



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Influência das condições do processo *In-Mold
Electronics* na produção de componentes funcionais

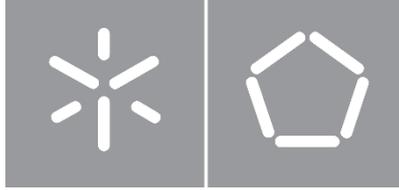
Catarina Isabel Oliveira Faria

Influência das condições do processo
In-Mold Electronics na produção de
componentes funcionais

Catarina Isabel Oliveira Faria

UMinho | 2023

dezembro de 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Catarina Isabel Oliveira Faria

**Influência das condições do processo
In-Mold Electronics na produção de
componentes funcionais**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)

Doutora Sílvia Cruz
Professor Doutor Júlio C. Viana

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
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

Foram 5 anos de muito esforço, provas, trabalhos e desafios que terminam com a realização desta dissertação. O decorrer deste projeto final é o culminar de um percurso cheio de boas memórias, que contaram com a presença de pessoas com as quais estarei grata e que me acompanharam mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço em especial à minha família que permitiu que eu traçasse este caminho e me incentivou a não baixar os braços. Eles que são o meu pilar e que sempre me transmitiram os valores necessários para atingir os meus objetivos.

Ao PIEP- Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros, por me possibilitar a realização da minha dissertação de mestrado. Em especial à Sílvia, Cátia, Diana, Tiago, Rita e Eduardo pela prontidão em ajudar, pelos conselhos e dedicação que sempre demonstraram em todos os momentos.

Ao professor Júlio Viana, meu orientador, pelo auxílio no decorrer de todo o trabalho.

E para finalizar, mas não menos importante, aos meus amigos porque sem eles pouco conseguiria caminhar. Que foram e são o meu amparo nos momentos menos bons. Em especial, à Francisca e à Márcia que me acompanharam neste percurso e que me ajudaram a aceitar todos os desafios, sem medo das dúvidas, porque foi isso que nos moveu com maior força.

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 ou IME é uma tecnologia que permite integrar eletrônica impressa em componentes plásticos através da moldação por injeção, integrando funções eletrônicas nos mesmos. Esta é uma tecnologia que tem vindo a demonstrar interesse a nível tecnológico e científico, uma vez que, permite suprimir os botões convencionais, reduzindo a complexidade das peças, peso, e a necessidade de um produto multimaterial.

Um produto produzido através da tecnologia IME percorre três etapas fundamentais, sendo elas: impressão dos padrões impressos no substrato, termoformação do filme, dependendo da configuração do produto e, por fim, moldação por injeção sobre o filme termoformado podendo ou não integrar componentes como sensores, LED's, entre outros.

Em particular na serigrafia os filmes foram impressos, fazendo-se variar a diluição da tinta condutora e o número de camadas a aplicar, de modo a analisar de que modo estas condições influenciam a qualidade de replicação das geometrias impressas, assim como de que forma afetam a compatibilidade dos materiais e a condução ou não de corrente elétrica.

Seguidamente, na termoformação foi avaliada a influência do aquecimento na qualidade estética e funcional final. As variáveis a estudar foram o tempo de exposição, potência de aquecimento e pressão de vácuo emitida, de forma a respeitar as limitações associadas à tinta funcional. Já na sobreinjeção do produto, foram analisadas a velocidade de injeção e temperatura do fundido de modo a ser possível avaliar a integridade dos padrões impressos e, conseqüentemente, validar a funcionalidade do componente produzido.

Em paralelo, efetuou-se um estudo com recurso a modelos numéricos e ao software Moldex 3D de forma a antecipar e analisar a interface entre o polímero fundido e o filme, durante o processo de moldação por injeção. Dessa forma, avaliou-se em particular o *remelt* por meio da temperatura, considerando a aderência entre inserto e peça, e avaliou-se potenciais zonas de arrastamento de tinta, bem como a possibilidade do aparecimento de defeitos.

Para finalizar, pretendeu-se proceder à caracterização dos filmes impressos de forma a analisar a compatibilidade e, no caso do filme funcional, a capacidade de conduzir corrente elétrica após os processos de cura, termoformação e sobreinjeção. Para isso, efetuou-se análise morfológica dos filmes e medição da resistência elétrica para constatar se existia ou não a perda da propriedade ao longo do processo IME.

Palavras-chave: In-Mold Electronics, moldação por injeção, resistência elétrica, serigrafia, termoformação.

Abstract

In-Mold Electronics or IME is a technology that allows printed electronics to be integrated into plastic components through injection moulding, enabling the integration of electronic functions in them. This is a technology that has been showing interest at a technological and scientific level, since it allows to eliminate conventional buttons, reducing the complexity of the parts, weight, and multi-material requirements.

A product produced using IME technology goes through three fundamental stages, which are: printing the printed patterns on the substrate, thermoforming the film, depending on the product configuration and, finally, injection molding on the thermoformed film, which may or may not integrate components such as sensors, LED's, etc...

In particular in screen printing, the films were printed, varying the percent dilution of the conductive ink and the number of layers to be applied, in order to analyze how these conditions, influence the quality of replication of the printed geometries, as well as how affect the compatibility of materials and the conduction or not of electric current.

Then, during thermoforming, the influence of heating on the final aesthetic and functional quality was evaluated. The variables to be studied were exposure time, heating power and emitted vacuum pressure, in order to respect the limitations associated with functional ink. When over-injecting the product, the injection speed and melt temperature were analyzed to make it to evaluate the integrity of the printed patterns and, consequently, validate the functionality of the produced component.

In parallel, a study was carried out using numerical models and the Moldex 3D software in order to anticipate and analyze the interface between the melted polymer and the film, during the injection molding process. In this way, the remelt was evaluated in particular through temperature, considering the adhesion between the insert and the part, and potential areas of ink dragging were evaluated, as well as the possibility of the appearance of defects.

To conclude, was intend to characterize the printed films in order to analyze the compatibility and, in the case of the functional film, the ability to conduct electrical current after the curing, thermoforming and overmolding processes. To achieve this, morphological analysis of the films and measurement of electrical resistance are necessary to determine whether or not there has been a loss of property throughout the IME process.

Keywords: In-mold electronics, injection moulding, electrical resistance, screen-printing, thermoforming.

Conteúdo

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Apresentação da Organização.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.4	Estrutura da dissertação.....	3
2.	Estado de Arte	4
2.1	<i>In-Mold electronics</i> (IME)	4
2.2	Tecnologias de Impressão	7
1.	Impressão por Serigrafia.....	7
2.3	Materiais.....	10
1.	Tintas.....	10
2.	Substratos.....	11
2.4	Termoformação.....	12
2.5	Moldação por Injeção	13
2.6	Estudos desenvolvidos.....	17
3.	Materiais e Processamento	18
3.1	Metodologia de trabalho	18
3.2	Geometria e Materiais	19
3.3	Processamento	20
1.	Serigrafia	20
2.	Termoformação dos filmes impressos.....	25
3.	Simulação <i>Moldex 3D</i>	27
4.	Sobreinjeção	30
3.4	Tecnologias de caracterização	31
1.	Determinação da rugosidade	31
2.	Determinação da resistência elétrica.....	32
3.	Microscopia eletrônica de varrimento (SEM).....	33
4.	Brilho e cor	34
4.	Apresentação e Discussão dos Resultados.....	36
4.1	Seleção do Substrato.....	36

4.2	Serigrafia	38
4.3	Termoformação.....	42
4.4	Simulação realizada	46
1.	<i>Remelt</i> (refusão).....	49
2.	Contração	50
3.	Empeno	52
4.	Chupados	56
5.	Força de Fecho	57
6.	Tempo de enchimento.....	58
4.5	Sobreinjeção	59
4.6	Caracterização dos filmes e peças injetadas	65
1.	Morfologia	65
2.	Brilho e cor	69
5.	Considerações finais	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	75
6.	REFERÊNCIAS	76
7.	ANEXOS	80
	Anexo 1 – Fichas técnicas dos filmes	80
1.	Filme rugoso	80
2.	Filme liso	82
	Anexo 2 – Ficha técnica da tinta decorativa	84
	Anexo 3 – Ficha técnica da tinta condutora de prata.....	88
	Anexo 4 – Solvente da tinta condutora	90
	Anexo 5 – Características da máquina de injeção.....	92
	Anexo 6 – Cálculos da média e desvios padrão obtidos	93
	Anexo 7 - Dimensões das linhas do circuito	96
	Anexo 8 – Artigo publicado no âmbito do trabalho desenvolvido.....	97

Lista de Figuras

Figura 1. Exemplos de aplicação de FIM: a) In-mold labeling (IML), b) In-mold decoration (IMD). 5	5
Figura 2. Processo IME (adaptado de: [10]).	5
Figura 3. Exemplos de aplicação por IME: a) máquina de lavar, b) interior automóvel [13].	6
Figura 4. Cueva de las manos [19].	8
Figura 5. Processos de Serigrafia: (a) mesa plana; b) rotativa) [2].	9
Figura 6. Ciclo de Moldação por Injeção [33].	13
Figura 7. Erros associados ao empeno.	16
Figura 8. Metodologia de trabalho.	18
Figura 9. Geometria da peça em estudo: (a) parte superior; (b) parte inferior.	19
Figura 10. Dimensionamento da tela decorativa.	21
Figura 11. Dimensionamento da tela do circuito elétrico.	21
Figura 12. Telas de impressão: a) padrão da tinta decorativa, b) padrão da tinta condutora.	22
Figura 13. Etapas de impressão da tinta decorativa: 1) Tela decorativa; 2) Aplicação de tinta decorativa; 3) Filme de PC com padrão decorativo impresso.	23
Figura 14. Sobreposição de camadas de tinta: a) parte interna, b) parte visível.	23
Figura 15. Molde de termoformação.	25
Figura 16. Equipamento utilizado na termoformação.	26
Figura 17. Zonas de aquecimento controláveis de forma independente [53].	26
Figura 18. Suporte de fixação do filme.	27
Figura 19. Previsão de zonas do filme que poderão fundir ou causar o seu arraste durante a injeção (retirado de: [3]).	28
Figura 20. Modelo utilizado.	29
Figura 21. Molde de injeção: a) parte móvel; b) parte fixa.	31
Figura 22. Representação dos pontos de medição de resistência elétrica.	33
Figura 23. Resultados obtidos para os filmes liso e rugoso.	37
Figura 24. Resultados obtidos para as diluições (pontos representados na Figura 22).	39
Figura 25. Resultados médios obtidos para o plano experimental.	40
Figura 26. Molde de termoformação.	42
Figura 27. Filme termoformado com 0.5 bar, resistências a 100% e 32 s.	43
Figura 28. Fissura da tinta condutora.	44
Figura 29. Representação dos valores atribuídos às diferentes zonas de aquecimento.	44
Figura 30. Filme termoformado com tempo de exposição insuficiente (17 s).	45
Figura 31. Resultados obtidos após termoformação das amostras nas condições finais.	46
Figura 32. Tempo de enchimento.	47
Figura 33. Contração da peça com o inserto.	47
Figura 34. Contração da contra-peça.	48
Figura 35. Temperatura de arrefecimento.	48
Figura 36. Arrefecimento no interior da peça.	48
Figura 37. Núcleo no final do arrefecimento.	49
Figura 38. Resultados obtidos para o remelt.	50

Figura 39. Resultados Moldex 3D obtidos no âmbito da contração: RUN 's 1, 2 e 3.	51
Figura 40. Resultados Moldex 3D obtidos no âmbito da contração: RUN 4.....	52
Figura 41. Resultados obtidos para o empeno.....	53
Figura 42. Deformação para a RUN 1.	53
Figura 43. Deformação visível nas RUN's 2, 3 e 4.....	54
Figura 44. Tendência de empeno exagerado das peças moldadas.	55
Figura 45. Localização dos chupados: RUN 's 1 e 2.	56
Figura 46. Localização dos chupados: RUN 's 3 e 4.....	57
Figura 47. Curvas da força de fecho.	57
Figura 48. Resultados obtido para o tempo de enchimento.....	58
Figura 49. Diferenças de enchimento das peças moldadas.....	59
Figura 50. Incorreto posicionamento do filme: a) Dimensões de corte superiores; b) Filme na parte inferior da peça moldada.	59
Figura 51. Fratura da peça provocada pela remoção do canal de alimentação.....	60
Figura 52. Raiados na peça.	60
Figura 53. Amostras injetadas nas diferentes condições.	61
Figura 54. Componentes eletrônicos.	62
Figura 55. Demonstrador final.	64
Figura 56. Níveis de intensidade do interruptor desenvolvido: a) mínimo; b) máximo.	64
Figura 57. Resultado obtido em SEM para a amostra 1 (i.0%C).	65
Figura 58. Resultado obtido em SEM para a amostra 2 (i.10%C).	66
Figura 59. Resultado obtido em SEM para a amostra 3 (i.D+C).	67
Figura 60. Resultado obtido em SEM para a amostra 4 (t.D+C).	67
Figura 61. Resultado obtido em SEM para a amostra 5 (m. D+C): a) x2500; b) x5000.	68
Figura 62. Medições de Brilho.	70
Figura 63. Resultados obtidos nas medições de refletância.	71
Figura 64. Escala de cores.....	72
Figura 65. Cálculos efetuados para seleção do substrato a utilizar.....	94
Figura 66. Cálculos efetuados para determinação das melhores diluições.	94
Figura 67. Cálculos efetuados para o plano: experiências 1 e 2.....	94
Figura 68. Cálculos efetuados para plano: experiências 3 e 4.....	95
Figura 69. Cálculos efetuados após termoformação dos filmes.....	95
Figura 70. Cálculos efetuados para Brilho.	95
Figura 71. Comprimento das linhas do circuito.	96
Figura 72. Largura das duas linhas do circuito.	96

Lista de Tabelas

Tabela 1. Propriedades dos substratos flexíveis [17].....	12
Tabela 2. Plano experimental realizado.	24
Tabela 3. Primeira RUN realizada.	29
Tabela 4. Dados de entrada do processo.	30
Tabela 5. Condições utilizadas na caracterização morfológica.....	34
Tabela 6. Medições de rugosidade média.....	36
Tabela 7. Resultados dos desvios padrão determinados nos filmes liso e rugoso.....	37
Tabela 8. Experiências realizadas.....	39
Tabela 9. Resultados médios obtidos para o plano experimental.....	41
Tabela 10. Rugosidades para os filmes impressos.....	42
Tabela 12. Funcionalidade das peças injetadas.....	63
Tabela 13. Média das medições de brilho para as amostras.	69
Tabela 14. Rugosidades da superfície decorativa das amostras.	70
Tabela 15. Cálculo do desvio padrão associado às medições.....	71
Tabela 16. Redução percentual obtida.	72
Tabela 17. Coordenadas Cromáticas.....	72
Tabela 18. Síntese dos resultados.....	75

Siglas

3D – tridimensional

ABS – Acrilonitrilo- Butadieno- Estireno

DoE – Design of Experiments

FIM – Film Insert Molding

IMD – In-mold decoration

IML – In-mold labeling

IME – In-mold electronics

PIEP – Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros

PC – Policarbonato

PET – politereftalato de etileno

PEN – polinaftalato de etileno

PEEK – polieteretercetona

PI – poliimida

SPM- Sociedade Portuguesa dos Materiais

Tg – Temperatura de transição vítrea

Tf – Temperatura de fusão

UV – Ultravioleta

Au-Pd – Ouro-Paládio

LDS – Laser Direct Structuring

Símbolos

Ω – Ohm

μm – micrómetro

Ra – rugosidade média do filme

Rq – rugosidade quadrática do perfil

Rz – rugosidade média do pico ao vale

w – Largura da amostra

h – Espessura da amostra

l – Comprimento da amostra

ρ – Resistividade elétrica

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo do tempo, o planeta Terra tem vindo a sofrer várias alterações e problemas ambientais, fruto do avanço da ciência e da tecnologia, bem como do desenvolvimento de novos produtos e materiais.

Assim, é fundamental que os produtos sejam redesenhados e pensados, de modo a assentar no desenvolvimento da engenharia sustentável, com o objetivo de responder aos desafios sociais, económicos e ambientais.

Com a evolução e desenvolvimento de novos materiais, verifica-se a constante necessidade de adaptar as tecnologias e os métodos de processamento convencionais. Uma das tecnologias possíveis é o processo In-Mold Electronics (IME) que consiste na incorporação de circuitos elétricos em componentes plásticos, produzidos por impressão de tintas funcionais utilizando filmes como suporte, termoformação do filme e sobremoldação de polímero fundido sobre o filme termoformado. Esta tecnologia permite a obtenção de peças 3D funcionais, integradas com circuitos, sensores, antenas, etc. O processo é uma ramificação das tecnologias In-Mold Decoration (IMD) e In-mold labeling (IML), que consistem na integração de filmes impressos no processo de moldação por injeção, sendo obtida uma peça final única com diferentes cores, decorações e informações [1], [2].

No caso particular do IME, para além de poder incluir a componente decorativa, estes filmes podem ser impressos com tintas condutoras, produzindo-se circuitos, que, para além de garantirem a passagem de corrente elétrica, podem ser ensamblados com diferentes componentes eletrónicos. Desta forma, através da inclusão da eletrónica, diretamente no processo de injeção, é possível suprimir os botões convencionais, reduzindo o número de componentes, eliminando processos de ensamblagem e reduzindo o peso total do mesmo [3].

Assim, a presente dissertação, desenvolvida no PIEP – Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros, visa compreender de que forma as variáveis do processo influenciam e afetam a qualidade e reprodutibilidade final de um produto, a fim de substituir os botões tradicionais por uma tecnologia inovadora, na qual uma tinta condutora tenha capacidade de garantir a funcionalidade do produto em estudo.

1.2 Apresentação da Organização

Tal como referido a presente dissertação foi desenvolvida no PIEP– Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros, situado no Campus de Azurém. Esta é uma associação que, iniciou a sua atividade em 2001 e envolve atividades de Investigação, Desenvolvimento Tecnológico, Inovação e Engenharia.

A entidade referida desenvolve produtos e tecnologias para vários setores industriais, nomeadamente da mobilidade (automóvel, aeronáutica e ferroviária), ambiente e energia, embalagens, calçado, eletrónica, telecomunicações e construção. O PIEP atua ao nível da prestação de serviços nestas áreas, desde testes, ensaios e diagnósticos de falha, do desenvolvimento de novos materiais e produtos, das tecnologias de processamento e ferramentas produtivas, tendo por base os princípios de desenvolvimento sustentável [4]. Adicionalmente, contribui na formação de recursos humanos com capacidade e experiência em inovação industrial na área da engenharia de polímeros.

1.3 Objetivos

O principal objetivo para a realização da dissertação consistiu no desenvolvimento de um interruptor de luz, sem botões mecânicos, através do processo IME, avaliando a funcionalidade do mesmo, de modo a proceder à substituição de um modelo já existente por um modelo inteligente, no qual superfícies sensorizadas possibilitam substituir botões físicos tradicionais.

Para isso, analisou-se a influência das condições durante todo o processo produtivo, quer as condições de processo usadas na impressão por serigrafia, como na termoformação e na sobreinjeção, de modo a avaliar a influência que cada etapa tem na concretização de um produto funcional.

Deste modo, proceder à caracterização dos filmes impressos e termoformados etapa após etapa, de forma a analisar a compatibilidade e, no caso do filme funcional, a capacidade de conduzir corrente elétrica é essencial. Assim, neste trabalho procedeu-se a análise morfológica e dimensional, de modo a verificar a existência de microfissuras na tinta e medição da resistência elétrica, para avaliar se existe a perda das propriedades, de forma a assegurar um bom acabamento e validação funcional do componente. Através da avaliação da resistência foi possível analisar o efeito da variação dos parâmetros de injeção e termoformação, no filme e nas condições da tinta condutora.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos essenciais sendo eles: introdução, estado de arte, materiais e processamento, apresentação e discussão dos resultados e por fim, conclusões. Acrescendo com as referências e anexos.

No capítulo 1, designado por Introdução é feita uma breve descrição e apresentação dos objetivos definidos para o projeto, bem como o enquadramento do mesmo e o seu desenrolar.

O Estado de Arte (capítulo 2) traça uma introdução teórica dos conceitos-chave abordados ao longo da dissertação, sobretudo do processo IME e as suas etapas.

Já no capítulo 3, designado por Materiais e Processamento, é apresentado o caso de estudo. Aqui, serão descritos os métodos utilizados na elaboração do plano de trabalho, todos os processos produtivos e ensaios realizados para produzir a peça a ser desenvolvida, como também os materiais a serem usados e as técnicas de caracterização utilizadas.

O capítulo “Apresentação e Discussão dos Resultados”, apresenta os resultados de todos os testes e ensaios efetuados, através de uma apreciação e comparação dos mesmos.

Para finalizar, no capítulo 5 - “Considerações Finais” são apresentadas as principais conclusões do trabalho final, bem como sugestões futuras.

2. Estado de Arte

2.1 *In-Mold electronics (IME)*

A tecnologia está em constante evolução e nesse sentido a existência de novos materiais tem sido o motor para a investigação e desenvolvimento.

Segundo a Sociedade Portuguesa dos Materiais (SPM), o desenvolvimento de materiais avançados permitirá desenvolver uma economia mais verde, baseada em matérias-primas mais limpas, processos de produção mais sustentáveis e produtos finais recicláveis [5]. Deste modo, vários setores industriais, focam-se na procura por materiais com propriedades e funcionalidades cada vez mais avançadas.

Na indústria automóvel, destaca-se a procura por automóveis cada vez mais leves, sustentáveis, personalizados e adequados às preferências estéticas dos consumidores. Esta procura tem resultado no desenvolvimento do design e produção de peças poliméricas com altos requisitos decorativos [3] e funcionais. Mas não é só no setor automóvel que isto se verifica, esta tecnologia está, também, a ser aplicada de uma forma geral nos recentes dispositivos eletrónicos, como por exemplo, eletrodomésticos, dispositivos médicos, etc., mostrando que, a sociedade procura, de certa forma, ir ao encontro do paradigma, sendo cada vez mais exigente.

Para isso, e aliado aos desafios da sustentabilidade, surgiu a tecnologia FIM (*Film Insert Molding*) que possibilita a produção de peças plásticas numa única etapa, através da integração de uma superfície decorativa e/ou funcional num componente plástico. Esta tecnologia utiliza um filme pré-impreso, que posteriormente pode ser termoformado dependendo da configuração da peça. Pré conformado o filme no formato pretendido, este é sobremoldado, ou seja, é colocado no molde de injeção, ficando incorporado no produto final [6]. A tecnologia FIM permite eliminar etapas de acabamento secundárias, nomeadamente pintura ou revestimento, essenciais para decorar e/ou funcionalizar o componente plástico. No âmbito da decoração de peças são utilizadas tecnologias que têm vindo a ser desenvolvidas, designadas: *In-Mold decoration (IMD)* ou *In-Mold labeling (IML)*. Ambas as tecnologias oferecerem uma vasta gama de cores, tamanhos, imagens e texturas [7].

Atualmente, estas duas tecnologias são distinguidas pelo tipo de produtos impressos e os materiais utilizados. Apesar das semelhanças, têm como destino aplicações diferentes. Enquanto o processo IML surgiu em alternativa à colocação de etiquetas/ rótulos secundários no produto pós processo, sendo maioritariamente utilizado em embalagens descartáveis, a tecnologia IMD, que pode ter finalidade estética, protetora ou funcional, enquadra-se para produtos com vida útil

O processo de IME, para além de muito versátil, pode abranger vários setores industriais, nomeadamente, automóvel, aeroespacial e a vertente eletrónica.

No setor automóvel, o IME é usado para fabricar peças de interiores, como instrumentos e painéis de controlo de portas e de vidros acionados por sensores de toque. Já nas indústrias aeroespacial e eletrónica, onde a presença de botões e fios é significativa, o IME promove, para além da versatilidade de design e a possibilidade de diferentes modelos disponíveis, a diminuição da complexidade dos mesmos e, conseqüentemente, o desperdício causado, tornando-os parte integrante da estrutura desenvolvida. Desta forma, a inexistência de fios e botões, torna as peças produzidas com tempo de vida útil maior uma vez que reduz o potencial de partir [11], [12].

Em suma, a tecnologia IME veio possibilitar reduzir o nível de complexidade dos componentes e a sua espessura, tornando-os 70% mais leves e 30% mais baratos que os convencionais [10], [11].

Na Figura 3 são apresentados exemplos de aplicação de produtos obtidos por IME.

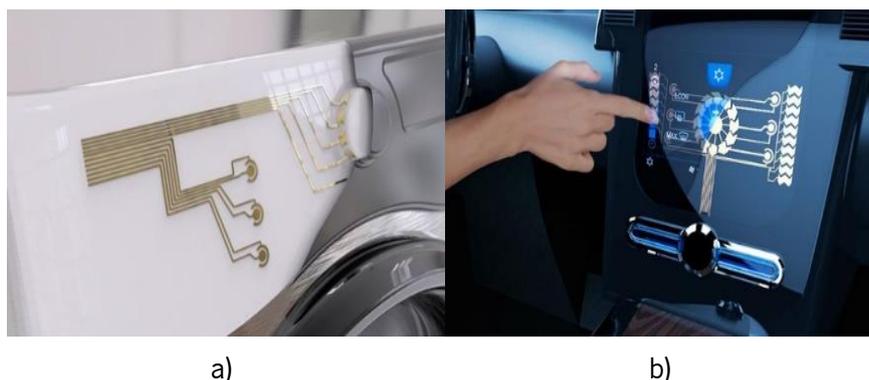


Figura 3. Exemplos de aplicação por IME: a) máquina de lavar, b) interior automóvel [13].

Ghaffarzadeh [14], diretor de investigação da *IDTechEx*, descreve que o primeiro produto desenvolvido utilizando este tipo de tecnologia, surgiu em 2012 e correspondia a um interruptor suspenso da marca Ford. Apesar do lançamento ter sido um sucesso, este componente foi retirado do mercado devido ao seu mau funcionamento. A falha levou a indústria a repensar o uso desta tecnologia nos seus meios de fabrico, no entanto, o interesse tecnológico continuou a manifestar-se e ao longo do tempo foram desenvolvidos vários protótipos nas mais diversas áreas.

Exemplos de desenvolvimentos no processo IME, são descritos por *Yuan et al.* 2021 e por *Wimmer et al.* 2016 [15], [16]. No primeiro caso [15], através da fabricação de um painel de controlo foi possível estudar que um arrefecimento não uniforme resultou no empeno da peça. Já *Wimmer et al.* 2016 [16], faz referência ao projeto FOLTRONIC onde se combinou uma camada

decorativa de tinta com uma funcional, de modo a criar um sistema híbrido, cuja funcionalidade atribuída consistia em sensores de toque. Para o estudo foram utilizados vários materiais, concluindo-se que as estruturas impressas devem ser adaptadas ao processo de termoformação, de forma que o valor da resistência elétrica seja ideal.

Tal como referido, para iniciar um processo de IME, destaca-se a importância de se recorrer a uma técnica de impressão capaz de transmitir com ótima resolução, a imagem para o substrato. Assim, no ponto seguinte serão mencionadas as tecnologias de impressão existentes para produzir um componente funcional.

2.2 Tecnologias de Impressão

Para a produção de um componente funcional qualificado, é necessário selecionar a técnica de impressão mais adequada. Esta tecnologia depende da aplicação de destino do produto e determina a resolução da impressão.

Existem dois tipos de impressões: por contacto, onde as tintas são colocadas em contacto físico com o substrato, e sem contacto, onde a solução é pulverizada através de aberturas. Ambas as tecnologias podem combinar o processo roll-to-roll, R2R (impressão rolo a rolo), que consiste num processo contínuo, de alto rendimento, através de uma linha de produção rápida e eficiente. As tecnologias de impressão sem contacto envolvem, por exemplo impressão a jato de tinta. Enquanto as tecnologias por contacto podem englobar, por exemplo: rotogravura, flexografia e serigrafia.

No caso concreto de impressão por serigrafia, esta é a tecnologia de impressão mais usual e mais avançada para circuitos eletrónicos impressos. Para além disso, este tipo de impressão é mais rápido, mais versátil e possui um baixo custo de produção e de investimento. Desse modo, esta tecnologia encontra-se descrita detalhadamente a seguir, uma vez que, será o cerne desta dissertação [1], [17].

1. Impressão por Serigrafia

Desde a antiguidade, que egípcios e gregos recorriam ao princípio da serigrafia para decorar os túmulos e fazer mosaicos através das mãos sobre as paredes. No *Cueva de las manos*, um museu arqueológico situado na Argentina, é possível observar como as mãos eram utilizadas como molde (Figura 4). Assim, apesar de ainda ser muito rudimentar, destaca-se a importância desta técnica para o desenvolvimento de impressões desde muito cedo [18], [19].



Figura 4. *Cueva de las manos* [19].

As primeiras formas de impressão por serigrafia foram desenvolvidas por chineses e japoneses através de folhas e cascas. Numa primeira abordagem, esta técnica consistia em tecer cabelo humano numa moldura de madeira e transferir os padrões para um tecido. Mais tarde, com a evolução do processo, optou-se por substituir os fios de cabelo por seda entre dois pedaços de papel resistente com algumas aberturas. A tinta passava nessas aberturas sendo transferida para o substrato [18].

No final do século XIX, este processo surgiu na França como método para estampar tecidos, mas somente no século XX ganhou maior relevância devido ao desenvolvimento dos *stencil's* que permitiram melhor controlo e qualidade de impressão. Aqui surgiram as primeiras patentes desta técnica sendo referentes ao ano de 1907, em Inglaterra e a 1915 nos Estados Unidos.

Inicialmente, a técnica de impressão por serigrafia era utilizada para decorar papéis de parede e para a indústria têxtil na estampagem de tecidos. Contudo, a segunda guerra mundial permitiu alastrar esta tecnologia, uma vez que os militares desenvolveram os primeiros circuitos, sendo aplicada pela primeira vez na indústria eletrónica, através dos mesmos princípios. Já em 1960, a serigrafia tornou-se a tecnologia dominante para produção de placas de circuito impresso [20], [21].

Para executar o processo de serigrafia, é necessário um suporte de imagem, ou seja, uma tela. Esta é uma malha porosa esticada e fixada a uma moldura que, com o auxílio de uma raquetele denominada de *squeegee*, produz depósitos de tinta no substrato [22].

A raquetele é responsável por arrastar a tinta na parte superior da tela e esta é transferida para o substrato por ação da pressão exercida. Os valores de pressão e velocidade exercidas são atribuídos no caso de se tratar de um processo automático e devem assumir valores mínimos, de modo que, quer a malha, quer a espessura pretendida, não sofram alterações. Todavia, também pode não ser possível controlar quando se tratar de impressões manuais, onde o operador é o principal responsável por exercer a pressão. O *squeegee*, é geralmente constituído por dois

elementos, uma borracha ou plástico na parte inferior que arrasta a tinta e uma pega metálica que permite agarrá-lo quer seja um processo manual ou automático. Este componente requer algumas exigências, nomeadamente possuir largura inferior à tela de modo a não a danificar pelas pressões exercidas, e conseqüentemente manter a malha perfeitamente esticada.

Já a malha é composta por materiais metálicos ou poliméricos e permite definir a espessura da tinta que é transmitida. A seleção do material da composição malha, irá determinar a qualidade da impressão, através da tinta que passa e respetiva espessura da camada.

Relativamente à moldura, que pode ser em madeira ou metal, esta é responsável por manter a malha perfeitamente esticada, para a impressão ter a qualidade desejada. Ainda assim, a mais utilizada é a de metal devido ao contacto direto com produtos químicos que a podem danificar.

A impressão necessita ainda de uma imagem presente na tela. Esta é um elemento fundamental para que, neste caso, o circuito seja transferido ao substrato. A formação da imagem depende dos materiais a serem usados e pode variar entre uso de fita cola ou vinil para cobrir áreas específicas da tela, pintar o padrão com bloqueadores de tinta como a cola ou verniz, ou através de uma solução fotossensível de forma semelhante à revelação de uma fotografia [23].

Por fim, a última ferramenta para efetuar um processo de serigrafia é a mesa de impressão, que apesar de ter pouca influência, pode ser bastante versátil. Existem vários formatos de mesa (Figura 5), nomeadamente em mesa plana (ou *flatbed*) e rotativa (R2R).

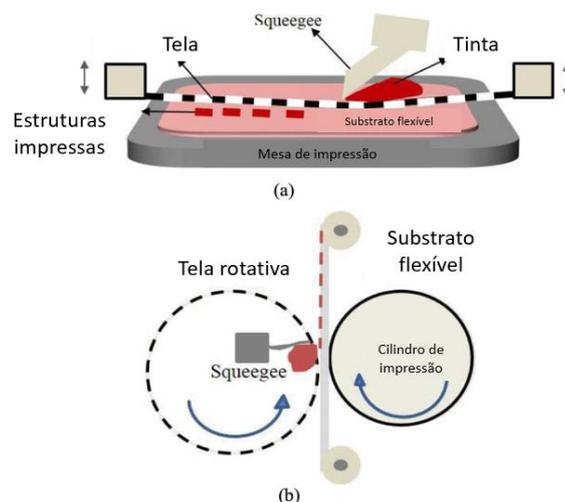


Figura 5. Processos de Serigrafia: (a) mesa plana; b) rotativa) [2].

No primeiro caso (*flatbed*), o método mais comum, é utilizada uma tela plana para substratos cuja configuração é igualmente plana, seja ele rígido ou flexível. Contudo, estas podem ser substituídas por rotativas, para casos em que o formato do substrato é curvo ou flexível. Aqui,

existe um rolo, onde o *squeegee* e a tinta são introduzidos no seu interior. A raquetele fica fixa e arrasta a tinta pelo movimento rotativo do rolo, ou seja, à medida que a tela e o substrato rodam, a tinta é continuamente arrastada fazendo uma impressão por cada rotação [1], [2], [17].

A impressão serigráfica, para além de requerer as ferramentas já referenciadas, exige que sejam selecionados os materiais envolventes (tinta e substrato), pelo que no capítulo seguinte serão abordados os mais utilizados e as suas principais características.

2.3 Materiais

1. Tintas

Conicionados pela constante evolução humana, o uso de diferentes cores e da pintura, foram sofrendo alterações. Assim, o uso de tintas, cujo início remonta para a era pré-histórica como complemento à comunicação entre seres humanos, sofreu uma evolução notória. Além disso, também os materiais constituintes destes pigmentos evoluíram, passando de misturas de carvão, gorduras e sangue usadas nos primórdios, até às resinas mais desenvolvidas.

As tintas podem-se classificar como decorativas/gráficas ou funcionais. As tintas gráficas podem assumir várias tonalidades desde vermelho, cinza, branco, entre outras e permitem decorar um componente através de transferência da tinta para determinado substrato. Para além destas, existem ainda tintas com capacidade de atribuir uma funcionalidade, nomeadamente condutividade elétrica, isto é, tintas funcionais.

Com o desenvolvimento de novos materiais e o aparecimento de tintas flexíveis capazes de suportar altas temperaturas e estiramento, foi então possível integrá-las em folhas poliméricas. O fabricante alemão *Pröell* em cooperação com a *Bayer Material Science AG*, desenvolveu tintas para o processo de IMD. O objetivo principal passou pela criação de uma tinta eficiente para a impressão de folhas de policarbonato (PC), capaz de suportar as condições do processo IME, devido a possuírem baixa degradação a altas temperaturas [24], [25].

A tecnologia IME requer tintas funcionais, com propriedades reológicas específicas para garantirem adequada impressão em substratos, dependendo do tipo de aplicação. Estas tintas podem ser condutoras, semicondutoras ou dielétricas, sendo que as primeiras são normalmente utilizadas para desenvolvimento de circuitos impressos e, por isso, serão o foco deste projeto [26].

