

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Nuno Miguel Barbosa Mariz

**Componentes funcionais obtidos
através de serigrafia**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Júlio César Machado Viana

julho 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

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

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação, contei com o auxílio e apoio de diversas pessoas, sem as quais a conclusão da mesma não teria sido possível, expressando o meu agradecimento mais sincero.

Ao meu orientador, o Professor Júlio Viana, agradeço a oportunidade que me concedeu para a realização deste tema nesta dissertação, assim como a sua contribuição com sugestões e ajuda, mostrando-se sempre disponível para me auxiliar.

A todos os investigadores do DEP e do IPC, que de alguma forma me auxiliaram nos procedimentos práticos desta dissertação, tendo sido incansáveis na ajuda prestada, mesmo quando nem tudo estava a correr da melhor forma. Um agradecimento especial à Sílvia Cruz, pois o seu auxílio na fase inicial no projeto, foi essencial para a conclusão do mesmo.

Aos meus pais e ao meu irmão, que foram incansáveis no apoio que foram demonstrando ao longo de toda a minha vida académica, especialmente nesta fase final da dissertação, onde o apoio foi ainda maior, tendo sido esta, a fase onde este era mais preciso.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos, aos que já trazia comigo antes de entrar para a universidade e aos que fiz dentro da mesma, sendo que o seu apoio foi essencial ao longo de todos estes anos, tanto nos bons, como nos maus momentos. Gostaria ainda de efetuar um agradecimento especial, ao João Pedro e ao Luís Pedroso, pois sem eles a ajudarem-me quando mais precisei, talvez não tivesse chegado aqui da forma que o consegui.

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

Com o aumento da competitividade dos mercados na produção de produtos eletrónicos, surgem cada vez mais especificações para este tipo de produtos. Desta forma, o objetivo principal desta dissertação, foca-se na produção de um componente funcional, a partir de uma película impressa, também ela funcional, recorrendo-se à técnica de IMD (*In-mould Decoration*) para os seus procedimentos.

Numa primeira fase, foi efetuada uma seleção de quais os materiais a utilizar durante todo o processo, desde o substrato, à tinta que será impressa, baseando-se esta seleção nos resultados de alguns testes de adesão, elasticidade e de caracterização elétrica, que permitem avaliar o estado em que as tintas se encontram. Nesta fase, foi ainda efetuada uma planificação de quais as estruturas que seriam impressas, de modo a que a película seja funcional, como pretendido.

Com os testes realizados e com materiais selecionados, e ainda antes de iniciar o processo de impressão com as estruturas que foram efetuadas, foi testada a impressão da tinta selecionada com o material selecionado para o substrato, tendo-se recorrido ao processo de moldação por injeção, para auxiliar na obtenção de substratos, assim como a um *Doctor Blade*, que procedeu aos testes de impressão. Após a impressão, voltaram a efetuar-se os mesmos testes que foram efetuados durante a seleção da tinta, percebendo-se as alterações que surgem com a alteração do substrato e se este é o material ideal para a aplicação da tinta selecionada.

Ainda antes de proceder à impressão, surgiu a oportunidade de utilizar um equipamento de corte e gravura a laser, de forma a produzir uma máscara ou uma gravura nos substratos utilizados, procedendo-se à impressão com o *Doctor Blade*, nos resultados obtidos.

Por fim, procedeu-se à impressão por serigrafia, sendo que durante a execução deste processo, surgiu disponível uma nova tinta com características semelhantes à selecionada previamente, tendo sido efetuados os testes de impressão com as duas tintas. Após as impressões, voltaram a ser efetuados os mesmos três testes nos resultados, de forma a avaliar o desempenho e a efetuar conclusões de todos os processos.

PALAVRAS-CHAVE

Impressão de eletrónicos, *In-mould Decoration*, Laser, Sensores interdigitais, Serigrafia

ABSTRACT

With increasing competition in the electronics product production markets, specifications for this type of products are increasingly emerging. In this way, the main objective of this dissertation, focus on the production of a functional component, from a printed film which is also functional, using IMD (In-mould Decoration) techniques for its procedures.

First, a selection process was made for which materials to use throughout the entirety of the process, from the substrate, to the ink that will be printed, basing this selection on the results of some adhesion, elasticity and electrical characterization tests, which allow to assess the conditions of the inks. At this stage, it was also made a planing of which structures would be printed, so that the film is functional, as intended.

With the tests carried out and with the selection of the materials completed, and even before starting the printing process with the structures that were designed, the printing of the selected ink was tested with the selected material for the substrate, using the injection moulding process, to assist in obtaining some substrates, as well as a Doctor Blade, who carried out the printing tests. After printing, the same tests that were performed before, during the selection process for the ink, were performed again, with the intent of getting an idea of the changes that switching the substrate material produces, as well as understanding if this is the ideal substrate for the selected ink.

Yet again, before starting the printing process, the opportunity arose to use the laser cutting and engraving equipment, in order to produce a mask or an engraving on the substrates, proceeding to the printing of the results obtained with the help of the Doctor Blade.

Finally, the screen printing process was carried out, being that during its execution, a new ink with similar characteristics to the one which was previously used was made available, and printing tests were carried out with both inks. After the procedures, the same three tests were again performed on the results, in order to evaluate their performance and to be able to conclude about all the processes that were made.

KEYWORDS

In-mould Decoration, Interdigital sensors, Laser, Printable Electronics, Screen Printing

Índice

Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Objetivos do trabalho.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2. Estado da Arte.....	4
2.1. Componentes funcionais.....	4
2.1.1. Tipos de estruturas comuns na impressão de eletrónicos.....	6
2.2. In-mould Decoration (IMD).....	7
2.2.1. Impressão – Serigrafia.....	8
2.2.2. Termoformação.....	17
2.2.3. Moldação por injeção.....	20
Capítulo 3. Seleção dos Materiais e dos Conceitos.....	22
3.1. Seleção das estruturas para a produção de um sensor.....	22
3.2. Seleção da técnica de impressão.....	27
3.2.1. Elaboração do desenho da tela para serigrafia.....	28
3.2.2. Seleção dos substratos e das tintas.....	29
3.2.2.1. Procedimento para a realização do teste de impressão com o <i>Doctor Blade</i>	32
3.2.2.2. Resultados dos primeiros testes de impressão com o <i>Doctor Blade</i> nos substratos de PEN.....	33
3.2.2.3. Resultados dos segundos testes de impressão com o <i>Doctor Blade</i> nos substratos de PEN.....	41
3.2.2.4. Testes de adesão com provetes de policarbonato (PC).....	49
3.2.2.5. Seleção final da tinta a usar no processo de impressão.....	51
Capítulo 4. Procedimento Experimental.....	52
4.1. Injeção de placas retangulares de PC.....	52
4.2. Impressão da tinta de prata nas placas de PC.....	56
4.3. Testes a realizar com as placas de PC.....	57
4.3.1. Procedimento para o cálculo da resistividade elétrica.....	59
4.4. Processos realizados com a máquina de corte e gravação a laser.....	60
4.4.1. Procedimento para a observação microscópica efetuada aos resultados obtidos....	62

4.4.2. Procedimento para a impressão efetuada aos resultados obtidos e para a obtenção dos valores da resistência elétrica	63
4.5. Processo de impressão por serigrafia	64
4.5.1. Caracterização da tela efetuada	64
4.5.2. Caracterização da máquina de serigrafia a utilizar	67
4.5.3. Procedimento para a impressão por serigrafia	67
Capítulo 5. Apresentação e Discussão dos Resultados	70
5.1. Impressão da tinta de prata nas placas de PC	70
5.2. Testes realizados com as placas de PC	71
5.2.1. Cálculo da resistividade elétrica	77
5.3. Processos realizados com a máquina de corte e gravação a laser	81
5.3.1. Observação microscópica efetuada aos resultados obtidos na gravação das placas de PC	86
5.3.2. Impressão efetuada nas placas de PC gravadas e obtenção do valor da resistência elétrica	95
5.4. Processo de impressão através da técnica de serigrafia com a tinta de prata HPS FG57B	100
5.4.1. Primeira fase de testes efetuados nas placas de PC	100
5.4.2. Segunda fase de testes efetuados nas placas de PC	106
5.4.3. Testes efetuados em filmes de PEN	110
5.4.4. Terceira fase de testes efetuados nas placas de PC	113
5.4.5. Quarta fase de testes efetuados nas placas de PC	116
5.5. Processo de impressão através da técnica de serigrafia com a tinta de prata DM-SIP-2001	122
5.5.1. Testes efetuados em filmes de PI	123
5.5.2. Testes efetuados em filmes de PEN	125
5.5.3. Primeira fase de testes efetuados nas placas de PC	128
5.5.4. Segunda fase de testes efetuados nas placas de PC	132
5.6. Realização de testes de caracterização física e elétrica nos resultados obtidos	137
5.6.1. Obtenção da resistência elétrica dos resultados impressos	138
5.6.2. Testes de dobra efetuados nas placas de PC impressas com a segunda tinta de prata	146
5.6.3. Obtenção da resistência elétrica para os resultados obtidos nas placas de PC após o teste da dobra	150

Capítulo 6. Conclusões.....	153
Referências Bibliográficas	158
Anexo I – Desenho Técnico do Primeiro Sensor Interdigital (0,5 mm de espaçamento).....	162
Anexo II – Desenho Técnico do Segundo Sensor Interdigital (1 mm de espaçamento)	163
Anexo III – Desenho Técnico do Sensor Circular	164
Anexo IV – Desenho Técnico do Sensor em Forma de Rede	165
Anexo V – Desenho Técnico da Tela de Serigrafia.....	166
Anexo VI – Ficha Técnica para o Filme <i>Teonix Q83</i>	167
Anexo VII – Ficha Técnica para a Tinta de Prata HPS FG57B.....	168
Anexo VIII – Ficha Técnica do Material LEXAN LUX2180T	169
Anexo IX – Parâmetros de Processamento Utilizados no Processo de Injeção	172
Anexo X – Ficha Técnica para a Tinta de Prata DIM-SIP-2001.....	174

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema demonstrativo da geometria básica de um sensor interdigital	7
Figura 2: Imagem do squeegee utilizado durante o processo de impressão.....	11
Figura 3: Equipamento de serigrafia de mesa plana ATMA AT-60PD	13
Figura 4: Esquema simples de um sensor interdigital, com a sua nomenclatura específica, em que L corresponde ao comprimento dos traços desenhado, w à largura dos mesmos e s ao espaçamento entre traços.....	23
Figura 5: Imagem do sensor desenhado numa placa retangular com o espaçamento de 0,5 mm	24
Figura 6: Imagem do sensor desenhado numa placa retangular com o espaçamento de 1 mm	25
Figura 7: Imagem do sensor circular desenhado numa placa retangular.....	26
Figura 8: Imagem do sensor cruzado em forma de rede numa placa circular.....	27
Figura 9: Imagem descritiva do desenho da tela de serigrafia	28
Figura 10: Exemplo de um filme de PEN cortado com as dimensões de 150mmX80mm.....	31
Figura 11: Foto do Doctor Blade com uma placa de vidro com uma presilha	32
Figura 12: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. A imagem da esquerda representa o Filme 1 e a da direita o Filme 2.....	34
Figura 13: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de prata HPS FG57B. A imagem da esquerda representa o Filme 3 e a da direita o Filme 4	35
Figura 14: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. A imagem da esquerda representa o Filme 5 e a da direita o Filme 6.....	36
Figura 15: Representação do procedimento para a realização do teste de adesão.....	37
Figura 16: Auxiliar utilizado para a obtenção precisa do valor da resistência elétrica	38
Figura 17: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes de maior espessura de tinta impressa. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 2 e na direita a imagem do Filme 6	40
Figura 18: Imagens dos três resultados obtidos no teste de dobra para os três filmes de menor espessura de tinta impressa. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 1, no centro da imagem do Filme 3 e na direita a imagem do Filme 5.....	40
Figura 19: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de prata HPS FG57B. A imagem da esquerda representa o Filme 7 e a da direita o Filme 8	42
Figura 20: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. A imagem da esquerda representa o Filme 9 e a da direita o Filme 10.....	43
Figura 21: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. A imagem da esquerda representa o Filme 11 e a da direita o Filme 12.....	43
Figura 22: Imagem do resultado obtido no teste de dobra para o filme impresso com a tinta de prata HPS FG57B.....	46
Figura 23: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes impressos com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 9 e na direita a imagem do Filme 10	47

Figura 24: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes impressos com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 11 e na direita a imagem do Filme 12	48
Figura 25: Imagem de um provete de PC que foi usado para o teste de adesão.....	49
Figura 26: Imagens dos resultados obtidos para os testes de adesão com os provetes de PC. A imagem da esquerda representa o resultado para a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66, na imagem do centro para a tinta HPN-DEV-79-89-84 e na da direita para a tinta HPS FG57B.....	50
Figura 27: Imagens do molde aberto das placas retangulares.....	53
Figura 28: Imagem da máquina de moldação por injeção utilizada, a Ferromatik Elektra Evolution 110-300	54
Figura 29: Imagem de uma placa injetada após a extração da peça da máquina	55
Figura 30: Imagem de uma placa retangular sem o jito	55
Figura 31: Imagem representante do procedimento a executar para a realização do teste de adesão	58
Figura 32: Imagem do desenho selecionado para os testes com a máquina de laser	61
Figura 33: Imagem da tela efetuada com os desenhos	64
Figura 34: Imagem representativa do desenho transferido para a tela de um sensor interdigital66	
Figura 35: Imagem demonstrativa dos resultados da impressão de tinta de prata HPS FG57B nas placas de PC.....	70
Figura 36: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 1	72
Figura 37: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 2.....	72
Figura 38: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 4.....	73
Figura 39: Imagens do resultado do teste da dobra na Placa 5.....	73
Figura 40: Imagem representativa do resultado do corte no filme de PEN.....	82
Figura 41: Imagem representativa do resultado do primeiro teste de gravura numa placa de PC	84
Figura 42: Imagem representativa do resultado do segundo teste de gravura numa placa de PC	85
Figura 43: Imagem representativa do resultado do último teste de gravura numa placa de PC .	86
Figura 44: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a primeira placa de PC gravada	87
Figura 45: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a primeira placa de PC gravada	88
Figura 46: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a segunda placa de PC gravada	89
Figura 47: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a segunda placa de PC gravada	90
Figura 48: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a última placa de PC gravada	91
Figura 49: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a última placa de PC gravada	93
Figura 50: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na primeira placa de PC gravada	96

Figura 51: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na segunda placa de PC gravada	97
Figura 52: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na última placa de PC gravada	98
Figura 53: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC1-S1.....	101
Figura 54: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC2-S1.....	103
Figura 55: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC3-S1.....	104
Figura 56: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC4-S2.....	107
Figura 57: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC5-S2.....	108
Figura 58: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC6-S2.....	109
Figura 59: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T1-PEN1-S2	112
Figura 60: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T1-PEN1-S1	112
Figura 61: Imagem representativa das ligações efetuadas da máquina à terra através de fios de cobre.....	114
Figura 62: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC7-S2.....	115
Figura 63: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC8-S2.....	115
Figura 64: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC9-S2.....	117
Figura 65: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC10-S2.....	118
Figura 66: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC11-S2.....	120
Figura 67: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC12-S1.....	121
Figura 68: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PI1-S2.....	124
Figura 69: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PI2-S2.....	124
Figura 70: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PEN1-S2	126
Figura 71: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PEN2-S2	127
Figura 72: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC1-S2.....	129
Figura 73: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC2-S2	130
Figura 74: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC3-S2	131
Figura 75: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC4-S1	133
Figura 76: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC5-S1	134
Figura 77: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC6-S3	136
Figura 78: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC7-S3	136
Figura 79: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC2-S2	147
Figura 80: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC3-S2	147
Figura 81: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC4-S1	148
Figura 82: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC5-S1	148
Figura 83: Imagem do resultado do teste da dobra na placa T2-PC6-S3	149
Figura 84: Imagem do resultado do teste da dobra na placa T2-PC7-S3	149

Índice de Tabelas

Tabela 1: Valores selecionados e obtidos para os sensores interdigitais desenhados.....	24
Tabela 2: Valores selecionados e obtidos para os sensores circulares desenhados.....	26
Tabela 3: Valores obtidos para a resistência elétrica dos primeiros filmes impressos.....	38
Tabela 4: Valores obtidos para a resistência elétrica dos segundos filmes impressos	45
Tabela 5: Valores apresentados para as principais características da malha da tela [40].....	66
Tabela 6: Valores apresentados para as principais características do equipamento ATMA AT-60PD	67
Tabela 7: Valores dos parâmetros utilizados no processo de impressão das placas retangulares de PC.....	70
Tabela 8: Valores obtidos para a resistência elétrica nas placas de PC impressas antes do teste de dobra.....	75
Tabela 9: Valores obtidos para a resistência elétrica nas placas de PC impressas após o teste da dobra	75
Tabela 10: Dados dimensionais dos filmes de PEN impressos com a tinta de prata	77
Tabela 11: Valores calculados para a resistividade elétrica dos filmes de PEN	77
Tabela 12: Dados dimensionais das placas de PC impressas com a tinta de prata.....	79
Tabela 13: Valores calculados para a resistividade elétrica das placas de PC antes do teste de dobra	79
Tabela 14: Valores calculados para a resistividade elétrica das placas de PC após o teste de dobra	79
Tabela 15: Valores obtidos para a resistência elétrica das placas de PC gravadas.....	99
Tabela 16: Resultados da resistência elétrica para a primeira fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC.....	139
Tabela 17: Resultados da resistência elétrica para a segunda fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC.....	139
Tabela 18: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da primeira tinta nos filmes de PEN.....	140
Tabela 19: Resultados da resistência elétrica para terceira fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC.....	141
Tabela 20: Resultados da resistência elétrica para a última fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC.....	141
Tabela 21: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da segunda tinta nos filmes de PI	143
Tabela 22: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da segunda tinta nos filmes de PEN.....	143
Tabela 23: Resultados da resistência elétrica para a primeira fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC.....	144
Tabela 24: Resultados da resistência elétrica para a segunda fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC.....	145

Tabela 25: Resultados da resistência elétrica para a terceira fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC.....	145
Tabela 26: Resultados da resistência elétrica para as primeiras placas de PC dobradas	150
Tabela 27: Resultados da resistência elétrica para as segundas placas de PC dobradas	151
Tabela 28: Resultados da resistência elétrica para as últimas placas de PC dobradas.....	152

Nomenclatura

FIM - *Film Insert Moulding*

IMD - *In-mould Decoration*

PC - Policarbonato

PEN - Polietileno Naftalato

PI - Poliimida

Tg - Temperatura de transição vítrea

Capítulo 1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Após um período de estágio menos favorável numa empresa, surgiu a oportunidade de regressar à Universidade do Minho, para realizar a dissertação de mestrado, sendo apresentada uma proposta de um tema, que foi prontamente selecionado, por ser muito interessante e desafiante, sendo este “*Componentes funcionais obtidos através de serigrafia*”.

Neste tema, foi proposta a produção de um produto, através de técnicas de moldação por injeção, em que durante os processos da sua produção, é fornecido algum tipo de funcionalidade, sendo que para o caso desta dissertação, foram fornecidas características elétricas ao componente em questão, através de tintas condutoras.

Para tal, foi necessário perceber como proceder à utilização destas tintas, de forma a que a peça seja, funcional e, para tal, recorreu-se a variantes do processo comum de moldação por injeção, sendo selecionada a técnica de FIM (*Film Insert Moulding*), sendo esta também uma variante da tecnologia de IMD (*In-mould Decoration*), sendo que, numa primeira fase, é atribuída uma decoração a um filme, de seguida esse filme impresso é termoformado e por fim, procede-se à sobre moldação desse filme termoformado, através do processo de injeção.

Conhecida a tecnologia a utilizar ao longo de todo este trabalho, a primeira fase deste trabalho, foca-se na seleção dos materiais a utilizar, desde os substratos para o processo impressão e quais as tintas a serem impressas sobre os mesmos. Também nesta primeira fase, são selecionadas quais as técnicas que serão utilizadas para cada um dos processos a implementar, pois as possibilidades são variadas e distintas, sendo necessário avaliar quais se adequam melhor às necessidades da peça a produzir.

As fases seguintes do trabalho, são a aplicação da primeira técnica do processo de FIM, procedendo-se a um estudo do processo de impressão de tintas condutoras nos filmes previamente selecionados, de forma a produzir uma película que seja funcional e que possa ser aplicada nas restantes técnicas de IMD-FIM, para permitir produzir um componente final totalmente funcional. No final, o produto final obtido durante o processo de impressão, será posto à prova em alguns testes, de forma a proceder a uma avaliação de toda a produção desta película funcional.

De referir, que todas as fases desta dissertação são um processo iterativo, pois em qualquer fase do trabalho é efetuada uma certa seleção, tanto de materiais, como de processos, que influenciam todo o trabalho a efetuar, e surgindo algum erro numa fase mais avançada da produção do produto, pode ser necessário voltar alguns passos atrás e recomeçar esse passos de novo, de forma a corrigir esse erro que apareceu.

1.2. Objetivos do trabalho

A presente dissertação tem como objetivo principal, o desenvolvimento de um produto funcional a partir das tecnologias selecionadas, tendo sempre em conta a técnica não convencional de moldação por injeção IMD-FIM, desenvolvendo a técnica de impressão, para a produção de uma película, que seja também ela funcional.

Um segundo objetivo para esta dissertação, foca-se numa análise ativa de problemas e defeitos que possam surgir ao longo de todos os processos de impressão, que são efetuados no processo de criação de uma película impressa funcional, a partir da técnica de IMD-FIM, desde problemas de impressão da tinta no substrato, através da técnica selecionada, a problemas com a tinta impressa, durante a realização dos testes que são efetuados de seguida. Deste modo, é necessário uma avaliação de todos os processos, com o propósito de corrigir e evitar estes possíveis problemas.

1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho efetuado durante esta dissertação, encontra-se dividido em seis capítulos distintos.

No Capítulo 1, denominado de “Introdução”, é efetuado um enquadramento de todo o trabalho que é efetuado ao longo desta dissertação, explicitando também os objetivos principais para a realização deste trabalho.

No Capítulo 2, “Estado da Arte”, é efetuado um enquadramento teórico de todos os processos que são utilizados, ao longo de todo este trabalho, apresentando alguns exemplos de trabalhos de investigação científica que auxiliam o desenvolvimento deste projeto.

No Capítulo 3, “Seleção dos Materiais e dos Conceitos”, é realizado um processo de seleção de tudo o que será utilizado durante os processos seguintes, desde as estruturas que serão impressas, com a função de produzir alguma funcionalidade ao produto em causa, os

materiais a usar, como substratos e tintas para a impressão, até às diferentes tecnologias para a usar para a impressão.

No Capítulo 4, “Procedimento Experimental”, procede-se a uma apresentação de como todos os processos e testes foram desenvolvidos, ao longo de todo o trabalho.

No Capítulo 5, “Apresentação e Discussão dos Resultados”, apresentam-se todos os resultados obtidos para os diferentes testes e processos efetuados, efetuando-se de seguida, uma avaliação e comparação desses mesmos resultados.

No Capítulo 6, “Conclusões”, são apresentadas as principais conclusões retiradas ao longo de todo o projeto.

Capítulo 2. Estado da Arte

2.1. Componentes funcionais

Como descrito no capítulo anterior, o objetivo principal para esta dissertação corresponde à produção de um produto funcional, neste caso uma película funcional, através de técnicas não convencionais de moldação por injeção, a técnica de IMD-FIM. Deste modo, em primeiro lugar, é necessário compreender do que se tratam este tipo de produtos.

Um componente funcional, de uma forma simplista, corresponde a um produto, em que a sua produção é efetuada a partir de técnicas normais de processamento, mas, a diferença com uma peça considerada como normal, encontra-se com a adição de alguma característica à peça em produção, de forma a que esta possua alguma funcionalidade. Existem diversas funcionalidades que podem ser atribuídas a um produto, mas a que foi selecionada para esta dissertação, corresponde ao fornecimento ao produto em causa de características elétricas, de forma a que este funcione, por exemplo, com o toque de uma pessoa, ou quando este produto se encontrar ligado a uma fonte de energia, ativando alguma função na peça.

De modo a proceder a este passo na produção de um produto, foi necessário perceber como esta funcionalidade seria atribuída à peça que se pretende produzir, tendo sido escolhida uma tecnologia que se encontra em clara expansão na indústria eletrónica e plástica, sendo esta a impressão de componentes eletrónicos. [1]

Atualmente, a procura por produtos eletrónicos, com especificações técnicas cada vez mais elevadas e complicadas de se conseguir, tem vindo a aumentar drasticamente com o incremento considerável da utilização de produtos eletrónicos no nosso dia-a-dia. Deste modo, é necessário procurar por soluções, que permitam controlar alguns dos problemas existentes nestes produtos, como a não flexibilidade dos produtos em causa, ou a baixa resistência a certos aspetos com que o produto se defronta, de forma a que estes problemas sejam mais controlados ou deixem de existir por completo. Assim, foi surgindo e aumentando a procura pela impressão de componentes eletrónicos, pois esta tecnologia trata-se de um processo que se encontra em rápida expansão, possui um baixo custo, uma baixa área de impressão, pouco peso e, o mais importante de todos os aspetos, permite a impressão de estruturas eletrónicas flexíveis, numa grande escala, permitindo um maior controlo de algumas das especificações pretendidas, em alguns dos produtos eletrónicos mais comuns. [1] [2]

O conceito de impressão de eletrônicos flexíveis corresponde à utilização de técnicas de impressão comuns, para a produção de circuitos elétricos em substratos com características flexíveis, em que são impressas estruturas eletricamente condutoras, podendo estas ser, por exemplo, algum tipo de sensor capacitivo, resistivo ou piezoelétricos. [3] [4]

Ainda assim, trata-se de um processo que ainda se encontra com algumas limitações, pois apesar de permitir a impressão de sistemas elétricos, em superfícies com formatos curvos ou irregulares e que possam ainda ser deformadas, os materiais que são usados nos processos podem ainda possuir uma certa rigidez, dependendo do tipo de material utilizado, que pode não permitir a flexibilidade pretendida, sendo este um dos grandes desafios da tecnologia de impressão de eletrônicos flexíveis. [5]

A impressão destas estruturas elétricas a partir deste tipo de tecnologias, normalmente ocorre em filmes de espessuras reduzidas e que tentam ser cada vez mais finas, pois estes permitem a flexibilidade tão desejada, assim como baixo peso e dimensões reduzidas, que resultam num baixo custo de produção, mas que acarretam outras limitações ao processo, como baixas resistências ao impacto ou baixas características físicas nos materiais, que impedem que o produto impresso, seja incorporado em certos produtos eletrônicos a pronto. [6]

Tendo em conta estas limitações vão surgindo soluções para estes problemas com os filmes impressos, sendo uma destas, a situação onde se incorporam outras técnicas de processamento de produtos em plástico, ao processo de impressão, como a moldação por injeção e a termoformação, de forma a que o filme possua na mesma as características específicas pretendidas, mas em que as propriedades físicas melhorem consideravelmente, de forma a que o produto final, possa ser considerado como utilizável. Estes três processos encontram-se incorporados na técnica de *In-mould Decoration* (IMD), que será a tecnologia utilizada nesta dissertação para a produção da película funcional pretendida e que será discutida num dos pontos seguintes deste capítulo (Ponto 2.2.). [6]

2.1.1. Tipos de estruturas comuns na impressão de eletrônicos

Apesar de existirem outras estruturas que podem ser impressas para este tipo de produtos, na maior parte das peças que são desenvolvidas a partir da tecnologia de impressão de eletrônicos, as estruturas que surgem em quase todos os exemplos, são os sensores. [7]

Um sensor corresponde a uma estrutura em que quando um sinal lhe é transmitido, por exemplo a partir de uma fonte de energia, este pode ser quantificado, e pode alterar o valor deste mesmo sinal, consoante a alteração de um ou mais aspetos físicos no sensor, como por exemplo, quando um dedo toca num sensor sensível ao toque. Esta característica torna estas estruturas muito interessantes, permitindo que diversos tipos de sensores sejam efetuados, com funções diferentes, dependendo da forma como estes são preparados e quais os aspetos físicos que estão em estudo e sujeitos a alterações. [8]

A intenção quanto aos sensores para este trabalho, consiste na produção de um sensor que altere o sinal que lhe é fornecido aquando do toque de uma pessoa, tratando-se de um sensor sensível ao toque (dispositivo *touch*). Deste modo, os sensores que se encontram em estudo neste trabalho, recaem nos resistivos e nos capacitivos, que são normalmente os mais utilizados em neste tipo de sensores. [7]

Assim, ao conhecer os tipos de sensores a utilizar, é necessário proceder à escolha de um sensor em específico, sendo que neste caso foi selecionado um sensor que é denominado de interdigital, e este consiste num tipo de sensor em que a sua estrutura é diferente do normal, pois baseia-se em dois elétrodos que possuem um formato periódico de pequenas estruturas, que se assemelham a dedos interligados e que se encontram no mesmo plano em paralelo. Estes elétrodos, sendo um positivo e outro negativo, e por estarem no mesmo plano, criam um campo elétrico, que penetra no substrato utilizado para a sua impressão, que com as suas propriedades dielétricas, em conjunto com a geometria selecionada para o sensor, afetam a capacitância e a condutividade entre os dois elétrodos, criando-se o efeito pretendido com o sensor interdigital. Na figura seguinte, encontra-se representado um esquema de um sensor interdigital (Figura 1). [7]

[9]

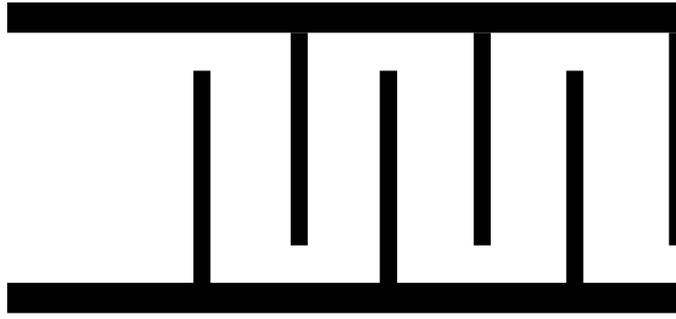


Figura 1: Esquema demonstrativo da geometria básica de um sensor interdigital

Este tipo de sensores são dos mais utilizados para este tipo de produções através de impressão de eletrónicos, pois o seu carácter periódico possui algumas vantagens, permitindo que a estrutura seja repetida as vezes necessárias, de forma a que o comprimento do sensor seja do tamanho que se pretenda, pois com um comprimento extenso, a capacitância aumenta consoante esta dimensão, melhorando o desempenho do sensor. [7] [9]

A geometria deste tipo de estrutura é de uma importância máxima para a sua produção, pois nos valores para o comprimento do sensor e para o espaçamento entre os “dedos”, se encontra a forma de controlar o comportamento elétrico do sensor. [10]

2.2. In-mould Decoration (IMD)

Como referido no Ponto 2.1., a tecnologia que foi selecionada para a produção do componente funcional pretendido para este trabalho, e que engloba a impressão de eletrónicos, trata-se do *In-mould Decoration* (IMD), sendo que esta tecnologia consiste na produção de um filme, em que este é decorado (impressão do sensor) e, de seguida, este filme é colocado dentro de um molde, onde este será sobre moldado a partir da técnica de moldação por injeção, ganhando o filme uma robustez que não possuía anteriormente. [5]

Apesar de este ser o procedimento base para um processo IMD, existem algumas variantes para esta técnica, onde outras tecnologias são introduzidas ao processo, com o intuito de facilitar o mesmo ou para fornecer novas características ao produto que é desejado produzir. Deste modo, para este trabalho foi utilizada uma dessas variantes de IMD, sendo esta denominada de *Film Insert Moulding* (FIM), em que às duas técnicas descritas anteriormente (Impressão e Moldação por injeção), é adicionada uma outra, sendo esta a termoformação. [11]

Com a introdução deste novo aspeto no processo, este passa a ser composto por três fases distintas, sendo elas, numa primeira fase, a impressão, em que é impresso um sensor num

filme, de seguida, vem a fase da termoformação, onde é fornecido ao filme impresso um formato 3D, numa forma que permita que este se encaixe no molde da última fase do processo, a moldação por injeção, onde por cima do filme impresso e termoformado, é injetado material para lhe fornecer a forma final e permitir que o filme possua maiores resistências e características físicas. [2][12]

Esta técnica possui algumas vantagens, como permitir formas geométricas distintas, diminuição de custos de produção, com o uso de moldes de termoformação e moldação por injeção já existentes, obtenção de um só produto, o que faz com que o tamanho e peso do resultado obtido seja substancialmente menor e permitir efetuar produtos para diversas áreas, pois oferece a possibilidade de realização de diversas decorações nos filmes. [11][13]

Mas como qualquer tecnologia, apresenta também algumas desvantagens como, os diferentes passos da técnica possuírem uma grande duração e custo e, quando são utilizados moldes já existentes, a qualidade das peças a obter é bastante menor, do que se os moldes fossem efetuados apenas com o propósito da produção das peças a obter. [13][14]

2.2.1. Impressão – Serigrafia

A técnica de impressão, corresponde a um processo onde é efetuada uma certa decoração num produto, em que na maioria dos casos, possui um motivo comercial. Mas nem todos os produtos que são impressos, possuem esta função, existindo cada vez mais novas formas de abordar a impressão para diferentes processos e produtos. [2]

Deste modo, a impressão surge como um aspeto essencial para as técnicas de IMD-FIM, pois trata-se da primeira fase deste procedimento, e possui uma vertente muito importante quando é aplicada a impressão de componentes e produtos eletrónicos.

