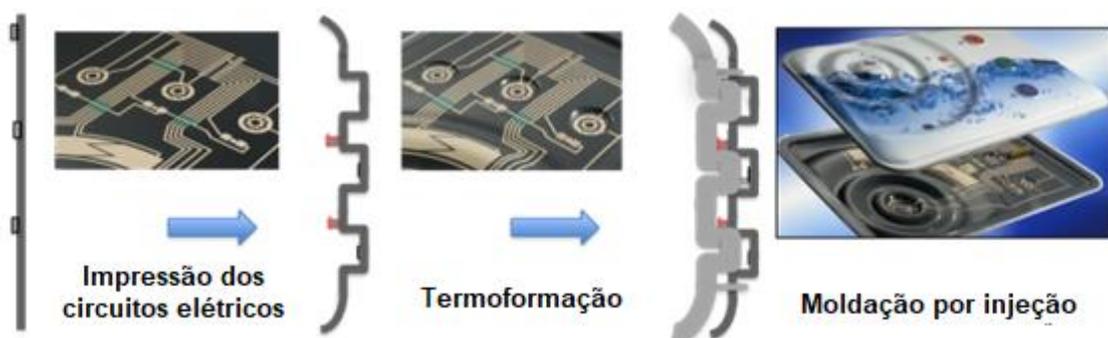


Figura 1. Principais processos IME adaptado de [2]

Nesta tecnologia, existem outros fatores a ter em conta como a tinta de impressão e o material do substrato polimérico, estando relacionados um com o outro. Estes são importantes para permitir uma boa adesão ao substrato e para garantir o bom funcionamento do circuito. Neste tipo de tecnologia, a tinta utilizada tem de ser funcional, ou seja, tem de ser condutora. Estas tintas podem ser constituídas por materiais condutores, em que na sua composição estão integradas nanopartículas metálicas que fornecem à tinta a condutividade desejada; semicondutores, que são baseadas, principalmente, em polímeros condutores; e dielétricos. As mais utilizadas são as tintas condutoras à base de prata visto que têm boas propriedades elétricas, são resistentes à oxidação e o seu custo é razoável. Para além disto, as tintas têm de ser flexíveis para conseguirem suportar os processos de termoformação e de moldação por injeção [4]. Os substratos utilizados para dispositivos eletrónicos flexíveis podem ser folhas de metal, vidro fino, papel e polímeros. Os mais indicados e os mais vantajosos são os substratos poliméricos visto que têm baixo custo associado e alta velocidade de impressão. No entanto, os polímeros têm uma Tg baixa o que limita a temperatura da cura da tinta. Assim, a tinta tem de ser escolhida tendo em conta o polímero utilizado no substrato e vice-versa, sendo que os substratos poliméricos mais comuns para esta tecnologia são o Polietileno tereftalato (PET) e o PC.

2.2 Técnica de impressão

A técnica de impressão assume um papel essencial para a técnica de IME, uma vez que é a primeira fase deste procedimento. Para além disso, esta etapa possui ainda maior importância porque se procede à impressão de componentes elétricos havendo a necessidade de garantir que as estruturas eletrónicas são fidedignas [4]. Deste modo, a escolha da tinta, do substrato e da técnica de impressão estão interligados, não podendo ser realizada separadamente. As tecnologias de impressão podem ser divididas em dois grupos: técnicas de contacto, onde existe contacto direto com o substrato, e técnicas sem contacto, em que a tinta é colocada sob o substrato a uma curta distância. Na Tabela 1 encontram-se listadas as principais técnicas de impressão que existem [3].

Tabela 1. Técnicas de impressão

Com contacto	Sem contacto
Serigrafia	Jato de tinta
Rotogravura	Jato de aerossol
Flexografia	Matriz de ranhura
Litografia	Gravação direta a laser

No presente trabalho a técnica de impressão utilizada é a serigrafia, que será explicada detalhadamente em seguida. A serigrafia é umas das técnicas mais utilizadas e desenvolvidas na impressão de componentes elétricos e consiste, basicamente, na transferência de tinta para um substrato por intermédio de uma tela. Para além disso, esta tecnologia possui diversas vantagens como a sua versatilidade, rapidez e baixo custo de produção, entre outros. O equipamento de serigrafia, Figura 2, é composto, essencialmente por quatro componentes: tela de impressão, que é constituída por uma malha feita a partir de materiais metálicos ou poliméricos; tinta, que reproduz a imagem seleccionada; *squeegee*, promove o deslocamento da tinta ao longo da tela e obriga a sua passagem para o substrato; mesa de impressão, local onde é colocado o substrato, e por consequência, onde a tela será colocada e a impressão realizada.

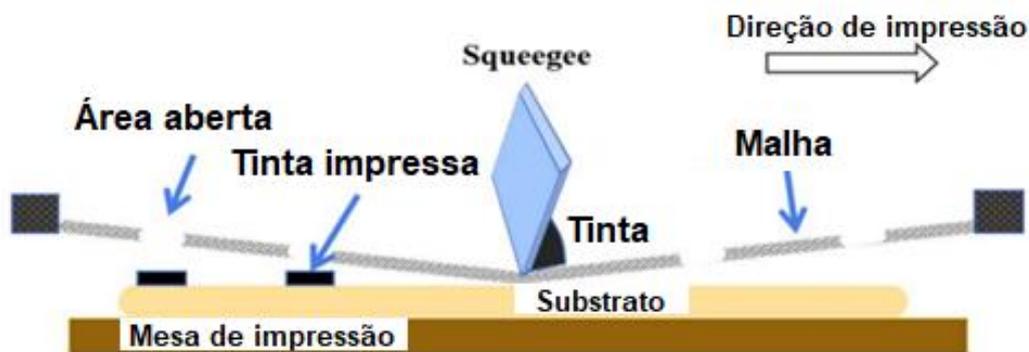


Figura 2. Equipamento de serigrafia adaptado de [5]

Na Figura 3 está ilustrado o processo de impressão de um circuito elétrico. Inicialmente, coloca-se a tela de impressão sob o substrato polimérico. De seguida, deposita-se a tinta com o auxílio do *squeegee* e remove-se o *squeegee*. Por fim, retira-se a tela de impressão e cura-se a tinta [5]. Deste modo, nesta tecnologia a qualidade da impressão é afetada pelo tipo de tinta, substrato, viscosidade da tinta, velocidade de impressão, ângulo, geometria do *squeegee* e tamanho da malha [4].



Figura 3. Processo de serigrafia adaptado de [5]

2.3 Termoformação

A termoformação é uma técnica de processamento de termoplásticos que consiste em forçar uma folha termoplástica, previamente aquecida, contra os contornos de um molde através da aplicação de um diferencial de pressão e/ou ações mecânicas. É um processo simples que transforma um filme ou uma folha num produto em três dimensões e possui um baixo custo de produção. Deste modo, esta tecnologia baseia-se essencialmente em seis etapas, ilustradas na Figura 4.



Figura 4. Etapas do processo de termoformação

1. Colocação da folha: pode ocorrer manualmente ou automaticamente, dependendo do equipamento utilizado.
2. Aquecimento: é a fase mais longa do ciclo de produção, a temperatura e o tempo de aquecimento são definidos tendo em conta o tipo de material e a espessura da folha.
3. Enformação: inicia-se após o contacto da folha com o molde, onde esta irá adquirir os contornos desse mesmo molde. A folha não contacta com o fundo e com as paredes do molde ao mesmo tempo por isso a peça terá um gradiente de espessuras. Assim, a enformação pode ocorrer por três formas: por vácuo, por pressão ou por punção.

4. Arrefecimento: pode dar-se por condução ou por convecção, esta fase é bastante importante para que a peça tenha estabilidade dimensional.
5. Extração: ocorre quando a folha estiver moldada e suficientemente arrefecida.
6. Operações de acabamento: remove-se os excessos e dependendo dos requisitos do produto, pode haver acabamentos como a pintura, soldadura, etc.

Um fator a ter em conta no processo de termoformação é a termofomabilidade dos polímeros que se trata dos limites das condições de processamento a que a folha é termoformada com sucesso. Para estes limites serem definidos é necessário ter em consideração o acabamento superficial, a degradação do material e controlo da espessura. A definição da temperatura da folha é o fator principal para garantir o controlo destes problemas [6].

Chen *et al.* [7] estudaram a termoformação de filmes de policarbonato para decoração *In-Mold*, utilizando o molde ilustrado na Figura 5. Verificou-se que a variação da dimensão da espessura da parede lateral dos filmes aumenta com o aumento da temperatura do molde, da temperatura de pré-aquecimento, da profundidade do *plug* (punção) e do tempo de retenção sendo que a temperatura do molde tem um efeito mais significativo. Pelo contrário, a variação dimensional da parede diminui com o aumento da velocidade do *plug*. Além disso, averiguaram também que filmes mais espessos apresenta maiores variações do que filmes com menor espessura e que o aumento da profundidade no molde causa enrugamento, principalmente, em filmes mais finos.

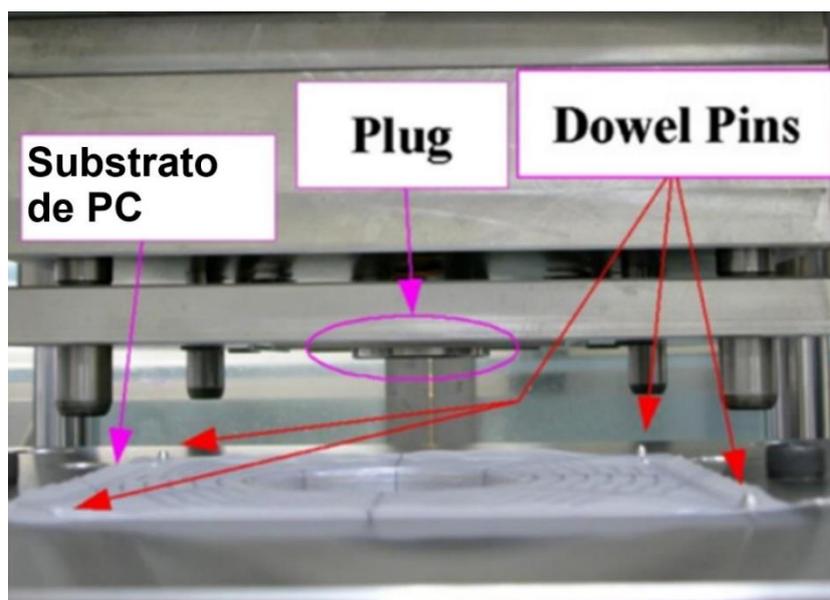


Figura 5. Esquema do molde de termoformação adaptado de [7]

Para além disto, outra variante que existe nesta técnica de processamento é o tipo de moldes que se utiliza, que podem ser macho ou fêmea, Figura 6, [8]. Estes dois tipos de moldes produzem peças com distribuições de espessuras diferentes. No molde fêmea calibra-se a parte externa da folha, e esta contacta primeiro com as paredes do molde e só depois com o fundo. Pelo contrário, no molde macho calibra-se a parte interna da peça, e a folha contacta primeiro com o fundo antes de contactar com as paredes do molde. Por isso, as peças produzidas quando se utilizam moldes fêmea não são iguais às produzidas num molde macho.

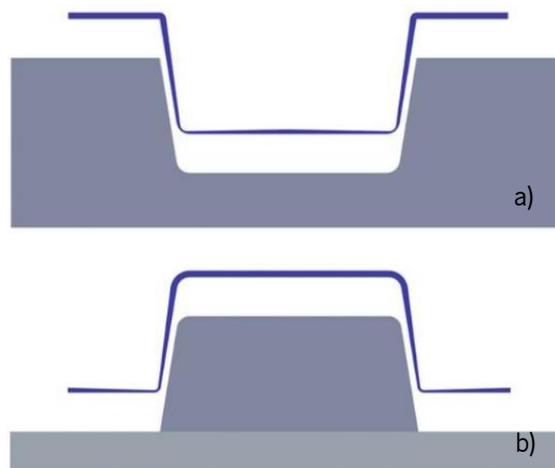


Figura 6. Tipo de moldes: a) fêmea; b) macho adaptado de [8]

Gong *et al.* [9] estudaram as características de deformação e da resistência do circuito elétrico após a termoformação. Estes dois parâmetros foram medidos experimentalmente e, posteriormente, foram comparados com simulações numéricas. Observaram que a distribuição da deformação é diferente consoante a utilização de moldes macho ou fêmea. No molde fêmea, o estiramento é dominante tanto nas paredes como na zona central e é mais significativo na região central enquanto no molde macho o estiramento é dominante apenas na região da parede. Neste caso, como o circuito está impresso na zona central, é mais vantajoso utilizar o molde macho. Para além disso, para estudar a resistência do circuito utilizaram um molde em forma de cone, Figura 7, para que seja possível obter diferentes deformações num único processo de termoformação. Deste modo, verificou-se que o circuito se torna instável à medida que a deformação aumenta. Tal deve-se ao facto de as linhas condutoras partirem à medida que o estiramento aumenta. Assim, o limite para que isto não ocorra dependerá da espessura da linha

e das condições do processo de impressão. Por fim, verificaram que os efeitos dos parâmetros geométricos são mais significativos do que o efeito das condições de processamento.

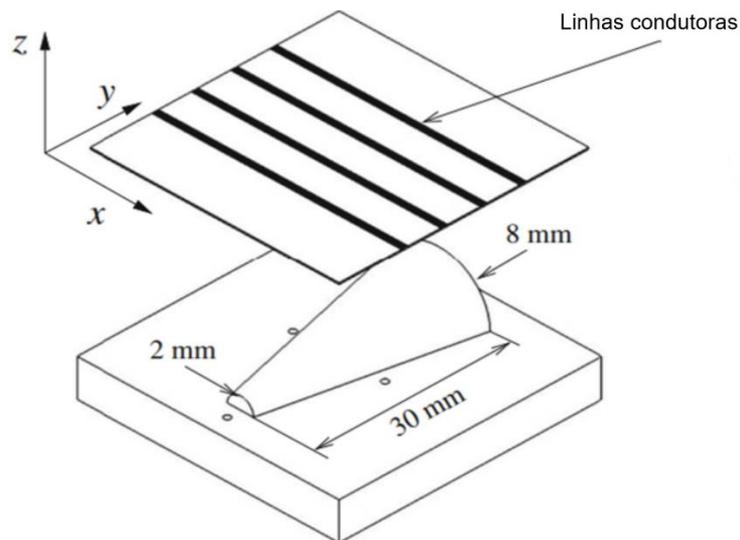


Figura 7. Molde em forma de cone adaptado de [9]

Gill M. *et al.* [10] estudaram o raio de curvatura e a profundidade do produto ilustrado na Figura 8. Verificaram que a profundidade e o raio inferior (R_b) eram os parâmetros mais significativos. Para além disso, também averiguaram que uma maior profundidade e um raio inferior com menor curvatura contribuíam para a degradação dos circuitos e que os raios de curvatura do topo (R_t) não tinham efeito no circuito.

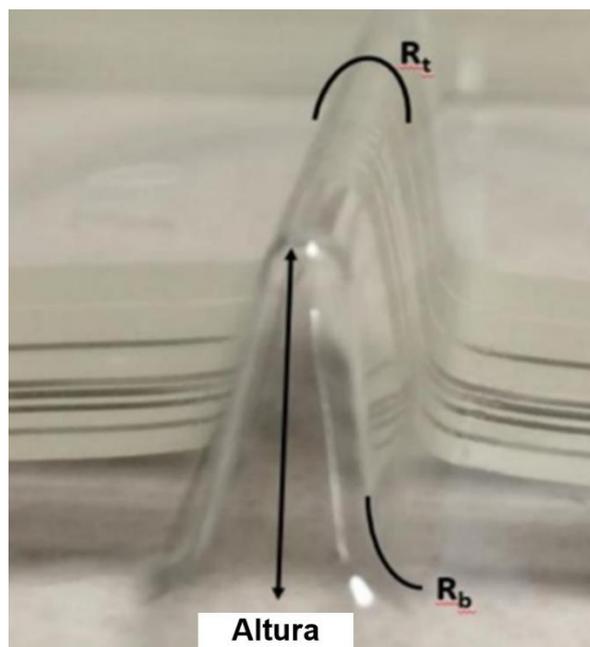


Figura 8. Variáveis em estudo adaptado de [10]

A termoformação pode ser realizada, principalmente, por dois meios: vácuo ou pressão. A termoformação por vácuo é o método mais comum e é utilizado em peças sem detalhes significativos. Este tipo de termoformação consiste em aquecer uma folha termoplástica a uma dada temperatura, onde depois é criado vácuo entre o molde e a folha. O vácuo força a folha contra as paredes do molde de modo que esta ganhe os contornos do mesmo e se obtenha a forma desejada. A termoformação por pressão permite obter peças com características mais complexas. Este processo é semelhante à termoformação por vácuo, no entanto, para além do vácuo é aplicada uma pressão de ar com o objetivo de empurrar a folha contra o molde [11]. Considerando que a temperatura da folha é uma variável relevante para a termoformação, mas que simultaneamente pode danificar a tinta, a empresa *Niebling* desenvolveu um processo de termoformação a alta pressão. Neste processo, a folha é aquecida, em ambos os lados sem contacto, até à T_g , e esta deforma com o auxílio de uma pressão com cerca de 100 bar sobre um molde. Assim, com a utilização desta tecnologia os símbolos, gráficos ou padrões impressos permanecem posicionados com precisão [12]. Segundo Christine *et al.* [13] o comportamento da folha termoplástica está significativamente relacionado com a temperatura de aquecimento da mesma. Para além disso, constou também que a temperatura da folha e a pressão exercida estão relacionadas uma com a outra. Ou seja, ao aplicar altas temperaturas é necessário uma pressão de enformação mais baixa.

2.4 Métodos de caracterização

De modo que as peças tenham qualidade, ao longo do seu ciclo de processamento, é necessário caracterizar tanto as impressões como os substratos. Assim, é preciso realizar vários testes que consigam identificar possíveis defeitos, verificar as propriedades dos substratos e a integridade das linhas dos circuitos vendo se estas perdem condutividade elétrica. Na literatura são inúmeros os ensaios realizados para avaliar as condições dos componentes desta tecnologia.

Goument C. *et al.* [14] realizaram ensaios de calorimetria diferencial de varrimento (DSC), para analisar o efeito das propriedades térmicas dos polímeros no processo IME, e de Análise Termogravimétrica (TGA), para obter a temperatura de degradação e o resíduo final dos polímeros. Também foi medido o ângulo de contato usando dois líquidos, água desionizada e diiodometano, para determinar a energia superficial dos polímeros. Do ponto de vista mecânico, efetuaram-se testes de tração, para obter a resistência à tração e à rotura, e de resistência ao impacto. Para

além disso, fizeram um teste padronizado de *cross-cut*, mediram a área de secção transversal das trilhas condutoras utilizando um perfilómetro.

Merilampi S. *et al.* [15] caracterizaram os padrões de tinta condutiva em substratos flexíveis. Neste estudo foram analisadas propriedades morfológicas, elétricas, de adesão e de resistência à tração. Deste modo, mediram a espessura das camadas condutoras com um microscópio ótico a partir de seções transversais das amostras e analisaram a adesão fazendo um teste de adesão *crosshatch*. A resistência elétrica da tinta foi medida em função da deformação ocorrida durante um ensaio mecânico de tração.

Zulfiqar S. *et al.* [16] estudaram a produção de dispositivos de interconexão 3D usando o processo de termoformação e para isso, também foram feitos ensaios de caracterização. Realizaram um ensaio de DSC para escolher o substrato, PC ou PET, com base na Tg de cada um. Sendo escolhido aquele que tiver maior Tg devido ao facto de suportar temperaturas mais elevadas. Calcularam a espessura e o nível de estiramento do substrato através da utilização de duas equações. Estes dois parâmetros foram medidos nas superfícies superiores e nas superfícies das paredes. Para além disso, avaliaram o desempenho elétrico do projeto, medindo a tensão, corrente, resistência e o consumo de energia. O desempenho mecânico foi estudado através do auxílio de um microscópio eletrónico de varredura (SEM), para analisar as partículas de prata, e de uma máquina de tração para verificar a resistência da união dos adesivos com os LEDs.

3. Ferramentas produtivas

3.1 Molde

O molde foi idealizado tendo em conta as dimensões da abertura da máquina de termoformação, Formech 450DT. Assim, a Figura 9 mostra as medidas da abertura da mesma, tendo esta um comprimento de 230 milímetros (mm) e uma largura de 140 mm.

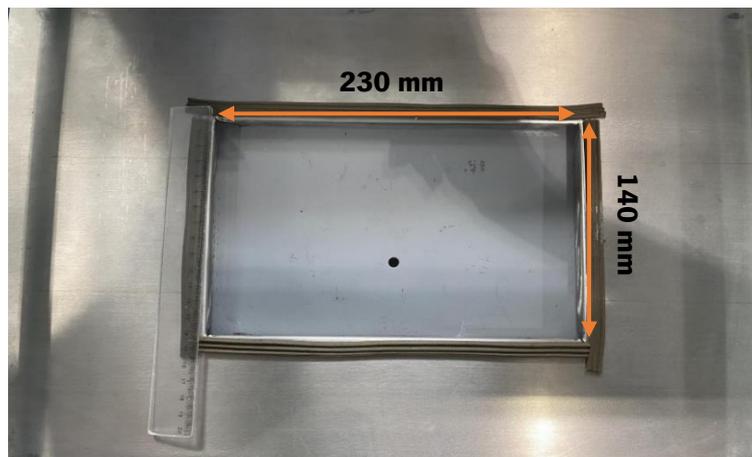


Figura 9. Dimensões da abertura da máquina

O molde é composto por uma base e por três cavidades como ilustrado na Figura 10. Este molde permite mudar as cavidades de forma rápida consoante os parâmetros geométricos que se quer analisar. O projeto do molde foi realizado no software *Solidworks*.

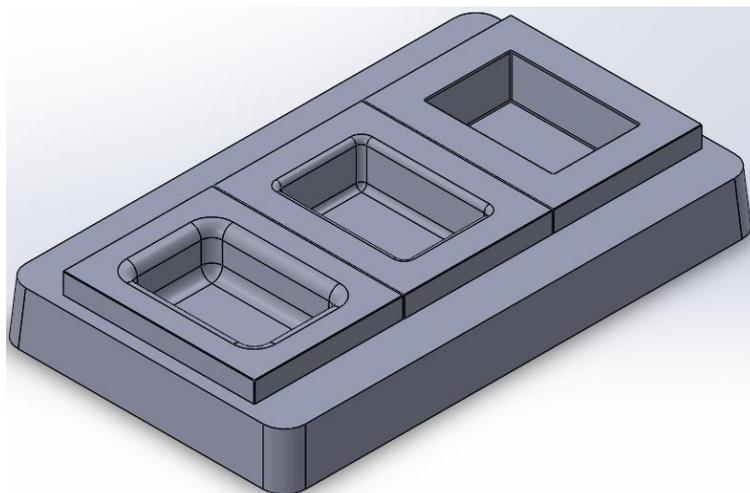


Figura 10. Projeto do molde

A base do molde tem uma dimensão de 225 mm por 135 mm por 25 mm e três orifícios onde, posteriormente, são colocadas as cavidades, Figura 11. No Anexo 1 é possível observar o dimensionamento da placa.

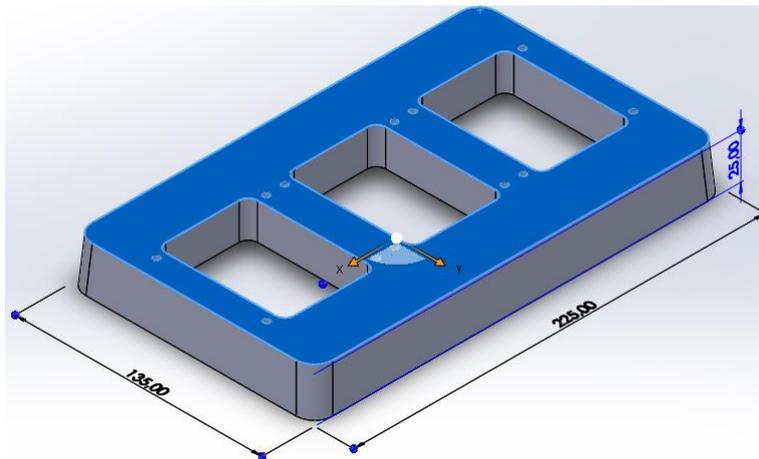


Figura 11. Dimensões da placa do molde

As cavidades são dotadas de uma geometria simples e foram dimensionadas tendo em conta os furos da placa do molde. Na Figura 12 mostra a geometria das cavidades e as dimensões da zona de enformação das mesmas, tendo esta um comprimento e uma largura de 60 mm e 40 mm, respetivamente. No Anexo 2 estão representadas todas as cotas das cavidades.

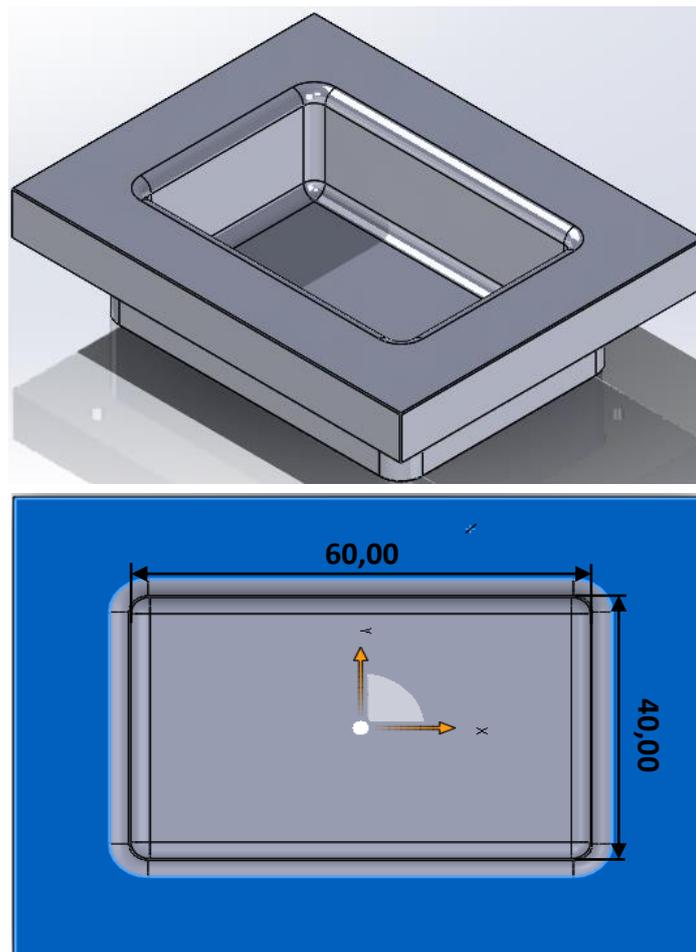


Figura 12. Projeto da cavidade e respetivas dimensões

As cavidades projetadas têm parâmetros geométricos distintos, entre eles, a profundidade e os raios de curvatura. Na Figura 13 e Figura 14 estão ilustradas as secções transversais das cavidades com 10 e 20 mm de profundidade, respectivamente.

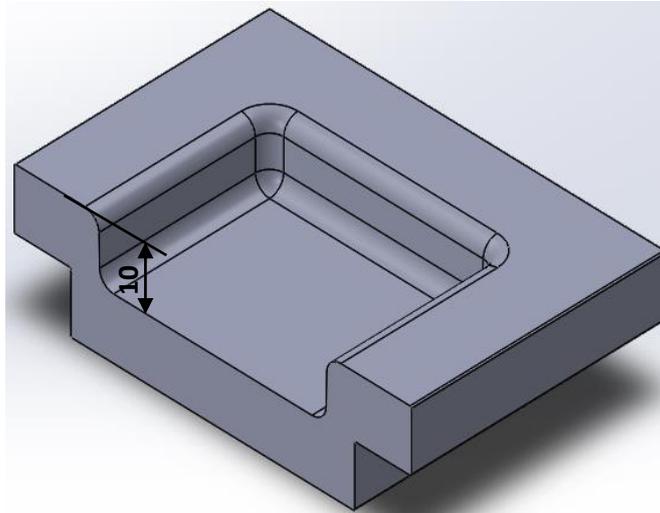


Figura 13. Cavidade com 10 mm de profundidade

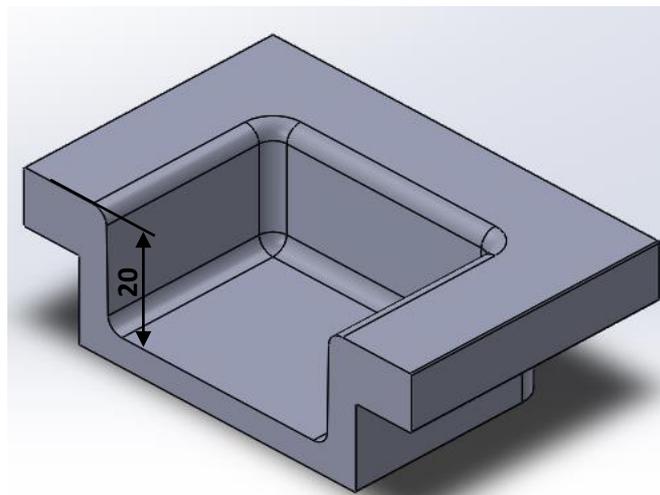


Figura 14. Cavidade com 20 mm de profundidade

Assim, ao utilizar cavidades com profundidades distintas a razão de estiramento ocorrida na folha polimérica será também distinta. A razão de estiramento é a razão entre o comprimento da folha antes e depois de ser termoformada tendo em conta a direção do estiramento e a profundidade do molde. No caso em estudo, o estiramento pode ocorrer ao longo do comprimento, 60 mm, ou da largura, 40 mm (ver Figura 12). Para as cavidades com 10 mm de profundidade a razão de estiramento provocada ao longo do comprimento é 1,33 e da largura é 1,5. Para as cavidades com 20 mm, a razão de estiramento é superior em ambas as direções, tendo esta 1,67

no comprimento e 2 na largura. Estudou-se ainda o efeito do raio de curvatura na termoformação e integridade dos circuitos impressos, fazendo variar o raio superior e inferior das cavidades do molde, como se mostra na Figura 15.