A composição das tintas passa pela incorporação de polímeros e aditivos responsáveis por manter as propriedades mecânicas da tinta e a sua adesão ao substrato. Incluem ainda, o pigmento que atribui características à tinta, podendo ser funcional ou apenas decorativo (cor). Nas

tintas funcionais, o pigmento é substituído por um componente condutor que atribui condutividade à tinta. Geralmente as tintas condutoras são compostas por partículas metálicas sólidas altamente condutoras que podem ser de micro ou nano escala, como, por exemplo, prata, ouro, níquel, cobre ou, em alternativa, à base de cargas não metálicas, como por exemplo, carbono.

Além dos materiais já referidos, as soluções de tinta são preparadas com ou sem recurso a solvente (aquoso ou orgânico), que serve como elemento de transporte, dissolvendo os materiais e fornecendo a viscosidade adequada para a impressão [27].

De todos os metais utilizados, é notório que a indústria procura maioritariamente soluções à base de prata, devido ao seu desempenho físico e elétrico em substratos poliméricos, apresentando uma condutividade elétrica superior comparativamente a outros metais [28].

Após a impressão, a tinta necessita de ser curada. A cura corresponde ao processo de secagem e fixação da tinta ao filme polimérico. Durante este processo, o solvente presente na composição da tinta começa a evaporar aquando da colocação na superfície polimérica. A evaporação de solvente desencadeia o endurecimento da película de tinta, fixando-se no substrato e, conseqüentemente, promovendo a aderência dos materiais [29]. Um processo de cura não adequado permite correr o risco de a tinta não possuir flexibilidade suficiente para sofrer deformação na termoformação ou suportar elevadas pressões características do processo de injeção. Assim, é necessário que os materiais respeitem alguns princípios, de forma a garantir uma boa aderência. Uma aderência deficiente pode ter várias causas, nomeadamente, um processo de cura não eficiente, demasiada tinta depositada resultando em pontos críticos, ou seleção incorreta do substrato, ou seja, incompatibilidade de materiais [22].

2. Substratos

Os substratos, por sua vez, correspondem ao material de suporte que receberá a impressão. Existe uma enorme variedade de substratos viáveis na indústria, que dependem da finalidade para a qual o produto é projetado. Os substratos podem ser classificados como materiais rígidos, como vidro e outros materiais cerâmicos, ou flexíveis como o papel e os filmes poliméricos. Contudo, considerando a aplicação pretendida para este projeto, ou seja, impressão de circuito elétrico, o substrato utilizado deverá ser flexível, optando-se pelos filmes poliméricos, onde a aderência é um fator essencial.

Alguns exemplos de materiais poliméricos descritos como flexíveis, sejam eles de natureza amorfa ou semi-cristalina, podem incluir: politereftalato de etileno (PET), polinaftalato de etileno (PEN), polieteretercetona (PEEK), poliimida (PI), policarbonato (PC), entre outros [1], [17].

Os substratos flexíveis devem, nomeadamente, ter estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica e excelente resistência a solventes. Desse modo, as principais características dos substratos referidos anteriormente e mais comuns em IME (PET, PEN e PC), encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos substratos flexíveis [17].

Substrato	PET	PC	PEN
Tg (°C)	70–110	145	120 –155
Tf (°C)	115–258	115–160	269
Coefficiente de expansão térmica (ppm/ °C)	15–33	75	20
Densidade(g/cm³)	1.39	1.20–1.22	1.36
Resistência a solventes	Bom	Mau	Bom
Estabilidade dimensional	Bom	Razoável	Bom

2.4 Termoformação

Após o circuito elétrico estar impresso sobre o substrato, e quando a geometria do produto final o exige, é possível passar para a segunda etapa do processo IME, a termoformação. Esta consiste na conformação de um filme plano numa peça tridimensional, recorrendo a um molde de termoformação. Trata-se de um processo simples e versátil, uma vez que pode utilizar vários tipos de materiais. Além disso, possui baixo custo de produção e envolve tempos de produção curtos [30].

O ciclo de produção por termoformação é sequencial e inclui três etapas essenciais, sendo elas: aquecimento, conformação e arrefecimento. Neste processo, a folha/filme impresso é colocado no molde e aquecido de modo a sofrer estiramento. O aquecimento ocorre até um pouco acima da temperatura de transição vítrea (Tg) para os materiais amorfos, e entre a Tg e a temperatura de fusão (Tf) para materiais semi-cristalinos. As temperaturas usadas ditas “ideais”, designam-se de temperaturas de conformação.

A etapa de aquecimento é a mais morosa e a que requer mais gastos a nível de energia. Esta pode ocorrer por condução, ou seja, por contacto com uma superfície aquecida, ou então por convecção ou radiação, dependendo da espessura do filme. É ainda possível aplicar um aquecimento bifacial, resultando em peças com maior qualidade, num menor tempo de ciclo e com diferença de temperaturas mais uniforme.

Posteriormente, decorre a etapa crítica do processo, a conformação, onde o filme é forçado contra as paredes do molde, ou seja, sofre estiramento. A deformação do filme pode ocorrer de várias formas, nomeadamente, através de vácuo ou sob pressão. Para o primeiro caso, a

deformação é provocada pela diferença de pressões entre o interior do molde e o ambiente, e na segunda, é aplicado ar sob pressão numa das superfícies, criando uma diferença de pressões entre as duas faces [31]. As condições de pressão, temperatura e vácuo são determinadas dependendo do material que será utilizado.

No processo IME, o filme termoformado obtém a forma da cavidade do molde de injeção para que posteriormente possa ser inserido. Após adquirir a forma do respetivo molde, o filme perde calor rapidamente até o produto adquirir estabilidade dimensional.

Terminada esta etapa, a peça é extraída do molde e, por fim, é necessário proceder a operações de acabamento, de modo a eliminar o restante filme não termoformado.

Os parâmetros do processo podem afetar quer a deformação total, quer a qualidade final do produto. Fatores como a temperatura de conformação, o tipo de material (amorfo ou semi-cristalino), o formato do molde e pressão do ar exercida são fatores com influência. Desse modo, é primordial otimizar esta etapa do processo [32].

2.5 Moldação por Injeção

A última etapa do processo IME, moldação por injeção, consiste na transformação de material plástico em produtos acabados. A grande vantagem associada a este processo é a fabricação em massa nos mais diversos setores industriais.

No ciclo de moldação (Figura 6), o material sofre uma sequência de etapas, abrangendo: fecho, injeção, pressurização, arrefecimento, abertura e ejeção.

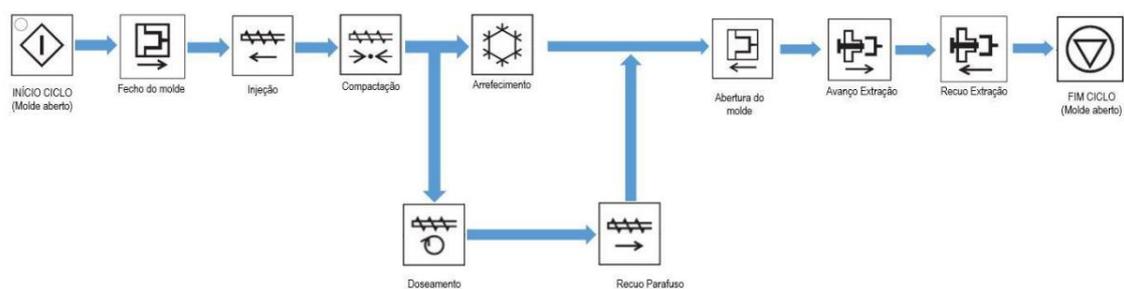


Figura 6. Ciclo de Moldação por Injeção [33].

Primeiramente, procede-se ao fecho do molde, etapa inicial do ciclo. De seguida, o material que está geralmente sob a forma de grânulos, é introduzido numa tremonha da máquina de injeção, e transportado através de um parafuso rotativo que possui resistências para fusão e é empurrado pela rotação, obrigando o material a entrar no molde. Ou seja, o material é aquecido a fim de amolecer (ou plasticizar) e forçado, sob pressão, a entrar para a cavidade [33], [34].

Após o enchimento do molde, é necessário pressurizar o fundido de modo a compensar a contração do material por arrefecimento e refluxo do mesmo (compactação). Em seguida, ocorre simultaneamente o arrefecimento e doseamento do material injetado. Esta etapa termina assim que o jito esteja solidificado, seguindo com o recuo do parafuso por efeito da pressão. A etapa de arrefecimento termina quando a peça atinge rigidez necessária para desmoldação e o processo conclui-se com a abertura e ejeção da moldação [33] – [35].

Particularmente no IME, a sobreinjeção tem uma variação do método convencional, o que difere é que o material polimérico é injetado sobre um filme plástico. Isto é o filme com padrões impressos é posicionado dentro do molde de injeção antes do fecho. Geralmente, o filme é posicionado de modo que a superfície impressa fique voltada para o fluxo do polímero fundido, isto é, na superfície da peça moldada. Já no molde, o material fundido preenche a cavidade que contem o filme impresso, fazendo com que este perca rigidez devido à transferência de calor. Posteriormente, arrefecem adquirindo o formato da peça final.

Na injeção existe ainda um período desde o momento em que a primeira peça está pronta a ser removida do molde e o início de um novo ciclo, que se designa tempo morto. Normalmente, este tempo é instantâneo, no entanto, pode variar caso a peça necessite de ser removida manualmente, ou pela necessidade de colocação de insertos, como é o caso dos filmes funcionais [36], [37].

Todas as etapas já referidas desempenham um papel preponderante na qualidade do processo e, conseqüentemente, na qualidade do produto final. Assim, é fundamental proceder à otimização desta etapa do processo IME, uma vez que, a má definição destas variáveis pode provocar desprendimento dos componentes e formar bolhas de ar na interface polímero- substrato, afetando assim a aderência entre componentes [1]. Para isso, o processo de moldação por injeção possui um conjunto de parâmetros que afetam diretamente o resultado da peça final. Estes parâmetros podem ser classificados do seguinte modo: variáveis operatórias, quando o operador pode atuar com alterações, parâmetros do processo associados à geometria e construção dos equipamentos, molde e peça, e por último, as propriedades do material.

É expectável que as variáveis operatórias sejam as que provocam mais origem de defeitos, uma vez que, tanto nos parâmetros do processo como na escolha do material se tenha efetuado uma seleção adequada durante a fase de desenvolvimento e concessão do projeto.

Exemplos de variáveis operatórias abrangem, por exemplo:

- **Temperatura de injeção:** A temperatura de injeção varia de acordo com o material, geometria da peça e características do molde. A temperatura deve ser suficiente para garantir a fluidez do material, sem provocar degradação térmica.
- **Temperatura do molde:** Os canais de aquecimento devem ter uma distribuição uniforme para a peça assumir estabilidade dimensional. A temperatura do molde afeta diretamente a etapa de arrefecimento, e este é tanto menor, quanto menor a temperatura.
- **Velocidade de injeção:** Corresponde à velocidade efetuada pelo avanço do fuso, ou seja, a velocidade de enchimento da cavidade. A velocidade de injeção será tanto maior, quanto menor for o tempo associado. Assim, é preferível uma velocidade de injeção maior evitando a solidificação da peça antes de terminar o processamento, evitando possíveis defeitos.
- **Pressão de injeção:** Esta pressão é responsável por preencher a cavidade do molde com material, e a sua intensidade depende do tipo de material e das suas características, bem como das condições de injeção (temperaturas e velocidade de injeção).
- **Pressurização:** A pressurização ou contrapressão tem como função manter a dosagem constante e, caracteriza-se pelo aumento da pressão de forma a compensar a contração da peça durante a solidificação.
- **Tempo de arrefecimento:** tempo definido para a solidificação da peça, de forma a ter estabilidade dimensional suficiente para suportar os esforços dos extratores.
- **Tempo de ciclo:** Refere-se ao tempo total decorrente na moldação. É calculado através do somatório do tempo de injeção, tempo de arrefecimento, e tempos de abertura, fecho e ejeção. O tempo de injeção e arrefecimento estão relacionados com o enchimento completo do molde e arrefecimento da peça, respetivamente [34].

Em IME, zonas com pressões e temperaturas elevadas são propensas a arrastamento de tinta e alterações de cor. Para evitar esses problemas, a empresa HP [38] apresenta um guia com soluções nesse âmbito, nas quais inclui: diminuição da temperatura de injeção e aumento do tempo de ciclo, bem como, o posicionamento do ataque de forma a não sobrepor a imagem impressa e, na impossibilidade, diminuição do número de camadas de tinta.

Chen et al. 2010 [39] estudou o efeito do filme de PC na temperatura da superfície do molde durante a sobreinjeção, concluindo que a transferência de calor é afetada pela incorporação do filme na cavidade e pela sua espessura. Através deste estudo, verificou-se a existência de uma diferença de temperatura no molde onde o filme estava inserido. Assim, a temperatura da superfície do molde é uma variável crítica do processo já que o filme atua como um isolante.

O aparecimento de defeitos é bastante comum na moldação por injeção aquando de um processo não estabilizado. Exemplos comuns são a presença de chupados, empeno e contração.

Os chupados são característicos na superfície das peças onde ocorre variações na espessura da parede. Estes são pequenas crateras/depressões desenvolvidas em áreas de espessura maior cuja principal razão está ligada à contração, já que as zonas de maior espessura necessitam de mais tempo para arrefecer do que as restantes [40], [41].

A contração e o empeno são defeitos correlacionados, na qual o primeiro se refere a uma deformação dimensional no sentido do encolhimento após arrefecimento. Ou seja, após arrefecer a moldação não mantém o formato dimensional original, divergindo da cavidade que foi preenchida. Já o empeno é referente ao facto da peça se tornar disforme de zona para zona, podendo tornar o produto não funcional. As razões para o empeno são várias, mas geralmente estão associadas ao arrefecimento não uniforme do material, provocando tensões internas. Os erros mais comuns estão subdivididos conforme a Figura 7 [41] – [43].

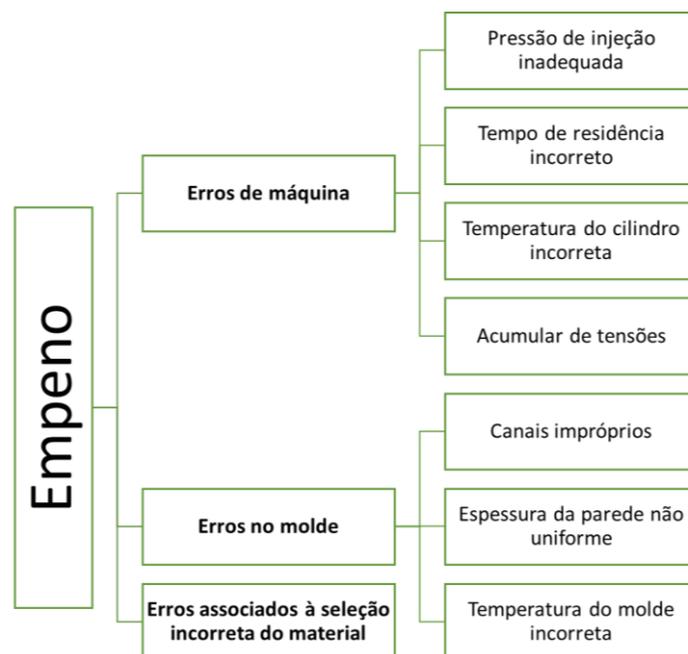


Figura 7. Erros associados ao empeno.

2.6 Estudos desenvolvidos

Vários estudos têm sido realizados ao longo do tempo no âmbito da integração de filmes no processo de moldação por injeção. Maior parte das investigações, descrevem os desafios da utilização do processo, abrangendo deslocação do filme e remoção de tinta na superfície impressa, bem como o arrefecimento assimétrico que pode dar origem ao empeno, afetando assim a qualidade final das peças [44] – [46].

Wong et al. 1997 [45] focaram o seu estudo na limitada janela de processamento utilizando filmes de PET. O seu trabalho permitiu realçar a dificuldade no desenvolvimento de superfícies decoradas, devido à temperatura associada ao processo e à curvatura do produto [45].

Por sua vez, *Chen et al. 2013* [44] refere que o material fundido, ao ser injetado, pode propiciar a união parcial ao filme, e conseqüentemente, promover a adesão dos materiais após a solidificação. Por outro lado, acrescenta que a transferência de calor transmitida ao filme permite a sua segunda fusão comprometendo a integridade dos padrões impressos através da alteração superficial (cria rugas), consumando em peças NOK (não conformes) [47].

Mais recentemente *Juntunen et al 2017* [48] desenvolveram um demonstrador de uma pulseira de luz LED. Este estudo permitiu destacar a viabilidade da tecnologia IME com um ótimo rendimento, recorrendo a uma linha contínua (R2R).

Aliado a isso, estudos numéricos e experimentais relacionados à termoformação de filmes têm sido descritos na literatura [49]–[52]. No entanto, no que toca à integração de circuitos impressos *Gong et al. 2020* [53] descrevem um estudo mais relevante no qual foram avaliados o efeito das condições de termoformação na variação da resistência e deformação do filme. Durante o processo de termoformação, o circuito impresso sofre deformação que resulta na variação da resistência elétrica do circuito, por isso, o processo de termoformação é determinante para o desempenho final do produto. Para além disso, ainda é referenciado o efeito dos parâmetros geométricos do molde na mudança de resistência elétrica, tendo mais influência do que as condições de processamento. *Woyan et al. 2016* [54] estudaram os parâmetros do processo na ligação de peças moldadas por IMD. O impacto de cada fator foi avaliado quantitativamente, através de um DoE (*Design of Experiencies*), no qual todas as condições avaliadas apresentaram uma influência significativa à exceção da pressão de compactação.

Assim, os estudos referidos salientam a tendência tecnológica e comercial para o uso de métodos de produção não convencionais e hibridização tecnológica, realçando o quão desafiador pode ser.

3. Materiais e Processamento

Neste capítulo serão descritas as tarefas a realizar ao longo da dissertação, será feita a definição inicial do produto, como a seleção de materiais, variáveis a estudar e os métodos de processamento usados.

3.1 Metodologia de trabalho

A sequência de passos efetuados durante todo o desenvolvimento do interruptor em estudo, e descritos detalhadamente ao longo do capítulo 3, encontra-se sumariada na figura seguinte:

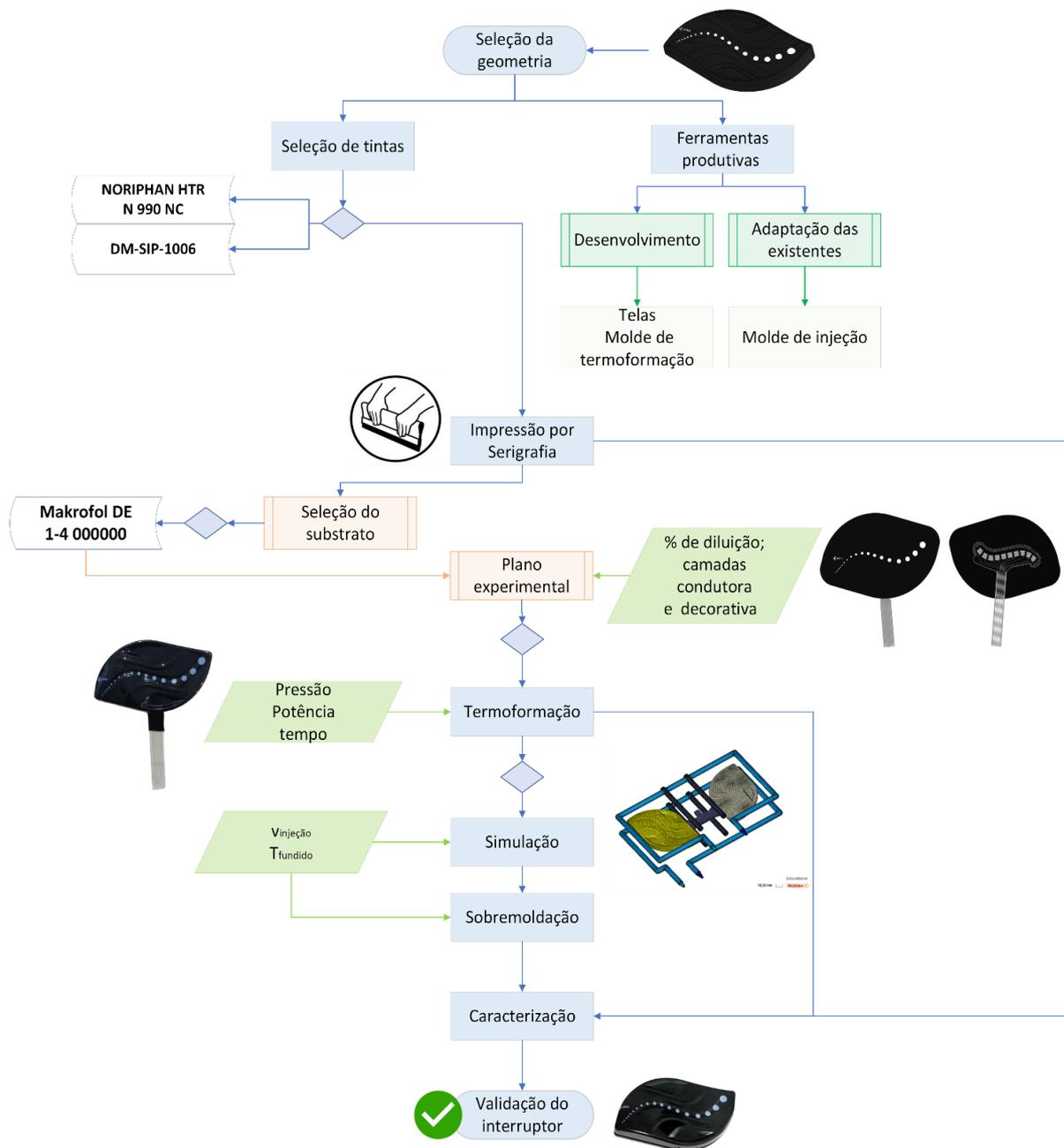


Figura 8. Metodologia de trabalho.

3.2 Geometria e Materiais

Como referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação consistiu no desenvolvimento de um interruptor através do processo IME, de modo a proceder à substituição de um modelo já existente, por um modelo inteligente, capacitivo e funcional. Assim, estas estruturas devem produzir características funcionais (elétricas) ao toque. O interruptor selecionado, representado na Figura 8, é composto por duas partes: uma parte superior na qual é colocado um inserto de filme impresso, e por uma parte inferior que encaixa na anteriormente referida. Ambas as peças são produzidas no mesmo molde cujas especificações se encontram de forma detalhada no capítulo 3.3.4. O componente selecionado foi desenvolvido para Estruturação Direta a Laser (LDS) que apresenta algumas limitações, nomeadamente baixa resolução, demonstrando, o presente estudo, interesse no que toca à substituição tecnológica.

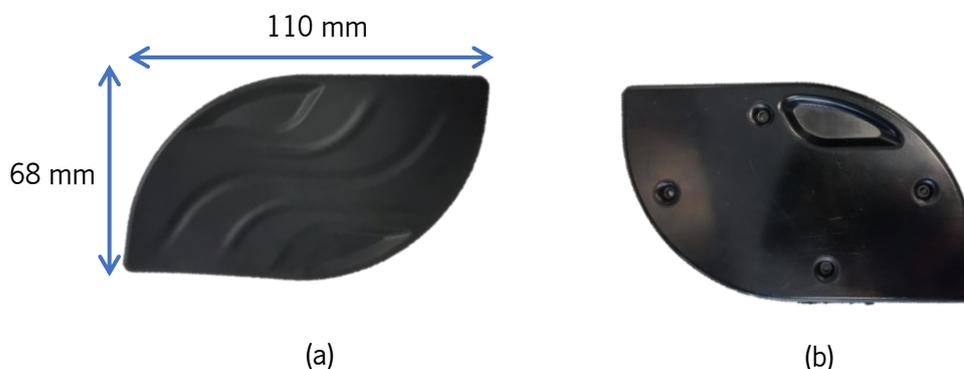


Figura 9. Geometria da peça em estudo: (a) parte superior; (b) parte inferior.

De modo a iniciar a produção do interruptor, é necessário efetuar a seleção do substrato e tintas a utilizar. Estes materiais requerem compatibilidade e por isso, é essencial garantir aderência entre os mesmos. Para além disso, esta seleção é bastante criteriosa uma vez que os materiais não devem perder propriedades após os processos de termoformação e injeção, de forma a não comprometer a funcionalidade do produto final.

Os filmes de PET, PEN e PC são os substratos flexíveis mais utilizados na tecnologia de IME. Assim, optou-se por selecionar o substrato de PC, resultado da elevada temperatura de transição vítrea capaz de suportar as altas temperaturas características do processo de termoformação e injeção, bem como a capacidade de ser submetido a estufas térmicas durante o tempo de secagem da tinta. Deste modo evitam-se anomalias e defeitos no processamento do material, como por exemplo, a existência de bolhas de ar ou até a degradação do mesmo.

Por uma questão de disponibilidade de matéria-prima, definiu-se efetuar testes a dois tipos de substratos em PC presentes no PIEP, Makrofol DE 1-4 000000 e Lexan 8B35, ambos com 250 µm de espessura. As fichas técnicas, de ambos os filmes, podem ser consultadas no Anexo 1. A grande diferença entre os dois substratos incide essencialmente na rugosidade superficial. Assim, numa primeira análise, foram feitas impressões em ambos os substratos de modo a perceber de que forma a condução de corrente elétrica poderia sofrer alterações, uma vez que, garantir a funcionalidade do produto era o objetivo central do projeto.

Para selecionar o substrato mais indicado, imprimiram-se amostras, medindo-se a rugosidade superficial e a resistência elétrica para ambos os casos. No capítulo 4.1 é possível consultar os resultados obtidos para a seleção do filme.

Relativamente às tintas, para além da tinta funcional capaz de permitir passagem de corrente elétrica, foi primeiramente impressa uma tinta decorativa, de modo a omitir os circuitos impressos, tornando o produto mais estético. Para a tinta decorativa foi utilizada uma formulação designada *NORIPHAN HTR 990/010* (Anexo 2) com pigmento na cor preta, na qual a seleção se deveu à sua capacidade isolante. Já no caso concreto da tinta funcional, foi utilizada uma tinta condutora cuja composição passa pela incorporação de micro - partículas metálicas à base de prata designada de *DM-SIP-1006* (Anexo 3). Por sua vez, o material a utilizar na sobreinjeção trata-se de PC/ABS, cujo grau se denomina *Bayblend T85 XF*.

3.3 Processamento

Durante a produção de um componente funcional pelo processo IME, são necessárias três etapas essenciais, sendo elas: impressão por serigrafia, termoformação e sobreinjeção. Posto isto, neste capítulo serão descritos os métodos e equipamentos de processamento utilizados, bem como as variáveis a estudar em cada uma das fases.

1. Serigrafia

Tal como citado anteriormente, a serigrafia é o método de impressão mais usual e mais avançado para a impressão de circuitos elétricos e é determinante para a resolução da impressão. Assim, para a realização da impressão, optou-se por selecionar o método de serigrafia por mesa manual, disponível no DEP- Departamento de Engenharia de Polímeros, da Universidade do Minho.

O primeiro passo para se proceder à impressão serigráfica, apesar de já realizado em estudos anteriores efetuados no PIEP, consiste no desenvolvimento das ferramentas produtivas,

nomeadamente, as telas de impressão. Nesta etapa, garantir a capacidade de replicação uniforme das geometrias é essencial para, deste modo, eliminar futuros erros e operações de correção na impressão pretendida. Nesta fase, o padrão eletrónico foi dimensionado de forma a se ajustar à geometria da peça. Para além disso, foram definidos os padrões de decoração do produto com duas cores distintas nos quais se inclui uma mancha capaz de cobrir a geometria da peça e um conjunto de bolas de diferentes dimensões indicativas do caminho da intensidade da luz. Nas Figuras 9 e 10 é possível visualizar o dimensionamento efetuado.

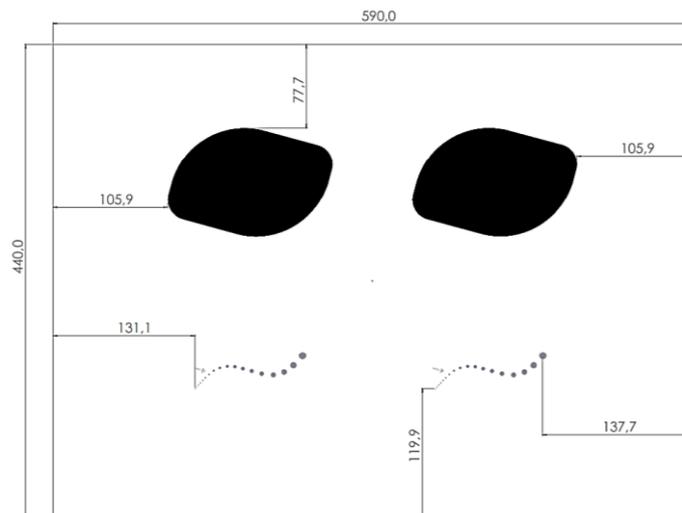


Figura 10. Dimensionamento da tela decorativa.

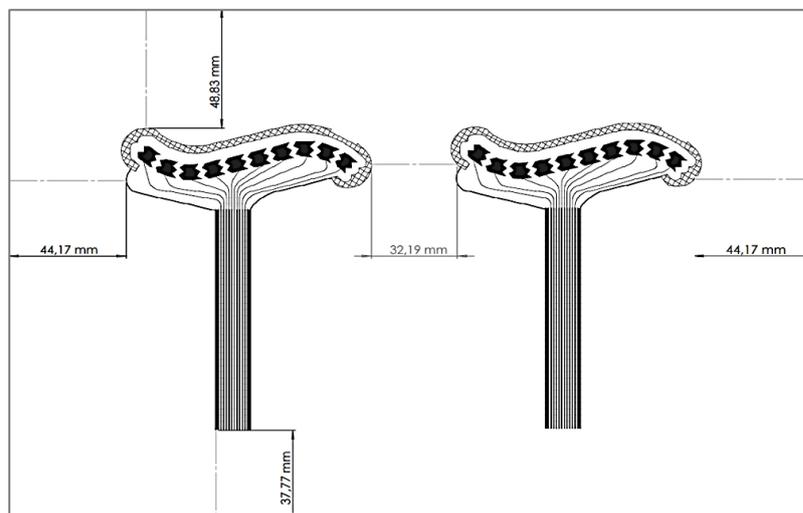


Figura 11. Dimensionamento da tela do circuito elétrico.

Uma vez validada a geometria de impressão, procede-se então à impressão propriamente dita. Para isso, iniciou-se com a limpeza das ferramentas produtivas utilizando acetona para retirar possíveis impurezas. De seguida, é necessário proceder à fixação da tela na mesa de impressão

de modo a garantir a uniformidade necessária para a imagem final. Ou seja, a tela deve estar plana de modo que a passagem de tinta seja uniforme, evitando a existência de pontos em que a tinta não atinja o substrato.

Na Figura 11 é possível observar a tela utilizada para a tinta decorativa e a tela utilizada para a tinta funcional.

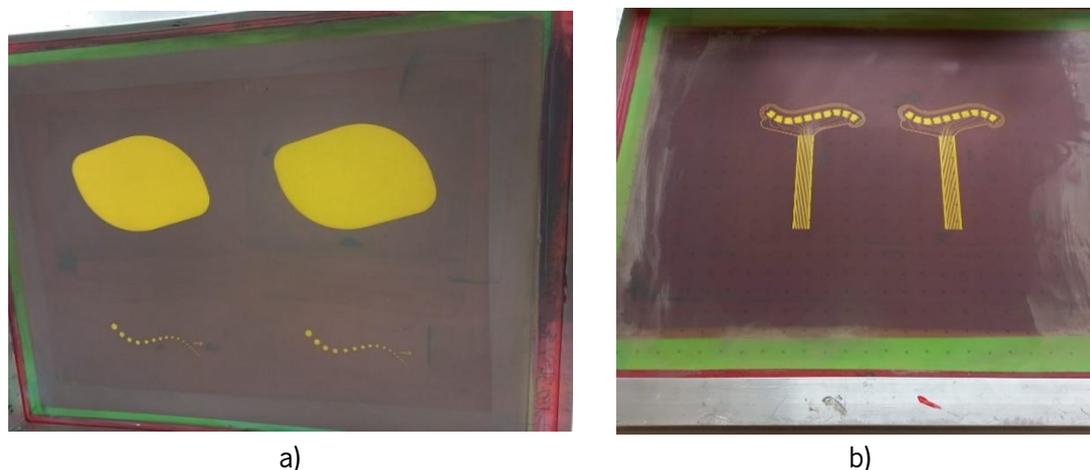


Figura 12. Telas de impressão: a) padrão da tinta decorativa, b) padrão da tinta condutora.

O filme, tem algumas particularidades de posicionamento, nomeadamente deve estar centrado no padrão de impressão de modo a garantir alinhamento nas fases seguintes: termoformação e sobreinjeção. Os filmes em estudo possuem dois lados diferentes, dos quais um é menos rugoso do que o outro. Assim, o passo seguinte foi colocá-lo na mesa de impressão centrado no padrão impresso e com a parte mais rugosa virada para cima, uma vez que a rugosidade garantiria melhor aderência.

Em seguida, a tinta é colocada sobre a tela e é utilizada uma raquete para arrastá-la e transferi-la para o substrato polimérico.

Tal como já referido, foram utilizadas tintas decorativa e funcional para a produção do interruptor final. Assim, as impressões passaram por duas fases: impressão da imagem decorativa e por fim, a camada funcional, ou seja, o circuito.

Posteriormente, os filmes foram, a cada camada impressa, foram introduzidos numa estufa a temperatura e tempo controlados de modo a sofrer o processo de cura. Enquanto a tinta decorativa cura a 90 °C durante 2 horas, a tinta funcional passou por duas fases: na primeira, onde permaneceu a 80 °C durante 10 minutos e numa segunda fase, prossegue a cura a 120 °C durante 5 minutos, conforme as fichas técnicas dos materiais.

Embora as etapas a realizar para ambas as tintas sejam as mesmas, para as impressões utilizando a tinta decorativa, é recomendado utilizar uma raquete exclusivamente para essa tinta em específico uma vez que não é possível limpá-la completamente, ficando danificada. As etapas descritas são apresentadas na Figura 12 a seguir:

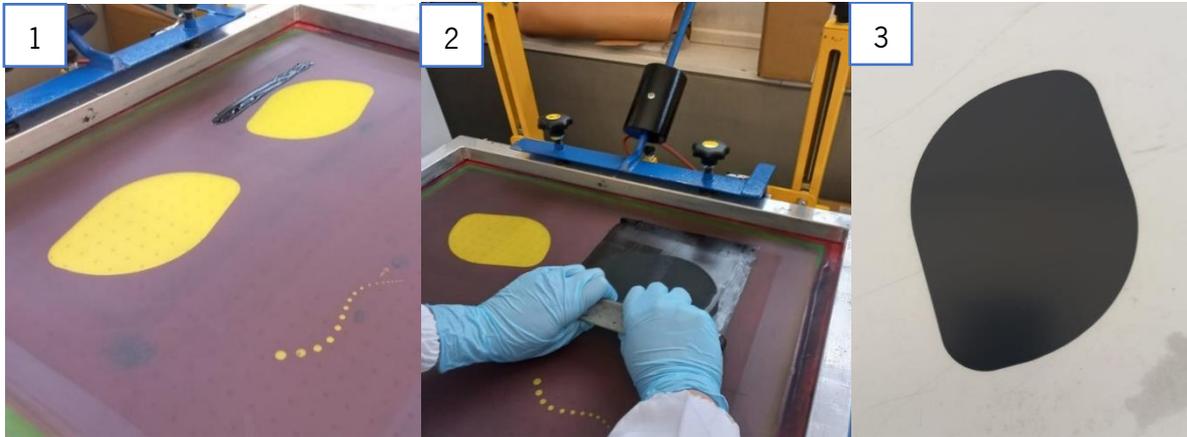


Figura 13. Etapas de impressão da tinta decorativa: 1) Tela decorativa; 2) Aplicação de tinta decorativa; 3) Filme de PC com padrão decorativo impresso.