Para efetuar o processo de impressão, as técnicas existentes são inúmeras, existindo uma técnica mais aconselhada, para cada tipo de produto que se pretende imprimir e dividem-se principalmente considerando dois aspetos, impressão com contacto e sem contacto, em que na primeira, a impressão efetuada na tinta é realizada através de contacto físico com o substrato, enquanto que na sem contacto, a impressão é realizada através de processos de dispersão da tinta, em que esta é depositada no substrato com o formato pretendido. As técnicas de contacto possuem uma grande desvantagem quando comparadas com as sem contacto, pois as primeiras, em muitos casos, danificam o substratos onde estão a ser impressas, devido ao contacto que é

efetuado e possuem um grande desperdício de tinta, devido ao facto de a impressão não se limitar apenas à estrutura que vai ser impressa, mas também ao local onde a impressora tem de passar para conseguir imprimir o produto pretendido. [15] [16]

Com uma variedade extensa para cada uma das impressões descritas no parágrafo anterior, é necessário perceber como efetuar a seleção de uma tecnologia de impressão. Tendo em conta as estruturas que se pretende imprimir, assim como os custos e volumes de produção que se pretende utilizar e ainda os materiais que serão utilizados como substratos e tintas, é principalmente a partir destes aspetos, que se avalia qual a melhor tecnologia a utilizar. Este trabalho que está a ser apresentado nesta dissertação apenas se focou em técnicas de impressão por contacto, tendo sido escolhida a técnica de serigrafia para o mesmo. [17]

A serigrafia trata-se de uma técnica de impressão por contacto, sendo uma das tecnologias mais utilizadas para impressões de componentes eletrónicos, especialmente para sensores tácteis, sendo a tecnologia que mais se enquadra com o que é pretendido para esta dissertação. Possui diversas características que são bastante importantes para este trabalho, como a sua velocidade e versatilidade, o baixo custo de produção e investimento, a sua simplicidade, apesar de possuir uma extensa lista de parâmetros que podem ser alterados durante o seu processo, e a sua fácil adaptação ao produto que se pretende imprimir, conseguindo uma elevada precisão quando os parâmetros corretos são utilizados e o equipamento também é o mais indicado. [15] [18]

O seu processo de funcionamento é bastante simples, baseando-se no processo de transferência da tinta que se pretende imprimir, através de uma imagem numa malha, com o auxílio de um componente com a função de empurrar a tinta, denominado de *squeegee*. [2]

Esta tecnologia é composta por quatro componentes obrigatórios para que o equipamento e a impressão possam decorrer, sendo estes uma tela de impressão efetuada a partir de uma malha, por cima desta, encontra-se o *stencil*, que produz a imagem que foi selecionada para a impressão, o *squeegee*, que como já foi referido anteriormente, se trata do componente que promove o deslocar da tinta ao longo da tela, para que esta seja impressa no substrato selecionado e por fim, uma mesa onde é colocado o substrato, sendo este o local onde a tela será colocada e a impressão realizada. [19]

A tela de impressão, como descrita anteriormente, é composta por uma malha efetuada a partir de materiais metálicos ou poliméricos, sendo que esta é esticada numa moldura que pode também ser efetuada de diversos materiais, como a madeira ou metais. A moldura possui uma

função de extrema importância, pois esta tem de assegurar que a malha que foi selecionada para a impressão, se mantenha completamente esticada consoante a tensão pretendida, durante a produção do *stencil*, assim como durante o processo de impressão. Esta moldura tem de ser selecionada, tendo em conta que irá sofrer diversos contactos com produtos químicos, que podem afetar a sua estrutura, como por exemplo durante a produção do *stencil*, ou durante o processo de limpeza das tintas, se for o caso de necessidade de produtos químicos para a limpar, sendo este o principal aspeto para a seleção de materiais metálicos na maior parte dos casos. Para esta dissertação, foi selecionada uma moldura metálica por estes mesmos motivos. [2]

A escolha da malha, já possui uma influência muito grande para a produção do produto desejado, pois trata-se do mais importante aspeto para a impressão por serigrafia, em conjunto com o *stencil*, porque é a malha que durante o processo de impressão permite a passagem de tinta através dos seus fios e promove a definição da espessura de tinta que será impressa, sendo esta a sua principal função na serigrafia. Deste modo, existem diversas características que são importantes ter em conta no processo de seleção da malha a usar, começando logo pelo material a utilizar para a mesma, existindo diversos tipos de materiais, como poliéster ou aço inoxidável, que são os mais utilizados, que permitem diferentes características para a tela. Uma outra característica muito importante na escolha da malha, passa pela seleção do diâmetro dos fios da malha e os seus comprimentos, assim como o número de fios utilizados por cm, pois são estes três aspetos que definem a qualidade da impressão, sendo que em malhas onde existem mais fios por cm, permitem uma maior precisão na altura da impressão, determinando também qual o tamanho mais pequeno que uma partícula de tinta atravessa a malha, assim como malhas com um maior diâmetro para cada fio obtêm resultados similares. É então perceptível que é preciso jogar com todas estas características, de forma a obter a tela de impressão ideal com a malha certa. [2] [15] [20] [21]

De seguida, com a malha selecionada para a utilização, é necessário efetuar a transferência da imagem que se pretende imprimir para a tela que se encontra em produção, recorrendo-se a execução de um *stencil* na mesma. O processo normal de criação de uma imagem por um *stencil*, começa com um processo de um revestimento na malha com uma resina, sendo que essa resina, de seguida, é exposta a uma emulsão fotossensível na tela, onde se procede à exposição da imagem selecionada, num processo semelhante à de uma revelação de uma fotografia, onde a imagem pretendida é passada para a malha, através da remoção da resina, nos locais onde as estruturas se vão encontrar, ficando assim pronta a imagem na tela. Importante

referir também, que o *stencil* é sempre produzido na parte superior da tela de impressão, ou seja, na zona onde a tela não entrará em contacto com a mesa do equipamento, pois este componente da tela, também funciona como uma espécie de camada protetora da malha, que se trata de um componente mais frágil, contra as pressões e danos que o *squeegee* provoca durante o processo de impressão.[2]

Como referido anteriormente, assim como a malha é muito importante para o processo de impressão por serigrafia, o outro aspeto que possui uma importância semelhante corresponde ao *stencil* produzido, pois enquanto que a malha controla a tinta que passa para o substrato e a espessura com que essa tinta ficará, o *stencil* controla a forma que a estrutura a imprimir possuirá, permitindo uma elevada precisão na impressão das estruturas pretendidas. Assim, tal como a escolha da malha correta é muito importante para o processo de impressão, também uma boa escolha do *stencil* e do desenho que será transmitido, é muito importante. [2] [20]

O componente seguinte trata-se do *squeegee*, sendo este o elemento que procede ao arrastar da tinta ao longo da tela de impressão e que força a tinta a passar ao longo do desenho efetuado no *stencil*, tratando-se de um componente indispensável para todo o processo. Este elemento do processo de serigrafia, possui duas estruturas distintas, uma borracha ou plástico que será a parte do componente que efetuará o arraste de tinta e um punho ou um engate para proceder à impressão manual ou no equipamento, respetivamente, como é possível verificar na Figura 2.[2]



Figura 2: Imagem do *squeegee* utilizado durante o processo de impressão

Durante um processo de impressão por serigrafia através de um processo automático num equipamento, é ainda utilizado um segundo *squeegee* todo metálico, com o intuito de recolher

o excesso de tinta que se acumula na superfície da tela de impressão. Ambos os *squeegees* que são usados em telas de impressão, devem possuir um tamanho um pouco menor do que a largura total da tela, de forma a que esta última não seja afetada pelas pressões junto à moldura, onde a malha se encontra presa e constantemente a ser deformada, e com a pressão que um *squeegee* produz, pode danificar a extensibilidade da malha. [2]

Apesar de ser um componente indispensável ao processo, este não influencia em nada os aspetos da impressão que se encontra em realização, pois esta apenas arrasta a tinta para a imagem que foi transferida para a tela e “empurra” a tinta para o substrato que se encontra na mesa de impressão, com a pressão e velocidade que lhe é atribuída, mas são a malha e o *stencil* que influenciam o resultado do que é impresso, tanto a geometria, como a espessura da tinta. Deste modo, a velocidade e a pressão do *squeegee*, devem possuir os valores mínimos, para que a tinta seja empurrada na sua totalidade para dentro da malha, pois um excesso de pressão ou velocidade neste componente, podem afetar negativamente a espessura predeterminada na malha, ou a capacidade de preenchimento do *stencil*. [20]

Por fim, o último componente a estudar corresponde à mesa de impressão, e apesar de em teoria, este ser o componente de um equipamento de serigrafia que menos influência tem no processo de impressão, este consegue possuir diferentes formatos, dependendo da estrutura do substrato que será impresso com a tinta, podendo imprimir tanto em substratos planos flexíveis e rígidos, como em substratos curvos. [22]

Assim, existem diversos formatos para a mesa, sendo o mais comum de todos o método de mesa plana (*flatbed*), que será a estrutura utilizada para o trabalho em estudo, e que consiste numa mesa com um prato plano e em que o substrato também é plano, sendo a tinta transferida para a tinta pelo movimento do *squeegee*, passando a tinta através da malha da tela de impressão. Uma imagem da estrutura com este formato utilizada neste trabalho, encontra-se representada na Figura 3. [2]



Figura 3: Equipamento de serigrafia de mesa plana ATMA AT-60PD

Outros modelos de mesa de impressão, focam-se em implementar substratos e componentes com formatos curvos nos processos, em que, num primeiro exemplo, a impressão é efetuada na mesma com uma tela de impressão semelhante ao caso de estudo, mas neste caso não é o *squeegee* que realiza o movimento de impressão, mas sim a tela e o substrato curvo que se movem em conjunto e em sincronia, sendo que o *squeegee*, ficando parado, promove o arraste de tinta pela tela em movimento, realizando a impressão ao longo do filme circular. Outro caso, trata-se da implementação de uma tela de impressão com um formato cilíndrico, já com um *squeegee* implementado nesse mesmo cilindro, procedendo-se à impressão num substrato plano, ou seja, existem dois cilindros no processo, um para a tela e um para transportar o filme, sendo que estes se encontram sincronizados, e que enquanto o *squeegee* se encontra novamente parado, rodam e procedem à impressão da imagem transferida para a tela do cilindro. [2]

Estando definidos quais os componentes que são utilizados numa máquina de impressão por serigrafia, apenas fica a faltar referir os dois componentes que faltam, para se poder proceder ao processo de impressão, sendo eles as tintas e os substratos, estando estes dois materiais muito relacionados entre si, pois um dos aspetos mais importantes na impressão, trata-se da adesão entre os mesmos. [23]

Iniciando o estudo pelas tintas, estas são o componente que é transferido para o substrato a partir do *stencil* que foi produzido na tela, com o objetivo de produzir uma decoração no produto final. Mas não são todos os tipos de tintas que podem ser utilizadas no processo de impressão

por serigrafia, tendo as tintas de serem formuladas, já tendo em mente que estas serão utilizadas em processos de serigrafia.

Considerando o caso em estudo, a tinta que será selecionada para o processo de impressão numa fase posterior deste trabalho (Ponto 3.2.2.), não pode ser uma tinta considerada como normal, por exemplo uma tinta gráfica, pois é necessário que esta tinta seja funcional. Deste modo, foi necessário recorrer a tintas denominadas de funcionais, mais propriamente a tintas condutoras, em que os pigmentos, que são normalmente encontrados nas tintas gráficas, são substituídos por formulações onde se encontram incluídas partículas metálicas, que fornecem à tinta a condutividade desejada. [2] [17]

Estas tintas, para além das partículas metálicas, também possuem outros componentes nas suas formulações, como polímeros que tem a função de assegurar a adesão da tinta ao substrato e também solventes que se dissolvem com o processo de cura, mas que permitem um certo fluxo controlado na tinta, podendo ainda existir mais aditivos, apesar de não ser muito comum neste tipo de tintas. [17]

Estes tipos de tintas, ainda podem ser divididos em dois tipos distintos de tintas, dependendo do solvente que foi utilizado na sua formulação, sendo elas à base de água ou à base de solventes químicos, sendo este um aspeto muito importante para facilitar o processo de cura das mesmas, assim como na limpeza dos componentes que forma utilizados para a impressão destas tintas. As tintas que são formuladas à base de água são as que apresentam piores características essenciais para a impressão, como a adesão ao substrato, pior resistência ao aquecimento, à humidade e à abrasão. Deste modo, quando a adesão se trata de uma das especificações para o produto que está a ser produzido, é preferível utilizar as tintas à base de solventes, pois apresentam melhores resultados, sendo este tipo de tintas usados no caso de estudo. [17]

Dos materiais metálicos que são normalmente utilizados para a formulação destas tintas, o mais utilizado de todos é a prata, devido ao seu preço mais reduzido do que os restantes metais normalmente utilizados como o ouro, ainda que existam opções mais baratas, como o cobre e o carbono, sendo que a prata apresenta performances físicas e elétricas melhores do que estes últimos metais, após a impressão. Ainda assim, as tintas de prata possuem ainda um óxido condutor na sua composição que as tornam extremamente condutoras e que mantém essa propriedade por longos períodos de tempo, sendo excelentes para a produção de sensores para componentes eletrónicos, como pretendido. [2] [15]

Outro aspeto, que é extremamente necessário que as tintas de prata, que são utilizadas em impressões, possuam, pois de seguida irão sofrer com os passos seguintes da técnica de IMD-FIM, trata-se da sua flexibilidade, pois as tintas necessitam de apresentar um relativo grau de flexibilidade, que permita suportar as dobras que são impostas durante o processo de termoformação, assim como as pressões que o filme impresso com a tinta de prata sofre durante o processo de moldação por injeção. Um processo muito importante para que a tinta suporte estas tensões que lhe são provocadas, é o processo de cura da tinta efetuado corretamente, pois este faz com que a tinta retenha alguma da flexibilidade que é inerente a uma tinta deste género. [13]

Deste modo, para além da escolha das partículas metálicas que compõe a tinta, é necessário também avaliar a sua flexibilidade, que se encontra normalmente relacionada com a elasticidade que é verificada entre os poros das micro ou nanopartículas metálicas de prata utilizadas, sendo que existem tintas especializadas para que esta elasticidade seja elevada, encontrando-se denominadas de tintas extensíveis. [5]

O último aspeto importante para as tintas de prata que são impressas a partir do processo de serigrafia, corresponde à viscosidade da tinta, pois esta característica possui uma extrema importância na capacidade de estas serem impressas pela técnica de impressão pretendida, sendo que para a técnica de serigrafia, a viscosidade que é recomendada é bastante elevada, pois os carregamentos de tinta condutoras usadas normalmente noutros processos são de cerca de 20-60 wt%, mas para as tintas que são formuladas tendo em conta a técnica de serigrafia, os carregamentos já costumam atingir valores de cerca de 80 wt%, devido aos limites de viscosidade da técnica ser mais baixo, permitindo também uma melhor condutividade do material, devido ao aumento de partículas metálicas na tinta. [2] [17]

Assim, tendo estes princípios em conta, é necessário proceder à escolha de uma tinta condutora que flua facilmente através da malha, de forma a que a impressão da tinta seja feita num curto espaço de tempo na sua totalidade e sem que ocorram marcas do formato da malha, mas também é necessário, que o fluxo seja controlado de forma a que o espalhar da tinta não seja total, aumentando a largura que é pretendida na estrutura a imprimir, ou seja é necessário encontrar um valor entre estes dois comportamentos da tinta verificados, de forma a encontrar a viscosidade ideal para o processo. [24]

Terminada a avaliação do comportamento das tintas, o último material para o qual fica a faltar a sua discriminação, trata-se do substrato de impressão. Quanto a este aspeto, não existe muita discussão, pois a técnica de serigrafia só por si não impede que qualquer tipo de material

seja impresso, desde papel, a tecidos ou filmes plásticos, desde que os filmes possuam um formato plano, considerando sempre a técnica mais utilizada de serigrafia, o método da mesa plana. [2] [25]

Quanto ao caso de estudo em específico, o substrato pretendido já possui um maior escrutínio no momento da escolha, pois este, na fase da impressão, tem de possuir uma boa adesão com a tinta condutora que será impressa, sendo uma especificação para a impressão de componentes eletrônicos, que o filme seja transparente e flexível. De seguida, tem de suportar as pressões e deformações do processo de termoformação, em que o seu formato será alterado, pelo que, mais uma vez, necessita de ser flexível e, por fim, necessita de possuir uma compatibilidade de adesão com o material que será injetado durante a última fase de um processo de IMD-FIM, a moldação por injeção. [15]

Dando por terminada a avaliação de todos os componentes, é perceptível que o processo de serigrafia em si é muito simples, mas existem diversos parâmetros e variáveis que podem ser alterados, que fazem com que o controlo dos resultados que se pretendem obter seja muito complexo, sendo alguns dos fatores que mais influenciam o processo, a velocidade e ângulo de impressão, a geometria do *squeegee*, a distância entre o substrato e a tela de impressão, o material e dimensões usadas para a malha e a lista contínua, fazendo cerca de 50 parâmetros que são possíveis de alterar. [19] [26]

Concluindo, os processos de impressão estão a tornar-se cada vez mais complexos, e as especificações que são pedidas aos produtos eletrônicos também se encontram no mesmo caminho, fazendo com que os dois processos se cruzem. Assim, existe cada vez mais exemplos em artigos e em revistas científicas, da produção de componentes funcionais através da inclusão do processo de impressão de componentes eletrônicos, a partir de estruturas sensoriais. Um exemplo deste crescimento, é apresentado por Soukup [27], em que este imprime um sensor interdigital de dimensões muito reduzidas, em que o seu objetivo passa pela criação de um sensor que é sensível a alterações de humidade, a partir de materiais orgânicos.

Um outro exemplo de que a indústria apresenta especificações cada vez mais específicas em produtos eletrônicos, é apresentado por Gonzalez [28], em que este efetua um estudo, onde imprime linhas de tinta, sendo que estas não se encontram esticadas na sua totalidade, apresentando em certas zonas, denominadas de zonas críticas, formatos curvados de forma intercalada para cada lado da forma esticada de uma linha, e estas dobras possuem a função de possibilitar que, por exemplo, quando o filme onde a peça foi impressa necessite de ser

termoformado, a tinta não quebre nas zonas críticas do filme, sendo aplicada a zona de curva onde é espectável que a tinta se quebre.

Por fim, são apresentados mais dois exemplos em que a estrutura que é impressa continua a ser a de um sensor, mas novos formatos para os mesmos estão a surgir, como nos casos apresentados por Zhang [4] e por Wei Tat Ng [25], em que em ambos os artigos são desenvolvidos sensores com princípios semelhantes aos de um sensor interdigital, funcionando através de paralelismos de elétrodos, mas os formatos dos mesmos são distintos por serem em formato de espiral, assemelhando-se ao tamanho de uma impressão digital de um ser humano.

2.2.2. Termoformação

A segunda fase de um processo de IMD-FIM, corresponde à transformação de um filme impresso com um formato 2D, ou seja, um filme plano, numa peça com um formato 3D, e para isso recorre-se à técnica de termoformação. Esta trata-se de um processo extremamente simples, em que se transforma um filme ou uma folha de material plástico, por um processo de aquecimento da mesma até uma temperatura onde esta começa a amolecer, numa peça em três dimensões através de ações mecânicas ou pneumáticas, com um formato que é definido pelo molde utilizado no processo. [29] [30]

Este processo é um dos processos de transformação de materiais poliméricos mais utilizados, pois possui algumas vantagens, como ser um processo muito simples, possuir um baixo custo de produção e possui a possibilidade de transformar materiais multicamada, o que é essencial para esta dissertação, pois permite que um filme que esteja impresso com uma camada de tinta, possa ser transformado num formato 3D. [29]

O procedimento normal para o processo de termoformação, possui três fases distintas, o aquecimento, a enformação e o arrefecimento.

Começando pelo aquecimento, este trata-se de uma fase muito importante para a termoformação, pois se o procedimento de aquecimento é mal efetuado, limita as capacidades de um processo normal. O aquecimento corresponde à fase em que o filme que vai ser transformado é aquecido, normalmente a partir de radiadores térmicos, sendo que no caso do material ser amorfo, a temperatura recomendada situa-se ligeiramente acima da temperatura de transição vítrea (T_g) do material, enquanto que para um material semi-cristalino, a temperatura recomendada situa-se ligeiramente abaixo da temperatura de fusão (T_m) do material, sendo estas

as temperaturas ideais, denominadas de temperaturas de enformação, para que o filme fique no seu estado de borracha. [29]

Esta fase do processo também se torna extremamente relevante, quando estamos a lidar com filmes que possuem uma impressão na sua superfície, pois é preciso também ter em conta as temperaturas que as tintas suportam, sem que estas sejam danificadas, podendo ter de se efetuar alterações no processo de aquecimento do filme, em que este não é uniforme ao longo de todo o filme, de forma a proteger o que foi impresso. Mas este aquecimento não uniforme pode dificultar as fases seguintes deste processo. [31]

A segunda fase de um processo de termoformação básico, trata-se da enformação, em que um filme que foi previamente aquecido, encontrando-se na sua temperatura de enformação, é forçado contra as paredes de um molde que foi previamente escolhido, de forma a que o filme fique com o formato desse mesmo molde, através de processos pneumáticos ou mecânicos.

Existem diferentes técnicas, para proceder à fase de enformação do filme, mas as que são mais utilizadas, correspondem às técnicas a partir ou da utilização de vácuo, ou da utilização de uma alta pressão. No primeiro, como o nome indica, o processo de enformação é efetuado através de pressão efetuada pelo vácuo, em que esta pressão força o material amolecido contra as paredes do molde. Trata-se de um processo bastante barato, ideal para a produção de peças de grandes dimensões. O segundo método para a enformação, corresponde à utilização de pressão de ar contra a superfície do filme, empurrando o material amolecido, contra as paredes do molde, sendo que esta técnica, apesar de mais cara do que a primeira, possui um maior controlo dimensional do produto final. [29] [31]

Também esta fase é crítica, tendo em conta um filme onde impressões foram efetuadas, pois é nesta fase que se consegue compreender a extensibilidade e flexibilidade, que a tinta impressa possui, quando o filme previamente amolecido é estirado contra as paredes do molde, sendo necessário que estas não apresentem nenhuma quebras ou danificações nos desenhos impressos, sendo este o grande desafio das tintas denominadas de elásticas.

Por fim, procede-se à última fase do processo de termoformação, o arrefecimento, sendo que este se inicia mal o material que se encontra em deformação, toca nas paredes do molde, pois na maioria dos casos, o molde encontra-se frio, ou aquecido a uma temperatura relativamente mais baixa do que o material, iniciando-se o arrefecimento logo quando este toca o molde. Mal o material toca no molde, o seu processo de enformação termina, sendo que o material retém a forma que possui no exato momento em que toca na superfície fria, podendo este causar

problemas de enformação no processo. Esta fase é a mais simples do processo, mas possui uma grande importância, pois quando o material é arrefecido, este retém a forma e os detalhes do molde, sendo, portanto, necessário que as duas fases anteriores decorram sem nenhum problema que o arrefecimento não consiga corrigir. [29] [31]

Concluindo, o processo de termoformação trata-se de um processo em que a sua aplicação é bastante simples, mas o controlo do mesmo pode ser difícil de ser conseguido, pois, em primeiro lugar, é necessário escolher um material que possua a capacidade de suportar as três fases do processo, de seguida, e talvez o aspeto mais importante, é necessário que exista um certo controlo das espessuras que vão ser encontradas ao longo da peça, apesar de ser expectável que não exista uma perfeita uniformidade das espessuras ao longo do processo. [29]

Uma solução, passa por pré calcular qual a deformação espectável no filme, a partir de *softwares* de simulação, em que se obtêm informações de como o processo se vai desenrolar, de forma a que surgindo algum problema ou defeito, este possa ser previsto e solucionado. Este aspeto, é bastante importante, tendo em conta a impressão de componentes eletrónicos, pois considerando os traços que são normalmente desenhados para sensores em filmes poliméricos, torna-se possível averiguar o comportamento destas estruturas ao longo do processo de termoformação. [11]

Existem cada vez mais exemplos em que a técnica de termoformação, começa a ser aplicada em processos de produção de produtos eletrónicos, como no caso da impressão de eletrónicos através de IMD-FIM, sendo exemplo disso o caso de estudo de Anisimov [32], em que é testada produção de um componente funcional através de IMD-FIM, em que o seu objetivo final, é funcionar através do toque.

Um outro exemplo de como a tecnologia começa a ser cada vez mais estudada para aplicação em impressões de tinta, é apresentado por Liu [12], em que é efetuado um estudo da deformação de tinta num processo de termoformação simples, e de como essa deformação pode ser controlada.

Por fim, são apresentados dois exemplos em que as tintas que são impressas, já tem em conta que durante o processo de termoformação que se segue, estas não vão suportar as tensões sobre elas impostas, pelo qual são efetuadas alterações ao desenho da tinta de forma a que durante o processo de formação, estas não se quebrem. Estes exemplos são apresentados por Tenchine [31] e por Gonzalez [28].

2.2.3. Moldação por injeção

A última fase de um processo de IMD-FIM, corresponde à técnica de moldação por injeção. Mas para este processo em específico, não pode ser utilizada um procedimento regular para a moldação por injeção, pois é necessário recorrer a técnicas não convencionais de moldação por injeção, em que um inserto, que é colocado dentro do molde, é sobre injetado.

A moldação por injeção, consiste num processo de criação de um produto a partir de materiais plásticos, em que esse material é fundido e introduzido dentro de um molde, de forma a que o fundido replique a forma que o molde possui, obtendo-se um produto final com o formato desejado. [33]

O primeiro passo neste processo, corresponde à introdução do material plástico selecionado, no seu estado sólida em formato de pequenas dimensões, como por exemplo, em grânulos, dentro da tremonha de um equipamento simples de injeção, sendo que a partir desta estrutura, o material é transportado até um parafuso rotativo que possui resistências elétricas que promovem o aquecimento do material. Neste parafuso, o polímero selecionado é fundido, sendo esta fase do processo denominada de fase de plastificação, e de seguida, com os movimentos rotativos do fuso, o fundido é empurrado ao longo da estrutura, pois este promove um aquecimento adicional ao das resistências, devido às ações de forças de corte existentes, que reduzem a viscosidade do material, permitindo o seu fluxo normal ao longo do fuso. No final do parafuso, é efetuada a injeção do material que foi fundido para dentro do molde sob altas pressões, sendo esta fase denominada de fase de enchimento. Terminado o enchimento total do molde, inicia-se a fase de compactação e arrefecimento, em que é efetuada uma segunda pressão no material, de forma a que durante o arrefecimento, o material não contraia. Por fim, o molde é aberto após terminado o arrefecimento da peça produzida, ejetando-se o produto final e terminando-se o processo de injeção, podendo-se iniciar outro logo de seguida, pois trata-se de um processo repetitivo e cíclico. [33]

Para efetuar uma sobre moldação, o processo descrito no parágrafo anterior decorre da mesma forma, sendo que a diferença se encontra apenas no molde, pois é inserido no seu interior um inserto, sobre o qual o material fundido será injetado, criando um produto em que o inserto surge ou dentro ou à superfície do material injetado. Para tal, um dos aspetos mais importantes da sobre moldação, consiste na boa adesão entre o inserto que foi colocado e o material que foi escolhido para a moldação por injeção. [11] [31]

No caso específico em que o inserto consiste num filme que foi impresso com tintas condutoras e que já foi previamente termoformado de forma a encaixar no molde selecionado para a injeção, o processo é o mesmo, mas são necessários alguns cuidados extra, principalmente por causa das tintas que foram impressas, pois estas tem de ser colocadas de forma a que não entrem em contacto com o material fundido, assim como tem de suportar as temperaturas e pressões elevadas que um processo de injeção normal necessita para o seu funcionamento. Se não for possível controlar estes parâmetros para evitar danos no inserto, os defeitos mais comuns que são apresentados nestes filmes, são a remoção da tinta devido às elevadas temperaturas, ou quebras e danificações nas estruturas que são impressas, por não suportarem as pressões que são impostas. [11] [13] [31]

Como foi verificado para a termoformação, também para a moldação por injeção estão a aumentar os estudos, em que este processo é incluído na produção de um componente funcional através de impressão de eletrónicos e a partir da técnica IMD-FIM, como está apresentado num exemplo desenvolvido por Tenchine [31], em que é desenvolvido um componente funcional através de IMD-FIM, sendo utilizado a injeção de um material polimérico com a função de dar alguma robustez ao filme que foi impresso e termoformado.

Um outro exemplo, é apresentado por Wimmer [11], em que através do mesmo processo (IMD-FIM), são testadas formas de produzir uma interface 3D.

Capítulo 3. Seleção dos Materiais e dos Conceitos

A primeira fase prática desta dissertação, foca-se na realização de um processo de seleção inicial dos conceitos e dos materiais, que serão utilizados durante todos os diferentes processos deste trabalho, efetuando uma escolha cuidadosa de quais as tecnologias, dentro do espectro da decoração de produtos por processos de IMD-FIM, são as mais compatíveis durante a parte experimental, de forma a atingir o objetivo final de produção de uma película funcional.

3.1. Seleção das estruturas para a produção de um sensor

Como foi descrito anteriormente nos objetivos desta dissertação (Ponto 1.2.), o objetivo principal passa pela produção de uma película funcional, recorrendo à técnica de decoração de peças IMD, ou seja, através de tecnologias comuns de impressão. Desta forma, e com a intenção de promover funcionalidade à peça a ser produzida, foi decidido que esta intenção seria cumprida através da realização de pequenas estruturas impressas, que provêm características elétricas ao material onde estas se encontram, denominadas de sensores.

Uma das principais intenções ao imprimir estes sensores, recai no princípio de que estas estruturas produzam características funcionais à peça onde estas se encontram, através do toque de uma pessoa. Assim, e de forma a efetuar uma decisão sobre quais são as dimensões ideais a escolher para a sua produção, foi tido em conta qual a dimensão normal que um dedo de um ser humano possui, tentando que as dimensões do sensor sejam ligeiramente superiores à largura deste membro, de forma a que a maior área de contacto possível de um dedo, esteja em contacto com o desenho.

Foram selecionados três formatos de sensores distintos, de forma a avaliar a influência que o tipo de desenho realizado produz nas características elétricas dos materiais utilizados, e perceber se estes *designs* são viáveis para serem utilizados em alguma aplicação com necessidade de sensores elétricos. Todos os tipos de sensores foram desenhados tendo em conta que os sensores seriam impressos em placas retangulares com uma área de 150mmX80mm, portanto o comprimento máximo destes sensores teve esta especificação em conta, nunca ultrapassando os 150 mm. Os sensores foram desenhados de forma a estarem enquadrados nestas placas retangulares, pois estas possuem a medida para a área superficial que, numa fase posterior deste

trabalho, será também a área superficial de placas que serão produzidas através de moldação por injeção (Ponto 4.1.), onde, mais tarde, serão efetuadas impressões com estes mesmos sensores. Para efetuar todos os desenhos dos sensores, foi utilizado um *software* de CAD 3D, o SOLIDWORKS.

O primeiro desenho selecionado para imprimir foi o de um sensor interdigital, que se trata de um sensor que é baseado no comportamento elétrico de dois condensadores planos paralelos, e que é composto por dois elétrodos planos que se encontram também em paralelo e possuem um padrão espaçado entre eles, encontrando-se posicionados de forma a que as suas estruturas que possuem formatos semelhantes a dedos, estejam como que encaixadas entre si, produzindo um campo elétrico entre eles, quando ligados a uma fonte de energia, sendo que este penetra no material onde eles se encontram, alterando as características elétricas do material. Na Figura 3, encontra-se um desenho de uma estrutura simples de um sensor interdigital. Nestes sensores, existem quatro aspetos principais que tem a possibilidade de serem alterados e que podem influenciar as características elétricas. Cada um possui uma nomenclatura específica, sendo L o comprimento dos traços desenhados, w a largura dos mesmos, s o espaçamento entre eles e N o número total de traços desenhados num único sensor. [8] [34]

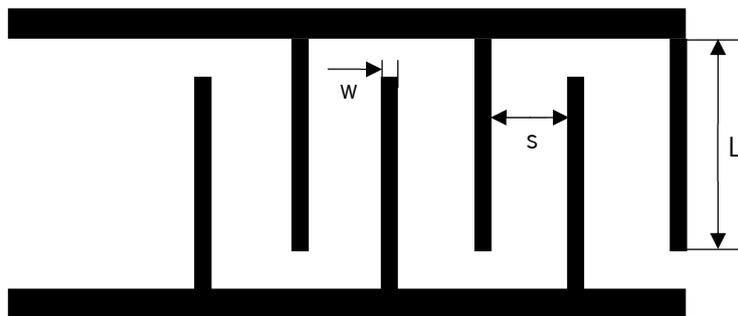


Figura 4: Esquema simples de um sensor interdigital, com a sua nomenclatura específica, em que L corresponde ao comprimento dos traços desenhado, w à largura dos mesmos e s ao espaçamento entre traços.

Foram efetuados dois desenhos distintos para estes sensores, com o objetivo de verificar se as alterações nas suas dimensões principais influenciam as suas características elétricas. Ambos os *designs* efetuados possuem os mesmos valores para as dimensões de L e w , 15 mm e 0,5 mm, respetivamente, apenas sendo diferente o valor para s , que varia entre 0,5 mm e 1 mm, o que acaba por ter influência no número de traços desenhados (N), para um certo comprimento do sensor.

Desta forma, foram selecionados dois comprimentos de base para cada *design* do sensor, sendo que o primeiro se tenta aproximar do tamanho médio de uma impressão digital, tendo sido definida com um valor de cerca de 20 mm e o segundo tem um valor aproximado de 120 mm, pois encontra-se abaixo do valor máximo que tinha sido definido anteriormente, devido à área superficial da placa retangular.

Na Tabela 1, encontram-se descritas todas as dimensões referidas anteriormente, para os quatro sensores interdigitais que foram desenhados, incluindo o valor obtido para o número de traços obtidos para cada sensor (N).

Tabela 1: Valores selecionados e obtidos para os sensores interdigitais desenhados

	L (mm)	s (mm)	w (mm)	N
1º Sensor Interdigital Pequeno	15	0,5	0,5	22
1º Sensor Interdigital Grande	15	0,5	0,5	110
2º Sensor Interdigital Pequeno	15	1	0,5	16
2º Sensor Interdigital Grande	15	1	0,5	80

Ambos os desenhos para os espaçamentos distintos entre os traços encontram-se representados nas Figuras 5 e 6, estando os seus desenhos técnicos cotados em anexo (Anexo I e II).