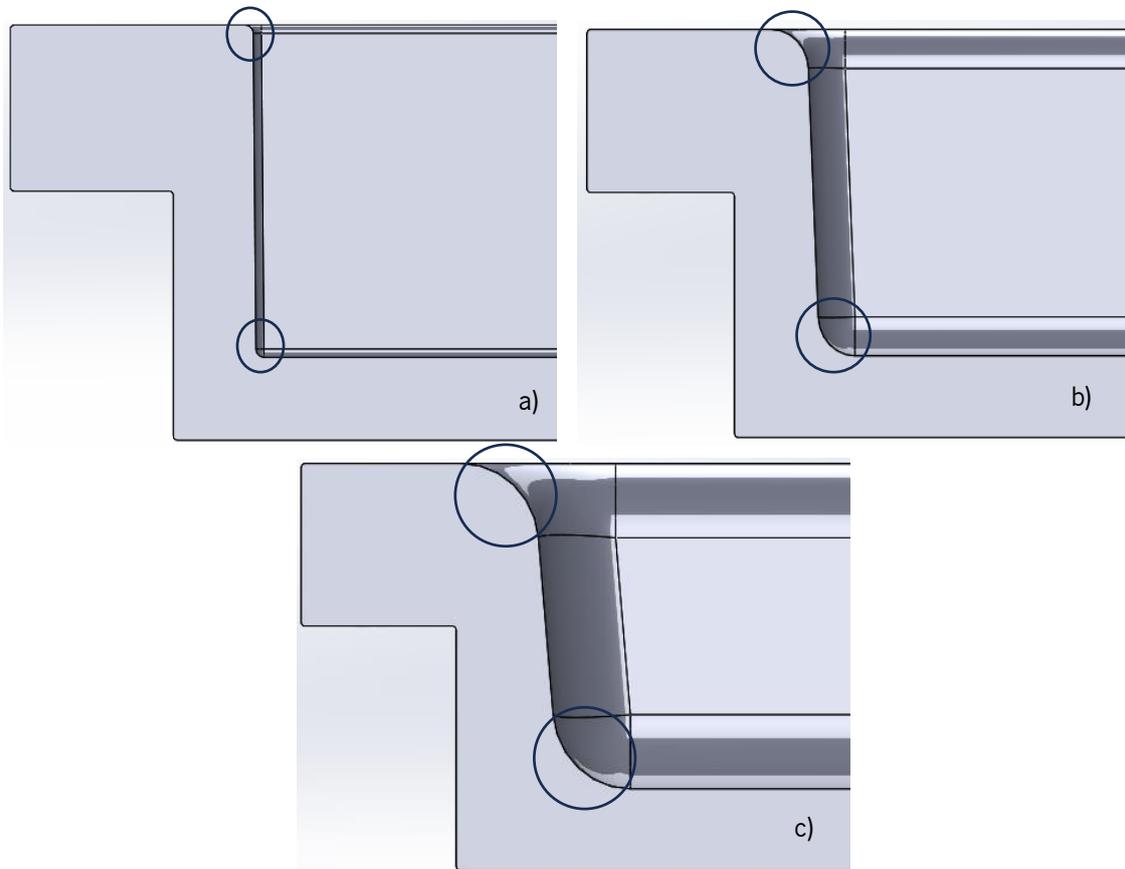


Figura 15. Raios de curvatura: a) 0,5mm; b) 2,5 mm; c) 5mm

Os moldes foram projetados com raios de curvatura abruptos, 0,5 mm, intermédios, 2,5 mm, e suaves, 5 mm. Além disto, os ângulos de saída também são distintos dependendo dos raios de curvatura. Estes assumem um valor de $0,5^\circ$ para os raios abruptos, $2,5^\circ$ para os intermédios e 5° para os suaves. Isto é visível na Figura 15 através da inclinação da parede do molde. Posteriormente, também foi idealizada a disposição dos furos de vácuo nas cavidades. Estes estão localizados nas extremidades e no meio da cavidade para que a folha aquecida, aquando da sua moldação, reproduza, eficazmente, os contornos do molde. Na Figura 16 verifica-se a disposição dos furos de vácuo que têm um diâmetro de 0,5 mm.

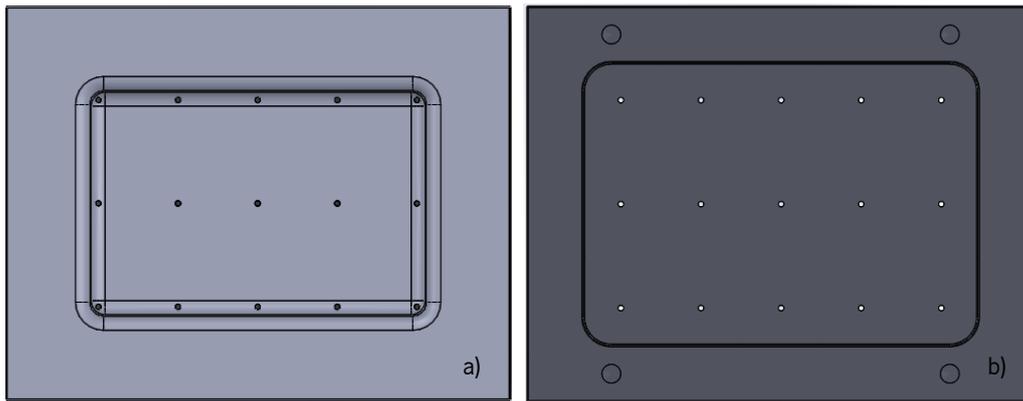


Figura 16. Disposição dos furos de vácuo: a) Vista superior; b) Vista inferior

3.2 Sistema de encastramento

Houve a necessidade de projetar um sistema de encastramento visto que a máquina de termoformação disponível está direcionada para utilizar moldes macho e neste caso, são utilizados moldes fêmea. Assim, este sistema tem a função de encastrar a folha na periferia das cavidades atuando, por isso, sob a folha polimérica de forma a proporcionar uma melhor enformação. Na Figura 17 verifica-se a disposição do contramolde, do substrato e do molde durante o processo de termoformação.

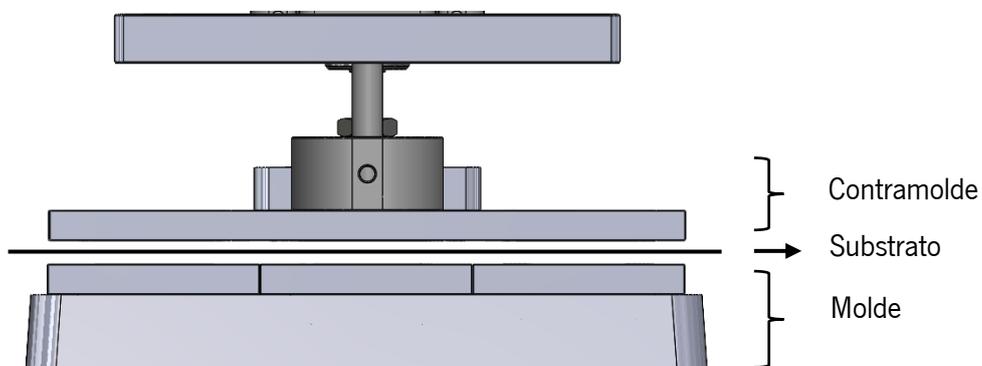


Figura 17. Encastramento da folha

O sistema de encastramento é constituído por um contramolde e um sistema elevatório e foi projetado no *Solidworks*. O contramolde é composto por duas placas: uma de encastramento e outra de fixação, representadas na Figura 18. A placa de encastramento permite que o substrato não se mova e que não haja fugas de ar. Esta tem três aberturas que representam as três cavidades que existem no molde. A placa de fixação liga a placa de encastramento ao sistema

elevatório através da utilização de quatro parafusos. As dimensões da placa de encastramento e de fixação estão ilustradas no Anexo 3 e Anexo 4, respectivamente.

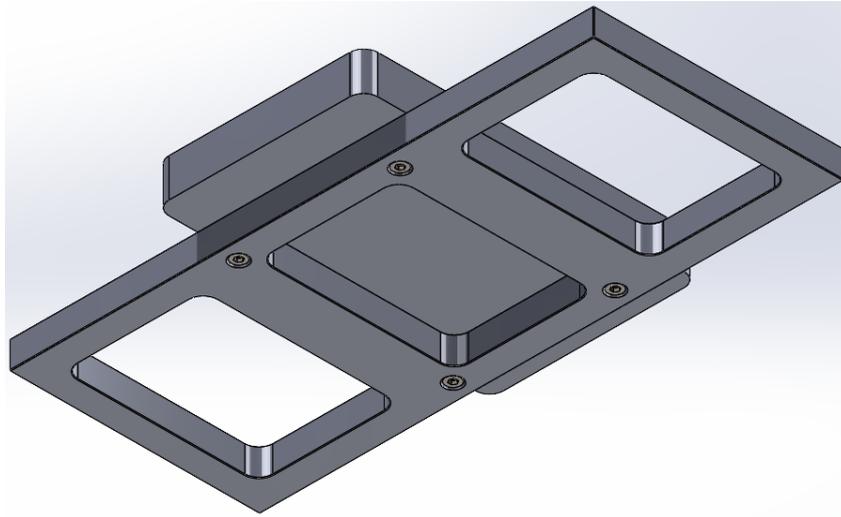


Figura 18. Projeto do contramolde

O sistema elevatório é constituído por vários elementos como molas, parafusos, barras de alumínio, cilindro pneumático, etc, em que estes estão ligados entre si, como é visível na Figura 19. Para além disso, estes elementos estão ligados ao ar comprimido que é o que faz com que o sistema de encastramento suba e desça.

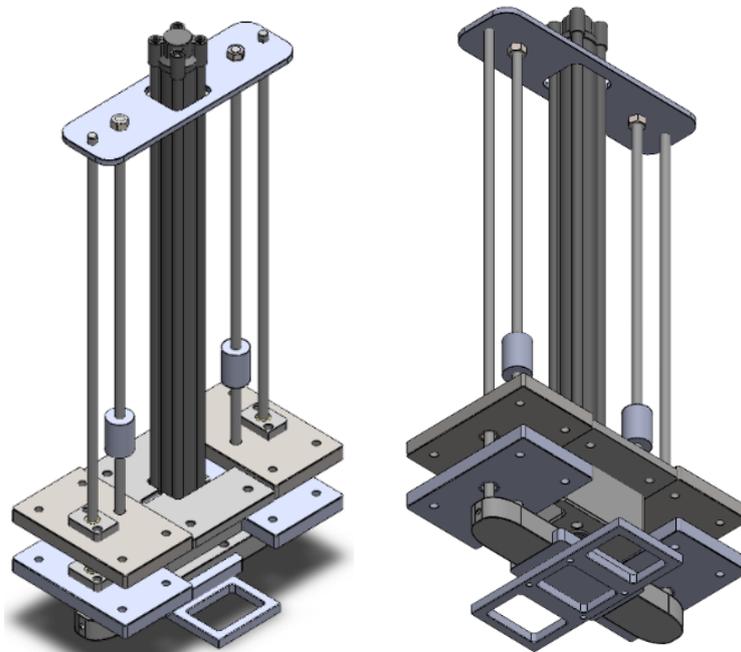


Figura 19. Sistema elevatório do contramolde

3.3 Placa de aquecimento do molde

Da mesma forma, idealizou-se, também, uma placa de aquecimento do molde removível de modo a permitir que o equipamento seja usado com outros moldes. A placa de aquecimento tem uma dimensão de 225 mm por 135 mm para que coincida com o dimensionamento do molde. Na Figura 20 está representado o projeto da placa de aquecimento onde também estão indicadas as entradas e saídas de vácuo e de água.

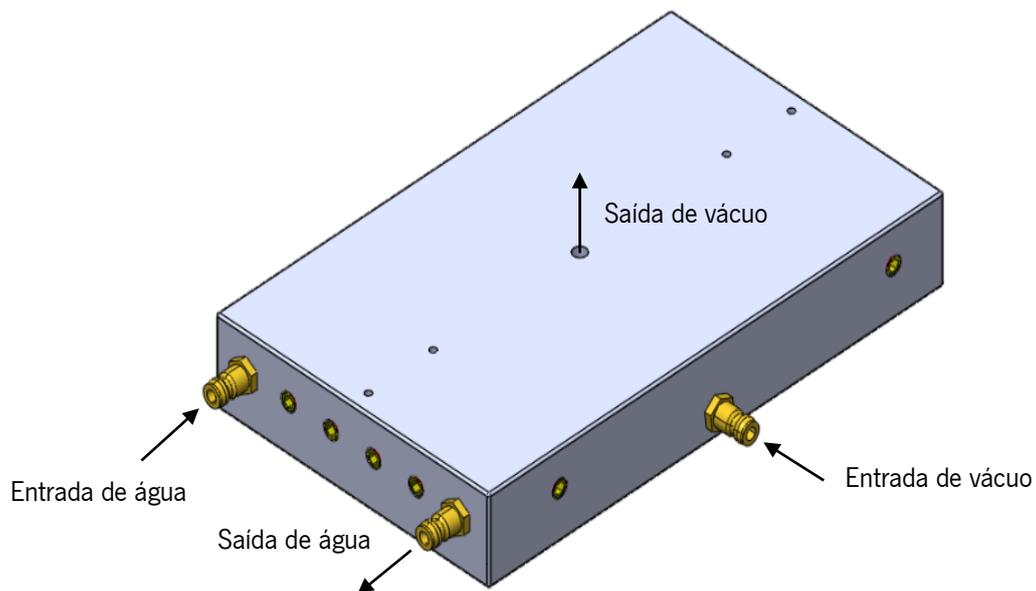


Figura 20. Dimensionamento e projeto da placa de aquecimento

O vácuo percorre o canal projetado no interior da placa e sai pelo orifício do centro da mesma permitindo que o vácuo chegue às cavidades. Relativamente ao aquecimento, este é conseguido devido à circulação de água no interior da placa. Tal é possível porque no interior da mesma foi projetado um sistema de linhas de água. A utilização da placa de aquecimento permite obter diferentes condições de processamento. Ou seja, com a utilização desta é possível obter diferentes temperaturas do molde. Na Figura 21 estão ilustradas as linhas de vácuo e de água. Estas foram projetadas de forma independente e por isso, o circuito do vácuo não interfere com o da água.

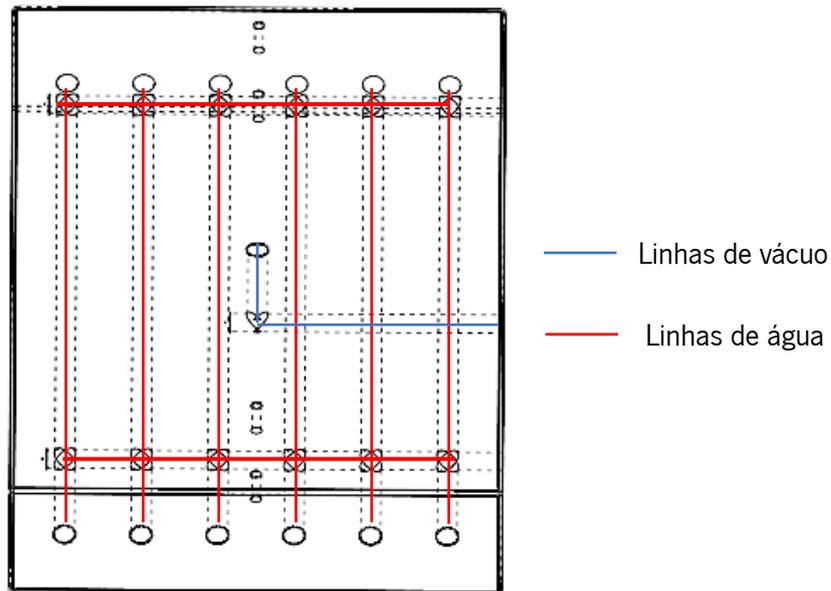


Figura 21. Sistema de linhas de vácuo e de água

Deste modo, a placa é ligada a um termostato, através de duas mangueiras, que faz com que circule água quente dentro da mesma e por condução, o molde vai aquecendo. Neste caso, definiu-se no termostato uma temperatura de 80°C visto que é a temperatura máxima aconselhada para este termostato. Por isso, como o molde só é aquecido por condução, o processo de aquecimento demora cerca de 40 minutos (min) até a temperatura desejada estabilizar. No entanto, como existem perdas de calor o molde atinge, no máximo, uma temperatura de, aproximadamente, 75°C. Assim, na Figura 22 está representada a ligação da placa de aquecimento ao termostato.



Figura 22. Ligação do termostato à placa de aquecimento

Para além disto, de modo que o vácuo seja mais eficaz optou-se por adicionar um reservatório de vácuo para que houvesse vácuo instantâneo e maior pressão negativa. Este está ligado à placa de aquecimento e à máquina de termoformação, mais especificamente à bomba, responsável por criar vácuo, através de mangueiras. A abertura e fecho do reservatório é conseguida com a utilização de uma torneira. Todos os componentes descritos neste capítulo foram produzidos em alumínio uma vez que este é considerado um bom condutor térmico conseguindo-se, assim, um aquecimento mais rápido. Na Figura 23 está ilustrado o conjunto do molde e da placa de aquecimento.

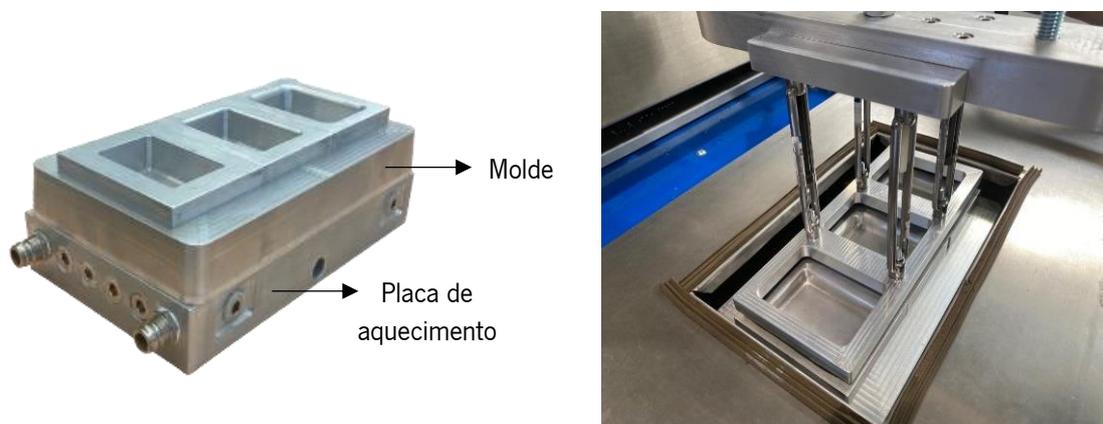


Figura 23. Placa de aquecimento, molde e contramolde

4. Procedimento experimental

4.1 Materiais

Neste projeto, os materiais utilizados foram tintas condutoras e substratos de policarbonato. Em relação aos substratos, foram utilizados dois *grades* distintos: Lexan 8A13E (Sabic, Arábia Saudita) e DE 1-4 060007 (Covestro, Alemanha). Na Tabela 2 estão descritas algumas propriedades dos mesmos.

Tabela 2. Propriedades dos substratos [17], [18]

Propriedades	Substratos	
	LEXAN 8A13E	DE 1-4 060007
Módulo de Young (MPa)	≥ 2100	≥ 2200
Alongamento na rotura (%)	100	140

Nos substratos Lexan 8A13E foram utilizadas folhas poliméricas com uma espessura de 0,25 mm e 0,5 mm enquanto nos substratos DE 1-4 060007 apenas foram utilizadas folhas com uma espessura de 0,3 mm. Em relação à tinta, usou-se dois tipos de tinta diferentes: tinta à base de prata, ME614, e tinta à base de carbono, ME201. Ambas são utilizadas para promover a condutividade elétrica e foram adquiridas na DuPont (CCI Eurolam, Barcelona, Espanha). Para além disto, também se utilizou o adesivo ME902, à base de prata, fornecido também pela DuPont. Este adesivo serve para garantir uma boa adesão entre tintas condutoras de prata e componentes eletrónicos. Os três elementos têm os mesmos requisitos para a cura, ou seja, têm de ser curados durante 20 min a uma temperatura de 120°C. Na Tabela 3 estão ilustradas as características das tintas e do adesivo.

Tabela 3. Especificações das tintas e do adesivo [19]-[21]

Propriedades	Tintas		Adesivo
	ME201	ME614	ME902
Viscosidade (Pa.s)	40 – 75	20 – 40	40 – 90
Sólidos (%)	30 – 34	70 – 73	75 – 77
Resistência ($m\Omega/sq/mil$)	≤ 750	≤ 40	100 – 150

4.2 Métodos

4.2.1 Serigrafia – impressão dos circuitos

A impressão dos circuitos foi feita em duas máquinas diferentes: uma semiautomática, modelo AT-60PD (ATMA, Taiwan), [22], e outra manual, modelo Miniprint, [23]. A máquina semiautomática deposita a tinta sob a tela de impressão, suavemente, com a pressão estipulada tornando o processo mais mecânico. Deste modo, este tipo de equipamento proporciona impressões com maior repetibilidade e qualidade comparando com máquinas manuais. As impressões realizadas em máquinas manuais dependem no nível técnico do impressor. Além disso, na semiautomática consegue-se definir parâmetros de impressão enquanto na manual não. Assim, as impressões foram realizadas com o *squeegee* a uma velocidade de 100 mm/s a uma distância de 1 mm com um ângulo de 65° e uma pressão do ar de 3,5 bar. Em ambos os equipamentos, estipulou-se uma posição para colocar a folha na máquina, para que esta ficasse sempre no mesmo local. A impressão foi feita no lado mais rugoso do substrato visto que a tinta adere melhor a superfícies rugosas. Para além disso, houve a necessidade de utilizar duas telas de impressão diferentes uma vez que vão ser impressos dois circuitos distintos. Na Figura 24 estão ilustradas as telas de impressão utilizadas que são feitas de poliéster ou de *stainless steel* sendo colocadas, posteriormente, numa moldura de alumínio.



Figura 24. Telas de impressão

Na Figura 25 mostra-se as dimensões dos circuitos impressos. As trilhas, representadas na Figura 25 (a), são o foco deste trabalho e por isso, foram analisadas antes e após a termoformação através da realização de vários testes experimentais. Estas têm uma largura de 0,5 mm e um comprimento de 60 mm. No entanto, devido ao facto de serem finas não foi possível realizar o teste de adesão. Deste modo, imprimiram-se quadrados, como o que está ilustrado na Figura 25 b), e avaliou-se a adesão dos dois tipos de tinta ao substrato de PC.

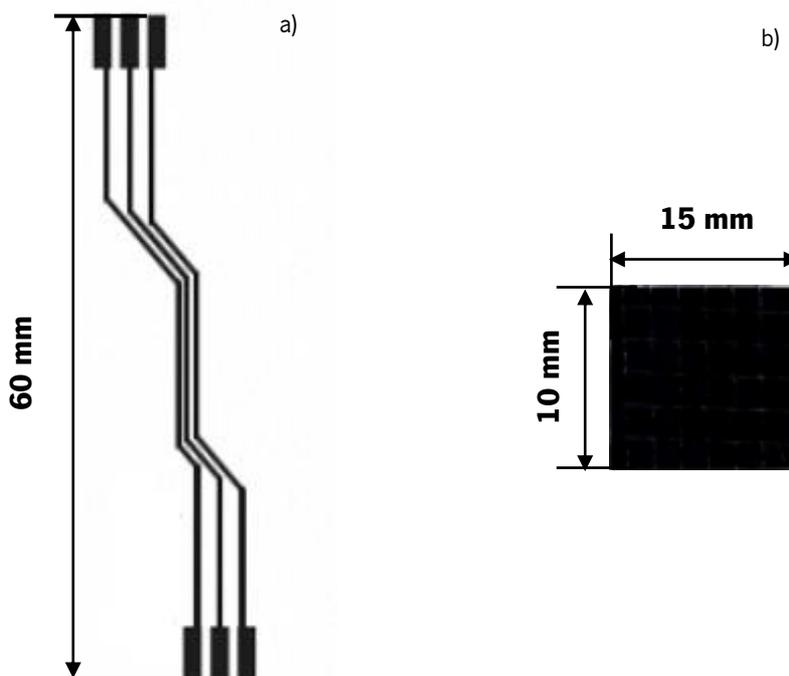


Figura 25. Circuitos impressos: a) Trilhas; b) Quadrados

Primeiramente, antes de iniciar a impressão foi necessário preparar a tinta condutora. Assim, foi necessário misturá-la, com o auxílio de uma vareta de metal, de modo que ficasse homogênea. Depois deixou-se repousar durante 20 min para que sejam eliminadas as bolhas de ar. Posteriormente, colocou-se a respetiva tela de impressão e definiu-se a posição do substrato na mesa de apoio. Depositou-se a tinta por cima da tela e descolocou-se o *squeegee* de forma que a tinta passe para o substrato. Por fim, após a impressão, os substratos foram curados numa estufa (modelo FD115, Binder, Alemanha), a 120°C durante 20 min. As telas de impressão foram limpas após o uso das mesmas com o respetivo solvente, Diacetato de etilenoglicol.

4.2.2 Teste de adesão

O ensaio de *Cross Cut* é utilizado para analisar a adesão da tinta ao substrato através de cortes paralelos feitos sob o revestimento. O equipamento usado para a realização deste teste foi o KIT de Teste de Adesão *Cross Cut* TQC CC2000, Figura 26. Este teste segue a norma EN-ISO 2409, para substratos rígidos, ou ASTM D-3359 -17, para substratos poliméricos. Uma vez que é utilizado material plástico, a norma escolhida foi a ASTM D-3359 -17.



Figura 26. KIT de Teste de Adesão Cross Cut TQC CC2000

O teste *cross cut* foi realizado na tinta à base de prata, ME614 (DuPont), e à base de carbono ME201 (DuPont). No entanto, apenas se utilizou um tipo de substrato, LEXAN 8A13E, com uma espessura de 0,25 mm. Para cada uma das tintas, foram preparadas cinco amostras. Assim, colocou-se as amostras sob uma base firme e fez-se cortes paralelos, com o auxílio da ferramenta [24]. Ou seja, cortou-se o filme de tinta até o substrato num movimento constante, pressionando o suficiente a ferramenta para que a aresta de corte atinja o substrato. Depois de fazer os cortes necessários, limpou-se o filme, levemente, com uma escova e observou-se os cortes. Posteriormente, colocou-se e alisou-se a fita (tesa 4657, Farnell, Espanha) sobre a área de corte e removeu-se a mesma, após 90 ± 30 s de aplicação. A fita utilizada em cada um dos ensaios

tinha, aproximadamente, um comprimento de 50 mm. A zona de estudo, ou seja, a área de corte foi analisada na Lupa estereoscópica (Leica, DMS1000) após a realização dos cortes e da colocação da fita, de modo a observar diferenças no padrão. Para além disso, pesou-se a fita antes e após a sua utilização, numa balança analítica (modelo ADB, KERN, Portugal) para que seja possível analisar a quantidade de revestimento removido. Após a execução deste procedimento, quantificou-se qualitativamente, numa escala de 0 a 5, a resistência do revestimento à separação do substrato, segundo a norma ASTM D-3359-17, representado na Figura 27.

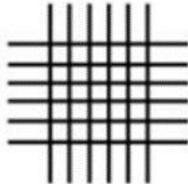
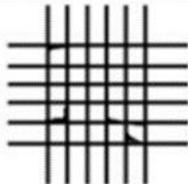
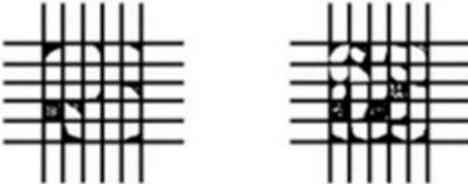
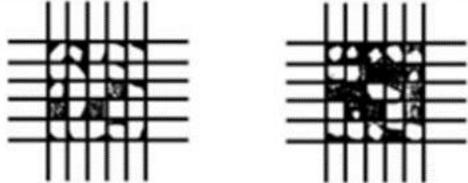
Classificação dos resultados dos teste de adesão		
Classificação	Percentagem de área removida	Aparência da superfície da área de corte
5B	0%	
4B	Menos do que 5%	
3B	5 – 15%	
2B	15 – 35%	
1B	35 – 65%	
0B	Mais do que 65%	

Figura 27. Classificação dos resultados do teste de adesão adaptado de [24]

Assim, através da Figura 27, atribui-se uma classificação de [24]:

- 5B, se não ocorrem danos na superfície, por isso os cortes são totalmente lisos e nenhum dos quadrados é afetado;
- 4B, se menos de 5% da área é afetada, ou seja, quando, apenas, pequenas porções de tinta são removidas nas interseções dos cortes;
- 3B, se a área afetada é de 5 a 15%, a zona de corte apresenta pequenas ranhuras no revestimento ao longo das bordas e nos cruzamentos dos cortes;
- 2B, se a área afetada é de 15 a 35%, a superfície contém fissuras no revestimento ao longo das bordas e em alguns dos quadrados;
- 1B, se a área afetada é de 35 a 65%, quando são removidos quadrados inteiros de revestimento;
- 0B, se a superfície apresenta piores condições que em 1B.

4.2.3 Medição da espessura das linhas

A utilização do perfilômetro tem como principal intuito medir a espessura das trilhas condutoras, de modo a verificar se a espessura depende do tipo de tinta ou dos parâmetros colocados na máquina de serigrafia. Esta medição também foi bastante importante para perceber se, nas impressões realizadas, não havia oscilações na espessura das linhas que podiam afetar os resultados obtidos. Portanto, foram realizadas medições em linhas de tinta com uma e duas camadas. Deste modo, utilizou-se um sistema de medição 3D ótico, da marca Alicona (modelo INFINITEFOCUS SL) onde é possível observar o acabamento da superfície e medir a sua forma. Assim, foi necessário colocar a amostra no equipamento e definir a zona de medição onde será projetada uma luz. Foi essencial ajustar os parâmetros de aquisição no *software* de modo que a luz utilizada não seja demasiado refletida para que não provoque vazios na imagem a ser estudada. Por fim, adquiriu-se uma imagem da superfície da peça e traçou-se uma linha na imagem da mesma para se efetuar a medição.

4.2.4 Testes eletromecânicos

A caracterização eletromecânica tem como objetivo avaliar a capacidade de estiramento da tinta, relacionando a resistência elétrica com estiramento/alongamento do material. Na Figura 28 ilustra-se os componentes usados neste ensaio. Utilizou-se uma máquina de tração (Zick/Roell Z005) onde se conseguiu obter valores de tensão e deslocamento para que, posteriormente, fosse

possível construir gráficos tendo em conta estas duas variáveis. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente a uma velocidade de 5 mm/min, definida pela norma EN ISO 527-1. Previamente mediu-se a espessura dos provetes, com o auxílio de um micrómetro. Durante o ensaio procedeu-se ao registo dos valores da resistência elétrica tendo em conta o deslocamento que ocorre durante a tração. Isto foi conseguido através da montagem de um circuito elétrico. O circuito é composto por uma placa SBC, Figura 28 d), uma *breadboard* Figura 28 e), resistências e fios elétricos. Além disso, foi preciso montar dois circuitos diferentes: um para medir resistências médias e outro para medir resistências baixas. Para este último caso, teve-se de adicionar um *pinout* LM317, Anexo 5, que se trata de um regulador de tensão linear para circuitos de corrente contínua. Os circuitos foram montados de acordo com o Anexo 6 e Anexo 7. A leitura dos valores da resistência ocorreu com o auxílio do *software Open-source Arduino (IDE)*.