Relativamente às impressões de tinta funcional, a tinta de prata utilizada possui um tempo de vida útil curto e, por isso, é primordial mexer a tinta a cada utilização uma vez que esta deve possuir viscosidade adequada para atravessar a malha. Caso a tinta esteja demasiado viscosa poderá abrir durante o processo de cura e consequentemente criar microfissuras no circuito.

Na Figura 13 é possível observar a sobreposição de camadas decorativa e elétrica. Aqui, é visível o desalinhamento entre a camada decorativa e a camada funcional de prata. Apesar de este defeito não se verificar em todas as impressões, salienta-se que uma dificuldade sentida na realização deste estudo prende-se com o posicionamento da tela para a sobreposição de camadas. Por fim, destaca-se a importância de realizar limpeza das ferramentas produtivas.

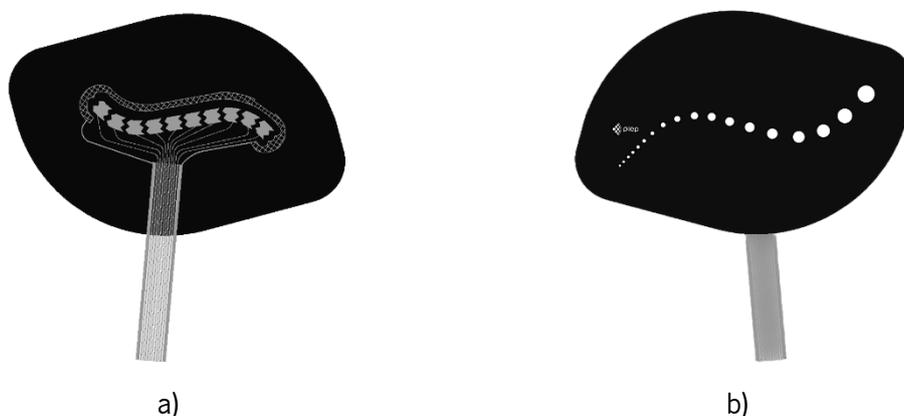


Figura 14. Sobreposição de camadas de tinta: a) parte interna, b) parte visível.

Numa primeira fase da dissertação, foi necessário imprimir filmes em dois substratos distintos. Para isso, imprimiram-se 5 amostras de cada um dos tipos de filme, ambos com 1 camada de tinta condutora e 1 camada de tinta decorativa, de modo a reunir amostras comparáveis. De seguida, procedeu-se à caracterização da rugosidade e propriedade elétrica das amostras de modo a verificar qual a sua influência na perda ou não da passagem de corrente. Selecionados os materiais a utilizar, encontram-se reunidas as condições para dar início ao plano de experiências. Para isso, foi necessário planejar as iterações a realizar de modo a evitar a complexidade e número de variáveis envolvidas. Inicialmente efetuaram-se 4 diluições diferentes da tinta condutora recorrendo ao solvente da tinta, denominado de *Benzyl alcohol* *EPR* (anexo 4). Este estudo teve como objetivo compreender se a diminuição da viscosidade facilitaria ou não o processo de serigrafia aliada à rentabilização da tinta funcional de modo a reduzir o custo da matéria-prima. Para isso, incluíram-se formulações com 0%, 10%, 15% e 20% de solvente.

O planeamento de experiências, através da realização de uma série de testes onde é possível alterar as variáveis de entrada e analisar de que forma provocam alterações nas variáveis de saída, utilizando um número limitado de combinações experimentais, permitiu determinar as melhores condições de processamento [55].

Na Tabela 2 é possível observar os fatores em estudo e respetivos níveis atribuídos nas impressões. Os valores de percentagem de incorporação foram selecionados tendo em conta os piores resultados de resistência elétrica obtidos para as diluições da tinta (níveis 1 e 2) que podem ser consultados no capítulo 4.2. Já para o número de camadas somente considerou a mancha decorativa preta e o circuito impresso variando entre 1 a 2 camadas de tinta, desconsiderando os níveis de intensidade (tinta decorativa branca).

Para cada uma das experiências a realizar, pré-definiu-se a impressão de 5 amostras, de modo a minimizar a incerteza de medição.

Tabela 2. Plano experimental realizado.

<i>Experiência</i>	% de incorporação	Nº camadas de tinta condutora	Nº camadas de tinta decorativa
1	% 1	1	1
2	% 1	2	2
3	% 2	1	2
4	% 2	2	1

Com a finalidade de realizar o plano experimental, foi necessário realizar impressão de segundas camadas. Desse modo, em primeiro lugar foram impressos os padrões decorativos sobrepondo-se, nas experiências 2 e 3 mais uma camada de tinta decorativa e nas experiências 1 e 4 o circuito elétrico. A experiência 2 foi a mais morosa de todas, uma vez que, para além da sobreposição de camadas de tinta decorativa, ainda foi impressa uma nova camada de tinta condutora sobre a anterior. Apesar do método ser o mesmo, torna-se necessário realizar medições do padrão impresso na primeira camada de tinta de modo que este fique perfeitamente centrado na imagem da tela para que assim, a segunda camada se sobreponha exatamente na anterior, não comprometendo a integridade dos padrões. Entre cada impressão, ou seja, a cada camada de tinta que foi impressa, os substratos foram submetidos ao processo de cura.

A condição selecionada teve em conta a passagem de corrente transmitida e, por isso, em todas as condições foram medidos os valores de resistência elétrica.

2. Termoformação dos filmes impressos

A termoformação é uma etapa preponderante para a obtenção da peça final, na qual a tinta necessita resistir de modo a garantir a condutividade necessária para a sua funcionalidade. Desse modo, garantir um processo adequado é essencial para respeitar as limitações da tinta funcional, uma vez que, o estiramento poderia rompê-la, resultando em fissuras e, conseqüentemente, o circuito deixaria de funcionar. Assim, nesta etapa os filmes impressos foram submetidos ao processo de termoformação, sendo analisada a influência das condições do processo, nomeadamente, o aquecimento, na funcionalidade do filme termoformado. Esta etapa, e tal como na anterior, inicia com o desenvolvimento do molde com o formato da peça em estudo. No entanto, este já se encontrava projetado e, por isso, foi possível dar início às conformações dos filmes.



Figura 15. Molde de termoformação.

O equipamento utilizado, *Formech* 450DT presente na Figura 16 encontra-se no Departamento de Engenharia de Polímeros.



Figura 16. Equipamento utilizado na termoformação.

Adicionalmente, a máquina utilizada possui quatro zonas distintas controláveis de aquecimento, sendo elas: 1) zona central, 2) laterais, 3) zona superior e 4) zona inferior, conforme demonstrando na Figura 17.

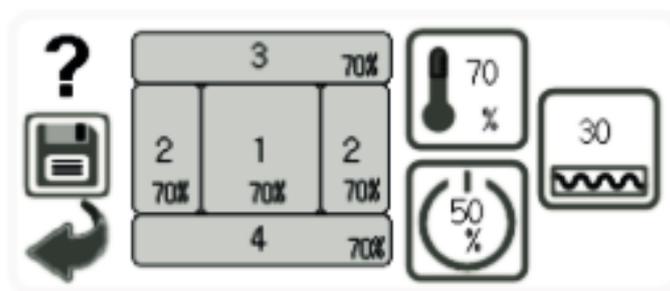


Figura 17. Zonas de aquecimento controláveis de forma independente [53].

O primeiro passo consiste então na colocação do molde no equipamento e, seguidamente, dos filmes poliméricos impressos no sistema de fixação do equipamento de modo que estes possam ser aquecidos pelas resistências durante o tempo de aquecimento. Este sistema presente na Figura 18, que permite a fixação do filme, denomina-se de redutor.



Figura 18. Suporte de fixação do filme.

Seguidamente, a pressão de vácuo é acionada de modo que o filme já quente obtenha o formato do molde desenvolvido. Esta etapa termina com o arrefecimento proveniente da temperatura ambiente e posteriormente a extração do filme termoformado. Desse modo, nesta fase, para além do tempo, a potência atribuída às diferentes resistências de aquecimento e a pressão de vácuo realizada foram fatores tidos em conta.

3. Simulação *Moldex 3D*

Prever as propriedades do material e do processamento da peça plástica é essencial para garantir que esta cumpra os requisitos estabelecidos bem como as dimensões finais. Assim, é recorrente utilizarem-se simulações numéricas através de modelos numéricos de modo a analisar as várias fases do processo de moldação por injeção.

O *Moldex 3D* é um software líder mundial utilizado pela indústria de moldação por injeção. Este permite realizar simulações de elevada precisão de cálculo, numa ampla gama de produtos de modo a analisar a influência das variáveis em estudo e otimizar a capacidade de fabricação de determinado projeto, bem como prever possíveis defeitos/ erros de processamento [56].

Para isso, esta ferramenta 3D permite alterar os parâmetros de processo e analisar as diferentes fases (de enchimento, compactação e arrefecimento), sendo possível obter dados como o tempo de enchimento, temperatura ao longo da peça e ao longo dos ciclos de injeção, taxas de corte, força de fecho, bem como, prever a formação de linhas de soldadura, a avaliação do *remelt* aquando da colocação de insertos, chupados ou contrações na peça em estudo, e ainda a contração e deformação total da peça que podem resultar no empeno da mesma.

Na Figura 16 é apresentado um exemplo de resultado obtido pela simulação *Moldex 3D*, onde foi possível prever zonas em que, ao incorporar um filme, este poderia fundir. Na interface

inserto-polímero, a temperatura do filme deverá ser suficiente para amolecer e permitir a aderência entre os materiais, contudo temperaturas excessivas levam ao arrastamento da tinta ou do próprio filme e até mesmo à sua degradação. Assim, é de salientar que através de simulação numérica foi possível prever zonas onde este teria maior probabilidade de fundir e, conseqüentemente, sofrer arrastamento, pelo que através do estudo, a simulação permitiu antecipar defeitos e corrigi-los antes mesmo de iniciar o processo real [3].

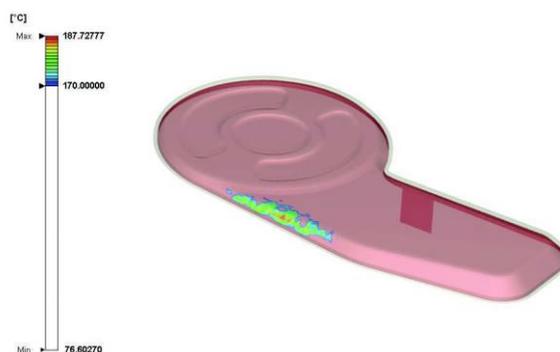


Figura 19. Previsão de zonas do filme que poderão fundir ou causar o seu arraste durante a injeção (retirado de: [3]).

Nesta fase da dissertação efetuou-se a simulação numérica do processo de injeção para um estudo inicial. Este teve como objetivo avaliar possíveis variações do processo, nomeadamente, o tempo de enchimento, contração linear e temperatura de arrefecimento. O efeito das condições de injeção (temperatura ao longo da peça e velocidade de injeção) na interface (temperatura) e nas características da moldação, como os empenos e contração foram, posteriormente, tidos em conta.

Através deste tipo de ferramenta, é possível obterem-se resultados relativamente aproximados à realidade do processo de injeção. Para tal, é necessária uma preparação adequada do modelo, nomeadamente na integração dos sistemas de alimentação e de controlo de temperatura do molde, bem como uma definição adequada da malha. Para isso, iniciou-se pela definição da “malha”, que representa um conjunto de elementos de dimensão reduzida responsáveis por determinar a geometria da peça.

Na Figura 20 é apresentado o modelo utilizado constituído pelas peças, inserto, canais de alimentação e de arrefecimento com as respetivas malhas e detalhes do modelo.

Model Details		
Mesh Type		Solid
Solid Mesh Element Count		430,254
Part		160,808
Cold Runner		31,746
Part Insert		16,637
Cooling Channel		221,063
Surface Mesh Element Count		27,916
Part		23,814
Runner		4,102
Dimension		(mm)
Part		110.33x195.50x13.95
Mold		186.00x329.31x186.00
Volume		(cc)
Part		28.62
Cold Runner		4.46

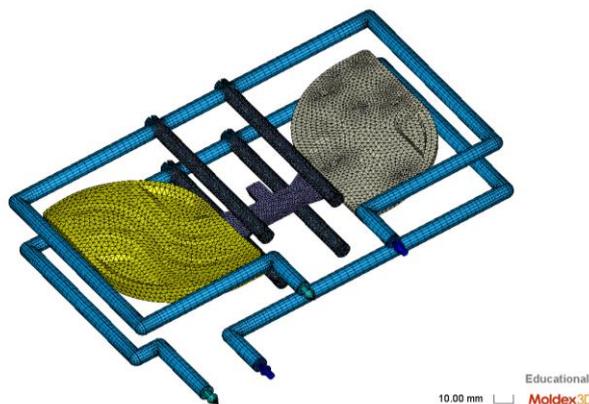


Figura 20. Modelo utilizado.

Numa abordagem preliminar (*RUN 1'*), através do modo CAE, em que não é considerado o equipamento de injeção, optou-se por selecionar valores standard de processamento para o material utilizado, designadamente 270 °C e 80 °C para as temperaturas do fundido e do molde, respetivamente. Nesta iteração e, de forma a avaliar o processo, utilizaram-se como dados de entrada os seguintes valores atribuídos pelo software Moldex 3D:

Tabela 3. Primeira RUN realizada.

Tempo de injeção	1,16 s
Tempo de compactação	5 s
Tempo de arrefecimento	12,2 s
Pressão de compactação	70%

Posteriormente, para a realização do estudo do processo, foram definidas várias iterações designadas de *RUN's*. Neste estudo, optou-se por, a cada iteração, alterar a temperatura do fundido e a velocidade de injeção. Estas condições foram selecionadas tendo por base a literatura que salienta que a existência de zonas com pressões e temperaturas elevadas são propícias a sofrer arrastamento de tinta e alterações de cor e, desse modo, é essencial garantir baixa temperatura do fundido ou baixa velocidade de injeção de forma a aumentar o tempo de ciclo, sendo a fase de injeção a mais relevante para obter peças com qualidade desejada. Neste caso, a simulação do processo foi realizada através do *Machine Mode*, em que é considerado o equipamento de injeção utilizado (*Billion H150/470* cujas características se encontram no anexo 5) e, desta forma pode ser reproduzido o processo de injeção experimental. Adicionalmente, após a moldação por injeção foram comparadas as simulações numéricas de forma a validar as condições realizadas experimentalmente.

Os parâmetros de processamento introduzidos em cada *RUN*, foram definidos tendo por base um plano experimental elaborado, cujos valores podem ser consultados na Tabela 4.

Os níveis para a temperatura do fundido foram selecionados tendo em conta a ficha técnica do material, e para a velocidade de injeção foram tidas em conta injeções anteriores já realizadas para a estabilização do processo. Para além disso, fixou-se o valor da temperatura do molde em 80°C e avaliaram-se as condições definidas.

Tabela 4. Dados de entrada do processo.

<i>Simulação</i>	<i>Designação</i>	<i>Temperatura do fundido (°C)</i>	<i>Velocidade de injeção (mm/s)</i>
<i>RUN 1</i>	T1V1	260	30
<i>RUN 2</i>	T1V2	260	50
<i>RUN 3</i>	T2V1	280	30
<i>RUN 4</i>	T2V2	280	50

4. Sobreinjeção

A sobreinjeção iniciou-se com a colocação do material numa estufa a desumidificar durante 5 horas a 100 °C, sendo verificada a humidade presente nos *pellets* antes de iniciar as experiências, estando abaixo de 0,02%, como recomendado. Seguidamente numa abordagem inicial foram injetadas peças sem a inserção do filme de modo a verificar a estabilidade do processo e da máquina. Ainda nesta etapa, salienta-se a importância de analisar a influência das condições do processo de moldação por injeção. Garantir a adequabilidade desta etapa é crucial para que o aparecimento de defeitos seja evitado, uma vez que os circuitos impressos terão de resistir às elevadas temperaturas e taxas de corte, características do processo. Para isso, avaliaram-se as condições simuladas (temperatura do fundido e velocidade de injeção conforme a Tabela 4) de forma a proceder à validação prática dos resultados.

Para cada umas das condições acima referidas, produziram-se cinco amostras de peças injetadas com a inserção do filme conformado. Durante o processamento das peças teve-se em atenção a estética das amostras e por isso procedeu-se a inspeção visual das mesmas para uma análise controlada.

A injetora utilizada, de 200 toneladas, designada *Billion H150/470* possui as características descritas no anexo 5. Relativamente ao molde utilizado, a peça em questão é produzida através de um molde com canais frios com dimensões de 342 x 442 x 475 mm, presente na figura a

seguir. A alteração de tecnologia produtiva (LDS para IME) levou a que o molde sofresse uma ligeira adaptação de modo a incorporar o flat cable do circuito sem o deteriorar. Para isso, a zona assinalada indica o desgaste realizado à cavidade moldante.

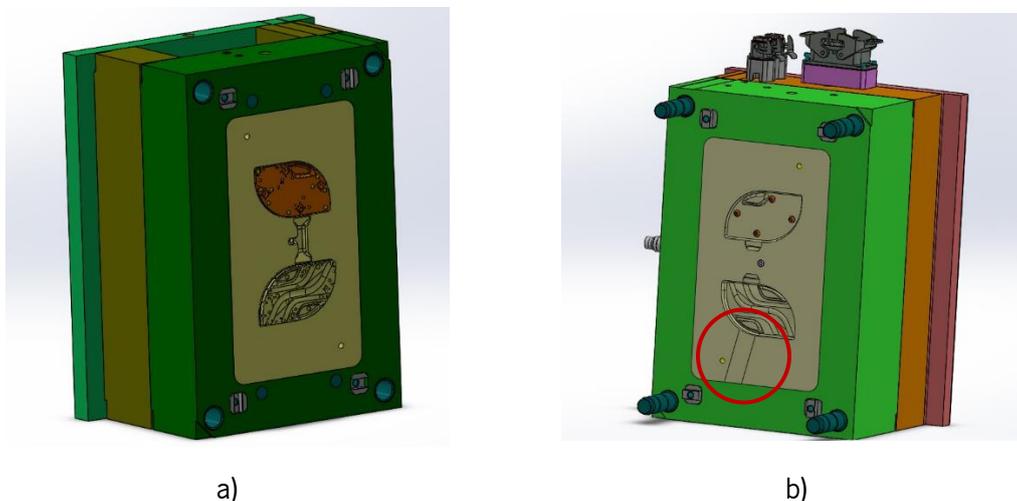


Figura 21. Molde de injeção: a) parte móvel; b) parte fixa.

3.4 Tecnologias de caracterização

Neste subcapítulo serão descritos os métodos de caracterização utilizados nas diferentes fases da dissertação, de forma a validar a funcionalidade do produto em questão.

1. Determinação da rugosidade

A rugosidade superficial dos filmes requer destaque quando se fala da adesão tinta-substrato. Para esta etapa de caracterização utilizou-se um microscópio ótico 3D para a medição designado *InfiniteFocusSL*. A rugosidade foi medida em três pontos distintos do filme impresso, incluindo:

1. A parte impressa com tinta condutora de prata;
2. A parte impressa com a tinta decorativa preta;
3. A rugosidade associada à superfície do filme.

A medição foi crucial para efetuar a seleção do substrato a utilizar durante o trabalho experimental. Para as diferentes medições, foi possível analisar a R_a que corresponde à rugosidade média do filme, R_q correspondente à rugosidade quadrática do perfil e, por fim, a rugosidade R_z definida pela rugosidade média do pico ao vale.

Contudo, o resultado mais relevante para este caso foi a rugosidade média associada e por isso só se teve em conta Ra. As medições foram realizadas em duas direções: vertical e horizontal.

Para além da rugosidade, também a tensão superficial demonstra interesse para garantir adesão entre tinta e substrato. No entanto, o ângulo de contacto não foi considerado, uma vez que, os filmes comerciais utilizados possuem um pré-tratamento superficial que permite que estes tenham uma tensão superficial superior à das tintas comerciais.

2. Determinação da resistência elétrica

Esta fase de caracterização é a etapa mais relevante uma vez que determina a capacidade de o circuito impresso transmitir corrente elétrica. Para isso, foi necessário proceder à obtenção dos valores de resistência elétrica da tinta.

A resistência elétrica é diretamente proporcional à resistividade do material (ρ). Esta corresponde a uma medida de quanto o material resiste à passagem de corrente elétrica (em $\Omega \cdot m$), e pode ser determinada a partir da resistência elétrica, da área da secção transversal e do comprimento da amostra, conforme a equação 1 [57].

$$\rho = \frac{R \times w \times h}{l} \quad (1)$$

R - Resistência elétrica medida (Ω)

w - Largura da amostra (m)

h - Espessura da amostra (m)

l - Comprimento da amostra (m)

A condutividade elétrica, por sua vez, é inversamente proporcional à resistividade. Na presença de corrente elétrica num material condutor, um número elevado de eletrões passa a deslocar-se livremente sem dificuldade, contrariamente aos materiais isolantes onde os eletrões colidem entre e si enfrentando uma certa dificuldade de movimento. Assim, salienta-se que materiais com baixos valores de resistência são conhecidos como condutores, ao contrário de materiais que oferecem resistência à passagem de corrente, impedindo o movimento dos eletrões.

Neste caso de estudo, e dado que as dimensões da camada de prata impressa são reduzidas, tendo pouco impacto nos resultados, apenas a resistência elétrica foi medida.

Para isso, nesta etapa, foram utilizados dois pontos de cada amostra para a medição da resistência elétrica, recorrendo a um multímetro.

Relativamente às medições de resistência elétrica, estas foram feitas na superfície da tinta de prata, linha a linha, conforme representado na Figura 22, onde os elétrodos do multímetro foram colocados nos extremos de cada uma [58]. Esta medição permitiu validar a qualidade do circuito e analisar a influencia das condições do processo entre as diferentes amostras.

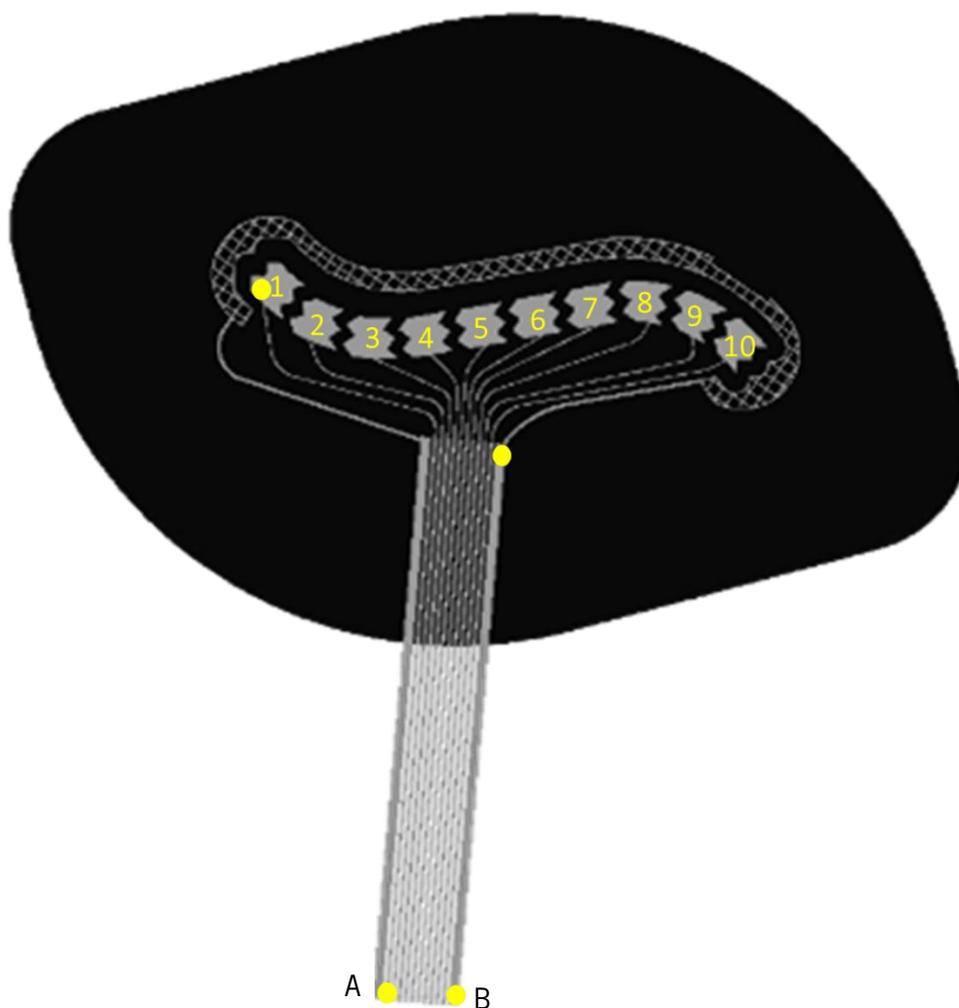


Figura 22. Representação dos pontos de medição de resistência elétrica.

3. Microscopia eletrónica de varrimento (SEM)

Após realizar as impressões, procedeu-se à caracterização da morfologia do filme de modo a verificar as variações de espessura. Esta medição foi efetuada, conforme Tabela 5, para 3 amostras impressas distintas e, posteriormente, para o filme termoformado e para a peça sobreinjetada de forma a perceber se ocorreram alterações perante a submissão a altas temperaturas.

Tabela 5. Condições utilizadas na caracterização morfológica

<i>Amostra</i>	<i>Designação</i>	<i>Impressão</i>
1	i.0%C	Filme impresso somente com tinta de prata
2	i.10%C	Filme impresso somente com tinta de prata 10% diluída
3	i.D+C	Filme impresso com sobreposição de camadas decorativa e funcional
4	t.D+C	Filme pré-impresso após termoformação
5	m.D+C	Filme na peça final

Esta tecnologia de caracterização projeta um fluxo concentrado de elétrons sobre uma superfície de forma a criar uma imagem. Os elétrons ao incidirem na amostra emitem sinais que permitem obter informações como a morfologia, composição e estrutura dos materiais em análise [59].

Um microscópio eletrónico de varrimento é o mais versátil para avaliar e analisar microestruturas de amostras. A grande vantagem deste equipamento recai essencialmente numa maior resolução comparativamente aos microscópios tradicionais [59]. Estes ensaios foram realizados no laboratório de serviços de caracterização de materiais da Universidade do Minho (SEMAT). O microscópio (*NanoSEM – FEI Nova 200*) foi usado na caracterização morfológica dos filmes impressos, cuja caracterização permitiu avaliar, adesão, espessura das camadas impressas e a possibilidade de impregnação entre tintas. Os filmes poliméricos foram todos revestidos com Au-Pd (Ouro-Paládio).

4. Brilho e cor

A aparência de uma superfície, que está diretamente dependente da rugosidade superficial, é responsável por manter a qualidade visual dos produtos. A cor representa uma sensação provocada pela visão quando esta capta radiação luminosa no qual o espectro se encontra em desequilíbrio quando comparado com o espectro de luz branca.

O olho humano é sensível a 555 nm e por isso a utilização de instrumentos para avaliar a cor é justificada pela necessidade de ter resultados inequívocos em outros comprimentos de onda.

Para isso, no que respeita à aparência, existem os espectrofotômetros ou colorímetros e medidor de brilho para a medição de cor e brilho, respetivamente [60].

Na presente dissertação foram usados o espectrofotómetro *UV-2401 PC* e o medidor de brilho de três ângulos *SAGT 525*. Os diferentes ângulos (20°, 60° e 85°) são permitem obter medições mais precisas, pois em superfícies de alto brilho, o ângulo de 20 ° é mais adequado, ao passo que para superfícies de baixo brilho o ângulo de 85° permite obter medições mais conformes [61].

Relativamente ao espectrofotómetro, os ensaios foram realizados com recurso a uma esfera integradora, no qual foi utilizado sulfato de bário para calibrar o aparelho. O equipamento mede a quantidade de luz refletida (refletância) da amostra, na gama de comprimento de onda do visível, e posteriormente estes valores são utilizados pelo *software COLOR* para determinar as coordenadas cromáticas.

4. Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1 Seleção do Substrato

Iniciando pela seleção do substrato, na Tabela 6 encontram-se compilados os resultados obtidos nas medições de rugosidade dos substratos utilizados. É de destacar que à medida que é adicionada tinta, a rugosidade sofre diminuição uma vez que os espaços vazios são preenchidos. A diferença entre estes materiais é notória já que no melhor dos casos, ou seja, na direção horizontal para a tinta preta, a discrepância de valores chega a ultrapassar os 600 nm. Do mesmo modo, as variações dos valores para os filmes diferem em cerca de 2180 a 2250 nm e para a tinta de prata em cerca de 870 a 970 nm.

Tabela 6. Medições de rugosidade média.

		<i>Direção horizontal (nm)</i>	<i>Direção vertical (nm)</i>
<i>Makrofol DE 1-4 000000</i>	Filme	770,59	815,03
	Tinta prata	702,74	721,74
	Tinta preta	520,64	556,26
<i>Lexan 8B35</i>	Filme	2959,80	3059,90
	Tinta prata	1573,40	1687,10
	Tinta preta	1149,20	1256,60

Após consultar o fornecedor da tinta decorativa, foi possível aferir que esta possui uma viscosidade de 4,5 - 7,5 Pa.s, inferior à tinta de prata (6 - 10 Pa.s). Desse modo, foi possível explicar o facto da rugosidade da película de tinta preta aplicada ser inferior, uma vez que, é possível que esta ao ser mais fluida, se espalhe entre os vales do filme polimérico, uniformizando a camada superficial e, conseqüentemente diminui a rugosidade. Por outro lado, a adição da camada de prata promove a rugosidade devido às partículas da tinta.

Por fim, de modo a terminar a seleção do substrato preferencial para este projeto, efetuaram-se medições de resistência elétrica, conforme descrito em 3.4.2.

A média das medições para cada um destes são apresentados na Figura 23 onde é possível verificar que o facto de a superfície ser mais rugosa diminuiu a capacidade de o circuito conduzir corrente elétrica. Estes resultados são indicativos de que a rugosidade superficial pode afetar diretamente a resistência elétrica já que a presença de vazios interfere na homogeneidade/uniformidade da espessura da camada impressa, dificultando assim o movimento de elétrons e aumentando os níveis de resistência.

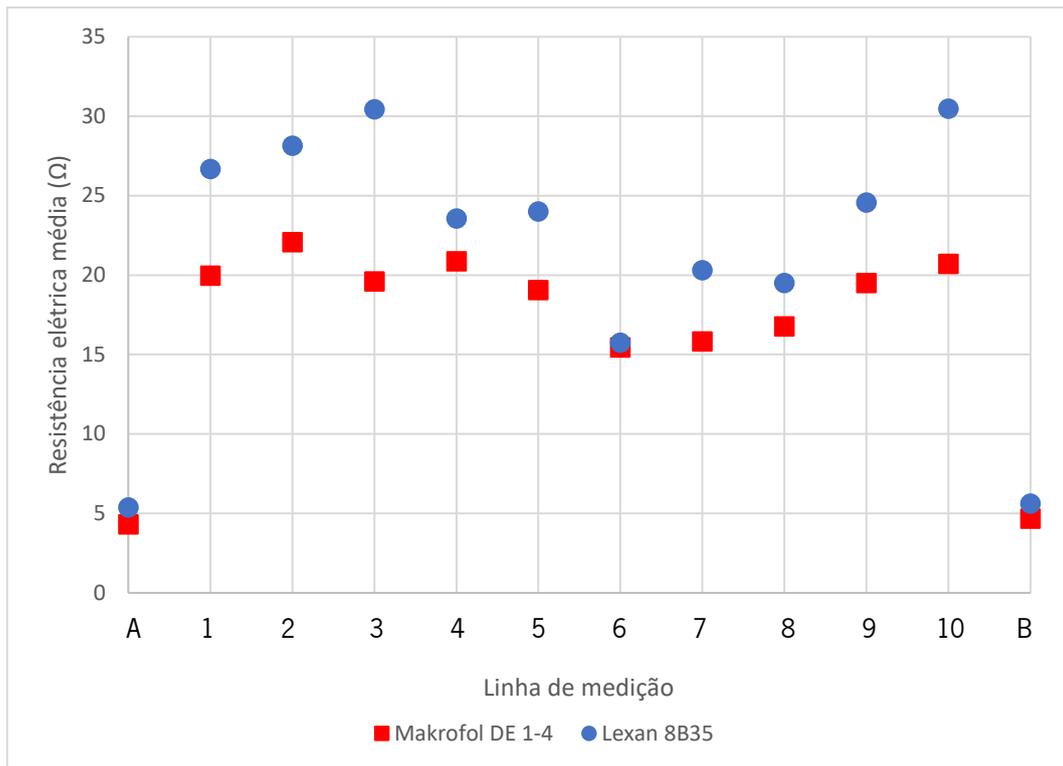


Figura 23. Resultados obtidos para os filmes liso e rugoso.

Ainda assim, observando os desvios padrão determinados para todos os pontos de medição (Tabela 7), é possível retirar que, de um modo geral, o filme rugoso apresentou menor desvio padrão, e por isso, os pontos tendem a estar mais próximos da média contrariamente ao filme liso que amplia a gama de valores. Contudo, apesar da diferença, verifica-se maior uniformidade ao longo dos pontos de medição (representados na Figura 22) para a mesma amostra.

Tabela 7. Resultados dos desvios padrão determinados nos filmes liso e rugoso.

Linha de medição	MAFROFOL DE 1-4	LEXAN 8B35
A	0,50	0,25
1	3,80	2,76
2	3,94	2,82
3	3,63	11,12
4	5,30	1,76
5	4,01	4,26
6	3,60	7,95
7	3,15	1,55
8	3,56	2,16
9	4,99	2,82
10	4,44	4,02
B	0,35	0,98

Assim, a seleção de material teve em conta o fator rugosidade, e apesar do filme MAKROFOL DE 1-4 000000 apresentar maior dispersão de valores, este possui menor resistência elétrica, elegendo-se assim o filme liso de forma a não comprometer a funcionalidade do produto final. Para além disso, a dispersão dos resultados obtidos que se verifica fruto do elevado desvio calculado, quer em ambos os filmes quer ao longo da realização de todo o trabalho experimental, pode estar associada ao facto de ser um processo de impressão bastante manual.

4.2 Serigrafia

O primeiro passo para realizar o plano de experiências foi determinar a percentagem de diluição da tinta que apresentavam melhor condição de passagem de corrente elétrica. Para isso, foram impressos 5 filmes para cada amostra com as percentagens de tinta de prata já referidas no capítulo 3.2.1.

Após se efetuar a medição dos valores de resistência elétrica associados às várias impressões (tinta base ou diluída), foi possível verificar que para os casos de 15% e 20% os filmes entraram em curto-circuito, ou seja, a diluição levou à redução da viscosidade de forma significativa, fazendo com que esta se espalhasse em demasia, havendo cruzamento entre as diferentes linhas. Assim, esta abordagem permitiu concluir que o limite de adição de solvente foi atingido, uma vez que se tornou inexecutável a medição da resistência para as diluições nestas amostras.

Na Figura 24 é possível consultar os valores médios de resistência obtidos para as amostras de 0% e 10% nos pontos de medição das diferentes linhas do circuito. É notório que a diluição que obteve melhor passagem de corrente foi, então, a de 0%, ou seja, a tinta base como seria de esperar. Já a de 10% apesar de sofrer aumento de resistência elétrica, e, por consequência, diminuição da condutividade, ainda foi possível efetuar a medição. Para além disso, é possível analisar que a incorporação de solvente na tinta tornou os valores cada vez mais dispersos, consequência do aumento do valor do desvio padrão. Semelhantemente, é de salientar a impossibilidade de medição de corrente em determinados pontos, visto que nem sempre foi possível fazê-lo, destacando a existência de fissuras no padrão de impressão. No anexo 6 é possível consultar os cálculos efetuados, bem como se encontram identificados os dados cuja medição foi inexecutável.