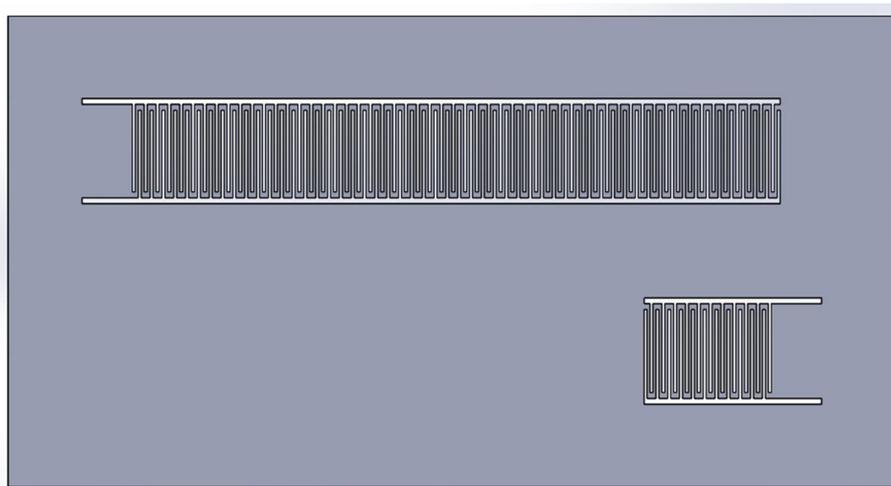


Figura 5: Imagem do sensor desenhado numa placa retangular com o espaçamento de 0,5 mm

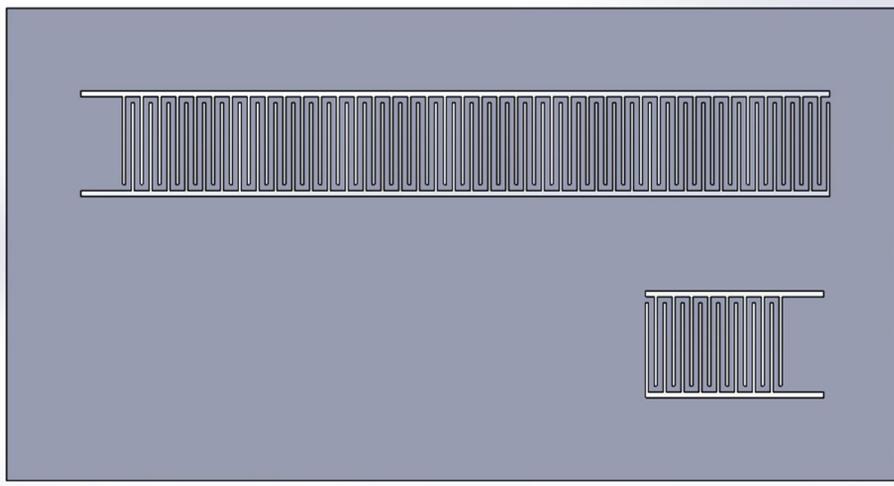


Figura 6: Imagem do sensor desenhado numa placa retangular com o espaçamento de 1 mm

O desenho que foi efetuado de seguida trata-se de uma alteração de um sensor interdigital, criando um sensor circular. O princípio de funcionamento é em tudo semelhante ao de um sensor interdigital, pois também se trata de um sensor com dois elétrodos planos em paralelo, alterando a sua estrutura da forma semelhante a dedos interligados, para um formato de uma espiral.

Para este tipo de sensores, também foram criados dois *designs* diferentes seguindo o mesmo princípio do anterior, em que um se aproxima do tamanho necessário para que uma impressão digital o cubra e outro que tenta cobrir o máximo de área possível da placa onde foi desenhado. Assim, foram feitos dois sensores individuais, um do lado esquerdo e outro do lado direito da placa, com o tamanho mais pequeno descrito anteriormente, e um sensor maior, que cobre o máximo de comprimento possível e onde foram colocados três sensores circulares em sequência.

Como os traços que são desenhados para efetuar estes sensores se encontram sempre em paralelo, como referido anteriormente, não foi possível fazer com que os sensores fossem completamente iguais, sendo que os sensores individuais possuem um *design* completamente circular, baseando-se numa forma em espiral, enquanto que o sensor mais comprido possui um *design* mais irregular, pois não é possível fazer com que os sensores sejam circulares em espiral sem que ocorra uma sobreposição dos traços por cima desta mesma espiral ao passar para o sensor seguinte, baseando-se, então, em semicírculos que vão ficando cada vez mais pequenos, de forma a que seja permitido efetuar uma ligação entre os sensores a partir do centro, o que torna o raio dos dois *designs* ligeiramente diferentes.

Seguindo uma nomenclatura semelhante à do sensor anterior, existem três dimensões importantes a ter em conta, sendo elas w a largura dos traços, s o espaçamento entre eles e r o

raio máximo, que se trata do raio exterior do último traço do sensor. Na Tabela 2, encontram-se descritos os valores destas dimensões para os dois *designs*.

Tabela 2: Valores selecionados e obtidos para os sensores circulares desenhados

	r (mm)	s (mm)	w (mm)
Sensor Circular Individual	14	1	0,5
Sensor Circular em Sequência	12,5	0,5	0,5

O desenho da placa contendo os dois tipos de sensores circulares encontra-se representado na Figura 7 e os seus desenhos técnicos cotados também se encontram nos anexos (Anexo III).

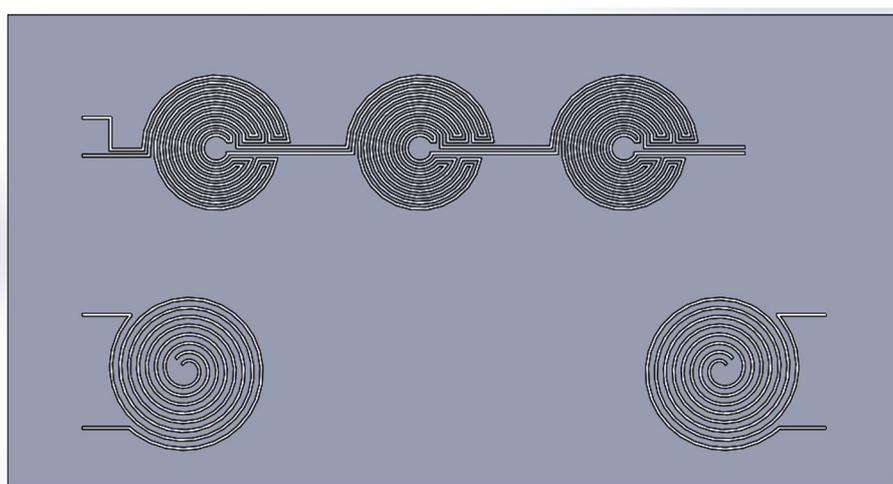


Figura 7: Imagem do sensor circular desenhado numa placa retangular

Por fim, o último sensor que foi desenhado parte de um princípio de funcionamento ligeiramente diferente, pois não se baseia a partir de apenas duas linhas paralelas, que se mantêm nesta formato ao longo de todo o sensor, mas sim a partir de diversas linhas completamente retas, paralelas e perpendiculares, de forma a criar uma espécie de rede. O objetivo deste sensor passa por utilizar diversos elétrodos distintos que se encontram cruzados, tentando avaliar qual o efeito desta diferença no *design* nas características elétricas do material usado.

Foi selecionada uma geometria em que foram desenhadas, numa primeira fase, 10 linhas horizontais com uma distância entre as linhas de 6,5 mm, com um comprimento de 140 mm e largura de 0,5 mm. De seguida, e tendo em conta estas linhas, foram então desenhadas 20 linhas verticais também com uma distância entre elas de 6,5 mm e com largura de 0,5 mm, sendo que a diferença se encontra no comprimento da linha que tem o valor de 72,5 mm. Todas estas

dimensões, principalmente os valores para o comprimento das linhas e a distância entre elas, têm em atenção a área da placa que foi selecionada anteriormente.

O desenho da placa com a rede desenhada encontra-se representado na Figura 8 e o seu desenho técnico cotado encontra-se nos anexos (Anexo IV).

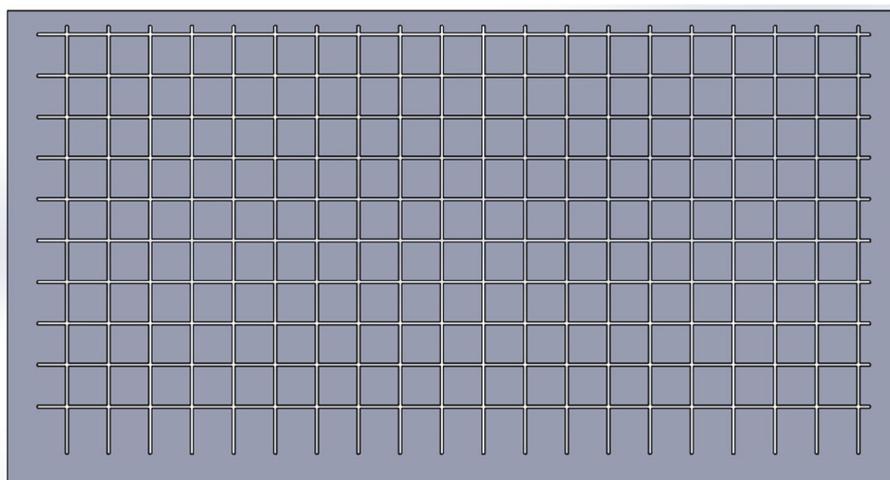


Figura 8: Imagem do sensor cruzado em forma de rede numa placa circular

3.2. Seleção da técnica de impressão

Após efetuada a seleção das diferentes estruturas a serem impressas, é necessário escolher qual a tecnologia mais adequada para efetuar o processo, tendo em especial atenção as dimensões pretendidas com os desenhos e o propósito dos mesmos, sendo necessário uma elevada precisão neste processo. Não estando disponíveis muitas tecnologias para proceder a este processo, nos meios que foram fornecidos para efetuar este estudo, foi selecionada a serigrafia como a técnica para a impressão.

O motivo para a escolha desta técnica sobre outras técnicas disponíveis, como impressão por gravura ou por *inkjet*, que também são técnicas de impressão muito utilizadas para a produção de produtos de modelo semelhante, deve-se ao facto de ser uma técnica com uma grande escala de produção e reprodução, trata-se de uma tecnologia de fácil compreensão, apesar de possuir um elevado número de parâmetros de processamento, que permitem obter os melhores e mais diversos resultados e um maior custo-benefício em termos de impressão de produtos eletrónicos, conseguindo manter uma qualidade e precisão elevada, consoante o tipo de malha e imagem (*stencil*) utilizados na tela. [2] [35]

Nos pontos que se seguem, serão descritos os diversos passos e seleções que são necessários efetuar para se poder dar início à fase de impressão, começando pela elaboração do desenho para a produção da tela para serigrafia com os desenhos dos sensores nela dispostos e, de seguida, a seleção dos materiais para os substratos e das tintas para utilização durante a impressão.

3.2.1. Elaboração do desenho da tela para serigrafia

As dimensões pretendidas para a tela de serigrafia são selecionadas tendo em conta os desenhos que vão ser desenhados na mesma, as limitações nas dimensões máximas que a máquina, a ser utilizada para a impressão, possui e ainda as diferentes dimensões que o produtor da tela consegue produzir. Tendo em conta estes três pontos, principalmente o último, foi selecionada uma área retangular com as dimensões de 600mmX500mm, onde foram implementados os desenhos dos sensores anteriormente desenvolvidos, como está descrito na Figura 9. O desenho cotado da tela encontra-se em anexo (Anexo V).

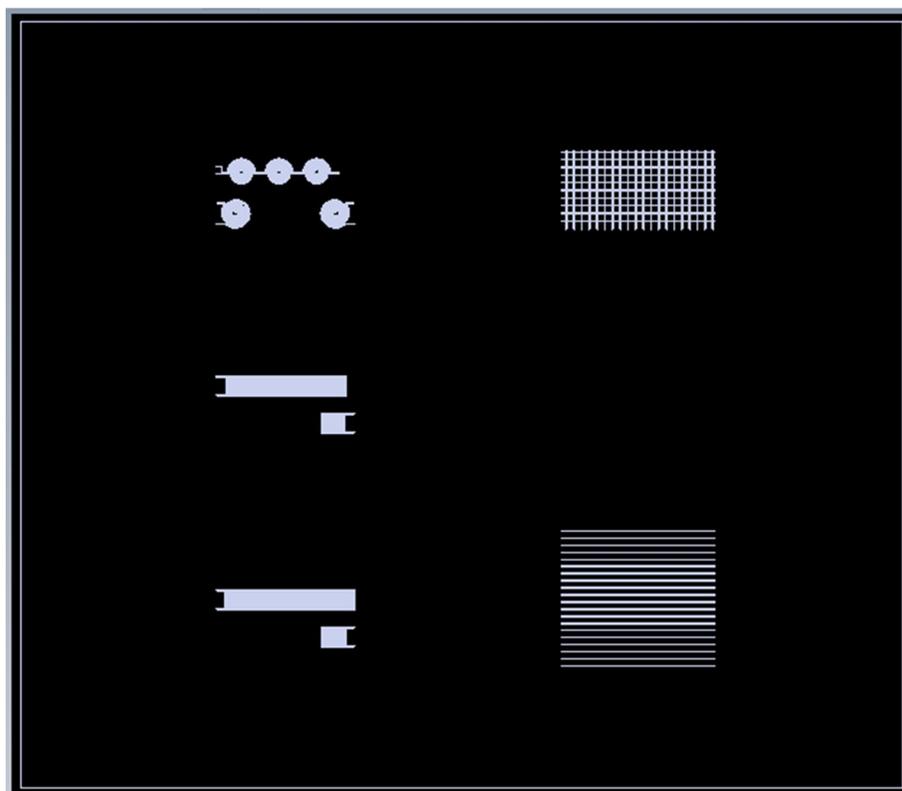


Figura 9: Imagem descritiva do desenho da tela de serigrafia

Como é possível verificar na Figura 9, os desenhos anteriormente selecionados encontram-se dispostos do lado esquerdo da tela e no lado superior direito da mesma, sobrando um grande espaço na área restante da tela. Assim, com a intenção de preencher este espaço, foram desenhadas 20 linhas horizontais com um comprimento de 140 mm, uma largura de 0,5 mm e um espaçamento entre elas de 6 mm.

Estas linhas foram desenhadas com o propósito de, na altura da impressão, criar um sensor que também se baseia numa espécie de rede/grelha a partir destas linhas, mas estas serão impressas de uma forma sequencial, isto é, numa primeira impressão imprime-se linhas no sentido horizontal no substrato e, numa segunda impressão, rodando o substrato em 90 graus, imprime-se novamente as mesmas linhas, mas desta vez serão impressas no sentido vertical no substrato, obtendo, então, a rede desejada. Entre cada impressão a tinta é curada para que as linhas não se misturem e sejam totalmente independentes.

A forma sequencial como é efetuada esta grelha, tem como objetivo verificar quais as diferenças que ocorrem na caracterização elétrica deste sensor, quando as linhas impressas não estão interligadas, mas sim sobrepostas umas às outras nos locais onde se cruzam.

3.2.2. Seleção dos substratos e das tintas

A seleção destes dois tipos de materiais, os substratos e as tintas, tem de ser efetuada em simultâneo, pois a sua seleção baseia-se principalmente, na adesão da tinta com o material usado como substrato e, ainda, em algumas características que são consideradas importantes para este trabalho, como a resistência a forças que podem provocar o alongamento ou mesmo a quebra da tinta, e o cálculo da resistividade elétrica da tinta, para obter uma perceção das características elétricas, após esta já ter sido pintada sobre o substrato.

Como este processo da seleção acaba por ser efetuado em simultâneo, este acaba por ser iterativo, pois ao escolher um certo material como substrato e uma certa tinta para a impressão, é necessário testá-los de forma a perceber se a adesão ou as características elétricas são as adequadas para implementar com os restantes processos. Se, ocorrer o caso em que os valores de uma destas características não são considerados como corretos ou suficientes, é necessário voltar atrás no processo, fazer uma nova seleção dos materiais e testá-los até que seja encontrada a combinação ideal. É necessário referir que toda a parte experimental desta dissertação se trata de um processo iterativo, exatamente pelos mesmos motivos, pois numa fase

mais avançada do trabalho, pode ocorrer uma falha devido à combinação dos materiais selecionados que não prevista nesta fase, sendo necessário voltar a esta fase de seleção, começando toda a parte experimental de novo.

O material desejado como substrato para iniciar a realização destes testes trata-se do policarbonato (PC) e os motivos para esta escolha recaem, principalmente, sobre as boas características físicas, mecânicas e óticas deste material, pois possui uma boa resistência a impactos e forças impostas sobre o material, garantindo uma boa estabilidade dimensional, possui também uma temperatura de transição vítrea (T_g) relativamente alta (cerca de 150°C), sendo esta temperatura suficiente para suportar o processo de cura de tintas e ainda as temperaturas da termoformação e do molde de injeção, aquando da impressão sobre este material e, por fim, trata-se de um material transparente, sendo este uma característica necessária importante para a realização deste trabalho.

Apesar de existir intenção em utilizar este material como base para o substrato, logo a partir do início da parte experimental desta dissertação, tal não foi possível devido à falta deste material na forma de filme. A solução inicial encontrada para contrariar logo a necessidade de compra deste material, foi utilizar outro material que se encontrava disponível na forma de filme, o Polietileno Naftalato (PEN), em que o objetivo principal não passava por verificar a adesão entre deste material com as tintas, mas sim o estado em que estas se encontram, pois as tintas usadas já se encontravam abertas e guardadas durante algum tempo, sendo necessário verificar o estado em que estas se encontravam.

Foi utilizado um filme *Teonix Q83* da marca *Teijin*, sendo este um material que apresenta algumas características favoráveis à realização destes testes, como uma baixa espessura de filme, cerca de 0,075 mm, boa transparência no filme e uma T_g de cerca de 121°C, suportando algumas das temperaturas usadas nos processos de cura das tintas a testar. A ficha técnica deste filme encontra-se nos anexos (Anexo VI).

O filme de PEN encontra-se disposto num rolo com dimensões demasiado grandes, tendo sido necessário cortá-lo, de forma a torná-lo utilizável para a realização dos testes com as tintas. Tendo em conta que a quantidade de filme no rolo não era extensa, e de forma a que as dimensões sejam coerentes com o resto das dimensões utilizadas no restante trabalho, foram cortados filmes com as dimensões que já tinham sido definidas na altura da seleção dos desenhos dos sensores (Ponto 3.1.), sendo estas de 150mmX80mm, encontrando-se um exemplo representado na seguinte figura (Figura 10).



Figura 10: Exemplo de um filme de PEN cortado com as dimensões de 150mmX80mm

Definidos quais o material dos primeiros substratos a serem utilizados, o passo seguinte é a escolha das tintas que irão ser usadas. Foram, então, escolhidas três tintas que se encontravam disponíveis para efetuar os testes e que foram desenvolvidas pela empresa *Novacentrix*, cujas formulações foram preparadas para que as tintas sejam usadas especificamente na técnica de serigrafia e para que apresentem condutividade após a sua impressão. Estas tintas são formuladas à base de partículas metálicas, sendo que destas, duas são formuladas à base de partículas de níquel (HPN-DEV-79-89-84 e HPN-DEV-79-89-66) e são tintas que são consideradas pela empresa que as desenvolveu como estando em processo de desenvolvimento, sendo que não são divulgadas quaisquer fichas técnicas ou informações para a sua utilização nas bases de dados da empresa; e a restante tinta é formulada à base de partículas de prata (HPS FG57B), sendo que esta apresenta uma ficha técnica que possui todas as informações necessárias para a sua aplicação e esta encontra-se em anexo.

Com todos os materiais selecionados, o passo seguinte passa por perceber se esta decisão é a mais adequada para o processo seguinte, a impressão, sendo necessário efetuar alguns testes. Para tal, uma forma de os efetuar poderia ser já através do processo de serigrafia, de forma a evitar a adição de mais processos ao trabalho, mas na altura em que esta fase da dissertação decorreu, a tela para a serigrafia ainda não estava pronta. Como era importante assegurar que o comportamento das tintas estava dentro dos padrões necessários para a sua utilização, recorreu-se a outra forma de imprimir tinta nos filmes, tendo sido utilizado um *Doctor Blade*, que consiste numa lâmina metálica, cuja função primária consiste na remoção de excesso de tinta de uma superfície de impressão, sendo incorporado em algumas das máquinas de diversas técnicas de impressão. Com o evoluir das técnicas, foram surgindo novos modelos para este auxiliar, como o que foi utilizado nesta dissertação, em que este modelo possui um mecanismo que permite

controlar a espessura de tinta que se mantém impressa na superfície de impressão, sendo este aspeto perfeito para realizar pequenos testes de impressões de finas camadas de tinta com este auxiliar e avaliar o comportamento desta tinta no substrato onde esta foi impressa, o que é o pretendido nesta fase do trabalho. Uma fotografia do *Doctor Blade* utilizado, em conjunto com uma placa de vidro com uma presilha, que permite manter o substrato preso durante a impressão, está representada na Figura 11. [36] [37]

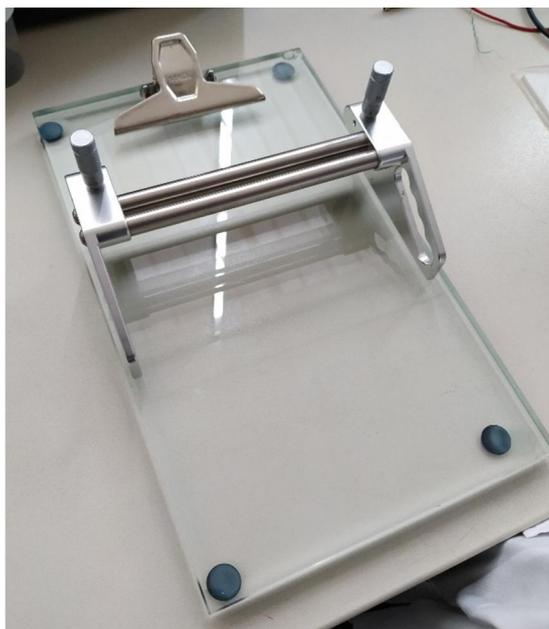


Figura 11: Foto do Doctor Blade com uma placa de vidro com uma presilha

3.2.2.1. Procedimento para a realização do teste de impressão com o *Doctor Blade*

O primeiro passo para a realização deste teste, e um dos mais importantes para assegurar que a impressão seja o mais correta possível, passa por colocar a medida da espessura de tinta que a lâmina *Doctor Blade* vai imprimir no valor de zero.

Utilizando uma placa de vidro que possui uma presilha acoplada, procede-se à colocação do substrato a imprimir na placa com o auxílio desta presilha, para que o substrato não deslize e se mantenha preso durante o deslizar da lâmina. Se a largura deste substrato for menor do que o comprimento total da lâmina, de cada lado do substrato coloca-se mais um substrato do mesmo tipo, sendo que estes dois não se encontram presos, pois têm a função de assegurar que a base em que o *Doctor Blade* assenta possui uma espessura igual à do filme a imprimir, para não provocar discrepâncias entre a espessura real imprimida e a espessura selecionada no auxiliar.

Com a lâmina do Doctor Blade e os substratos prontos para serem usados, coloca-se no aparelho a espessura pretendida, em que as medidas são em micrómetros e coloca-se a tinta no substrato numa quantidade que permita que o substrato fique com um pequeno filme de tinta impresso.

Procede-se então à impressão, que é realizada através do arraste da lamina Doctor Blade por cima do substrato de forma a que a tinta seja arrastada ao longo do substrato e que fique impressa na espessura pré-determinada. No final, limpa-se o excesso de tinta que se encontra no fim da impressão no substrato e procede-se à colocação do substrato impresso num forno para que a tinta seja curada na temperatura aconselhada e durante o tempo aconselhado pela ficha técnica da tinta. Retira-se o filme impresso do forno e deixa-se este a arrefecer um pouco, ficando assim pronto e podendo-se dar início à impressão de um novo filme, repetindo todo o processo aqui descrito.

No final de todos os procedimentos e todas as impressões que se considerem necessárias efetuar, procede-se à limpeza e à arrumação de todos os componentes que estiveram envolvidos em todo este processo.

3.2.2.2. Resultados dos primeiros testes de impressão com o *Doctor Blade* nos substratos de PEN

Antes de iniciar a realização dos testes, é necessário, previamente, selecionar quais os valores para os parâmetros que serão utilizados durante a impressão, sendo estes a temperatura e o tempo de cura das tintas quando estas são colocadas no forno e, ainda, qual a espessura de tinta que será impressa com o *Doctor Blade*. Para auxiliar na seleção destes valores, foi necessário seguir as indicações fornecidas pelos fornecedores através das fichas técnicas das tintas ou seguindo exemplos de testes semelhantes descritos em artigos científicos.

Seguindo o procedimento descrito no ponto anterior, a primeira tinta a ser testada foi a tinta HPN-DEV-79-89-84, sendo esta uma das duas tintas de níquel disponíveis e procedeu-se à sua impressão no substrato com o *Doctor Blade*, efetuando-se no final a sua cura.

Foram efetuados dois testes para esta tinta nesta primeira impressão, em que os parâmetros selecionados foram 120°C para a temperatura de cura e 15 minutos para o tempo de cura. Estes valores foram os selecionados, pois de acordo com o que a empresa que desenvolveu as tintas (*Novacentrix*) aconselhou, quando foram questionados sobre a cura das tintas que ainda se encontram em desenvolvimento, foi de que a temperatura de cura deveria

estar entre os valores de 100°C e 140°C e que o tempo de cura devia ser de cerca de 15 minutos. Assim, como a temperatura de transição vítrea do material usado como substrato se encontra por volta de 120°C, foi esta a temperatura selecionada para a cura e o tempo de cura que foi selecionado trata-se do tempo aconselhado pela empresa.

A diferença entre estes dois testes que foram efetuados, está na espessura de tinta que foi impressa, sendo que no primeiro filme a espessura é de 50 micrómetros e no segundo a espessura é de 100 micrómetros. Na seguinte figura (Figura 12), estão demonstradas duas imagens destes dois filmes, sendo utilizada uma numeração que permite facilitar na identificação dos mesmos de uma forma mais simples, e sendo que estes são os primeiros, estão identificados como Filme 1 e Filme 2.

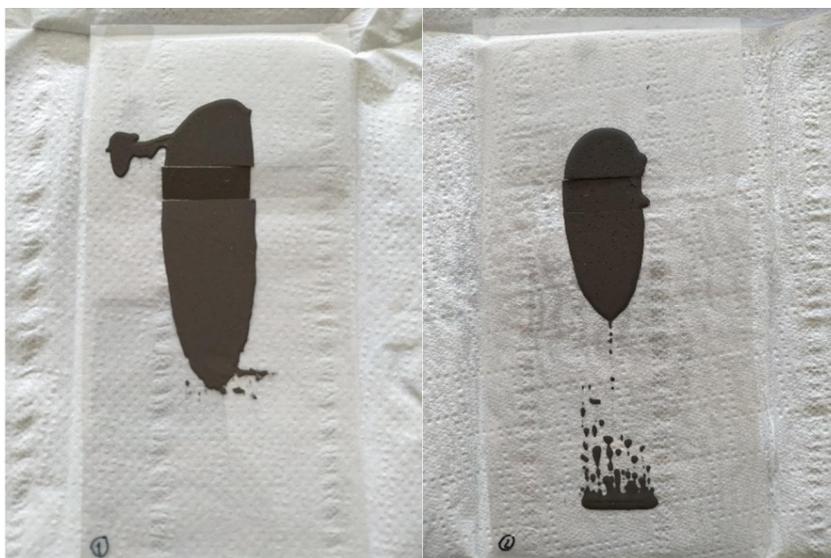


Figura 12: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. A imagem da esquerda representa o Filme 1 e a da direita o Filme 2

A segunda tinta a ser aplicada através desta técnica, trata-se da tinta de prata HPS FG57B, sendo que os parâmetros que foram utilizados com a tinta anterior voltam a ser exatamente os mesmos que foram usados com esta tinta, ou seja, são também efetuados dois testes em que a temperatura e tempo de cura são os mesmos, e as espessuras utilizadas nos dois testes também foram as mesmas.

Apesar de existir uma ficha técnica para esta tinta, estando esta disponível em anexo (Anexo VII), com alguns exemplos de parâmetros utilizados no processo de cura, todos os apresentados são efetuados seguindo diversos valores para a temperatura de cura, sendo que a temperatura mínima apresentada é de 120°C e as restantes possuem valores ainda mais elevados, sendo que estes não poderiam ser usados devido à baixa temperatura de transição vítrea

do PEN, que se encontra em valores por volta de 120°C, tendo sido, desta forma, esta a temperatura selecionada. O tempo de cura recomendado pela ficha técnica é de 30 minutos para a temperatura selecionada, mas, devido ao tempo que foi usado no teste anterior (Filme 1 e Filme 2) ter sido de 15 minutos, foi também o tempo usado neste ensaio, como forma de efetuar uma comparação entre as duas tintas. Num ensaio seguinte com esta tinta, repete-se a mesma temperatura de cura, mas utilizando o tempo recomendado pela ficha técnica para o processo.

Na figura seguinte (Figura 13), encontram-se descritos os filmes com a tinta de prata, estando estes identificados como Filme 3 e Filme 4.



Figura 13: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de prata HPS FG57B. A imagem da esquerda representa o Filme 3 e a da direita o Filme 4

Por fim, foi testada a última tinta disponível, sendo esta a segunda tinta de níquel, HPN-DEV-79-89-66, tendo sido, mais uma vez, utilizados exatamente os mesmos valores para os três parâmetros descritos anteriormente, efetuando-se também dois testes com as diferentes espessuras.

Na Figura 14, estão demonstrados os dois filmes com esta tinta de níquel, encontrando-se identificados como Filme 5 e Filme 6.

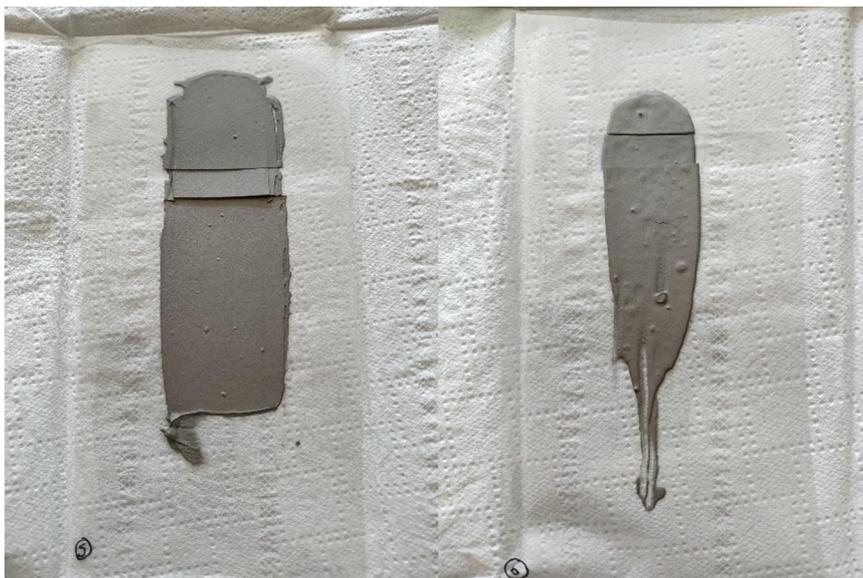


Figura 14: Imagens dos primeiros resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. A imagem da esquerda representa o Filme 5 e a da direita o Filme 6

Após a impressão destes seis substratos, com as três diferentes tintas, e ainda antes de realizar qualquer um dos testes de avaliação das tintas no substrato, foi possível observar que no Filme 4, que corresponde ao segundo filme em que é impressa a tinta de prata, com uma espessura de 100 micrómetros, a cura da tinta não foi suficiente, pois a tinta não secou de forma correta e, quando foi colocado o substrato num papel, de forma a facilitar o seu transporte, ficou papel colado na tinta, como é possível verificar na segunda imagem da Figura 13. Desta forma, não foram efetuados os testes expectáveis neste filme, devido ao mau processo de cura.

Passou-se, então, para a realização dos testes de adesão e do registo da resistência elétrica, de forma a efetuar o cálculo da resistividade elétrica, para obter uma caracterização destes aspetos. Os testes de adesão que foram efetuados são um teste de dobra do substrato impresso, observando o comportamento da tinta, e outro em que é colocado um pouco de fita-cola sobre a tinta e o substrato, e depois esta é arrancada, obtendo informações básicas sobre as forças de adesão dos dois materiais. Para efetuar o registo do valor da resistência elétrica da tinta impressa no substrato, recorreu-se à técnica experimental de através de dois pontos, em que a partir de duas amarras de um multímetro de precisão se obtém um valor desta característica elétrica. [38]

O primeiro teste que foi efetuado, devido às alterações que são efetuadas nos filmes, para a realização dos testes seguintes, trata-se do teste de adesão através da utilização de fita-cola. Na figura seguinte (Figura 15), encontra-se um exemplo do procedimento para a realização deste teste, em que fita-cola é colocada no substrato, de forma a que esta sobreponha, numa única

direção, toda a tinta impressa, e ainda um pouco do substrato, para poder ser efetuada uma avaliação da força de adesão da tinta ao substrato, sendo que ela é considerada como forte se nenhuma porção de tinta for levantada ou fique presa na fita, mantendo-se intacta no substrato, e é considerada como fraca, se alguma quantidade de tinta for solta do substrato após o levantar da fita.

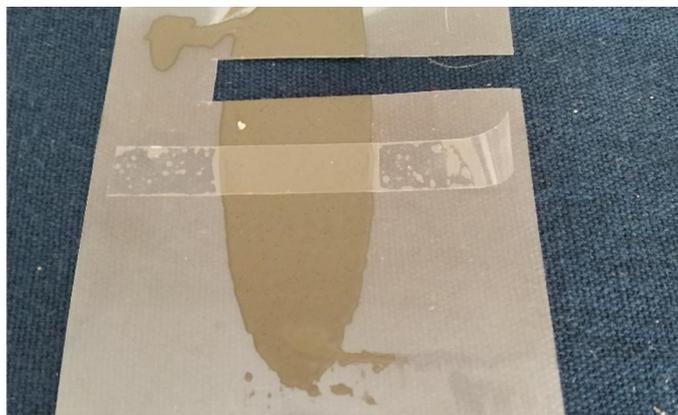


Figura 15: Representação do procedimento para a realização do teste de adesão

Neste teste em estudo, o único resultado que é considerado como aceitável, é quando a força de adesão é forte, pois este aspeto é um dos mais importantes para a realização de um componente funcional através da impressão de tintas, não podendo existir qualquer falha na tinta que impossibilite o seu funcionamento previsto.

O resultado para todos os substratos em teste (exceto para o Filme 4, que já tinha sido descartado) foi de que a força de adesão é considerada como forte, sendo que em nenhum dos substratos não existiu qualquer levantamento de tinta no substrato.

De seguida, foram registados os diversos valores para a resistência elétrica da tinta impressa em cada substrato, sendo que apenas o Filme 4 não teve o valor registado. De forma a facilitar a obtenção do valor da resistência, foram cortados pequenos retângulos de substratos com tinta, como é possível verificar nas figuras anteriores dos substratos aquando da sua impressão (Figuras 12, 13 e 14), de forma a utilizar um pequeno auxiliar que permite que o contacto dos dois pontos necessários seja mais preciso e facilitado, estando este auxiliar representado na Figura 16. Este pequeno corte foi sempre efetuado numa zona com tinta na parte superior do filme, de modo a deixar espaço no filme com tinta impressa para a realização do último teste, o teste de dobra.