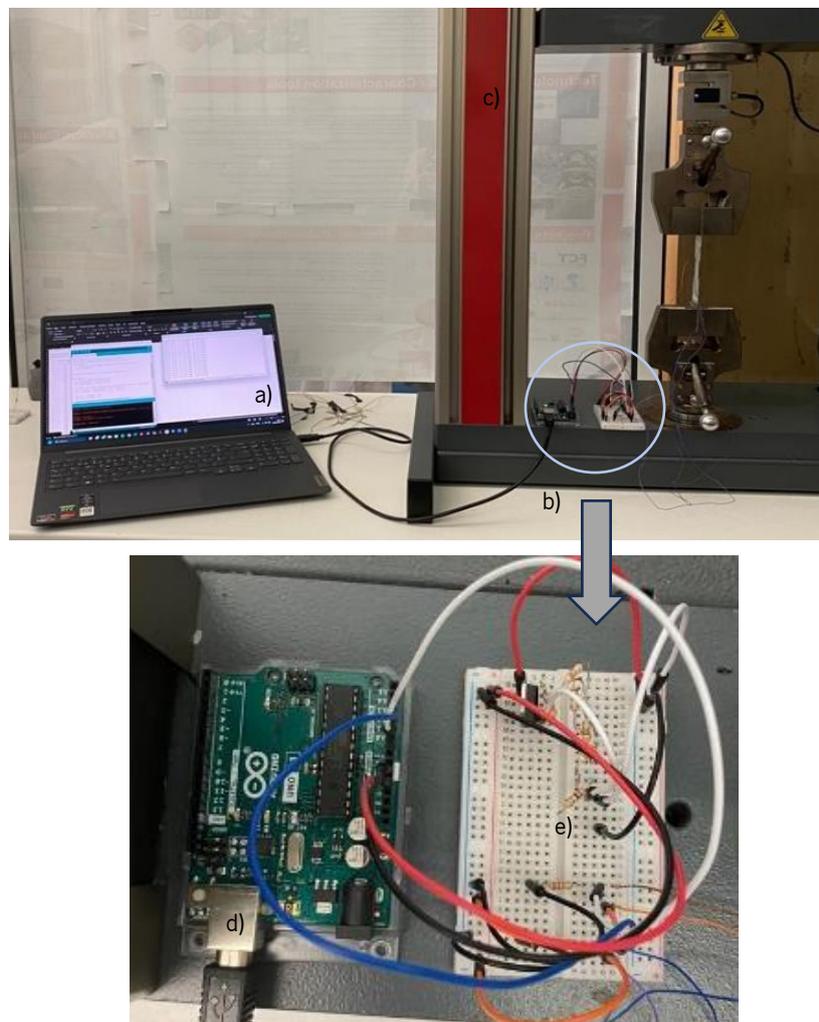


Figura 28. Teste eletromecânico: a) Leitura das resistências no software; b) Circuito elétrico; c) Ensaio de tração; d) Placa SBC; e) *Breadboard*

O ensaio eletromecânico foi feito com provetes de folha polimérica em PC e de tinta condutora. Em ambos os casos, os ensaios foram realizados com dois tipos de tinta diferentes: tinta à base de prata, ME614, e tinta à base de carbono, ME201. O substrato utilizado para fazer os provetes foi o LEXAN 8A13E, onde foram impressas trilhas condutoras. Nestes substratos, cortaram-se provetes, como representado na Figura 29, com dimensões segundo a Norma EN ISO 527-3. Após o corte, foram colocados fios condutores nas extremidades das trilhas, Figura 30, que, posteriormente, são ligados à *breadboard*.

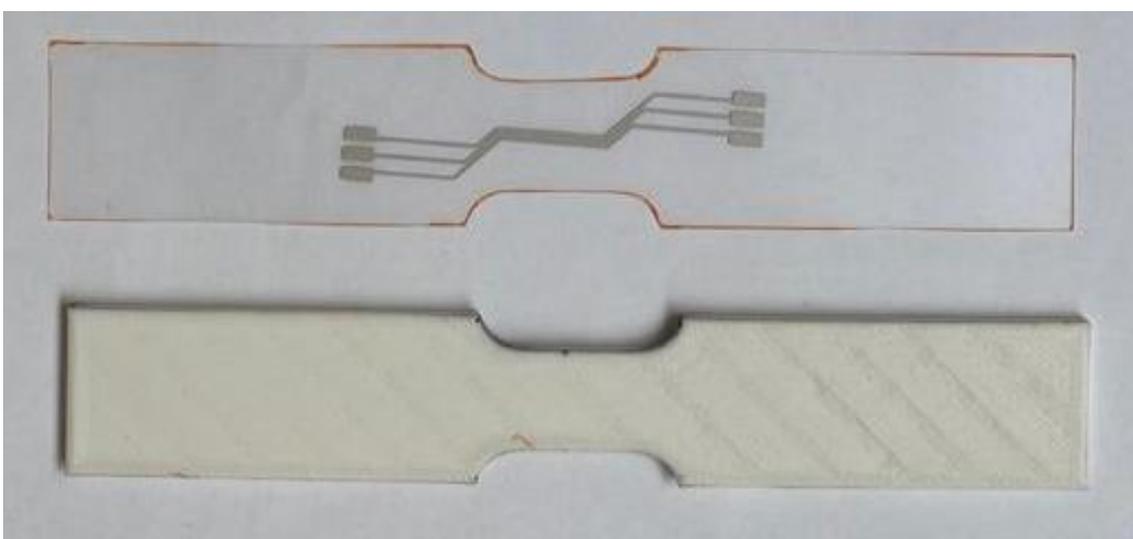


Figura 29. Provetes

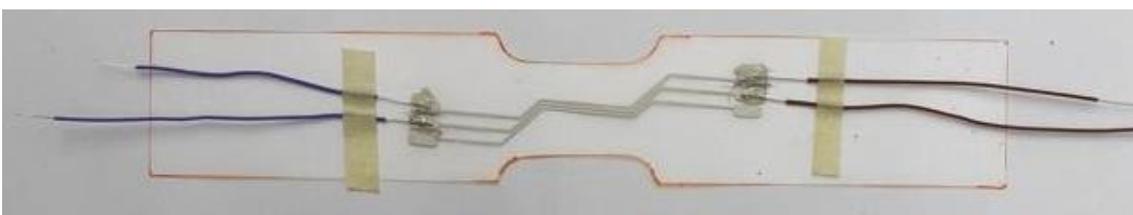


Figura 30. Colocação dos fios nas extremidades das trilhas

Para fazer os provetes de tinta depositou-se a mesma numa folha de teflon. Depois, com o uso da *doctorblade* definiu-se uma espessura de 1,25 mm, de forma que os provetes tivessem uma espessura entre 0,1 mm e 0,3 mm, e espalhou-se a tinta pela folha de teflon. A tinta foi curada numa estufa durante 20 min a 120°C, tal como recomendado na ficha técnica da mesma. Após a cura da tinta, decalcou-se e cortou-se provetes. Na Figura 31 observa-se a descrição deste processo.



Figura 31. Processo da formação dos provetes de tinta

Assim, após o corte dos provetes, procedeu-se à colocação dos fios nas extremidades dos provetes, com o uso do adesivo, como se pode observar na Figura 32 a). Para além disto, nestes provetes teve-se de colocar fita isoladora na extremidade dos mesmos, Figura 32 b), porque é a zona que está em contacto com a amarra da máquina de tração. Ou seja, como a amarra é de metal ia interferir nos resultados da resistência elétrica.

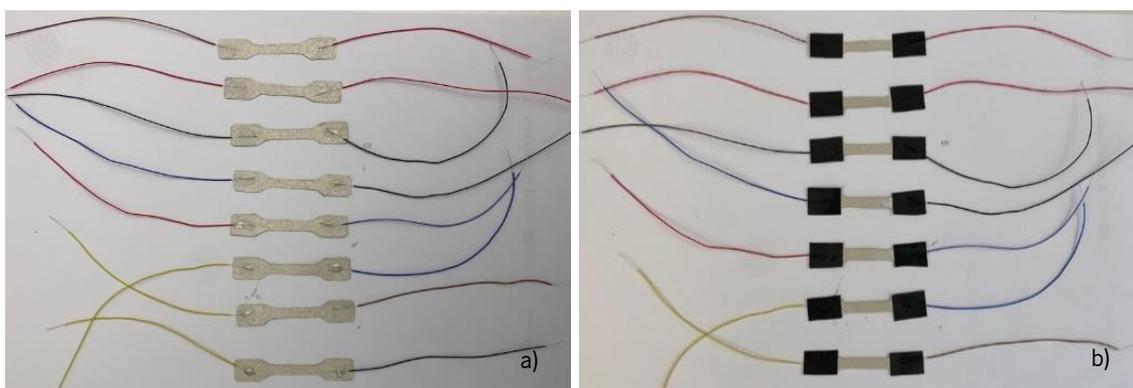


Figura 32. Provetes de tinta: a) Colocação dos fios; b) Colocação da fita isoladora

Tanto nos provetes de substrato como nos de tinta os adesivos utilizados para segurar os fios foram os mesmos. Na tinta de prata usou-se o adesivo ME902 e na de carbono foi a própria tinta. Optou-se por utilizar estes adesivos para que tivessem as mesmas propriedades que a tinta dos provetes. Assim, os materiais ao serem compatíveis não alteram os resultados obtidos. A cura do adesivo foi realizada consoante a respetiva ficha técnica.

4.2.5 Calibração do tempo de aquecimento

Antes de iniciar a termoformação calibrou-se o tempo de aquecimento de modo a obter a temperatura desejada para cada uma das espessuras de substrato. Para isto utilizou-se uma Câmara térmica IR ThermoCAM SC640. Na Figura 33 mostra-se a montagem do sistema.



Figura 33. Câmara IR ThermoCAM SC640

Este equipamento tem integrado um *software* (*ThermaCAM Researcher*) que permite analisar as imagens captadas e contém funções de medição e análise para o estudo da temperatura [25]. Para realizar a calibração as folhas poliméricas, estas foram aquecidas com diferentes tempos de aquecimento. Estipulou-se tempos de aquecimento entre os 30 e 60 s (segundos) para cada uma das espessuras dos substratos, tendo sido feitas três medições para cada tempo. Para além disso, na câmara definiu-se uma *box* onde é possível observar a temperatura mínima, média e máxima nessa zona, como se pode observar na Figura 34.

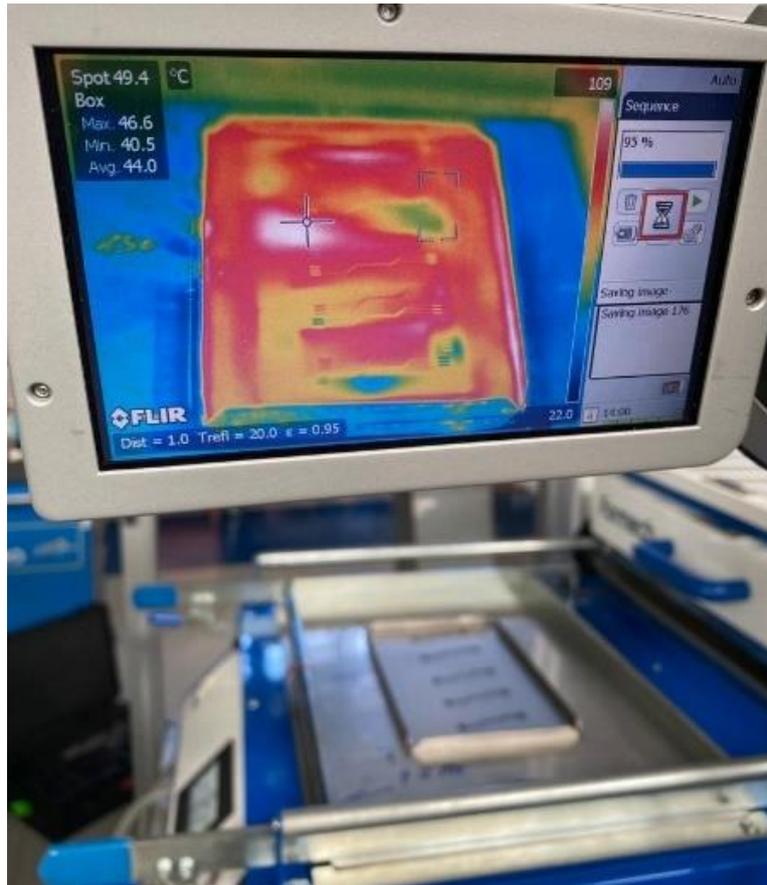


Figura 34. Disposição da *box* na câmara IR *ThermaCAM SC640*

Deste modo, aqueceram-se os substratos e captaram-se imagens da respetiva superfície. Posteriormente, estas foram analisadas, com o auxílio do programa referenciado acima. Os tempos de aquecimento foram escolhidos tendo em conta as temperaturas recomendadas pelo fornecedor para o processamento deste tipo de substratos, estando estas entre 180°C e 210°C.

4.2.6 Termoformação

Os testes de termoformação dos substratos de PC servem para avaliar o desempenho da folha polimérica e da tinta funcional quando submetidos a temperaturas elevadas e à deformação. Para isso, recorreu-se a um equipamento de termoformação *Formech 450DT* (*Formech, Alemanha*). Trata-se de um equipamento manual e usa a enformação por vácuo. Antes de iniciar a termoformação das folhas, definiu-se uma potência de resistências de 70% para que o aquecimento seja mais lento e por consequência, mais uniforme. As folhas poliméricas foram colocadas na máquina sempre da mesma forma, isto é, a folha foi aquecida no lado da impressão.

4.2.7 Microscopia

A microscopia foi utilizada com o intuito de analisar o estado das trilhas condutoras. Antes da termoformação, verificou-se a integridade das linhas condutoras e mediu-se a largura das mesmas, de forma a perceber se havia imprecisões que pudessem afetar os resultados. Após a termoformação, observou-se se as trilhas apresentavam quebras e onde é que estas se localizavam e mediu-se, novamente, a largura das trilhas. Para isso, utilizou-se a Lupa estereoscópica (Leica, DMS1000) conjuntamente com o *software* do equipamento, Figura 35.



Figura 35. Lupa estereoscópica e respetivo software

4.2.8 Medição elétrica

A medição elétrica foi realizada antes e após a termoformação. Esta medição foi feita com a utilização de um multímetro digital (modelo KIOTTO KT1000H). A realização deste teste serve para comparar os valores e verificar se houve perda da condutividade elétrica após a termoformação. As pontas do multímetro foram colocadas nas extremidades das trilhas, como está representado na Figura 36. Após a obtenção de todos os valores, realizou-se um tratamento de dados onde foi calculada a média de cada uma das trilhas construindo-se, posteriormente, gráficos de barras de modo a analisar os resultados obtidos.

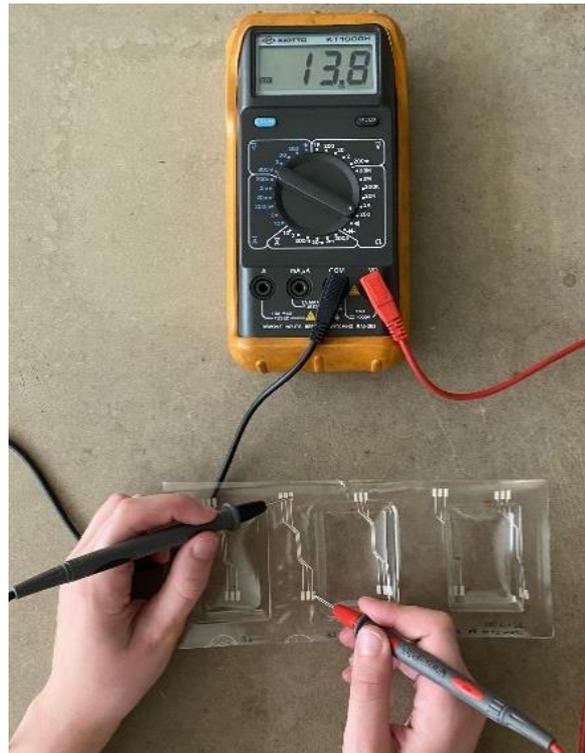


Figura 36. Medição da resistência elétrica na extremidade das linhas

4.2.9 Razão de estiramento e distribuição de espessuras

Para o cálculo da razão de estiramento das trilhas mediu-se o seu comprimento antes e depois da deformação. O cálculo foi realizado tendo como base na Equação 1, onde L_I e L_F são os comprimentos inicial e final das linhas, respetivamente.

$$\delta = \frac{L_F - L_I}{L_I} \times 100\% \quad (1)$$

A medição da espessura da peça termoformada foi realizada com o auxílio de um micrómetro de pontas. Uma vez que se trata de um molde simétrico supôs-se que a distribuição de espessuras era a mesma nos dois lados opostos da peça. Por isso, foi cortado um quarto de cada uma das peças em estudo onde se conseguiu medir a espessura nas direções, x e y, como ilustrado na Figura 37 a). Na Figura 37 b) observa-se como é que a peça foi colocada no micrómetro para proceder à medição da espessura.

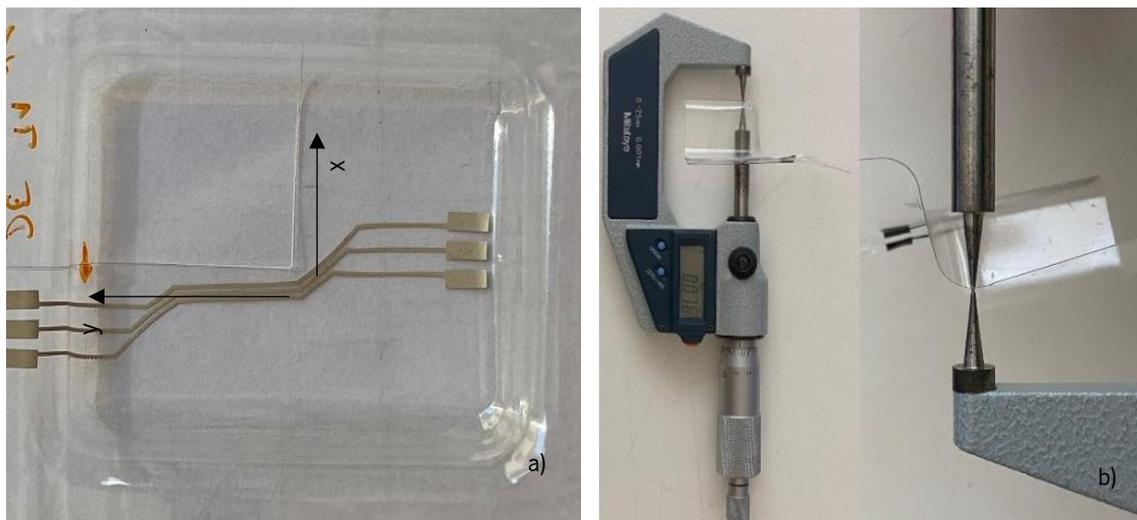


Figura 37. a) Corte da peça e respetivas direções; b) Colocação da peça no micrómetro

Desta forma, definiram-se pontos de medição com um espaçamento de 5 mm, entre eles, de modo que a medição fosse a mesma em todas as peças em estudo. Assim, para uma profundidade de 10 mm, em x e em y fizeram-se 6 e 8 medições, respetivamente. Já para uma profundidade de 20 mm, efetuaram-se 8 medições em x e 10 em y.

4.3 Simulação do processo de termoformação: T-SIM

Para simular o processo de termoformação e comparar os resultados previstos com os resultados experimentais, utilizou-se o T-SIM, que é um *software* dedicado à simulação do processo de termoformação. Este consegue prever a distorção da imagem e a distribuição final da espessura da parede tendo em conta o nível de pressão, a velocidade das ferramentas e a temperatura [26]. Além disso, no T-SIM estão disponíveis dados de polímeros, por exemplo, do PE, PP, PET, PC, PMMA, etc, no banco de dados de materiais do mesmo. Após a simulação, o programa fornece uma série de dados que permitem analisar o processo. Assim, consegue-se, por exemplo, obter mapas de cores da espessura, temperatura, tensão e deformação, analisar o contacto existente entre a folha polimérica e o molde e calcular o arrefecimento do substrato.

O processo de simulação deste programa inicia com a criação da folha. No caso em estudo, as folhas utilizadas nas simulações têm uma dimensão de 70 mm por 50 mm (definidas na caixa de diálogo do Anexo 8) visto que é o dimensionamento adequado para a cavidade utilizada. Também têm uma temperatura de 200°C porque as folhas, nos ensaios experimentais, são termoformadas a uma temperatura semelhante. No entanto, foram simuladas folhas com espessuras diferentes (0,25 mm, 0,3 mm e 0,5 mm) uma vez que são estas as espessuras

utilizadas no trabalho prático. Para além disso, foi necessário encastrar a folha para que esta, durante a simulação, não se movesse. Assim, na Figura 38 mostra a folha utilizada onde se pode observar a zona de encastramento (região a vermelho).

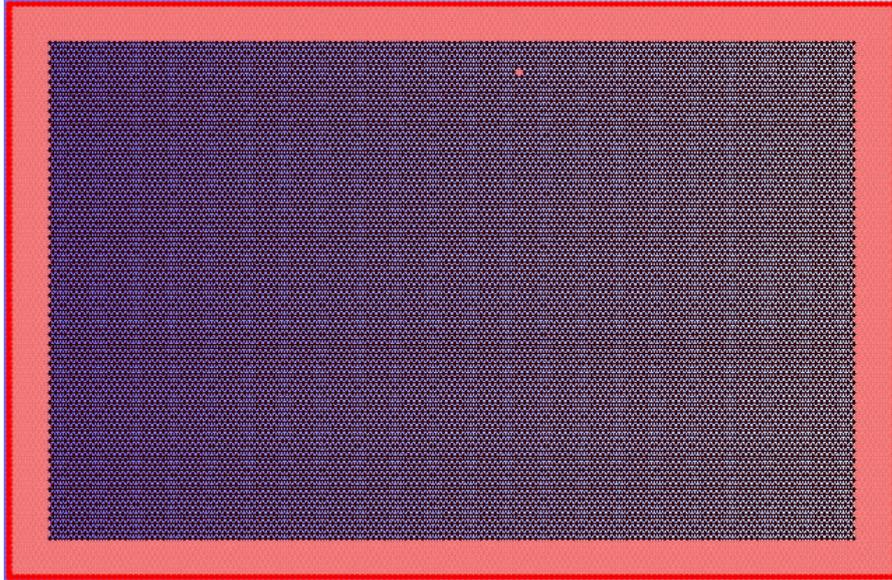


Figura 38. Definição da folha

Após a criação da folha, define-se a ferramenta/molde. Esta pode ser criada diretamente no T-SIM usando o editor de ferramentas ou importada de um arquivo externo. Deste modo, na caixa de diálogo (Anexo 9) seleciona-se “*Create new tool*”, se for para desenhar uma ferramenta nova ou “*Import new tool*” se a ferramenta já existir. Como o molde em estudo estava projetado em *Solidworks*, precisou-se apenas de guardar o ficheiro no formato *STL* e, posteriormente, importar o mesmo para o T-SIM. Na Figura 39 ilustra-se os dois moldes utilizados nas simulações.

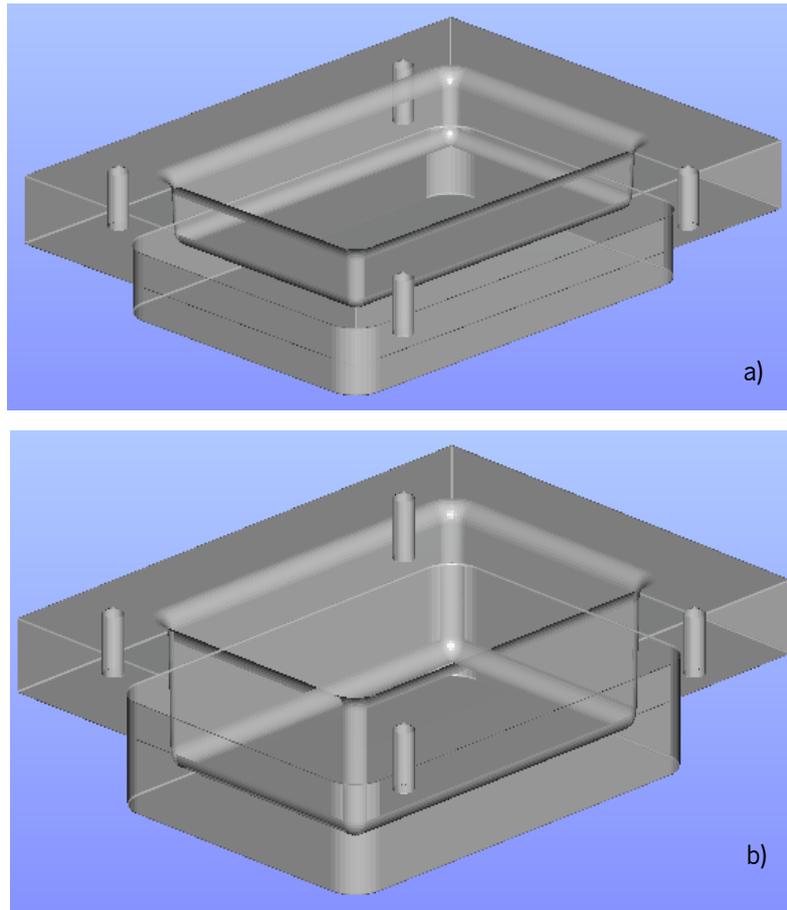


Figura 39. Moldes utilizados nas simulações: a) Profundidade de 10 mm; b) Profundidade de 20 mm

Para além disto, definiu-se também o controlo do processo que serve para descrever a pressão/vácuo aplicada e os movimentos das ferramentas. Aqui é necessário preencher uma tabela (Anexo 10) com os dados apropriados. Desta forma, estipulou-se uma pressão de - 80 kPa para que esta fosse semelhante à utilizada nos testes laboratoriais (0,8 bar). Relativamente ao material, no banco de dados do *software* selecionou-se o PC uma vez que se trata do material em estudo. No entanto, caso o material em análise não estivesse na lista era possível adicionar um novo à mesma. Além disto, no programa também é preciso ter em conta os coeficientes de transferência de calor e de fricção e as temperaturas ambiente e das ferramentas. Assim, criou-se dois ficheiros de *heat and friction* uma vez que foram testadas duas temperaturas de ferramentas diferentes. Ou seja, criou-se um ficheiro onde a temperatura do molde era de 75°C e outro onde a temperatura era de 25°C. Por fim, após a criação de todos os arquivos, criou-se um projeto no T-SIM que serve para configurar e executar a simulação. Assim, no novo projeto (Anexo 11) insere-se todos os arquivos concebidos (folha, molde, controlo de processo, material e *heat and friction*) e inicia-se a simulação.

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Teste de adesão

A adesão entre a tinta condutora e o substrato desempenha um papel fundamental no processo da eletrônica flexível. Na Figura 40, estão presentes imagens dos cortes realizados nos dois diferentes tipos de tinta. Deste modo, pode-se verificar que não existem diferenças relevantes na área em estudo após a colocação da fita. Ou seja, o estado do revestimento nas interseções e nos quadrados não modificou indicando que a adesão é boa. Tal ocorre nas tintas de prata e de carbono podendo-se, assim, também concluir que estas duas tintas têm boa adesão em substratos de PC (LEXAN 8A13E).

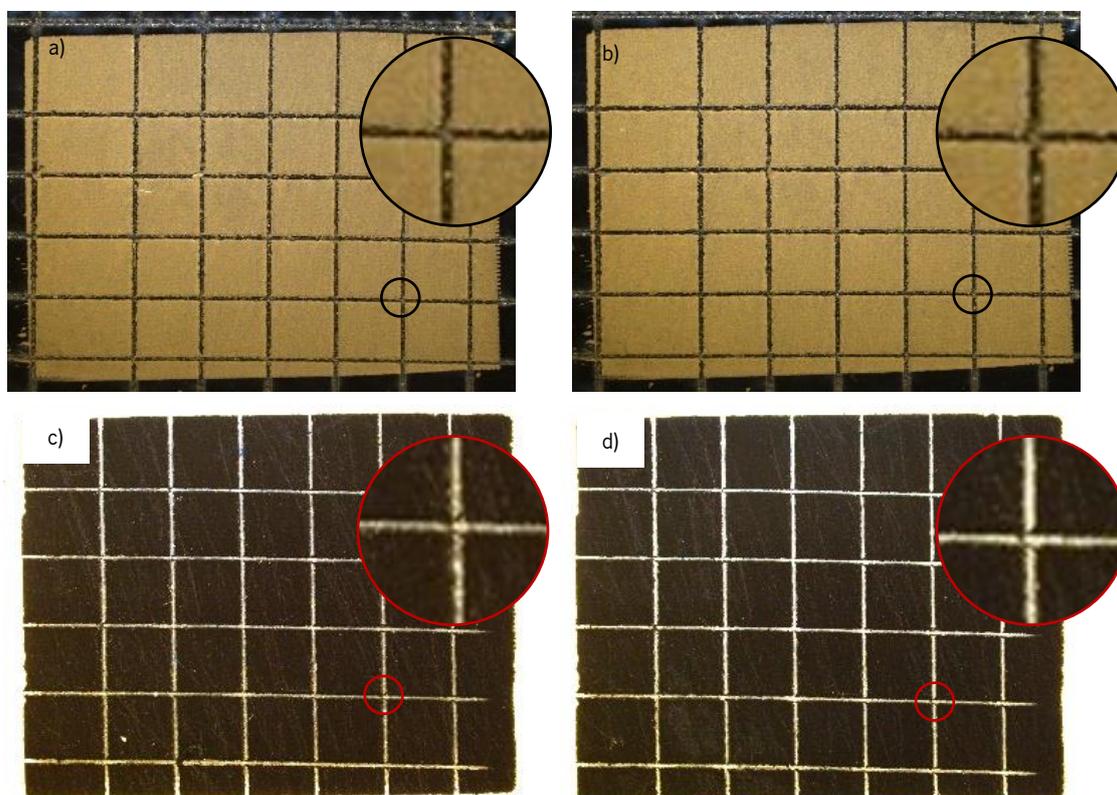


Figura 40. Cortes transversais: a) Antes da colocação da fita (tinta de prata); b) Após a colocação da fita (tinta de prata); c) Antes da colocação da fita (tinta de carbono); d) Após a colocação da fita (tinta de carbono);

A Tabela 4 mostra a diferença entre o peso final e inicial da fita e a respectiva classificação do teste de adesão segundo a norma ASTM D-3359-17. Assim, pelos valores obtidos, verificou-se que a quantidade de tinta removida pela fita é reduzida e que menos de 5% da área de impressão foi afetada. Por isso, todas as amostras em estudo foram classificadas com 4B.

Tabela 4. Diferença de pesos das tintas após os testes *cross-cut* e classificação final das tintas

Tinta à base de prata (ME614)		Tinta à base de carbono (ME201)	
Tinta removida (mg)	Classificação	Tinta removida (mg)	Classificação
0	4B	0,5	4B
0,8	4B	0,6	4B
0,5	4B	0,5	4B
0,3	4B	0,2	4B
0,9	4B	0,3	4B

5.2 Medição da espessura das linhas

Na Figura 41 e Figura 42 mostra-se a variação da espessura ao longo da largura das trilhas condutoras impressas, linha a azul, com tinta de prata e de carbono, respetivamente. Estas duas figuras foram adquiridas através do *software* do perfilómetro.

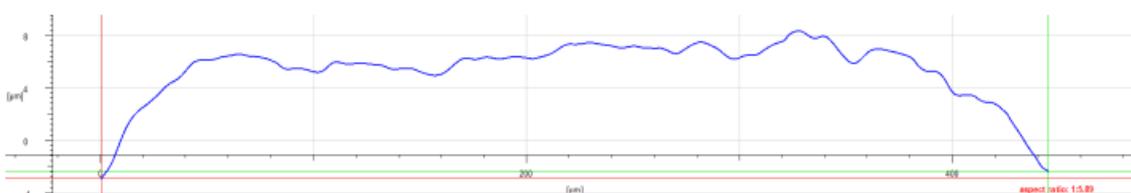


Figura 41. Variação da espessura da linha condutora com tinta de prata

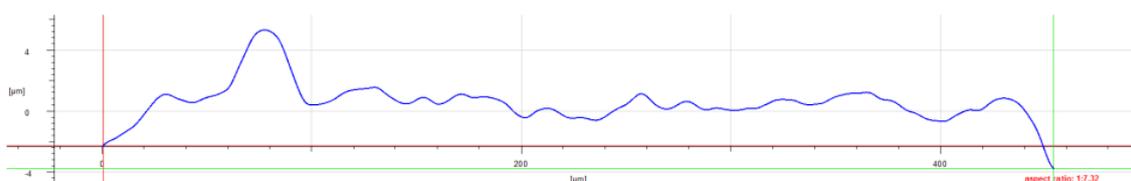


Figura 42. Variação da espessura da linha condutora com tinta de carbono

A variação da espessura na periferia da linha tende a diminuir comparando com os valores obtidos no meio da mesma. Para além disso, verifica-se que as duas tintas apresentam alguma rugosidade uma vez que a espessura ao longo da largura da trilha não é constante. Isto pode estar relacionado com o tamanho das partículas ou com problemas na impressão, mais precisamente com o *squeegee*. Na Tabela 5 apresentam-se as espessuras médias das linhas com uma e duas camadas para as diferentes tintas. Os valores obtidos foram calculados através da soma do valor absoluto do que está abaixo do eixo com o que está acima do mesmo.