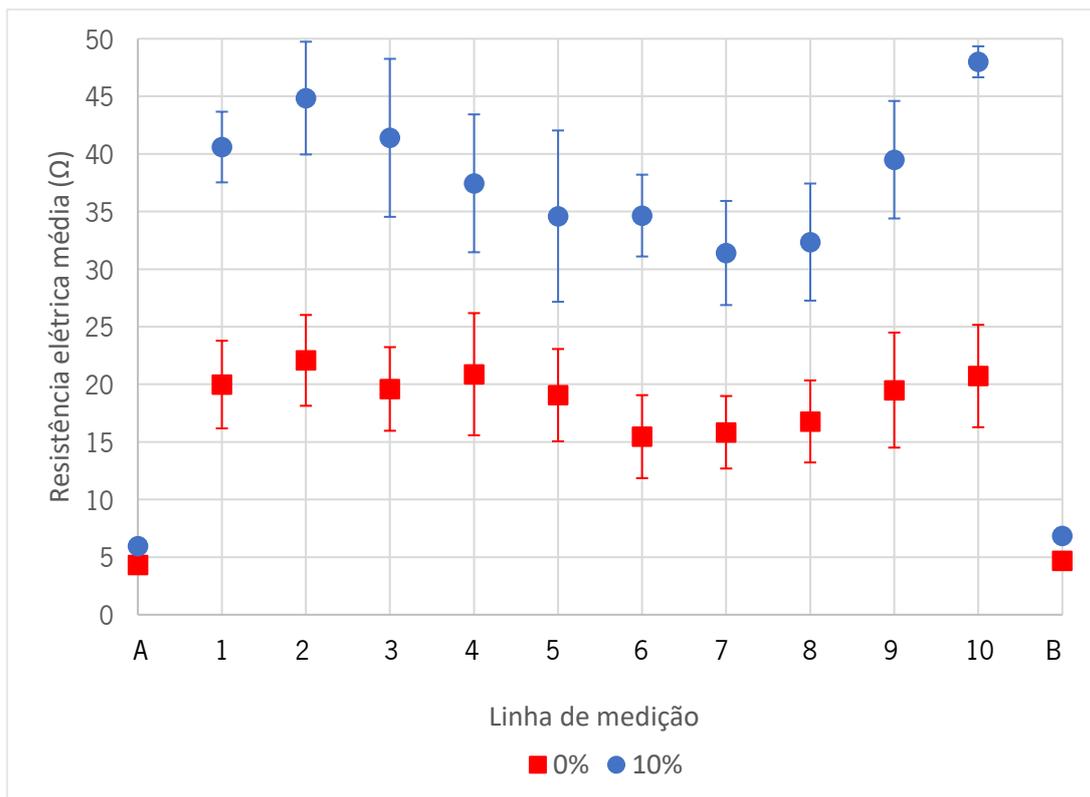


Figura 24. Resultados obtidos para as diluições (pontos representados na Figura 22).

Apesar de ser evidente que a incorporação de solvente na tinta elevou os valores de resistência elétrica em todos os pontos de medição, e conseqüentemente a diminuição da capacidade de conduzir corrente elétrica, selecionaram-se estes dois limites como níveis da percentagem de incorporação para a realização experimental do plano. Os restantes fatores foram, como já referido, o número de camadas de tinta funcional e o número de camadas de tinta decorativa, cujos níveis variam entre ter somente uma camada ou a presença de duas (Tabela 8).

Tabela 8. Experiências realizadas.

<i>Experiência</i>	Designação	% de incorporação	Nº camadas de tinta condutora	Nº camadas de tinta decorativa
1	0%C1D1	Base (0%)	1	1
2	0%C2D2	Base (0%)	2	2
3	10%C1D2	10% diluída	1	2
4	10%C2D1	10% diluída	2	1

Pela observação da Figura 25, é possível denotar que as experiências onde existiu incorporação de solvente na tinta de prata, foram as que apresentaram piores resultados devido à superior resistência elétrica medida. Por comparação, as experiências 3 e 4 (10%C1D2 e

10%C2D1) apresentam valores de medição relativamente próximos e, embora a experiência 3 exprima pior resultado, advertindo para que a incorporação de tinta decorativa possa prejudicar a transmissão de corrente, é de ressaltar que a percentagem de solvente incluída na tinta condutora é o fator de maior peso no que toca à transmissão de corrente elétrica pois, da mesma forma que nas medições anteriores o acréscimo de solvente levou à diminuição da corrente elétrica, também para este caso isto se verifica de forma mais significativa. Para além disso, destaca-se o facto da inclusão de solvente diminuir a espessura da camada de tinta funcional podendo o aumento da resistência não estar associado à camada decorativa.

Por outro lado, nas experiências com tinta base, a resistência elétrica sofreu um decréscimo notório quando comparada com as anteriores, frisando novamente que a diluição de tinta prejudica, de forma perceptível, a condução de corrente elétrica no filme. Apesar de em alguns dos pontos de medição (Figura 22), nomeadamente os três pontos assinalados, a experiência 2 (0%C2D2) apresentar resultados de resistência elétrica inferiores à experiência 1 (0%C1D1), regra geral isso não se verifica, comprovando que a experiência que deverá ser reproduzível será a que possui uma camada de tinta condutora sem diluição e uma camada de tinta decorativa. Para além disso, ao analisar estes resultados, é possível verificar que estes são relativamente próximos não excedendo $0,12 \Omega$ refletindo que a adição de mais camadas pode não ter grande influência no produto final. Com a seleção da condição 1 (0%C1D1) foi possível simplificar as iterações do processo de impressão serigráfico.

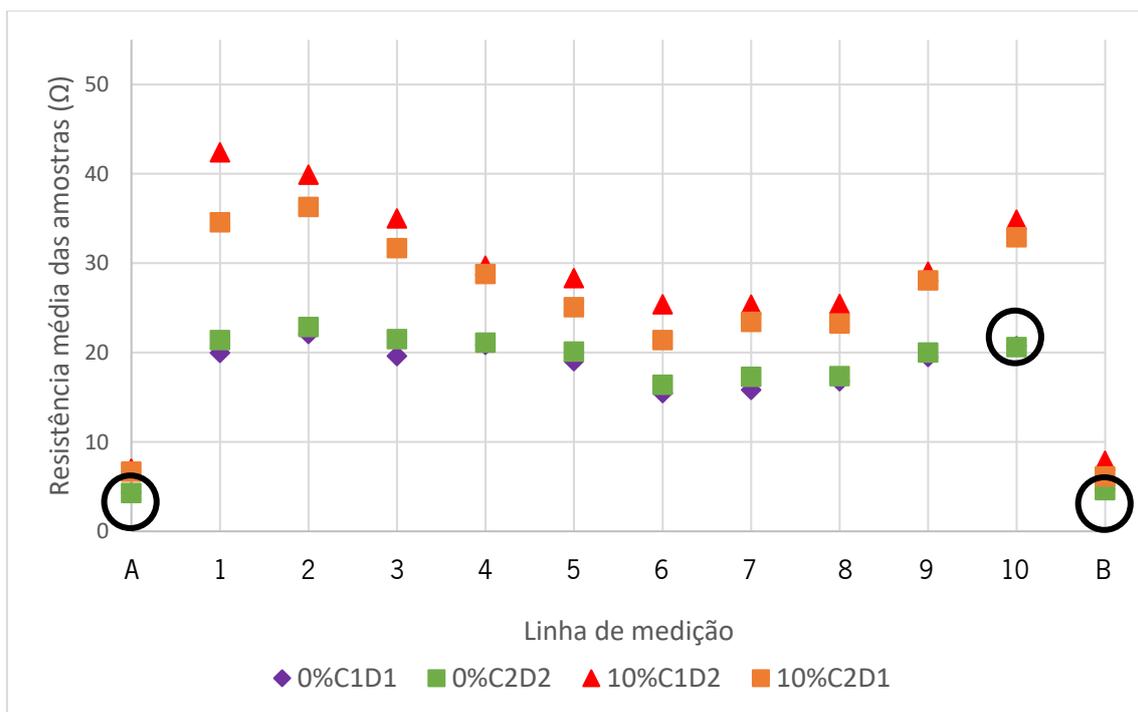


Figura 25. Resultados médios obtidos para o plano experimental.

A Tabela 9 compila os resultados obtidos no cálculo do desvio padrão para todos os pontos de medição nas diferentes experiências. Pela análise dos mesmos é possível concluir que ao aumentar o número de camadas de tinta funcional e decorativa, a variação da gama de valores tende a aumentar também. Comparando as experiências 1 (0%C1D1) e 2 (0%C2D2), observa-se que de um modo geral, os valores são mais dispersos na presença de 2 camadas de cada tinta ou o desvio calculado é relativamente próximo. No entanto, no ponto de medição 9, é de destacar que o reduzido desvio calculado não é comparável com a experiência 1 (0%C1D1), uma vez que, foi impossível efetuar a medição para três das amostras.

Nas experiências 3 (10%C1D2) e 4 (10%C2D1) verifica-se que, em grande parte dos pontos, o desvio foi menor, ou relativamente próximo, às experiências que utilizaram a tinta base. Nesse sentido, esta variação pode estar associada ao processo de cura, uma vez que, ao ocorrer a evaporação de solvente, a película de tinta não se deposita uniformemente ao longo do circuito, fazendo com que a incorporação de solvente intensifique o resultado devido ao facto de este evaporar. Contudo, a adição de solvente não promoveu a uniformidade dos valores, mas resultou na impossibilidade de medição, existindo menos dados para comparação. Para além disso, denota-se que a presença de mais camadas de tinta decorativa do que funcional torna o circuito mais resistivo. O desvio padrão determinado na presença de duas camadas de tinta funcional e o calculado na integração de duas camadas de tinta decorativa, provoca a diminuição tendencial do mesmo nos vários dados. Esta tendência leva a concluir que a incorporação de mais 1 camada de tinta decorativa pode ter influência positiva na dispersão de valores, ao passo que a diluição da tinta funcional tem influência negativa na uniformidade dos dados.

Tabela 9. Resultados médios obtidos para o plano experimental.

Linha de Medição	0%C1D1	0%C2D2	10%C1D2	10%C2D1
A	0,50	0,68	1,12	0,60
1	3,80	3,96	7,64	3,37
2	3,94	3,79	3,71	2,14
3	3,63	4,94	5,94	2,12
4	5,30	4,05	4,00	1,51
5	4,01	3,15	3,28	2,16
6	3,60	2,60	3,18	1,61
7	3,15	2,80	1,84	1,65
8	3,56	2,73	2,28	1,95
9	4,99	0,10	0,05	2,68
10	4,44	4,10	3,73	0,00
B	0,35	0,54	0,55	0,45

Para complementar esta análise, optou-se por medir a rugosidade da zona decorativa com duas camadas impressas. A Tabela 11 compila os resultados obtidos para 1 e 2 camadas decorativas. Pela observação destes, é possível aferir que adição de mais uma camada de tinta, diminuiu a rugosidade superficial das amostras, refletindo que a adição de mais camadas uniformiza a superfície da película de tinta.

Tabela 10. Rugosidades para os filmes impressos.

		<i>Direção horizontal (nm)</i>	<i>Direção vertical (nm)</i>
<i>1 camada</i>	Tinta preta	520,64	556,26
<i>2 camadas</i>		313,61	313,87

4.3 Termoformação

Na fase de termoformação, e após uns ensaios preliminares, foi possível denotar que os furos inferiores do molde de termoformação, isto é, da parte de baixo (conforme assinalado na Figura 22), não permitiam a conformação uma vez que o vácuo não era suficiente para garantir a deformação completa do filme. Assim optou-se por colocar umas borrachas isolantes por baixo deste, de modo que não ficasse em contacto direto com a saída de vácuo, mas sim mais elevado assegurando a passagem uniforme de ar. Para além disso, a termoformadora utilizada, não garantia pressão de vácuo suficiente e, por esse mesmo motivo, optou-se por acoplar uma botija de ar capaz de aumentar a pressão de vácuo emitido para a superfície do filme.



Figura 26. Molde de termoformação.

Numa fase inicial, o primeiro passo recaiu então na seleção do melhor valor de pressão de vácuo capaz de permitir a conformação da folha polimérica, ocorrendo somente para valores superiores a 0,5 bar, já que para valores inferiores a deformação não era completa. Ainda assim, foi possível constatar que para uma pressão igual ou superior a 0,6 bar o estiramento era em demasia, derivando em fissuras na tinta condutora de prata. Desse modo a seleção passou por utilizar 0,5 bar de pressão de vácuo emitida.

De seguida, para ajustar a potência das resistências nas diferentes zonas testou-se um medidor de temperatura digital por contacto (modelo *TESTO 922*) com as mesmas a 100% de potência, no entanto, como a temperatura não é atingida imediatamente, ou seja, vai subindo de forma gradual, foi possível notar que o filme submetido à medição ficou demasiado tempo exposto. A Figura 27 apresenta o filme com rugas no qual é visível que para atingir uma temperatura de 120°C, o tempo de exposição de 32 segundos foi excessivo, refletindo que o filme possa já ter atingido uma temperatura superior ou equivalente à temperatura de transição vítrea (150°C), no entanto o aparelho não foi capaz de medir no momento.



Figura 27. Filme termoformado com 0.5 bar, resistências a 100% e 32 s.

Posto isto, optou-se por fazer testes por tentativa e erro até se obter as condições ideais. Em primeiro lugar, tal como já referido, testou-se a 100% de potência das resistências (18 s) no qual foi possível verificar a degradação da tinta essencialmente na zona interior do filme, demonstrando não uniformidade na temperatura da folha polimérica. Com o intuito de reduzir esse efeito, alteraram-se os valores das resistências interiores (zona 1,3 e 4) passando para 70% da sua potência total. Apesar da deformação ocorrer, para este valor de potência, é possível observar que, e em particular na zona do *flat cable*, a tinta fissura comprometendo a

funcionalidade do componente (Figura 28). A degradação da tinta nesta zona deve-se ao ângulo (90°) do molde de termoformação.

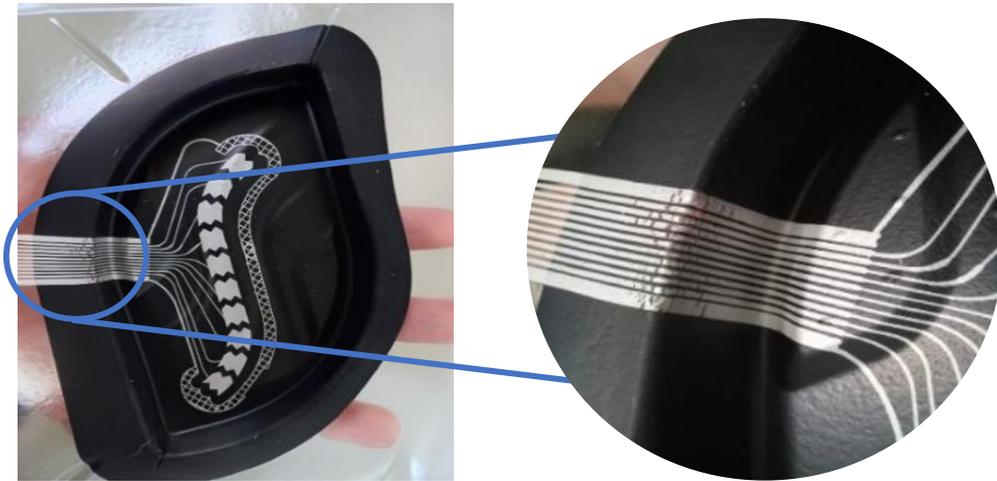


Figura 28. Fissura da tinta condutora.

Assim, para finalizar e visto que a alteração da ferramenta produtiva (molde de termoformação) traria adição de custos, restringiu-se a potência a 55% verificando-se que apesar da deformação ocorrer e a passagem de corrente existir, a colocação no molde de injeção seria dificultada principalmente na zona do ataque e por isso, aumentou-se a zona 3 (zona de contacto com o ataque) para 65% deixando as restantes a 55%. Esta alteração de potência fez com que os filmes tivessem de ser colocados todos da mesma maneira, ficando o flat cable posicionado na zona 4.

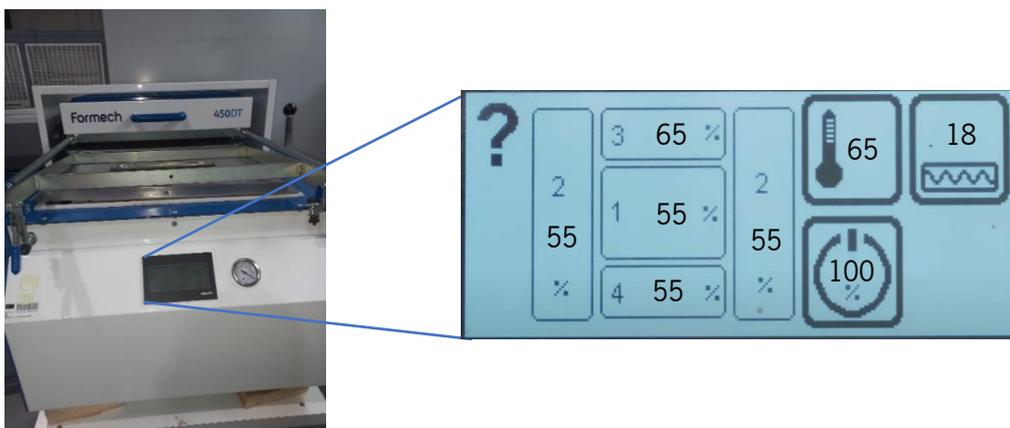


Figura 29. Representação dos valores atribuídos às diferentes zonas de aquecimento.

Por outro lado, para o tempo de aquecimento foi possível constatar que o filme aquecia demasiado a partir dos 20 segundos de exposição e criava microfissuras na tinta funcional. No entanto, para tempos de exposição de 17 segundos o filme não conseguia termoformar pois a temperatura de conformação ainda não tinha sido atingida (Figura 30).

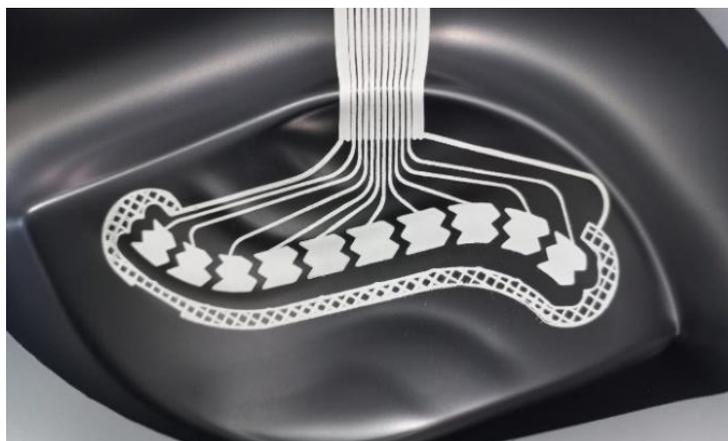


Figura 30. Filme termoformado com tempo de exposição insuficiente (17 s).

Através destes testes iniciais foi possível aferir que o tempo de exposição ótimo para garantir a funcionalidade do produto é de 18 segundos, acrescentando o tempo de abrir a máquina e subir o molde, uma vez que a termoformadora utilizada o exige. Esta imposição de máquina torna o processo muito variável já que o facto de o filme ficar exposto à temperatura ambiente tem influência.

Assim, esta primeira abordagem levou à obtenção das condições ditas “ideias” de conformação (0.5 bar, zona 3 a 65% e restantes zonas a 55% e 18 segundos de exposição), sendo visível que a janela operatória encontrada é limitada.

Terminada esta primeira fase, termoformaram-se as amostras impressas nas condições determinadas de forma a ser possível sobreinjetar peças suficientes que garantam o minucioso ajuste do processo de moldação por injeção.

As conformações obtidas nas condições ótimas, permitiram proceder à medição da resistência elétrica conforme descrito em 3.3.2. A Figura 31 representa a média da resistência elétrica nos diversos pontos de medição para cinco amostras dos filmes termoformados. Pela análise dos resultados é possível afirmar que a fase de termoformação provocou o aumento da resistência elétrica variando entre 3 a 5 vezes mais em todos os pontos da medição, tendo como efeito a diminuição considerável da transmissão de corrente elétrica, o que à partida comprovou

que a deformação afetou a tinta de prata. Esta conclusão permitiu averiguar que o estiramento e temperatura de aquecimento promoveram o aumento da resistência elétrica. Para além disso, é notório que o desvio padrão calculado após termoformação alcançou 2 a 13 vezes mais (cálculos em anexo 6). Este aumento considerável poderá estar associado ao facto de o estiramento deformar a linha do circuito e, ao ficar mais fina, impedir a existência de um caminho curto para a passagem de corrente devido à quebra da continuidade. A obtenção da peça final começa a estar comprometida com esta etapa, uma vez que, a tinta funcional apesar de resistir, não garante condutividade necessária em todos os pontos de medição.

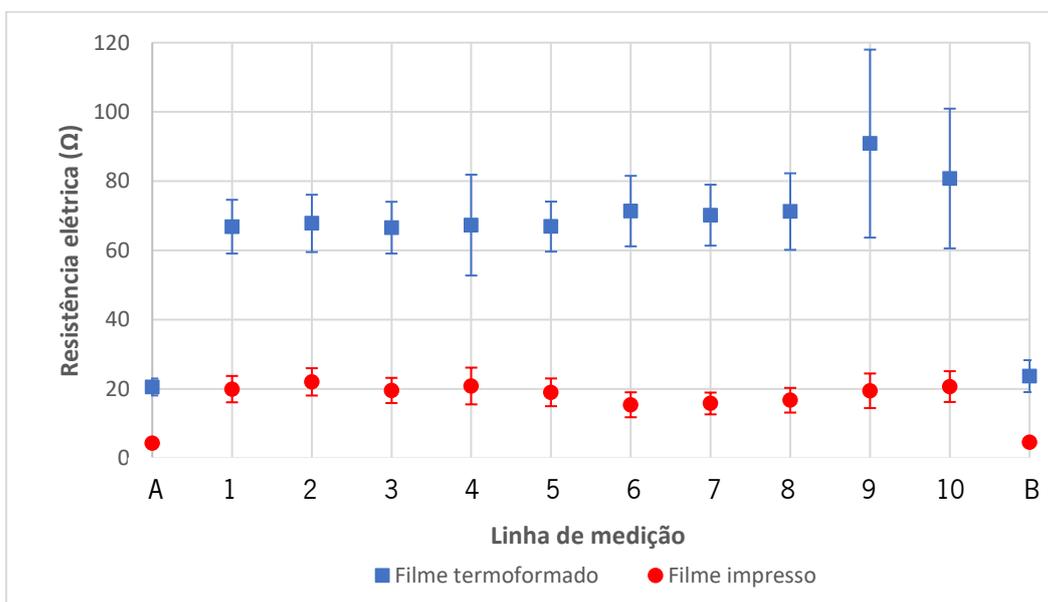


Figura 31. Resultados obtidos após termoformação das amostras nas condições finais.

4.4 Simulação realizada

O software *Moldex 3D* permitiu efetuar uma avaliação do processo de injeção, pelo que neste capítulo serão discutidos os resultados mais relevantes das diferentes simulações.

Iniciando pela *RUN 1'*, em que foram consideradas as condições aconselhadas pelo software, esta permitiu analisar dados do processo relativos à moldação por injeção, nomeadamente:

- O tempo de enchimento é suficiente para encher ambas as partes totalmente, antes de terminar esta etapa do processo.

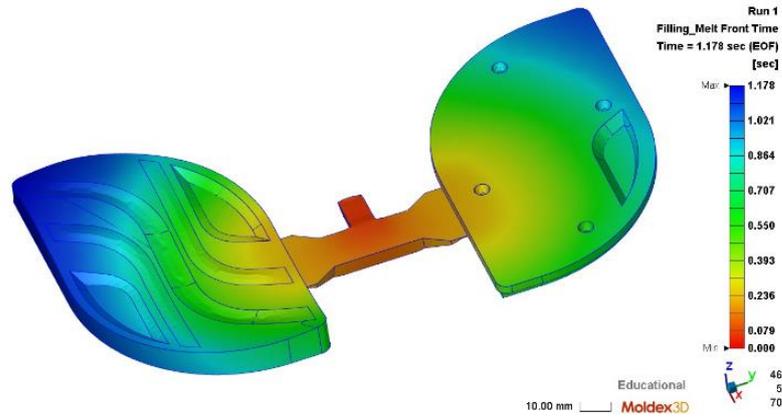


Figura 32. Tempo de enchimento.

- A contração obtida para a peça que contém o filme ronda em média os 0,77%, sendo que a peça de encaixe apresenta uma média relativamente inferior (0,75%), o que seria de esperar que acontecesse visto que o material em questão apresenta um valor típico de contração de 0.8%.

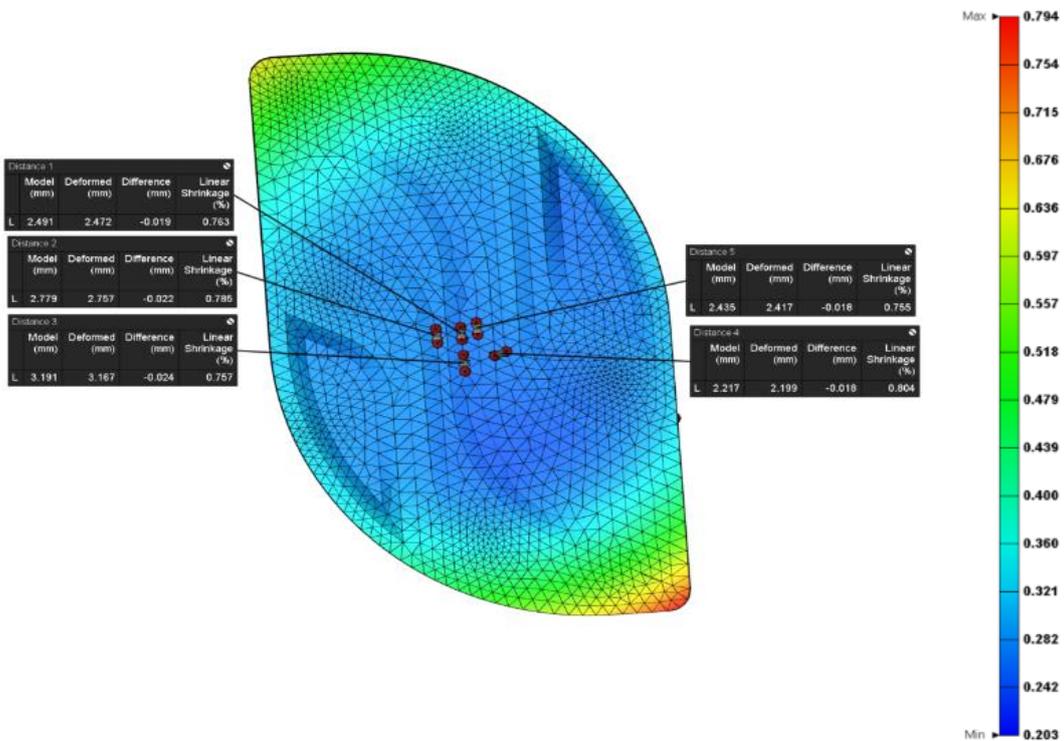


Figura 33. Contração da peça com o inserto.

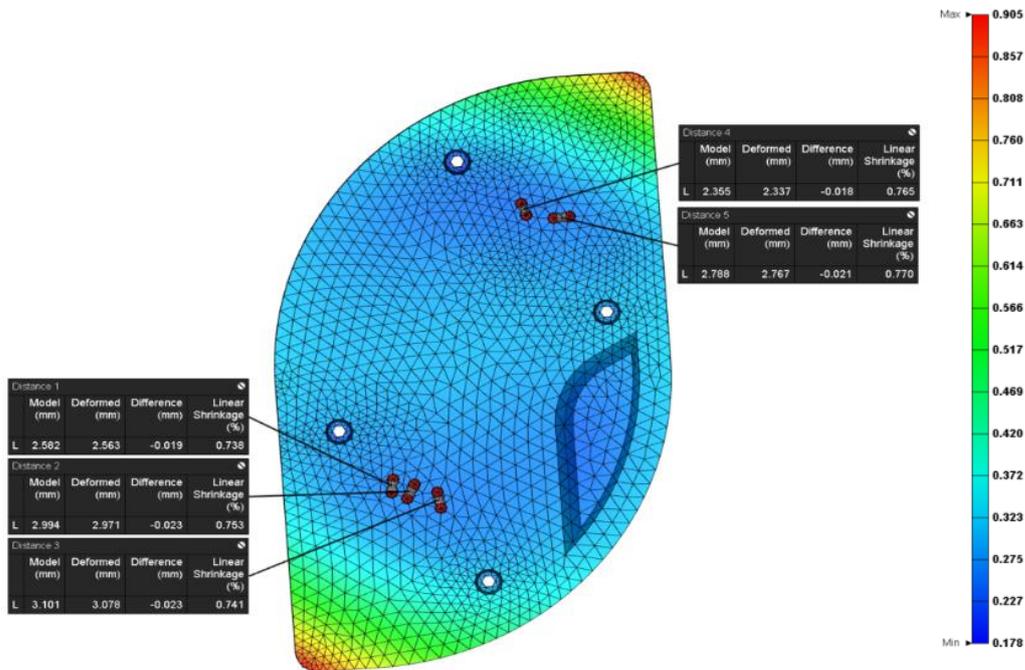


Figura 34. Contração da contra-peça.

- No final da fase de arrefecimento, a temperatura de arrefecimento das peças difere, em particular na zona superficial central das peças, devido à variação de volume entre elas. Em contrapartida, a zona dos cantos é onde o arrefecimento é mais rápido.

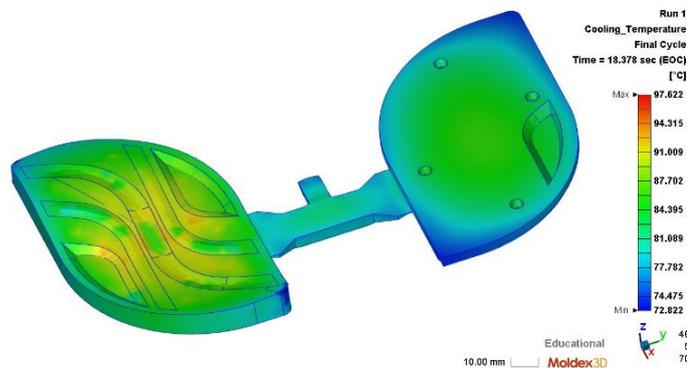


Figura 35. Temperatura de arrefecimento.

Por outro lado, no interior da peça, é visível um arrefecimento uniforme ao longo da sua espessura. No entanto, as zonas dos castelos são as zonas críticas do arrefecimento resultado da acumulação de material.

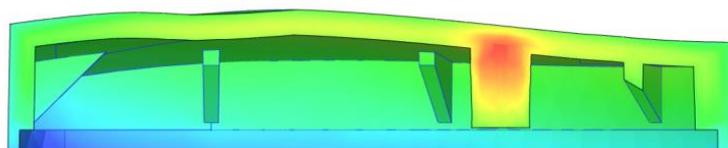


Figura 36. Arrefecimento no interior da peça.

- Adicionalmente, foi possível verificar que ambas as peças se encontram acima da temperatura de não-escoamento no final do arrefecimento, apenas se verificando alterações no ataque. Este resultado destaca que no final do arrefecimento as peças se encontram com temperaturas inferiores à temperatura de ejeção (124°C), facilitando a desmoldação.

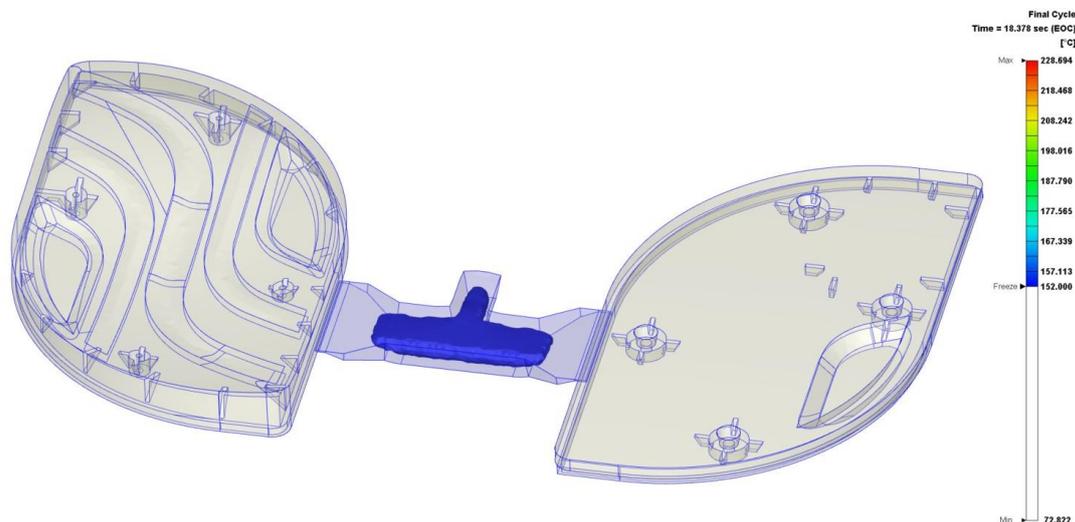


Figura 37. Núcleo no final do arrefecimento.

De forma a complementar o estudo, foi ainda realizado um plano experimental com as diferentes condições do processo definidas na Tabela 4, de modo a analisar o impacto das variáveis no resultado. Estes foram avaliados no sentido de garantir que apesar de o molde de injeção já desenvolvido se destinar a materiais carregados para a tecnologia LDS, a sobreinjeção com PC/ABS seria adequada.

1. Remelt (refusão)

Em termos práticos, o remelt do filme deve ser promovido de forma a existir uma boa aderência entre os materiais, pelo que o filme deverá voltar a fundir por contacto com o material quente, para que haja uma boa ligação entre o filme e polímero injetado. Contudo, neste caso concreto, esta fusão poderá resultar em arrastamento da tinta condutora de prata e, conseqüente, no comprometimento da função do produto final.

Ao avaliar as diferentes simulações efetuadas é possível concluir que a temperatura (na interface) é baixa e, por isso, a simulação não permite identificar a ocorrência ou não da união dos dois componentes. Por outro lado, na zona onde se encontra o flat cable posicionado, é possível que a aderência de materiais seja baixa indicando que a capacidade de fundir nesta zona é relativamente inferior aquando da comparação com a zona de contacto com os canais de

alimentação. Tendo por base os diferentes resultados obtidos, é possível aferir que a que apresentou melhores resultados foi a simulação que utilizou uma temperatura do fundido de 280°C e uma velocidade de injeção de 50 mm/s. Relativamente às restantes iterações, é notório que com o aumento da velocidade de injeção, o *remelt* se vá dando em novas áreas, e para valores de temperaturas superiores esse efeito é ainda mais intensificado, uma vez que devido à espessura reduzida do canal de alimentação a taxa de corte tem tendência a ser maior.