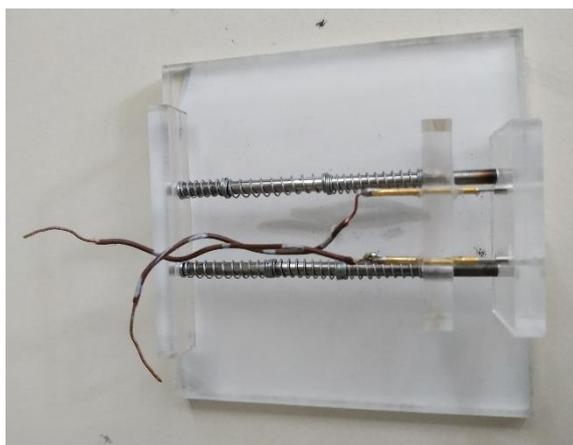


Figura 16: Auxiliar utilizado para a obtenção precisa do valor da resistência elétrica

Na tabela seguinte (Tabela 3), encontram-se discriminados todos os valores registados para a resistência elétrica de todos os filmes impressos, sendo que estes estão registados em unidade de ohm(Ω).

Tabela 3: Valores obtidos para a resistência elétrica dos primeiros filmes impressos

Substratos	Valores de resistência elétrica
Filme 1	1,120 M Ω
Filme 2	5,832 M Ω
Filme 3	1080,30 M Ω
Filme 4	Valor não obtido
Filme 5	9,997 Ω
Filme 6	3,841 Ω

No caso deste teste, os valores são todos muito diferentes consoante a tinta utilizada na impressão. Na primeira tinta usada, a primeira tinta de níquel, os valores encontram-se na ordem das unidades de megaohm (M Ω), na segunda, a tinta de prata, só foi registado um valor e encontra-se na ordem dos milhares de megaohm (M Ω) e, por último, a segunda tinta de níquel, possui valores muito mais baixos, na ordem das unidades de ohm (Ω).

Através destes valores, pode-se observar que, apesar da primeira e da terceira tinta serem formuladas através de partículas de níquel, os valores de resistência elétrica obtidos são completamente distintos, pois na primeira tinta os valores são muito superiores aos da terceira tinta, em que os valores são extremamente baixos. Na tinta restante, como só foi efetuado um teste, este não pode ser considerado como um resultado, por não existir uma comparação com

outros valores, sendo que neste teste pode ter ocorrido algum erro, provocando um valor tão elevado.

Como vão ser realizados mais testes de impressão com o *Doctor Blade*, com diferentes parâmetros, não foi efetuado o cálculo da resistividade elétrica nesta fase para os primeiros resultados obtidos, de forma a compará-los com resultados que podem ser encontrados em diferentes artigos científicos sobre este tema. Estes cálculos serão efetuados num ponto deste trabalho mais adiante (Ponto 5.2.1.), onde existem mais resultados a serem comparados.

Por fim, foi efetuado o teste de adesão através da dobra do substrato. Este teste, além de auxiliar na avaliação da adesão da tinta, também permite avaliar o alongamento e elasticidade das tintas quando sujeitas a forças que modificam a superfície do substrato, permitindo avaliar a possibilidade da utilização da tinta nas fases seguintes do trabalho. O modo para proceder à execução deste teste, é apenas necessário dobrar o filme, de forma a que fique com uma forma arredondada e verifica-se o estado em que se encontra a tinta. O filme deve ser dobrado numa zona central com alto preenchimento de tinta, mas foi dobrada numa zona inferior à recomendada, devido ao corte que foi efetuado para o teste anterior.

Novamente ignorando o Filme 4, nesta avaliação foram obtidos diferentes resultados, ao contrário do que tinha acontecido no primeiro teste, pois trata-se de um teste com algumas semelhanças. Separando os substratos impressos de acordo com a espessura de tinta impressa, ou seja, separando os substratos com uma espessura de tinta de 50 micrómetros, dos substratos com uma espessura de 100 micrómetros, é possível verificar que os filmes com uma espessura menor, suportam melhor as forças impostas, enquanto que nos filmes com maior espessura, a tinta parte no local da dobra, não suportando as forças.

Na figura seguinte (Figura 17), encontram-se as imagens dos três substratos com menor espessura de tinta, em que a tinta não se partiu com as forças impostas pela dobra do filme, sendo que nos dois primeiros filmes (Filme 1 e Filme3), a tinta apresenta uma ligeira falha no local da dobra, apesar desta não se ter partido por completo, e apenas no último filme (Filme 5), a tinta apresenta uma dobra perfeita, sem apresentar qualquer defeito.



Figura 18: Imagens dos três resultados obtidos no teste de dobra para os três filmes de menor espessura de tinta impressa. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 1, no centro da imagem do Filme 3 e na direita a imagem do Filme 5

Nas duas imagens seguintes (Figura 18), estão demonstradas as imagens obtidas para os restantes substratos (Filme 2 e Filme 6), onde a tinta não suportou as forças impostas e acabou por partir na zona onde foi efetuada a dobra.



Figura 17: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes de maior espessura de tinta impressa. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 2 e na direita a imagem do Filme 6

Destes primeiros testes efetuados, é possível retirar conclusões que permitem que a escolha dos parâmetros ocorra de uma forma mais adequada para os testes seguintes.

Uma primeira observação abrange o teste de adesão efetuado com o auxílio de fita-cola, em que é possível observar que, em todos os filmes onde foram efetuados os testes, em nenhum existiu qualquer vestígio de tinta levantada pela fita, o que permite perceber que todas as tintas possuem uma boa adesão aos filmes de PEN, chegando-se à conclusão de que, numa primeira instância, as tintas em termos de forças de adesão, ainda se encontram em bom estado.

De seguida, através do teste de dobra realizado nos filmes, é possível perceber que a espessura de 100 micrómetros não é uma espessura ideal a utilizar na utilização destas tintas, pois nos dois testes em que foi utilizada esta espessura, a tinta quebrou completamente. Na outra espessura utilizada, só num dos filmes impressos não existiu qualquer falha, sendo que nos restantes se encontram pequenas fissuras na tinta na zona da dobra. Esta situação permite concluir que as tintas, para os valores selecionados para os parâmetros, não possuem muita flexibilidade ou elasticidade.

Por fim, no teste em que foram obtidos os valores da resistência elétrica, estes foram muito diferentes uns dos outros, mostrando que todas as tintas, numa primeira observação, têm um comportamento elétrico muito diferente.

3.2.2.3. Resultados dos segundos testes de impressão com o *Doctor Blade* nos substratos de PEN

Para contrariar as adversidades encontradas nos resultados anteriores e de forma a tentar encontrar os parâmetros ideais para o processamento das tintas, é necessário que os parâmetros selecionados para o processo de impressão através de um *Doctor Blade* sejam diferentes nesta segunda fase de testes.

O primeiro problema a corrigir trata-se da questão com a cura do Filme 4, onde foi utilizada a tinta de prata (HPS FG57B) e, com os parâmetros anteriormente utilizados (120°C, 15 minutos e 100 micrómetros), a tinta não secou de forma correta. Tendo em conta o que é aconselhado pela ficha técnica da tinta (Anexo VII), a temperatura de cura irá ser a mesma, 120°C, pois não pode ser aumentado, devido à temperatura de transição vítrea do PEN ser o mesmo valor do utilizado. Já o tempo de cura irá ser aumentado de 15 minutos para 30 minutos, que é o aconselhado pela ficha para a temperatura escolhida. A espessura de tinta impressa volta também a ser a mesma, sendo que irão ser efetuadas mais duas impressões com as espessuras de 50 e 100 micrómetros.

Na figura seguinte (Figura 19), encontram-se demonstrados estes novos filmes, impressos com os novos parâmetros descritos com a tinta de prata, estando estes denominados por Filme 7 e Filme 8.



Figura 19: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de prata HPS FG57B. A imagem da esquerda representa o Filme 7 e a da direita o Filme 8

De seguida, foram efetuadas as impressões com as duas tintas de níquel, em que o problema que foi tido em consideração para a sua realização, foi a flexibilidade e elasticidade das tintas após o teste, em que os resultados obtidos foram bastante diferentes, dependendo da tinta usada e da espessura impressa. Desta forma, como a temperatura de transição vítrea do PEN é por volta de 120°C e a temperatura utilizada no teste anterior foi exatamente esta, neste segundo teste a temperatura vai ser reduzida em 10°C, para a temperatura de 110°C, em que o objetivo passa por observar se o amolecimento que é provocado no filme durante o aquecimento, por estar num valor muito perto da T_g, influencia a elasticidade e flexibilidade da tinta. O tempo de cura usado na primeira impressão (15 minutos), foi mantido para o segundo teste, pois é o valor que foi indicado pelo fornecedor para o processo de cura com estas tintas. As espessuras usadas também são as mesmas do ensaio anterior (50 e 100 micrómetros), para que os filmes possam ser comparados, com os resultados dos filmes impressos anteriormente, especialmente em relação ao teste de dobra.

Tendo em atenção os parâmetros seleccionados, foi efetuada a impressão dos dois filmes com a primeira tinta de níquel (HPN-DEV-79-89-84). Na Figura 20, encontram-se demonstrados os dois filmes impressos, estando estes identificados como Filme 9 e Filme 10.

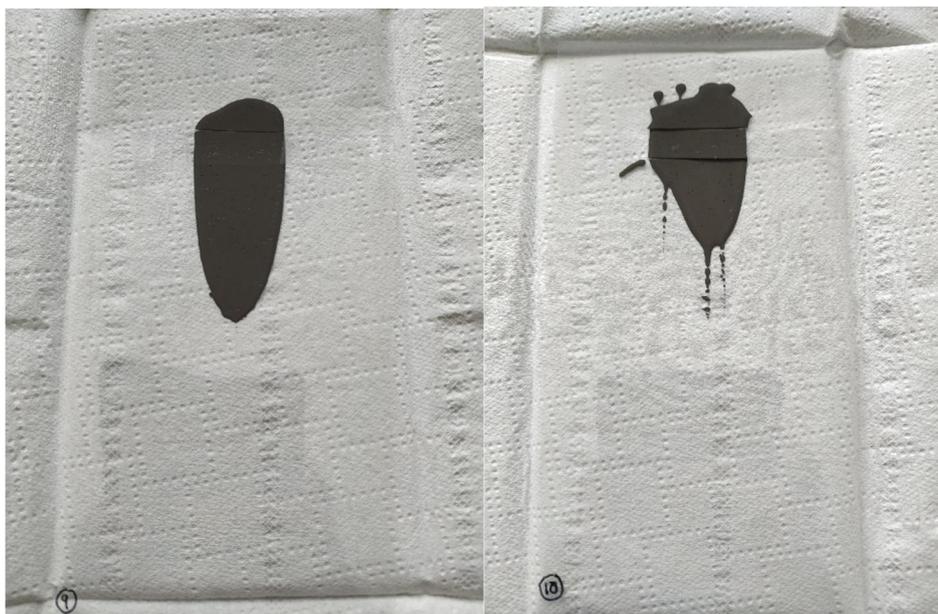


Figura 20: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. A imagem da esquerda representa o Filme 9 e a da direita o Filme 10

Por fim, foram efetuadas as últimas impressões deste segundo teste, em que foi utilizada a outra tinta de níquel (HPN-DEV-79-89-66). Os parâmetros utilizados foram exatamente os mesmos utilizados na tinta anterior, ou seja, a temperatura de cura foi de 110°C, o tempo de cura foi de 15 minutos e as espessuras usadas foram de 50 e 100 micrómetros. Na figura seguinte (Figura 21), estão demonstrados estes filmes impressos e estão denominados de Filme 11 e Filme 12.

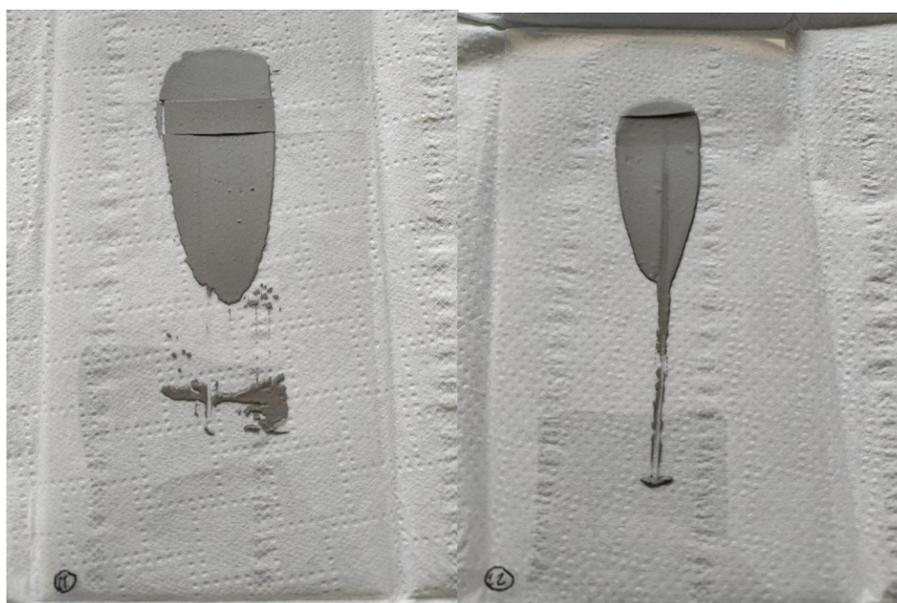


Figura 21: Imagens dos segundos resultados dos filmes com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. A imagem da esquerda representa o Filme 11 e a da direita o Filme 12

Após a impressão destes seis novos filmes e observando novamente apenas os que foram impressos com a tinta de prata, é possível verificar que no Filme 8, onde a espessura impressa foi de 100 micrómetros, a cura foi novamente insuficiente, sendo possível observar mais uma vez, na Figura 19, restos de papel, que serviu para auxiliar no armazenamento do filme, colado na zona onde a tinta não secou completamente. Apesar do problema de cura voltar a aparecer no filme em que é impressa tinta com uma maior espessura (100 micrómetros), é possível observar que neste teste, em que o tempo de cura foi aumentado, a quantidade de papel que ficou colado é menor, o que permite perceber que, apesar de esta gama de espessura não ser ideal para utilização, com o aumento do tempo, a cura acaba por produzir melhores resultados. Desta forma, o Filme 8 é também posto de parte, em relação à realização dos testes.

De seguida, foram efetuados os mesmos testes que foram realizados anteriormente, sendo estes o teste de adesão com o auxílio de fita-cola, o teste de adesão e flexibilidade efetuado com a dobra do filme e ainda o registo do valor de resistência elétrica da tinta impressa no filme.

Iniciaram-se os testes novamente pelo teste de adesão, em que se procedeu à colocação de fita-cola, na zona da tinta em todos os filmes que foram produzidos, exceto no Filme 8, para verificar a adesão da mesma e comparar com os resultados anteriores. Exatamente como no ensaio anterior, todos os resultados da força de adesão foram considerados como fortes, sendo as tintas consideradas como aceitáveis quanto à adesão sob os parâmetros selecionados, pois em nenhum dos testes efetuados surgiu alguma partícula de tinta na fita, permitindo concluir que a força de adesão é superior à força provocada pela fita-cola.

O segundo teste efetuado foi o registo dos valores da resistência elétrica para os cinco filmes impressos em boas condições. Novamente, o procedimento para a realização deste teste é o mesmo, em que é necessário cortar pequenos retângulos na zona superficial do substrato, em que no corte esteja a tinta que foi impressa, como é possível verificar nas figuras dos substratos (Figuras 19, 20 e 21). O objetivo deste corte foi para a utilização de um auxiliar (Figura 13), que permite o registo do valor da resistência elétrica por dois pontos de uma forma mais simples. Na tabela seguinte (Tabela 4), estão demonstrados os valores da resistência para cada um dos filmes.

Tabela 4: Valores obtidos para a resistência elétrica dos segundos filmes impressos

Substratos	Valores de resistência elétrica
Filme 7	1,237 Ω
Filme 8	Valor não obtido
Filme 9	Valor não obtido - <i>Overload</i>
Filme 10	184,3 M Ω
Filme 11	6,421 Ω
Filme 12	3,832 Ω

Os valores para este teste voltam a ser diferentes de acordo com a tinta utilizada. Considerando o único valor obtido para a tinta de prata, este encontra-se na ordem das unidades de ohm (Ω). Na tinta seguinte, a primeira tinta de níquel utilizada, o valor para o Filme 9 não foi possível ser registado, pois no multímetro utilizado o valor foi registado como muito elevado (*Overload*), ultrapassando o limite de registo do mesmo. No filme seguinte, e ainda para a mesma tinta, o valor registado foi na ordem das centenas de megaohm (M Ω). Por último, para a segunda tinta de níquel usada, ambos os filmes foram registados para os valores da resistência elétrica e em ambos os valores obtidos forma da ordem das unidades de ohm (Ω).

Avaliando os resultados obtidos, é possível perceber que, quando comparados com os obtidos nos testes anteriores para as tintas de níquel, os valores são bastante semelhantes, enquanto que para a tinta de prata os valores são muito diferentes, sendo as ordens de grandeza diferentes em termos de milhões. É ainda possível perceber que o que foi concluído no teste anterior quanto à tinta de níquel, ocorreu também neste, em que apesar de as duas tintas serem formuladas a partir de partículas do mesmo elemento, os valores de resistência elétrica são completamente distintos, sendo que para uma das tintas os valores são muito elevados e para a outra os valores são muito baixos.

Por mais uma vez, só foi efetuado o registo do valor da resistência elétrica em apenas um dos filmes impressos com tinta de prata, sendo que neste registo, o valor foi muito baixo. Como no teste anterior o valor obtido foi extremamente alto e sendo os registos completamente diferentes, estes valores não são tidos como aceitáveis para efetuar uma avaliação do comportamento elétrico da tinta, sendo necessário realizar mais testes com esta tinta para ser possível avaliar o seu comportamento de forma correta.

Da mesma forma como ocorreu no teste anterior, não foram efetuados os cálculos para a resistividade elétrica, principalmente devido aos resultados obtidos para a tinta de prata não serem completamente conclusivos quanto à sua resistência elétrica, pelo que ficou decidido que estes cálculos seriam efetuados numa fase posterior do trabalho (Ponto 5.2.1.), onde a tinta já estará selecionada e onde mais testes terão sido feitos aos quais se procederá aos cálculos para tudo o que foi efetuado.

O último dos testes a realizar nos segundos filmes produzidos, foi o teste de dobra, para obter uma perceção do comportamento da tinta em termos da sua flexibilidade, quando exposta às forças provocadas durante a dobra. O procedimento para a sua realização é exatamente o mesmo do teste anterior, mas neste ensaio os resultados obtidos são ligeiramente diferentes, sendo este o motivo pelo qual estes estão divididos de forma diferente, estando enquadrados pela tinta que foi usada e não pela espessura de tinta impressa, como ocorreu nos primeiros testes.

Desta forma, iniciou-se o teste pela tinta de prata, sendo que este apenas foi realizado no Filme 7, em que foi impressa uma espessura de 50 micrómetros. Como é possível verificar na seguinte figura (Figura 22), o filme apresenta algumas fissuras na tinta na zona onde foi efetuada a dobra, o que demonstra que apesar das alterações efetuadas nos parâmetros da impressão e cura, o resultado neste teste, é exatamente o mesmo que ocorreu no Filme 3.



Figura 22: Imagem do resultado obtido no teste de dobra para o filme impresso com a tinta de prata HPS FG57B

A segunda tinta a ser testada foi a primeira tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84, sendo testados os filmes 9 e 10, tendo estes sido impressos com espessuras de tinta de 50 e 100 micrómetros, respetivamente. Ao contrário do que ocorreu no teste anterior, a tinta em ambos os

filmes não suportou as forças impostas pela dobra, sendo que em ambos a tinta se partiu completamente, como se encontra demonstrado na seguinte figura (Figura 23).

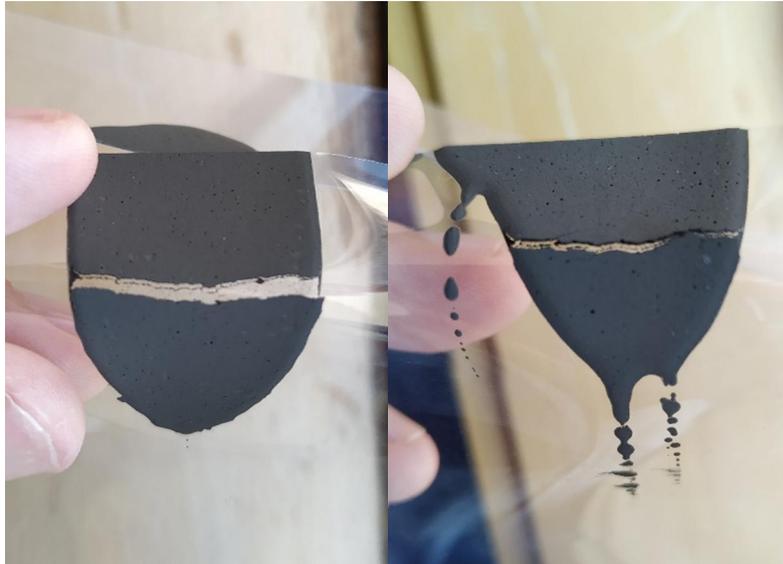


Figura 23: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes impressos com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-84. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 9 e na direita a imagem do Filme 10

Por fim, foi efetuado o último teste com a tinta restante, sendo esta a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66, sendo que foram realizados os testes nos filmes 11 e 12, com as espessuras de 50 e 100 micrómetros. Fazendo novamente uma comparação com os resultados obtidos no teste anterior para esta tinta, neste teste foram obtidos exatamente os mesmos resultados, ou seja, para a espessura de 50 micrómetros a tinta não apresenta qualquer vestígio de fissura, apresentando uma flexibilidade excelente, e para a espessura de 100 micrómetros a tinta não suportou as forças impostas e partiu completamente na zona de dobra. Estes filmes estão demonstrados na seguinte figura (Figura 24).

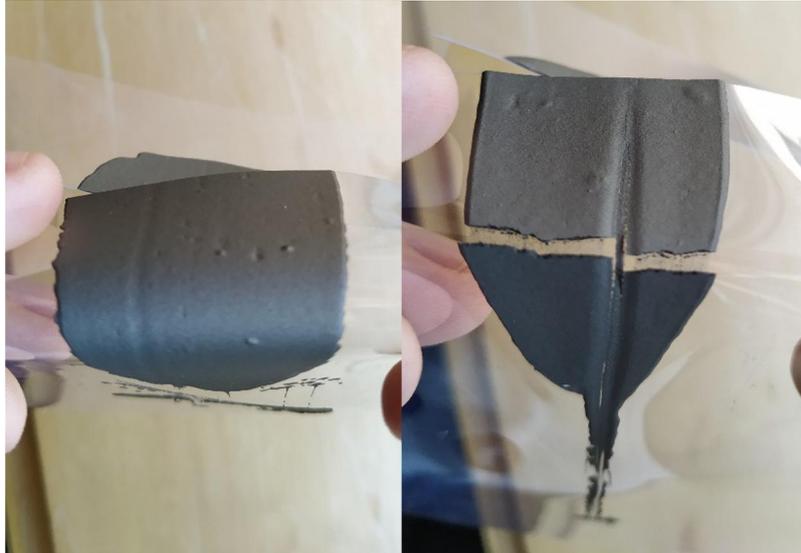


Figura 24: Imagens dos dois resultados obtidos no teste de dobra para os dois filmes impressos com a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66. Na imagem da esquerda encontra-se a imagem do Filme 11 e na direita a imagem do Filme 12

Com todos os testes efetuados para o filme de PEN, é possível retirar conclusões finais sobre os resultados obtidos, de forma a estipular os passos seguintes a serem tomados.

Fazendo novamente uma divisão segundo cada tipo de teste que foi efetuado, o primeiro teste a avaliar foi o de adesão com o auxílio de fita-cola, em que nos 10 filmes que foram impressos sem quaisquer defeitos, os resultados para todos foram os mesmos, em que a adesão de todas as tintas é considerada como forte, pois em nenhum dos filmes foi arrancado pela fita qualquer vestígio de tinta, provando que as forças de adesão das tintas em teste e dos substratos de PEN são fortes e adequadas para que as tintas sejam utilizadas no restante processo, pois as tintas encontram-se em bom estado em relação a esta característica específica.

O segundo teste a avaliar quanto aos resultados alcançados, trata-se da dobra realizada nos 10 filmes impressos em boas condições. Uma primeira conclusão obtida, foca-se na espessura de 100 micrómetros, pois em todos os testes em que esta espessura foi a aplicada, a tinta não suportou as forças e quebrou completamente, provando que esta espessura não é uma espessura ideal a utilizar em nenhuma destas tintas. Quanto à outra espessura utilizada, os 50 micrómetros, apenas para a denominada segunda tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66, os resultados foram excelentes, pois apresenta uma flexibilidade ideal para esta espessura, sendo a única tinta onde não aparece qualquer fissura em ambos os filmes, o que permite concluir que, para esta tinta, esta espessura pode ser usada durante a produção. Nas restantes tintas aparecem sempre ligeiras fissuras nesta dimensão de espessura, pois não possuem flexibilidade e elasticidade suficientes e

não suportam as forças impostas, não permitindo que estas tintas sejam utilizadas na produção com esta espessura de tinta, sendo necessário testar dimensões mais reduzidas.

O último teste, em que foram obtidos os valores da resistência elétrica, trata-se do único em que não é possível obter uma conclusão, em termos de características elétricas das tintas, em todos os filmes. Isto deve-se principalmente aos filmes com tinta de prata, em que dois dos quatro filmes produzidos não ficaram em condições devido ao mau processo de cura, sendo que os dois filmes em boas condições apresentam valores de resistência muito dispares, não podendo ser efetuada uma conclusão quanto ao seu comportamento elétrico. Os restantes filmes produzidos apresentam valores mais semelhantes entre si de acordo com cada tinta de níquel, mas quando a comparação recaí sobre os resultados entre as duas tintas, apesar de serem produzidas a partir do mesmo elemento químico (níquel), os resultados são completamente distintos.

Por fim, é ainda possível concluir que as alterações que foram efetuadas nestes segundos testes com o substrato de PEN, pouco ou nada mudam os resultados, quando comparados com o que foram efetuados previamente.

3.2.2.4. Testes de adesão com provetes de policarbonato (PC)

Ainda antes de passar para as fases seguintes que estão previstas nesta dissertação, foi possível realizar um último teste com as três tintas que se encontravam disponíveis, pois existiam alguns provetes de policarbonato disponíveis (Figura 25), para executar um curto teste de adesão com o auxílio de fita-cola, permitindo de uma forma rápida obter apenas uma perceção da adesão destas tintas, ao material que se pretende utilizar como substrato final, o policarbonato (PC), para a produção do componente funcional, pois o resultado deste teste fornece uma ideia inicial do que esperar nos filmes de PC que serão testados numa fase adiante deste trabalho.



Figura 25: Imagem de um provete de PC que foi usado para o teste de adesão

Ao contrário do que aconteceu nos testes com os filmes de PEN, não foi utilizado o *Doctor Blade* para realizar a impressão das tintas nos provetes de PC, devido principalmente às suas dimensões geométricas, que não facilitam o processo de impressão com este auxiliar. Deste modo, e como o objetivo é apenas a observação dos resultados da adesão das tintas neste material, foi colocada um pouco de cada tinta, numa das pontas de um provete, sem ter uma especial atenção à espessura de tinta que estava a ser colocada no provete. Após a pequena impressão das diferentes tintas em três diferentes provetes, foi necessário proceder ao processo de cura, tendo sido utilizados os mesmos parâmetros nos três provetes, sendo a temperatura de cura usada de 120°C e o tempo de cura de 30 minutos. Na seguinte figura (Figura 26), demonstram-se os resultados dos três provetes após o processo de cura, estando do lado esquerdo da imagem os provetes onde foram impressas as tintas de níquel e a do lado direito da imagem o provete com a tinta de prata.



Figura 26: Imagens dos resultados obtidos para os testes de adesão com os provetes de PC. A imagem da esquerda representa o resultado para a tinta de níquel HPN-DEV-79-89-66, na imagem do centro para a tinta HPN-DEV-79-89-84 e na da direita para a tinta HPS FG57B

Com os resultados obtidos, foi possível retirar algumas conclusões quanto à adesão de cada uma das tintas após o processo de impressão. Começando a avaliação pelos provetes onde foram utilizadas as duas tintas de níquel, percebe-se que a impressão e a subsequente cura foram ideais, apesar de os parâmetros selecionados estarem acima dos valores recomendados pela empresa que as fornece, tendo o teste de adesão sido efetuado logo de seguida, obtendo os mesmos resultados quando comparados com os dos filmes de PEN, em que as tintas aparentam

uma adesão ideal, pois não existe nenhum arrancar de tinta quando aplicada fita-cola por cima das tintas.

Pela observação do provete em que foi impressa a tinta de prata, percebe-se que os resultados foram novamente diferentes dos obtidos com as restantes tintas disponíveis, sendo observado que o processo de cura efetuado foi novamente insuficiente para que o mesmo estivesse completo, existindo novamente pequenos pedaços de papel colados na tinta. Apesar da cura incompleta, como a espessura não foi controlada durante o processo de impressão, na tinta impressa existem locais onde esta ficou completamente curada, sendo estas zonas localizadas na parte inferior da tinta impressa, observável na terceira imagem da figura (Figura 26), aproveitando-se este local para a realização do teste de adesão com o auxílio de fita-cola, tendo o resultado obtido sido considerado como bom, pois não existe qualquer arrancar de partículas de tinta, concluindo-se que esta tinta é utilizável para impressão no policarbonato, em termos de forças de adesão entre a tinta selecionada e o substrato.

3.2.2.5. Seleção final da tinta a usar no processo de impressão

Após todos os testes estarem efetuados, a tinta que foi selecionada para ser utilizada nos restantes testes e no processo de impressão, foi a tinta de prata HPS FG57B e o motivo principal para a sua escolha deveu-se não aos resultados obtidos nos testes, pois estes não foram muito conclusivos, mas sim às duas tintas de níquel (HPN-DEV-79-89-84 e HPN-DEV-79-89-66), pois estas ainda se encontram numa fase de desenvolvimento, não existindo muita informação em bibliografia sobre estas tintas, que permita efetuar uma avaliação dos resultados obtidos por comparação com a informação, por exemplo, de artigos científicos.

Desta forma, e de acordo com as conclusões retiradas dos testes anteriores, o passo seguinte do trabalho passa por testar novamente esta tinta, mas desta vez já com o material que vai ser utilizado, durante o processo total da produção de um componente funcional, o Policarbonato (PC), sendo necessário primeiro proceder à injeção de umas placas deste mesmo material e realizar novamente os mesmos três testes com a tinta de prata impressa nas placas, comparando também os resultados com os já anteriormente obtidos.

Assim, é dada como terminada a fase de seleção dos materiais que irão ser utilizados durante o processo de impressão, sendo o próximo passo do trabalho, a preparação e aplicação da técnica de serigrafia para produzir os filmes necessários para a produção da película funcional.

Capítulo 4. Procedimento Experimental

Apesar de todos os processos necessários para iniciar o processo de impressão estarem concluídos, pois foi efetuada a seleção da técnica de impressão de serigrafia, em conjunto com a tinta metálica de prata e o substrato de policarbonato, a tela com os desenhos previamente efetuados para efetuar este processo não se encontrava pronta, de forma a dar início à fase seguinte do trabalho.

Como solução, para que o plano de trabalhos estabelecido não fosse interrompido por completo, foi efetuada, numa primeira fase a impressão de placas de PC, com a intenção de testar o comportamento da tinta selecionada, e surgiu ainda, a oportunidade de utilizar uma máquina de corte e gravação a partir da tecnologia laser, em que foi possível testar duas outras formas de proceder à impressão.

Desta forma, este capítulo foca-se no procedimento a usar na injeção das placas de PC, nos procedimentos necessários para a utilização da máquina de corte e gravação a laser e nas técnicas usadas nos resultados obtidos neste equipamento, e, efetuar o mesmo, na técnica de serigrafia, após a chegada da tela com os desenhos pretendidos.

4.1. Injeção de placas retangulares de PC

No final do capítulo anterior, foi selecionada qual a tinta a ser utilizada durante a impressão, sendo esta uma tinta que é formulada através de partículas de prata, denominada, pela empresa que a desenvolveu (*Novacentrix*), por HPS FG57B. Apesar desta seleção, esta tinta apenas foi testada uma vez com o material que será utilizado como substrato durante todo o trabalho, o policarbonato (PC), não tendo sido os resultados que foram obtidos nos testes com os provetes deste material, viáveis para concluir algo sobre a tinta, quando aplicada sobre este material. A ideia inicial seria a de testar a tinta com este substrato selecionado, já durante o processo de impressão através de serigrafia, mas devido a atrasos que ocorreram durante a produção da tela e por não existirem disponível filmes de PC para testes, foi necessário recorrer a outras opções, sendo este o motivo pelo qual se recorreu ao processo de moldação por injeção, em que se procedeu à injeção de umas pequenas placas retangulares de PC. Existiam outras possibilidades, como o fabrico de filmes de PC ou mesmo a compra dos mesmos, mas o processo

mais simples e mais barato, neste caso, era a moldação por injeção de placas de PC, pois já existiam um molde e material disponíveis para serem utilizados.

O objetivo principal da produção destas placas de PC através desta técnica de moldação, passa novamente, numa primeira fase, pela realização de alguns testes de impressão com o *Doctor Blade*, de forma a caracterizar a tinta selecionada e o material que se encontra em utilização como substrato (PC), quanto às características físicas e elétricas e, de seguida, iniciar o processo de impressão por serigrafia, se necessário com estas mesmas placas de PC.

O molde que se encontrava disponível e que permitia que fosse realizado o processo de impressão por serigrafia, no produto injetado, trata-se de um molde em que é injetada uma pequena placa retangular, com uma espessura de cerca de 2 mm e com uma área superficial de 150X80 mm². Esta área é exatamente a mesma que foi utilizada anteriormente (Ponto 3.1.), de forma a realizar os desenhos para a tela de serigrafia e ainda para executar os primeiros testes de tintas com os filmes de PEN, em que estes filmes tinham este exato tamanho. Esta área sempre foi a utilizada nos pontos anteriores do trabalho, já tendo em conta que este molde seria utilizado posteriormente numa fase seguinte do trabalho, em que é efetuada a moldação por injeção sob o filme já impresso e termoformado, sendo este processo o último a ser realizado na produção do componente funcional, mas devido aos sucessivos atrasos durante o decorrer do trabalho, foi necessário utilizar o molde previamente ao previsto, para produzir estas mesmas placas para testar a tinta de prata com o PC, substituindo a falta de filmes deste mesmo material. Na Figura 27, estão demonstradas imagens do molde aberto, destas placas retangulares.



Figura 27: Imagens do molde aberto das placas retangulares

Com o molde selecionado e descrito, é necessário escolher qual o material a utilizar, sabendo que é necessário usar um policarbonato. Para tal, estava disponível um material da marca *SABIC*, denominado de LEXAN LUX2180T, em que a característica principal que levou à sua escolha, foi o facto de este PC ser transparente, pois é uma característica importante para este trabalho, sendo uma especificação do material a utilizar enquanto substrato do processo de impressão.