Tabela 5. Espessuras das linhas

	Tinta de prata	Tinta de carbono
1 camada	10,9 μm	9 μm
2 camadas	18 μm	11,2 μm

Através dos dados da tabela é possível observar que dependendo da tinta existem diferenças na espessura das linhas. Quando as linhas só têm uma camada de tinta, verifica-se que a espessura das trilhas é idêntica. No entanto, o mesmo não se observou nas linhas com duas camadas de tinta, onde a espessura na tinta de prata é muito maior à da tinta de carbono. Assim, pode-se concluir que a diferença de espessuras das linhas está relacionada com o tipo de tinta utilizado, devendo estar associada à quantidade de sólidos presentes nas tintas. Segundo as fichas técnicas das mesmas, 70% da composição da tinta de prata corresponde a sólidos enquanto na de carbono, apenas 30% são sólidos. Ou seja, ao haver maior quantidade de sólidos a espessura da tinta tende a aumentar. A medição foi realizada apenas em substratos não termofomados uma vez que se tentou analisar a espessura das linhas em peças termofomadas e o equipamento não tinha sensibilidade para analisar superfícies com espessura demasiado reduzida.

5.3 Testes eletromecânicos

5.3.1 Provetes de tinta

Na Figura 43 está representada a relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica para provetes de tinta de prata. Assim, verifica-se que os provetes com este tipo de tinta sofrem uma quebra instantânea. Ou seja, o valor da resistência elétrica mantém-se ao longo da deformação e atinge o valor máximo quando o provete chega ao ponto de rotura. Isto significa que a tinta de prata não tem muita elasticidade, não suportando grandes deformações.

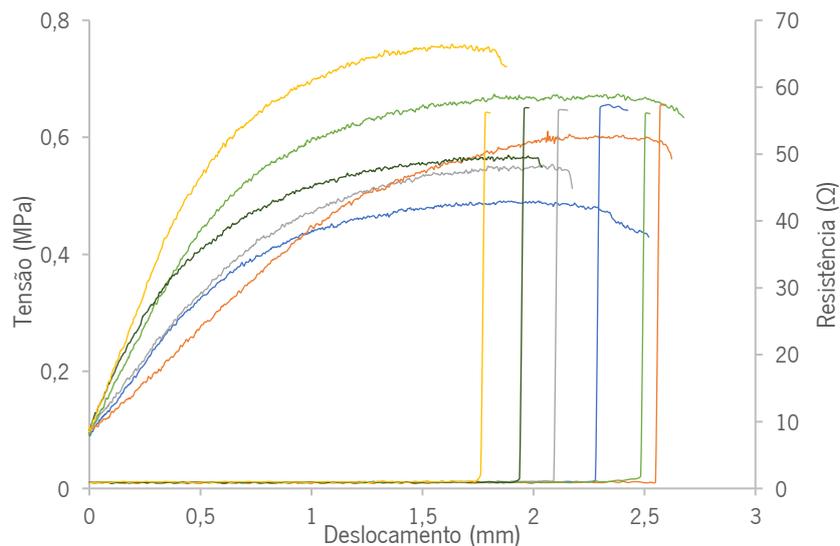


Figura 43. Relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica (tinta de prata)

Para além disso, o deslocamento ocorrido é idêntico em todas as amostras estudadas, estando este entre os 1,7 mm e os 2,5 mm. O mesmo se pode concluir sobre a tensão uma vez que a oscilação do seu valor é insignificante. Na Figura 44 apresentam-se os valores do deslocamento para provetes de tinta de carbono tendo em conta a tensão e a resistência elétrica. Assim, verifica-se que, neste tipo de tinta, o valor da resistência elétrica vai aumentando ao longo da deformação. Tal pode ocorrer devido ao facto das partículas de carbono, ao longo do estiramento, perderem a ligação entre elas provocando o aumento gradual da resistência elétrica.

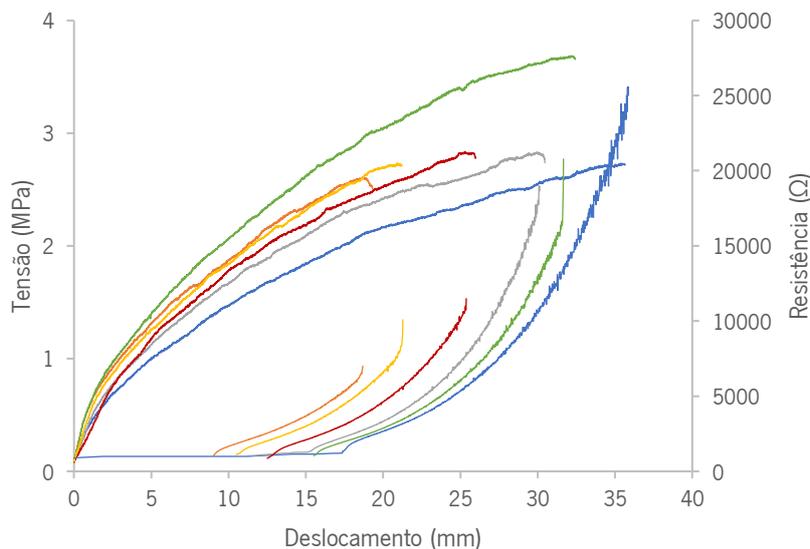


Figura 44. Relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica (tinta de carbono)

Além disso, observa-se que o deslocamento obtido é distinto de amostra para amostra. A razão para isto acontecer pode estar relacionada com a posição dos provetes na amarra da máquina de

tração visto que a localização dos mesmos não é exatamente a mesma em todos os ensaios. Ao comparar os resultados obtidos nos dois tipos de tinta, verifica-se que o comportamento das mesmas é diferente. A tinta à base de prata tem uma quebra instantânea enquanto a tinta à base de carbono estira, razoavelmente. Conclui-se, então, que a tinta de prata resiste menos à tração do que a de carbono. Assim, afirma-se que a tinta à base de carbono suporta melhor o processo de termoformação. Também é possível concluir que a resistência elétrica da tinta de carbono é muito superior à de prata. Ou seja, significa que a tinta de carbono tem uma menor eficácia em termos de condutividade elétrica. Por esta razão, aos dias de hoje, as tintas à base de prata são mais utilizadas em termos práticos do que as de carbono.

5.3.2 Provetes de substrato

Com base nos resultados obtidos no perfilômetro, para a tinta de prata, fizeram-se ensaios com trilhas com apenas uma camada de tinta. No entanto, para a tinta de carbono optou-se por fazer os testes com trilhas com duas camadas de tinta uma vez que se verificou que a diferença da espessura não era significativa e ao utilizar linhas com apenas uma camada o circuito elétrico não conseguia ler os valores das resistências por serem muito elevados. Na Figura 45 apresentam-se os valores obtidos para os provetes com tinta de prata, onde se relaciona o deslocamento com a tensão e a resistência elétrica. Assim, verifica-se que quando estes são sujeitos à tração o seu comportamento é homogêneo, sendo que as curvas com diferentes cores representam amostras distintas.

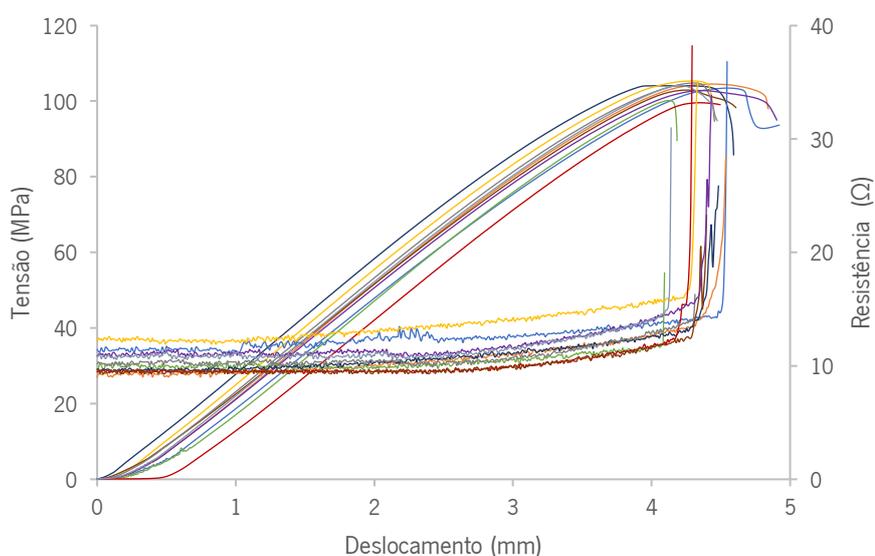


Figura 45. Relação entre a tensão e a resistência elétrica (tinta de prata)

Para além disso, também é possível observar que os provetes tendem a romper quando atingem uma tensão de, aproximadamente, 100 MPa, que corresponde a um deslocamento de 4 mm. O valor da resistência elétrica não varia muito ao longo do deslocamento, mantendo-se, praticamente, constante. Isto significa que a condutividade elétrica não é afetada pelo deslocamento existente, mas sim pelo rompimento do substrato. Tal é corroborado com o facto de o valor máximo registado da resistência elétrica coincidir com o ponto de rotura do substrato. Na Figura 46 mostra-se a relação do deslocamento com a tensão e a resistência elétrica para provetes de substrato com tinta de carbono. Deste modo, é possível observar que o valor da resistência elétrica vai aumentando gradualmente, tal como aconteceu nos provetes de tinta de carbono. Por isso, este aumento também pode estar relacionado com a perda de ligações entre as partículas de carbono.

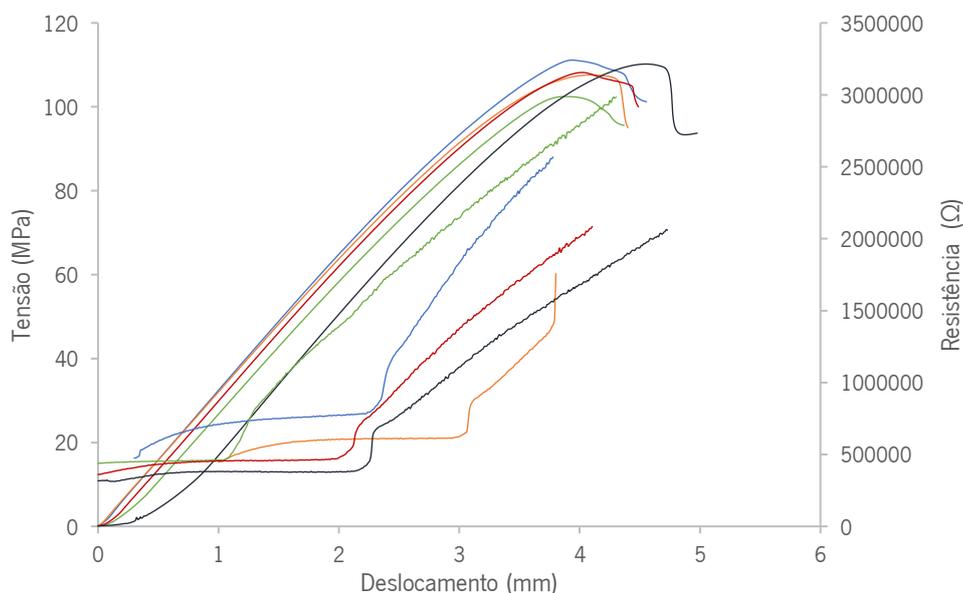


Figura 46. Relação entre a tensão e a resistência elétrica (tinta de carbono)

Além disso, observa-se também que o valor do deslocamento e da tensão são semelhantes ao que ocorre com a tinta de prata, concluindo-se, por isso, que o tipo de tinta não tem influência no deslocamento e na tensão. Deste modo, optou-se por calcular o módulo de Young que assume um valor experimental de, aproximadamente, 2222 MPa. Ao comparar este valor com o da ficha técnica do substrato (Tabela 2), verifica-se que corresponde às propriedades estipuladas.

5.4 Calibração do tempo de aquecimento

Na Figura 47 mostram-se as temperaturas atingidas para diferentes tempos de aquecimento. Desta maneira, é possível verificar que para atingir as temperaturas desejadas, 180°C a 210°C, são necessários diferentes tempos de aquecimento tendo em conta as diferentes espessuras dos substratos. Ou seja, os substratos mais espessos necessitam de um maior tempo de aquecimento, para alcançar a temperatura desejada, do que substratos mais finos.

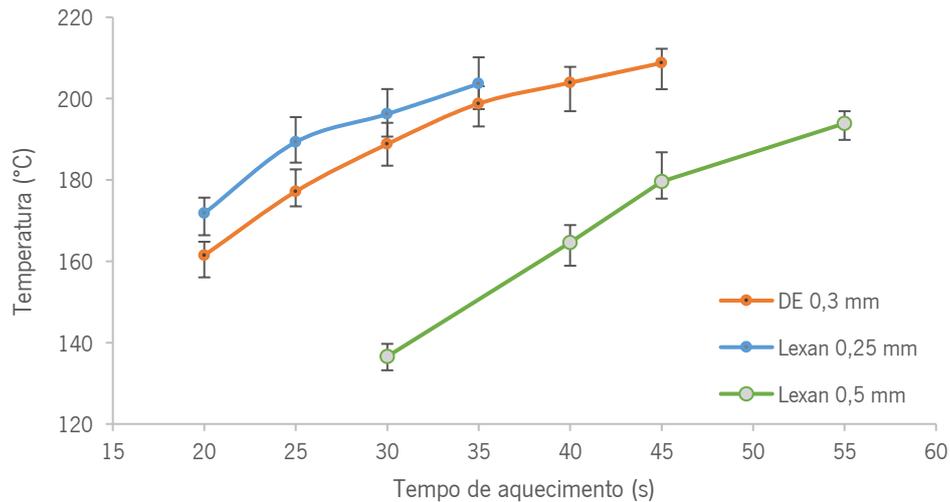


Figura 47. Dados obtidos na calibração dos tempos de aquecimento

Assim, para termoformar os substratos com menor espessura, 0,25 mm e 0,3 mm, foi definido um tempo de aquecimento de 35 s e 40 s, respetivamente. Já para as folhas poliméricas de maior espessura, 0,5 mm, foi estabelecido um tempo de aquecimento de 60 s.

5.5 Termoformação

Na Figura 48 e na Figura 49 estão ilustradas peças termoformadas com uma temperatura do molde de 25°C e 75°C com uma profundidade de 10 e 20 mm, respetivamente. Verifica-se que estas quando são termoformadas à temperatura ambiente não reproduzem, eficazmente, os contornos do molde. Contrariamente, quando se utiliza o molde aquecido as peças adquirem os contornos do mesmo.

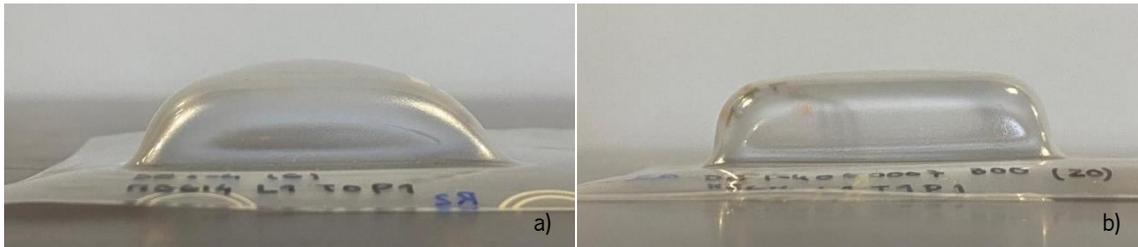


Figura 48. Vista lateral das peças termoformadas com profundidade de 10 mm: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C

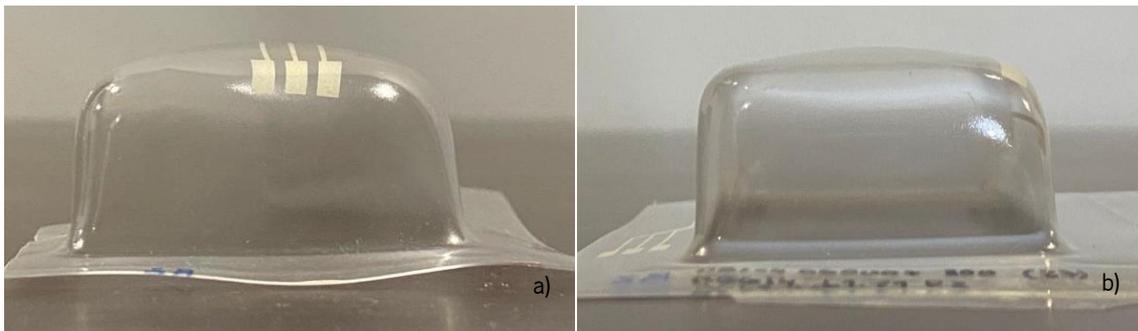


Figura 49. Vista lateral das peças termoformadas com profundidade de 20 mm: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C

Deste modo, conclui-se que a temperatura do molde tem influência direta na qualidade da termoformação das peças. Esta diferença na qualidade da enformação está relacionada com o arrefecimento. Ou seja, quando o molde atinge uma temperatura elevada faz com que o arrefecimento da peça seja mais lento e por isso, a folha tem mais tempo para adquirir os contornos do molde. Ao usar molde frio, o arrefecimento é muito rápido visto que a diferença de temperaturas entre o substrato e o molde é maior. Também se pode verificar que a profundidade dos moldes não tem impacto na qualidade da termoformação visto que acontece a mesma coisa tanto nas profundidades maiores como nas menores. Além disto, outro parâmetro que pode afetar a reprodutibilidade do molde é a existência de linhas condutoras. Assim, na Figura 50 mostra-se peças termoformadas a diferentes temperaturas onde têm impressas trilhas condutoras na zona dos raios.

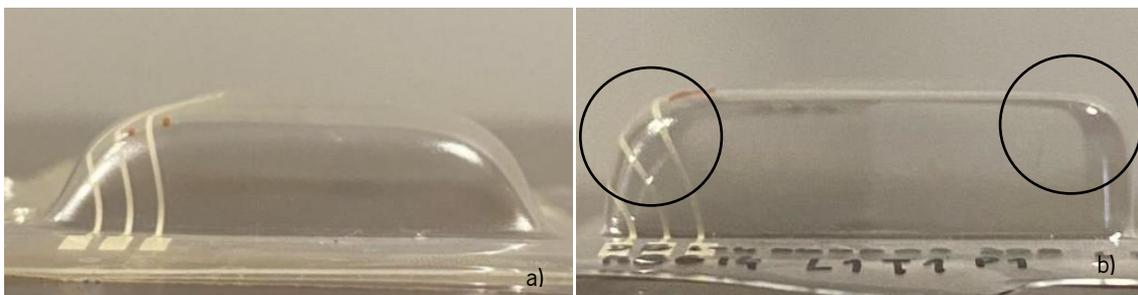


Figura 50. Vista lateral das peças termoformadas com linhas condutoras: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C

Como se pode observar, a peça termoformada à temperatura ambiente não apresenta diferenças com a existência de linhas condutoras. No entanto, na termoformada a 75°C não acontece o mesmo, os contornos dos raios de curvatura são diferentes. Ou seja, na zona em que estão as trilhas, verifica-se que o substrato não conseguiu adquirir os contornos do molde. Isto está relacionado com o facto de as linhas condutoras não permitirem o aquecimento das folhas poliméricas uma vez que as resistências aquecem a folha do lado em que estas estão impressas. Para além disto, também é necessário comparar as termoformações com tintas diferentes de modo a perceber se a influência das trilhas no aquecimento é comum em todos os tipos de tinta. Assim, na Figura 51 apresenta-se peças termoformadas a uma temperatura de 75°C com tinta de prata e carbono.

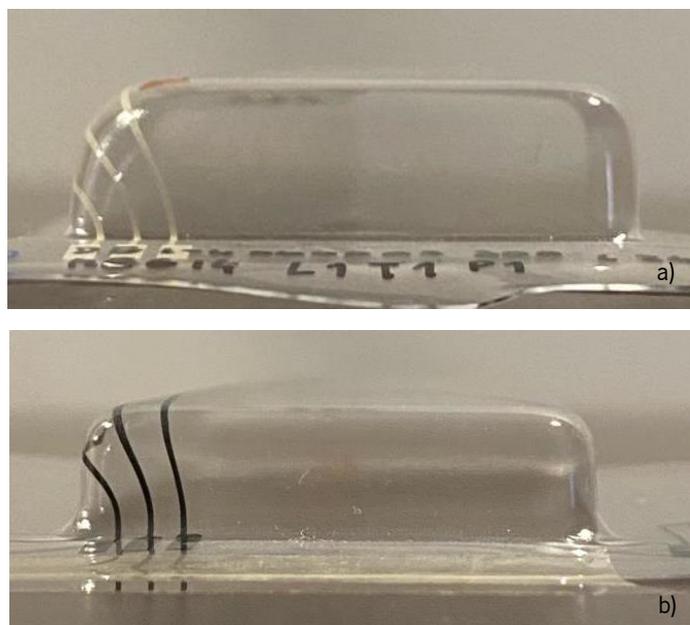


Figura 51. Vista lateral das peças termoformadas com diferentes tintas: a) tinta de prata; b) tinta de carbono

Deste modo, observa-se que a zona onde está impressa a tinta de carbono não apresenta má termoformação, ao contrário do que acontece com a tinta de prata. Por isso, pode-se concluir que apenas a tinta de prata tem influência no aquecimento da folha e consequentemente, na qualidade da termoformação. Na Figura 52 ilustra-se o estado dos raios de curvatura superiores termoformados a molde frio e quente. Ao contrário do que acontece com o fundo da peça, neste caso, o substrato consegue reproduzir eficazmente os raios de curvatura. Tal é explicado por serem zonas com pouca deformação e entrarem primeiro em contacto com o molde. Também se percebe que a utilização de molde frio ou quente não tem interferência na sua reprodutibilidade porque a sua condição é a mesma nas duas situações.

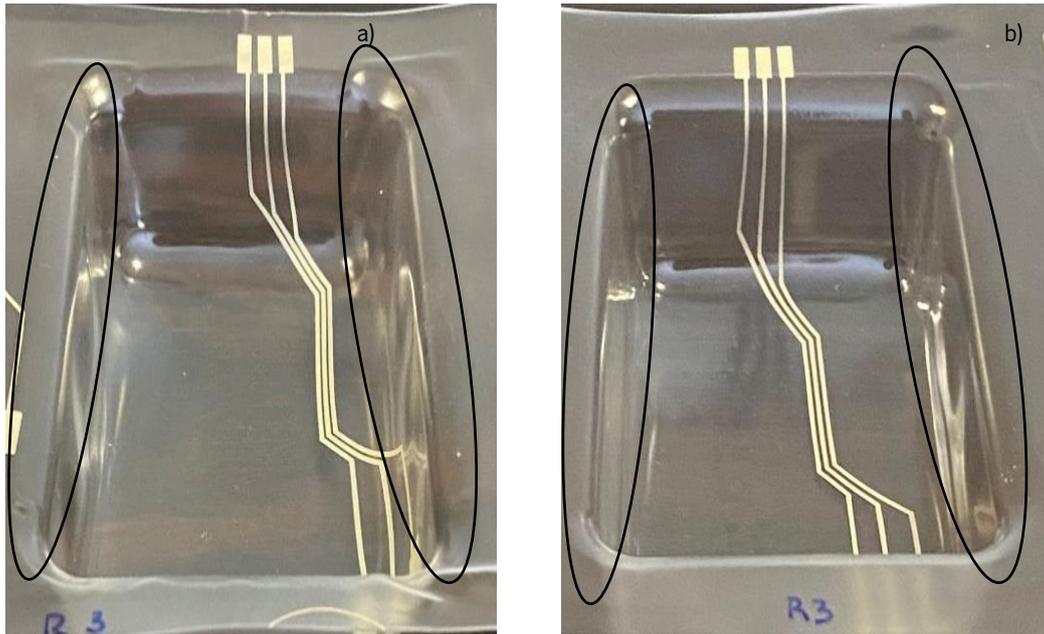


Figura 52. Exemplo do estado dos raios de curvatura: a) Molde a 25°C; b) Molde a 75°C

5.6 Microscopia

5.6.1 Observação das trilhas

Na Figura 53 estão ilustradas as linhas de tinta de prata antes de se proceder à termoformação, observadas na lupa. As impressões não apresentam defeitos, ou seja, não há falhas nas linhas condutoras não afetando, assim, a integridade das mesmas.

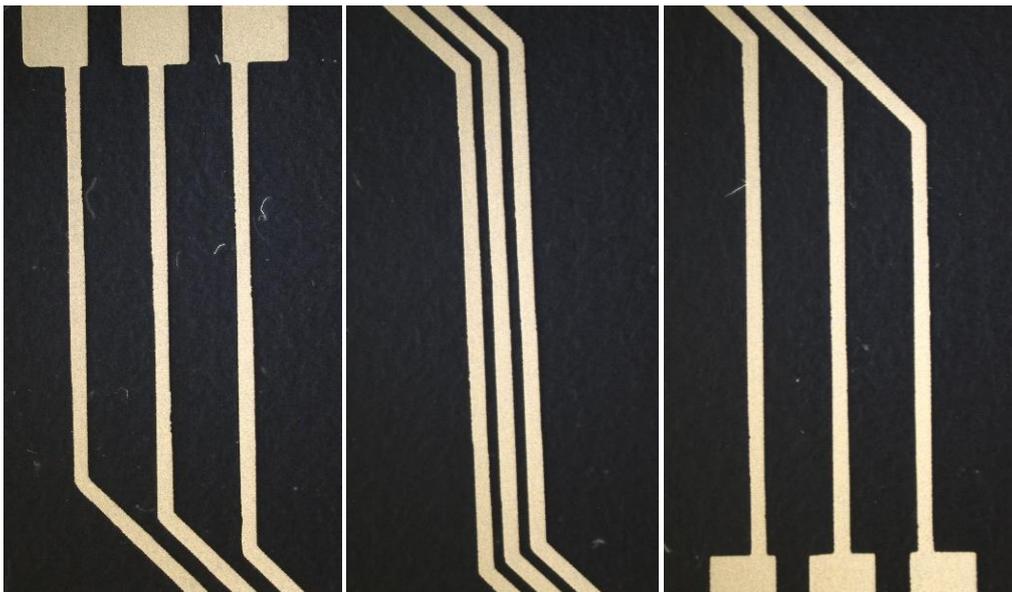


Figura 53. Linhas antes da termoformação

A Figura 54 representa o estado das trilhas condutoras, após a termoformação, quando sujeitas a diferentes raios de curvatura. Para além disso, corresponde a peças termoformadas em moldes com uma profundidade de 10 mm.

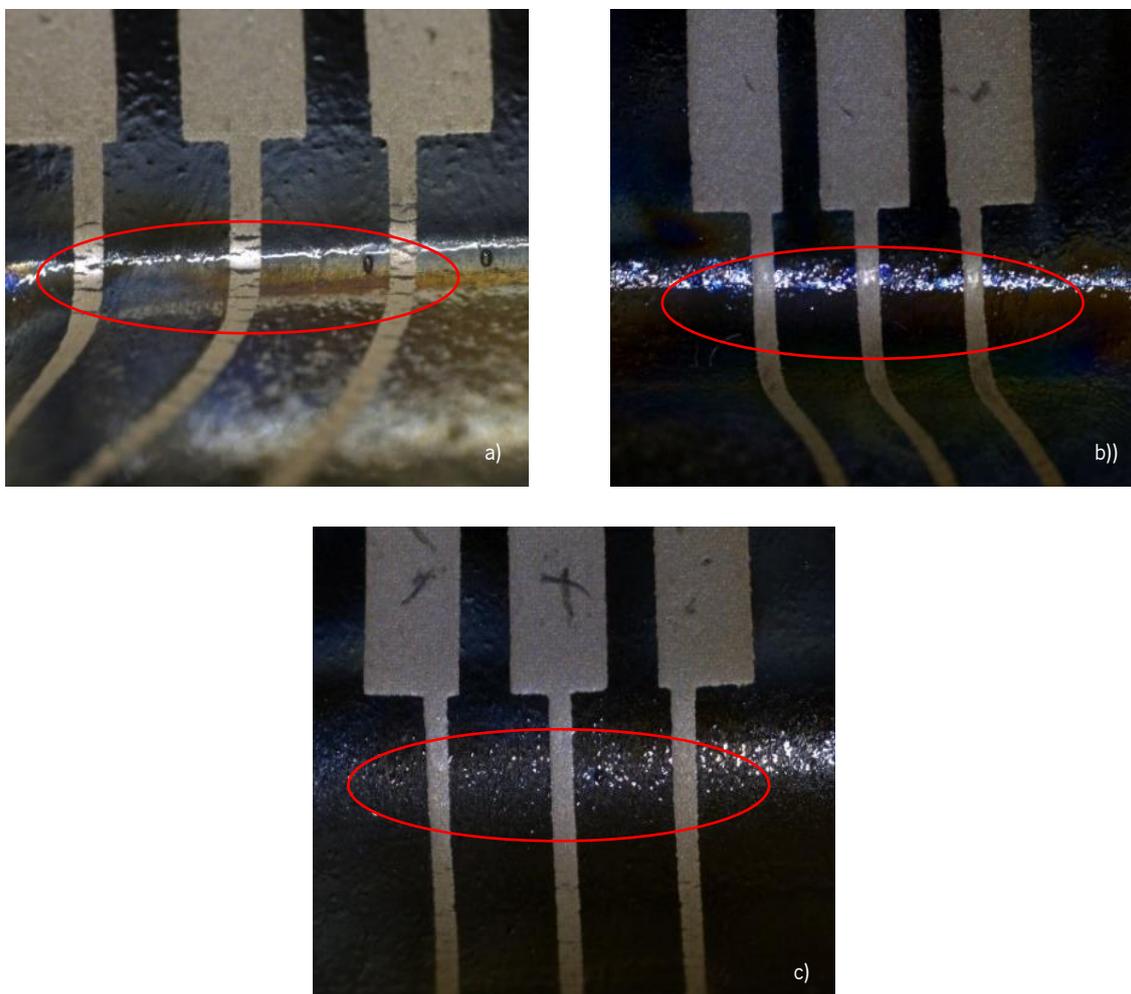


Figura 54. Estado das linhas de tinta de prata nos raios de curvatura: a) 0,5 mm; b) 2,5 mm; c) 5 mm

Assim, constatou-se que as trilhas têm um desempenho diferente dependendo do raio de curvatura da cavidade. As linhas tendem a quebrar quando o raio de curvatura tem um valor de 0,5 mm. Por isso, conclui-se que a integridade das mesmas é afetada quando o molde possui raios pequenos e abruptos. Por outro lado, percebeu-se que as trilhas não partem quando o raio de curvatura tem 2,5 mm e 5 mm, Figura 54 b) e c). Tal acontece porque se trata de raios grandes onde a sua curvatura é, relativamente, suave. Além disso, outro fator que interfere com a integridade das linhas condutoras é a razão de estiramento provocada, após a termoformação. Deste modo, na Figura 55 mostra-se as linhas de prata após a termoformação em moldes com 10 mm de profundidade.