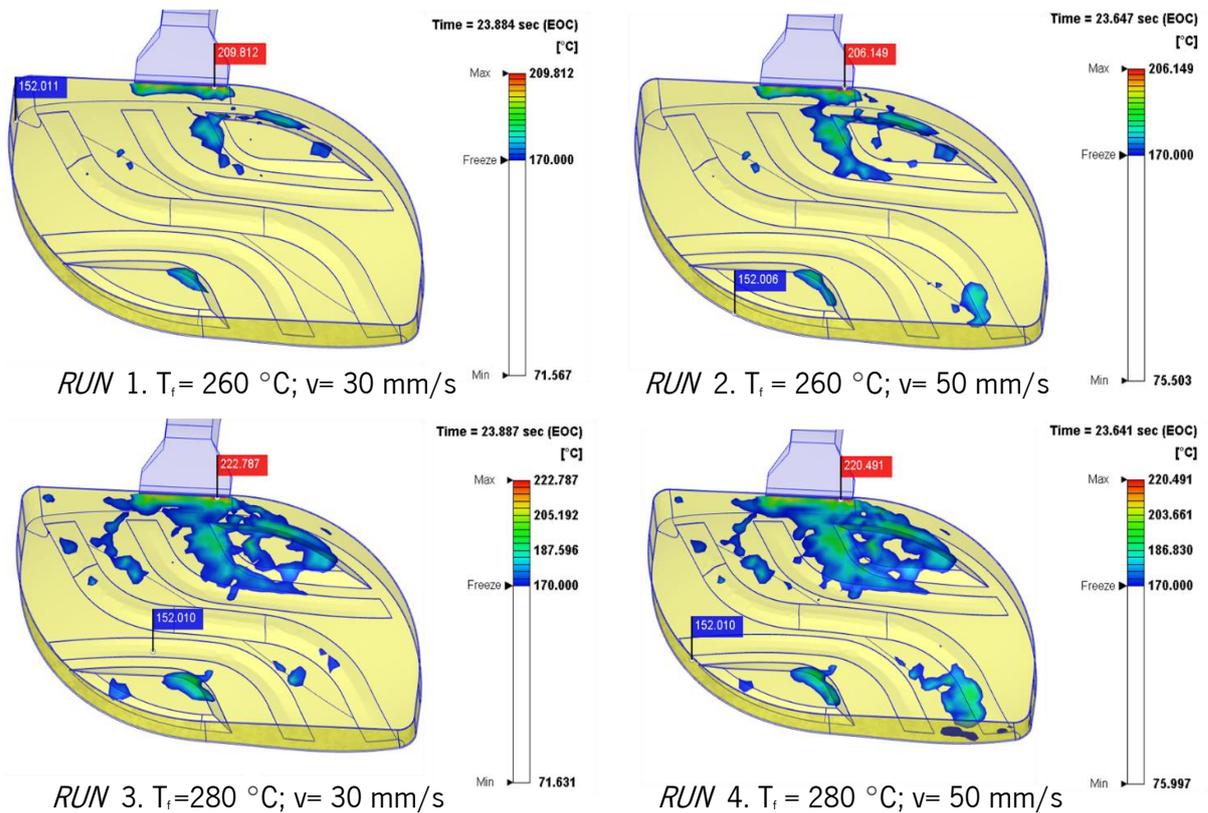


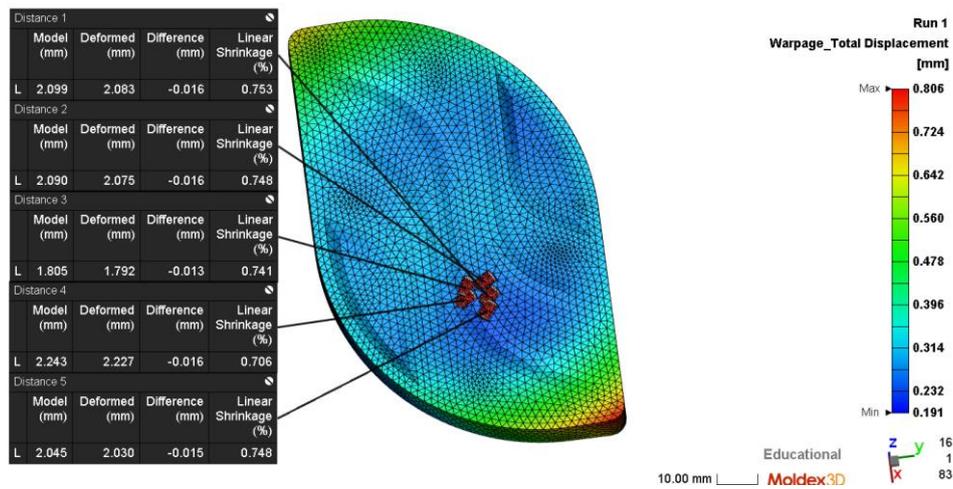
Figura 38. Resultados obtidos para o remelt.

2. Contração

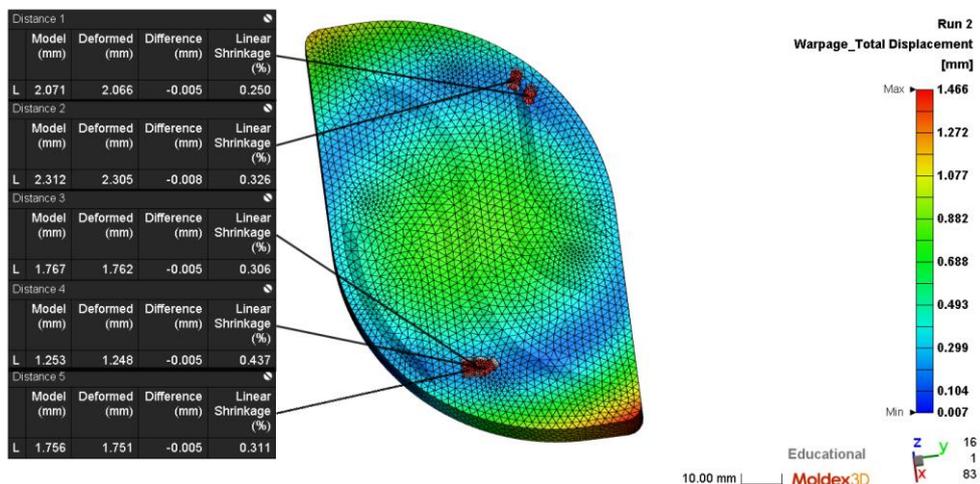
A contração é um fator de relevo quando se fala em deformações e empenos na peça injetada. Desse modo, uma contração uniforme garante a inexistência de empenos, essencialmente em zonas cuja espessura é reduzida.

Em todos os resultados obtidos no âmbito da contração, é possível verificar que os valores não foram em média superiores a 0,79%, encontrando-se dentro da gama típica do material (0,8%), sendo que em todas as simulações, os valores máximos atingidos são relativamente próximos. No caso das *RUN*'s que utilizaram velocidade de injeção mais elevada (50 mm/s), os valores de contração foram inferiores. No entanto, ao considerar a alteração de temperatura de injeção a variação da contração não foi significativa. Ao observar cada condição individualmente, é visível

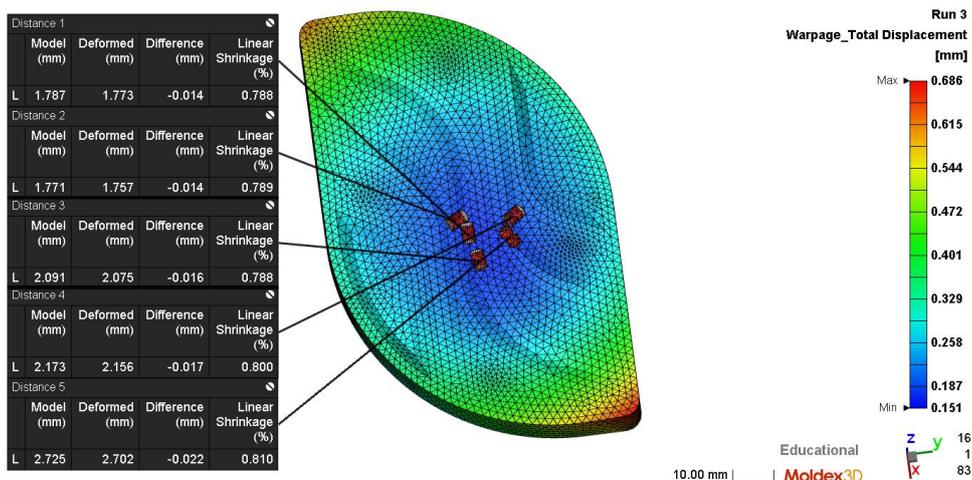
que os valores de contração não sofrem variações significativas.



RUN 1. $T_r = 260\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 30\text{ mm/s}$

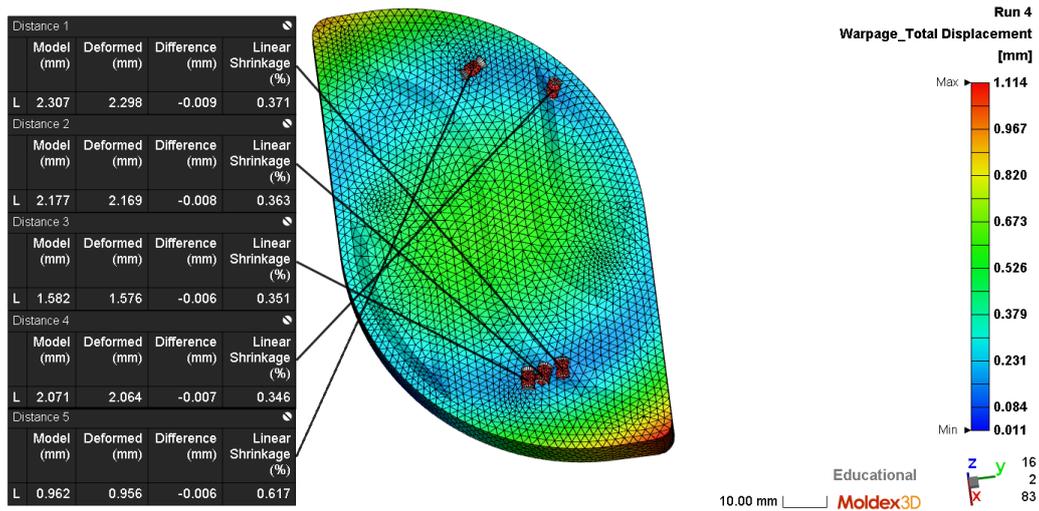


RUN 2. $T_r = 260\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 50\text{ mm/s}$



RUN 3. $T_r = 280\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 30\text{ mm/s}$

Figura 39. Resultados Moldex 3D obtidos no âmbito da contração: RUN 's 1, 2 e 3.



RUN 4. $T_r = 280 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 50 \text{ mm/s}$

Figura 40. Resultados Moldex 3D obtidos no âmbito da contração: RUN 4.

3. Empeno

Na Figura 41 observam-se os resultados obtidos para o empeno previsto das peças nas diferentes definições de parâmetros de processamento, onde é possível reparar que as zonas das extremidades, que correspondem à última zona da peça a ser preenchida, são as mais críticas.

Em todas as iterações efetuadas, os empenos apresentados não superam 1,5 mm (podendo a peça apresentar deformação) e apresentam valores relativamente próximos. Contudo, analisando os resultados conclui-se que:

- As *RUN*'s 1 e 3 foram as que apresentaram melhores resultados e as *RUN*'s 2 e 4 as que revelam pior resultado fruto da elevada velocidade de injeção;
- Apesar de nas *RUN*'s 1 e 3, o valor máximo de empeno não ser superior a 0,9 mm, o aumento da temperatura de injeção conseguiu minimizar a tendência de empeno;
- Enquanto, nas *RUN*'s 2 e 4 o empeno verificado possui uma zona envolvente na qual este é mínimo, limitando a zona central, nas *RUN*'s 1 e 3 o empeno varia de forma homogênea desde a zona central até às extremidades.

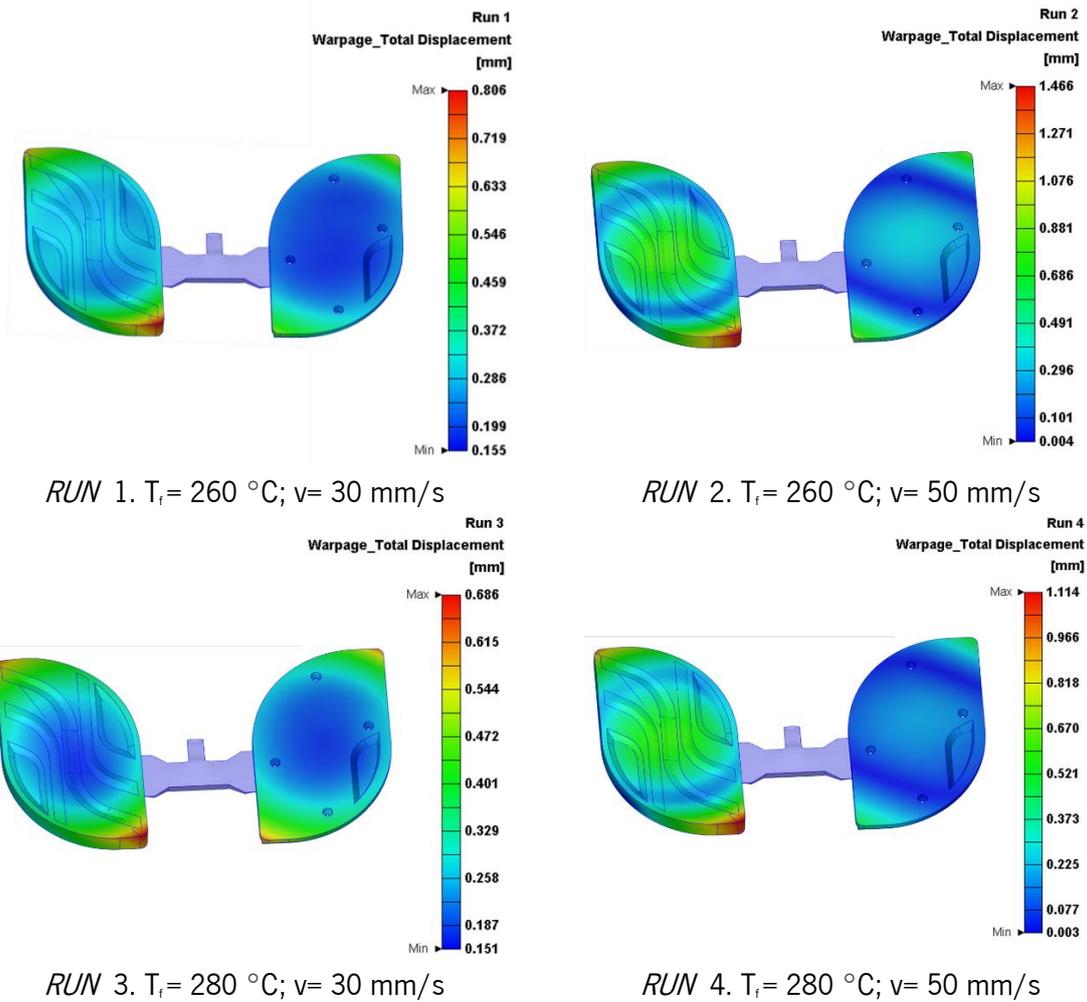


Figura 41. Resultados obtidos para o empeno.

Relativamente à deformação, esta é visível de forma mais saliente nas condições 1 e 3 na qual se utilizou velocidade de injeção de 30 mm/s. No entanto, é notório que a deformação ocorrida é mínima em todas as condições simuladas.

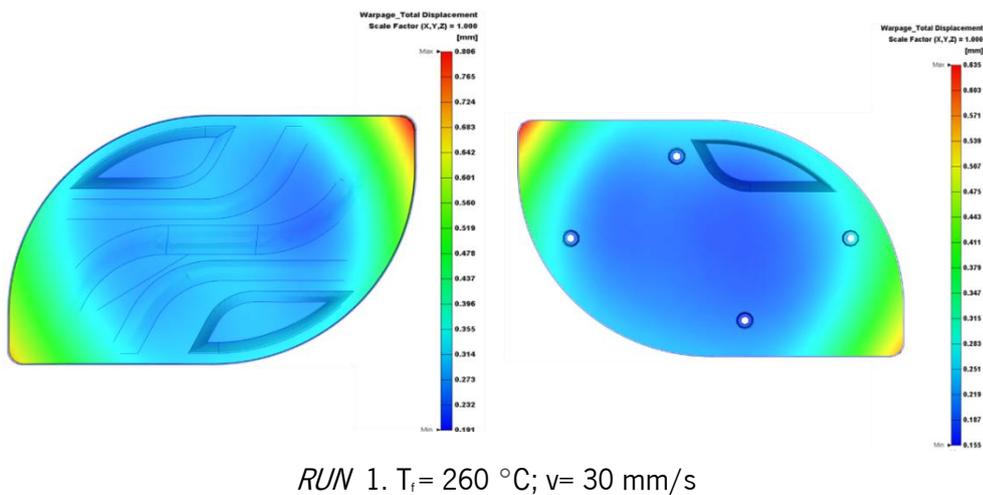
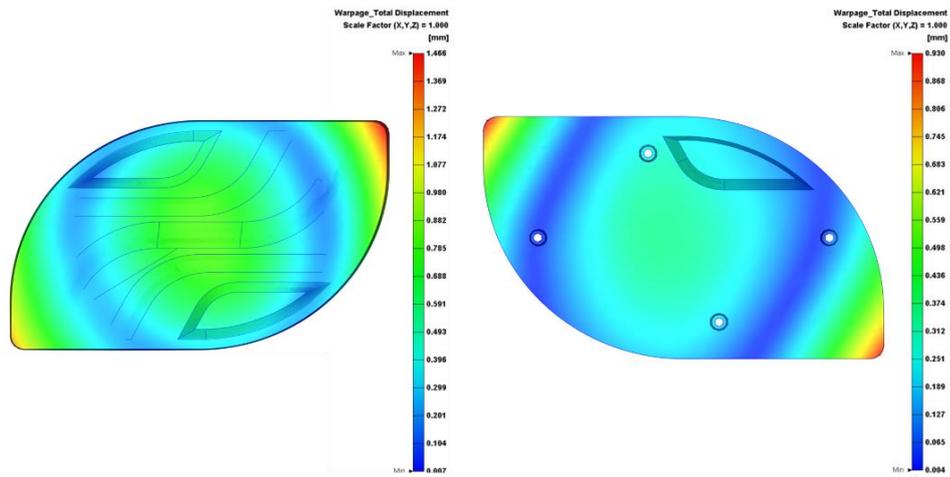
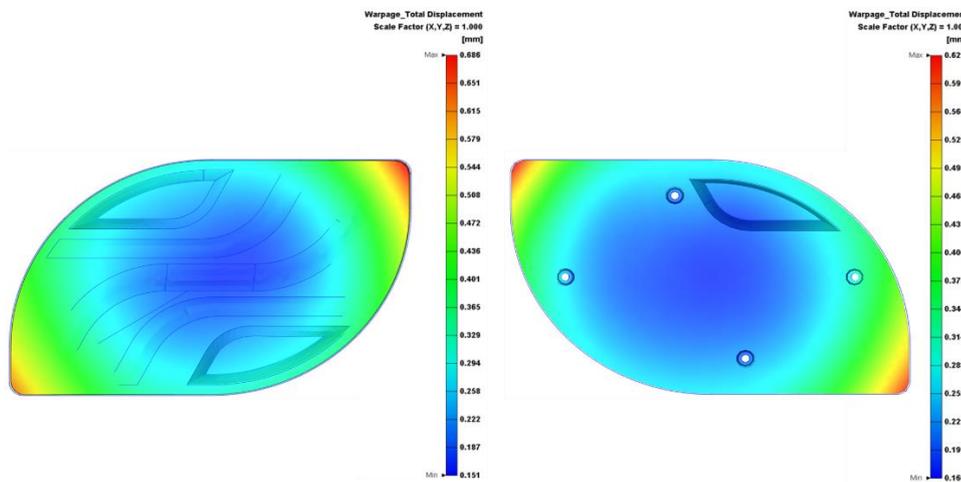


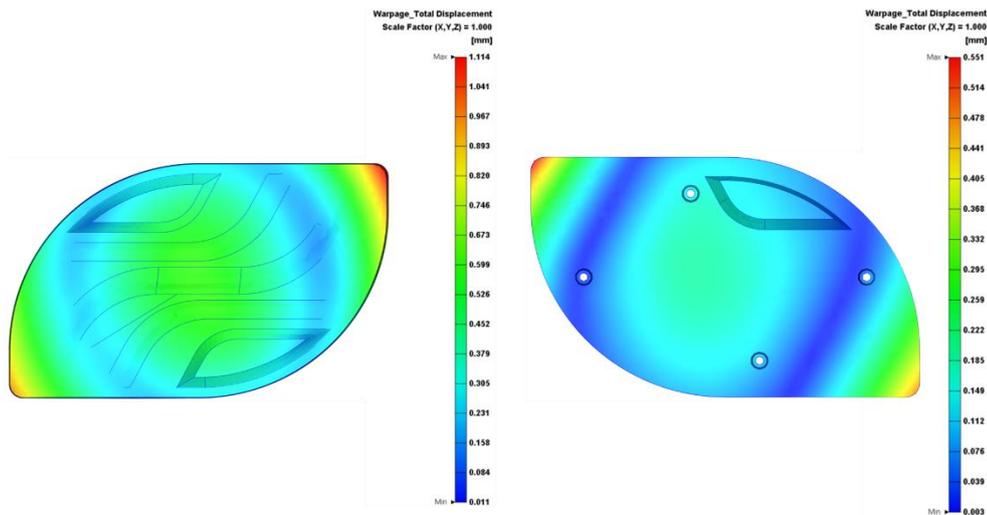
Figura 42. Deformação para a RUN 1.



RUN 2. $T_f = 260\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 50\text{ mm/s}$



RUN 3. $T_f = 280\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 30\text{ mm/s}$



RUN 4. $T_f = 280\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 50\text{ mm/s}$

Figura 43. Deformação visível nas RUN's 2, 3 e 4.

Para todas as condições estudadas, verificou-se a tendência de empeno com um fator de escala igual. Em todos os resultados, é visível que a deformação ocorreria pelos cantos da peça podendo resultar em problemas de encaixe entre os dois componentes (Figura 44).

Esta análise permitiu verificar que velocidade de injeção tem mais influência no empeno do que a temperatura de injeção, já que a proporção de variação não é igual. Enquanto tornar a velocidade de injeção superior praticamente duplica o empeno, aumentar a temperatura de injeção, para além de diminuir o empeno, diminui numa proporção significativamente inferior.

Ainda assim, é de salientar a diferença entre as duas partes injetadas, pois a peça que incorpora o filme impresso tende a sofrer maior distorção relativamente à peça de encaixe inferior, sendo por isso necessário ter especial atenção para garantir a união entre peças. Esta diferença é verificada pelo facto de o filme plástico ser mau condutor de calor e, conseqüentemente, afetar a taxa de transferência de calor.

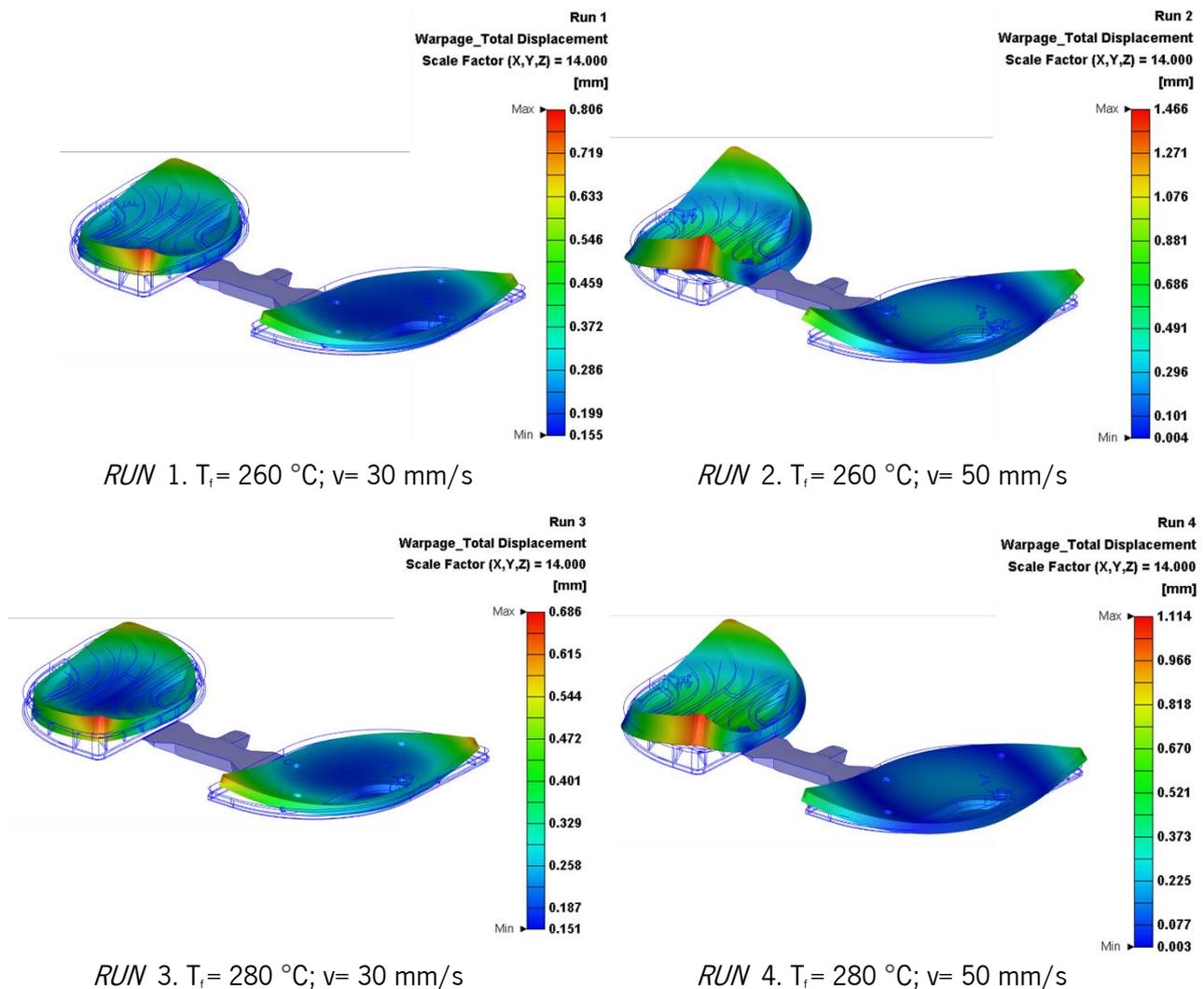


Figura 44. Tendência de empeno exagerado das peças moldadas.

4. Chupados

A presença de chupados na peça é caracterizada pela presença de pequenas depressões na superfície da peça e pode dever-se a contrações volumétricas das zonas interiores. Este fenómeno é explicado pelo arrefecimento das camadas exteriores de material, que ao arrefecerem lentamente, são estiradas pelas camadas internas.

Pela análise das Figuras 45 e 46, este tipo de defeito ocorre, essencialmente, em zonas de maior espessura (p.e., zonas de contorno ou de engates da peça), caracteristicamente zonas com maior acumulação de material. Estas marcas podem influenciar o processo de sobreinjeção do filme, uma vez que a presença dos chupados pode resultar na criação de vazios e, conseqüentemente, comprometer a aderência do filme ao material injetado. Caso a aderência não seja perfeita, a peça pode estar sujeita a tensões internas que futuramente poderão propiciar a remoção do inserto.

No caso particular da RUN 2 (T1V2) esta resultou em chupados menos profundos não ultrapassando 0,035 mm. Já na RUN 4 (T2V2) o valor máximo obtido continua relativamente próximo (0,039 mm).

Os piores casos, RUN 's 1 (T1V1) e 3 (T2V1), na qual se utilizou uma temperatura de injeção de 260 °C apesar de apresentarem valores máximos superiores às anteriormente referidas, esta subida não foi significativa não excedendo 0,071 mm. Desse modo, é possível afirmar que quer a velocidade de injeção, quer a temperatura de injeção, apesar de influenciarem a presença de chupados nas peças, não demonstraram uma importância relevante para este caso de estudo uma vez que os valores não são significativos.

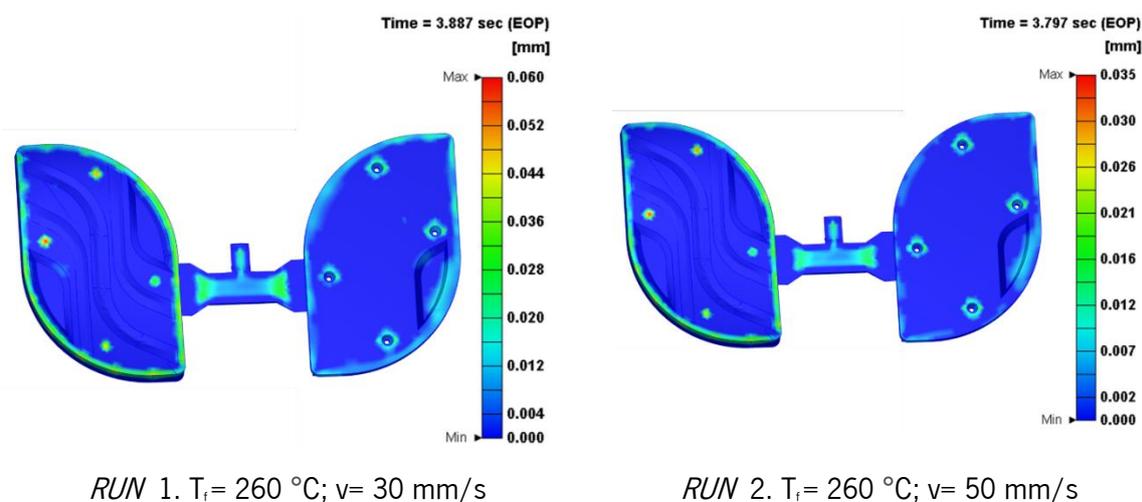


Figura 45. Localização dos chupados: RUN 's 1 e 2.

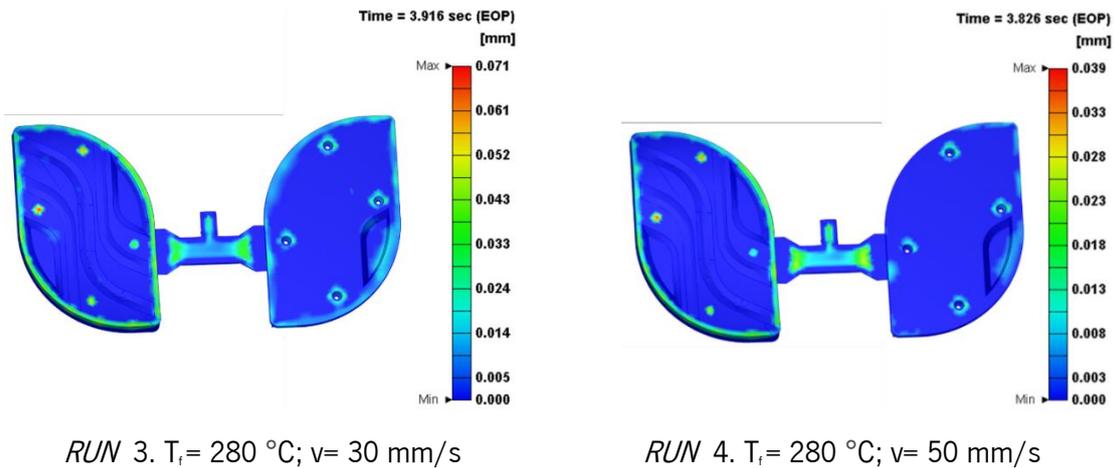


Figura 46. Localização dos chupados: *RUN*'s 3 e 4.

5. Força de Fecho

Por comparação de resultados, é possível verificar que na *RUN 2* a força de fecho obtida é superior à força máxima permitida pela máquina que se pretende utilizar, cuja capacidade equivale a 200 toneladas. Posto isto, a opção deveria passar por descartar esta condição de processamento já que a capacidade da máquina poderá ser insuficiente para estas condições.

Em contrapartida, as condições de processo utilizadas para as *RUN*'s 1, 3 e 4 não atingem os valores limite da *Billion H150/470*, contudo considerando um fator de segurança de 30% a *RUN 4* poderá também não atingir os valores de capacidade da máquina ou trabalhar muito nas condições limite e, por isso, a decisão passaria por também desconsiderar estas condições usadas. Assim, é possível retirar que as melhores condições obtidas foram as utilizadas nas *RUN*'s 1 e 3, ou seja, as quais utilizaram valores de velocidade injeção menores, mas ainda assim objetivou-se replicar estas condições na realidade de forma a validar o modelo teórico.

Pela observação das curvas da força de fecho nas condições 1 e 3 (Figura 47), é possível observar dois picos (conforme assinalado na curva da *RUN 3*) que poderão estar associados à baixa velocidade de injeção.

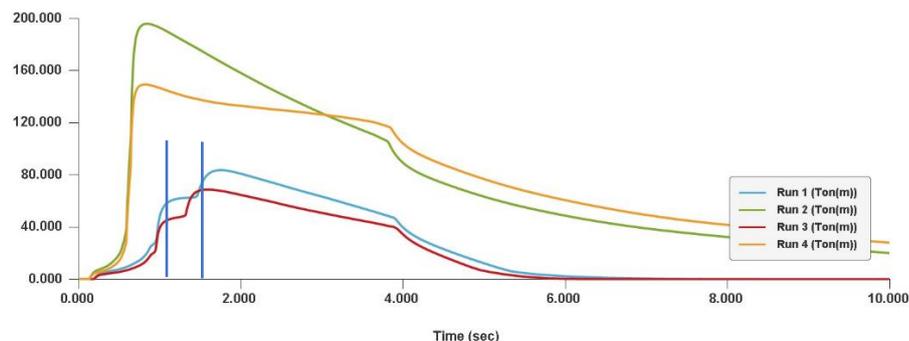


Figura 47. Curvas da força de fecho.

6. Tempo de enchimento

A Figura 48 retrata o tempo de enchimento nas quatro condições pré-definidas. É de destacar que enquanto para uma velocidade de 50 mm/s a peça se encontra totalmente preenchida ao final do tempo de enchimento (0,65 s), as peças moldadas a uma velocidade de injeção de 30 mm/s só ficam totalmente completas após a compactação. Pela observação das condições 1 e 3, na qual o enchimento não foi completo, é também de salientar a diferença de enchimento entre as peças inferior e superior resultado da variação de volume entre elas, destacando a existência de dois tempos de enchimento distintos, e daí os dois picos presentes na curva da força de fecho.

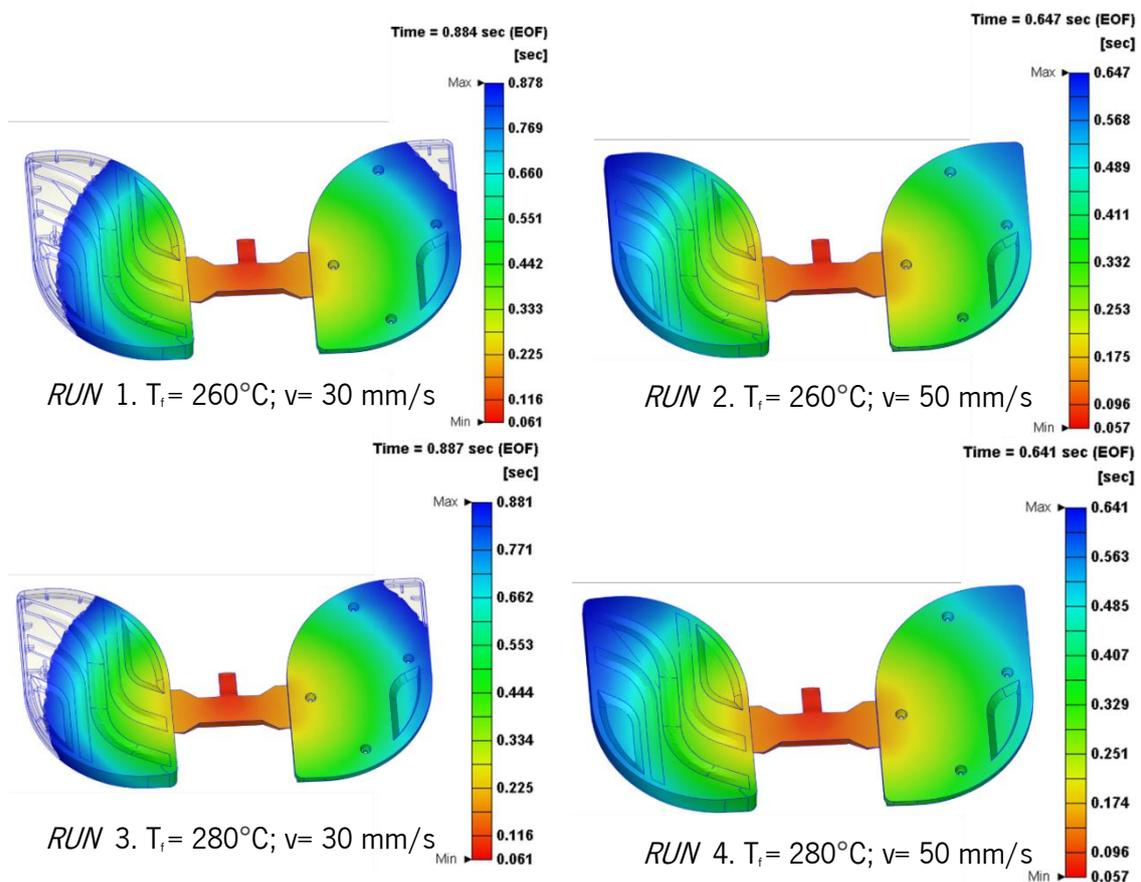


Figura 48. Resultados obtido para o tempo de enchimento.