Com o molde e com o material selecionados, o passo seguinte é o processo de moldação em si. A máquina de injeção que foi selecionada para a realização deste processo, trata-se de uma máquina elétrica da marca *Ferromatik* e o seu modelo é *Elektra Evolution 110-300*, sendo a sua característica principal a sua força de fecho, que é de cerca de 110 toneladas. Na seguinte figura (Figura 28), encontra-se uma imagem desta mesma máquina de injeção.



Figura 28: Imagem da máquina de moldação por injeção utilizada, a Ferromatik Elektra Evolution 110-300

Com a célula de injeção disponível para utilização, deu-se início ao processo de moldação por injeção das ditas placas retangulares, seguindo a ficha técnica do material utilizado (Anexo VIII). Como tal, o primeiro passo a ser realizado trata-se da secagem do material, sendo que esta foi efetuada a uma temperatura de 120°C durante um período de 3 horas, como está aconselhado na ficha anteriormente referida. Este processo de secagem ocorre, com a intenção de remover o excesso de humidade que existe no material dentro do saco fornecido, pois esta humidade pode interferir com o processo de injeção do material, criando bolhas no material injetado.

Com a secagem do material realizada, passou-se para o processo da moldação por injeção. Colocou-se o material seco na tremonha da máquina, definiu-se os parâmetros principais para o processamento, desde as temperaturas (molde, tremonha, resistências existentes ao longo do parafuso e bico de injeção), tendo sido seguido sempre o que estava descrito na ficha técnica

do material, até às pressões, velocidades e tempos utilizados, e procedeu-se à injeção do material, levando à produção das placas. O tempo de cada injeção, em que é produzida uma placa de cada vez, é de cerca de 40,80 s e, no total, foram produzidas 50 placas, estando o resultado da injeção de uma das placas produzidas demonstrada na Figura 29. Todos os parâmetros do processo de injeção estão descritos detalhadamente nos anexos (Anexo IX).



Figura 29: Imagem de uma placa injetada após a extração da peça da máquina

A placa retangular que é obtida através da injeção possui um jito com grandes dimensões, como é possível observar na figura anterior (Figura 29), e é necessário retirar este mesmo jito para que a placa esteja adequada para utilização, ou seja, é necessário cortar o jito para que a placa fique completamente plana e utilizável durante os testes que serão efetuados. Para tal, foi utilizada uma serra de corte, com o intuito de efetuar o corte do jito das 50 placas retangulares, estando o resultado final do corte demonstrado na figura 30, ficando estas prontas para os testes que se seguem.



Figura 30: Imagem de uma placa retangular sem o jito

4.2. Impressão da tinta de prata nas placas de PC

Com o processo de moldação por impressão das placas retangulares completo, o passo seguinte passa por testar as placas injetadas, com a tinta de prata que foi selecionada no capítulo anterior, a tinta HPS FG57B, devido ao facto de este material ser o desejado como substrato no processo de impressão, efetuando-se um estilo de testes semelhantes ao que foi realizado aquando dos testes da seleção da tinta, com ligeiras alterações para adequar às placas.

Para tal, o primeiro passo a ser realizado trata-se da impressão da tinta de prata nas placas retangulares. Voltou-se a recorrer ao *Doctor Blade*, como forma de proceder à impressão de uma fina camada de tinta nas placas, com diferentes espessuras, permitindo realizar os testes necessários e perceber a influência deste substrato, nas características físicas e elétricas da tinta. O procedimento para a realização desta impressão com o *Doctor Blade* é exatamente o mesmo que foi utilizado nos testes anteriores, encontrando-se este especificado no capítulo 3 (Ponto 3.2.2.1.).

Considerando este procedimento, para efetuar o processo de impressão nas placas, primeiro é necessário selecionar quais os valores dos parâmetros que são utilizados, sendo estes a espessura de tinta a imprimir e a temperatura e o tempo para o processo de cura para a tinta. Para tal seleção, também é necessário saber qual o número de impressões a realizar, de forma a organizar os diferentes valores dos parâmetros ao longo das impressões, para existirem diferentes resultados, que permitam efetuar comparações e avaliações da influência dos parâmetros na tinta impressa e de quais são os parâmetros ideais para este processo.

Desta forma, foram efetuadas cinco diferentes impressões, sendo que nestas cinco os parâmetros foram sempre alterados. Numa primeira fase de testes, foi decidido que as primeiras três placas a serem impressas seriam realizadas tendo, por princípio, que a temperatura e o tempo de cura seriam de 150°C e 15 minutos, respetivamente, sendo que o que seria alterado seria a espessura de tinta que será impressa, sendo as espessuras de 10, 20 e 30 micrómetros. De acordo com estas espessuras utilizadas, foi possível efetuar uma identificação destas placas retangulares com as suas respetivas impressões, ou seja, à placa em que foi impressa uma espessura de 10 micrómetros, foi dado o nome de Placa 1, à espessura de 20 micrómetros, denominou-se de Placa 2 e, por último, à espessura de 30 micrómetros, deu-se o nome de Placa 3.

As restantes placas foram impressas com diferentes parâmetros, sendo que em ambas a temperatura e tempo de cura foi de 100°C e de 30 minutos, respetivamente, sendo que as

espessuras utilizadas foram na primeira placa de 10 micrómetros, e denominou-se esta de Placa 4 e, na última, a espessura foi de 5 micrómetros, sendo esta denominada por Placa 5.

4.3. Testes a realizar com as placas de PC

Após a impressão da tinta de prata nas placas retangulares de PC, torna-se possível a realização dos testes previstos para testar a tinta no substrato escolhido. Deste modo, foram efetuados três diferentes testes, sendo exatamente os mesmos que foram efetuados aquando dos testes das tintas no substrato de PEN, ou seja, foi efetuado um teste de adesão através do uso de fita-cola, um outro teste de elasticidade e flexibilidade da tinta através da dobra da placa impressa e ainda, a obtenção do valor da resistência elétrica, com o intuito de calcular a resistividade elétrica da tinta, de forma a comparar os resultados com valores encontrados em bibliografias e com os valores para os resultados obtidos para os filmes de PEN.

O primeiro teste efetuado foi o teste de adesão, em que é utilizada fita-cola como uma forma simples de perceção das forças de adesão entre a tinta de prata e a placa de PC. O seu procedimento é bastante simples, sendo que se coloca um pouco de fita-cola por cima da placa, de forma a que a fita cubra tanto a superfície da placa, como a tinta impressa e, de seguida, arranca-se a fita. Observando a fita arrancada e a zona onde a fita-cola atuou, é possível perceber se existiu algum levantamento de tinta, por mais ligeiro que este seja, permitindo concluir qual o tipo de forças de adesão existentes neste teste, pois se existir algum arrancar de tinta pela fita, as forças de adesão são consideradas como fracas, sendo logo descartados estes materiais para os restantes processos desta dissertação, devido à adesão ser uma especificação muito importante para a produção de um componente funcional; se não existir qualquer levantamento de tinta, que é o esperado na realização deste teste, as forças são consideradas como fortes. Na Figura 31, encontra-se representado um exemplo de como este teste é efetuado.



Figura 31: Imagem representante do procedimento a executar para a realização do teste de adesão

De seguida, foi efetuado o segundo teste, sendo este o da dobra das placas impressas, em que se provoca a dobra das mesmas, de forma a realizar uma avaliação da tinta quanto à sua flexibilidade e elasticidade, quando impressa neste substrato. Ao contrário do que aconteceu nos testes realizados com os filmes de PEN, como as placas retangulares são compostas de um material muito rígido, o policarbonato, e possuem uma espessura muito superior à de um filme, não é possível efetuar a dobra de forma manual, tendo sido necessário o auxílio de uma pistola de ar quente.

Deste modo, o procedimento para este teste inicia-se pela utilização da pistola de ar quente de forma a aquecer e amolecer uma placa, que se encontra presa com o auxílio de um torno de mesa, o que permite efetuar a dobra da placa. Após a placa estar amolecida o suficiente na zona onde a pistola está a ser aplicada, procede-se à dobra da placa. Exatamente como aconteceu no teste anterior, existem dois resultados esperados neste teste. O primeiro, trata-se de quando a elasticidade da tinta é máxima, pois a placa é dobrada até ao seu máximo possível, sem que a tinta apresente qualquer defeito ou fissura. O outro resultado esperado, consiste no surgimento de fissuras na tinta, pois quando se está a efetuar a dobra, neste caso a tinta começa a ceder num certo ponto, parando-se logo a dobra neste momento, sendo que o ângulo em que a dobra parou se trata do ângulo máximo para a tinta dobrar. Desta forma, foi efetuada e avaliada cada dobra de uma placa de cada vez.

Por último, foi efetuado o último teste previsto, correspondendo este à obtenção dos valores de resistência elétrica da tinta que foi impressa nas placas retangulares, sendo este valor

obtido em medidas de ohm (Ω). Como após a realização do teste anterior, as placas que foram dobradas não recuperam a forma que possuíam inicialmente, ficando com a forma que lhe foi imposta, tendo isto em conta, foram obtidos os dois valores distintos para esta característica elétrica, antes da dobra e após a mesma, permitindo também obter dados quanto à diferença que o segundo teste provoca na tinta.

Desta forma, foram novamente obtidos os valores recorrendo ao mesmo método que foi utilizado anteriormente (Pontos 3.2.2.2. e 3.2.2.3.), o método de dois pontos de contacto, em que a partir do uso de um multímetro de precisão, com duas amarras colocadas no material em estudo, ligadas ao aparelho, se obtém o valor de resistência elétrica da tinta impressa, mas como não é possível cortar pequenos pedaços destas placas, de forma a utilizar o mesmo auxiliar que foi utilizado nos testes com filmes de PEN, devido à elevada rigidez do material, é necessário apenas utilizar os dois pontos de contacto da máquina (as amarras) na superfície da tinta impressa, obtendo, assim, o valor necessário da resistência elétrica.

4.3.1. Procedimento para o cálculo da resistividade elétrica

Com a obtenção dos valores de resistência elétrica para os testes que foram realizados, a fase seguinte desta dissertação trata-se do cálculo do valor da resistividade elétrica, tanto para as placas retangulares de PC, como para os filmes de PEN, onde foi impressa a tinta de prata selecionada.

Em primeiro lugar é necessário perceber como é efetuado o cálculo da resistividade elétrica. O método que é utilizado nesta dissertação baseia-se numa técnica experimental, em que a resistividade elétrica do material é obtida através da medição da resistência elétrica e das dimensões físicas do material em estudo, sendo o valor de resistência elétrica obtido através do método de medição por dois pontos, com o auxílio de um multímetro de precisão e as dimensões físicas obtidas com um auxiliar de medição dimensional, sendo neste caso utilizado um paquímetro para medir os comprimentos e as larguras, pois o *Doctor Blade* usado já define qual a espessura de tinta em uso.

Deste modo, a equação que é utilizada como base para calcular a resistividade elétrica, é a seguinte

$$\rho = \frac{Vwh}{Il} \quad (1)$$

em que ρ corresponde à resistividade elétrica da amostra medida em ohm metro ($\Omega.m$), V trata-se da voltagem medida pelo multímetro em Volts (V), w é a largura medida na amostra em metros (m), h corresponde à espessura medida na amostra em metros (m), I trata-se da intensidade da corrente elétrica medida em Ampere (A) e, por fim, l é o comprimento medido na amostra em metros (m). [38]

Como o cálculo da resistividade elétrica é efetuado através do método de dois pontos, em que a partir do valor da resistência elétrica se calcula o valor final pretendido, é necessário introduzir o valor da resistência na equação anterior (Equação 1), usando-se para tal a seguinte equação base para este parâmetro. [38]

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Substituindo esta equação (Equação 2) da resistência elétrica na equação inicial (Equação 1), permite obter uma alteração da primeira equação (Equação 1). [38]

$$\rho = \frac{Rwh}{l} \quad (3)$$

Através da última equação (Equação 3), torna-se possível efetuar o cálculo da resistividade elétrica, através dos valores dos parâmetros já utilizados durante a impressão da tinta de prata.

4.4. Processos realizados com a máquina de corte e gravação a laser

Como foi referido no início do capítulo, devido a atrasos na produção da tela de serigrafia, surgiu a oportunidade de utilizar uma máquina de corte e gravação através da tecnologia de laser. Através deste equipamento, foi decidido que seriam efetuados pequenos testes com os materiais que se encontravam disponíveis, com o objetivo de perceber se a utilização deste género de equipamentos, permitem realizar uma boa impressão de uma estrutura, em que uma das suas principais especificações é uma precisão elevada no processo, devido ao reduzido tamanho das estruturas que se pretende imprimir.

Para tal, foram testadas duas formas distintas de encarar o equipamento, ou seja, foi decidido que primeiro seria testada a realização de uma máscara recorrendo ao corte a laser, a partir de um dos desenhos dos sensores que tinham sido efetuados no capítulo anterior (Ponto

3.1.) e também a partir do filme que se encontrava disponível, o filme de PEN; e a segunda forma, trata-se de efetuar uma gravação com o laser nas placas de PC que foram efetuadas anteriormente, recorrendo ao mesmo desenho do sensor escolhido para a máscara.

O equipamento utilizado durante estes procedimentos, trata-se de uma máquina de corte a laser CNC de modelo SD-1390, sendo que o seu funcionamento se baseia na incidência de um laser do tipo de CO₂ sobre um material selecionado, realizando o corte ou a gravura. Possui, ainda, um sistema de arrefecimento através de ar frio, para evitar que as peças a cortar ou gravar se queimem. Para selecionar o tipo e a forma do corte ou da gravura que será executado pela máquina, é necessário, previamente, introduzir um ficheiro com o desenho pretendido, em formato CAD, no sistema do equipamento, de forma a obter a peça e forma pretendida. Os parâmetros que podem ser alterados e controlados durante este processo são bastante poucos, pois apenas se pode alterar a velocidade com que o laser é movimentado durante o corte e a potência com que a laser incide sobre o material. [39]

De modo a iniciar os procedimentos previstos, foi necessário proceder à escolha de um dos desenhos que foram efetuados, para introduzir no sistema do equipamento, sendo usado como base para os testes com esta tecnologia, tendo sido selecionado um dos designs com o sensor interdigital, em que o espaçamento entre os traços desenhados é maior, ou seja, possui um espaçamento de 1 mm, estando este desenho representado na seguinte figura (Figura 32).

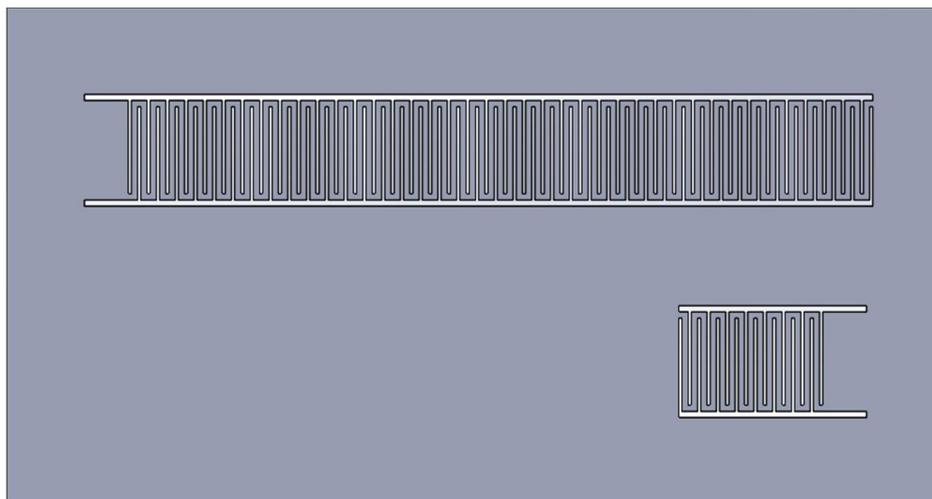


Figura 32: Imagem do desenho selecionado para os testes com a máquina de laser

Com a estrutura selecionada, podem-se iniciar os dois testes previstos com o equipamento, iniciando-se pela técnica de produção de uma máscara com o filme de PEN, através do corte a laser, em que a sua utilização consiste em possibilitar a impressão da estrutura

previamente selecionada num substrato, servindo de uma outra possível solução para a produção de um sensor, com as especificações pretendidas para o produto final.

Com a intenção de apenas testar o comportamento do filme com este tipo de tecnologia, numa primeira fase, foi apenas introduzido no sistema, o pequeno sensor desenhado na figura anterior, devido ao facto de a quantidade de filme ser bastante pequena para realizar diversos testes, tendo de restar filme suficiente, de forma a realizar no final a máscara com ambos os desenhos.

Para realizar os testes, é necessário selecionar quais os primeiros parâmetros a serem utilizados durante o processo. Assim, foi selecionada uma velocidade de movimento do laser de 200 mm/s e uma potência do laser de 20 W.

Passou-se, então, para a segunda técnica descrita anteriormente, a gravação através do laser. Continuando a incidir sobre as placas de PC, este segundo processo foi efetuado sobre este mesmo material, usando as placas como substrato, gravando o mesmo desenho que foi selecionado anteriormente, procedendo de seguida à impressão de tinta de prata, preenchendo o espaço que foi gravado na placa, testando mais um formato diferente para a realização de um sensor para a produção de um componente funcional.

Nesta segunda experiência com o equipamento de corte e gravura a laser, foram efetuados três diferentes testes, sendo que foram testados três combinações diferentes entre os parâmetros disponíveis a alterar pela máquina, sendo eles a velocidade de movimento do laser e a potência de incidência de laser. Desta forma, no primeiro teste foi usada a velocidade de 200 mm/s e uma potência de 20 W, no segundo aumentou-se os dois valores para 230mm/s e para 30 W, respetivamente, e por fim apenas se procedeu a um aumento na potência, para 40 W, dando-se por terminadas as experiências com o equipamento com a tecnologia de laser.

4.4.1. Procedimento para a observação microscópica efetuada aos resultados obtidos

Após a conclusão da gravação das três placas e com o objetivo de efetuar uma avaliação e perceber a influência dos danos causados pela técnica, foi possível utilizar uma lupa estereoscópica e um microscópio de reflexão, com o objetivo de obter uma perceção das diferenças da profundidade do desenho gravado nas diferentes placas, assim como os efeitos dos danos causados pelo laser nas paredes dos canais efetuados.

O procedimento para a utilização dos dois aparelhos é em tudo semelhante. Para iniciar, o primeiro passo passa pela escolha da objetiva a utilizar, de forma a efetuar a observação com a proximidade pretendida. Colocando a objetiva selecionada no aparelho que vai ser utilizado, procede-se também à colocação da estrutura a observar na platina do equipamento e à observação da mesma. Após este processo, seleciona-se uma zona visualizada nas placas, que contenha informação sobre o que é pretendido com este teste, e tira-se uma fotografia desta zona, a partir do sistema do equipamento ligado a um computador.

4.4.2. Procedimento para a impressão efetuada aos resultados obtidos e para a obtenção dos valores da resistência elétrica

Para concluir esta parte deste trabalho que envolve a técnica de gravura por laser, apenas falta a impressão da tinta de prata selecionada numa fase anterior da dissertação, com o auxílio de um *Doctor Blade*.

O procedimento para a utilização do *Doctor Blade* para realizar a impressão é exatamente a mesma que foi usada nos testes anteriores deste trabalho (Ponto 3.2.2.1.), sendo que a grande diferença entre os testes que foram realizados anteriormente e os que vão ser efetuados agora é não existir a necessidade de escolher um valor para a espessura de tinta que será impressa, pois o objetivo passa por preencher o espaço que foi gravado na placa, usando-se o valor de zero no *Doctor Blade*.

Após o processo de impressão efetuado, procede-se à realização de apenas um teste aos resultados obtidos, sendo este teste a obtenção dos valores de resistência elétrica, com a intenção de obter informações sobre o comportamento elétrico da tinta quando impressa sob estas condições de processamento. O procedimento para este teste é exatamente o mesmo que foi utilizado no ponto anterior (Ponto 4.3.), recorrendo-se ao mesmo método de dois pontos, sendo que as amarras do multímetro utilizado, foram colocadas nas zonas terminais do sensor impresso, em zonas onde tinta foi impressa, avaliando o comportamento ao longo de toda a estrutura.

4.5. Processo de impressão por serigrafia

Com a conclusão dos testes realizados no equipamento de corte e gravura a laser e com a chegada da tela de serigrafia encomendada, com os desenhos previamente selecionados, deu-se início ao processo de impressão, através da técnica previamente pretendida, a serigrafia. Desta forma, nos pontos seguintes, será caracterizada a tela que vai ser utilizada e também será descrito o procedimento para o processo de impressão por serigrafia.

4.5.1. Caracterização da tela efetuada

De forma a iniciar o processo de impressão por serigrafia, é necessário, numa primeira fase, efetuar uma caracterização da tela encomendada com os desenhos que foram produzidos na primeira fase deste trabalho, sendo o foco principalmente na malha que foi utilizada, pois fornece informações importantes para o processo de impressão. Para tal, está representada na seguinte figura (Figura 33), uma fotografia da tela com os desenhos que foram transferidos para a mesma.



Figura 33: Imagem da tela efetuada com os desenhos

A malha que foi utilizada para a produção desta tela, foi uma malha da marca SEFAR denominada de SEFAR PME 120-30 Y, que é produzida a partir de fios de poliéster de alta resistência à tração, possuindo, portanto, um alongamento bastante baixo, sendo este um material

ideal para obter uma grande precisão na impressão das imagens (os desenhos escolhidos) que foram transferidas para esta malha, devido às pequenas dimensões das estruturas desenhadas. [40]

Quando foi referido o nome da malha selecionada, foi também apresentado o número da mesma, 120-30 Y, e estes caracteres possuem todas as informações necessárias para caracterizar os fios utilizados, de forma a obter informações sobre a malha que será produzida. Assim, o primeiro número corresponde ao número de fios que se encontram dispostos num centímetro de malha, sendo que neste caso, o número é de 120. O segundo número corresponde ao diâmetro nominal do fio utilizado na malha, sendo o valor descrito em micrómetros (μm), apresentando-se na malha selecionada com o valor de 30 μm . Por fim, a letra Y representa a cor dos fios usados, sendo que a letra Y representa a cor amarela, sendo esta letra baseada na forma como se pronuncia esta cor em inglês (*yellow*). [40]

Estas três informações, são as bases para obter os valores restantes sobre a malha, pois é a partir destes, em conjunto com a técnica de tecelagem selecionada para produzir a malha, sendo, no caso da malha escolhida, uma tecelagem plana denominada de tafetá (tecido trançado), que se torna possível obter todas as informações que são necessárias para proceder à impressão. Desta forma, são obtidos os valores para o tamanho das aberturas na malha, da percentagem de área aberta na malha, do volume teórico de tinta e da espessura da malha, sendo este último o valor mais importante para o desenvolvimento deste trabalho, pois uma parte vital para o processo de impressão é obter a informação sobre a espessura de tinta impressa, de forma a poder efetuar o cálculo da resistividade elétrica, caracterizando o produto quanto às suas propriedades elétricas. [40]

Os valores para todas estas propriedades da malha já se encontram disponibilizados pelo produtor da mesma, pois é a partir destas informações que se procede à escolha do modelo da malha, de forma a que o processo de impressão seja o mais otimizado possível. Assim, todos os valores para as informações da malha selecionada encontram-se descritos, de forma resumida, na seguinte tabela (Tabela 5). [40]

Tabela 5: Valores apresentados para as principais características da malha da tela [40]

Características da malha	Valores apresentados para o modelo
	120-30 y
Nº de fios na malha (/cm)	120
Diâmetro nominal do fio (μm)	30
Tamanho das aberturas na malha (μm)	52
Área aberta na malha (%)	38
Volume teórico de tinta (cm^3/m^2)	17
Espessura da malha (μm)	45 ± 2

Por fim, ao observar as estruturas que foram transferidas para a tela, foi perceptível que ocorreu um erro ao efetuar este processo pelo fornecedor da mesma. Ao observar um dos desenhos que foram transferidos, por exemplo, um sensor interdigital que se encontra representado no canto inferior esquerdo da figura anterior (Figura 33), percebe-se que a transferência não foi efetuada de acordo com o desenho que foi enviado ao fornecedor, pois a estrutura que se encontrava na tela não estava preenchida, mas sim apenas com uma linha a toda a volta do sensor. Esta falha apresenta uma grande desvantagem para o desenrolar deste processo, pois, em primeiro lugar, não permite perceber qual a dimensão das geometrias que foram efetivamente transferidas para a tela, devido às suas reduzidas dimensões e, por último, afeta as características elétricas do sensor que são esperadas durante este trabalho. De forma a ser perceptível a forma como as estruturas foram transferidas para a tela, na seguinte figura (Figura 34) encontra-se uma representação do mesmo sensor, descrito no início deste parágrafo, nas condições em que foi apresentado na tela.

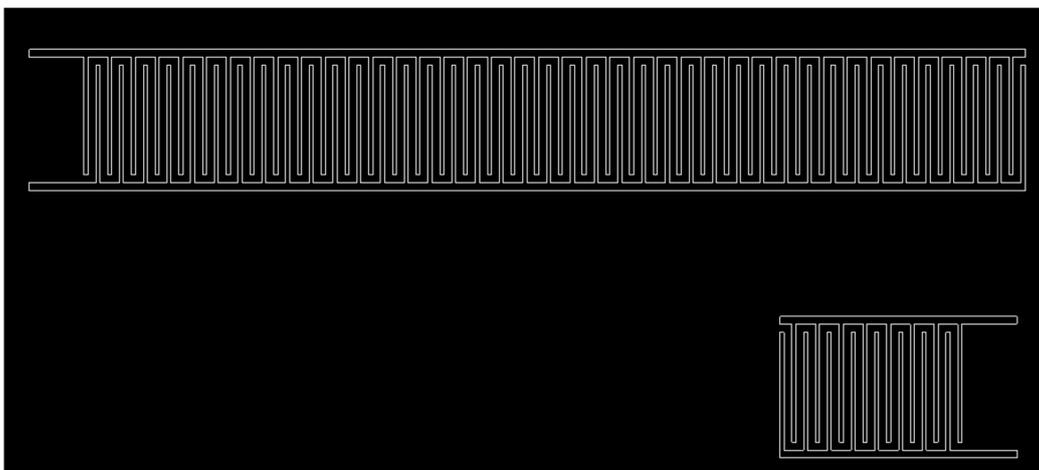


Figura 34: Imagem representativa do desenho transferido para a tela de um sensor interdigital

Devido a esta falha só ter sido perceptível após a primeira impressão com a tela, durante o primeiro teste de impressão por serigrafia, todos os testes que se seguiram foram efetuados com esta mesma tela, sendo o seu propósito apenas o de verificar a funcionalidade e o comportamento da tinta nesta técnica de impressão selecionada.

4.5.2. Caracterização da máquina de serigrafia a utilizar

Desta forma, antes de iniciar a impressão de tinta de prata através da tela descrita no ponto anterior, é necessário proceder também à caracterização da máquina que foi utilizada para proceder à impressão a partir da técnica de serigrafia.

O equipamento que foi utilizado foi uma máquina da marca *ATMA*, da série *AT-PD*, sendo o modelo utilizado AT-60PD. Esta máquina trata-se de um equipamento elétrico e digital, de impressão plana por serigrafia, sendo que algumas das principais características da máquina que possuem algum interesse para esta dissertação encontram-se descritas na seguinte tabela (Tabela 6).

Tabela 6: Valores apresentados para as principais características do equipamento ATMA AT-60PD

Características Principais do Equipamento	Valores Apresentados
Espessura permitida (mm)	0 ~ 120
Área de impressão máxima (mm²)	405 X 600
Área máximo da tela (mm²)	700 X 950
Área da mesa (mm²)	500 X 700
Dimensões da máquina (mm³)	1300 X 1060 X 1600

4.5.3. Procedimento para a impressão por serigrafia

Com o equipamento de serigrafia caracterizado, o passo seguinte trata-se da descrição do procedimento para proceder à impressão através da técnica de serigrafia.

Antes de proceder a qualquer operação na máquina, o primeiro passo passa por ligar o sistema de ar comprimido do laboratório, sendo o valor de pressão deste de 7 bar e, de seguida, ligar o sistema de ar comprimido do equipamento, rodando a válvula até atingir os 4 bar, que é o valor recomendado pelo livro de instruções do aparelho.

Com o sistema de ar comprimido ligado, liga-se a máquina, sendo que após o sistema iniciar, o primeiro passo é colocar os diferentes componentes necessários para a impressão no equipamento, iniciando-se pela tela, utilizando as amarras do aparelho para a segurar. De seguida, coloca-se o *squeegee* na sua posição e também um *Doctor Blade*, de forma a imprimir a tinta com o primeiro e limpar os excessos de tinta da tela com o segundo, sendo possível estipular as posições onde estes componentes são colocados e qual o ângulo em que estes são posicionados.

De seguida, com os componentes do equipamento colocados, o passo seguinte passa por colocar o substrato selecionado para o processo, na mesa da máquina, sendo que este tem de ser disposto sempre tendo em conta o posicionamento da tela, de forma a que o desenho que se pretende imprimir, esteja perfeitamente alinhado com o substrato, existindo a hipótese de baixar e levantar a tela, para facilitar o alinhamento no caso do substrato possuir um tamanho pequeno.

O passo seguinte trata-se da programação de como o processo de impressão vai decorrer, sendo necessário escolher as distâncias que os componentes previamente descritos (*squeegee* e *Doctor Blade*) vão ter de percorrer, de forma a procederem à impressão, e ainda a velocidade de movimento e a pressão que estes mesmos componentes tem de executar. Com a programação completa, é necessário testá-la, de forma a perceber se o percurso que foi selecionado para a impressão está correto, de forma a que a impressão ocorra por completo, sem que fiquem a faltar zonas não impressas. Para efetuar este pequeno teste, inicia-se o processo de impressão da máquina, sendo que a diferença se encontra na posição da tela, pois esta encontra-se levantada por este mesmo motivo, ou seja, o equipamento permite manter a tela levantada para testar o percurso pretendido. Se o percurso selecionado estiver correto, pode-se proceder ao baixar da tela, para iniciar o teste.

Com o percurso selecionado e com a tela no posicionamento correto, coloca-se a tinta na tela, numa zona próxima do desenho que será impresso, sendo que, se for necessário, pode-se tapar algum outro desenho da tela que não seja pretendido imprimir e que se encontre no percurso que os componentes do equipamento irão efetuar durante a impressão, podendo-se utilizar fita-cola, ou um auxiliar semelhante, para evitar que a tinta passe por estas imagens na malha não desejadas.

Dado que tudo se encontra pronto, procede-se à impressão da tinta no substrato, podendo-se realizar quantas impressões necessárias para imprimir o mesmo desenho, colocando mais tinta, no caso de esta se tornar pouca, e voltando alguns passos atrás deste procedimento, quando se pretende alterar o desenho a imprimir, sendo necessário voltar a selecionar o percurso dos

componentes, devido ao desenho se encontrar numa posição distinta, voltar a testar este novo posicionamento e proceder a nova colocação de tinta perto desse desenho, imprimindo, de seguida, o mesmo.

No final do processo de impressão, procede-se à cura da tinta num forno, seleccionando-se o tempo e a temperatura de cura, dando por terminada o processo na sua totalidade, ficando o resultado pronto para as próximas fases do trabalho.

Quanto aos componentes de impressão, é necessário proceder à limpeza dos mesmos, sendo que consoante a tinta utilizada, se utiliza o agente de limpeza aconselhado pela ficha técnica do material, podendo mesmo ser necessário utilizar uma *hotte*, no caso de o agente ser nocivo durante a sua utilização. No final desliga-se a máquina e deixa-se os componentes secar, dando por terminado o processo.

Capítulo 5. Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1. Impressão da tinta de prata nas placas de PC

Como descrito no capítulo anterior (Ponto 4.2), foram efetuadas cinco diferentes impressões, com a tinta de prata HPS FG57B, nas placas de PC, sendo que os parâmetros utilizados (espessura de tinta impressa, temperatura e tempo do processo de cura), foram bastante distintos em cada uma das impressões, estando os valores dos mesmos resumidos na seguinte Tabela 7, onde as placas foram identificadas como Placa 1, Placa 2 e por aí sucessivamente, de acordo com o que também foi decidido no capítulo anterior, o que facilita a identificação das mesmas.

Tabela 7: Valores dos parâmetros utilizados no processo de impressão das placas retangulares de PC

Substratos	Temperatura de cura	Tempo de cura	Espessura de tinta
Placa 1	150°C	15 minutos	10 µm
Placa 2	150°C	15 minutos	20 µm
Placa 3	150°C	15 minutos	30 µm
Placa 4	100°C	30 minutos	10 µm
Placa 5	100°C	30 minutos	5 µm

Deste modo, na seguinte figura (Figura 35), encontram-se demonstrados os cinco resultados das impressões efetuadas com o auxílio do *Doctor Blade*.

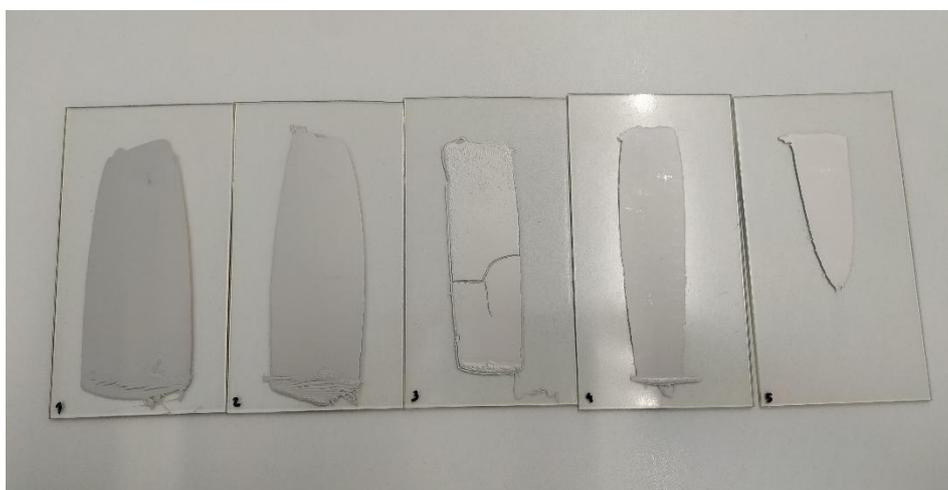


Figura 35: Imagem demonstrativa dos resultados da impressão de tinta de prata HPS FG57B nas placas de PC

Após efetuadas as cinco impressões, foi possível observar que na impressão da Placa 3 (placa que se encontra no centro da figura anterior), durante o processo de cura, a tinta não suportou os parâmetros que foram selecionados para o processo e quebrou-se numa zona central da impressão, o que impossibilitou a realização de todos os testes que estavam previstos nesta placa. Este defeito deve-se ao aumento da espessura para valores demasiados elevados, que não suportam as contrações existentes durante o processo de cura, quebrando a tinta impressa numa zona intermediária. Nas restantes placas, a impressão e a cura da tinta nas placas não apresentou qualquer defeito, tendo sido realizados todos os testes sem qualquer impedimento.