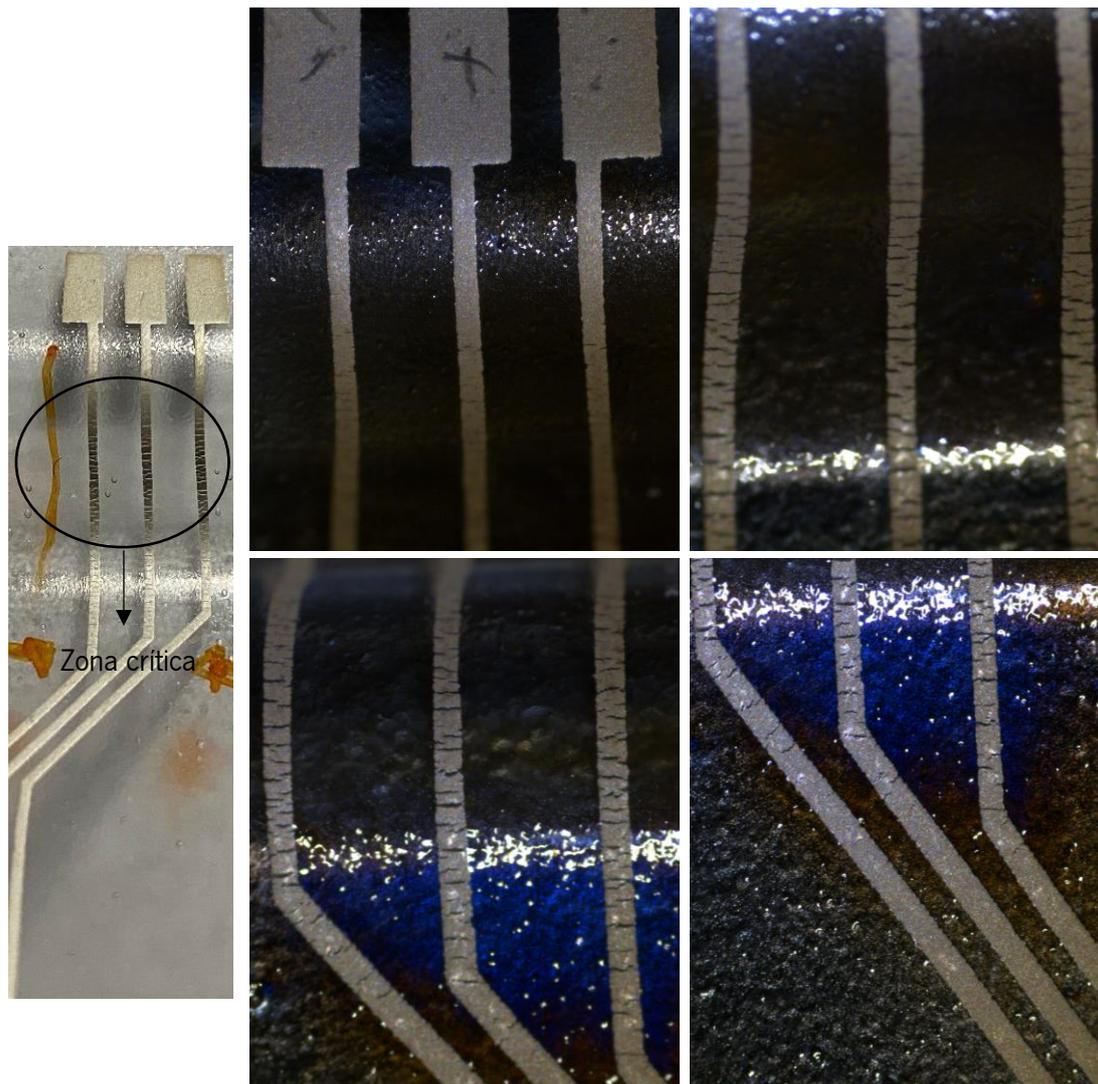


Figura 55. Estado das linhas de prata em peças com profundidade de 10 mm

As trilhas com tinta de prata não suportam a deformação e tendem a quebrar na zona entre a parede e o fundo da peça. Por isso, para este tipo de tinta, os moldes têm de ter uma razão de estiramento menor do que 1,5, que representa a razão de estiramento no sentido transversal às linhas condutoras. Assim, de forma a validar o que foi mencionado, observou-se na lupa também substratos termoformados em moldes com uma razão de estiramento maior. Na Figura 56 ilustra-se o estado das linhas de prata das peças com uma profundidade de 20 mm. Foi possível verificar que as linhas têm ainda mais quebras e a sua zona crítica é muito mais ampla. Para além disso, observa-se que o tipo de quebra é diferente. Ou seja, quando a razão de estiramento é menor as quebras deformam num só sentido, uniaxial, no entanto quando o estiramento é maior as linhas deformam em mais do que uma direção, biaxial.

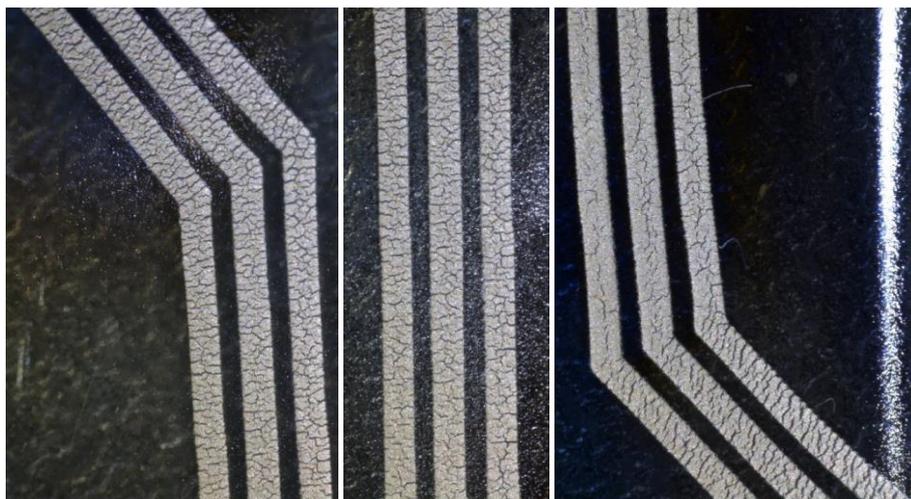


Figura 56. Estado das linhas de prata em peças com profundidade de 20 mm

Na Figura 57 apresenta-se as linhas condutoras de tinta de carbono observadas na lupa, antes da termoformação. Tal como aconteceu com a tinta de prata, as trilhas de tinta de carbono também não têm imperfeições e por isso, a integridade das mesmas não é prejudicada.

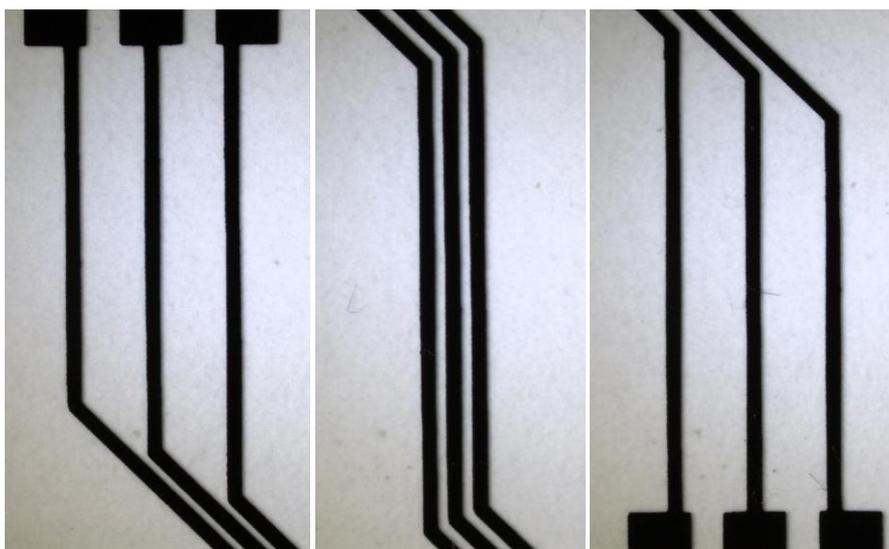


Figura 57. Trilhas com tinta de carbono observadas na lupa antes da termoformação

Já após a termoformação, as trilhas impressas com tinta de carbono têm um comportamento totalmente diferente da tinta de prata. Na Figura 58 observa-se o estado das linhas condutoras, na zona dos raios de curvatura, em peças termoformadas em moldes com uma profundidade de 10 mm. Como se verifica, a integridade das trilhas com tinta de carbono não é afetada quando ocorrem termoformações em moldes com raios de curvatura pequenos. Assim, conclui-se que esta tinta suporta raios mais pequenos do que a tinta de prata, o que pode indicar que a tinta de carbono é mais elástica.

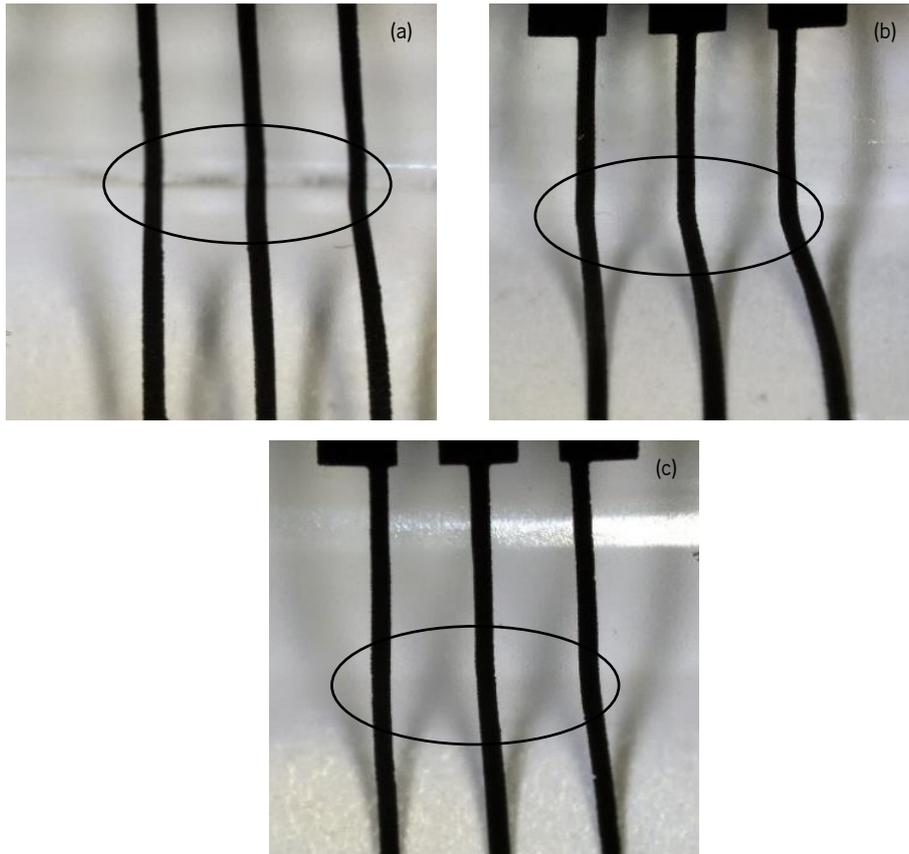


Figura 58. Estado das linhas de tinta de carbono nos raios de curvatura: (a) 0,5 mm, (b) 2,5 mm, (c) 5 mm

Na Figura 59 apresenta-se a deformação das trilhas com tinta de carbono num molde com uma profundidade de 10 mm. Deste modo, verifica-se que esta tinta resiste mais à deformação do que a tinta de prata uma vez que, após um estiramento de 1,5, as linhas não quebram. Concluindo-se por isso, que a tinta de carbono é realmente mais elástica do que a tinta de prata.



Figura 59. Estado das linhas de carbono em peças com profundidade de 10 mm

Observou-se, também, na lupa linhas de carbono em peças termoformadas com cavidades com profundidade de 20 mm. Assim, na Figura 60 ilustra-se o estado das linhas da tinta de carbono quando sujeitas a uma razão de estiramento de 2.

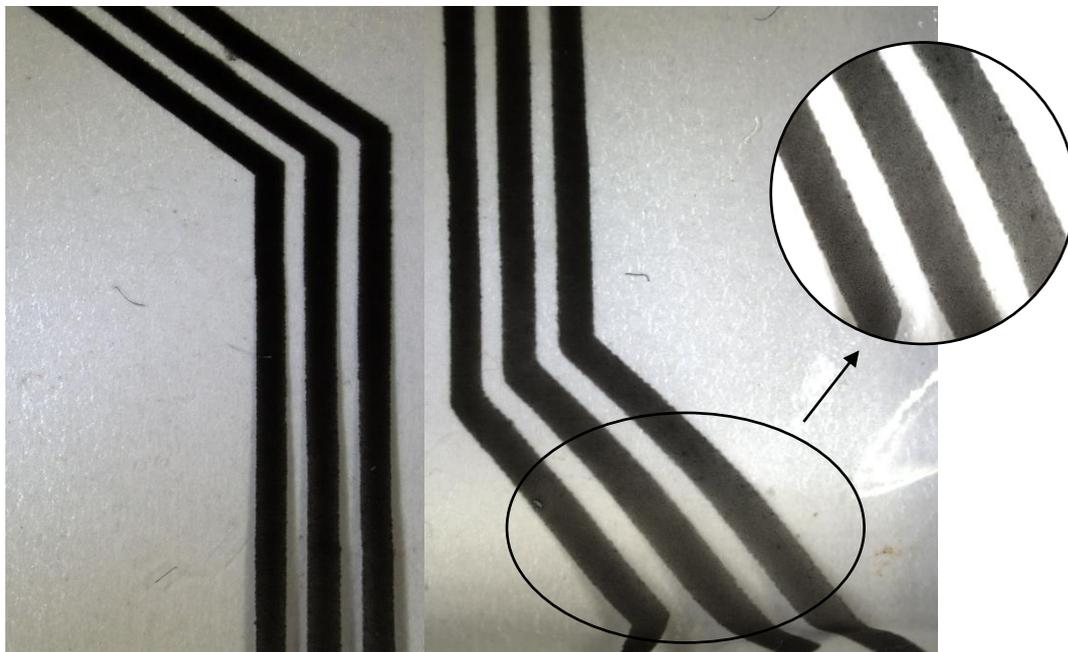


Figura 60. Estado das linhas de carbono em peças com profundidade de 20 mm

As linhas de carbono, desta figura, estão localizadas entre o fundo da peça e o raio de curvatura direito. No entanto, verificou-se que as trilhas de carbono não aguentam um estiramento tão elevado uma vez que, através da ampliação, se observa que ocorre a dispersão das partículas de carbono. Também se pode aferir que os parâmetros geométricos têm um papel mais importante na integridade das linhas dos circuitos em comparação com as condições de processamento, como por exemplo, a temperatura do molde.

5.6.2 Medição da largura das trilhas

A Figura 61 mostra como foi medida a largura das linhas condutoras. A largura de cada uma das trilhas foi medida em vários pontos ao longo do seu comprimento, sendo calculada, posteriormente, uma média. Estas medições permitiram perceber se a deformação provoca alterações na dimensão das mesmas.

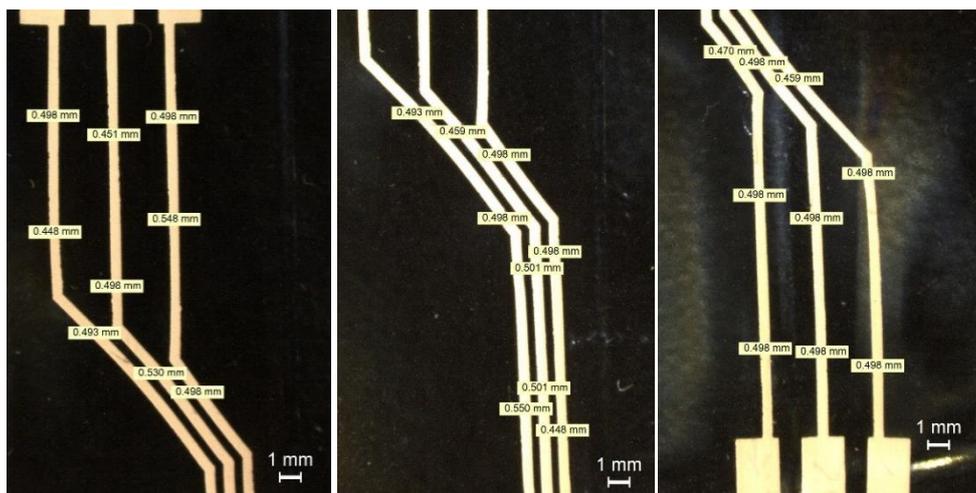


Figura 61. Exemplo das medições da largura das linhas dos circuitos

Antes da termoformação foi necessário medir a largura das linhas de carbono e de prata para, posteriormente, comparar os valores obtidos depois da termoformação. Deste modo na Figura 62 ilustra-se os valores médios da largura inicial das linhas condutoras. Verifica-se que as linhas de carbono e prata, inicialmente, têm, em média, 0,49 mm e 0,48 mm de espessura, respetivamente. Estes valores estão próximos do valor da tela de impressão, 0,5 mm, o que significa que as impressões das linhas foram bem realizadas.

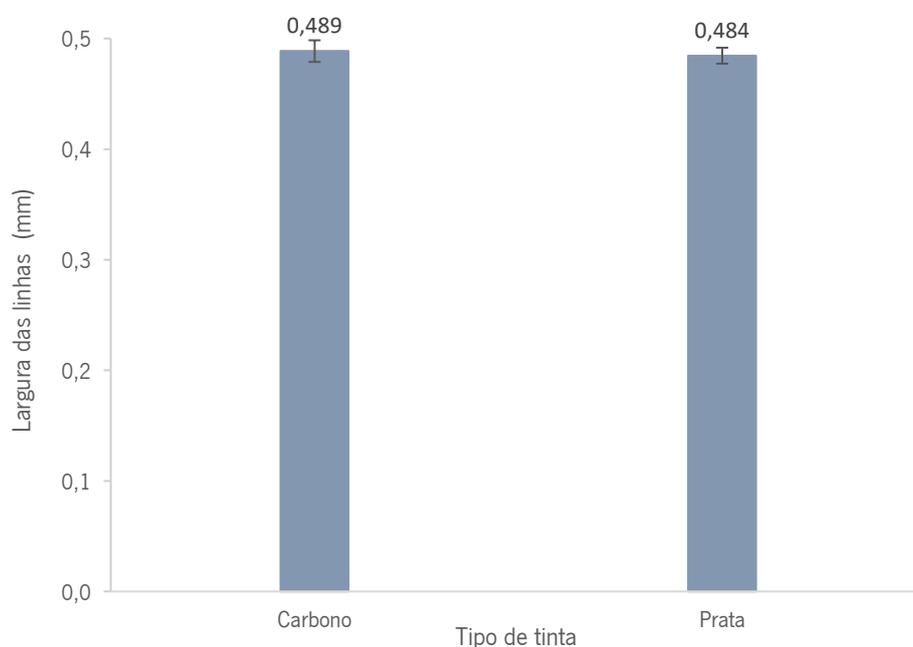


Figura 62. Largura média inicial das linhas condutoras

Relativamente à tinta de prata, os valores obtidos estão ilustrados na Figura 63, que representam peças termoformadas a uma temperatura de 75°C com uma profundidade de 10 mm, mas com substratos e espessuras distintos. Assim, verifica-se que a largura das linhas não alterou significativamente, após o estiramento provocado durante a termoformação.

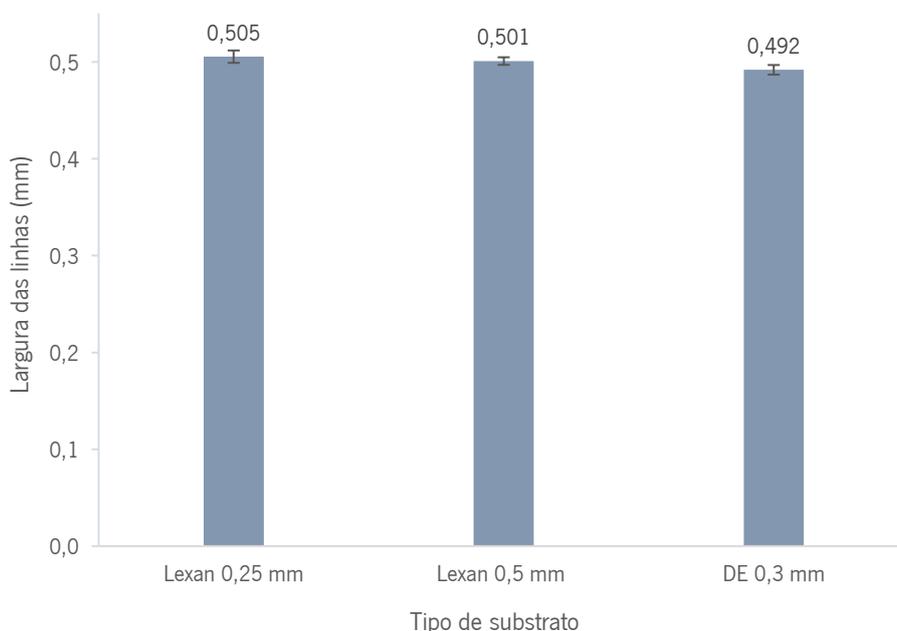


Figura 63. Largura média das linhas de tinta de prata, após a termoformação

Para além disso, também é possível verificar se o tipo de substrato e a espessura do mesmo têm influência na largura das linhas. Deste modo, percebe-se que o valor da largura das linhas é semelhante, por isso pode-se concluir que estes dois parâmetros não têm efeito nesta dimensão. Na Figura 64 mostra-se a largura média das linhas de tinta de prata onde é possível comparar as diferentes condições a que as peças foram termoformadas para o mesmo substrato, DE 1-4060007 com 0,3 mm de espessura. Estão também representados dois grupos distintos: um onde as peças têm uma profundidade de 10 mm e outro onde estas têm uma profundidade de 20 mm.

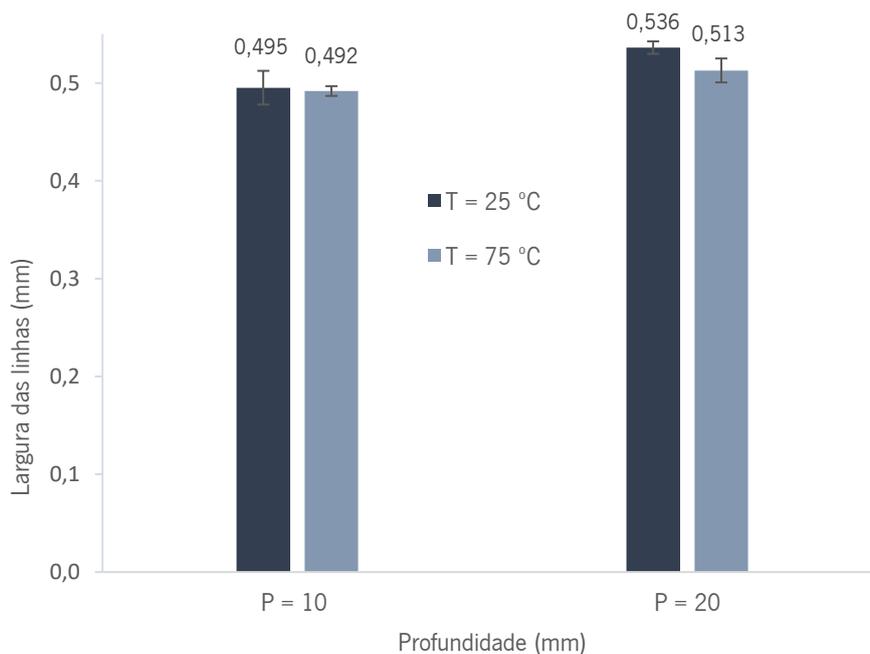


Figura 64. Largura média das linhas de tinta de prata diferentes condições

Os resultados mostram que as linhas de tinta de prata que suportam maior estiramento ($P = 20$ mm), tendem a adquirir uma maior largura do que as que estiram menos. Por isso, conclui-se que quanto maior o estiramento provocado nas trilhas maior é a largura das mesmas. Tal pode ser explicado com o tipo de deformação a que estas estão sujeitas. Ou seja, quando as linhas suportam uma razão de estiramento menor, 1,5, o estiramento a que estas estão sujeitas é menor sendo a deformação uniaxial. No entanto, quando há uma maior razão de estiramento, 2, a deformação é, maioritariamente, biaxial. De forma a corroborar estas afirmações, na Figura 65 observa-se a diferença da deformação das linhas de prata quando sujeitas a diferentes razões de estiramento.

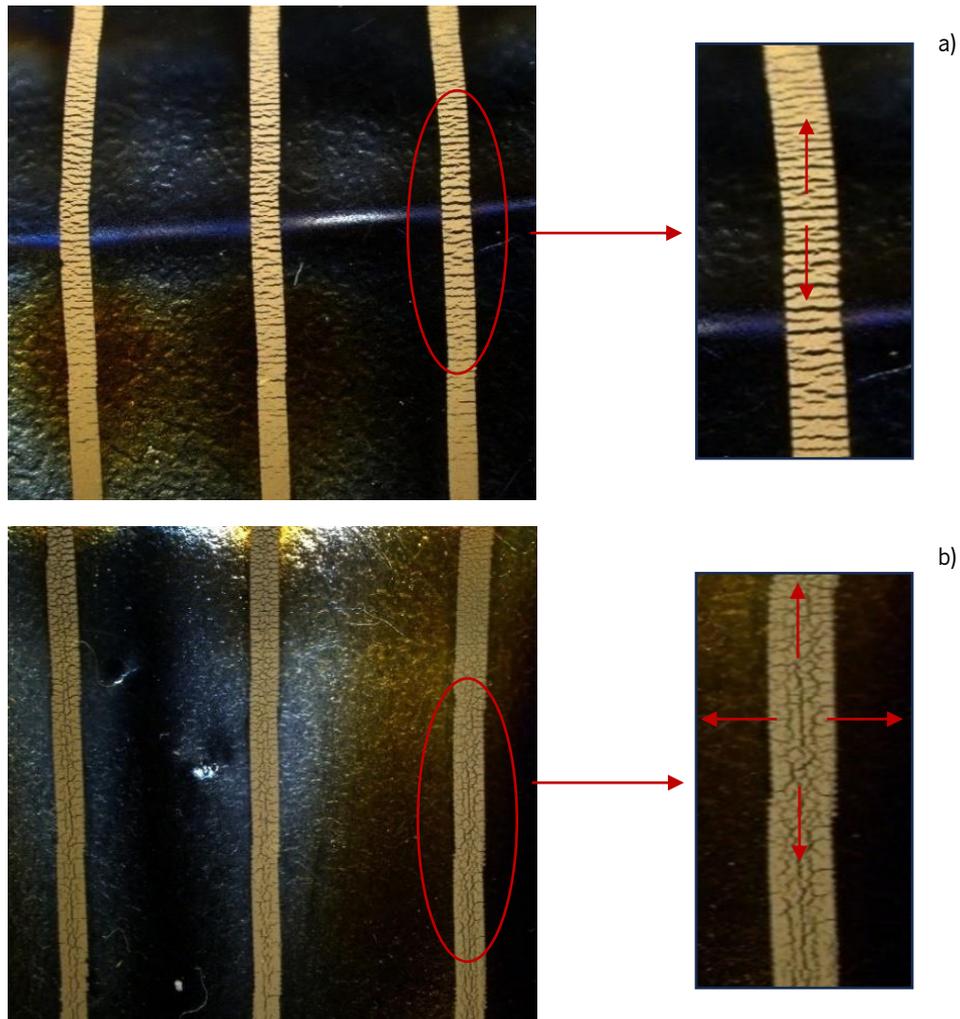


Figura 65. Deformação: a) Uniaxial para uma razão de estiramento de 1,5; b) Biaxial para uma razão de estiramento de 2

Deste modo, analisa-se que as linhas de tinta de prata sujeitas a um menor estiramento, deformam apenas na direção transversal, Figura 65 a), enquanto as trilhas que correspondem a um maior estiramento deformam tanto na direção transversal como na longitudinal, Figura 65 b). Na Figura 66 ilustra-se as larguras médias das trilhas de tinta de carbono e o respetivo desvio-padrão, após a termoformação. A largura das linhas é afetada tanto com cavidades com profundidade de 10 mm como de 20 mm. No entanto, verifica-se que este efeito é mais acentuado em profundidades maiores visto que correspondem a razões de estiramento maiores. Para além disso, também é possível concluir que o número de camadas de cada impressão não tem influência sob a largura das linhas visto que estes são relativamente semelhantes.

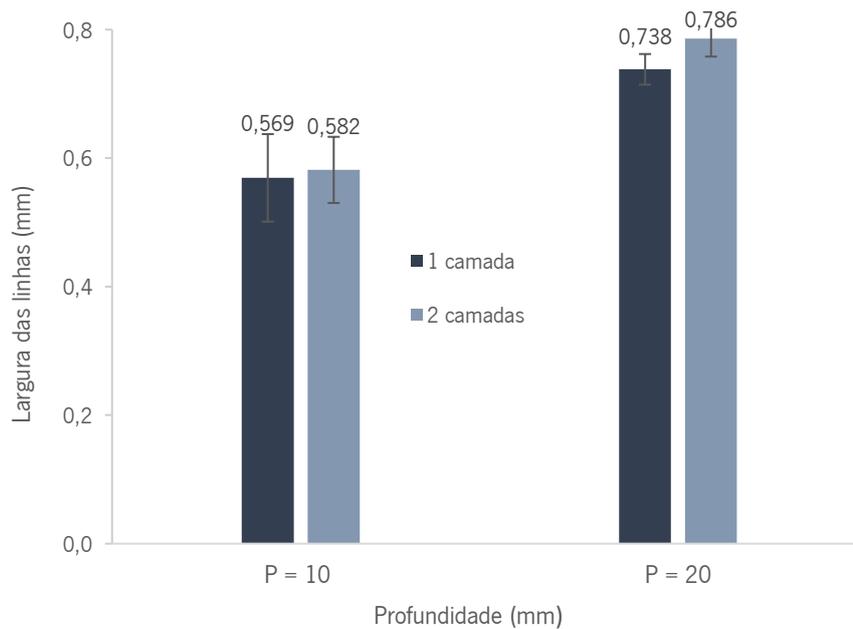


Figura 66. Largura média das linhas de tinta de carbono

Ao comparar a Figura 64 com a Figura 66 verifica-se que as linhas de tinta de carbono têm uma maior tendência para aumentar a largura do que as linhas de tinta de prata. Isto pode acontecer devido ao modo como estas duas tintas reagem à deformação. Ou seja, a tinta de prata quebra logo enquanto a tinta de carbono tende a dispersar as partículas com o estiramento gerando assim, uma maior largura nas linhas.

5.7 Medição da resistência elétrica

A resistência elétrica foi medida antes e após a termoformação visto que os valores da mesma podem modificar por causa da deformação que ocorre nas linhas. Na Tabela 6 estão ilustradas as resistências elétricas médias medidas antes da termoformação.