4.5 Sobreinjeção

Na abordagem inicial de injeção de peças sem a inserção do filme, as primeiras amostras moldadas, permitiram verificar a diferença de tempos de enchimento entre as peças superior e inferior e assim, comprovar a simulação de enchimento. Esta interpretação levou a perceber que enquanto uma das peças fica totalmente completa, a peça que contém o inserto ainda se encontra em processo devido às diferenças de volume e sistema de alimentação não balanceado.



Figura 49. Diferenças de enchimento das peças moldadas.

Em seguida, numa abordagem preliminar foram injetadas peças de modo a analisar se a temperatura do molde de 80°C permitia a não degradação do filme impresso. Nestas primeiras peças foi possível verificar que o filme não poderia ser cortado pela dimensão do molde de injeção, mas com dimensões menores de modo que o canal de alimentação não se sobrepusesse e dessa forma levasse o filme a ficar na zona inferior da peça, comprometendo o aspeto estético pretendido de alto brilho. A Figura 50 retrata uma peça no qual este efeito se verificou, e onde é notável o comprometimento estético e funcional do produto.



a)



b)

Figura 50. Incorreto posicionamento do filme: a) Dimensões de corte superiores; b) Filme na parte inferior da peça moldada.

Para além disso, destaca-se o facto de o molde não ser adequado para este tipo de processamento. Inicialmente, o referido interruptor foi desenvolvido para que o circuito fosse produzido através da tecnologia LDS, assim, o molde não se encontra preparado para receber um inserto sob a forma de filme impresso com flat cable. De forma a adaptar a passagem do flat cable para o interior da peça e garantir o encaixe perfeito foi necessário que fosse adaptado o molde de injeção. Adicionalmente, as dimensões do canal de alimentação são demasiado elevadas para o retirar sem quebrar a peça e por isso, deveria ser ponderada esta hipótese.



Figura 51. Fratura da peça provocada pela remoção do canal de alimentação.

Posteriormente, para a realização da última etapa (sobreinjeção) replicaram-se as condições simuladas. Analisando as amostras do presente estudo, particularmente a condição 4 na qual é usado quer temperatura quer velocidade elevada, é possível verificar a existência de raiados nas peças.

Na Figura 52 é possível verificar a existência deste defeito.



Figura 52. Raiados na peça.

Num estudo realizado por Chen et al. (1997), para a produção de um para-choques, é possível identificar causas associadas ao aparecimento de raiados. No referido estudo é abordada a dificuldade na fabricação de um produto, fruto da existência de riscos prateados (raiadados) nas peças e moldações incompletas. Através da análise dos resultados experimentais foi possível concluir que os fatores preponderantes para o aparecimento deste defeito estão intrinsecamente associados à temperatura do molde, tempo de enchimento e velocidade de injeção [62]. Assim sendo, as amostras produzidas no âmbito da dissertação foram claramente realizadas em condições divergentes, pois, o resultado obtido não foi o melhor.

Na Figura 53 é possível observar uma amostra de cada uma das 4 condições realizadas.

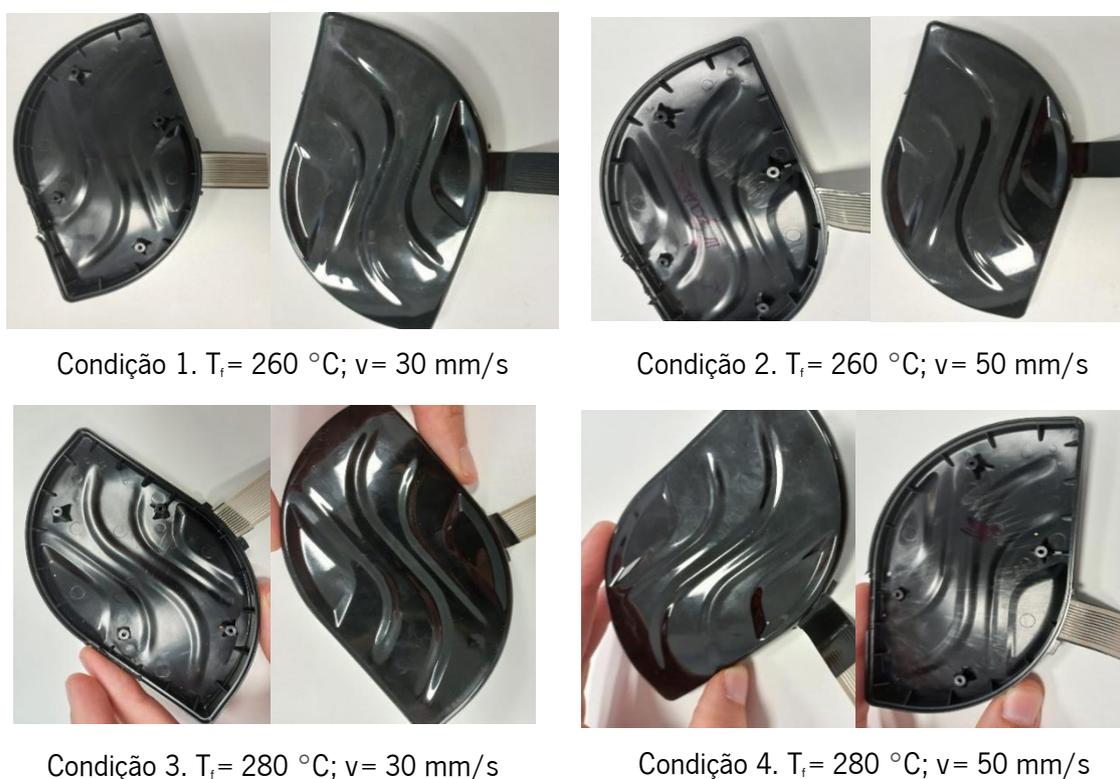


Figura 53. Amostras injetadas nas diferentes condições.

Avaliando os resultados é possível verificar que o aumento da velocidade de injeção intensificou a existência deste defeito. Além disso, e por concordância com o já referido, também para valores de altas temperaturas é notável, visualmente, a presença deste efeito já que, para a mesma velocidade, a diminuição do perfil de temperatura provoca mitigação do defeito nas amostras.

De forma complementar nas amostras cuja temperatura usada foi 280 °C começa a ser visível a intensificação da presença de rebarba. Embora nas amostras produzidas com temperatura de 260 °C este tipo de defeito seja observado, quase não é visível, retratando que o aumento da temperatura do fundido permite que o fundido se espalhe mais facilmente.

Por outro lado, apesar da presença deste defeito, a incorporação do inserto (filme) omite a aparência da moldação tornando a peça esteticamente mais apelativa.

Em suma, na verificação experimental, apenas se pode concluir que as melhores condições para garantir um "processo ideal" devem incluir uma temperatura do fundido de 260 °C, e um menor valor de velocidade de injeção correspondente a 30 mm/s. Pela análise de resultados foi ainda possível concluir que a máquina conseguiu responder a todas as condições dentro dos parâmetros, contrariamente às simulações realizadas, uma vez que nestas, os valores da força de fecho nas condições 2 e 4, se encontravam muito no limite da máquina de injeção ou fora dele. No entanto, as simulações poderão não representar a realidade devido a ter sido considerado um fator de segurança elevado (30%).

A medição de resistência elétrica nesta etapa é enfatizada de forma a validar a funcionalidade do produto acabado, contudo neste caso o multímetro não possui sensibilidade de leitura na gama dos resultados, devido às pistas estarem sobremoldadas com polímero. Desse modo, recorreu-se a um LCR meter de precisão, que apesar da instabilidade de sinal e dificuldade de medição, permitiu obter valores de resistência extremamente elevados (a rondar MΩ), concluindo-se que a sobremoldação comprometeu a passagem de corrente elétrica, tornando o produto muito resistivo. Assim, para comprovar a operacionalidade do componente em estudo, ligou-se o flat cable a um PCB (Figura 54). Este componente está ligado a um LED que possui um controlador de forma que o interruptor seja capaz de ligar ou desligar, bem como alterar a intensidade da fonte luminosa.

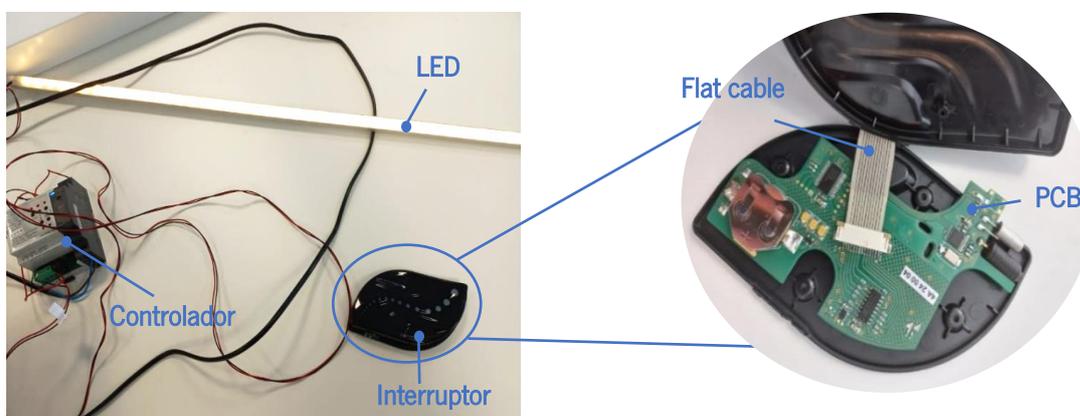


Figura 54. Componentes eletrónicos.

A Tabela 12 retrata o resultado da funcionalidade das peças injetadas nas diferentes condições atribuídas ao processo. Pela observação destes é possível referir que velocidades e temperaturas demasiado elevadas comprometem a funcionalidade do produto e somente a condição 1 permitiu obter duas peças funcionais. Ainda assim, reflete-se que a etapa de sobreinjeção comprometeu a funcionalidade da peça final, uma vez que a tinta não resistiu de modo a que esta tivesse a condutividade elétrica necessária. As peças não funcionais deveram-se, essencialmente, ao facto de o polímero que é sobreinjetado quebrar a tinta na zona do flat cable.

Tabela 12. Funcionalidade das peças injetadas.

Condição 1		Condição 2	
Amostra 1		Amostra 1	
Amostra 2		Amostra 2	
Amostra 3		Amostra 3	
Amostra 4		Amostra 4	
Amostra 5		Amostra 5	
Condição 3		Condição 4	
Amostra 1		Amostra 1	
Amostra 2		Amostra 2	
Amostra 3		Amostra 3	
Amostra 4		Amostra 4	
Amostra 5		Amostra 5	

Este primeiro modelo protótipo resultante da implementação do processo IME, encontra-se na Figura 55. Esta corresponde a um dos demonstradores das peças cujo funcionamento não estava comprometido. No entanto, é de reparar que o produto obtido possui pouca sensibilidade, uma vez que, para diferentes pessoas, ou seja, para fontes promotoras de capacitância diferentes, o produto não opera de igual forma. A capacitância corporal é o fator chave para o funcionamento do interruptor já que, é a principal responsável por conferir características elétricas ao corpo humano [63]. Dessa forma, é possível que o interruptor não funcione de igual forma para todos os que o testarem, uma vez que poderá não ter sensibilidade suficiente para ser ativado. Reajustar o alcance do demonstrador deverá ser o próximo passo a realizar no futuro.



Figura 55. Demonstrador final.

Tal como supramencionado, o interruptor possui sensibilidade ao toque de forma a alternar a intensidade da fonte luminosa. Na Figura 56 é possível observar a diferença de intensidades da lâmpada LED.

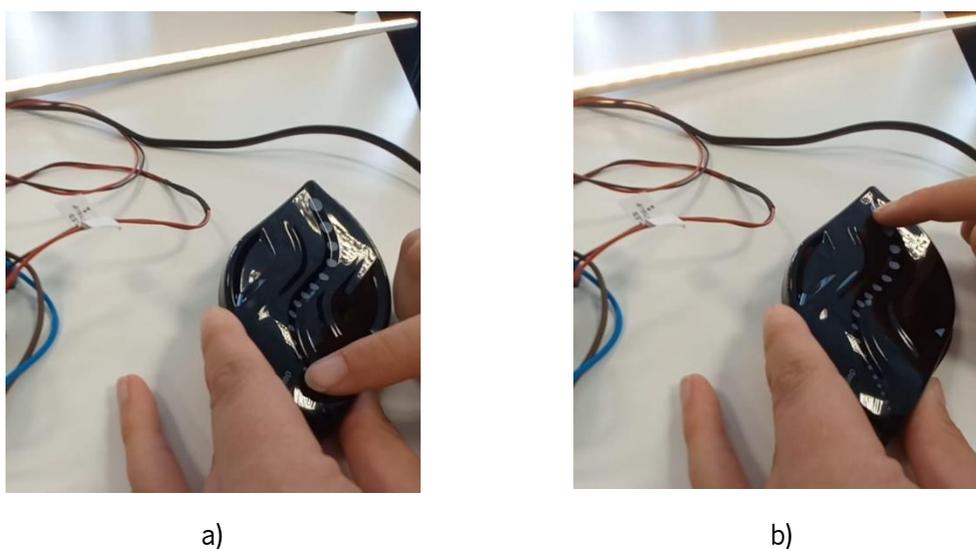


Figura 56. Níveis de intensidade do interruptor desenvolvido: a) mínimo; b) máximo.

4.6 Caracterização dos filmes e peças injetadas

1. Morfologia

Relativamente à amostra 1 (i.0%C) presente na Figura 57, averigua-se que a espessura de tinta condutora ronda os 6 μm , contudo é possível denotar que a espessura pode variar em cerca de 2,22 μm num dos pontos. Esta variação pode espelhar que a tinta que atravessou a malha de impressão não ocorreu de forma igual podendo estar associada à operação manual do processo.

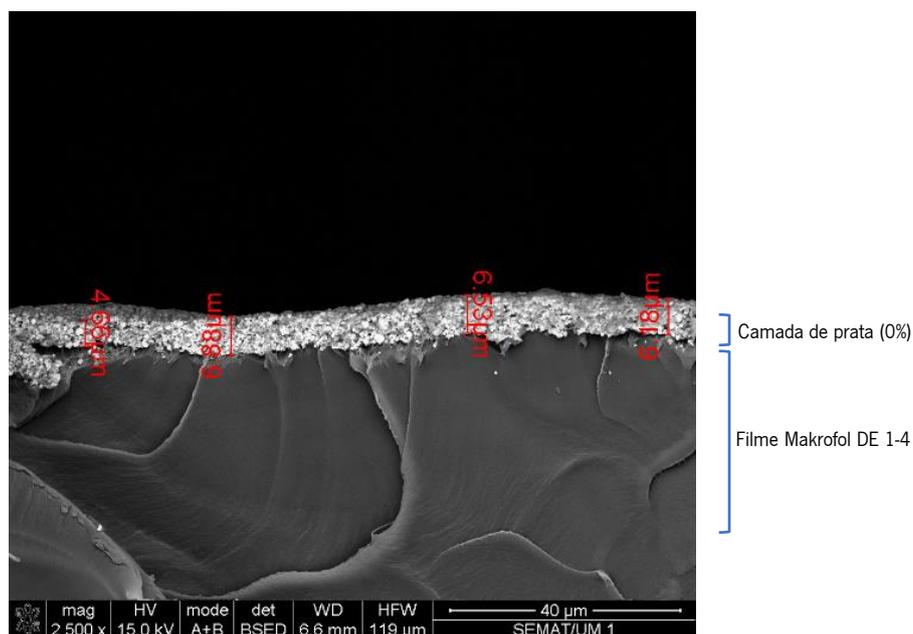


Figura 57. Resultado obtido em SEM para a amostra 1 (i.0%C).

Por outro lado, na Figura 58 (amostra 2, i.10%C), ou seja, para o filme impresso com a tinta funcional diluída, verifica-se a diminuição da espessura da camada de tinta para metade ($\approx 3 \mu\text{m}$). Esta diminuição resulta da incorporação de solvente na tinta, sendo possível aferir que o aumento da resistência elétrica e, por consequência, a diminuição da passagem de corrente pode refletir-se desta situação. Ainda assim, verificou-se a existência de um ponto com espessura máxima de 6,41 μm e os restantes relativamente menores, refletindo a não uniformidade ao longo da camada de prata.

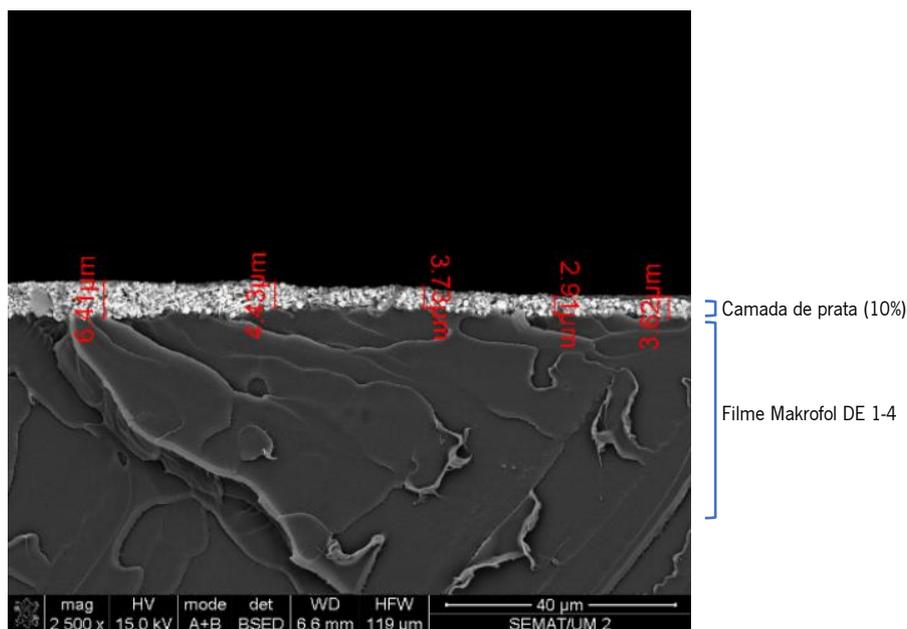


Figura 58. Resultado obtido em SEM para a amostra 2 (i.10%C).

A amostra 3 (i.D+C), representada na Figura 59, está afeta à sobreposição de camadas de tintas na qual se pode verificar maior concordância entre os vários pontos de medição para a camada de prata, uma vez que, a variação ronda (em μm) as casas decimais. Para além disso, e tal como referido anteriormente, seria de esperar que a camada decorativa possuísse uma espessura de camada inferior fruto da diluição. Contudo, a tinta decorativa possui praticamente o dobro da espessura da camada funcional. Este efeito deve-se essencialmente da dificuldade de transferir a tinta decorativa devido à considerável área do padrão a ser impresso. A etapa de impressão, foi claramente dificultada pela transferência do padrão decorativo de forma uniforme, sendo, por vezes, necessário passar o *squeegee* novamente para que a impressão não apresentasse falhas. Assim, é possível que as medições de espessura tenham ocorrido em zonas de falha que exigiram a passagem de mais tinta.

Adicionalmente, na amostra 3 observa-se claramente que a tinta decorativa preta possui reflexão menor comparativamente à tinta de prata condutora, dada a sua natureza à base de carbono, sendo facilmente distinguível a divisão de camadas entre tintas.

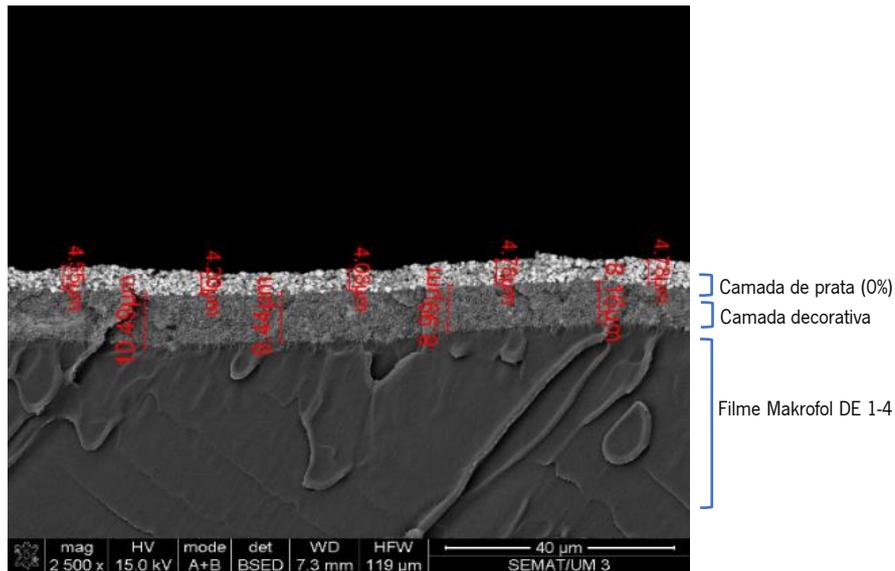


Figura 59. Resultado obtido em SEM para a amostra 3 (i.D+C).

Para a amostra 4 (filme termoformado, t.D+C), é possível observar na Figura 60 que, de uma forma genérica, a espessura não sofreu alterações significativas quando comparada ao filme impresso (i.D+C). Contudo, o expectável seria que ambas as camadas reduzissem a espessura devido ao estiramento sofrido. No entanto, apesar da diferença ser ligeira, observa-se que apenas a camada de tinta decorativa aumentou o valor da espessura. Hipoteticamente, e apesar das condições de impressão serem as mesmas, prevê-se que tenha ocorrido esta ligeira diferença devido à variabilidade do processo pelo facto deste se tratar de um processo manual e pela impossibilidade de realizar a medição na mesma amostra.

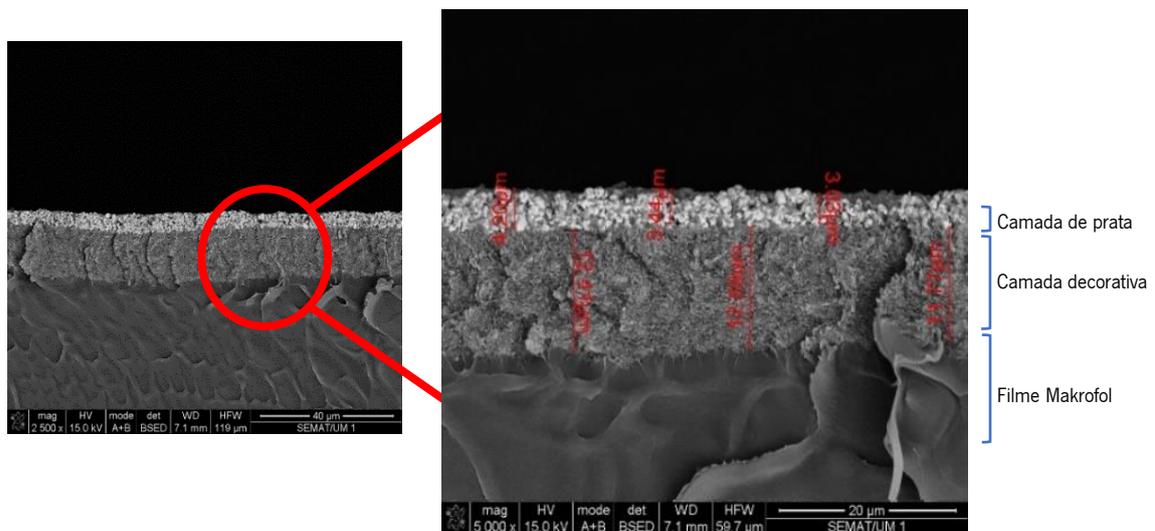


Figura 60. Resultado obtido em SEM para a amostra 4 (t.D+C).

Por outro lado, a Figura 61 retrata o resultado obtido para a amostra 5 (peça injetada, m.D+C). Neste caso salienta-se a diferença mínima de espessura entre ambas as camadas de tinta: decorativa e funcional, rondando os 5 μm . Comparativamente ao filme termoformado e impresso, é visível que a camada de tinta condutora de prata apesar de possuir maior espessura, a diferença não é significativa podendo diferir pelo facto de se tratar de um processo de impressão variável. Contudo, a camada decorativa sofreu uma diminuição significativa, sendo notório que a divisão de camadas deixa de estar tão bem definida quando comparada com os casos anteriores (filmes: impresso e termoformado). Este resultado pode estar associado à pressão de injeção, uma vez que, esta pode ter comprimido a camada de tinta decorativa.

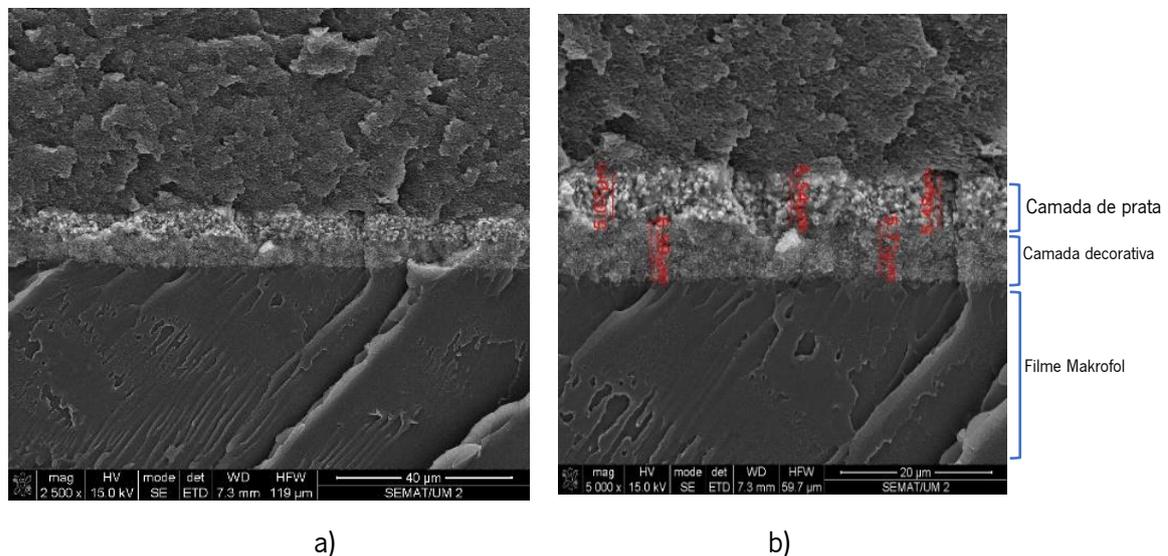


Figura 61. Resultado obtido em SEM para a amostra 5 (m. D+C): a) x2500; b) x5000.

As morfologias das amostras analisadas demonstraram que o processo de sinterização, ou seja, de união de partículas foi insuficiente uma vez que as partículas se encontram isoladas, devendo-se por isso, aumentar o tempo de exposição do substrato à secagem pois, durante o trabalho experimental foi possível verificar que temperaturas superiores ($>120^{\circ}\text{C}$) iriam degradá-lo.

2. Brilho e cor

O brilho foi medido em cinco pontos diferentes quer para a amostra impressa, quer para a amostra termoformada. A Tabela 13 ilustra a média dos resultados obtidos com o medidor de brilho.

Tabela 13. Média das medições de brilho para as amostras.

	20°	60°	85°
Filme impresso	104,10	102,76	97,78
Filme termoformado	67,90	91,96	90,28

É de notar que após a etapa de termoformação, qualquer que seja o ângulo de medição utilizado, o valor medido diminuiu. Este decréscimo reflete que ao sujeitar o filme ao aquecimento, isto poderá afetar a topografia do filme.

Ariño et al. 2005 refere que a presença de rugosidades na superfície e o brilho são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a rugosidade menor será o brilho. Esta relação indica que durante a medição de brilho, a luz emitida é mais dispersa devido à presença de microrrugosidades na superfície do material em análise, uma vez que uma superfície rugosa receciona menos luz pelo medidor de brilho [64]. Assim, esta determinação permitiu associar que o facto de o filme ser submetido à termoformação, poderá provocar saliências no filme polimérico. Contudo, o expectável seria a rugosidade da superfície diminuir após esta etapa devido ao estiramento provocado. Ainda assim, para comprovar isso, mediram-se as rugosidades, da superfície das amostras termoformada e injetada na zona decorativa do padrão, conforme descrito no capítulo 3.4.1.

A Tabela 14 compila as rugosidades da superfície na zona da tinta preta após as três fases do processo produtivo: impressão, termoformação e moldação por injeção. Ao analisar os resultados obtidos, é visível que após a termoformação a rugosidade superficial diminuiu e que após a sobremoldação do filme, esta sofreu um ligeiro aumento. O presente resultado não está conforme com a relação entre rugosidade e brilho anteriormente referida, uma vez que, o brilho diminuiu. Dessa forma, é possível que a medição de brilho na superfície do filme termoformado, apesar de ser realizada numa zona o mais plana possível, esta seja influenciada por outro fator que não a rugosidade, devendo-se no futuro avaliar se existiram alterações com o processo.

Para a amostra sobreinjetada, o medidor usado não permitiu efetuar a medição, uma vez que, a superfície da peça plástica não possui uma zona plana para a medição e, conseqüentemente, não é garantida exatidão necessária fruto da incidência de luz. Relativamente a esta amostra, o ligeiro aumento de rugosidade poderá estar associado às condições do processo de injeção, uma vez que, o brilho das peças é afetado pela microrrugosidade do molde que pode ser copiada com maior ou menor exatidão resultado do coeficiente de atrito entre o polímero e o metal, dependendo quer dos parâmetros do processo, quer das propriedades reológicas do polímero [65].

Tabela 14. Rugosidades da superfície decorativa das amostras.

	Direção horizontal (nm)	Direção vertical (nm)
Filme impresso	520,64	556,26
Amostra termoformada	277,85	331,72
Amostra sobreinjetada	343,98	348,55

Pela observação da Figura 62 é ainda assim possível observar que para diferentes ângulos de medição, a diminuição não foi constante, sendo que para uma medição em 20°, a diferença que se verifica é superior comparativamente aos ângulos de 60° e 85°. Além disso, a diferença entre as cinco medições para o ângulo de 20° é visivelmente superior, apresentando um maior valor de desvio.

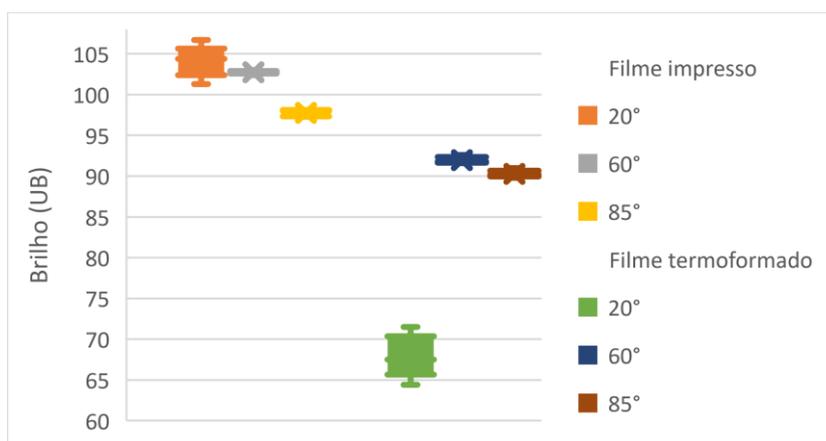


Figura 62. Medições de Brilho.

Para cada uma das medições foram calculados os desvios padrão associados. Estes resultados podem ser consultados na Tabela 15 e permitiram reforçar que o ângulo que

apresentam uma diferença maior corresponde a 20°. Para os ângulos de 60° e 85° os desvios associados são relativamente inferiores, sendo que o filme impresso a 60° foi o que apresentou um valor menor.

Tabela 15. Cálculo do desvio padrão associado às medições.

Filme impresso			Filme termoformado		
20°	60°	85°	20°	60°	85°
1,75	0,20	0,35	2,37	0,36	0,40

Por outro lado, relativamente à cor e visto que a tinta decorativa é preta era expectável que a energia fosse praticamente toda absorvida, o que se encontra em concordância com os resultados obtidos pois a percentagem de refletância obtida é relativamente próxima de zero.

A Figura 63 representa os resultados obtidos nas medições de refletância para ambos os filmes: impresso e termoformado.

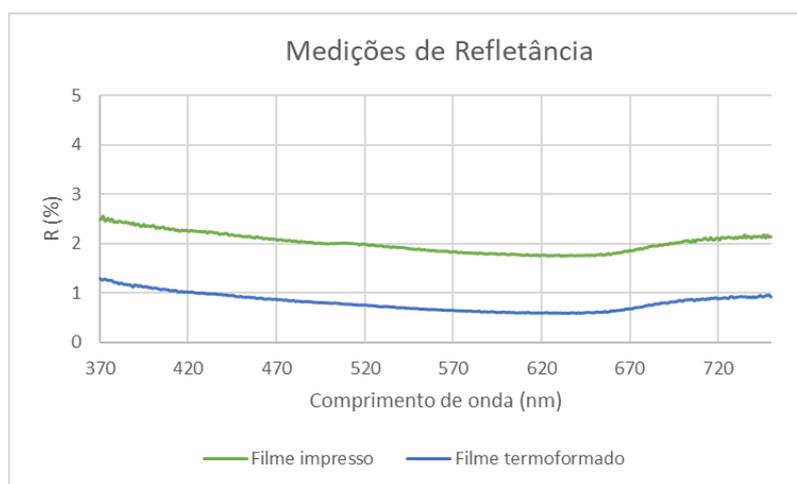


Figura 63. Resultados obtidos nas medições de refletância.

Em concordância com as medições de brilho, também a percentagem de refletância associada sofreu um decréscimo após o filme ser submetido à termoformação. A Tabela 16 representa a redução percentual sofrida em cada caso, sendo que é visível que a refletância sofreu uma redução relativamente superior. Estes resultados, permitiu verificar que a refletância é o principal responsável pela diminuição do brilho. Assim, quanto mais refletância a superfície tiver maior o brilho associado. Por sua vez, se a superfície em estudo fosse totalmente opaca, a percentagem de refletância deveria ser totalmente nula.

Tabela 16. Redução percentual obtida.

Brilho			Refletância
20°	60°	85°	
-35%	-11%	-8%	-60%

Para finalizar, utilizou-se o software COLOR para converter os valores de refletância em coordenadas cromáticas. Os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 17.

Tabela 17. Coordenadas Cromáticas.

	X	Y	Z	L*	a*	b*
Filme impresso	1,79	1,89	2,33	14,89	-0,16	-2,28
Filme termoformado	0,65	0,68	1	6,16	0,05	-3,63

Apesar das coordenadas serem distintas, é de realçar que a luminosidade (L^*) foi aquela que apresentou maior diferença, sendo que para o filme termoformado esta reduziu para praticamente metade do valor resultante para o filme impresso. Posicionando estes valores numa escala de cores (Figura 64), é de notar que para o filme impresso (ponto A), o tom de preto se aproxima mais de tons azuis ao passo que o filme termoformado (ponto B) se inclina mais para tons de violeta. Esta tendência leva a que, a temperatura atribuída ao filme durante a termoformação, aproxime a cor ao padrão preto-puro cujas coordenadas cromáticas correspondem a $L^*=0$, $a=0$ e $b=0$.