5.2. Testes realizados com as placas de PC

Exatamente como ocorreu nos testes realizados com os filmes de PEN impressos com as diversas tintas existentes, foram efetuados três testes para testar a tinta de prata HPS FG57B, com as placas de PC, um teste de adesão com o auxílio de fita-cola, um teste de elasticidade e flexibilidade da tinta através da dobra do substrato e um último teste em que é obtido o valor da resistência elétrica da tinta, com o objetivo de calcular a resistividade elétrica da mesma.

O primeiro teste realizado foi o teste de adesão com o auxílio de fita-cola. Este teste foi realizado duas vezes, em locais distintos da superfície de cada uma das placas impressas e, em todas as vezes em que foi efetuado o teste, o resultado foi sempre o mesmo, sendo este de que a adesão entre a tinta de prata e o substrato de PC é considerada como forte, pois em nenhuma das 10 fitas que foram utilizadas nas 5 placas, existiu qualquer levantamento de tinta do substrato, o que permite concluir que a adesão desta tinta a este substrato é considerada como boa, exatamente como tinha acontecido nos testes com o filme de PEN, permitindo perceber que este substrato de PC pode ser utilizado como substrato deste trabalho sem problemas de adesão. Apesar da Placa 3 se encontrar com a tinta danificada na zona central da placa, foi possível efetuar este teste na placa sem problemas, pois este foi efetuado na zona superior da placa, como é possível observar na Figura 31.

O segundo teste efetuado foi o teste da dobra das placas, em que foi efetuada e avaliada cada dobra de uma placa de cada vez. A Placa 3, pelo motivo de o processo de cura ter provocado a quebra da tinta, não foi sujeita a este teste.

Iniciando-se este teste pela primeira placa impressa, a Placa 1, procedeu-se ao aquecimento da mesma numa zona central com a pistola de ar quente e, após a placa estar

amolecida o suficiente, dobrou-se a placa, sendo que neste caso, a tinta nunca apresentou qualquer fissura, e a placa dobrou-se até ao seu máximo. Na figura seguinte (Figura 36), encontram-se demonstrados o quanto a placa foi dobrada e o estado em que a tinta ficou na dobra, ou seja, sem qualquer falha.



Figura 36: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 1

De seguida, passou-se ao teste de dobra da Placa 2, realizando novamente os mesmos passos, mas neste caso, a placa não foi dobrada completamente, apesar de ter ficado muito perto do seu máximo, sendo que muito perto deste máximo apresentou pequenas fissuras, como se encontra descrito nas duas imagens da figura seguinte (Figura 37).



Figura 37: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 2

Como este teste não foi possível de ser realizado na Placa 3, efetuou-se o teste na placa seguinte, na Placa 4, sendo que nesta, os resultados obtidos foram considerados como os piores dos cinco obtidos, pois o ângulo de dobra efetuado foi ligeiramente superior a 90° , tendo aparecido

ligeiras fissuras quando esta rotação da placa foi obtida, como é possível observar na seguinte figura (Figura 38).



Figura 38: Imagens do resultado do teste de dobra na Placa 4

Por fim, foi utilizada a pistola de ar quente para efetuar a dobra da última placa, a Placa 5, sendo que, novamente, não foi possível dobrar totalmente a placa, pois quando a dobra se aproximou de cerca de 135° de ângulo, a tinta voltou a ceder e a fissurar na zona onde é exercida a força, estando os resultados apresentados na seguinte figura (Figura 39).

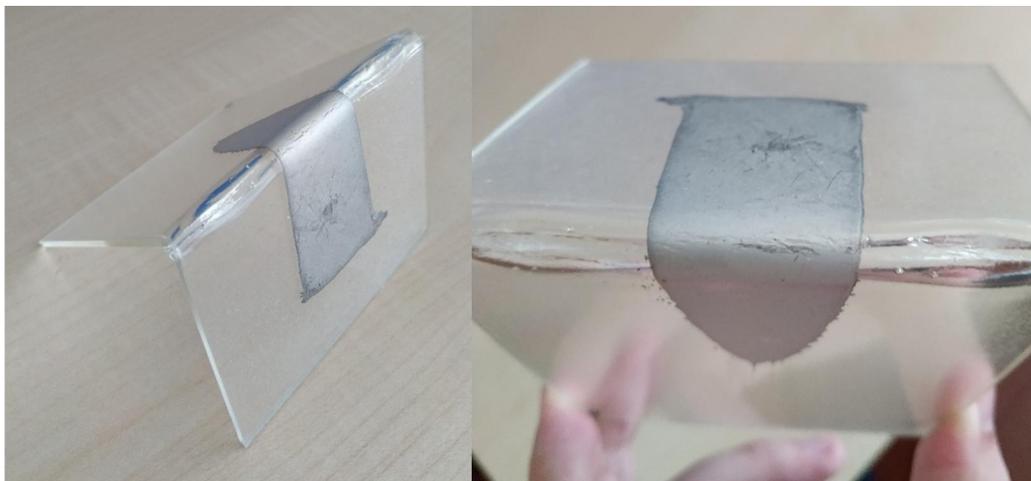


Figura 39: Imagens do resultado do teste da dobra na Placa 5

Com os testes de dobra das placas completos, é possível retirar algumas conclusões dos resultados obtidos. Observando os resultados dos dois primeiros testes, que correspondem às dobras efetuadas nas placas denominadas como Placa 1 e Placa 2, em que, durante o processo de impressão, apenas foi modificada a medida de espessura de tinta utilizada, sendo o tempo e temperatura de cura exatamente os mesmos, conclui-se que os resultados são bastante

semelhantes, pois a dobra imposta foi quase total nos dois testes e apenas na segunda placa foram encontradas pequenas fissuras na zona dobrada. Nas duas restantes placas, os resultados também são muito semelhantes, pois ambos os resultados apresentam pequenas fissuras entre os 90° e os 135° de ângulo de dobra e, novamente, foram utilizados exatamente os mesmos parâmetros para a impressão. Pode-se, então, concluir que a temperatura e o tempo de cura possuem influência nos resultados deste teste, pois estes são muito melhores quando a temperatura de cura é superior e o seu tempo inferior, como nas primeiras duas placas, em que a dobra é quase completa e num deles nem fissuras aparece, ao contrário do que aconteceu quando a temperatura de cura foi inferior e o seu tempo superior.

Apesar desta diferença encontrada nos resultados obtidos, consoante as temperaturas e tempos de cura utilizados, todos os testes efetuados são considerados como aceitáveis, dado que o objetivo deste teste é obter uma percepção quanto à elasticidade e à flexibilidade da tinta, sendo necessário suportar as forças impostas pela técnica de termoformação. Como nesta técnica, as dobras do filme que será utilizado não ultrapassarão ângulos de 90°, todos estes testes realizados ultrapassam sempre este valor, nunca apresentando fissuras antes deste, logo a tinta suportará as forças que serão impostas nos processos seguintes. Estes resultados corroboram os que foram obtidos nos testes anteriores com os substratos de PEN, em que apenas quando o ângulo de dobra do filme ultrapassa os 90°, a tinta apresenta pequenas fissuras.

Por último, foi efetuada a obtenção dos valores de resistência elétrica da tinta impressa nas placas. Apesar deste teste ser o último a ser apresentado, este foi realizado em duas fases distintas durante os testes, como referido no capítulo anterior (Ponto 4.3.). A primeira foi logo após a impressão e cura das cinco placas impressas e a segunda foi após o teste da dobra das placas. Esta situação ocorre devido ao segundo teste efetuado, o teste da dobra, pois ao realizá-lo, este provoca alterações geométricas nas placas, que podem influenciar os valores da característica em teste, sendo este o motivo para a obtenção de dois valores distintos.

Deste modo, após a impressão da tinta e da cura da mesma estar efetuada, foram logo registados os valores da resistência das cinco placas, incluindo o valor da Placa 3, onde a tinta se partiu em duas metades, tendo o valor sido obtido em apenas uma das metades, correspondendo à parte superior da placa. Os valores de resistência elétrica destas placas encontram-se descritos na seguinte tabela (Tabela 8).

Tabela 8: Valores obtidos para a resistência elétrica nas placas de PC impressas antes do teste de dobra

Substratos	Valores de resistência elétrica
Placa 1	0,8832 Ω
Placa 2	0,2064 Ω
Placa 3	0,2694 Ω
Placa 4	0,7434 Ω
Placa 5	1,4596 Ω

Após efetuada a dobra das quatro placas selecionadas para esse teste, foi novamente efetuado o registo dos valores da resistência elétrica, tendo estes sido obtidos exatamente no local onde foi efetuada a dobra, de forma a entender se o esticar da tinta e o afastamento das partículas de prata influenciam o valor da resistência elétrica. Neste caso, não foi efetuado o teste na Placa 3. Estes resultados encontram-se apresentados na seguinte tabela (Tabela 9).

Tabela 9: Valores obtidos para a resistência elétrica nas placas de PC impressas após o teste da dobra

Substratos	Valores de resistência elétrica
Placa 1	0,8231 Ω
Placa 2	0,2261 Ω
Placa 4	0,1939 Ω
Placa 5	0,2431 Ω

Dos resultados obtidos e considerando os resultados que foram obtidos anteriormente, aquando da realização deste teste com os filmes de PEN, é possível retirar certas conclusões acerca dos mesmos.

Numa primeira observação, percebe-se que todos os resultados que foram obtidos, antes e depois da realização da dobra, são todos muito semelhantes, ficando todos na ordem das décimas de ohm (Ω), à exceção do resultado da Placa 5 antes da dobra, em que o valor da resistência elétrica se encontra na ordem das unidades de ohm (Ω), sendo o valor pouco superior a 1. Quando comparados com os dois filmes de PEN que foram impressos com a tinta de prata (Tabela 3), percebe-se que o Filme 7 possui um valor muito semelhante aos valores obtidos nas placas retangulares, na ordem das unidades de ohm (Ω), aproximando-se o seu valor de 1, mas o Filme 3 possui um valor extremamente superior ao que era expectável, sendo o seu valor na ordem dos milhares de megaohm ($M\Omega$), o que permite considerar que existiu algum erro ou na

obtenção do valor da resistência elétrica, ou durante o processo de impressão da tinta e a sua subsequente cura.

Outra possível conclusão a ser retirada deste processo, trata-se da diferença nos valores obtidos na tinta impressa nas placas retangulares antes e após a realização da dobra, verificando o efeito da dobra nestes valores obtidos. Observando os resultados obtidos, separando e comparando as placas segundo os valores utilizados para os parâmetros durante o processo de cura, os resultados são ligeiramente diferentes, ou seja, nas primeiras duas placas, a Placa 1 e a Placa 2, os valores obtidos antes e após a dobra das placas são muito semelhantes, não existindo uma diferença substancial nos valores e nas restantes placas, a Placa 4 e a Placa 5, os valores já apresentam, ainda que ligeiras, diferenças nos valores, tendo os valores registados após da dobra diminuído, quando comparados com os registados antes da dobra.

Terminando a realização dos três testes, é possível selecionar quais dos diversos parâmetros de impressão utilizados são os ideais. Os resultados do primeiro teste, o teste de adesão com o auxílio de fita-cola, não auxiliam na seleção dos parâmetros, pois todos os resultados são exatamente iguais, não permitindo uma distinção entre eles. Já os resultados do segundo são os que melhor auxiliam nesta escolha, pois apresentam diversos resultados diferentes de acordo com os diferentes parâmetros selecionados, sendo que as placas que apresentam melhores resultados são as que possuem uma temperatura e um tempo de cura de 150°C e 15 minutos, respetivamente, sendo que dentro destes parâmetros, a que apresenta melhores resultados, trata-se da placa em que a espessura de tinta impressa tem o valor de 10 micrómetros, sendo a única em que não aparece qualquer tipo de fissura na tinta. O último teste efetuado permite perceber quais os valores de resistência elétrica da tinta impressa e comparar esses resultados, com outros obtidos após a dobra da mesma, sendo que os melhores resultados voltam a ser novamente as placas onde a temperatura e tempo de cura são 150°C e 15 minutos, respetivamente, pois são as placas onde os resultados são praticamente os mesmos, antes e após a dobra.

Desta forma, os parâmetros ideais para o processo de impressão com esta tinta de prata (HPS FG57B) são para o tempo de cura 15 minutos, para a temperatura de cura 150°C e para a espessura de tinta impressa 10 micrómetros.

5.2.1. Cálculo da resistividade elétrica

Iniciando o estudo pelos filmes de PEN, como já tinha sido referido no capítulo 3 (Ponto 3.2.2.2.), foi necessário cortar os filmes de forma a utilizar o auxiliar que se encontra demonstrado na Figura 16, que facilita a obtenção do valor da resistência elétrica através do método de dois pontos. Deste modo, dos filmes impressos com a tinta de prata, foi recortado um pequeno retângulo que continha a tinta impressa, de forma a obter o valor da resistência elétrica, estando os valores dimensionais destes retângulos descritos na seguinte tabela (Tabela 10), que incluem o comprimento e a largura do retângulo e, ainda, a espessura de tinta impressa, pois são todos os dados dimensionais necessários para efetuar o cálculo da resistividade elétrica.

Tabela 10: Dados dimensionais dos filmes de PEN impressos com a tinta de prata

Substratos	Comprimento	Largura	Espessura
Filme 3	29,70 mm	9,43 mm	50 μm
Filme 7	30,31 mm	10,17 mm	50 μm

Com estes últimos dados e com os valores de resistência elétrica recolhidos numa tabela anterior (Tabela 3), obtidos durante os testes nos filmes de PEN, foi utilizada a equação (3), para realizar os cálculos da resistividade elétrica para ambos estes filmes, estando os valores obtidos descritos na seguinte tabela (Tabela 11).

Tabela 11: Valores calculados para a resistividade elétrica dos filmes de PEN

Substratos	Valores para a resistividade elétrica
Filme 3	$1,715 \times 10^{10}$ m Ω .mm
Filme 7	20,7527 m Ω .mm

Com a obtenção destes valores, é necessário efetuar uma comparação destes resultados com valores semelhantes obtidos em bases de dados, em fichas técnicas ou em artigos científicos. Para tal, foram selecionados os valores que são exibidos pela ficha técnica da tinta de prata utilizada, a tinta HPS FG57B, que se encontra nos anexos (Anexo VII), estando estes valores apresentados segundo impressões em que os parâmetros usados, são muito semelhantes aos que são utilizados nesta dissertação, sendo, portanto, os dados ideais para uma comparação, sendo este o motivo pelo qual os valores de resistividade elétrica calculados estarem apresentados com as unidades de m Ω .mm, pois são as mesmas unidades apresentadas na ficha técnica, facilitando a comparação. Os valores registados nas tabelas apresentadas pela ficha técnica da

tinta, encontram-se num intervalo entre 4 e 11 $m\Omega \cdot mm$, sendo que estes resultados foram obtidos considerando uma espessura de 10 micrómetros e uma área superficial de impressão quadrada, o que anula o efeito do comprimento e da largura no cálculo da resistividade elétrica.

Numa primeira avaliação dos valores, é perceptível uma grande diferença nos resultados obtidos entre os dois filmes, assim como já tinha ocorrido aquando do registo dos valores de resistência elétrica, sendo que para o Filme 3, o valor de resistividade é muito elevado, quando comparado com os valores registados na ficha técnica, o que era previsível, devido ao muito elevado valor da resistência elétrica, não existindo mais nenhum valor semelhante a este em todos os testes efetuados, podendo ter ocorrido algum erro na obtenção do valor da resistência elétrica ou mesmo no processo de impressão.

No segundo filme avaliado, o Filme 7, o valor já se encontra mais perto do esperado, apesar de estar ligeiramente superior aos resultados da ficha técnica, podendo-se explicar estas discrepâncias pelas diferenças nos parâmetros seleccionados para a realização da impressão.

De seguida, foi efetuado o estudo dos valores de resistividade elétrica para as placas de PC impressos com a tinta de prata, através dos valores obtidos para a resistência elétrica da tinta nas placas, sendo que foram obtidos dois valores distintos para as mesmas, antes da dobra da placa e após a mesma. Não existindo a possibilidade de cortar estas placas sem as danificar e à tinta impressa, a obtenção da resistência elétrica foi obtida logo na placa, recorrendo-se ao método de dois pontos, através das duas pontas das amarras do multímetro. Desta forma, também o modo de obtenção do comprimento e da largura do filme de tinta foi distinto, tendo sido medidos o comprimento máximo e a largura máxima impressos em cada uma das placas, como se fosse efetuado um retângulo em torno de toda a tinta impressa. Apenas na Placa 3 não foi registado os valores de comprimento e largura à volta de toda a tinta, devido ao facto de esta se ter quebrado a meio durante o processo de cura, tendo sido apenas registado as dimensões numa das metades da impressão, coincidindo com o local onde a resistência elétrica foi registada, a zona superior de tinta impressa. Estes valores encontram-se descritos na seguinte tabela (Tabela 12).

Tabela 12: Dados dimensionais das placas de PC impressas com a tinta de prata

Substratos	Comprimento	Largura	Espessura
Placa 1	125,83 mm	48,73 mm	10 μm
Placa 2	131,7 mm	42,27 mm	20 μm
Placa 3	53,97 mm	32,34 mm	30 μm
Placa 4	123,37 mm	30,57 mm	10 μm
Placa 5	80,56 mm	27,96 mm	5 μm

Como foram registados dois valores distintos de resistência elétrica, um antes do teste de dobra e um após este teste, os cálculos foram efetuados para ambos os resultados, exigindo novamente o uso da equação (3). Para os resultados de resistência elétrica antes do teste de dobra, os valores obtidos encontram-se na seguinte tabela (Tabela 13).

Tabela 13: Valores calculados para a resistividade elétrica das placas de PC antes do teste de dobra

Substratos	Resistividade elétrica
Placa 1	3,4204 m Ω .mm
Placa 2	1,3249 m Ω .mm
Placa 3	4,8429 m Ω .mm
Placa 4	1,8272 m Ω .mm
Placa 5	2,533 m Ω .mm

De seguida, foi efetuado o segundo cálculo substituindo os valores de resistência elétrica anteriormente usados, pelos que foram obtidos após o teste de dobra, sendo que não foi possível realizar o cálculo para a Placa 3, devido à impossibilidade de obtenção do valor necessário, por causa do dano que a tinta sofreu durante o processo de cura, estando apresentados na tabela seguinte (Tabela 14), os valores de resistividade elétrica para as restantes placas.

Tabela 14: Valores calculados para a resistividade elétrica das placas de PC após o teste de dobra

Substratos	Resistividade elétrica
Placa 1	3,1876 m Ω .mm
Placa 2	1,4514 m Ω .mm
Placa 4	0,4805 m Ω .mm
Placa 5	0,4219 m Ω .mm

Efetuada novamente uma comparação com os valores que estão descritos na ficha técnica da tinta usada (Anexo VII), percebe-se que os registos obtidos para as placas de PC encontram-se mais próximos dos assinalados na ficha, sendo que um dos valores, o da Placa 3 sem efetuar o teste de dobra, se encontra dentro do intervalo dos valores da ficha, que se encontram entre 4 e 11 $m\Omega.mm$. Todos os restantes valores, tanto os obtidos antes, como os depois da dobra, se encontram abaixo deste intervalo, apesar de alguns estarem muito próximos deste intervalo, enquanto que os restantes se distanciam, apresentando-se nas ordens das décimas das grandezas utilizadas ($m\Omega.mm$).

Assim como aconteceu com os filmes de PEN, dos resultados obtidos para as placas de PC também é possível avaliá-los e retirar algumas conclusões. Separando as placas de acordo com os diferentes parâmetros usados durante o processo de cura, percebe-se que os resultados obtidos são distintos de acordo com estas diferenças. Para as primeiras placas impressas, a Placa 1 e a Placa 2, avaliando os dois resultados obtidos, tanto antes, como depois da dobra, os valores são muito semelhantes, sendo que para a Placa 1 o valor após a dobra diminui muito ligeiramente, enquanto que para a Placa 2, o segundo valor calculado aumenta também muito ligeiramente. Avaliando as duas últimas placas, a Placa 4 e a Placa 5, a diferença entre os valores é mais significativa, sendo que em ambas as placas os valores passam das unidades para a grandeza selecionada, para as décimas da mesma grandeza. Por fim, a Placa 3 não possui um segundo valor, mas trata-se da placa que apresenta o maior valor para a resistividade elétrica, podendo explicar-se este valor devido às dimensões utilizadas no cálculo serem relativamente mais pequenas do que nas restantes placas.

Desta forma, é perceptível que para os valores selecionados para a cura de 150°C e 15 minutos, os valores de resistividade elétrica são quase os mesmos, independente da dobra das placas, não existindo qualquer influência de qualquer parâmetro utilizado no valor final. O mesmo não acontece nas placas curadas com os parâmetros de 100°C e 30 minutos, em que os valores diminuem após a dobra das placas. Uma possível explicação para este acontecimento pode-se dever ao facto de a temperatura utilizada na segunda fase de testes (100°C), não ser elevada o suficiente, pois também no teste de dobra a tinta apresentou resultados inferiores às restantes placas, começando a quebrar muito mais cedo, permitindo concluir que a temperatura de 100°C não é a ideal para obter os melhores resultados no produto final.

Por fim, falta efetuar uma comparação dos resultados da resistividade elétrica entre os dois materiais utilizados como substrato para efetuar a impressão da tinta de prata, os filmes de

PEN e as placas de PC. Não considerando o Filme 3, que possui um valor que não se enquadra nos valores previstos para a resistividade elétrica da tinta, todos os restantes valores se enquadram no esperado, mas estes são diferentes entre eles, pois o valor obtido para o filme é algo superior a todos os valores obtidos para as placas, sendo isto explicado pela diferença nas dimensões utilizadas para os cálculos da resistividade elétrica, pois no filme a largura e o comprimento são muito mais pequenos e os seus valores estão muito mais aproximados um do outro, ao contrário do que acontece com a tinta nas placas em que a diferença nos valores da largura e do comprimento são maiores, apresentando uma maior influência no resultado final da resistividade elétrica, explicando a diferença nos valores entre o Filme 7 e todas as placas.

Considerando que os valores da resistividade elétrica obtidos são os esperados e após a realização de todos os restantes testes nesta tinta sobre o substrato escolhido para todo o processo, conclui-se que é possível efetuar o processo de impressão através da técnica de serigrafia com este substrato de PC e a tinta de prata selecionada, pois esta encontra-se em boas condições quanto às suas características físicas e elétricas, neste material.

5.3. Processos realizados com a máquina de corte e gravação a laser

A fase seguinte desta dissertação focou-se na utilização da máquina de corte e gravação a laser para a produção de uma máscara a partir dos filmes de PEN e da produção de gravuras nas placas de PC, sendo que em ambos é cortada e gravada a estrutura que foi selecionada anteriormente (Figura 32).

Iniciando o estudo pela produção de uma máscara nos filmes de PEN, foi necessário cortar um pouco de filme, como tinha sido referido anteriormente (Ponto 4.4.), devido às poucas quantidades de filme disponíveis para os testes, tendo sido apenas cortado um filme com dimensões que suportem o corte do desenho do sensor de pequenas dimensões, da figura referida no parágrafo anterior.

Com o filme cortado, procedeu-se ao corte do filme com o equipamento de laser, com os parâmetros de 200 mm/s para a velocidade e 20 W para a potência, tendo o processo demorado cerca de 1 minuto. O resultado desta experiência encontra-se demonstrado na seguinte figura (Figura 40).

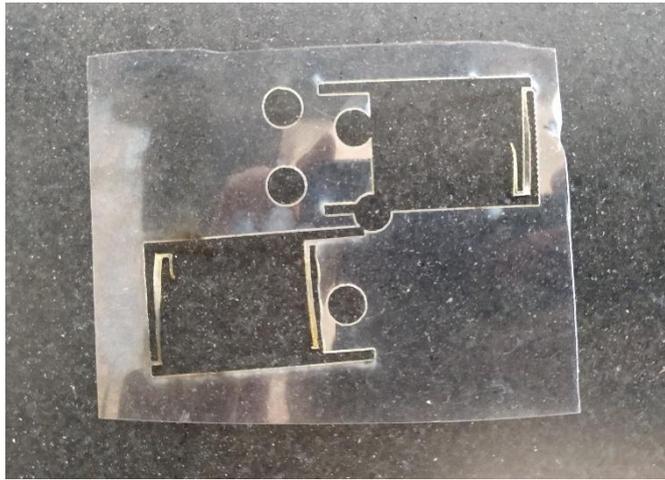


Figura 40: Imagem representativa do resultado do corte no filme de PEN

O primeiro teste realizado com o filme, trata-se do sensor que encontra demonstrado no canto superior direito da figura anterior, não tendo sido a experiência bem-sucedida. Como é possível observar, percebe-se que as estruturas que deveriam estar no interior do design foram danificadas ao efetuar o processo, não se encontrando na imagem, e isso deve-se principalmente ao facto de a espessura do filme ser muito reduzida, pois durante o processo ocorrem a queda das estruturas interiores, devido à intensidade do laser incidido no material e, principalmente, ao ar frio que é utilizado pelo aparelho para arrefecer o material, incidindo sobre o mesmo enquanto o laser está a ser aplicado, que acaba por arrancar as estruturas fragilizadas do filme.

Devido a este problema encontrado durante o primeiro teste e para evitar que este ocorra novamente, foi efetuada uma segunda experiência no mesmo filme, devido à ainda existência de espaço e foi decidido desligar o ar frio que a máquina utiliza para o arrefecimento do material, com o objetivo de perceber se, sem o ar disparado, as estruturas interiores do desenho no filme não são arrancadas. O resultado deste segundo teste encontra-se demonstrado no canto inferior esquerdo da Figura 40.

Apesar de apresentar mais uma estrutura do que no primeiro teste, o resultado acaba por ser o mesmo, pois a maioria das estruturas interiores caíram durante a produção da máscara, inviabilizando novamente a sua utilização, mesmo com o ar frio desligado, concluindo que a queda não se deve à intensidade do ar disparado sobre o filme, mas sim à intensidade do laser em conjunto com a pequena espessura do filme. Esta última característica faz com que o filme não possua capacidade de suportar umas estruturas tão pequenas, permitindo perceber que o design escolhido, com uma espessura tão reduzida, não é o ideal para este processo.

De forma a verificar esta última avaliação efetuada, foi efetuado apenas um mais último teste no mesmo filme de PEN, mas o desenho a efetuar no filme com o laser foi alterado, tendo sido inserido no sistema da máquina um pequeno círculo de 5 mm, com o objetivo de observar o efeito do laser no material utilizado. Então, foram efetuados os cortes de 5 círculos na zona central do filme, como é possível verificar na Figura 40.

Os resultados obtidos são exatamente os esperados, em que não ocorre nenhum defeito no filme com este desenho dos círculos, comprovando o que tinha sido concluído num dos parágrafos anteriores, ou seja, o facto de a espessura do filme ser tão reduzida, impossibilita a produção de uma máscara com qualquer um destes desenhos, devido ao facto do design destes possuir dimensões muito reduzidas, provocando a destruição de algumas partes destas estruturas.

Após as experiências efetuadas com a realização da máscara num filme de PEN, foi também equacionada a criação de uma máscara a partir das placas de PC injetadas, de forma a não desistir por completo da tecnologia de corte através do laser, mas o PC trata-se de um dos materiais que possuem incompatibilidade com esta técnica, sendo que este apresenta zonas queimadas quando o laser incide no material. Devido à elevada espessura das placas e também à incompatibilidade com a tecnologia, não é viável tentar efetuar uma máscara com uma destas placas, tendo sido descartada esta hipótese.

Desta forma, seguiu-se para o segundo processo selecionado a efetuar com o equipamento de laser, a gravura das placas de PC. Para tal, o desenho que foi selecionado para efetuar o processo, foi exatamente o mesmo do processo anterior, com o objetivo de gravar esta estrutura numa placa e, de seguida, preencher a mesma com a tinta de prata selecionada, testando um formato diferente para a realização de um sensor, avaliando o seu comportamento para a produção de um componente funcional.

Deu-se, então, início ao processo de gravura numa primeira placa, sendo que os parâmetros que foram utilizados durante este primeiro processo foram os mesmos que foram usados com o filme de PEN, ou seja, uma velocidade de 200 mm/s e uma potência de 20 W, tendo o teste demorado cerca de 33 minutos. O resultado desta primeira experiência encontra-se demonstrado na seguinte figura (Figura 41).

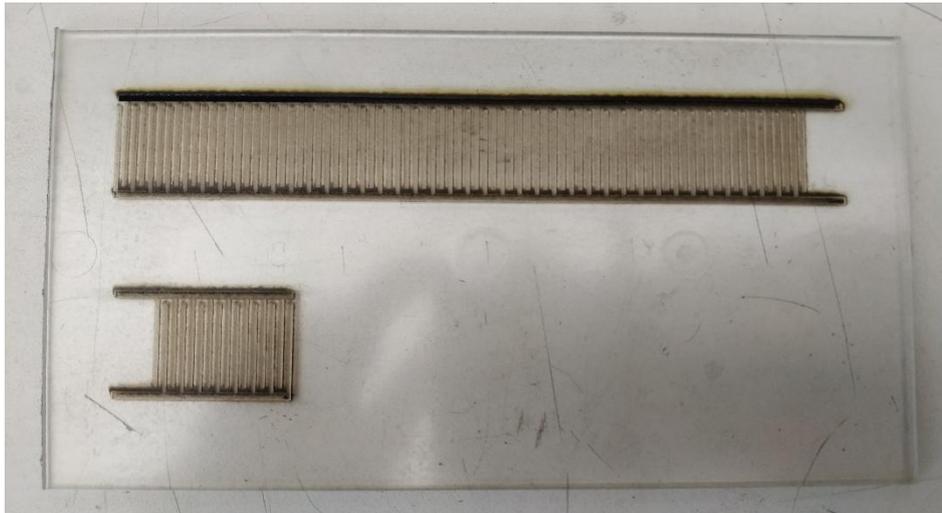


Figura 41: Imagem representativa do resultado do primeiro teste de gravura numa placa de PC

Como é possível verificar pela observação da imagem anterior, percebe-se que as estruturas que foram criadas na placa apresentam algumas zonas negras, principalmente onde as estruturas possuem uma espessura maior, pois é o local onde o laser incide durante mais tempo. Como o PC não se trata de um material muito compatível com a tecnologia usada, acaba por queimar nas zonas onde o laser incide com mais frequência, que correspondem a estas zonas negras apresentadas na Figura 41. Apesar destas zonas queimadas, o primeiro teste foi bem-sucedido, considerando que o objetivo se tratava de realizar uma gravura no material, mas a profundidade que foi conseguida com os parâmetros selecionados foi muito reduzida, sendo necessário tentar aumentar esta profundidade. Para tal, foi efetuado um segundo teste, em que foram aumentados os valores das condições do processo, de forma a tentar aumentar a profundidade, tendo sido usada uma velocidade de 230 mm/s e uma potência de 30 W, sendo que a experiência teve um tempo de duração de 31 minutos, sendo um pouco mais rápido do que o teste anterior. O resultado deste segundo teste está apresentado na seguinte figura (Figura 42).



Figura 42: Imagem representativa do resultado do segundo teste de gravura numa placa de PC

O segundo teste efetuado apresenta piores resultados do que o primeiro, em termos de nível de zonas queimadas, pois é visível na Figura 42, que praticamente todas as zonas da estrutura gravada possuem marcas negras, sendo que também surgem na zona superficial da placa, em volta da área gravada, ainda que muito ligeiramente. Estes defeitos são mais intensos do que na primeira experiência e isto deve-se ao aumento da potência do laser que incide no material, mas, como era esperado, a profundidade resultante neste teste é superior à obtida anteriormente, sendo também o aumento da potência a justificação para este aumento, cumprindo o objetivo predefinido no final do teste anterior.

O problema que se apresenta com este segundo teste é a incompatibilidade que o aumento da intensidade da potência do laser proporciona, pois tanto provoca o aumento da profundidade da gravura gerada, como também aumenta o nível de zonas queimadas na placa de PC, sendo necessário decidir qual é o aspeto mais importante a considerar para o produto em causa. Deste modo, como a intenção da gravura é a de ser preenchida com tinta e, com isto tapando a maior parte das zonas queimadas com tinta, é mais importante que a profundidade seja o maior possível, de forma a que o preenchimento seja também o melhor possível, tendo sido realizado mais um teste, em que foi aumentada, mais uma vez, a potência do laser, sendo o seu valor de 40 W, tendo sido utilizada a mesma velocidade, 230 mm/s, tendo durado exatamente o mesmo tempo do teste anterior, cerca de 31 minutos. O seu resultado está representado na seguinte figura (Figura 43).

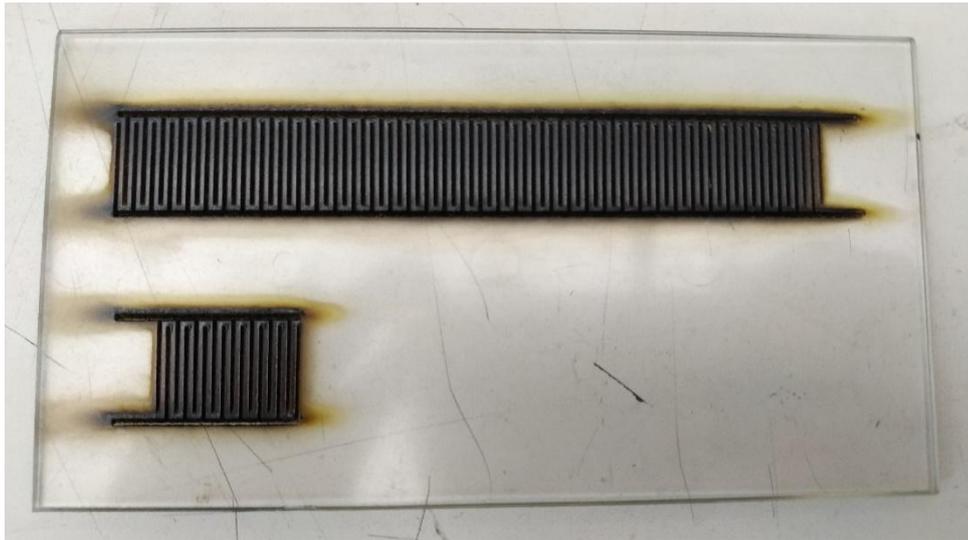


Figura 43: Imagem representativa do resultado do último teste de gravura numa placa de PC

Como era expectável, neste último teste efetuado, devido ao novo aumento da potência do laser, foi quando as zonas queimadas foram as mais intensas, verificando-se mesmo um acentuar das marcas de queimaduras à volta da zona onde o laser incidiu para criar a gravura, para além do aumento de zonas negras que se verifica nos canais gravados. Já quanto à profundidade, esta placa foi também a que obteve melhores resultados para esta característica, pois é nesta placa que o seu valor é o mais elevado, sendo novamente explicado pelo aumento da potência do laser. Com esta última placa, percebe-se que este valor da potência do laser utilizado é demasiado elevado para o material utilizado, pois apesar de ser o melhor resultado da profundidade de todos os testes efetuados, os danos que surgem com o procedimento não se cingem apenas no local onde o laser incide, provocando as zonas negras nos canais que são gravados, assim como nas zonas que a circundam, danificando a superfície da placa onde não é suposto existir qualquer alteração.