Tabela 6. Resistências elétricas médias (antes da termoformação)

Tinta	Substratos		
	Lexan 8A13E 0,25 mm	Lexan 8A13E 0,5 mm	DE 1-4060007 0,3 mm
Tinta de prata	6,99 ± 0,08 (Ω)	7,83 ± 0,01 (Ω)	10,05 ± 0,08 (Ω)
Tinta de carbono (1 camada)	0,81 ± 0,05 (MΩ)	-	-
Tinta de carbono (2 camadas)	0,32 ± 0,06 (MΩ)	-	-

Deste modo, verifica-se que existem diferenças acentuadas nos valores da resistência elétrica dos dois tipos de tinta. A resistência elétrica da tinta à base de carbono, ME201, é muito superior à da tinta à base de prata, ME614. Isto acontece porque a prata tem uma condutividade elétrica elevada comparando com outros materiais usados em tintas funcionais. Também é possível analisar que o valor da resistência elétrica da tinta de carbono difere significativamente quando são utilizadas uma ou duas camadas de tinta. Ou seja, a resistência diminui com a utilização de mais camadas de tinta. No entanto, nenhum dos casos tem uma resistência elétrica que consiga ser aplicada em casos práticos visto que estes valores são muito elevados. Assim, pode-se afirmar que esta tinta pode ser descartada uma vez que a sua condutividade elétrica é muito reduzida. Após a deformação das folhas poliméricas, voltou-se a medir a resistência elétrica das trilhas condutoras. Neste caso, foi necessário fazer uma análise comparativa entres os valores iniciais e finais visto que os resultados não seriam comparáveis se apenas fosse calculada a média. Assim, na Tabela 7 estão ilustrados valores percentuais das resistências elétricas, após a termoformação.

Tabela 7. Valores percentuais da resistência elétrica

Substrato de Polycarbonato	Tinta	P = 10 mm			P = 20 mm		
		Aumento da resistência	Mesma resistência	Sem condução	Aumento da resistência	Mesma resistência	Sem condução
Lexan 8A13E 0,25 mm		16,67 %	3,37 %	80 %	-	-	-
Lexan 8A13E 0,5 mm	Prata	16,67 %	0 %	83,33 %	-	-	-
DE 1-4060007 0,3 mm		30 %	0 %	70 %	0 %	0 %	100 %
Lexan 8A13E 0,25 mm	Carbono (1 camada)	100 %	0 %	0 %	49 %	0 %	51 %
	Carbono (2 camadas)	94,44 %	5,56 %	0 %	36,11 %	0 %	63,89 %

A condutividade elétrica da tinta de prata é inexistente em quase todas as trilhas, o que significa que as linhas condutoras quebram, após a termoformação. Deste modo pode-se concluir que este tipo de tinta não resiste a profundidades iguais ou superiores a 10 mm. Isto acontece devido ao estiramento que ocorre durante a deformação da folha. Ou seja, a tinta não suporta razões de estiramento superiores a 1,5. Assim, os moldes têm de ser projetados de forma que a razão de estiramento seja inferior a este valor. De qualquer forma, o mais indicado é idealizar a posição das linhas condutoras de maneira que estas não sofram tanto estiramento de modo a manterem as suas propriedades. Também se verifica que existem bastantes diferenças entre as duas tintas. Ao

contrário da tinta de prata, a de carbono não perde a condutividade elétrica quando a termoformação ocorre em moldes com profundidade de 10 mm. A resistência das trilhas tende a aumentar com o estiramento, mas não se anula. Isto indica que a elasticidade da tinta de carbono é maior do que a da tinta de prata. No entanto, para as linhas termoformadas em moldes com profundidade de 20 mm verificou-se que a tinta de carbono não suporta um estiramento tão elevado porque grande parte das trilhas perde a condutividade. Assim, para garantir que as trilhas de carbono se mantêm integras, estas só podem suportar razões de estiramento inferiores a 2.

5.8 Estiramento e distribuição de espessuras

5.8.1 Estiramento

Na Figura 67 está representado o estiramento das trilhas, após a termoformação, com o molde aquecido e com uma profundidade de 10 mm, mas com diferentes espessuras. É possível observar que o estiramento das linhas do circuito é influenciado pelo tipo de substrato. No entanto, não é influenciado pela espessura do mesmo. Isto pode ser concluído uma vez que a diferença do estiramento entre a espessura de 0,25 mm e de 0,5 mm não é significativa. Assim, verificou-se que a utilização de diferentes tipos de substratos pode modificar o estiramento das trilhas. Neste caso, os substratos DE 1-4 060007 proporcionam um menor estiramento das linhas do que o substrato Lexan 8A13E.

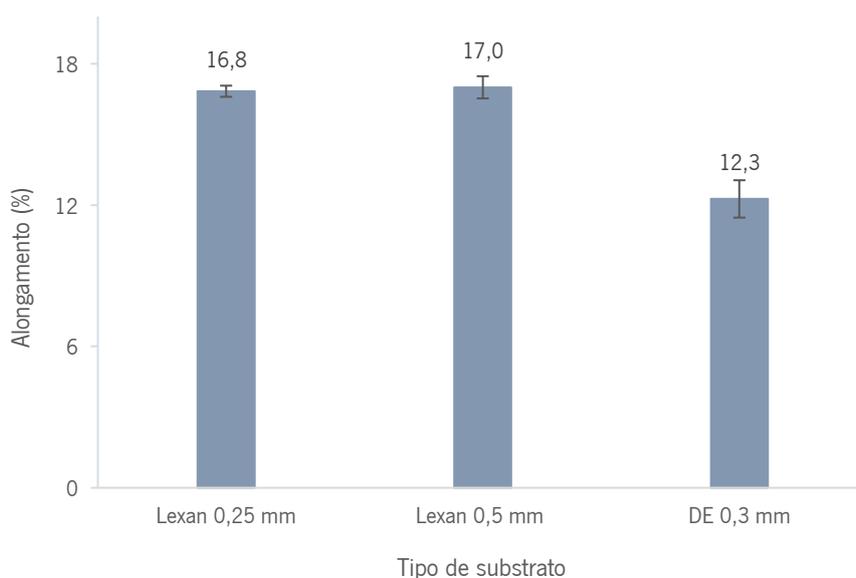


Figura 67. Estiramento médio das linhas de tinta de prata

Na Figura 68 estão ilustrados os valores médios do estiramento das linhas para o mesmo tipo de substrato, DE 1-4 060007 com uma espessura de 0,3 mm. No entanto, com profundidades e temperaturas do molde diferentes. Posto isto, será verificada qual a influência destas condições no estiramento das linhas condutoras.

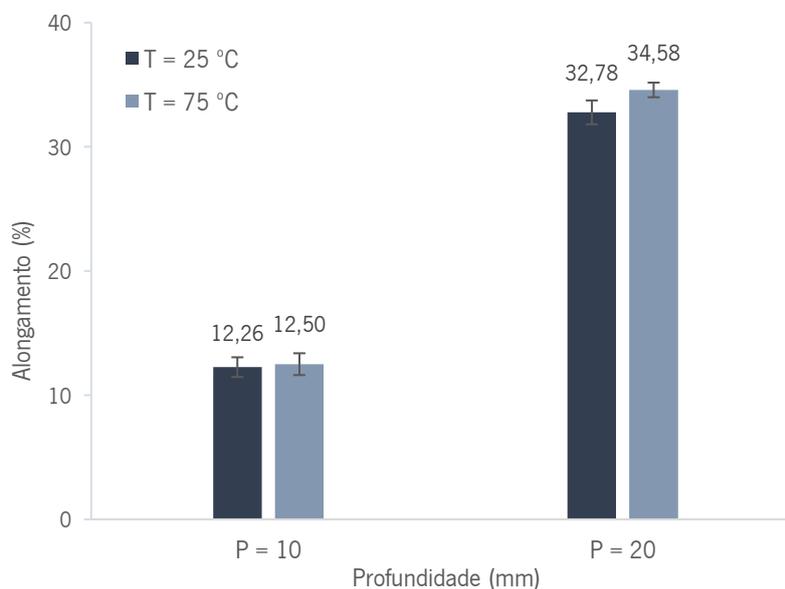


Figura 68. Estiramento média das linhas dos circuitos para diferentes condições operatórias (ME614)

Através da análise da figura anterior, pode-se concluir que a temperatura do molde não tem efeito no alongamento das linhas dos circuitos uma vez que os valores obtidos são, relativamente, semelhantes. No entanto, o mesmo não acontece com os parâmetros geométricos, nomeadamente, com a profundidade. Verifica-se que uma profundidade de 20 mm provoca um maior alongamento do que uma profundidade de 10 mm. Deste modo, quanto maior a profundidade maior será o alongamento das linhas. Isto está relacionado com o facto de, neste caso, uma maior profundidade proporcionar uma maior razão de estiramento. Por isso, ao haver uma maior razão de estiramento, consequentemente, o estiramento das linhas vai ser maior provocando uma maior deformação das mesmas. Na Tabela 8 apresenta-se uma comparação do estiramento para os dois tipos de tinta, ME614 (prata) e ME201 (carbono). Aqui estão ilustrados os valores percentuais do estiramento das trilhas condutoras para profundidades, substratos e tintas diferentes, mas com a mesma temperatura do molde, 75°C.

Tabela 8. Valores médios do estiramento das linhas condutoras, após termoformação

Tinta	P = 10 mm			P = 20 mm	
	Lexan 8A13E 0,25 mm	Lexan 8A13E 0,5 mm	DE 1-4 060007 0,3 mm	Lexan 8A13E 0,25 mm	DE 1-4 060007 0,3 mm
Prata	16,8 ± 0,24 %	17 ± 0,47 %	12,5 ± 0,88 %	-	34,58 ± 0,59 %
Carbono (1 camada)	16,25 ± 0,48 %	-	-	41,11 ± 0,48 %	-
Carbono (2 camadas)	16,46 ± 0,42 %	-	-	43,89 ± 0,96 %	-

Ao analisar a tabela anterior, percebe-se que a utilização de tintas diferentes não afeta o estiramento das linhas. Portanto, conclui-se que a elasticidade das tintas não tem interferência no estiramento das trilhas condutoras. Para além disso, também é possível corroborar o que foi concluído acima. Ou seja, observa-se, novamente, que a mudança de substrato afeta o estiramento das linhas. O substrato DE 1-4 060007 proporciona um estiramento inferior do que o substrato Lexan, tanto para uma profundidade de 10 mm como de 20 mm. Desta forma, também se pode afirmar que é melhor utilizar substratos DE 1-4 060007 visto que irão proporcionar uma menor deformação nas linhas de tinta e por isso, a quebra das mesmas poderá não ser tão frequente.

5.8.2 Distribuição de espessuras

Na Figura 69 mostra-se os valores médios da espessura para substratos com espessuras diferentes, à direita mostra-se a identificação dos pontos A, centro da base, B, canto inferior da peça, e C, canto superior, identificados no gráfico. Como se pode observar, o perfil de espessuras tem a mesma forma independentemente da espessura inicial da folha. Sendo que os pontos de maior e menor espessura se localizam na mesma região da peça.

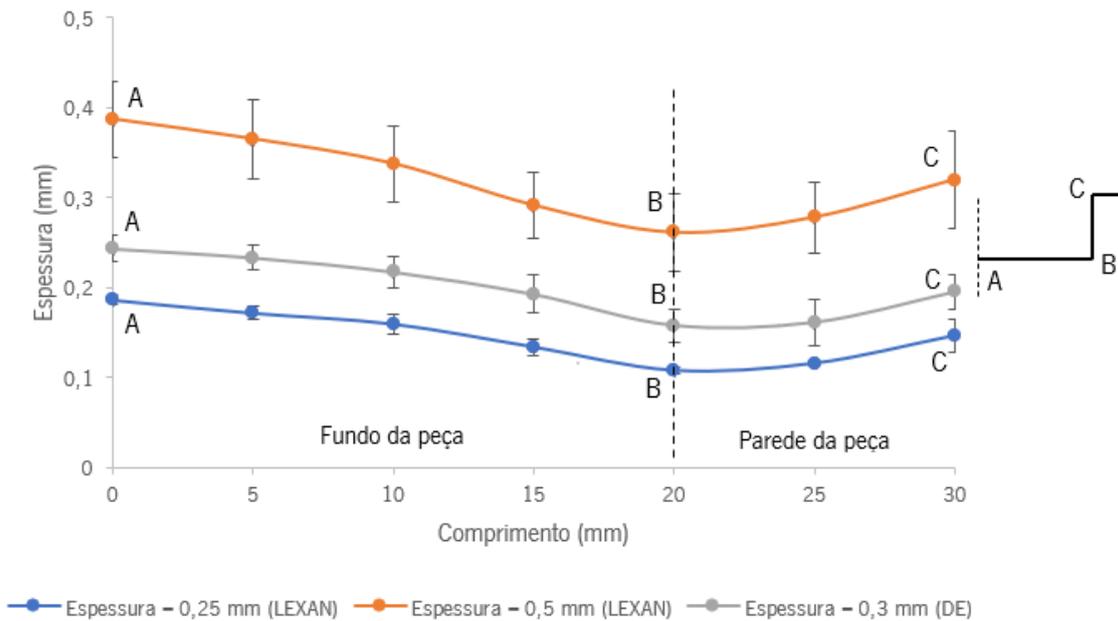


Figura 69. Perfil de espessuras para substratos com espessuras distintas

Tentou-se perceber também qual é a diferença que existe na redução da espessura consoante a espessura inicial do substrato. Na Tabela 9 mostra-se a diferença percentual entre a espessura inicial e final. Esta representa a redução da espessura das peças termoformadas com o molde aquecido e com uma profundidade de 10 mm.

Tabela 9. Comparação percentual das espessuras inicial e final para diferentes substratos

Substrato	Comprimento (mm)						
	0	5	10	15	20	25	30
Lexan 8A13E 0,25 mm	25,53 %	31,4 %	36,27 %	46,53 %	57,07 %	53,93 %	41,1 %
Lexan 8A13E 0,5 mm	22,7 %	27,1 %	32,57 %	41,8 %	47,87 %	45,79 %	36,17 %

Deste modo percebe-se que o substrato com menor espessura, 0,25 mm, tem uma redução da espessura mais acentuada, após a termoformação. Para além disso, nos substratos Lexan a zona que tem uma redução maior da espessura é a região dos raios de curvatura, ou seja, no local de menor espessura. Na Figura 70 e na Figura 71 estão ilustrados os valores médios obtidos da espessura na direção x e y, respetivamente, para moldes com profundidades distintas em substratos com uma espessura inicial de 0,3 mm. Através da sua análise percebe-se que a espessura das peças termoformadas têm o mesmo comportamento independentemente da razão

de estiramento e da direção de medição. Ou seja, a espessura é maior no centro da peça, A, e atinge a espessura mínima no raio de curvatura, B.

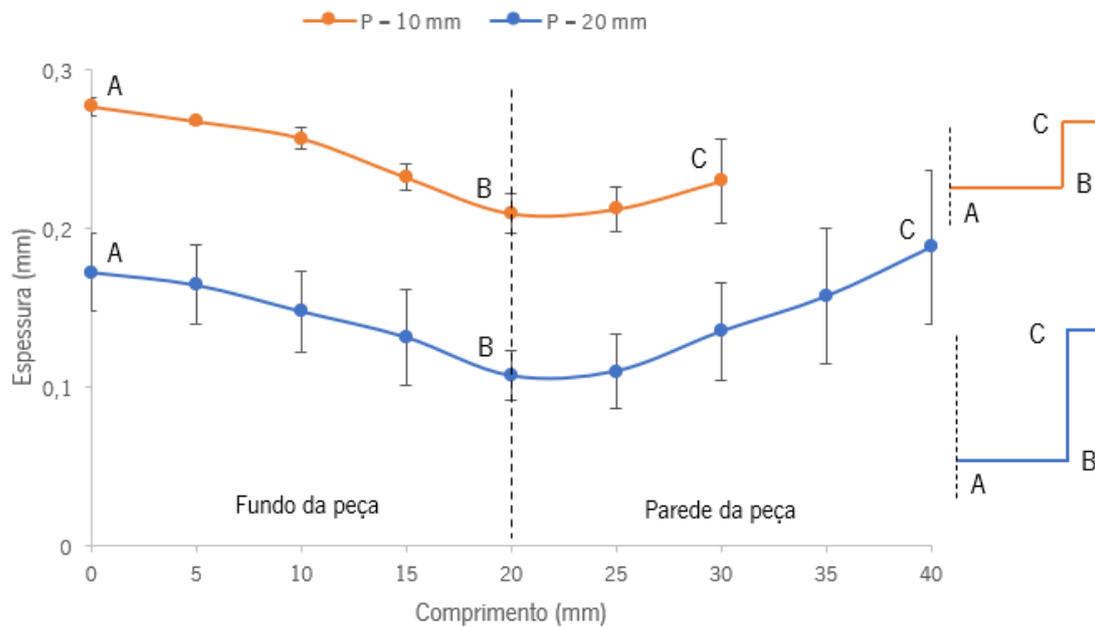


Figura 70. Distribuição de espessuras na direção x

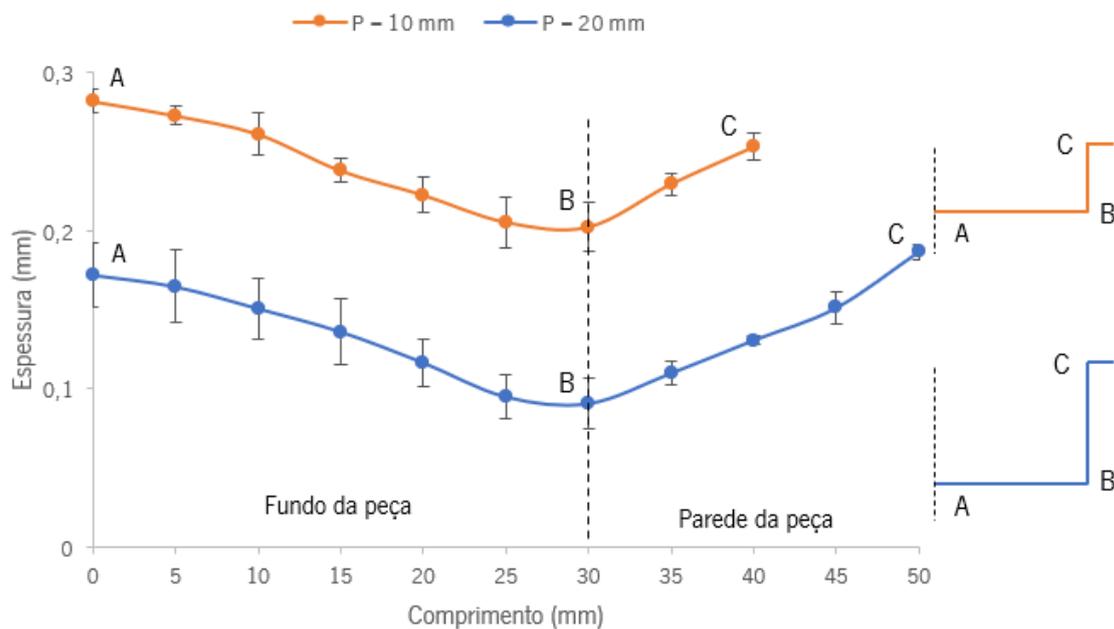


Figura 71. Distribuição de espessuras na direção y

Tal pode ser explicado pelo facto do molde utilizado ser considerado um molde baixo. Ou seja, o substrato entra primeiro em contacto com o fundo do que com as paredes. Assim, provoca um menor estiramento da folha polimérica, nessa região, devido ao seu rápido arrefecimento. Em

ambas as direções, verifica-se que as peças termoformadas em moldes com maior profundidade têm uma menor espessura ao longo da secção do que as peças com uma profundidade menor. Tal pode ser explicado pelo facto de a razão de estiramento ser maior quando a profundidade corresponde a 20 mm. Ou seja, o estiramento provocado é maior e por isso, a espessura diminui mais. A temperatura do molde também pode ter influência na distribuição de espessuras. Deste modo, na Figura 72 e na Figura 73 estão ilustrados os valores médios das espessuras na direção x e y, tendo em conta a temperatura do molde. Em ambos os casos, verifica-se uma ligeira descida no valor da espessura ao longo da secção quando o molde é aquecido.

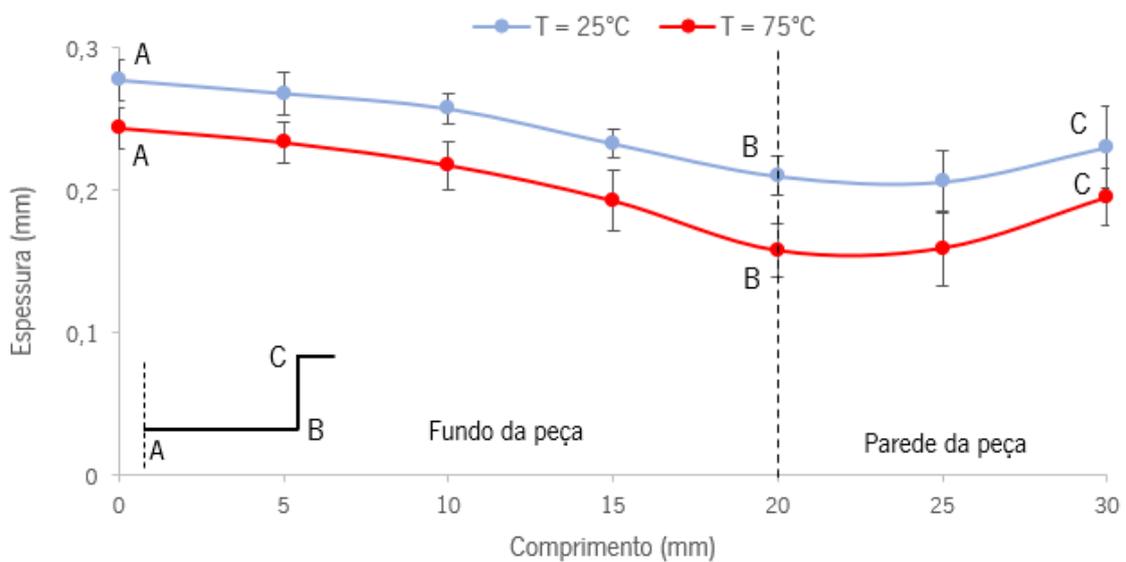


Figura 72. Distribuição de espessuras tendo em conta a temperatura do molde na direção x

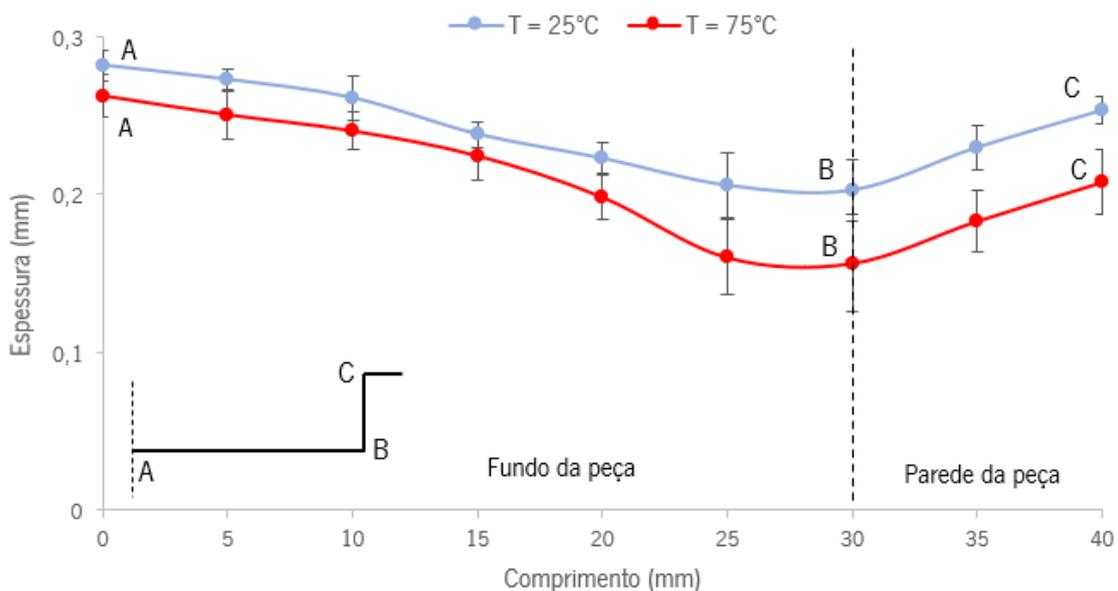


Figura 73. Distribuição de espessuras tendo em conta a temperatura do molde na direção y

Ao observar os pontos experimentais verifica-se que as peças termoformadas a molde frio, no geral, têm espessuras superiores às peças termoformadas a molde quente. Deste modo, pode-se concluir que a temperatura do molde tem influência na distribuição de espessuras. Isto está relacionado com o facto de o molde quente permitir um arrefecimento mais uniforme. Ou seja, a peça arrefece mais lentamente e assim o substrato estira mais fazendo com que a espessura diminua em todos os pontos. Para além disto, também é possível verificar que embora a espessura seja relativamente diferente, os pontos de maior e menor espessura são sempre os mesmos, independentemente, da temperatura do molde, localizando-se no centro da peça e nos raios de curvatura, respetivamente.

5.9 Simulação do processo de termoformação: T-SIM

5.9.1 Tamanho da malha

Inicialmente, fizeram-se várias iterações de modo que a enformação reproduzisse eficazmente os contornos do molde uma vez que houve a necessidade de modificar o número de elementos da malha. Na Figura 74 ilustram-se as regiões onde a folha polimérica não conseguiu adquirir os contornos do molde para uma malha com 1000 elementos. Por isso, teve de se aumentar o número de elementos da malha.

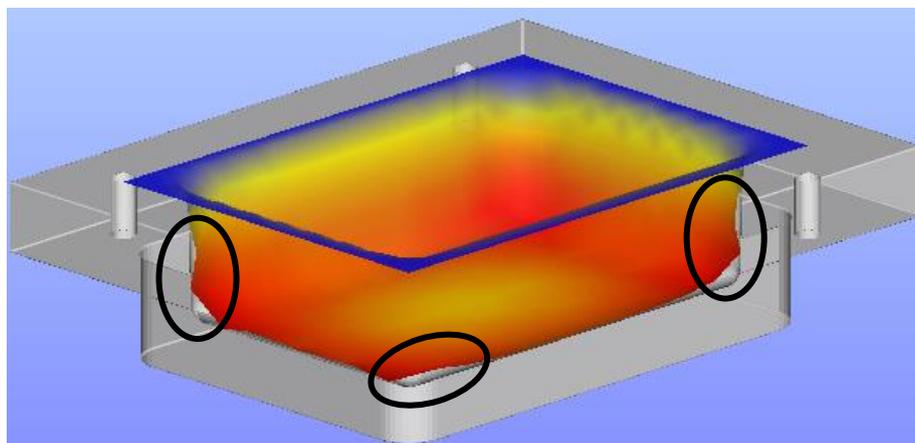


Figura 74. Simulação do processo para uma malha com 1000 elementos

Para isso, decidiu-se contruir uma malha com 5000 elementos. A Figura 75 representa a simulação do processo para uma malha com 5000 elementos, no entanto, verifica-se que a folha não adquire adequadamente os cantos do molde uma vez que existem vazios nas zonas assinaladas. Por isso, é necessário aumentar, novamente, o tamanho da malha.

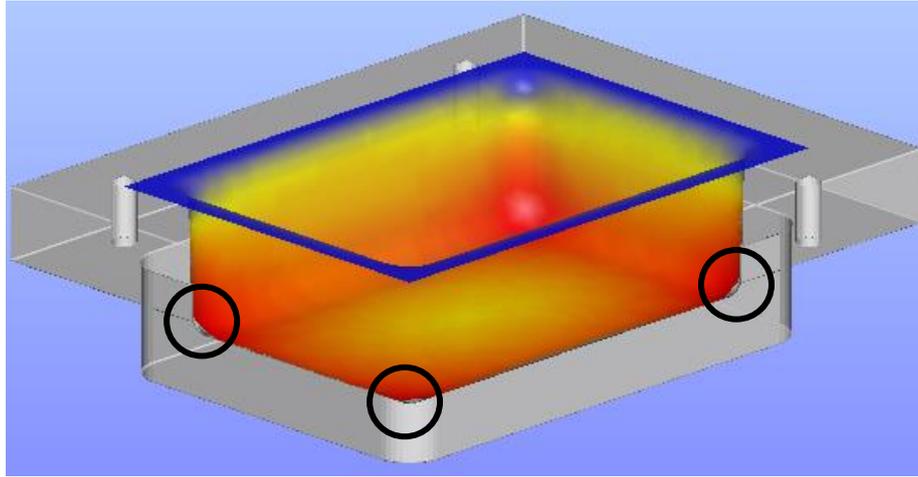


Figura 75. Simulação do processo para uma malha com 5000 elementos

Assim, na Figura 76 mostra-se a termoformação de uma malha com 40000 elementos. Este valor foi definido após várias tentativas erro, tendo em conta as três espessuras estudadas. Ou seja, teve-se de encontrar um número ideal de elementos onde fosse possível reproduzir eficazmente os contornos do molde em substratos com uma espessura de 0,25 mm, 0,3 mm e 0,5 mm. Para além disso, quanto maior o tamanho da malha mais precisa é a simulação provocando, uma melhor reprodutibilidade dos contornos do molde.

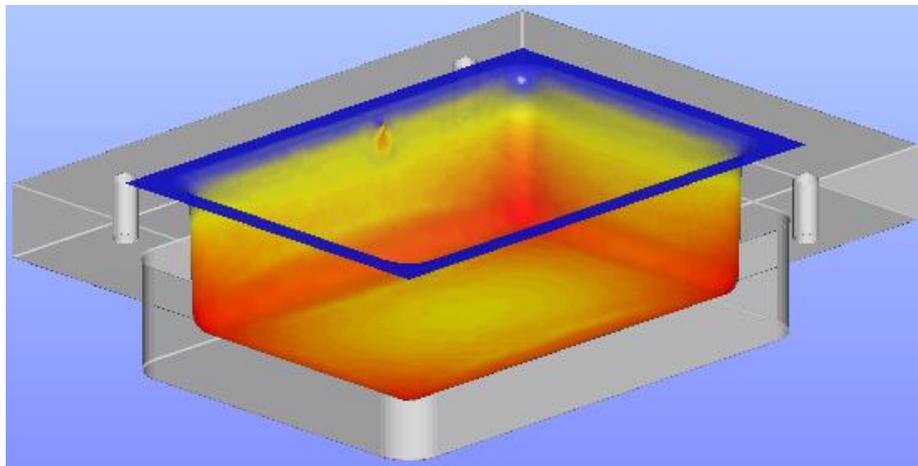


Figura 76. Simulação do processo para uma malha com 40000 elementos

5.9.2 Enformação

Um dos pontos que suscita mais interesse é perceber como é que ocorre a enformação da folha polimérica. No entanto, no trabalho experimental não foi possível observar este fenómeno. Assim, através do *software* conseguiu-se ver quais eram as regiões do molde que entravam primeiro em contacto com o substrato. Na Figura 77 mostra-se a sequência da enformação do substrato. A folha começa a deformar no centro da mesma devido ao vácuo exercido. Ao longo do

tempo, a folha vai-se aproximando do molde e é com o fundo do mesmo que esta contacta primeiro, tal é explicado pelo facto de este ser considerado um molde fundo. Posteriormente, com a sucessiva aplicação do vácuo sob a folha, esta vai adquirindo os contornos do molde. A zona dos raios de curvatura é a última a ser replicada.