Assim, é possível afirmar que quanto mais próximo de zero o valor de L^* estiver, mais escuro se torna o produto (menor luminosidade). Por sua vez, a e b representam as escalas de cores para verde ou vermelho e azul ou amarelo, respetivamente. No entanto, a e b para ambas as amostras medidas, possuem valores relativamente próximos, pelo que estas coordenadas se tornam pouco relevantes para o resultado esperado.

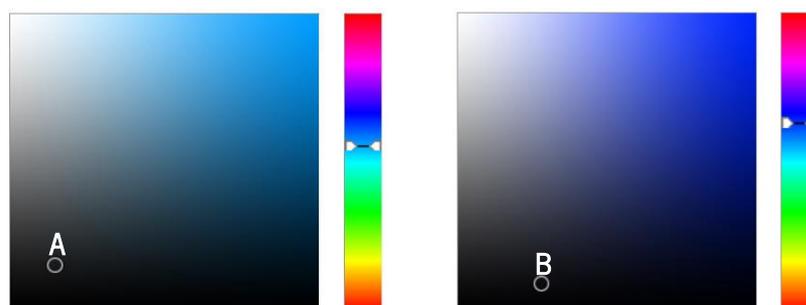


Figura 64. Escala de cores.

5. Considerações finais

5.1 Conclusões

O presente projeto descreveu o desenvolvimento de um interruptor sensível ao toque que permita a conectividade a uma lâmpada LED de forma a ativar e desativar a sua intensidade, através da leitura da capacitância promovida pelo toque humano. Para isso, recorreram-se a técnicas de moldação não convencionais (IME), de forma a desenvolver o dispositivo, que acabou por ser publicitado numa revista nacional (anexo 8).

Analisaram-se todas as etapas envolvidas no processo, desde a impressão dos filmes suporte, utilizando a combinação de camada decorativa e funcional de forma a obter uma peça híbrida, a termoformação dos filmes nas condições ótimas que garantisse a passagem de corrente no componente termoplástico, até à sobremoldação do filme conformado com polímero fundido.

O desenvolvimento deste projeto iniciou-se com a seleção do substrato a utilizar. Para isso, testaram-se impressões em substratos com diferentes rugosidades. A combinação de tinta-substrato demonstrou neste caso de estudo, que quanto maior a rugosidade do substrato, pior será a condutividade do material. Esta seleção teve por base a capacidade de garantir a passagem de corrente elétrica com maior eficiência, ou seja, o filme selecionado considerou o menor valor de resistência medido no multímetro. Ainda durante a fase de impressão, foi testada a incorporação de solvente na tinta funcional de prata, bem como analisada a influência do número de camadas quer de tinta decorativa quer de tinta funcional nas propriedades funcionais finais do substrato eletrónico. Esta abordagem permitiu verificar que a incorporação de solvente resultou em divergências superficiais da película de tinta, fruto de uma maior percentagem de evaporação de solvente, e por isso, adicionar solvente à tinta de prata não a torna mais condutora, muito pelo contrário, pelo que rentabilizar a tinta condutora não é uma opção. Por outro lado, adicionar mais de uma camada de tinta (decorativa e funcional), apesar de menor, tem pouca influência na alteração da resistência elétrica. A junção de uma camada adicional de tinta decorativa com a tinta funcional diluída eleva os valores de resistência das amostras, tornando-as mais resistivas, ao passo que a adição de mais uma camada de tinta funcional resultou na redução dos pontos exequíveis de medição. A impossibilidade de obtenção de dados resultou da dificuldade no alinhamento da primeira camada e a sobreposição das restantes, isto é, a segunda camada de tinta funcional fazia contacto com as linhas fronteiras ocorrendo curto nessas zonas. Os valores obtidos corroboraram a importância de rever as condições do processo e sensibilidade da tinta.

Durante a fase experimental, tornou-se necessário realizar caracterização das amostras, dividindo-se em duas fases: numa primeira fase, a caracterização dos filmes (impressos e conformados) e já na fase final a caracterização das peças injetadas. Através da análise morfológica foi ainda possível verificar que a camada de tinta decorativa sofreu alterações de espessura após termoformação, podendo ter ocorrido devido à variabilidade do processo de impressão, tal como ocorrido para a camada de prata onde estas variações de espessura não foram significativas, rondando $1\mu\text{m}$. Ainda assim, é visível que a alteração da camada decorativa se intensificou durante o processo de injeção, ocorrendo uma diminuição da espessura desta camada pela integração do polímero fundido. Assim, no desenvolvimento do demonstrador, foi possível correlacionar algumas questões no âmbito das diferentes fases do processo IME, nomeadamente a criação de fissuras promovidas pelas etapas decorrentes da célula produtiva (termoformação e moldação por injeção) em condições exageradas.

No decorrer do presente projeto, foi também contemplada simulação do processo de injeção através de modelos numéricos no software Moldex 3D. Contudo, os resultados obtidos teoricamente não refletem o ocorrido durante a validação prática, uma vez que, no estudo teórico a máquina de injeção trabalha muito no limite ou fora dele e na prática encontra-se dentro da gama dos parâmetros. Para além disso, é de salientar o facto de a presença de chupados comprometer a aderência do inserto o que na realidade não se verificou. Ainda assim, as simulações permitiram retirar ilações da frente de fluxo nomeadamente da diferença de tempo de enchimento de ambas as peças fruto das diferenças volumétricas entre elas.

Em suma, em todas etapas, foi possível verificar que a resistência elétrica sofreu aumento recorrente. Para além disso, observou-se que a submissão do filme a temperaturas e velocidades muito elevadas, bem como pressões de vácuo exageradas, comprometeu a funcionalidade do produto. Por sua vez, como para a mesma velocidade e temperatura de injeção, apenas se obtiveram duas peças moldadas conformes, foi possível concluir que o processo necessita de ser otimizado.

A Tabela 18 compila as principais conclusões obtidas ao longo da realização da presente dissertação, ilustrando as considerações a ter em conta no futuro para o desenvolvimento de um novo protótipo demonstrador.

Tabela 18. Síntese dos resultados.

Impressão	Termoformação	Sobremoldação
<ul style="list-style-type: none"> • Substratos menos rugosos; • Não incorporar solvente; • Alinhamento da camada condutora; • Não incluir camadas de tinta decorativa adicionais; • Influência das camadas decorativa e funcional pouco significativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar ângulos do molde exagerados; • Não usar pressões de vácuo exageradas; • ↑ Potência da resistência na zona do ataque; • Assegurar tempo de exposição ótimo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diferenças de volume e sistema de alimentação não balanceado; • Ângulo do molde quebra tinta na zona do flat cable; • Utilizar temperaturas e velocidades de injeção ↓; • Produto pouco sensível.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

De forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido, apresentam-se sugestões de melhorias a realizar futuramente, nomeadamente:

- Avaliar tintas com condutividades altas para compensar a perda da qualidade do sinal após sujeita aos processos de termoformação e injeção sem privar os requisitos finais do produto;
- Desenvolvimento de um suporte ou tela nova capaz de garantir o perfeito alinhamento das diferentes camadas durante a impressão;
- Proceder a alterações ao molde de termoformação e de injeção, designadamente diminuição do ângulo da zona em contacto com o flat cable e canal de alimentação, de forma a evitar fissuras na tinta condutora e evitar a quebra da peça, respetivamente;
- Repetição da moldação por injeção com novas variáveis, nomeadamente alteração à temperatura do molde de forma a validar a estabilidade do processo e consequente remoção de raiados;
- Substituição de materiais por substratos flexíveis provenientes de fontes biológicas, recicláveis e/ou compostáveis, bem como por tintas funcionais com menor pegada ambiental através da substituição da prata por outros metais, preferivelmente à base de carbono aliada à substituição dos filmes por outro de base bio ou reciclável.

6. REFERÊNCIAS

- [1] M. Beltrão, F. M. Duarte, J. C. Viana, e P. Vitor, «A review on in-mold electronics technology», *Polym Eng Sci*, vol. 62, n. 4, Fev. 2022, Disponível em: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pen.25918>
- [2] S. Khan, L. Lorenzelli, e R. S. Dahiya, «Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review», *IEEE Sens J*, vol. 15, n. 6, pp. 3164–3185, 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2375203.
- [3] Carina Peixoto *et al.*, «Importância da simulação do processo na integração de filmes funcionais e decorativos em componentes para indústria automóvel», *Revista Molde*, 5 de Julho de 2022. Disponível em: <https://www.piep.pt/importancia-simulacao-processo-integracao-filmes-funcionais-decorativos-componentes-industria-automovel/>
- [4] PIEP, «O que fazemos». Acedido: 12 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.piep.pt/>
- [5] J. Sousa, «Os materiais avançados e a evolução tecnológica», Sociedade Portuguesa dos Materiais. Acedido: 3 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://spmateriais.pt/site/2021/06/30/os-materiais-avancados-e-a-evolucao-tecnologica/>
- [6] Taylor Corporation, «Strengths and Uses of In-Mold Labeling vs. In-Mold Decorating». Disponível em: <https://www.taylor.com/blog/strengths-and-uses-of-in-mold-labeling-vs.-in-mold-decorating>
- [7] Sanwa Screen USA, «What is the Difference Between In Mold Labeling and In Mold Decorating?» Acedido: 13 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://sanwascreenusa.com/posts/what-is-the-difference-between-in-mold-labeling-and-in-mold-decorating>
- [8] Rosti Group AB, «Decoração no molde (IMD)». Acedido: 12 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.rosti.com/capability/in-mould-decoration-imd/>
- [9] KP Srinivasan e T Muthuramalingam, «In-depth scrutinization of In- Mold Electronics for Automotive applications», *J Phys Conf Ser*, vol. 1969, Mar. 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1969/1/012064/meta>
- [10] Promwad electronics design, «In-Mold Electronics (IME): How It Works and Why It's a New Trend». Disponível em: <https://promwad.com/news/mold-electronics-ime-how-it-works-and-why-its-new-trend>
- [11] NAMICS CORPORATION, «NAMICS Stretchable Inks For IME (In-Mold Electronics)». Acedido: 7 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://namics-corp.com/namics-stretchable-inks-for-ime-in-mold-electronics/>
- [12] Genesink enabling disruptive consumer electronics, «In-Mold Electronics». Acedido: 6 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.genesink.com/applications/in-mold-electronics/>
- [13] FUZETOUCH, «IN-MOLD ELECTRONICS». Acedido: 13 de Janeiro de 2023. Disponível em: <http://fuzetouch.com/products/inmold-electronics/>
- [14] Dr Khasha Ghaffarzadeh, «In-mould electronics and conductive inks», *Electronics World*, 11 de Abril de 2019. Disponível em: <https://www.electronicsworld.co.uk/in-mould-electronics-and-conductive-inks/7758/>
- [15] Z. Yuan, Q. Zhang, H. Wang, Y. Chen, e Q. Bai, «In-mold lightweight integrating for structural/functional devices», vol. 41, n. 8, pp. 717–729, 2021, doi:10.1515/polyeng-2021-0006.
- [16] A. Wimmer, H. Reichel, B. Rauch, R. Schramm, J. Hörber, e B. Hä:bler, «Manufacturing of

- sandwich structures for the integration of electronics in in mold labelling components», em *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICMID.2016.7738922.
- [17] S. M. F. Cruz, L. A. Rocha, e J. C. Viana, «Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics», em *Flexible Electronics*, S. Rackauskas, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2018. doi: 10.5772/intechopen.76161.
- [18] Luis Maranhão, João Ramos, Adriano Liberal, e Gregory Ribeiro, «Impressão do tempo», em *É impressão minha?*, Humi, Ed., São Paulo: Dados , 2016.
- [19] Cueva de las Manos, «Bienvenidos al sitio arqueológico Cueva de las Manos». Acedido: 16 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.cuevadelasmanos.org/>
- [20] D. Kuscer, «Screen Printing», em *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, M. Pomeroy, Ed., Oxford: Elsevier, 2021, pp. 227–232. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12082-X>.
- [21] Joana Schneider e Helene Gomes Sacco, «ESTÊNCIL E SERIGRAFIA: OS USOS TRADICIONAIS E ARTÍSTICOS DA TÉCNICA DE MOLDE VAZADO », *Revista Seminário de História da Arte*, Setembro de 2019. Acedido: 16 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/Arte/article/view/17912>
- [22] B. & A. Lda, «Tintas para Serigrafia». Acedido: 6 de Janeiro de 2023. Disponível em: <http://barbosa-e-amorim.com/tintas-serigrafia-uv/>
- [23] Custom Planet Ltd, «what is screen printing? a step-by-step guide». Acedido: 13 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.customplanet.co.uk/what-is-screen-printing-a-step-by-step-guide>
- [24] Pröll GmbH, «IMD/FIM-Farbsysteme & Haftvermittler». Acedido: 3 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.proell.de/de/produkte/farbsysteme-und-lacke/imd-fim.html>
- [25] Covestro AG, «Film Insert Molding: Herstellung komplexer Bauteile in nur einem Schritt». Acedido: 4 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://solutions.covestro.com/de/highlights/artikel/thema/prozesstechnologie/fim>
- [26] L. Guangzhou Print Area Technology Co., «Tinta Condutiva Preto Carbono e Prata». Acedido: 3 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://pt.enyink.com/product/conductive-carbon-black-and-silver-ink>
- [27] C. Cano-Raya, Z. Z. Denchev, S. F. Cruz, e J. C. Viana, «Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review», *Appl Mater Today*, vol. 15, pp. 416–430, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.APMT.2019.02.012.
- [28] S. Y. Lee *et al.*, «The development and investigation of highly stretchable conductive inks for 3-dimensional printed in-mold electronics», *Org Electron*, vol. 85, p. 105881, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105881>.
- [29] «Qual é a diferença entre “cura” e “secagem”?», ASK LOBSTER. Disponível em: <https://pt.woodworking.asklobster.com/posts/884/qual-e-a-diferenca-entre-cura-e-secagem/>
- [30] VENTIPLAST, «Termoformagem». Acedido: 7 de Janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.ventiplast.com/termoformagem/>
- [31] L. Tenchine e O. Dassonville, «Randomly shaped 3D electronics using innovative combination of standard surface mount technologies and polymer processing», em *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICMID.2016.7738937.
- [32] F. M. Duarte e J. A. Covas, «Termoformação», *Manual técnico*. Dezembro de 1999.
- [33] F. Ribeiro, «Melhoria do processo de moldação por injeção de um caso real», Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2017.

- [34] A.M. Cunha e A.S.Pouzada, «PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO».
- [35] M. Beltrão, «Desenvolvimento de Peça Decorativa para a Indústria Domótica», Mestrado, Universidade do Minho, 2018.
- [36] Paolo Gaucci, Norbert Fruehauf, Annemarie Ilchmann, Bernhard Polzinger, Wolfgang Eberhardt, e Heinz Kueck, «Organic thin film transistors on back molded plastic foil», *Flexible and Printed Electronics*, vol. 3, Mar. 2018.
- [37] A. Wimmer, H. Reichel, e K. Schmidt, «New standards for 3D-userinterfaces-manufactured by a Film Insert Molding process», em *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICMID.2018.8526978.
- [38] «In-Mold Labeling (IML) for HP Indigo Labels and Packaging Digital Presses How-to Guide», 2015.
- [39] S.-C. Chen, H.-M. Li, S.-T. Huang, e Y.-C. Wang, «Effect of decoration film on mold surface temperature during in-mold decoration injection molding process», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, n. 5, pp. 501–505, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.01.005>.
- [40] S. R. D. Co. Ltd, «Best Ways to Prevent And Fix Sink Marks In Injection Molding». Acedido: 5 de Abril de 2023. Disponível em: <https://www.rapidirect.com/blog/how-to-prevent-sink-mark-in-injection-molding/>
- [41] Tony Rogers, «Top-10 Injection Molding Defects And How To Fix Them». Acedido: 5 de Abril de 2023. Disponível em: <https://www.creativemechanisms.com/blog/what-cause-injection-molding-defects-and-how-to-fix-them>
- [42] VEM Tooling, «Injection Molding Defects: Plastic Warpage». Acedido: 4 de Abril de 2023. Disponível em: <https://www.vem-tooling.com/plastic-warpage/>
- [43] Molde Injeção Plásticos, «A INFLUÊNCIA DA CONTRAÇÃO NA MOLDAGEM DE PEÇAS PLÁSTICAS». Acedido: 4 de Abril de 2023. Disponível em: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/a-influencia-da-contracao-na-moldagem-de-pecas-plasticas/>
- [44] H.-L. Chen, S.-C. Chen, W.-H. Liao, R.-D. Chien, e Y.-T. Lin, «Effects of insert film on asymmetric mold temperature and associated part warpage during in-mold decoration injection molding of PP parts», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 41, pp. 34–40, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.11.002>.
- [45] A. C.-Y. Wong e K. Z. Liang, «Thermal effects on the behaviour of PET films used in the in-mould-decoration process involved in plastics injection moulding», *J Mater Process Technol*, vol. 63, n. 1, pp. 510–513, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02674-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02674-X).
- [46] YW Leong, Ishiaku dos EUA, M. Kotaki, H. Hamada, e S. Yamaguchi, «Interfacial characteristics of film insert molded polycarbonate film/polycarbonate-acrylonitrile-butadiene-styrene substrate, part 1: Influence of substrate molecular weight and film thickness», *Polymer Engineering & Science*, pp. 1674–1683, 2006.
- [47] S.-C. Chen, H.-M. Li, S.-T. Huang, e Y.-C. Wang, «Effect of decoration film on mold surface temperature during in-mold decoration injection molding process», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, n. 5, pp. 501–505, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.01.005>.
- [48] E. Juntunen, S. Ihme, A. Huttunen, e J.-T. Mäkinen, «R2R process for integrating LEDs on flexible substrate», em *2017 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, 2017, pp. 12–16. doi: 10.1109/NORDPAC.2017.7993155.
- [49] S.-C. Chen, S.-T. Huang, M.-C. Lin, e R.-D. Chien, «Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration», *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, n. 8, pp. 967–973, 2008, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.04.008>.
- [50] Y.-W. Chang e J.-H. Cheng, «Numerical and experimental investigation of polycarbonate vacuum-forming process», *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 36, n. 7, pp. 831–841, 2013, doi: 10.1080/02533839.2012.747059.
- [51] M. Ghobadnam, P. Mosaddegh, M. Rezaei Rejani, H. Amirabadi, e A. Ghaei, «Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, n. 5, pp. 1079–1089, 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6329-y.
- [52] C. A. Taylor, H. G. Delorenzi, e D. O. Kazmer, «Experimental and numerical investigations of the vacuum-forming process», *Polymer Engineering and Science*, pp. 1163–1173, Agosto de 1992.
- [53] Y. Gong, K. J. Cha, e J. M. Park, «Deformation characteristics and resistance distribution in thermoforming of printed electrical circuits for in-mold electronics application», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, n. 3, pp. 749–758, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05377-9.
- [54] F. Woyan, M. Bruchmüller, e M. Koch, «Process parameters affecting the bonding of in-mold decoration of injection molded components», em *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Out. 2016. doi: 10.1063/1.4965459.
- [55] S. Y. Teng e S. J. Hwang, «Predicting the process induced warpage of electronic packages using the P–V–T–C equation and the Taguchi method», *Microelectronics Reliability*, vol. 47, n. 12, pp. 2231–2241, Dez. 2007, doi: 10.1016/J.MICROREL.2007.01.084.
- [56] Moldex3D, «Visão geral dos produtos Moldex3D». Acedido: 29 de Março de 2023. Disponível em: <https://www.moldex3d.com/products/software/moldex3d/>
- [57] Michael B. Heaney, «Electrical Conductivity and Resistivity», 1999.
- [58] «How to measure Electric Paint with a multimeter», Bare Conductive. Disponível em: <https://www.bareconductive.com/blogs/resources/how-to-measure-electric-paint-with-a-multimeter>
- [59] «Scanning Electron Microscopy», Nanoscience Instruments. Acedido: 13 de Junho de 2023. Disponível em: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>
- [60] Maria Jovita Oliveira, «Propriedades Óticas de Polímeros».
- [61] Ida Ultraprecisão, «Medidor de Brilho – SOLOGLOSS & POLYGLOSS». Acedido: 4 de Julho de 2023. Disponível em: <https://www.ultraprecisao.com/produto/137/7>
- [62] R. S. Chen, H. H. Lee, e C. Y. Yu, «Application of Taguchi’s method on the optimal process design of an injection molded PC/PBT automobile bumper», *Compos Struct*, vol. 39, n. 3, pp. 209–214, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00110-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00110-4).
- [63] HowStuffWorks, «How do touch-sensitive lamps work?» Acedido: 26 de Julho de 2023. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20200624193844/https://science.howstuffworks.com/innovation/science-questions/touch-sensitive-lamp.htm>
- [64] I. Ariño, U. Kleist, L. Mattsson, e M. Rigdahl, «On the Relation between Surface Texture and Gloss of Injection-Moulded Pigmented Plastics», *Polym Eng Sci*, vol. 45, pp. 1343–1356, Set. 2005, doi: 10.1002/pen.20393.
- [65] R. J. Henriques De Sousa, «Estudo do brilho e microrrugosidade de peças plásticas produzidas por moldação por injeção Dissertação de Mestrado».

7. ANEXOS

Anexo 1 – Fichas técnicas dos filmes

1. Filme rugoso



PRODUCT DATASHEET

Lexan* 8B35 Film

DESCRIPTION

Lexan 8B35 is a one side velvet, one side matte transparent polycarbonate film. It offers high temperature resistance, excellent dimensional stability, as well as good printability without pre-treatment making it very suitable for multi-layer printing for applications such as overlays, floor graphics, high-performance labels and in-mould decoration. It can be screen printed using traditional solvent based or water based inks, as well as UV or infrared drying inks and offers ease of processing for thermoforming, embossing, die-cutting, hydro-forming and bending. The velvet texture offers mar resistance, and can be used over light-emitting devices (LEDs).

TYPICAL PROPERTY VALUES

Property	ASTM Test Method	Units (USCS)	Value	ISO Test Method	Units (SI)	Value
Mechanical						
Tensile Strength @ Yield	ASTM D882	psi	8500	ISO 527	MPa	62
Ultimate	ASTM D882	psi	9000	ISO 527	MPa	65
Tensile Modulus	ASTM D882	psi	300000	ISO 527	MPa	2100
Tensile Elongation at Break	ASTM D882	%	100-156	ISO 527	%	100
Gardner Impact Strength at 0.03" (0.75 mm)	ASTM D3029	ft-lb	23	ISO 6603-1	J	31
Tear Strength						
Initiation	ASTM D1004	lb/mil	1.4-1.8		kN/m	245
Propagation	ASTM D1922	g/mil	30-55		kN/m	10-20
Puncture Resistance (Dynatup)	ASTM D3763	ft-lb	9		J	12
Fold Endurance (MIT)						
0.010" (0.25 mm)	ASTM D2176-69	double folds	60			
0.020" (0.50 mm)	ASTM D2176-69	double folds	20			
Thermal						
Coefficient of Thermal Conductivity	ASTM D5470	Btu/hr./ft. ² /°F/in	1.35		W/m ² °K	0.2
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	(x10 ⁻³)/°F	3.2	ISO 11359	(x10 ⁻³)/°C	7
Specific Heat @40°F (4°C)	ASTM E1269	Btu/lb./°F	0.3		KJ/Kg.°C	1.25
Glass Transition Temperature	ASTM D3417 / D3418	°F	307	ISO 11357	°C	153
Vicat Softening Temperature, B	ASTM 1525-00 modified	°F	323		°C	150
Heat Deflection Temp. by TMA at 1.8 Mpa		°F	290	ISO 75 Modified	°C	135
Brittleness Temperature	ASTM D746	°F	-211		°C	-135
Physical						
Density	ASTM D792	slug/ft. ³	2.3	ISO 1183	kg/m ³	1200
Water Absorption, 24 hrs.	ASTM D570	% change	0.35	ISO 62	% change	0.35
Surface Roughness (RMS)	ASTM D5946-01	μ	See chart			
Surface Energy(1st surface/ 2nd surface)	Dyne Pens	Dyne	37/31			
Surface Tension(1 st surface/ 2 nd surface)	ASTM D3363	-	>44/38-40			
Taber Abrasion	ASTM D1044	delta Haze	<1			
Optical						
Refractive Index @77°F (25°C)	ASTM D542A	-	1.6			
Light Transmission	ASTM D1003	%	80			
Yellowness Index	ASTM D1925	%	2.2			
Haze	ASTM D1003	%	102			
Gloss over Flat Black min/max @ 60°	ASTM D523-60	-	See chart	ISO 2813	-	See chart
UV cutout	UV/Visual Spectroscopy	%	0.3			

- * These are typical properties and are not intended for specification purposes. If minimum certifiable properties are required, Please contact your local SABIC Innovative Plastics representative or the SABIC Innovative Plastics Quality Services Department. Reported Values are Based on 0.250 mm (0.010") Thickness unless otherwise noted.
- * Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

PRODUCT DATASHEET

Lexan* 8B35 Film

MANUFACTURING SPECIFICATIONS

Nominal Gauge Ranges	Min/Max Limit of Nominal
0.003" (0.075 mm)	± 10%
0.005 - 0.007" (0.125 - 0.175mm)	± 8%
0.010-0.015" (0.250-0.375 mm)	± 5%
0.020" (0.500 mm)	± 3

Americas Headquarters

SABIC Innovative Plastics
One Plastics Avenue
Pittsfield, MA 01201
USA
T +1-413-449-7125
Toll-free: 1-800-323-3783
F +1 (888) 443-2033
sfs.customerservice@sabic-ip.com

European Headquarters

SABIC Innovative Plastics
Plasticslaan 1
4612 PX
Bergen op Zoom
The Netherlands
T +31 164 293684
F +31 164 293272
Sfs.info@sabic-ip.com

Pacific Headquarters

SABIC Innovative Plastics
Specialty Film & Sheet
1266 Nanjing Road (W)
16th Floor, Plaza 66
200040 Shanghai
China
T +86 21 62881088 ext. 6733
F +86 21 6288 0818

E-mail

sfs.customerservice@sabic-ip.com



* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.
SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe BV

* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

sabic-ip.com/sfs

2. Filme liso



Makrofol® DE 1-4 000000

Description and Application Information

Makrofol® DE 1-4 000000 is a translucent extrusion film based on Makrolon, the High Tech Polycarbonate made by Covestro. It comprises all of the well known advantages of Polycarbonate such as excellent mechanical and optical properties.

The surface combination of Makrofol® DE 1-4 000000 is one side gloss - one side very fine matte. It stands out due to its good printing quality and formability. It is suitable for High Pressure Forming process (HPF) and Film-Insert-Molding process (FIM). It is available in various standard thicknesses from 75 microns to 750 microns. Other thicknesses on request.

Typical applications are name plates and automotive control panels.

Guide data*

General properties			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Density	1,2	g/cm ³	ISO 1183, 20°C method C
Gloss, 60° top side	≥ 98	Digits	ISO 2813
Gloss, 60° reverse side	0,1 to 9,0	Digits	ISO 2813
Mechanical properties			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Tensile Modulus	≥ 2200	MPa	ISO 527-1,-3
Stress at break, parallel	≥ 70	MPa	ISO 527-1,-3
Stress at break, across	≥ 70	MPa	ISO 527-1,-3
Strain at break, parallel	140	%	ISO 527-1,-3
Thermal properties			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Coefficient of linear thermal expansion, parallel 20 to 120°C	70	10 ⁻⁶ /K	following DIN 53752
Coefficient of linear thermal expansion, across 20 to 120°C	70	10 ⁻⁶ /K	following DIN 53752
Shrinkage, parallel 130°C, 1 h	< 0,4	%	following IEC 60674-2
Shrinkage, across 130°C, 1 h	< 0,4	%	following IEC 60674-2
Burning behavior			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Burning rate (FMVSS 302)	≤ 100	mm/min	ISO 3795



Makrofol[®] DE 1-4 000000

Optical properties			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Light transmittance	> 80	%	ISO 13468-2, following DIN 5036

Other properties			
Property	Value	Unit of measurement	Method
Water absorption (saturation)	0,2	%	following ISO 62

* These values provide general information and are not part of the product specification.

Labeling and REACH applications

This product data sheet is only valid in conjunction with the latest edition of the corresponding Safety Data Sheet.

Any updating of safety-relevant information – in accordance with statutory requirements – will only be reflected in the Safety Data Sheet, copies of which will be revised and distributed. Information relating to the current classification and labeling, applications and processing methods and further data relevant to safety can be found in the currently valid Safety Data Sheet.

The manner in which you use and the purpose to which you put and utilize our products, technical assistance and information (whether verbal, written or by way of production evaluations), including any suggested formulations and recommendations, are beyond our control. Therefore, it is imperative that you test our products, technical assistance, information and recommendations to determine to your own satisfaction whether our products, technical assistance and information are suitable for your intended uses and applications. This application-specific analysis must at least include testing to determine suitability from a technical as well as health, safety, and environmental standpoint. Such testing has not necessarily been done by Covestro. Unless we otherwise agree in writing, all products are sold strictly pursuant to the terms of our standard conditions of sale which are available upon request. All information and technical assistance is given without warranty or guarantee and is subject to change without notice. It is expressly understood and agreed that you assume and hereby expressly release us from all liability, in tort, contract or otherwise, incurred in connection with the use of our products, technical assistance, and information. Any statement or recommendation not contained herein is unauthorized and shall not bind us. Nothing herein shall be construed as a recommendation to use any product in conflict with any claim of any patent relative to any material or its use. No license is implied or in fact granted under the claims of any patent.

Editor: Specialty Films
Covestro AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
D-51373 Leverkusen
www.makrofol.com

page 2 of 2

Edition 2022-08-01

Replaces edition dated 2015-08-31

 **Makrofol[®]**
Product Datasheet

Anexo 2 – Ficha técnica da tinta decorativa

Addendum to Technical Information NORIPHAN® HTR N 7/2022
7/2022

Test Product



NORIPHAN® HTR N 990 NC

Non-conductive opaque **black** ink for use within IMD/FIM Technology

Area of Application

NORIPHAN® HTR N 990 NC is based on NORIPHAN® HTR N ink system and inorganic black pigment for combined high opaque decoration and high electrical resistance in capacitive sensors.

Note:

- production quantities under licensing
- pending patent application by Continental Automotive GmbH

Films

PC film: Makrofol®¹
PC blend film: Bayfol®¹

Finish

Glossy

The gloss level is influenced by the structure of the substrate.

Color Shades

990 NC	Black HF	<i>HF = halogen free</i>
990/010 NC	Deep Black HF	
990/011 NC	Deep Black opaque HF	

Mesh Count

Polyester mesh 77-48 threads/cm to 150-31 threads/cm (195-48 threads/inch to 380-31 threads/inch).
A stainless steel mesh may be used for special requirements.

Stencil

Solvent resistant emulsions must be used. Excellent results during long production runs are achieved by using Pröll Diazo-UV-Polymer Emulsion Norikop 10 HQ.

Processing

Processing is recommended under same conditions as described in Technical Information NORIPHAN® HTR N.

NORIPHAN® HTR N 990/010 NC and 990/011 NC are not recommended for back printing of white.

Auxiliaries

All of the auxiliaries mentioned below are free of halogens (HF).

Thinner and Retarder Pastes

Thinner F 013 (fast)
Thinner M 201 (medium)
Thinner S 403 (slow)

¹ Makrofol® and Bayfol® are registered trade marks used by Covestro AG, Germany

NORIPHAN® HTR N 990 NC

Retarder Pastes:

NORIPHAN® HTR N 097/005 (fast)
NORIPHAN® HTR N 097/006 (medium)
NORIPHAN® HTR N 097/007 (slow)

Auxiliaries may be mixed with each other in any desired proportions.

Only Thinner F 013 and Thinner M 201 should be used for large printing areas.

Recommended addition of thinner:

0 – 10 %	990/011 NC
5 – 15 %	990/010 NC
10 – 20 %	990 NC

To print fine details, Thinner S 403 can be used alone or in combination with retarder pastes

NORIPHAN® HTR N 097/005, 097/006 respectively 097/007.

The following proportions are recommended:

10 – 20 % Thinner S 403
5 – 10 % NORIPHAN® HTR N 097/007

NORIPHAN® HTR N 097/008: Retarder Paste ready to use mixture of Thinner M 201 and Retarder Paste
NORIPHAN® HTR N 097/007 (mixing ratio 1 : 1)

Cleaning of Screens and Utensils

UNI-REIN A III

Note:

The color shades 990/010 NC and 990/011 NC are tinting the printing squeegee. Consequently, a separate squeegee for these black colors is recommended.

Drying

NORIPHAN® HTR N is a physically curing ink system which dries through evaporation of the solvent in a tunnel dryer.

Note:

To protect PC films from extensive solvent attack, tunnel dryers should be used also for small trial runs. Rack drying is not recommended (cracking!).

Tips on Drying

Drying performance can be improved by:

- drying at higher temperatures
- use of infrared rays (from second heating compartment on)
- completely opened exhaust air valve – good air exchange.

The following settings are recommended for use with 3 zone dryers:

- First Zone: 80 °C (175 °F).
- Second Zone:
In the second zone, the maximum temperature for processing heat sensitive Bayfol® films is 80 °C (175 °F).
The maximum drying temperature for processing pure PC films (Makrofol®) is 100 °C (210 °F). If additional infrared emitters have been installed in the second compartment, they may be used to increase the efficiency of the drying operation.
- Third Zone: For cooling down to ambient temperature.

Drying results depend on the combination of thinner and retarder paste along with the thickness of the ink layer.

NORIPHAN® HTR N 990 NC

Conditioning / Post-curing

Complete evaporation of solvent residues in ink and film is necessary for further processing of printed films in the IMD/FIM process.

Thinner residues can lead to washout during the back molding process, or damage during the climatic test or use of the end product.

Fully benefiting from NORIPHAN® HTR N's superior properties (adhesion, suitability for back molding, etc.) requires guaranteeing an absolute minimum of solvent residues.

Post-curing is done after printing the last ink layer; the ideal conditions for each product must be determined individually. For best results, dry separately on a rack in a well ventilated box oven with air exchange.

Conditions:

Post-curing at 75 – 90 °C (165 – 195 °F) for 1 – 5 hours.

Maximum temperature 70 – 80 °C (160 – 175 °F) for processing heat sensitive films of PC blends such as Bayfol® CR.

In case of an application of too high temperatures with Bayfol® CR a change into bluish coloring of the film could be observed.

Bonding Strength

The adhesion of a film/ink/plastic bonding system depends on a number of variables (production, process, and structure of compound). For this reason, specific tests with respect to individual requirements are essential.

For good adhesion, at least **2 fully covering layers of NORIPHAN® HTR N** should be printed. The first layer can be composed of almost fully covering graphic motifs.

Safety Precautions

NORIPHAN® HTR N inks are inflammable. Smoking or open flames are strictly prohibited during use of these products.

Processing NORIPHAN® HTR N inks requires normal hygiene in the workplace.

Please see recommendations on label and read the material safety data sheets before use.

Shelf Life

The shelf life stated on the label assures the ink's quality and refers to unopened original cans stored in a dry place at temperatures between 5 °C (40 °F) and 25 °C (75 °F).

Important

Allow the ink as well as all the auxiliaries to be added to adjust to ambient temperature in the closed container before use.

Printing results, to a large extent, depend on the substrate as well as the printing and application conditions. We recommend checking your printing materials under your conditions of use prior to any production runs. Materials that are supposed to be identical may vary from manufacturer to manufacturer and even from batch to batch. Some substrates may have been treated with or can contain sliding agents, antistatics or other additives which will impair the adhesion of the inks.

It is not always possible to produce a given part using IMD/FIM technology.

The resins used for back molding IMD/FIM ink systems are supplied as commercial technical products. They are different in chemical composition as well as the content of additives. Process parameters will also influence the quality of the finished IMD/FIM parts.