5.3.1. Observação microscópica efetuada aos resultados obtidos na gravação das placas de PC

Dando por terminado o processo de gravação das placas de PC, foi necessário efetuar uma pequena avaliação dos resultados, quanto à profundidade das estruturas gravadas e também quanto aos danos de queimadura apresentados nas mesmas. Para tal, foi utilizada uma lupa estereoscópica e um microscópio de reflexão, com a intenção de proceder a esta avaliação.

Iniciando as observações pela primeira placa efetuada (Figura 41), foi utilizada em primeiro lugar a lupa estereoscópica, tendo sido utilizada uma objetiva de 4X para efetuar a avaliação. Foi retirada uma fotografia da imagem que foi visualizada com a lupa, estando esta identificada como a figura (Figura 44).

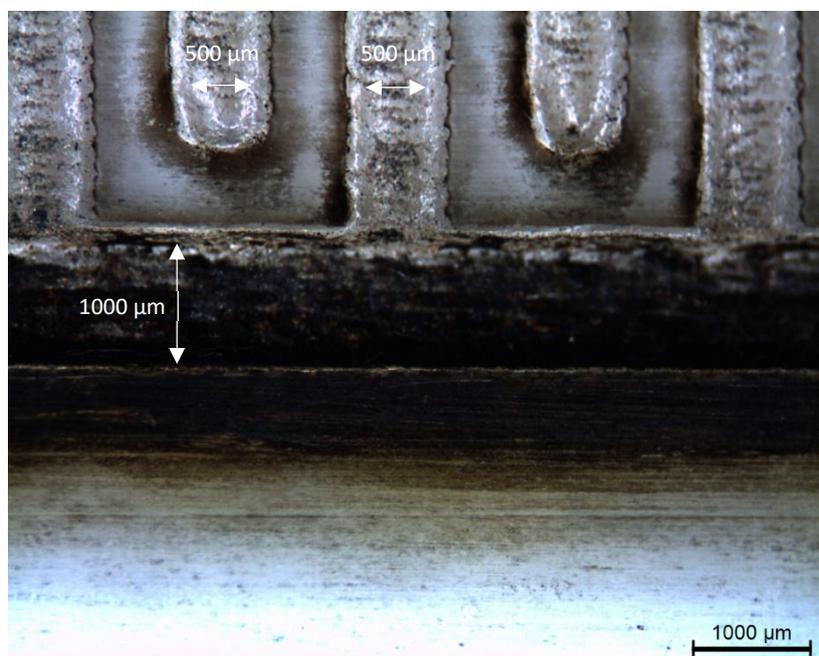


Figura 44: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a primeira placa de PC gravada

Da imagem anterior, é possível efetuar algumas conclusões sobre o efeito da tecnologia usada nestas placas de PC. A primeira conclusão, corresponde à profundidade dos canais gravadas e as suas diferenças. Na zona inferior da imagem, onde a largura dos canais é superior (corresponde ao canal com a largura de 1000 μm), a imagem é mais escura e mais desfocada do que nos restantes canais que foram efetuados (canais com largura de 500 μm), o que permite concluir que na zona onde o canal é mais escuro, a profundidade do canal é superior às restantes, o que seria de esperar, pois com a largura superior, o laser incide durante mais tempo nesta zona, provocando uma espessura maior. Apesar de esta diferença ser esperada, apresenta um problema com esta técnica de impressão, pois implica que a tinta que ocupará estes canais não será nivelada, existindo locais onde a quantidade de tinta será superior às restantes, causando diferenças na condutividade e resistividade que será esperada ao longo do sensor criado.

Outro problema que surge ao observar as imagens, foca-se na largura dos canais que foram obtidos. Na imagem anterior, encontram-se representadas três diferentes setas, e estas representam o tamanho que as estruturas, que estas estão a sobrepor, deveriam possuir. Como é possível observar, nenhuma das estruturas obtidas possuem o tamanho que estava inicialmente

programado, sendo que o dano nos canais é substancialmente superior nos canais de tamanho inferior ($500\ \mu\text{m}$), fazendo com que a distância entre os canais de pequenas dimensões não seja a esperada, mas sim muito mais reduzida, o que possui influência nas características elétricas esperadas para este sensor. A diferença de largura no canal de $1000\ \mu\text{m}$, apesar de ser muito mais reduzida, não possui tanta influência nas propriedades elétricas do sensor, não sendo considerada com um problema durante o processo.

De seguida, e ainda para a mesma placa, foi utilizado o microscópio de reflexão, com uma objetiva de 10X, onde foram obtidas duas imagens distintas. Na primeira imagem, encontra-se representado um dos canais gravados de pequenas dimensões, estando o foco neste canal, e as duas paredes que o ligam à superfície da placa e, na segunda imagem, está demonstrada uma das zonas superficiais que se encontrava demonstrada na figura anterior (Figura 44), estando focada nesta zona, e demonstrando os dois canais efetuados adjacentes. Estas imagens estão representadas na seguinte figura (Figura 45).

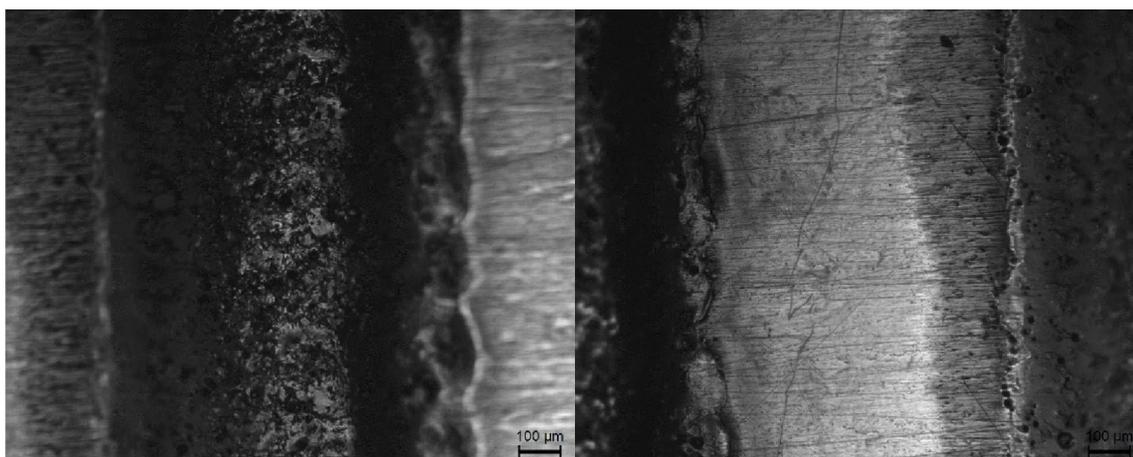


Figura 45: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a primeira placa de PC gravada

Estas duas imagens permitem fazer uma avaliação dos danos provocados pelo laser ao efetuar a gravura dos canais. A partir da Figura 45, percebe-se o efeito do laser, pois a partir da imagem do lado esquerdo, cujo foco se encontra num dos canais que foram gravados e que possui o máximo de profundidade possível, percebe-se que a largura desta zona é bastante mais reduzida do que estava previsto, sendo que as paredes deste canal se encontram num formato curvo, ao contrário do esperado pelo desenho que foi introduzido no sistema do equipamento, sendo esta uma limitação da técnica utilizada.

Outro aspeto observado a partir destas imagens, foca-se novamente nas paredes do canal, pois a parede do lado esquerdo possui uma geometria bastante distinta da do lado direito, estando

a última com uma geometria bastante danificada pelo efeito do laser, sendo o motivo para esta diferença uma provável maior incidência do laser neste local.

Por fim, é perceptível que a superfície da placa onde o laser não incidiu, não possui qualquer vestígio de danos, permitindo concluir que para a intensidade de potência selecionada, nas zonas circundantes da gravura efetuada não surgem defeitos na superfície do material.

O passo seguinte foi repetir os mesmos passos efetuados, mas para a segunda placa gravada (Figura 42), iniciando-se a avaliação, novamente, pela lupa estereoscópica com a objetiva de 4X. O resultado desta observação encontra-se representado na seguinte imagem (Figura 46).

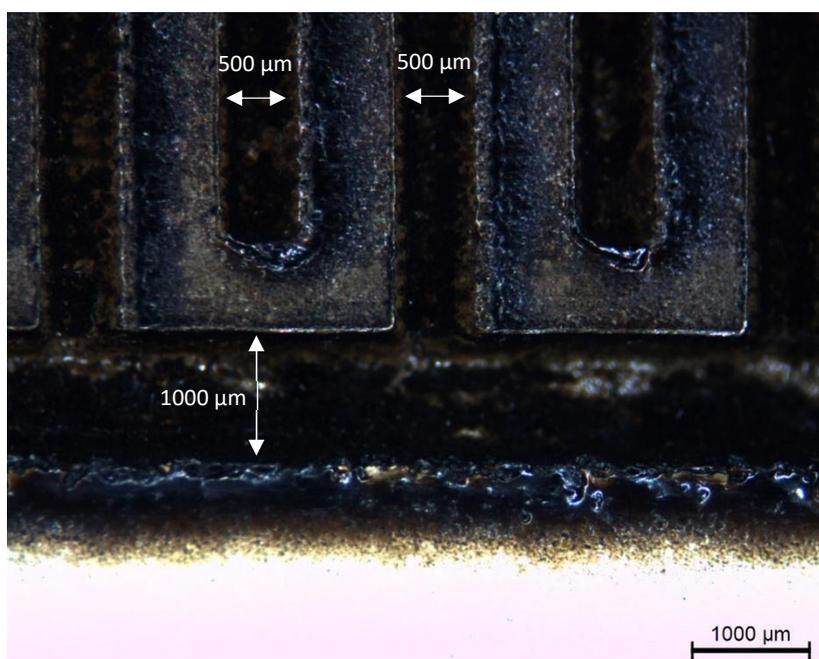


Figura 46: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a segunda placa de PC gravada

Os resultados observados a partir desta imagem, permitem perceber que as alterações promovidas nos parâmetros utilizados entre os dois primeiros testes, surtiram efeitos positivos no segundo, pois a partir das linhas que foram colocadas por cima das estruturas que foram gravadas, com as medidas que correspondem ao tamanho expectável destas, é perceptível que a largura das estruturas nesta placa estão mais próximas do desenho original, quando comparadas com a primeira placa, pois os canais efetuados estão apenas um pouco maiores do que o desenho original, sendo uma grande alteração dos resultados obtidos anteriormente, principalmente na zona das estruturas com uma largura de 500 μm. A razão para esta melhoria está relacionada com a alteração dos parâmetros para a realização desta experiência, principalmente com o aumento da velocidade de movimento do laser de 200 mm/s para 230 mm/s, pois o laser não

incide durante tanto tempo num só local, fornecendo uma maior precisão na formação das estruturas. O mesmo não se pode dizer quanto à influência do aumento da potência do laser usada de 20W para 30 W, pois é perceptível que as zonas com cor escura aumentaram consideravelmente em toda a imagem, quando comparadas com a placa anterior, sendo estas explicadas pelo aumento desta potência que provoca uma maior zona de queimadura onde o laser foi incidido e nas zonas envolventes.

Outro aspeto ainda observado nesta imagem, trata-se da diferença entre a profundidade obtida nos diferentes canais efetuados. Os resultados obtidos nesta segunda placa não diferem dos obtidos na primeira placa, pois é perceptível uma diferença de profundidade entre as zonas em que a largura é de 500 μm e em que é de 1000 μm , sendo esta diferença explicada pelo tempo em que as zonas estão sob a aplicação do laser, porque a zona de 1000 μm , por ser maior, leva mais tempo para ser gravada.

De seguida, foi utilizado o microscópio de reflexão, nesta mesma placa, de forma a avaliar, com uma maior resolução, os canais obtidos pela utilização do laser, sendo usada uma objetiva de 10X. Foram novamente obtidas duas imagens, mas não foi possível observar zonas semelhantes à primeira placa, devido ao nível de queimadura da placa, estando representado na primeira imagem a superfície da placa na zona final de um dos canais gravados com largura de 500 μm e na segunda, também a zona superficial, mas na parede superior da zona com largura de 1000 μm . Estas imagens estão representadas na figura seguinte (Figura 47).

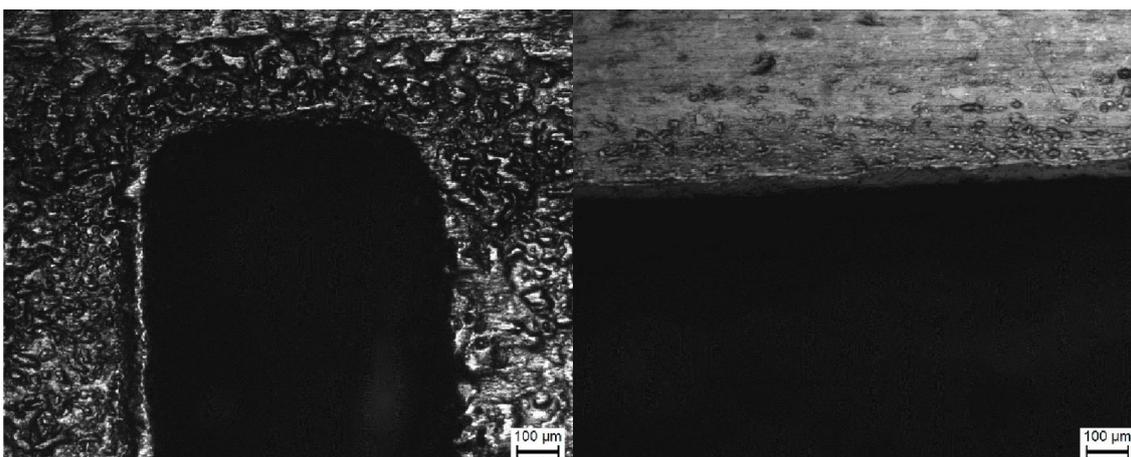


Figura 47: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a segunda placa de PC gravada

A partir da imagem à esquerda, no qual o foco se encontra na superfície da placa, é possível entender quais os danos que o laser provoca nesta zona, no término de um dos canais efetuados e, como já tinha acontecido na placa anterior, as paredes da estrutura gravada possuem

geometrias distintas, pois a parte esquerda é muito mais linear do que a parede direita, provavelmente devido a incidência do laser durante mais tempo na parte direita. Nesta imagem, ao contrário do que tinha acontecido com a primeira placa, não é possível obter uma percepção do estado da profundidade do canal, pois este encontra-se muito queimado, não sendo possível obter uma imagem clara dessa zona. Por fim, a superfície desta placa encontra-se em bastante pior estado do que a primeira, concluindo-se que para esta intensidade de potência do laser, a superfície sofre muito mais danos do que com a potência selecionada anteriormente.

A imagem do lado direito da figura, permite concluir que nem todas as zonas foram completamente queimadas pelo laser, sendo que nesta parede superior do canal de maior largura, na zona da superfície, não existem quaisquer danos. Também como tinha acontecido na outra imagem, não é possível obter uma visão da zona mais profunda, sendo o motivo também o mesmo, ou seja, a estrutura gravada apresenta-se muito queimada, não permitindo uma imagem clara.

Por fim, foram utilizados os aparelhos uma última vez para a restante placa gravada (Figura 43), de forma a realizar as conclusões finais desta tecnologia, antes de seguir para a fase da impressão, sendo usada em primeiro lugar, novamente, a lupa estereoscópica com a objetiva de 4X, tendo sido obtida uma imagem desta observação, estando esta demonstrada na seguinte figura (Figura 48).

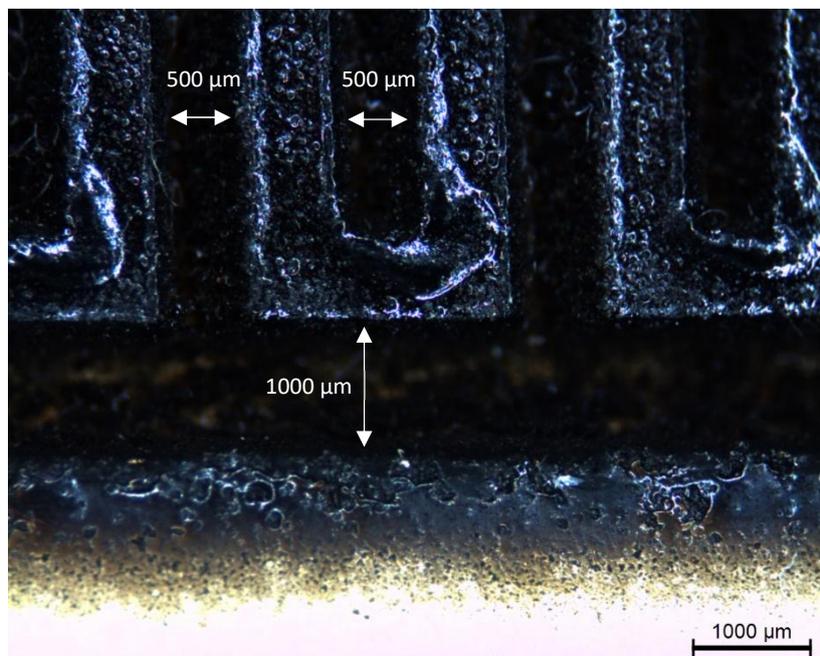


Figura 48: Imagem obtida a partir da lupa estereoscópica, para a última placa de PC gravada

A primeira percepção clara que é obtida pela observação da imagem trata-se do estado em que esta se encontra, pois tanto a superfície, como as estruturas que foram efetuadas, se encontram completamente queimadas, sendo esta a placa que apresenta os piores resultados quanto a este defeito. Este, deve-se ao facto de a potência do laser ter sido novamente aumentada durante a produção desta gravura, de 30 W para 40 W, o que causou que a placa ficasse totalmente queimada nos canais produzidos e na superfície envolvente.

Outro defeito que também piorou com o aumento da potência do laser foi o aumento da largura dos canais gravados, tanto para 500 μm , como para 1000 μm . Quando comparados com os outros resultados, é perceptível que estes valores para a largura são piores do que no segundo teste, onde a velocidade de movimento do laser foi a mesma, sendo aumentada apenas a potência, mas são melhores do que os resultados para a primeira placa, onde tanto a velocidade, como a potência do laser, são menores do que neste último.

Por último, e apesar de as zonas queimadas serem mais evidentes do que no teste anterior, é possível obter uma percepção da diferença de profundidade expectável entre as diferentes larguras dos canais efetuados, provavelmente devido à imagem ser mais escura, o que permite exibir uma melhor qualidade da imagem, que possibilita a visualização desta descontinuidade entre os canais. Esta, é explicada pelo tempo de incidência do laser ser distinto durante a execução de ambas as estruturas.

Seguindo o que foi efetuado anteriormente, o passo seguinte trata-se da utilização do microscópio de reflexão com a objetiva de 10X por uma última vez, de forma a avaliar a última placa e efetuar uma comparação final de todo o processo de gravura por laser, tendo sido obtidas duas imagens de zonas distintas desta placa, semelhantes às que foram obtidas para a placa anterior, ou seja, na primeira imagem está representada a zona superficial de um dos canais produzidos com 500 μm , de forma a avaliar os danos que o laser provocou nesta zona e na segunda imagem, também se encontra demonstrado o resultado do laser na zona superficial, com a mesma intenção da anterior, mas na parede inferior de um dos canais de 1000 μm . Estas imagens estão representadas na seguinte figura (Figura 49).

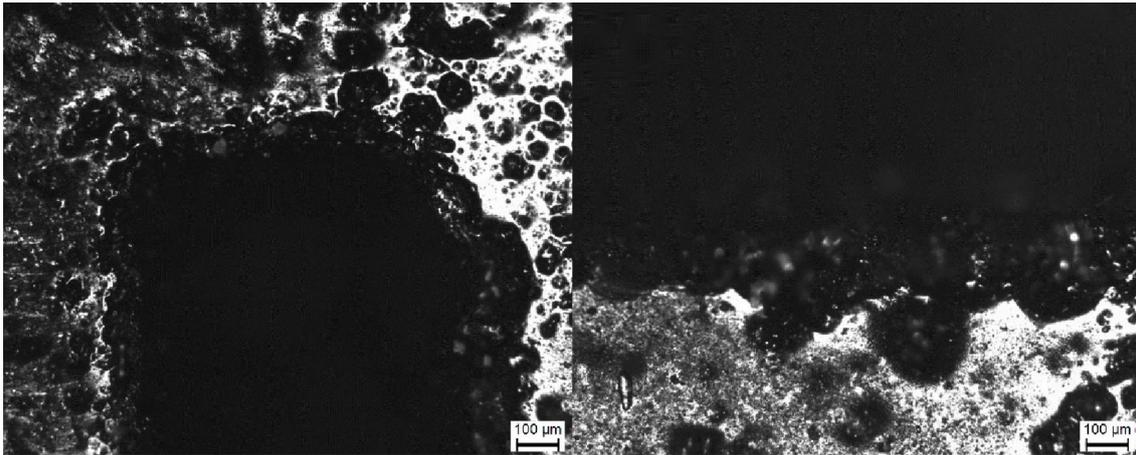


Figura 49: Imagem obtida a partir do microscópio de reflexão, para a última placa de PC gravada

A partir da primeira imagem, é perceptível o nível do extenso dano que o novo aumento da potência provocou na superfície da placa, nas zonas envolventes da local do término do canal de 500 µm efetuado, existindo mesmo pequenos círculos negros a toda a volta da estrutura gravada, que são zonas de material queimado e degradado. Também é observado que as paredes da estrutura se encontram em muito mau estado, sendo confirmado, mais uma vez, que a parede do lado direito é a que apresenta maiores defeitos, sendo a sua geometria muito irregular. O motivo para esta irregularidade volta a ser a incidência do laser do lado direito do canal durante a gravação. Não foi possível, novamente, efetuar uma avaliação da profundidade do canal produzido, devido a essa zona estar muito queimada, não sendo possível obter uma imagem clara do local em questão. Quando é efetuada uma comparação com as outras placas testadas, esta última é claramente a que apresenta piores resultados quanto ao estado da superfície da placa na zona envolvente da gravura e ainda na geometria do canal gravado.

A segunda imagem da figura anterior, foca-se na zona inferior do canal de 1000 µm, com a intenção de demonstrar que o nível de dano do laser no material ainda é maior nesta zona, pois a parede encontra-se muito danificada, não possuindo uma geometria uniforme e os círculos negros, que também são observados nesta imagem, são bastante maiores, sendo a explicação para o sucedido exatamente o mesmo da imagem anterior, pois é durante a produção desta estrutura de maior largura, que o laser incide durante mais tempo, e com a potência selecionada, o material usado não suporta a incidência durante tanto tempo e começa a queimar e degradar. Também nesta imagem, não é possível obter uma percepção quanto à profundidade do canal e do seu estado.

De forma a dar por terminada a utilização da lupa estereoscópica e do microscópio de reflexão, é necessário realizar uma avaliação de todas as imagens obtidas para as três placas e

retirar conclusões sobre a utilização da técnica de impressão por gravura a partir de um equipamento de corte e gravura por laser.

Iniciando a avaliação pelo aumento da potência do laser ao longo dos três testes (de 20 W para 30 W e ainda para 40 W), existem tanto resultados melhores, como piores, dependendo da característica sobre o qual se está a realizar a avaliação. Assim, com estes sucessivos aumentos de potência, existe uma melhoria no nível de profundidade obtida nos canais efetuados, ainda que esta não seja completamente visível em algumas das imagens obtidas. No entanto, quando estão em foco os danos que surgem durante a realização da gravura, existe um progressivo aumentar das zonas queimadas com a diferença no nível da potência usada, principalmente na zona superficial que envolve os canais que são produzidos, surgindo pequenas esferas escuras nestas zonas nos últimos testes, que são locais onde o material queimou por completo, sendo que com este nível de danos, o processo de impressão fica implicado por estes defeitos. Os danos são ainda verificados para as paredes dos canais, sendo que apenas se verifica um piorar dos resultados na última placa, implicando a geometria destas estruturas.

De seguida, verificou-se o efeito do aumento de velocidade de movimento do laser (de 200 mm/s para 230mm/s), sendo de destacar que esta alteração trouxe benefícios para o processo, pois observando as duas primeiras placas, que foi quando foi efetuada o único aumento da velocidade, foi perceptível uma considerável melhoria na largura das estruturas efetuadas, pois na primeira placa a largura dos canais era muito superior ao que era suposto e com o aumento da velocidade, as estruturas ficaram muito mais próximas da largura esperada, existindo uma melhor precisão na produção destes canais. Apesar desta melhoria, na última placa gravada como a velocidade não foi alterada, mantendo-se o aumento da velocidade e adicionando-se um novo valor para a potência do laser, os resultados voltaram a piorar quanto à largura dos canais, sendo que o dano nas paredes dos canais, devido à elevada potência, provocou o aumento dos valores da largura para valores semelhantes à da primeira placa gravada, anulando por completo o progresso conseguido com o aumentar da velocidade de movimento do laser.

Para concluir, a segunda placa produzida foi a placa que apresentou o melhor resultado, quando se tem em conta as estruturas que foram gravadas e a geometria que era pretendida no início da realização deste teste, permitindo perceber que o aumento da velocidade de movimento do laser foi bastante benéfico para a precisão da geometria nas estruturas e para ficar a perceber o comportamento deste parâmetro durante o processo.

A primeira placa é a que apresenta melhores resultados quanto ao estado da zona superficial, pois é a que possui menores danos devido à queima do material por causa da incidência do laser, permitindo concluir que com o valor de potência do laser mais baixo de entre todos os testes, a placa possui muito poucos danos na superfície da placa, sendo este valor ideal para a realização da gravura.

Por fim, ficou apenas por testar a combinação dos melhores resultados obtidos nos três testes anteriores, ou seja, realizar uma gravura numa placa em que a potência do laser consiste em 20 W e a velocidade de movimento do laser possui um valor de 230 mm/s. Esta apenas não foi efetuada devido à baixa profundidade expectável dos canais a efetuar, não auxiliando o processo de impressão que se segue.

5.3.2. Impressão efetuada nas placas de PC gravadas e obtenção do valor da resistência elétrica

Antes de proceder ao início da impressão, e devido ao mau estado em que se encontram as placas gravadas, devido às zonas queimadas, foi necessário realizar uma limpeza das mesmas, de forma a tentar retirar ao máximo o excesso de material queimado que se encontra tanto na superfície da placa, como nas estruturas gravadas.

Na primeira placa foi utilizada acetona para a tentar limpar, mas este líquido não deve ser utilizado no policarbonato, pois estes entram em reação, danificando o material, que foi o resultado obtido, pois quando a acetona, por descuido, foi usada para limpar o sensor de tamanho reduzido da primeira placa, a estrutura ficou completamente danificada, sendo possível observar este defeito na Figura 50. Na estrutura restante desta placa e nas estruturas das restantes placas, foi utilizada água para tentar reduzir o excedente de material queimado nas estruturas e nas superfícies circundantes, tendo sido conseguida uma ligeira redução da zona escura nas placas.

Com a limpeza efetuada, procedeu-se à impressão de cada uma das três placas com a tinta de prata com o *Doctor Blade*. Para efetuar este processo, foi necessário escolher previamente, quais os parâmetros a serem utilizados durante o mesmo, sendo que, como foi referido no capítulo anterior (Ponto 4.2.2.), a espessura escolhida no auxiliar de impressão não se trata de um valor a ter em conta durante a impressão, visto que o objetivo se foca no preenchimento dos canais gravados, sendo o valor utilizado de zero micrómetros. Os parâmetros para o processo de cura,

foram selecionados exatamente os mesmos que foram escolhidos como os ideais para esta técnica, sendo estes de 150°C para a temperatura da cura e 15 minutos para o tempo da mesma. Os resultados para a primeira imagem encontra-se demonstrado na seguinte figura (Figura 50).

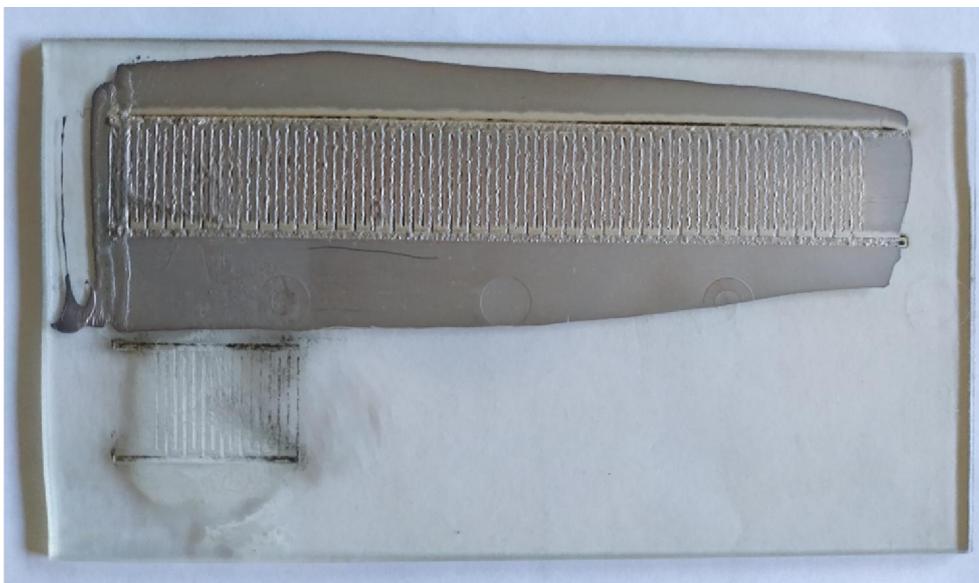


Figura 50: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na primeira placa de PC gravada

Pela observação da imagem anterior, percebe-se facilmente que a impressão não foi bem efetuada, pois apesar de os canais possuírem tinta impressa, também a superfície da placa em volta dos canais possui uma camada de tinta, o que não deveria ocorrer, pois durante a impressão com o *Doctor Blade*, não foi introduzido nenhum valor para a espessura, mantendo-se o valor em zero. Desta forma, conclui-se que, ou o auxiliar se encontra com algum defeito, não sendo o seu valor de zero um valor real, provocando este defeito, ou então, a tinta, devido às suas dimensões de partículas de muito reduzidas (nanopartículas), consegue aderir ao material durante o seu arraste e o *Doctor Blade* não possui capacidade de evitar essa atração e arrastar a tinta na sua totalidade, restando uma camada de muito baixa espessura. Este erro, provoca a impossibilidade de efetuar o cálculo para a resistividade elétrica nesta placa, pois é difícil obter um valor real para a área de tinta impressa e, nesta mesma área, existem duas espessuras muito distintas, impossibilitando o uso da fórmula (Equação 3) para o cálculo.

Tendo em conta o preenchimento que ocorreu nas estruturas gravadas, também se percebe que a impressão não foi perfeita nos canais, sendo perceptível que o preenchimento não foi sempre constante, existindo diferenças de espessura de tinta impressa nos canais de 500 μm , não existindo um único canal em que a tinta se encontra completamente nivelada, voltando a causar problemas na obtenção de um valor para a resistividade elétrica nestas estruturas.

Repetindo o mesmo processo para a segunda placa gravada, o resultado obtido encontra-se na seguinte figura (Figura 51).

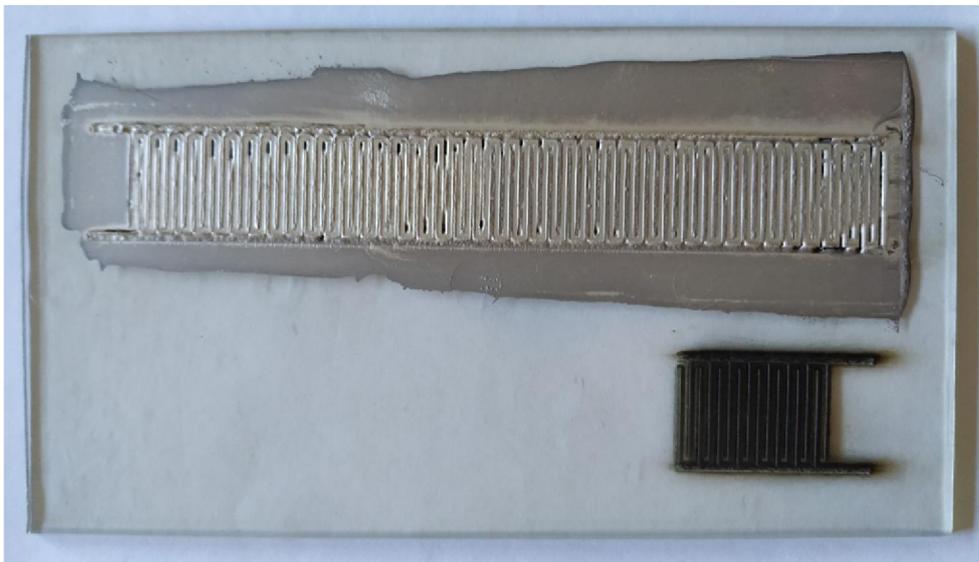


Figura 51: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na segunda placa de PC gravada

Avaliando a imagem obtida, percebe-se que voltou a ocorrer um mau processo de impressão de tinta, pois esta volta a surgir na superfície em volta da estrutura que foi gravada, não permitindo, novamente, que se efetue em condições, o cálculo da resistividade elétrica para esta placa.

Quanto à impressão nos canais em si, a impressão apresenta piores resultados do que na primeira, pois nem toda a estrutura ficou preenchida com tinta, existindo diversas falhas ao longo dos canais. Estas falhas podem ser explicadas pelo aumento da profundidade dos canais gravados, pois com a utilização do *Doctor Blade* é possível que ocorram falhas durante o preenchimento, e como se trata de uma tinta que possui alguma viscosidade, com um movimento um pouco mais rápido do que deveria ter sido praticado durante o teste, podem existir zonas onde a tinta não é preenchida na sua totalidade e, com o processo seguinte de cura da tinta, onde esta se contrai um pouco, criam-se estes pequenos vazios, principalmente em zonas perto das extremidades dos canais. Apesar destes pequenos vazios, as restantes áreas de preenchimento apresentam melhorias quando comparada com a placa anterior, não existindo grandes descontinuidades nestes preenchimentos. Ainda que existam melhorias, com os vazios existentes, a obtenção do valor da resistividade elétrica fica novamente em causa.

Para finalizar, foi efetuada a impressão da última placa, seguindo todos os passos anteriores, estando o resultado representado na seguinte figura (Figura 52).