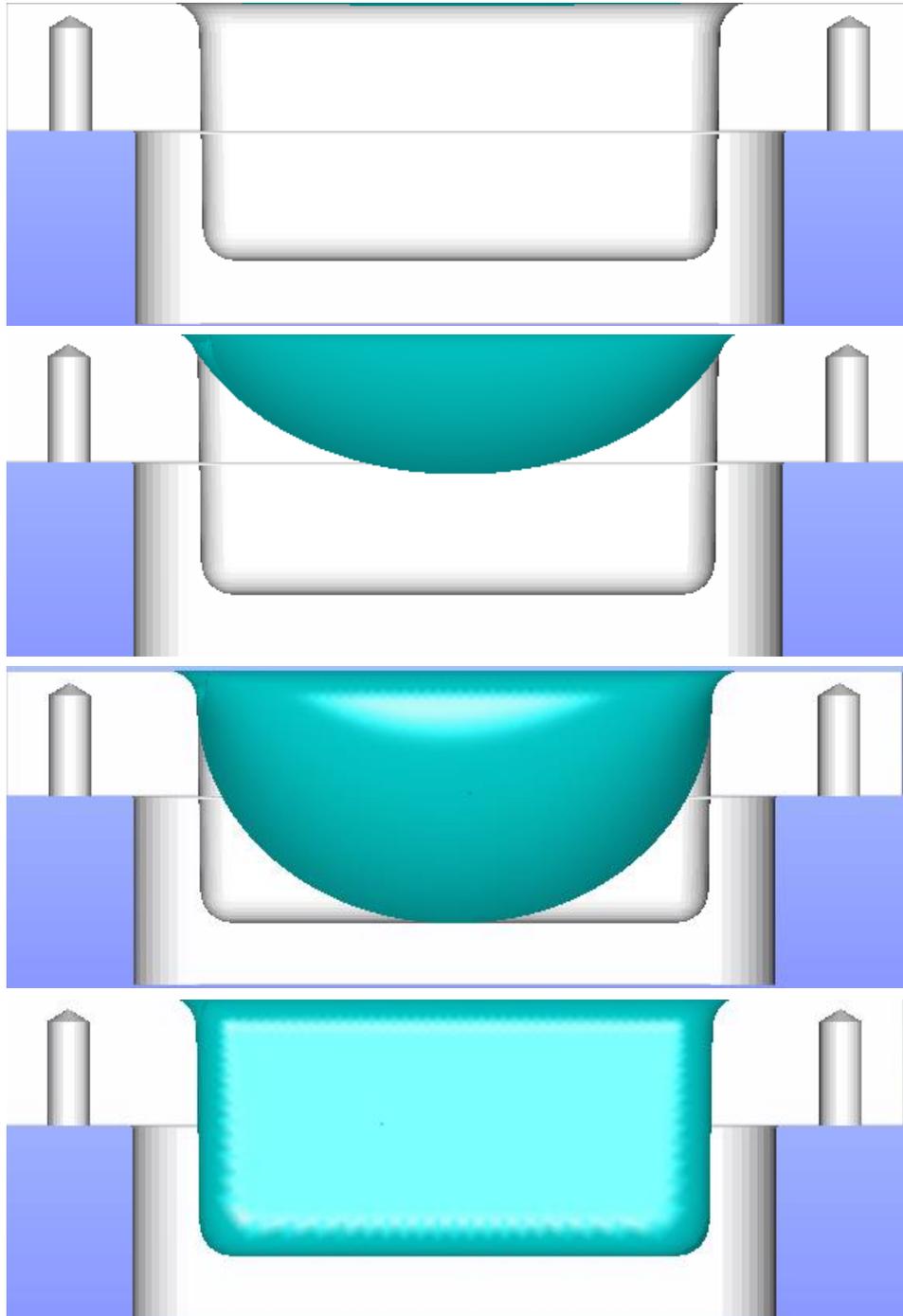


Figura 77. Sequência de enformação

5.9.3 Distribuição de espessuras

Após a execução de todas as simulações definidas analisou-se a distribuição de espessuras ao longo da secção da peça visto que se trata de um dos aspetos mais relevantes. Na Figura 78 ilustra-se o perfil de espessuras obtido na simulação do processo de uma folha com 0,3 mm de espessura. O *software* permite visualizar as zonas de maior e menor espessura através do uso de diferentes cores, onde o azul sinaliza a maior espessura e o vermelho a menor.

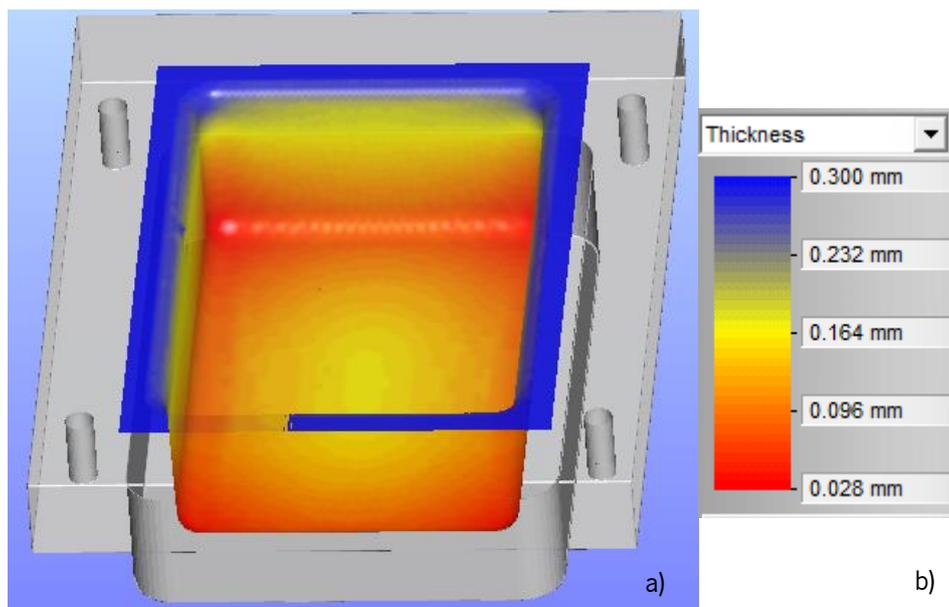


Figura 78. a) Simulação de uma folha com 0,3 mm de espessura; b) Legenda de cores

Assim, através das cores, percebe-se que a zona com maior espessura é a borda da folha que mantém a sua espessura inicial. Isto deve-se ao facto desta região da folha não ter sido sujeita à deformação uma vez que estava encastrada. Também se consegue verificar que o centro da folha, em comparação com os cantos do molde, tem uma maior espessura visto que se trata de um molde fundo. Por isso, a folha contacta primeiro com o centro do molde fazendo com que este adquira uma maior espessura. Para além disto, o *software* fornece um gráfico do perfil de espessuras. Deste modo, na Figura 79 ilustra-se o perfil de espessura de uma folha com 0,3 mm na direção x, Figura 79 a), e y, Figura 79 b).

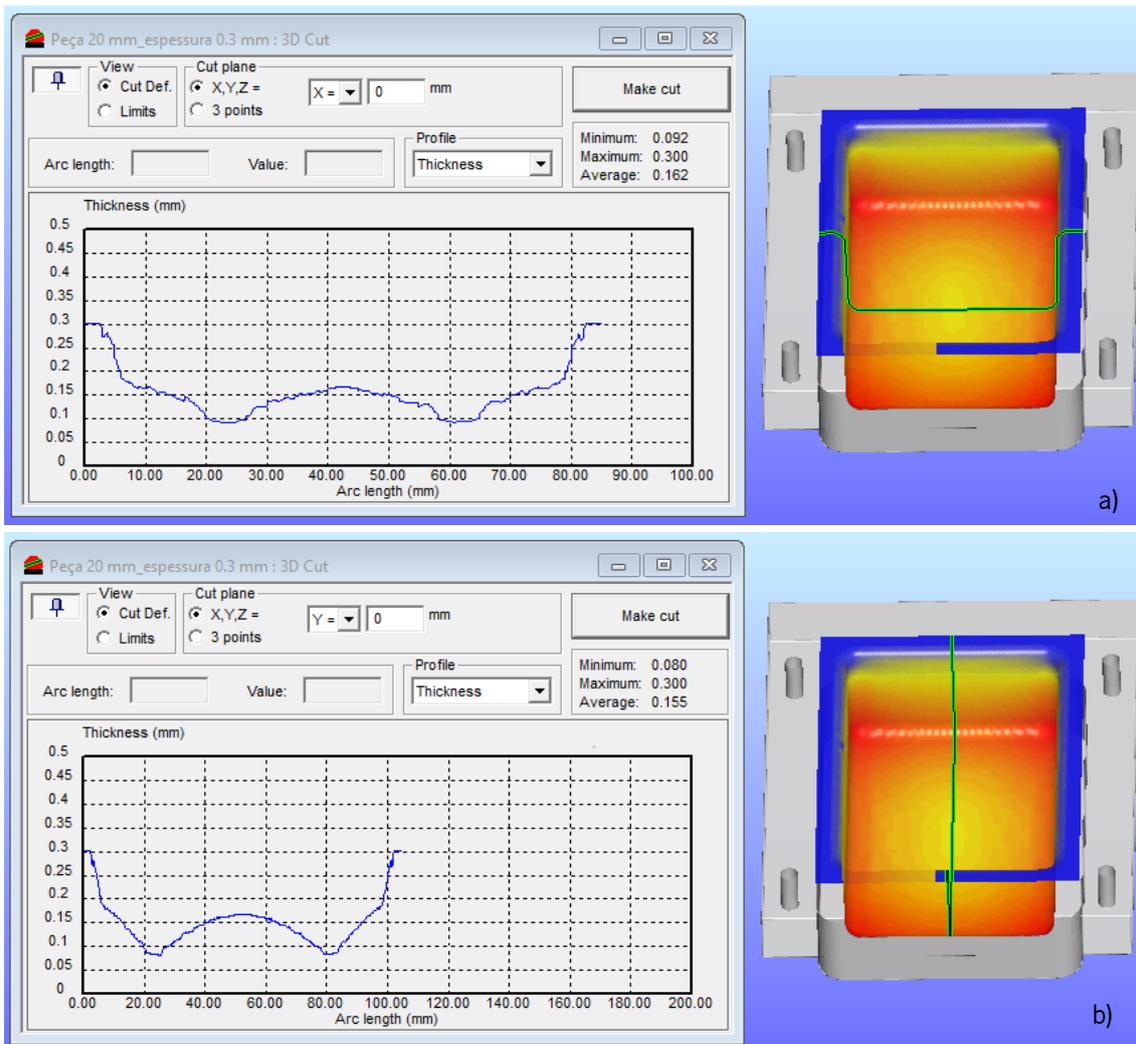


Figura 79. Distribuição de espessuras: a) Direção x; b) Direção y

Ao analisar as figuras verifica-se que, efetivamente, a espessura é superior no fundo da peça comparando com a espessura dos raios. Nos Anexo 12 e Anexo 13 estão ilustrados os perfis de temperatura para folhas com 0,25 mm e 0,5 mm, respetivamente. Para além disso, visto que o *software* também permite extrair os valores obtidos construíram-se gráficos com os mesmos. Assim, a Figura 80 e a Figura 81 ilustram o perfil de espessuras para folhas com diferentes espessuras com uma profundidade de 20 mm na direção x e y, respetivamente.

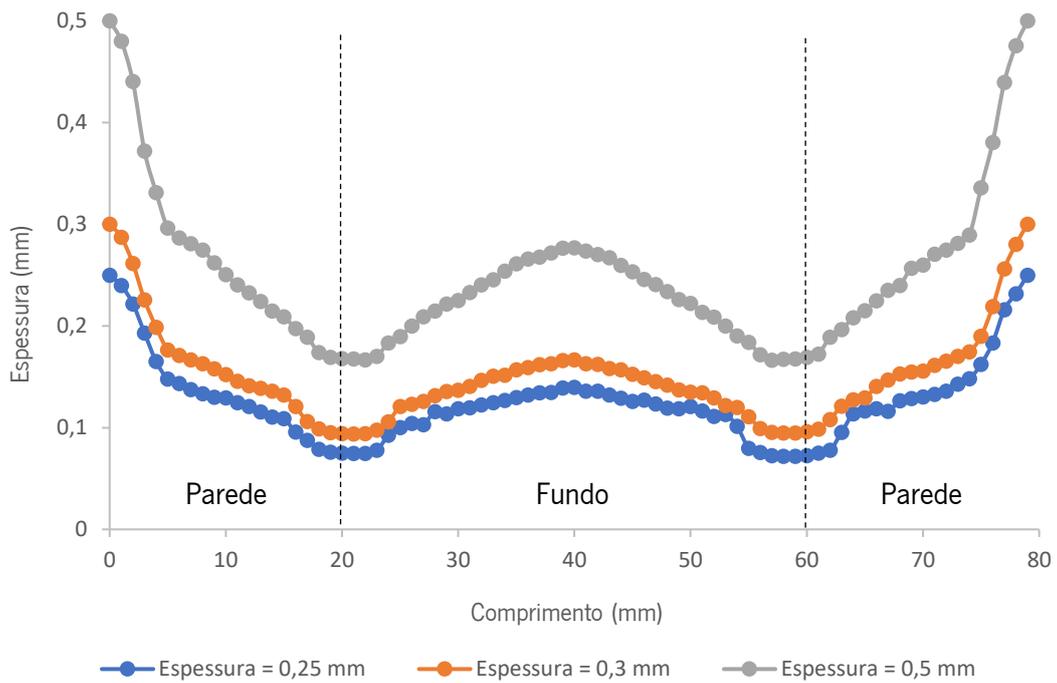


Figura 80. Perfil de espessuras na direção x

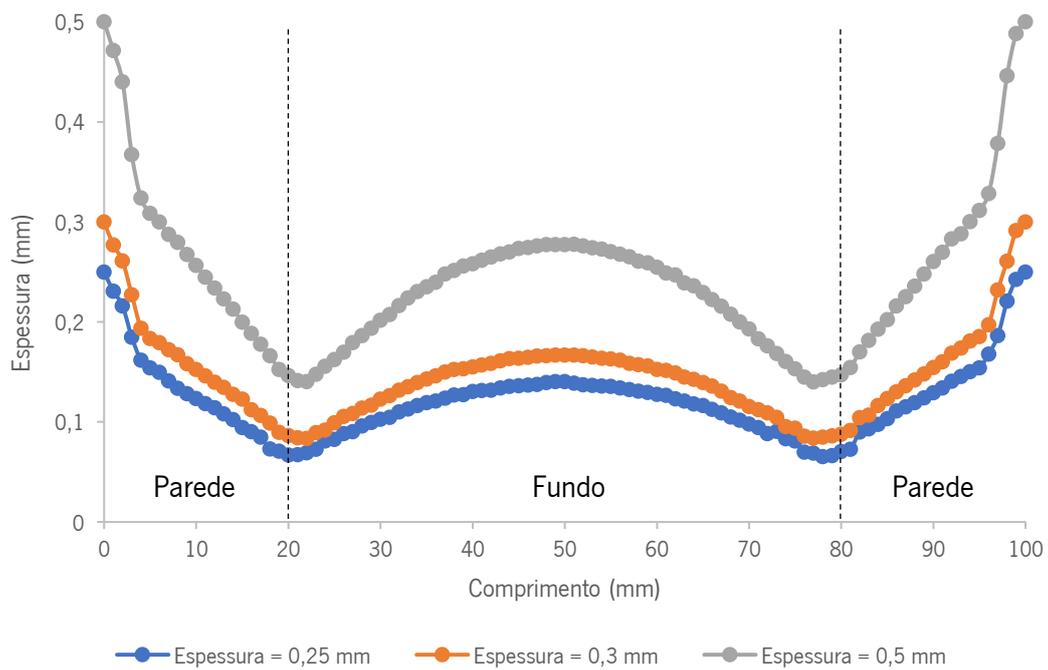


Figura 81. Perfil de espessuras na direção y

Verifica-se que a distribuição de espessuras tem o mesmo comportamento nas duas direções (x e y) independentemente da espessura inicial da folha uma vez que o desenho da linha é idêntico em todas as situações. Tal significa que a espessura da folha começa a diminuir ao logo da parede, atinge o seu valor mínimo no raio de curvatura e começa a aumentar até ao centro da peça. Também se pode concluir que a distribuição de espessuras é simétrica visto que os gráficos retratam os mesmos valores de espessuras em lados opostos da peça. As simulações feitas, anteriormente, foram realizadas para uma profundidade de 20 mm. Deste modo, é importante também comparar os resultados obtidos com simulações onde a profundidade é menor. Na Figura 82 mostra-se a simulação do perfil de espessuras para uma profundidade de 10 mm, Figura 82 a), e 20 mm, Figura 82 b).

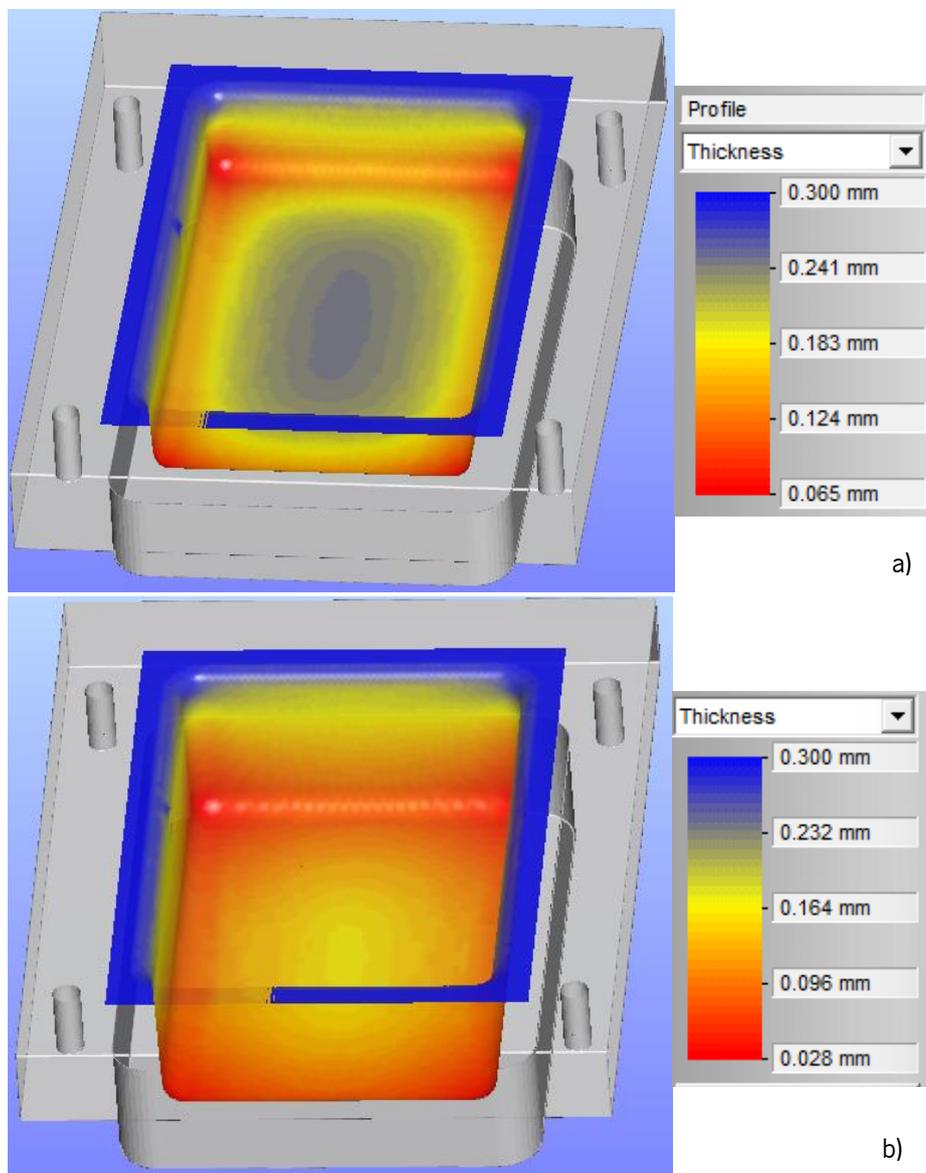


Figura 82. Simulação do perfil de espessuras: a) Profundidade de 10 mm; b) Profundidade de 20 mm

Ao observar as simulações, verifica-se que o degradê de cores é distinto. Pelas cores percebe-se que a espessura da folha simulada num molde uma profundidade de 10 mm, em geral, é superior à da simulada com uma profundidade de 20 mm. De modo que esta diferença seja mais perceptível, nas Figura 83 e Figura 84 mostra-se a distribuição de espessuras, ao longo da direção x, para substratos com uma espessura inicial de 0,3 mm simulados em moldes com profundidades de 10 mm e 20 mm, respectivamente.

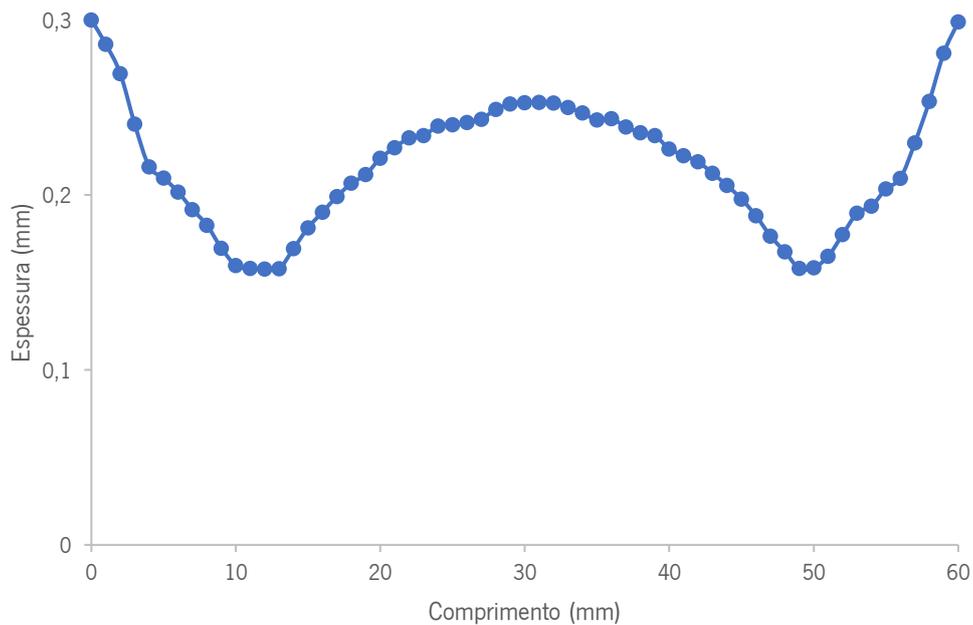


Figura 83. Perfil de espessuras para moldes com 10 mm de profundidade na direção x

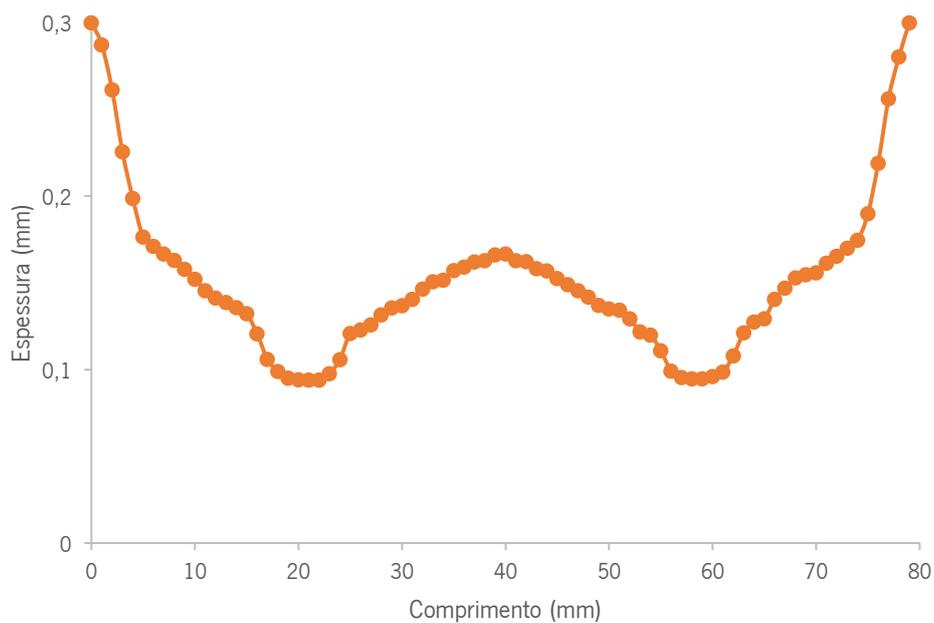


Figura 84. Perfil de espessuras para moldes com 20 mm de profundidade na direção x

Assim, independentemente da profundidade do molde, o comportamento da distribuição de espessuras é semelhante. Ou seja, a espessura mínima localiza-se, em ambos os casos, nos raios de curvatura e esta vai aumentando até chegar ao centro do molde. Também se verificou que quando se simula em moldes com uma profundidade de 10 mm a espessura é sempre maior relativamente a peças com 20 mm de profundidade. Isto ocorre devido ao facto de a razão de estiramento ser inferior proporcionando um menor estiramento na folha. Além disto, analisou-se a influência da temperatura do molde na distribuição de espessuras. Para estudar este efeito simulou-se o processo em folhas com 0,3 mm de espessura num molde com 20 mm de profundidade. Testou-se o processo com duas temperaturas distintas: 25°C e 75°C. Na Figura 85 mostra-se os perfis de espessuras tendo em conta a temperatura do molde. Desta maneira, percebe-se que os valores são parecidos independentemente da temperatura do molde. Por isso, pode-se concluir que pela simulação a temperatura do molde não tem influência na distribuição de espessuras das peças.

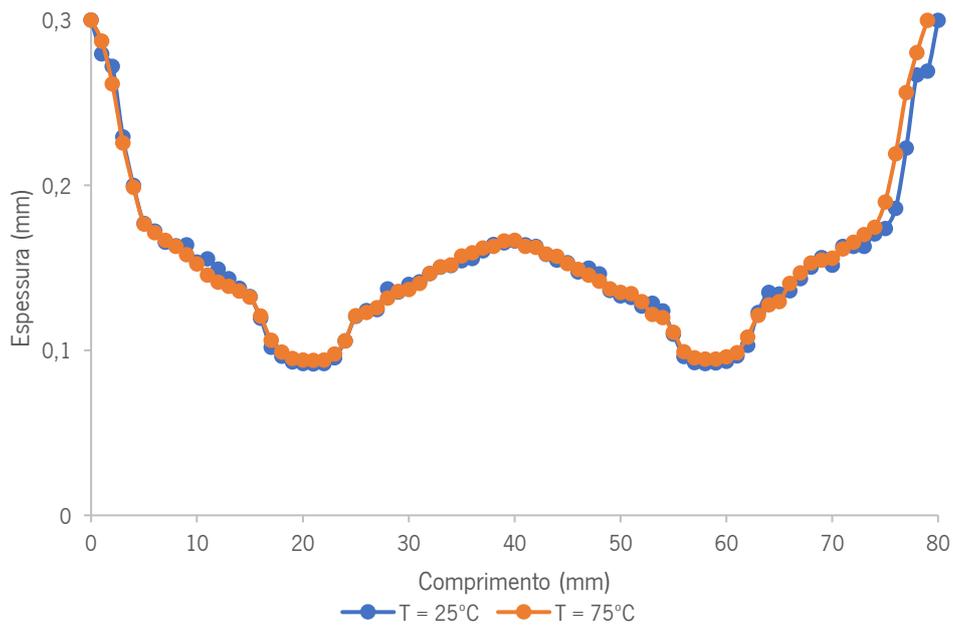


Figura 85. Perfis de espessura tendo em conta as temperaturas do molde

5.9.4 Resultados experimentais vs simulação

A simulação permitiu perceber realmente que o molde usado se trata de um molde baixo uma vez que a folha contacta primeiro com o fundo do mesmo do que com as paredes, como tinha sido referido no processo experimental. Para além disso, demonstrou também que a distribuição de espessuras medida no trabalho prático fazia sentido. Isto porque, nas simulações, a espessura vai diminuindo ao longo da parede do molde, atinge a espessura mínima no raio de curvatura e vai aumentando, progressivamente até ao centro da peça, tal como aconteceu experimentalmente. Também foi possível perceber que as espessuras das peças ao longo da secção são semelhantes em lado opostos do eixo de simetria, como foi afirmado no capítulo 4.2.9. Para além disso, o facto de as espessuras atingirem valores mais pequenos com razões de estiramento maiores coincide com os resultados obtidos nos ensaios. No entanto, não foi possível comprovar que a temperatura do molde afeta a distribuição de espessuras. Nas simulações as espessuras obtidas eram semelhantes para temperaturas do molde diferentes o que contraria os valores obtidos nos testes práticos.

6. Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo estudar os limites de termoformabilidade de certas tintas funcionais em substratos de policarbonato e relacionar os parâmetros estudados com a integridade das linhas dos circuitos. Assim, foram testados dois tipos de substratos com espessuras diferentes e dois tipos de tinta de forma a comparar o seu desempenho. Na caracterização da adesão verificou-se que a tinta removida pela fita era insignificante, não modificando o estado da tinta na zona de estudo. Por isso, concluiu-se que a adesão das tintas em substratos de PC é boa. Nos ensaios eletromecânicos concluiu-se que a tinta de carbono resiste mais à deformação do que a de prata. Com isto, a tinta à base de carbono suporta melhor o processo de termoformação.

Relativamente às peças termoformadas, concluiu-se que a temperatura do molde tem influência na qualidade das mesmas. Por isso, deve-se utilizar moldes aquecidos para a termoformação de substratos de PC, para que estes adquiram eficazmente os contornos do molde. Para além disso, verificou-se também que as linhas de prata influenciam negativamente a termoformação das folhas visto que impedem o aquecimento da mesma. Posteriormente, com a análise microscópica, verificou-se que existem diferenças nos parâmetros geométricos que cada uma das tintas suporta. Na tinta de prata, a integridade das linhas é afetada quando o molde possui raios pequenos e abruptos devendo utilizar-se raios de curvatura superiores a 2,5 mm. Para além disso, as linhas também são prejudicadas pela deformação provocada. Assim, os moldes devem ter menos de 1,5 de razão de estiramento para que as linhas de tinta não quebrem. Na tinta de carbono, os parâmetros geométricos são menos restritivos sendo que as linhas suportam raios de curvatura de 0,5 mm. Este tipo de tinta só perde a sua capacidade elétrica quando sujeita a uma razão de estiramento superior a 2. Para além disto, concluiu-se que os parâmetros geométricos têm um papel mais importante na integridade das linhas dos circuitos em comparação com as condições de processamento. Através da microscopia também se mediu a largura das linhas condutoras, sendo que o comportamento é diferente nas duas tintas. Na tinta de prata a variação da largura média é pouco significativa quando o molde tem uma profundidade de 10 mm. No entanto, as linhas das peças com maior profundidade tendem a adquirir uma maior largura. Na tinta de carbono a largura das linhas é afetada tanto com cavidades com profundidade de 10 mm como de 20 mm. Tal está relacionado com as propriedades das tintas utilizadas.

Relativamente aos valores medidos da resistência elétrica pode-se dizer que são bastante distintos. Através da medição da mesma verificou-se que a tinta à base de prata tem uma resistência elétrica muito inferior à tinta de carbono. Por isso, a tinta de prata tem uma condutividade muito superior em relação à tinta de carbono. Assim, em ambiente industrial, a utilização da tinta à base de carbono não é eficaz, uma vez que para atingir valores razoáveis de resistência elétrica teriam de ser usadas muitas camadas de tinta por impressão o que se traduz em maiores custos e tempo de produção. O estiramento das linhas do circuito é influenciado pelo tipo de substrato, mas não é influenciado pela espessura do mesmo. Sendo que os substratos DE 1-4 060007 proporcionam um menor estiramento das linhas do que o substrato Lexan 8A13E. Também se concluiu que a temperatura do molde não tem efeito no alongamento das linhas. No entanto, verifica-se que uma maior razão de estiramento, 2, provoca um maior alongamento nas linhas do que uma razão de estiramento de 1,5. Por isso, a quebra das linhas está efetivamente relacionada com a deformação do substrato. Com isto, é melhor utilizar substratos DE 1-4 060007 visto que proporcionam uma menor deformação nas linhas e por isso, a quebra das mesmas não é tão frequente. A distribuição de espessuras permitiu perceber que a espessura é maior no centro da peça e atinge a espessura mínima no raio de curvatura. A temperatura do molde tem influência na distribuição de espessuras e as peças com maior profundidade, 20 mm, têm uma menor espessura ao longo do comprimento do que as peças com uma profundidade de 10 mm. Por fim, as simulações conseguiram corroborar grande parte das conclusões que se obtiveram com o trabalho experimental. A simulação permitiu perceber realmente que o molde usado se trata de um molde baixo uma vez que a folha contacta primeiro com o fundo do mesmo do que com as paredes. Para além disso, demonstrou também que a distribuição de espessuras medida no trabalho prático foi bem conseguida uma vez que os resultados foram similares.