This is a test product which is still in development. For this reason, no assurances are currently given as to type conformity, processability or long-term performance characteristics. Therefore, the customer uses the product entirely at their own risk with no guarantee.

Before starting a production run, it is necessary to test samples of each newly designed part systematically with regard to the specifications for the intended use (e.g. climatic chamber, resistance, etc.).

NORIPHAN® HTR N 990 NC

The information contained in the technical information/instruction sheets or other product information sheets is based on product testing conducted by Pröll. Because printing and environmental factors critically affect each individual ink application, the above mentioned information and instructions represent only general recommendations concerning product characteristics and directions for use and should not be construed as representing express warranties regarding the product. The information and instructions in no way release the purchaser from his obligation to verify and test the inks and their application for the specific request, regarding: product characteristics, weather resistance, mixing proportions, gloss, thinning, special mixtures, printability, drying speed, cleaning, effects on or of other materials to be contacted and safety precautions. All details contained in the instruction sheet "General Information on Screen Printing Inks" are to be considered. The further manufacture and use of products containing our inks by the purchaser takes place beyond our control, and the responsibility for further application and use of our product resides solely with the purchaser. Pröll disclaims any warranties, express or implied.

This information supersedes all previous technical information.

Proell GmbH	Treuchtlinger Str. 29	Phone +49 9141 906-0	info@proell.de	
	91781 Weissenburg / Germany	Fax +49 9141 906-49	www.proell.de	Seite 4/4

Anexo 3 – Ficha técnica da tinta condutora de prata

DM-SIP-1006

DYCOTEC

MATERIALS

Product Description

DM-SIP-1006 is part of the Dycotec Materials product portfolio developed specifically for In-Mold Electronics (IME) applications. It is a solvent based screen printable conductive ink used to produce highly electrically conductive structures used in multilayer circuit designs. The paste is compatible with thermoforming processes and overmolding temperatures.

Product Benefits

- Good thermoformable characteristics for In-Mold Electronics (IME) use
- Excellent printability
- Excellent electrical conductivity (15 mΩ/□/25µm)
- Compatible with Dycotec Materials IME dielectric and conductive adhesive pastes

Paste Preparation

DM-SIP-1006 is a thermoplastic silver paste system. Once the paste has been removed from the container for printing, this may introduce contamination. Please do not replace the paste in the container. The paste should be gently stirred before use avoiding incorporation of air bubbles.

Properties of Uncured Paste

Test	Properties
Viscosity after mixing (Pa.s) (Cone and plate 50s ⁻¹ , 20°C)	6 - 10
Density	2.2 g/cm ³
Colour	Silver
Thinner	DM-SIP-1006-DT
Solids Content	65-70 %

Paste Processing Conditions

Parameter	Typical Properties
Substrate	Polycarbonate
Screen	280SS, 10 µm EOM or 325SS, 13 µm EOM
Print speed	100 - 400 mm/s
Squeegee type	80A Shore
Print Resolution	250 µm (line and gap)
Coverage	156 cm ² /g (10 µm thickness)

The paste can be dried using either a convection oven or using IR heating. Typical drying parameters used are 80°C followed by 120-130°C for 5-20 mins. Drying times may be reduced to achieve the optimum resistivity depending on manufacturing process set-up.

Properties of Cured Paste

Test	Typical Properties
Sheet Resistance	15 m Ω /□/25 μ m
Elongation	30%
Adhesion (ASTM D3359)	5B, no removal
Environmental (85°C/85%RH,1000hrs)	No increase in sheet resistance

Clean-Up

Equipment can be cleaned using benzyl alcohol followed by iso-propanol, wipe dry.

Storage and shelf-life

Containers should be stored in a fridge at a temperature between 4-7°C with lids tightly sealed. The paste shelf-life for an unopened container is 3 months from date of shipment. Please ensure the material has time to reach room temperature before use. Avoid introduction of water into the paste. Dycotec Materials cannot assume responsibility for a paste that has not been stored in appropriate conditions or where the pastes have been contaminated following use.

Safety and Handling

For safe use of this product, please review relevant material safety and datasheet (MSDS).

For more information, please contact:

Dycotec Materials Ltd
 Unit 6, Stainer Road
 Porte Marsh Industrial Estate
 Calne, Wiltshire, SN119PX, UK
 Email: Info@dycotecmaterials.com
 Tel: +44 (0)1793 422596
www.dycotecmaterials.com

All information reported in the datasheet is for experimental work undertaken in our laboratories and illustrates typical values only. Processing conditions may vary depending on customer's experience and their application requirements and manufacturing process equipment set-up.

Note: The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, Dycotec Materials specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale of use of Dycotec Material's products. Dycotec Materials specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits. The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Dycotec Material patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more UK or foreign patents or patent applications.

© 2022 Dycotec Materials

Anexo 4 – Solvente da tinta condutora



BNZY-00P-1K0



Benzyl alcohol EPR - Specification sheet
Alcohol bencilico EPR - Hoja de especificaciones
Alcool benzylique EPR - Fiche de spécifications
Alcool benzilico EPR - Scheda tecnica
Benzylalcohol EPR - Productgegevens
Benzylalkohol EPR - Datenblatt

Formula : $C_6H_5CH_2OH$
M.W : 108,14
CAS : 100-51-6
EC : 202-859-9
EC INDEX : 603-057-00-5
H : H302-H332
P : P501

SPECIFICATIONS	
Appearance	Colourless clear liquid
Assay	≥ 99%
Density at 20 °C	1.043 - 1.050g/ml
Colour (Hazen)	≤ 20
Refractive index	1.537 - 1.543
Free acid (Benzoic acid)	≤ 0.02%
Non-volatile matter	≤ 0.05%
Residue on roasting (SO ₄)	≤ 0.1%
Loss on drying	≤ 0.2%
Peroxides number	≤ 5

Note: Material Safety Data Sheets and Certificates of Analysis are downloadable free of charge at www.labbox.com. Disclaimer: Labkem chemical products are exclusively for laboratory use and by instructed and experienced users. These chemical products may be dangerous, so please follow instructions mentioned on the Material Safety Data Sheets. Due to shipping restrictions or local/regional regulations, all products may not be available in all countries or for some customers.

Nota: Fichas de Seguridad y Certificados de Análisis disponibles gratuitamente en www.labbox.com. Atención: los productos químicos son para uso exclusivo de laboratorio y reservados sólo para uso profesional por parte de usuarios debidamente formados y cualificados. Los productos químicos son peligrosos, respete las instrucciones indicadas en la Ficha de Seguridad. Debido a restricciones en el transporte o a normativas especiales aplicables, ciertos productos químicos pueden no estar disponibles en todos los mercados o para todas las tipologías de clientes.

Remarque: Fiches de Sécurité et Certificats d'Analyses téléchargeables sur www.labbox.com. Attention : les produits chimiques labkem sont réservés exclusivement à un usage professionnel en laboratoire par des utilisateurs formés et qualifiés. Les produits chimiques sont dangereux, respecter les instructions contenues dans les fiches de sécurité. En raison des restrictions de transport ou de normes spéciales, certains produits chimiques peuvent ne pas être disponibles pour tous les pays ou types de clients.

Nota: Schede di sicurezza e certificati di analisi disponibili gratuitamente su www.labbox.com. Attenzione: le sostanze chimiche sono ad uso esclusivo di laboratorio e sono riservate esclusivamente all'uso professionale da parte di utenti adeguatamente formati e qualificati. Le sostanze chimiche sono pericolose, rispettare le istruzioni riportate nella scheda di sicurezza. A causa di restrizioni di trasporto o di normative speciali applicabili, alcune sostanze chimiche potrebbero non essere disponibili in tutti i mercati o per tutte le tipologie di clienti.

Anmerkung: Sicherheitsdatenblätter und Analysenachweise stehen kostenlos zum Download unter www.labbox.com zur Verfügung. Wichtiger Hinweis: Die Chemikalien sind ausschließlich für den Laborgebrauch und nur zur professionellen Nutzung durch geschultes und qualifiziertes Personal vorgesehen. Chemische Produkte können gefährlich sein, befolgen Sie bitte die Anweisungen auf den Sicherheitsdatenblättern. Aufgrund von Transportbeschränkungen oder anderer jeweils gültiger Richtlinien können nicht alle chemischen Produkte auf allen Märkten oder für alle Kunden angeboten werden.

NB: Veiligheidsdocumenten en analysecertificaten zijn gratis verkrijgbaar op www.labbox.com. Let op: chemicaliën zijn uitsluitend voor laboratoriumgebruik en voorbehouden aan professioneel gebruik door opgeleide en gekwalificeerde gebruikers. Chemicaliën zijn gevaarlijk, volg daarom altijd de instructies volgens het veiligheidsdocument. Wegens vervoersbeperkingen of bijzondere toepasbare lokale voorschriften is het mogelijk dat bepaalde chemicaliën niet op alle markten of voor alle soorten klanten beschikbaar zijn.

Anexo 5 – Características da máquina de injeção



2. CARACTERISTIQUES

2.1. FICHE SIGNALETIQUE

2.1. FICHA DE IDENTIFICAÇÃO

2.1.1. Fermeture

2.1.1. Fecho

Pour les caractéristiques spécifiques se referer au paragraphe 2.1.4.2

Para as características específicas, favor consultar o parágrafo 2.1.4.2.

Modèle Version	200T GP – Bi	Modelo Versão
Force de verrouillage maximum	2011 kN	Força máxima de bloqueio
Epaisseur moule minimum (1)	460 mm	Espessura mínima do molde (1)
Epaisseur moule maximum (1) (2)	760 mm	Espessura máxima do molde (1) (2)
Course ouverture maximum	560 mm	Curso máximo de abertura
Dimension horizontale des plateaux	870 mm	Dimensão horizontal dos pratos
Dimension verticale des plateaux	870 mm	Dimensão vertical dos pratos
Entre colonne vertical et horizontal	610 mm	Distância entre colunas vertical e horizontal
Distance maximum entre plateaux (1)	1320 mm	Distância máxima entre os pratos (1)
Vitesse maximum d'ouverture	1000 mm/s	Velocidade máxima de abertura
Vitesse maximum de fermeture	1000 mm/s	Velocidade máxima de fecho
Force d'ouverture maximum à 2mm	168 kN	Força máxima de abertura a 2 mm
Force de déverrouillage maximum	290 kN	Força máxima de desbloqueio
Diamètre des colonnes	100 mm	Diâmetro das colunas
Ejection centrale		
Course maximum	150 mm	Curso máximo
Force maximum de sortie	4988 daN	Força máxima de saída
Force maximum de rentrée	2443 daN	Força máxima de retracção
Vitesse maximum de sortie	400 mm/s	Velocidade máxima de saída
Vitesse maximum de rentrée	400 mm/s	Velocidade máxima de retracção
Vitesse minimum de sortie et de rentrée ..	40 mm/s	Velocidade mínima de retracção e de saída
Ejection verticale (x2)		
Course maximum	140 mm	Curso máximo
Force maximum de sortie	3141 daN	Força máxima de saída
Force maximum de rentrée	1513 daN	Força máxima de retracção
Vitesse maximum de sortie	400 mm/s	Velocidade máxima de saída
Vitesse maximum de rentrée	400 mm/s	Velocidade máxima de retracção

(1) Sans base tournante

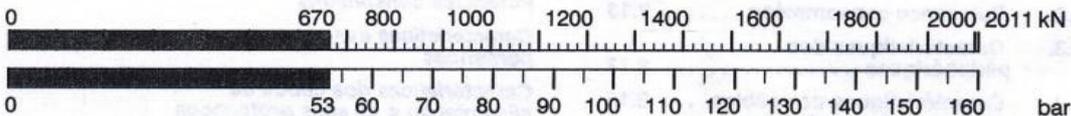
(1) Sem base rotativa

(2) Prendre en compte la course compression si machine équipée

(2) Tomar em consideração o curso de compressão, se a máquina estiver equipada.

FORCE DE VERROUILLAGE

FORÇA DE BLOQUEIO



PRESSION HYDRAULIQUE APPLIQUEE

PRESSÃO HIDRÁULICA APLICADA

Applicabilité : PO

Edition : Novembre 03

Machine : Her_Bi_2003_200T_GP

Mise à jour :

Equipement : DIXIT 2_Colonne+265mm_PMBT_SBT

Page : 2.1

2. CARACTERISTIQUES

2.1.2. Injection

Pour les caractéristiques spécifiques se référer au paragraphe 2.1.4.2

2.1.2. Injecção

Para as características específicas, favor consultar o parágrafo 2.1.4.2.

Modèle Version	H 150 / 470				Modelo Versão
	TP - STD				
Type injection 1	H 470				Tipo de injeção 1
Position					Posição
Diamètre des vis	Ø38	Ø40	Ø45	mm	Diâmetro dos fusos
Rapport L/D	25	23,5	20,9	-	Relação L/D
Volume max. théo. déplacé	198	220	278	cm ³	Volume teórico máx. deslocado
Pression max. sur la matière	2327	2100	1659	bar	Pressão máx. sobre o material
Débit maximum d'injection	430	475	600	cm ³ /s	Débito máximo de injeção
Vitesse max. de rotation vis (1) ..	300	300	300	mn ⁻¹	Velocidade máx. de rotação do fuso (1)
Vitesse max. de rot. vis continue (1)	300	300	260	mn ⁻¹	Velocidade máx. de rot. do fuso contínua (1)
Débit théorique par tour (2)	4,9	5,9	7,8	cm ³	Débito teórico por rotação (2)
Couple max. d'entraînement vis ..	45,7	58,5	75	m.daN	Binário máx. de accionamento do fuso
Course maximum de la vis	175			mm	Curso máximo do fuso
Vitesse max. d'avance de la vis (1)	380			mm/s	Velocidade máx. de avanço do fuso (1)
Type injection 2	H 150				Tipo de injeção 2
Position					Posição
Diamètre des vis	-	28	32	mm	Diâmetro dos fusos
Rapport L/D	-	26,2	28,8	-	Relação L/D
Volume max. théo. déplacé	-	74	97	cm ³	Volume teórico máx. deslocado
Pression max. sur la matière	-	2026	1551	bar	Pressão máx. sobre o material
Débit maximum d'injection	-	245	320	cm ³ /s	Débito máximo de injeção
Vitesse max. de rotation vis (1) ..	-	300	300	mn ⁻¹	Velocidade máx. de rotação do fuso (1)
Vitesse max. de rot. vis continue (1)	-	300	300	mn ⁻¹	Velocidade máx. de rot. do fuso contínua (1)
Débit théorique par tour (2)	-	2,1	2,9	cm ³	Débito teórico por rotação (2)
Couple max. d'entraînement vis ..	-	22,8	29,3	m.daN	Binário máx. de accionamento do fuso
Course maximum de la vis	120			mm	Curso máximo do fuso
Vitesse max. d'avance de la vis (1)	400			mm/s	Velocidade máx. de avanço do fuso (1)
Course de l'unité d'injection	290			mm	Curso da unidade de injeção
Force d'appui de la buse	43,1			kN	Força de contacto do bico
Vit. max. d'avance de l'unité d'inj.	150			mm/s	Veloc. máx. de avanço da unidade de inj.
Vit. max. de recul de l'unité d'inj. ..	100			mm/s	Veloc. máx. de recuo da unidade de inj.

(1) Valeurs applicables en séquentiel
(2) Vis thermoplastique standard

(1) Valores aplicáveis em sequencial
(2) Fuso termoplástico standard

Applicabilité : PO

Machine : Her_Bi_H150_H470
Equipement : DIXIT 2_TP_STD_30kw

Edition : Novembre 03

Mise à jour :

Page : 2.2

Anexo 6 – Cálculos da média e desvios padrão obtidos

Filme liso												
Filme 1	3,8	13,5	26,4	22,5	21,8	23,3	20,4	20,3	20,6	24,9	25,6	4,6
Filme 2	4,8	21,7	21,3	18,9	17,7	16,2	13,5	13,8	16,8	20,1	21,1	4,1
Filme 3	4,2	21,6	21,8	19,3	28,6	19,6	14,6	14,2	18,5	21,9	23,7	5
Filme 4	5	24,7	25,6	23,9	23,4	23,2	18,5	18,8	17,9	20,5	20,6	4,6
Filme 5	3,8	18,4	15,3	13,4	12,9	13	10,3	12,1	10,1	10,1	12,6	5,1
Média	4,32	19,98	22,08	19,6	20,88	19,06	15,46	15,84	16,78	19,5	20,72	4,68
Desvio	0,50	3,80	3,94	3,63	5,30	4,01	3,60	3,15	3,56	4,99	4,44	0,35

Filme rugoso												
Filme 1	5,4	25	26,5	24	22,6	22,2	19	19,4	18	21,2	26	4,7
Filme 2	5,6	31	32,5	28,9	25,2	26,1	21,6	23	23,6	29,3	37	6,9
Filme 3	5,7	28,8	30,3	52,3	26,1	31	0	20,8	18,9	24,3	29	4,3
Filme 4	5,1	23,7	24,8	23,1	21,6	18,4	18,5	18,4	17,5	22,4	27,4	5,9
Filme 5	5,1	24,9	26,6	23,9	22,3	22,4	19,7	20	19,5	25,7	33	6,3
Média	5,38	26,68	28,14	30,44	23,56	24,02	15,76	20,32	19,50	24,58	30,48	5,62
Desvio	0,25	2,76	2,82	11,12	1,76	4,26	7,95	1,55	2,16	2,82	4,02	0,98

Figura 65. Cálculos efetuados para seleção do substrato a utilizar.

Tinta com 0%												
Filme 1	3,8	13,5	26,4	22,5	21,8	23,3	20,4	20,3	20,6	24,9	25,6	4,6
Filme 2	4,8	21,7	21,3	18,9	17,7	16,2	13,5	13,8	16,8	20,1	21,1	4,1
Filme 3	4,2	21,6	21,8	19,3	28,6	19,6	14,6	14,2	18,5	21,9	23,7	5
Filme 4	5	24,7	25,6	23,9	23,4	23,2	18,5	18,8	17,9	20,5	20,6	4,6
Filme 5	3,8	18,4	15,3	13,4	12,9	13	10,3	12,1	10,1	10,1	12,6	5,1
Média	4,32	19,98	22,08	19,6	20,88	19,06	15,46	15,84	16,78	19,5	20,72	4,68
Desvio	0,50	3,80	3,94	3,63	5,30	4,01	3,60	3,15	3,56	4,99	4,44	0,35

Tinta com 10%												
Filme 1	6,6	44,2	50,3	48,6	44,65	43,5	38,8	37,5	38,3	44,6	47,1	7,7
Filme 2	6,4	43,9	50,7	47,9	N	N	37,5	30	38,55	N	48,2	N
Filme 3	5,15	37,4	44,05	N	N	35	31,7	N	30,1	N	50,1	6,7
Filme 4	6,3	40,5	39,8	34,9	37,7	N	N	N	28,2	N	46,6	6,8
Filme 5	5,3	37	39,4	34,2	30	25,3	30,6	26,7	26,6	34,4	N	6,2
Média	5,95	40,6	44,85	41,4	37,45	34,6	34,65	31,4	32,35	39,5	48	6,85
Desvio	0,60	3,07	4,89	6,86	5,98	7,44	3,55	4,52	5,08	5,10	1,34	0,54

Figura 66. Cálculos efetuados para determinação das melhores diluições.

EXPERIÊNCIA 1 - (0%; 1 DECORATIVA; 1 FUNCIONAL)												
Filme 1	3,8	13,5	26,4	22,5	21,8	23,3	20,4	20,3	20,6	24,9	25,6	4,6
Filme 2	4,8	21,7	21,3	18,9	17,7	16,2	13,5	13,8	16,8	20,1	21,1	4,1
Filme 3	4,2	21,6	21,8	19,3	28,6	19,6	14,6	14,2	18,5	21,9	23,7	5
Filme 4	5	24,7	25,6	23,9	23,4	23,2	18,5	18,8	17,9	20,5	20,6	4,6
Filme 5	3,8	18,4	15,3	13,4	12,9	13	10,3	12,1	10,1	10,1	12,6	5,1
Média	4,32	19,98	22,08	19,6	20,88	19,06	15,46	15,84	16,78	19,5	20,72	4,68
Desvio	0,50	3,80	3,94	3,63	5,30	4,01	3,60	3,15	3,56	4,99	4,44	0,35

EXPERIÊNCIA 2 - (0%; 2 DECORATIVA; 2 FUNCIONAL)												
Filme 1	4,2	17,4	25	27,7	18,3	24,5	18,6	N	20,1	19,9	27	4,1
Filme 2	4,3	26,4	21,7	25,7	27,1	18,1	14,4	15,3	14,4	20,1	17,6	4,6
Filme 3	5,5	20,8	27,4	21,6	24,6	23,3	20,4	20	14,9	N	23	4,8
Filme 4	4,1	25,5	17,3	18,6	16,4	17,6	14,1	13,8	N	N	15,3	5,5
Filme 5	3,4	16,9	N	13,9	19,1	17	14,5	20,1	20,1	N	20,1	4
Média	4,3	21,4	22,85	21,5	21,1	20,1	16,4	17,3	17,375	20	20,6	4,6
Desvio	0,68	3,96	3,79	4,94	4,05	3,15	2,60	2,80	2,73	0,10	4,10	0,54

Figura 67. Cálculos efetuados para o plano: experiências 1 e 2.

EXPERIÊNCIA 3 - (10%; 2 DECORATIVA; 1 FUNCIONAL)												
Filme 1	8,5	40,4	44,1	43,3	34,7	33,3	30,7	25,9	N	29,1	35,8	8,3
Filme 2	N	N	38,0	N	N	28,3	26,2	N	21,8	N	N	8,3
Filme 3	6,7	52,6	42,7	29,7	24,9	24,1	21,1	22,9	26,0	29,0	38,9	8,4
Filme 4	5,8	34,2	34,8	32,0	29,6	27,6	25,4	27,3	25,9	N	29,9	7,0
Filme 5	N	N	N	N	N	N	23,6	N	28,1	N	N	7,5
Média	7,00	42,40	39,90	35,00	29,73	28,33	25,40	25,37	25,45	29,05	34,87	7,90
Desvio	1,12	7,64	3,71	5,94	4,00	3,28	3,18	1,84	2,28	0,05	3,73	0,55

EXPERIÊNCIA 4 - (10%; 1 DECORATIVA; 2 FUNCIONAL)												
Filme 1	7,5	30,1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Filme 2	7,0	38,2	37,0	34,3	28,9	27,7	23,2	N	N	26,2	N	5,7
Filme 3	6,8	35,5	33,4	29,1	26,9	22,4	19,3	21,8	21,3	24,9	N	N
Filme 4	5,7	N	N	N	N	N	N	N	25,2	31,6	32,9	N
Filme 5	6,4	N	38,5	31,7	30,6	25,2	21,7	25,1	N	29,7	N	6,6
Média	6,67	34,6	36,3	31,7	28,8	25,1	21,4	23,45	23,25	28,1	32,9	6,15
Desvio	0,60	3,37	2,14	2,12	1,51	2,16	1,61	1,65	1,95	2,68	0,00	0,45

Figura 68. Cálculos efetuados para plano: experiências 3 e 4.

	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B
Filme 1	23,5	74,3	73,8	69,2	74,2	N	77,6	78,1	86,6	95,1	117,7	30,1
Filme 2	20,0	72,5	75,0	74,2	87,5	N	84,7	73,0	79,8	135,8	81,4	28,4
Filme 3	16,8	52,4	52,3	52,6	50,1	56,8	N	53,0	61,2	52,5	61,2	20,3
Filme 4	19,7	66,3	71,4	70,9	N	73,3	63,4	73,3	71,5	77,9	79,7	21,3
Filme 5	23,0	68,9	66,6	66,1	57,5	70,6	59,8	73,6	57,1	93,0	63,9	18,6
Média	20,60	66,88	67,82	66,60	67,33	66,90	71,38	70,20	71,24	90,86	80,78	23,74
Desvio	2,44	7,76	8,28	7,47	14,56	7,23	10,17	8,80	11,05	27,14	20,16	4,61
r. média	5	3	3	3	3	4	5	4	4	5	4	5
r. desvio	5	2	2	2	3	2	3	3	3	5	5	13

Figura 69. Cálculos efetuados após termoformação dos filmes.

BRILHO							
	Filme impresso			Filme termoformado			
	20º	60º	85º	20º	60º	85º	
1	103,5	102,4	97,4	1	66,9	91,8	90,1
2	104,6	103	98	2	64,4	91,6	90,3
3	106,7	102,8	97,3	3	67,5	92,6	90,2
4	104,4	102,8	98,1	4	69,2	91,7	89,8
5	101,3	102,8	98,1	5	71,5	92,1	91
média	104,10	102,76	97,78	média	67,90	91,96	90,28
desvio	1,75	0,20	0,35	desvio	2,37	0,36	0,40

Figura 70. Cálculos efetuados para Brilho.

Anexo 7 - Dimensões das linhas do circuito

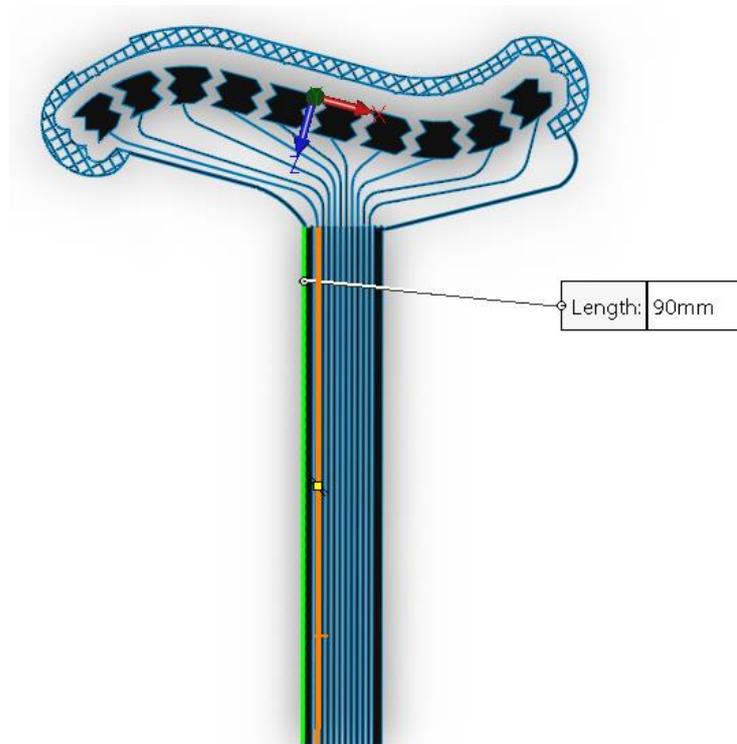


Figura 71. Comprimento das linhas do circuito.

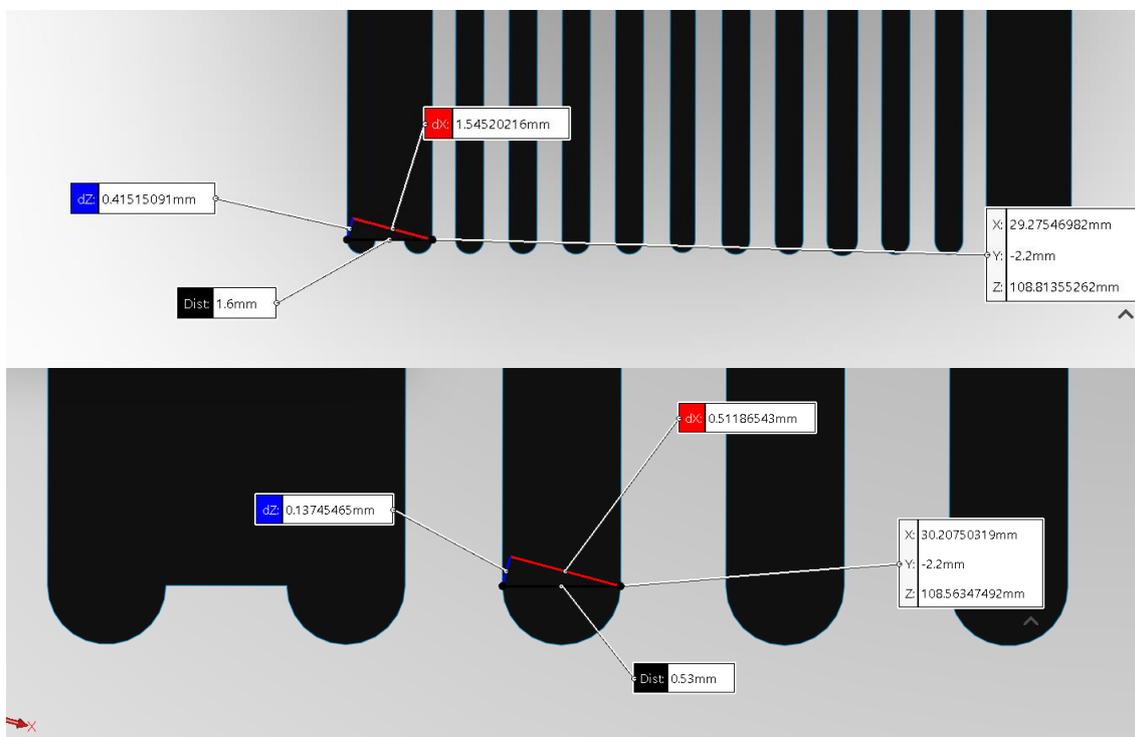


Figura 72. Largura das duas linhas do circuito.

Anexo 8 – Artigo publicado no âmbito do trabalho desenvolvido

INOVAÇÃO /

IN-MOULD ELECTRONICS PARA A PRODUÇÃO DE UMA SOLUÇÃO FUNCIONAL MAIS VERDE

Catarina Faria, Cátia Araújo, Diana Dias, Sílvia Cruz
PIEP- Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros

REVISTA MOLDE
E-FAMOL

59

Nos últimos anos tem-se assistido a uma evolução tecnológica que é transversal a diversos sectores, nomeadamente o sector automóvel. O interior dos automóveis possui cada vez mais componentes com superfícies funcionais, ou seja, superfícies táteis com *feedback*, promovendo, assim, a adoção da tecnologia que visa a sensorização e monitorização para um comando tátil - *In-Mould Electronics* (IME). Paralelamente, a pretensão de criar um impacto positivo ao nível da sustentabilidade ambiental e económica, aumentando, assim, a competitividade, visa a adoção de tecnologias mais ecológicas.

A procura por uma economia mais verde baseada em matérias-primas mais limpas e processos mais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de materiais com novas propriedades e funcionalidades [1]. Esta evolução visa a adaptação de tecnologias e métodos de processamento tradicionais, de

forma a irem ao encontro do paradigma atual e assentarem no desenvolvimento da engenharia sustentável.

Nesse sentido, surgiu a linha de investigação *Green Plastics Electronic*, que integra a agenda de investigação, desenvolvimento (I&D) e inovação tecnológica do PIEP no âmbito do projeto POLARISE. O projeto POLARISE enverga numa estratégia de desenvolvimento de competências de forma a capacitar recursos e organizações através da transferência de *know how*, contribuindo para a progressão no sector de Investigação, Desenvolvimento Tecnológico, Inovação e Engenharia.

Esta linha combina a produção de uma solução polimérica altamente integrada, funcional, de baixo peso e a complexidade associada ao processo IME. Este processo é uma evolução dos processos de decoração convencionais, cuja finalidade é



Tem Moldes/Matrizes Grandes de Componentes Múltiplos?
Novos Tamanhos Mesas Giratórias

Como os moldes de componentes múltiplos continuam a aumentar de tamanho, assim o fazem as soluções das prensas de ajustar Millutensil. A mesa giratória integrada é agora compatível com as nossas maiores prensas de ajustar, ajudando os nossos parceiros a reduzir significativamente os tempos de prova múltiplos, qualquer que seja o tamanho.

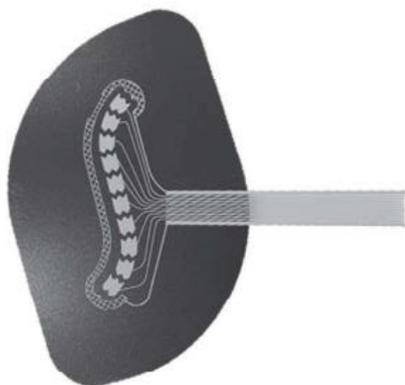
MILLUTENSIL
SINCE 1955
Plant Via delle Industrie, 10
6010 Izano (CR) - Italy
info@millutensil.com
www.millutensil.com
Office Corso Buenos Aires, 92
20124 Milano - Italy
Phone N. +39 02 29404390
Fax +39 02 2046677

MATER
www.mater.pt - mater@mater.pt



Novo Tablet Siemens
com o exclusivo
software MyMILL App®
spot smarter e criação
fácil de relatórios de ajuste.

a produção de um componente com características estéticas e funcionais, obtido pela combinação da eletrônica impressa, criando uma camada funcional. Esta solução permite, através da inclusão da eletrônica diretamente no processo de injeção, propiciar a substituição dos botões convencionais e reduzir o número de componentes, bem como o peso total da peça sendo, por isso, mais vantajosa aquando da comparação com as soluções convencionais. Incorporando o circuito elétrico num componente plástico, produzido por impressão de tinta funcional de prata em filme de suporte, termoformação do filme e sobremoldação de polímero fundido sobre o filme termoformado, foi possível a obtenção de uma peça final com diferentes decorações, aliada à sua capacidade funcional (Figura 1).

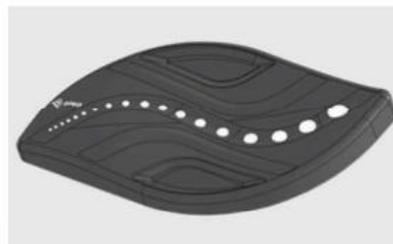


// Fig. 1 - Integração de camada decorativa e funcional em filme suporte.

Atualmente, os substratos poliméricos mais utilizados na eletrônica impressa são baseados em fontes não renováveis, o que contribui para um aumento do impacto ambiental. Já as tintas funcionais mais usuais atualmente baseiam-se em formulações com partículas de prata e, embora sejam uma opção quando comparadas com os PCB eletrônicos convencionais, possuem ainda um certo grau de impacto ambiental.

Dessa forma, a utilização de substratos flexíveis provenientes de fontes biológicas, recicláveis e/ou compostáveis, bem como tintas funcionais com menor pegada ambiental através da substituição da prata por outros metais como o cobre, o alumínio, ou preferivelmente à base de carbono, representam uma alternativa, apesar das limitações envolventes, aos materiais atualmente usados para a produção de uma solução mais sustentável [2].

Este projeto, que pretende desenvolver um interruptor que integra funcionalidades táteis para controlar funções (Figura 2A), tem como foco a implementação de soluções com uma maior sustentabilidade, tais como a seleção de materiais mais sustentáveis e a obtenção de processos mais eficientes a nível



a)



b)

// Fig. 2 A) - Interruptor com superfícies táteis para controlo de funções (modelo 3D); B) Primeiro modelo de protótipo resultante da implementação de IME para a produção de uma solução mais sustentável (TRL 6).

energético. Assim, por meio deste projeto, no que concerne à adoção de soluções mais ecológicas, o PIEP adquirirá competências no âmbito da eletrônica impressa verde através da adoção de materiais com menor impacto ambiental em alternativa à produção do interruptor tradicional de matriz fóssil.

AGRADECIMENTOS

Trabalho realizado no âmbito do Projeto POLARISE – apresentado ao abrigo da Medida RE-C05-i02 – Missão Interface, cofinanciado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência pela União Europeia.



[1] J. Sousa, "Os materiais avançados e a evolução tecnológica," Sociedade Portuguesa dos Materiais, Jun. 30, 2021. <https://spmaterias.pt/site/2021/06/30/os-materiais-avancados-e-a-evolucao-tecnologica/>.

[2] M. K. Välimäki et al., "Printed and hybrid integrated electronics using bio-based and recycled materials—increasing sustainability with greener materials and technologies," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 111, no. 1, pp. 325–339, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06029-8.