Em suma, conclui-se, então, que para a tecnologia *In mold-electronics* o substrato e a tinta têm de ser escolhidos consoante o tipo de molde e a finalidade prática do produto. Além disso, seria interessante criar uma tinta em que se junte as vantagens da tinta à base de prata, baixa resistência elétrica, e da tinta à base de carbono, elevada elasticidade.

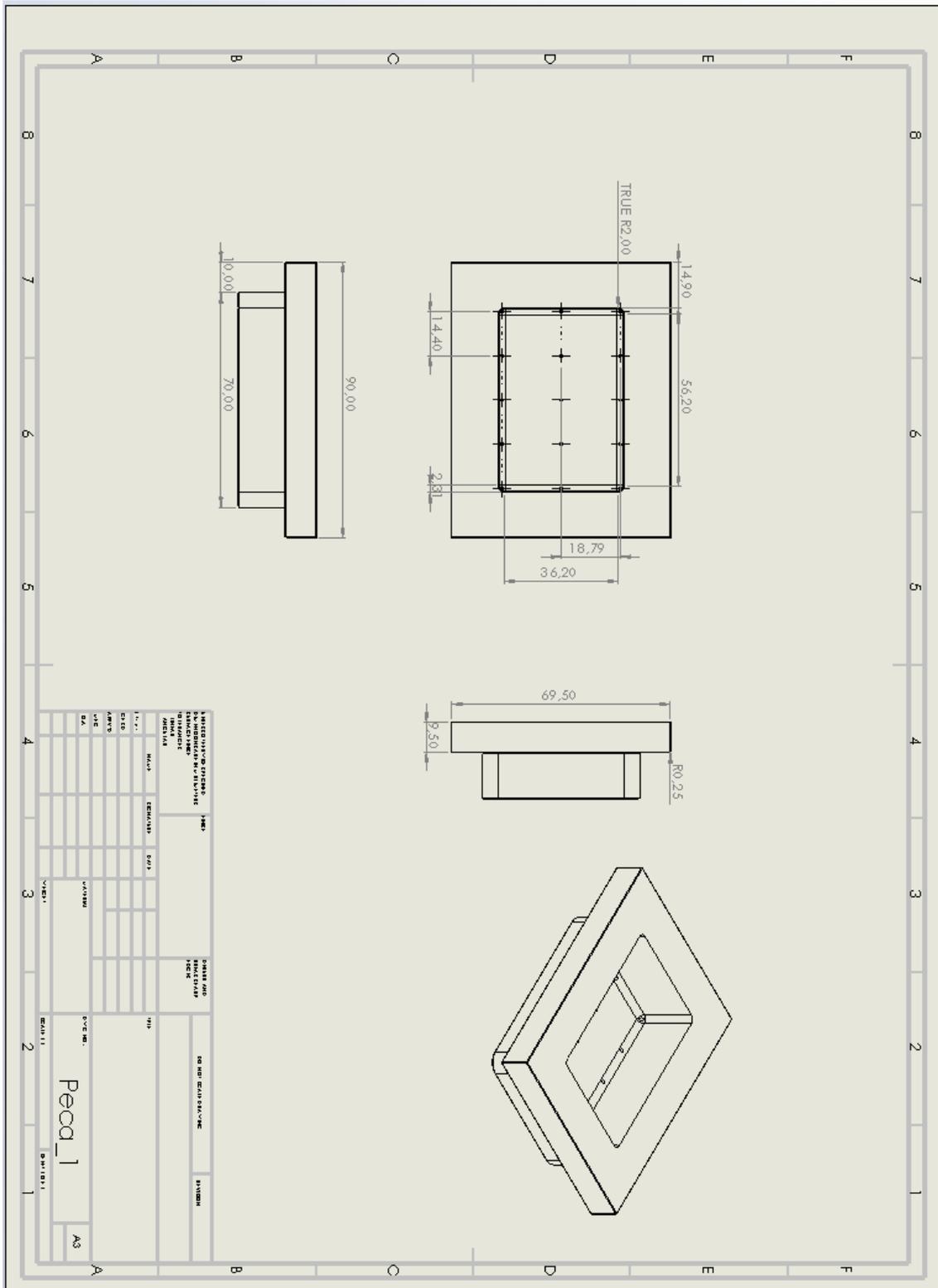
7. Referências Bibliográficas

- [1] “In-Mold Electronic Technology.” <https://www.mobility-materials.com/products/in-mold-electronic-technology.html> (accessed Feb. 22, 2023).
- [2] “In Mold Electronic Application Design.” <https://www.designhmi.com/2017/03/25/dupont-in-mold-electronics-technology-and-application-development/> (accessed Feb. 02, 2023).
- [3] M. Beltrão, F. M. Duarte, J. C. Viana, and V. Paulo, “A review on in-mold electronics technology,” *Polymer Engineering and Science*, vol. 62, no. 4. John Wiley and Sons Inc, pp. 967–990, Apr. 01, 2022. doi: 10.1002/pen.25918.
- [4] N. M. B. Mariz, “Componentes funcionais obtidos através de serigrafia,” Jun. 2020.
- [5] X. Qi, H. Ha, B. Hwang, and S. Lim, “Printability of the screen-printed strain sensor with carbon black/silver paste for sensitive wearable electronics,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 19, pp. 1–10, Oct. 2020, doi: 10.3390/app10196983.
- [6] D. Laroche and F. Erchiqui, “Experimental and theoretical study of the thermoformability of industrial polymers,” pp. 287–296, 1999.
- [7] S. C. Chen, S. T. Huang, M. C. Lin, and R. Der Chien, “Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 8, pp. 967–973, 2008, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.04.008.
- [8] “Vacuum Forming: The Difference between Male and Female Tooling.” <https://www.amtekcompany.com/vacuum-forming-difference-male-female-tooling/> (accessed Feb. 02, 2023).
- [9] Y. Gong, K. J. Cha, and J. M. Park, “Deformation characteristics and resistance distribution in thermoforming of printed electrical circuits for in-mold electronics application,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 3, pp. 749–758, May 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05377-9.
- [10] Gill M. *et al.*, “Analysis of the Design Variables of Thermoforming Process on the Performance of Printed Electronic Traces.”

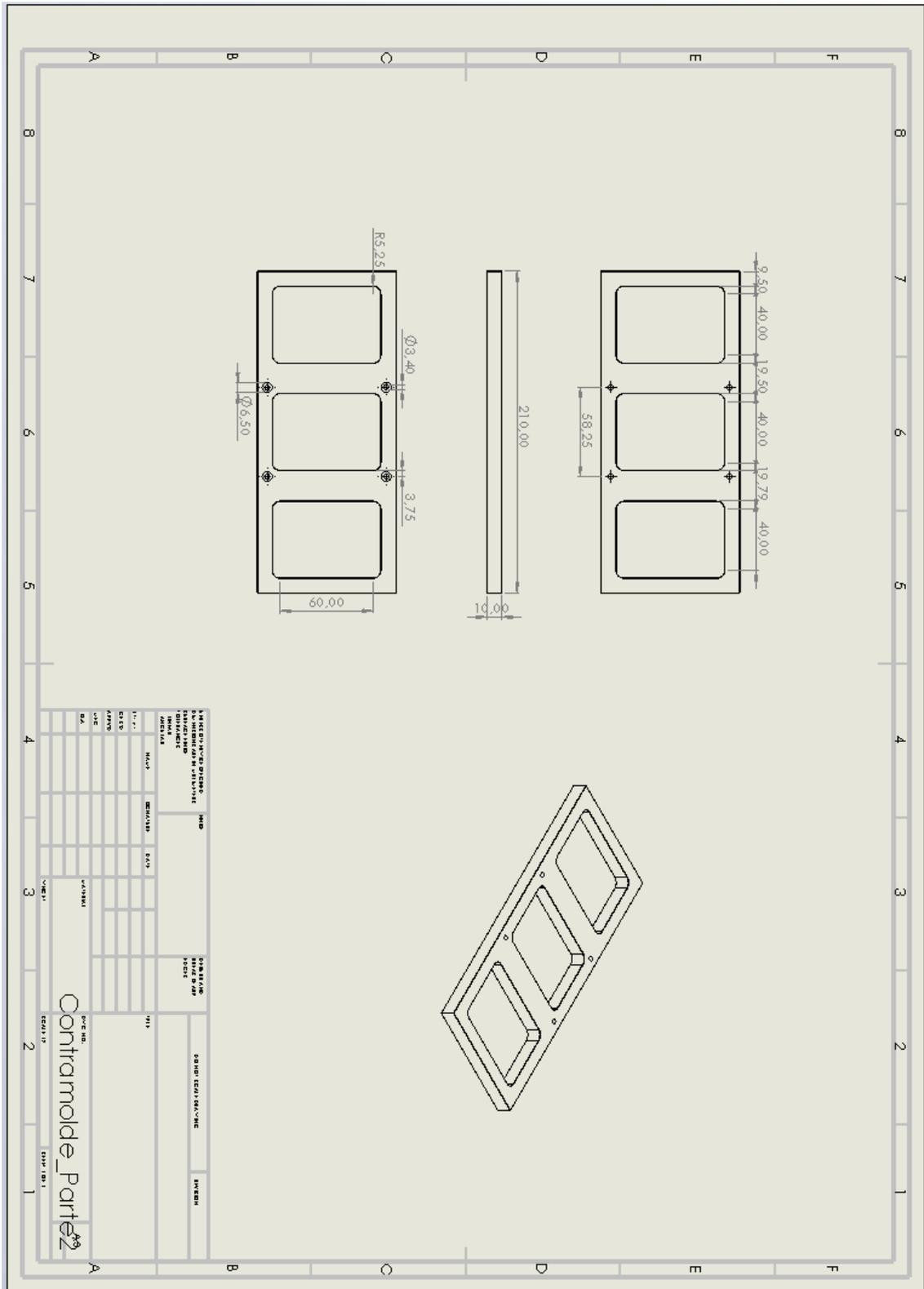
- [11] "What is Thermoforming?" <https://medical.brentwoodindustries.com/2020/07/29/what-is-thermoforming/> (accessed Feb. 22, 2023).
- [12] "High Pressure Forming." <https://www.niebling-form.com/en/technology/> (accessed Feb. 22, 2023).
- [13] C. Kallmayer, F. Schaller, T. Loher, J. Haberland, F. Kayatz, and A. Schult, "Optimized Thermoforming Process for Conformable Electronics," in *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices, MID 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2018. doi: 10.1109/ICMID.2018.8526929.
- [14] C. Goument *et al.*, "In-Mold Electronics on Poly(Lactic Acid): towards a more sustainable mass production of plasmonic devices," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 125, no. 5–6, pp. 2643–2660, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-10878-4.
- [15] S. Merilampi, T. Laine-Ma, and P. Ruuskanen, "The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates," *Microelectronics Reliability*, vol. 49, no. 7, pp. 782–790, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.microrel.2009.04.004.
- [16] S. Zulfqar *et al.*, "Alternative manufacturing process of 3-dimensional interconnect device using thermoforming process," *Microelectronics Reliability*, vol. 127, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114373.
- [17] Sabic, "Product Datasheet - Lexan 8A13E Film." [Online]. Available: <http://www.sabic-ip.com>
- [18] Covestro, "Product Datasheet," 2015. [Online]. Available: www.makrofol.com
- [19] "DuPont™ ME201 - Carbon Conductor," 2019.
- [20] "DuPont™ ME614 - Silver Conductor."
- [21] "DuPont™ ME902 - Electrically Conductive Adhesive," 2019.
- [22] "Drucktech." <https://www.drucktech.hu/hu/szitanymas/szitanomogepek/felautomata-szitanomogepek/atma-szitanomogepek/at-60pd> (accessed Sep. 06, 2023).
- [23] "Acosgraf." <https://acosgraf.com/produto/miniprint/> (accessed Sep. 06, 2023).

- [24] "Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test," 2017, doi: 10.1520/D3359-17.
- [25] "Photonics MEDIA."
https://www.photonics.com/Products/ThermaCAM_SC640_IR_Camera_/pr26214
(accessed Mar. 20, 2023).
- [26] "Accurform website." <https://www.t-sim.com/index.htm> (accessed Sep. 06, 2023).

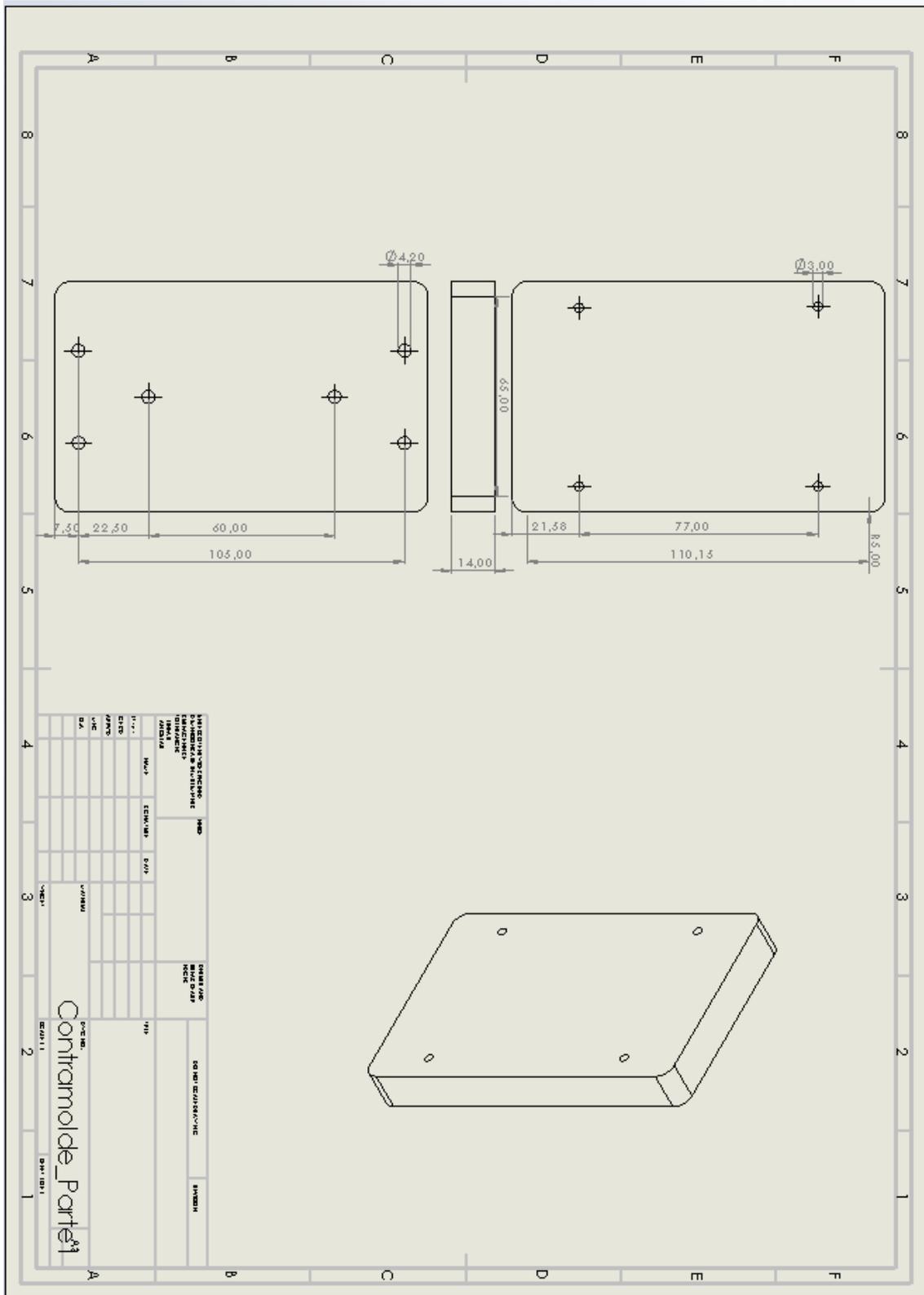
Anexo 2. Dimensionamento das cavidades



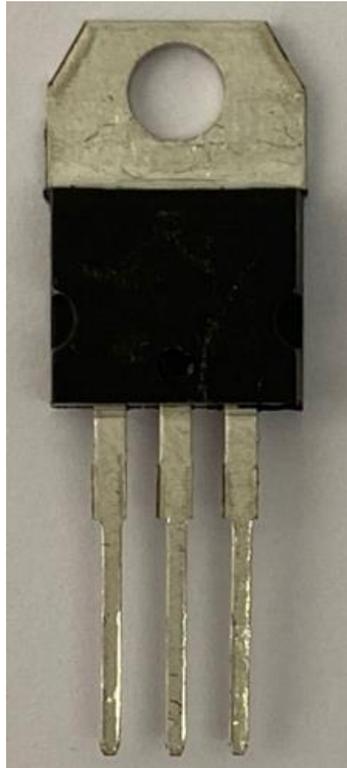
Anexo 3. Dimensionamento da placa de encastramento



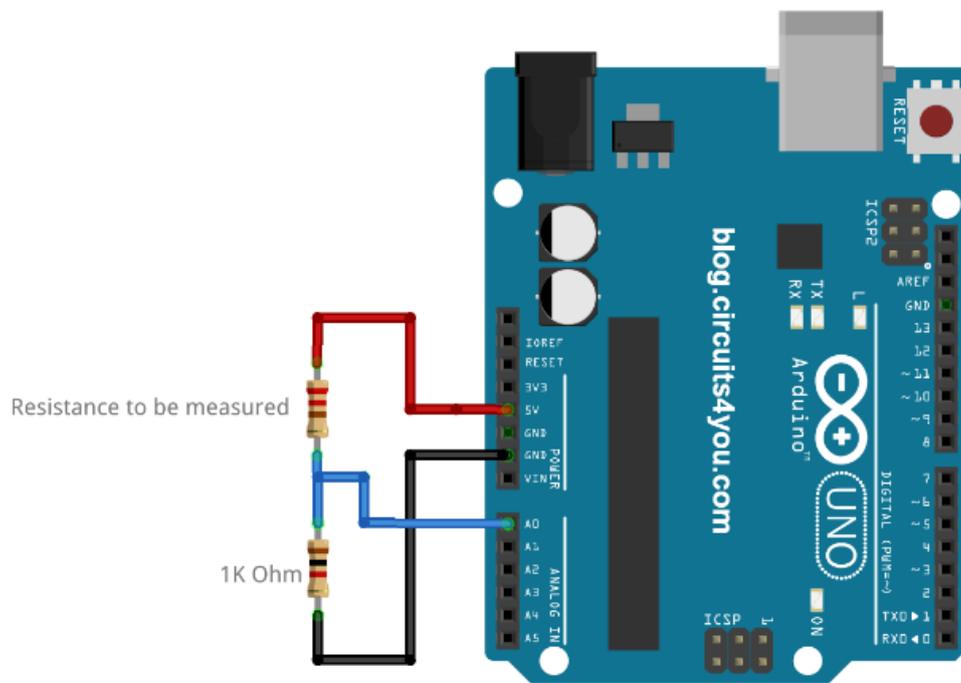
Anexo 4. Dimensionamento da placa de fixação



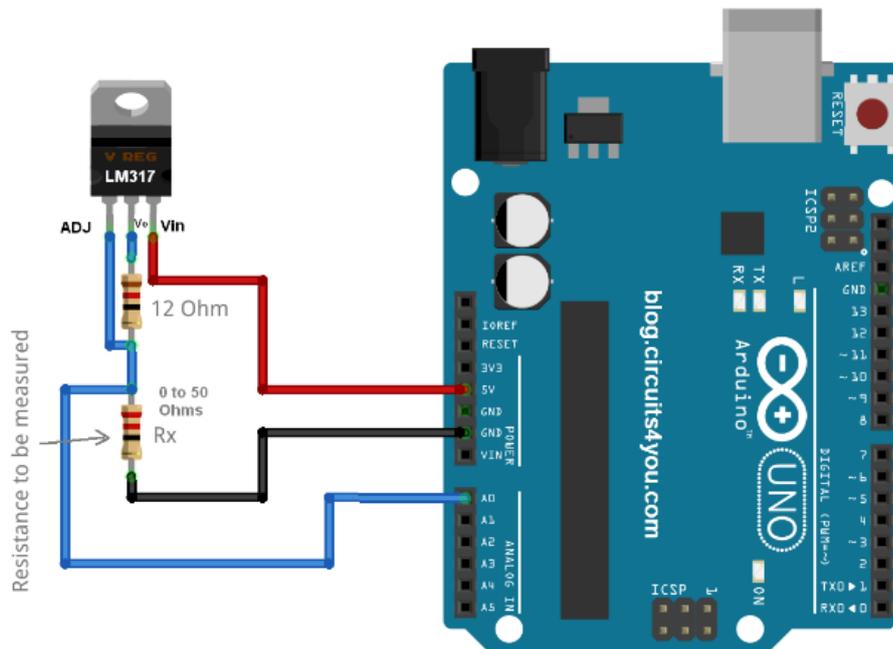
Anexo 5. *Pinout* LM317



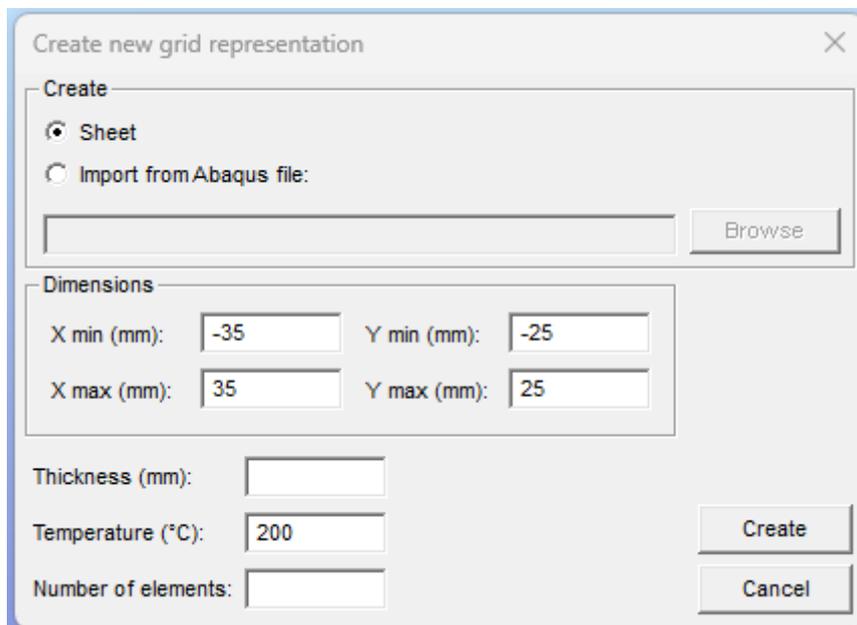
Anexo 6. Circuito elétrico para resistências de 50 a 500000 ohm



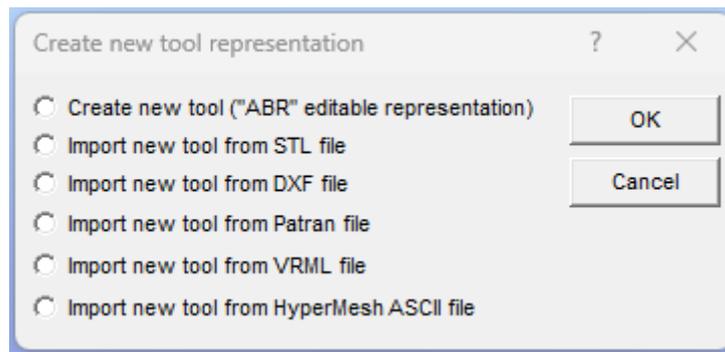
Anexo 7. Circuito elétrico para resistências de 0,1 a 50 ohm



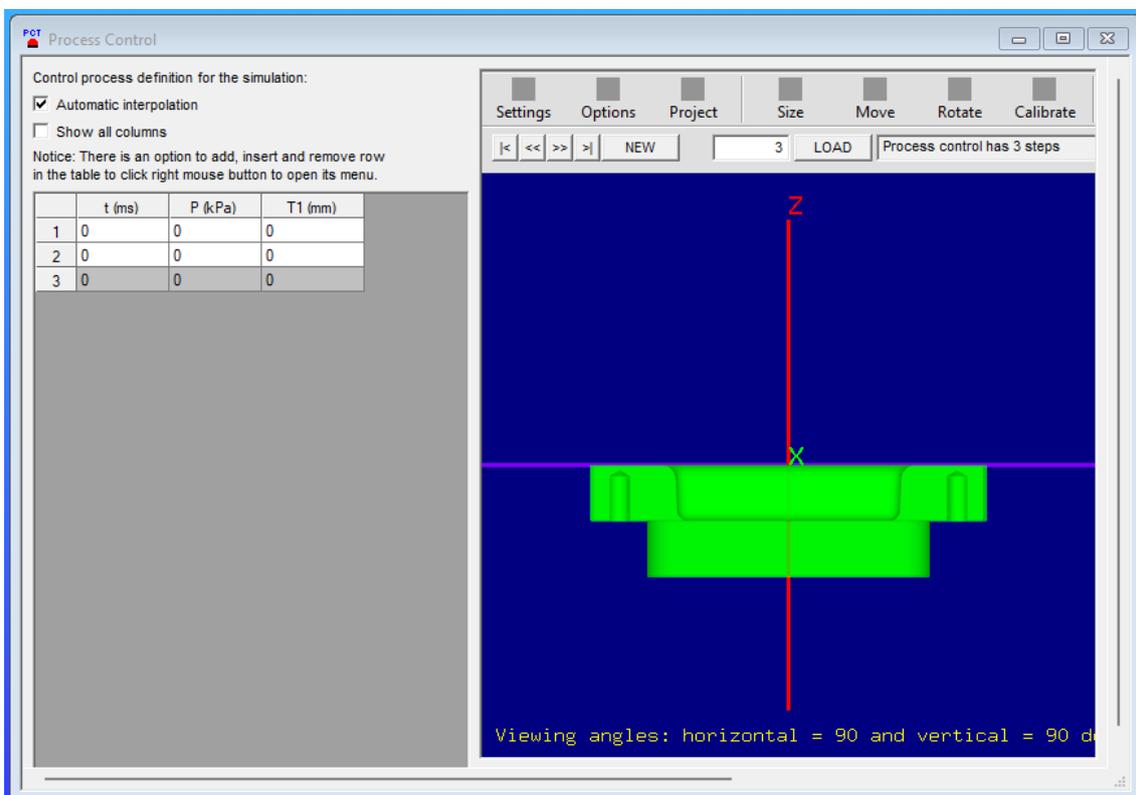
Anexo 8. Criação da folha



Anexo 9. Criação do molde



Anexo 10. Criação do controlo do processo



Anexo 11. Criação do projeto

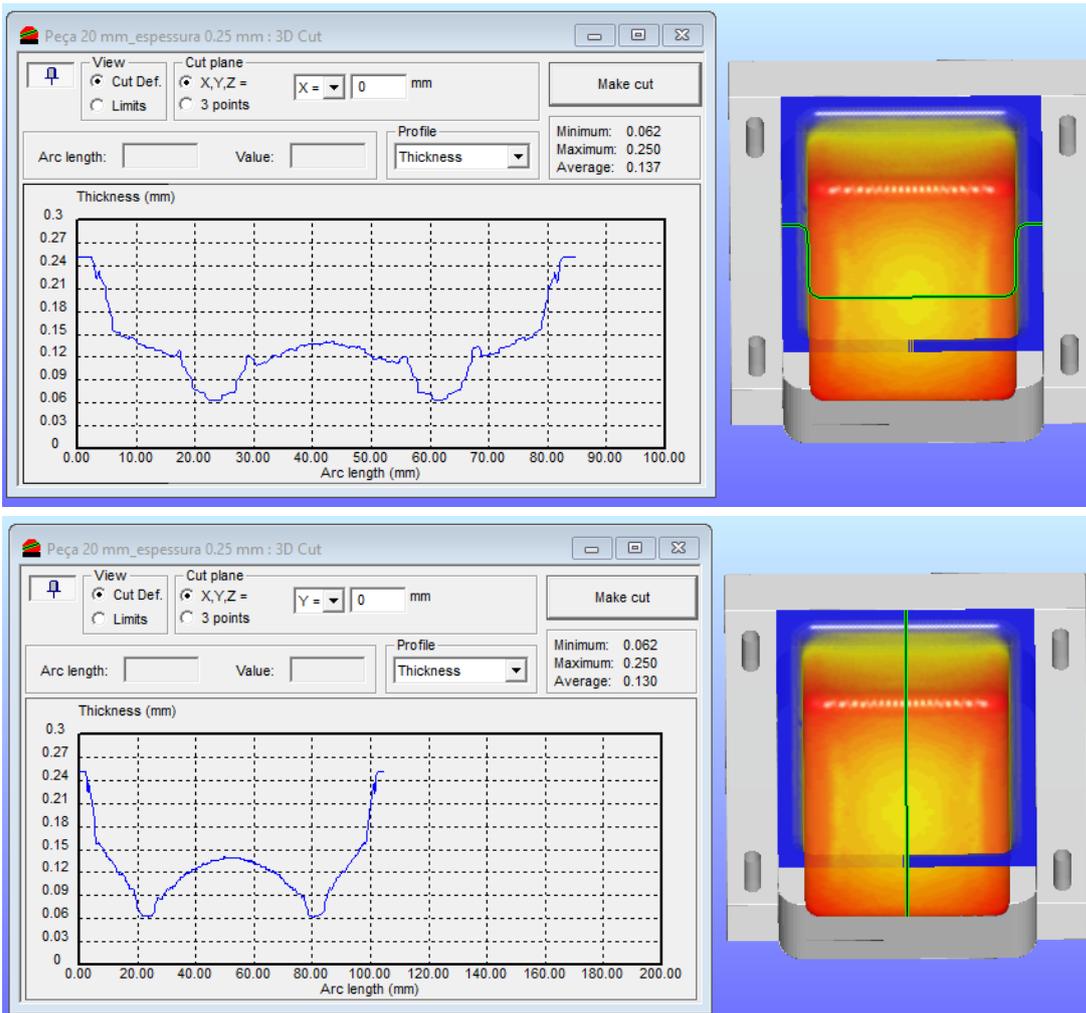
The screenshot shows the 'Project 1' configuration window. It is divided into several sections:

- Project files:** Grid (sheet): None. Buttons: Browse, View / Edit.
- Tools:** A table with columns 'Tool #' and 'Used'.

Tool #	Used
T 1	<input type="checkbox"/> None

Buttons: Browse, View / Edit.
- Process control:** None. Buttons: Browse, View / Edit.
- Material:** Unused. Buttons: Browse, View / Edit.
- Heat & friction:** None. Buttons: Browse, View / Edit.
- Set project files folder:** Automatically, Manually.
- Solver:**
 - Time step (ms): 25
 - Space tolerance (mm): 1
 - Refinement: 1x
- Additional information:**
 - Job number: [] #: []
 - Programmer: []
 - Comments: []

Anexo 12. Perfis de espessura de uma folha com 0,25 mm de espessura



Anexo 13. Perfis de espessura de uma folha com 0,5 mm de espessura