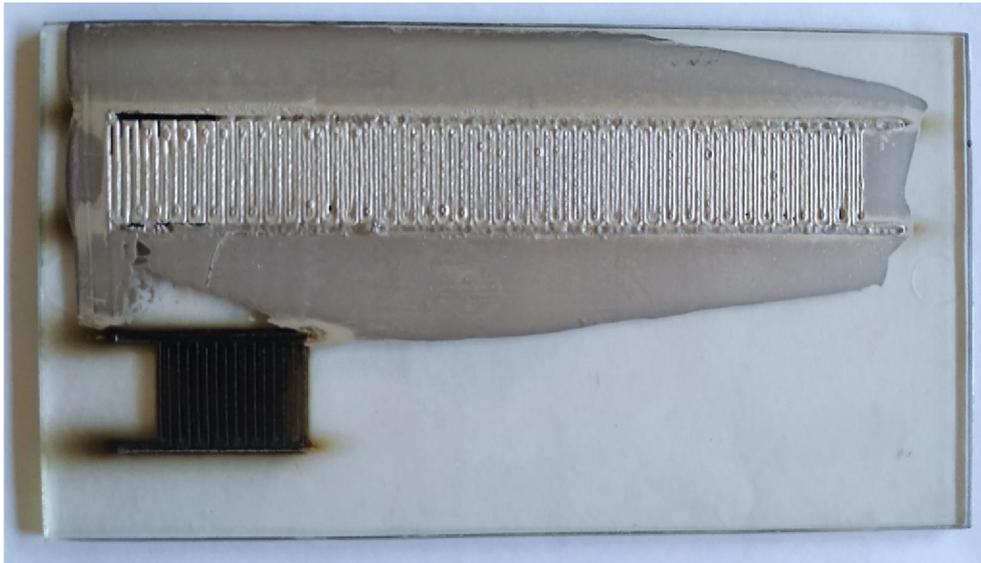


Figura 52: Imagem do resultado da impressão da tinta de prata na última placa de PC gravada

Como era expectável, também nesta placa foi observado que a impressão de tinta não foi a ideal, pois voltou a existir tinta na zona superficial envolvente das estruturas, voltando a não ser possível, por este motivo, obter um valor correto da resistividade elétrica da placa.

Tendo em atenção o que ocorreu no teste passado, em que existiram diversas zonas com vazios de tinta nos canais de pequenas dimensões, o arraste efetuado com o auxiliar de impressão foi feito de forma mais lenta e cuidada, tendo esta alteração resultado em melhorias, pois só na zona final da impressão, que corresponde ao lado esquerdo da imagem anterior, é que surgem grandes vazios na estrutura. Também é perceptível que, em alguns dos restantes canais gravados da placa, surgem pequenas marcas de bolhas, podendo isto significar que a temperatura usada durante o processo de cura pode ter sido demasiado elevada para a tinta, sob estas condições de impressão por preenchimento de pequenas estruturas. Apesar das claras melhorias, estas pequenas irregularidades na impressão voltam a impossibilitar o cálculo da resistividade elétrica da tinta.

O processo de impressão nas placas de PC, após a gravura efetuada a partir da tecnologia de laser, apresenta diversos problemas e defeitos ao longo dos três testes, podendo-se concluir que este processo não é o mais viável e otimizado para a produção deste tipo de componentes funcionais, quando são utilizados o policarbonato como substrato, em conjunto com a tinta de prata selecionada.

Como foi observado nos resultados obtidos para as três placas, em todos existiu impressão de tinta na superfície envolvente das estruturas criadas pela gravura, o que não era suposto ocorrer, impossibilitando a obtenção de um valor válido para a resistividade elétrica, sendo esta

falha explicada pelo tamanho das partículas da tinta (nanopartículas), e por possíveis defeitos que podem existir no *Doctor Blade*.

Também a impressão dos canais que foram gravados não foi perfeita em nenhuma das três placas, pois na primeira existem variações de espessura ao longo dos canais de pequenas dimensões e, nas restantes placas, surgem alguns vazios de tinta em todas as estruturas e estes são explicados por uma impressão demasiado rápida com o *Doctor Blade*, sendo estes vazios mais proeminentes na segunda placa, pois este defeito foi tido em conta durante a impressão na terceira placa. Nesta última, para além dos vazios, surgem também pequenas marcas de bolhas nas estruturas, sendo provável que, para estruturas de tamanho tão reduzido, a temperatura usada no processo de cura da tinta tenha sido demasiado elevada, provocando estas marcas.

De forma a realizar uma pequena comparação das alterações que esta tecnologia de gravura provoca nas características elétricas dos materiais usados, foram obtidos apenas os valores de resistência elétrica, de forma a perceber a evolução desta característica, com o aumentar das profundidades dos canais gravados nas placas. Os resultados obtidos estão apresentados na seguinte tabela (Tabela 15).

Tabela 15: Valores obtidos para a resistência elétrica das placas de PC gravadas

Substratos	Valores de resistência elétrica
Primeira Placa	3,012 Ω
Segunda Placa 2	47,5131 Ω
Terceira Placa 3	2,6217 k Ω

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que, com o aumentar dos valores para os dois parâmetros de processamento utilizados durante o processo da gravura, também os valores da resistência elétricas nas placas aumentam, sendo este facto explicado pelo gradual aprofundar das estruturas produzidas nas placas, fazendo com que seja impressa e preenchida cada vez mais tinta em cada teste efetuado, provocando este aumento sequencial dos valores em cada placa testada.

Fazendo uma apreciação global de todo o processo de produção de um sensor, recorrendo ao método de impressão de gravura a partir da tecnologia de laser, é conclusivo que este processo não se trata do mais vantajoso para a realização da impressão de um sensor para a produção de um componente funcional, pois apresenta diversos defeitos ao longo de todo o seu processo, iniciando-se logo na gravura, onde o material selecionado como substrato não é compatível com

a técnica usada e durante a impressão realizada, através do auxílio de um *Doctor Blade*, são diversos os defeitos que surgem, impossibilitando que os passos seguintes à impressão previstos no trabalho, sejam realizáveis.

5.4. Processo de impressão através da técnica de serigrafia com a tinta de prata HPS FG57B

Dado por concluído todos os diferentes processos e testes efetuados com o equipamento de corte e gravura a laser, o próximo passo do trabalho consiste no processo de impressão através da técnica de serigrafia, partindo da utilização do substrato selecionado, o policarbonato, e também a tinta previamente selecionada, a tinta de prata HPS FG57B.

Com a chegada da tela de serigrafia, que tinha sido encomendada com os diferentes desenhos que foram efetuados num capítulo anterior (Ponto 3.1.), foi possível dar início ao processo em si.

5.4.1. Primeira fase de testes efetuados nas placas de PC

Apesar de o objetivo principal do trabalho, na fase da impressão, ser a de produzir um sensor impresso com uma tinta condutora num filme de PC, devido à falta deste tipo de filme no momento de iniciar os testes com a técnica de serigrafia, tal não foi possível. Desta forma, voltou a recorrer-se às placas de PC que tinham sido injetadas no capítulo anterior (Ponto 4.1.), apenas com o objetivo de testar a técnica e também de obter uma perceção do comportamento tanto da tinta a usar, como do material a usar como substrato, o PC.

Com ambos os materiais necessários prontos para proceder à impressão, deu-se início à primeira impressão, sendo que foi seguido o procedimento que foi explicado no capítulo anterior (Ponto 4.5.3.). Para tal, foi necessário decidir, em primeiro lugar, qual o desenho que será impresso na placa de PC, tendo sido escolhido o desenho do sensor interdigital que possui um maior espaçamento entre os traços dos seus elétrodos (1 mm), estando este desenho representado na Figura 6. Devido ao facto de esta ser a primeira impressão, e como forma de avaliar o comportamento dos materiais e dos equipamentos envolvidos, apenas foi impresso o sensor de pequenas dimensões, sendo que o restante sensor foi tapado com fita-cola de forma a não interferir com o processo de impressão do primeiro.

Com a estrutura a imprimir definida, é necessário, de seguida, proceder à escolha dos parâmetros a utilizar para a impressão, sendo estes a velocidade de movimento do *squeegee*, a pressão exercida pelo mesmo e o ângulo em que este se encontra disposto, sendo estes os únicos aspetos que foram tidos em conta, durante todos os testes que foram efetuados com a máquina de impressão por serigrafia. Deste modo, o ângulo que foi utilizado para a impressão, foi o que já se encontrava em uso na máquina, sendo este o de 45° e a velocidade de impressão foi a mínima permitida pela máquina, sendo esta de 200 mm/s. Quanto à pressão exercida pelo equipamento utilizado, o valor para esta característica não é fornecido pelo sistema digital da máquina, sendo que o seu princípio de funcionamento se baseia no posicionamento vertical do *squeegee*, ou seja, consoante o posicionamento do componente se encontra ou mais inferior, ou mais superior, o valor da pressão aumenta ou diminui, respetivamente, não existindo um valor fixo para a pressão. Este aumentar ou diminuir da altura a que se encontra o componente, é controlado a partir de umas válvulas que fornecem informações da diferença de altura que foi alterada em mm. Neste primeiro teste, não existiu qualquer alteração do posicionamento do *squeegee*, sendo este considerado como a altura base (0 mm).

Com o percurso pronto e com todos os parâmetros selecionados, colocou-se tinta de prata na tela e procedeu-se à primeira impressão. De seguida, colocou-se a placa impressa no forno, de forma a efetuar o processo de cura da tinta sendo que a temperatura e o tempo de cura foram de 150°C e 15 minutos, respetivamente, sendo estes parâmetros os que foram selecionados no final dos testes efetuados no início deste capítulo (Ponto 5.2.). O resultado da impressão, após o processo de cura, encontra-se na seguinte figura (Figura 53) e esta placa foi denominada de T1-PC1-S1.



Figura 53: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC1-S1

Com o primeiro teste completo, foi logo perceptível um erro que viria a influenciar todo este processo de impressão, pois a estrutura que foi impressa não se encontrava preenchida com tinta, mas apenas foi impresso como que um contorno a toda a volta dessa estrutura e ao observar com maior rigor a tela que tinha sido usada, foi perceptível que o erro se encontrava na transferência da imagem para a mesma, pois todas as estruturas que foram para ela transferidas, se encontram com este defeito de não permitir o preenchimento total da sua geometria. Desta forma, todos os testes que são efetuados com esta tela possuem o mesmo defeito e, como tal, este erro não vai ser mais tido em conta nos restantes testes efetuados.

Este defeito da tela acaba por ter uma influência enorme em todo o processo, pois apenas a partir da tela, não é possível perceber qual o tamanho que as estruturas que se encontram na tela efetuada possuem, não existindo uma forma de calcular a área de tinta que é impressa ao longo de um sensor, impossibilitando o cálculo da resistividade elétrica da tinta quando impressa nestas condições, não sendo possível efetuar comparações entre os resultados que foram obtidos nas fases anteriores desta dissertação e também com os valores que estão descritos na ficha de material da tinta utilizada (Anexo VII), não existindo uma caracterização elétrica completa dos resultados obtidos, tratando-se esta de um dos aspetos principais desta fase da dissertação.

Apesar deste erro detetado na tela, o processo de impressão também foi longe de perfeito, pois neste primeiro teste foram detetados três diferentes defeitos. O primeiro e o mais notório dos três, trata-se do vazio que se encontra no meio da estrutura impressa.

De seguida, é também perceptível que a impressão não foi muito precisa, sendo verificado o defeito denominado de *cobwebbing* na peça, que consiste na aparição de pequenos fios de tinta espalhados ao longo da estrutura impressa, como é possível verificar na Figura 53. Este defeito é normalmente atribuído à existência de eletricidade estática durante o processo de impressão, que provoca o espalhar da tinta durante o levantar da tela do substrato.

Por fim, o último defeito que foi verificado neste teste, trata-se da existência de um pequeno traço de tinta do lado direito do sensor impresso, e este deveu-se a uma falha no início do processo, quando a fita-cola que deveria tapar o outro sensor de maiores dimensões não foi suficiente, causando a impressão daquela pequena estrutura na placa.

Após terminada a impressão, a tela teve de ser limpa, pois, considerando o local onde o vazio ocorreu na placa, no local correspondente na tela, ocorreu um bloqueio causado pela tinta que não transpôs a malha, sendo necessário realizar a limpeza da tela para se poder proceder a novos testes. Para efetuar esta limpeza, foi utilizado o agente de limpeza aconselhado pela

empresa desenvolvedora da tinta (*Novacentrix*), sendo este agente denominado de Zestron SD301, composto de uma base orgânica, sendo necessário recorrer à utilização de uma *hotte* para este processo.

Após a limpeza efetuada e a tela se encontrar completamente seca e pronta para um novo processo, iniciou-se outro teste de impressão, sendo utilizados exatamente os mesmos parâmetros e o mesmo percurso, pois o desenho a imprimir foi exatamente o mesmo. A diferença desta impressão para a anterior, consiste no número de impressões que são efetuadas neste teste, ou seja, tal como ocorreu no teste anterior, será efetuada uma primeira impressão, em tudo semelhante à anterior, mas logo após a sua conclusão, retira-se o substrato impresso da mesa do equipamento e coloca-se um novo substrato, realizando uma nova impressão, sem que haja uma grande interrupção entre as duas impressões, de forma a avaliar o comportamento da tinta, do substrato e dos componentes da máquina, quando são efetuadas duas impressões em sequência.

Com ambas as impressões efetuadas, foi efetuado o processo de cura da tinta, seguindo os mesmos parâmetros do teste anterior, estando os resultados destas duas experiências representadas nas seguintes figuras (Figuras 54 e 55). Estas placas foram denominadas de T1-PC2-S1 e T1-PC3-S1, tendo em conta a ordem pela qual foram impressas.

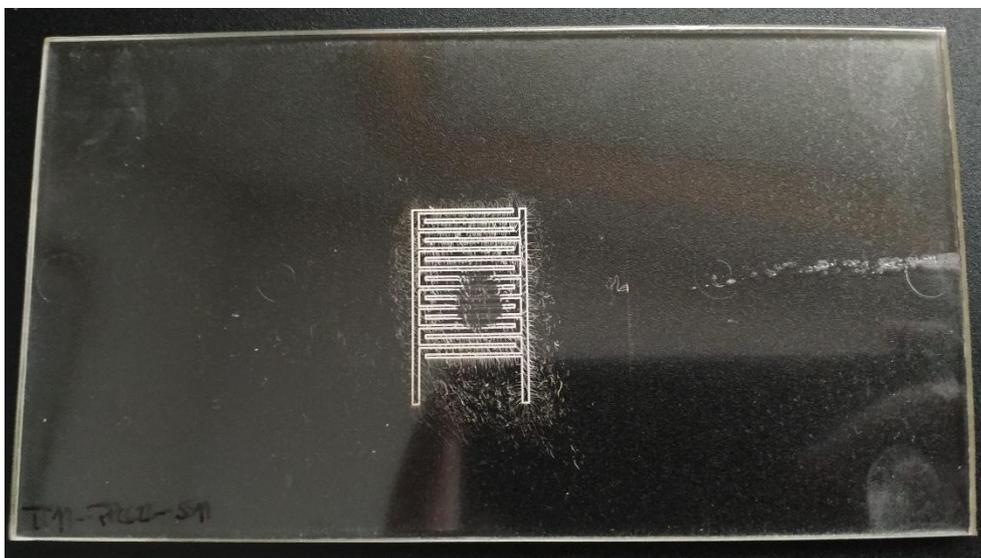


Figura 54: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC2-S1

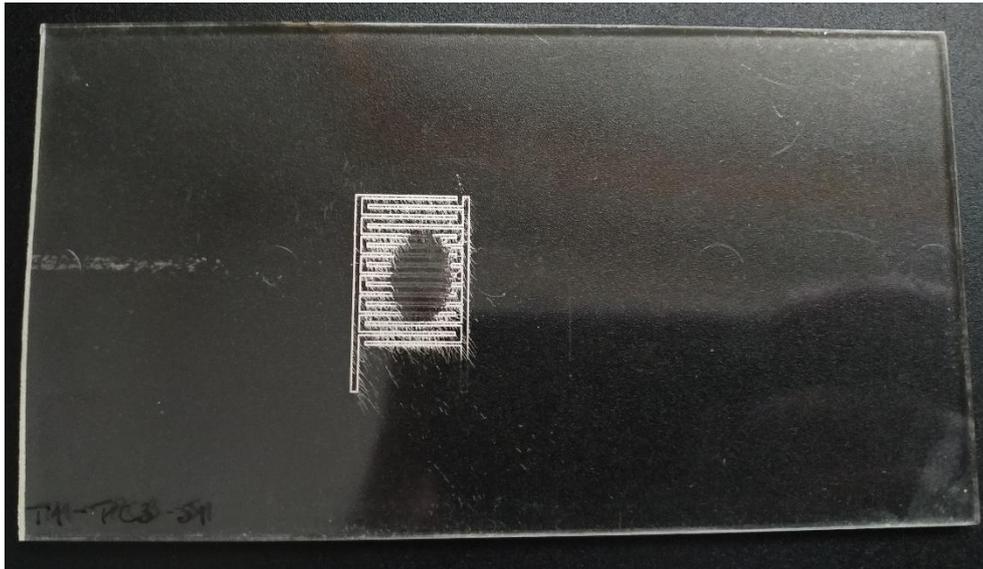


Figura 55: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC3-S1

Após a conclusão destas duas impressões, é perceptível que um dos defeitos que foi obtido anteriormente foi corrigido, sendo este o da aparição do traço à direita das estruturas impressas, e isto deveu-se ao facto de a colocação da fita-cola no sensor de grandes dimensões ter sido efetuada de forma correta, não existindo a possibilidade de este defeito voltar a ocorrer.

Apesar da melhoria obtida no primeiro defeito, o mesmo não ocorreu nos restantes, pois voltou a surgir em ambos os testes, o efeito de *cobwebbing*, sendo o resultado semelhante em ambos, e também o vazio na mesma zona onde tinha ocorrido na experiência passada, sendo que a limpeza da tela após a primeira impressão não apresentou nenhuma melhoria em qualquer um destes aspetos.

Quanto ao aspeto de se ter efetuado duas impressões em sequência, é possível perceber pelos resultados obtidos, que os resultados pioram bastante, pois durante o processo de impressão da segunda placa (T1-PC2-S1), ocorreu novamente o surgimento de um vazio na placa, o que significa que ocorreu um novo bloqueio de tinta na tela, o que leva a que na placa seguinte (T1-PC3-S1), também não surja tinta nesse local, devido a esse mesmo bloqueio, e isto foi verificado no resultado da terceira placa, pois existe um vazio no mesmo local, tendo este até aumentado o seu tamanho nesta última impressão. Também é possível verificar que nesta última placa, surge mais uma zona onde a impressão não ocorreu, sendo esta no canto inferior direito da estrutura, como é possível verificar na Figura 55, provocando um novo bloqueio de tinta na tela nesta zona.

Com estes três primeiros resultados obtidos, é possível perceber que o processo não se encontra otimizado, pois diversos erros estão a ocorrer em todos os testes efetuados.

Considerando o defeito de *cobwebbing*, este ocorre devido a um excesso de eletricidade estática que se desenvolve durante o processo, sendo esta criada quando o *squeegee*, que é constituído por uma borracha na sua ponta, se arrasta ao longo da malha da tela, e ao levantar a tela do substrato após a impressão, esta energia acumulada influencia o comportamento da tinta que se quebra com o levantar da mesma, criando estes fios por cima das estruturas impressas e também foram verificados estes fios por cima da tela de impressão. Este efeito possui ainda influência nas características elétricas destas estruturas, pois com os fios de tinta que acabam por se formar por cima da geometria que pretende formar, criam-se ligações de tinta entre os diversos traços do sensor, influenciando os valores obtidos, por exemplo, para a resistência elétrica.

Quanto aos vazios que surgem durante o processo, não foi possível obter uma conclusão concreta à cerca do surgimento destes defeitos, apesar de existir suspeitas dos motivos para o surgimento destes vazios. A primeira suspeita recai sobre a velocidade de impressão, pois a esta é bastante elevada, e não possui uma grande capacidade de precisão ao passar ao longo da tela, de forma a imprimir estruturas de dimensões tão reduzidas, mas como a velocidade já se encontra no seu valor mínimo, não é possível fazer testes com valores mais baixos de velocidade, para efetuar comparações de resultados e perceber se esta velocidade é um possível causa para este problema.

Outra possível explicação para o surgimento destes vazios encontra-se na pressão exercida pelo *squeegee*, podendo esta estar alta demais, não permitindo que a tinta passe pela tela, pois um dos princípios base para o processo de impressão por serigrafia é a utilização de valores de pressões baixas, de forma a que o componente apenas arraste a tinta ao longo da tela e não que este faça uma elevada pressão ao longo da tela, deformando-a e pondo em causa a boa impressão de tinta. [20]

Por fim, a última possível explicação para o aparecimento de vazios na impressão recai sobre a tela. Como já foi referido anteriormente neste ponto, a tela encontra-se com a geometria das estruturas, para ela transferidas, incorretas, estando as suas dimensões bastante mais reduzidas do que é suposto. Como a tela foi produzida tendo em conta as dimensões originais dos desenhos efetuados no capítulo 3 (Ponto 3.1.), foi escolhida uma malha tendo em conta os valores originais para as estruturas, podendo esta informação influenciar a capacidade da tela imprimir os sensores com dimensões mais reduzidas do que estava previsto, permitindo explicar o porquê da tinta bloquear em certos pontos do desenho na tela.

Desta forma, e tendo em vista as duas últimas explicações, foi decidido que no teste seguinte se alterariam os parâmetros, de forma a avaliar a influência destes no surgimento dos vazios. Assim, no teste seguinte procedeu-se à redução da pressão exercida pelo *squeegee* e também foi selecionado um outro desenho, de forma a perceber se apenas aquele pequeno sensor selecionado possui algum defeito que provoca o bloqueio de tinta na tela.

Com estes três resultados, dá-se por terminada os primeiros testes de impressão com a técnica de serigrafia. De referir que apesar de apenas terem sido apresentados três resultados para estes primeiros testes, foram realizados mais alguns do que os que aqui se encontram descritos, mas devido aos resultados serem em tudo semelhantes aos que foram apresentados neste ponto, após a impressão da tinta nesses outros testes, procedeu-se à limpeza da tinta nos mesmos, de forma a poder reutilizar as placas noutras impressões com parâmetros ou desenhos distintos, devido ao número limite de placas existentes, sendo este o motivo pelo qual não foram apresentados mais resultados.

5.4.2. Segunda fase de testes efetuados nas placas de PC

Como foi referido no final do ponto anterior, nesta segunda fase de testes de impressão por serigrafia nas placas de PC, foram efetuadas algumas alterações aos valores dos parâmetros selecionados para o processo, com o objetivo de perceber se estas diferenças apresentam melhores resultados do que nos testes anteriores, eliminando alguns dos defeitos que foram obtidos anteriormente.

Deste modo, foi selecionada uma diferente estrutura das disponíveis para a imprimir na tela, sendo esta a do outro sensor interdigital em que o espaçamento entre os traços dos elétrodos diminui a sua distância para 0,5 mm, estando o desenho deste sensor representado na Figura 5. De forma a manter a coerência com os resultados obtidos no ponto anterior, também apenas foram efetuados testes com o sensor de pequenas dimensões, de forma a comparar os resultados de uma melhor forma, sendo para tal necessário tapar a estrutura semelhante de maiores dimensões com fita-cola.

Passando para a seleção dos parâmetros que são selecionados no equipamento, procedeu-se à mudança do percurso dos componentes do equipamento, para que a impressão se foque no novo sensor escolhido, e selecionou-se o mesmo valor de velocidade de movimento do *squeegee*, 200 mm/s e o mesmo ângulo de posição para o componente, 45°. Quanto à pressão

exercida pelo *squeegee* da máquina, o seu valor foi diminuído, tendo sido, para tal efeito, aumentado o posicionamento vertical deste componente passando do valor base de 0 mm, para uma altura superior em 1 mm, ou seja, rodou-se a válvula do componente para -1 mm.

Com o percurso e os parâmetros novamente seleccionados e inseridos no equipamento, procedeu-se à colocação da tinta de prata na tela junto à estrutura que será impressa e deu-se início à sua execução, tendo sido impressa apenas uma única placa. No final da impressão, procedeu-se a um novo processo de cura da tinta, tendo utilizado os mesmos parâmetros para o processo, sendo estes de 150°C e 15 minutos, para a temperatura e tempo de cura, respetivamente. O resultado final, encontra-se demonstrado na Figura 56, tendo esta placa sido denominada de T1-PC4-S2.

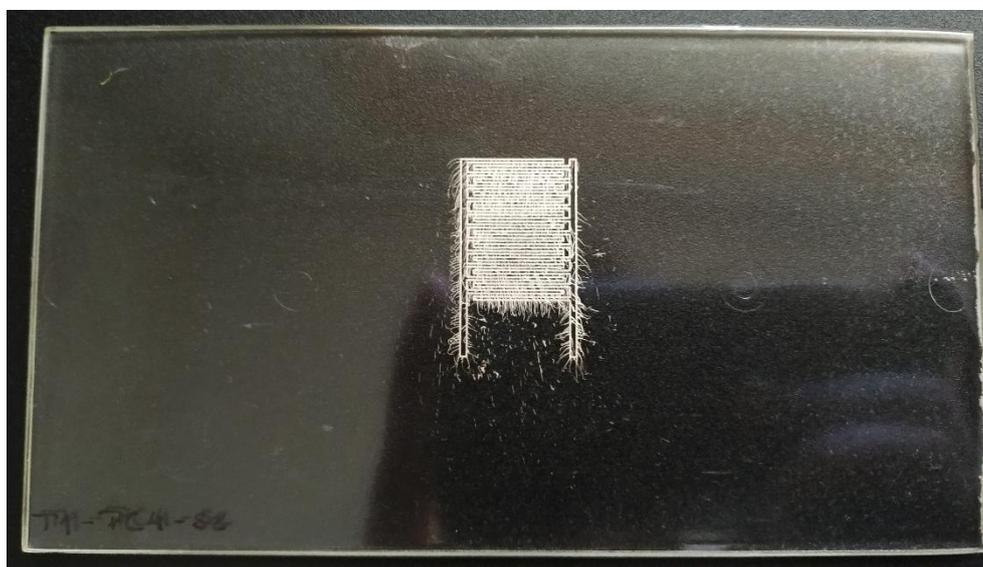


Figura 56: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC4-S2

Após observar o resultado obtido, a primeira observação que salta logo à vista na placa, trata-se do não surgimento do vazio expectável numa zona central do sensor impresso, o que apresenta uma melhoria significativa quanto aos testes anteriores, apesar de não ser possível concluir apenas com um teste, que tal defeito não irá mais surgir, até porque a estrutura a imprimir nesta segunda fase de testes foi alterada por completo, não sendo possível perceber a influência que as alterações nos parâmetros utilizados produziram no resultado final.

Apesar da melhoria apresentada na primeira avaliação, é possível perceber que o efeito de *cobwebbing* continua a surgir com grande intensidade na placa, não permitindo que a impressão desta estrutura possua bons resultados. A explicação para a continuação do

aparecimento deste efeito continua a ser um excesso de eletricidade estática gerada durante a impressão, que produz o aparecimento destes fios com o levantar da tela.

Terminando a avaliação desta primeira placa, foi necessário proceder a uma nova limpeza da tela de impressão com o agente de limpeza Zestron 301, de forma a limpar os restos de tinta seca, para efetuar uma nova vaga de impressões.

Considerando o que foi efetuado no ponto anterior, voltou-se a proceder a uma nova impressão em sequência de duas novas placas, utilizando o mesmo desenho para a impressão e os mesmos parâmetros, de forma a obter mais resultados para esta combinação de processos e também perceber os seus comportamentos, quando se produz mais do que uma peça de cada vez.

Deste modo, procedeu-se à impressão de duas novas placas com a tinta de prata, sendo que no final do processo, se procedeu à cura da tinta das mesmas, utilizando novamente os mesmos valores para os seus parâmetros (150°C e 15 minutos). Os resultados obtidos encontram-se discriminados nas seguintes figuras (Figuras 57 e 58), sendo estas placas denominadas de T1-PC5-S2 e T1-PC6-S2.

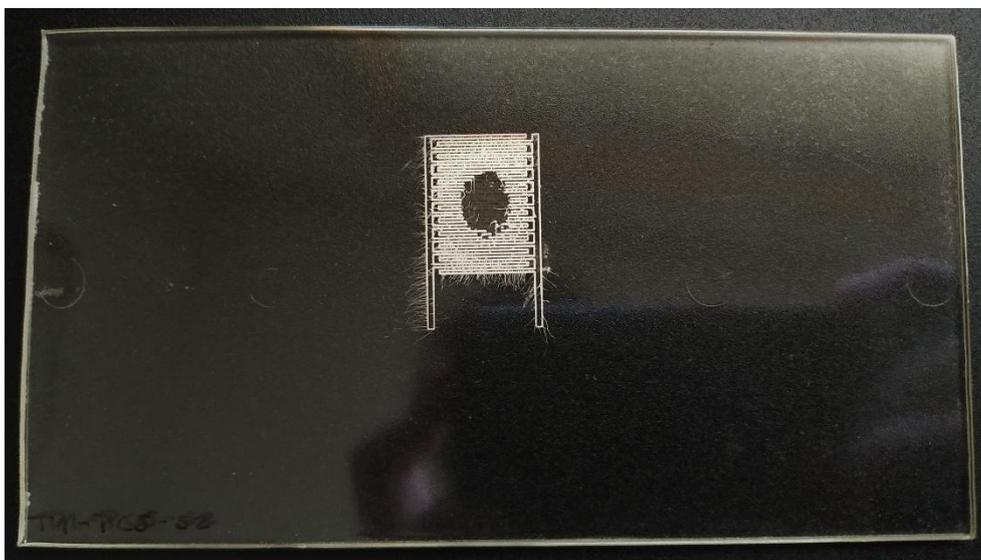


Figura 57: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC5-S2

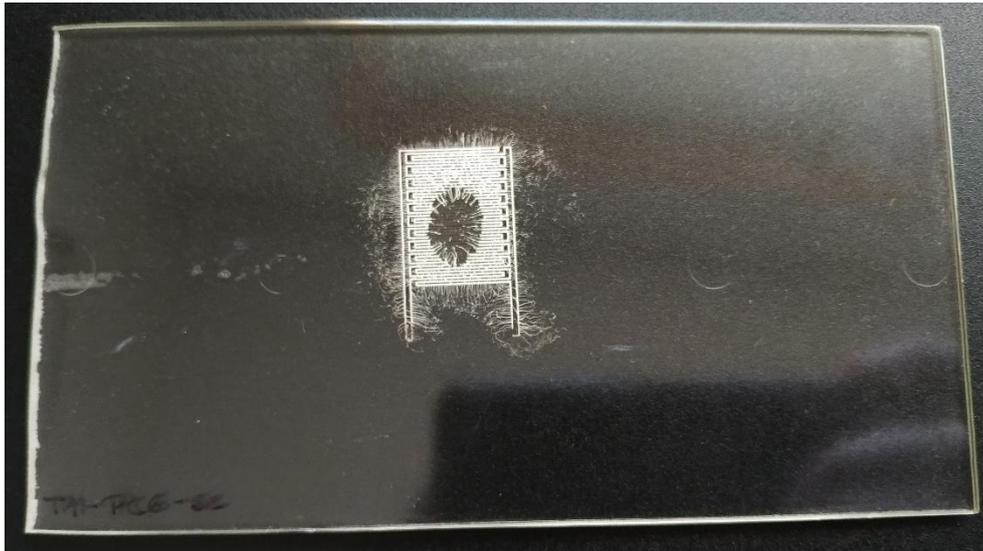


Figura 58: Imagem do resultado da impressão por serigrafia da placa T1-PC6-S2

Com estes dois testes efetuados, o que foi concluído com a primeira experiência efetuada para este sensor foi descartado, pois voltaram a surgir vazios numa zona interior destes dois últimos sensores impressos, voltando ao problema que era conhecido antes do início da segunda fase de testes de impressão por serigrafia nas placas de PC. Também como já tinha ocorrido no ponto anterior, é possível verificar que o vazio que se forma nas placas, aumenta as suas dimensões na última placa impressa (T1-PC6-S2), ainda que neste tipo de sensores o aumento tenha sido mais.

Quanto ao efeito de *cobwebbing*, este volta a surgir em ambos os testes, sendo este um grande defeito que não está a ser conseguido controlar apenas com o processo normal de impressão. Também é de notar, que na última placa impressa, o número e o tamanho dos fios provocados por este defeito, aumentaram consideravelmente, sendo este resultado o pior obtido de todos os testes efetuados até este momento.

Deste modo, e fazendo uma avaliação geral destes três testes, volta-se a perceber que efetuar uma sequência de impressões não é viável, com o equipamento selecionado, durante a produção de estruturas de tamanhos tão reduzidos, pois todos os resultados que são obtidos na segunda impressão da sequência apresentam todos os defeitos que a primeira possui, mas sendo estes defeitos consideravelmente maiores na última impressão da sequência.

Quanto ao efeito de *cobwebbing*, verifica-se que o problema continua a surgir com a mesma intensidade, sendo que apenas na última placa (T1-PC6-S2) este efeito é ligeiramente maior. Para tal, é necessário proceder a alguma alteração no processo, de forma a que a

eletricidade estática se dissipe por algum local, não influenciando mais o processo de impressão da tinta.

Em relação aos vazios de tinta no sensor, ocorreu uma melhoria na primeira placa que foi impressa (T1-PC4-S2), pois não existiu qualquer porção de tinta bloqueada pela tela, existindo uma impressão total de tinta em toda a placa. O mesmo não ocorreu ao efetuar a impressão nas duas restantes placas, pois em ambas voltou a surgir uma zona com vazio de tinta, não permitindo perceber a influência que a alteração dos parâmetros, para tentar o controlo deste defeito durante a impressão, podendo ter sido que o primeiro resultado ocorreu por um mero acaso.

Da mesma forma como ocorreu no ponto anterior, também neste foram efetuadas mais impressões, seguindo o processo efetuado nestes três testes, mas os resultados obtidos foram muito semelhantes aos que foram conseguidos para as duas últimas placas, tendo-se procedido à limpeza destas impressões de tinta extra, de forma a controlar o número de placas de PC existentes. Como todos os resultados, incluindo os que não foram registados, apresentaram vazios na sua impressão, isto permite contribuir para o fortalecimento da teoria de que, o resultado obtido sem vazios para a placa T1-PC4-S2, ocorreu por um mero acaso, pois nunca mais foi obtido este resultado.

Foi ainda efetuada mais uma tentativa de controlo do aparecimento dos vazios durante as impressões e para tal procedeu-se ao aumento do posicionamento vertical do *squeegee* no equipamento em 1 mm, passando de -1 mm, para -2 mm, com a intenção de diminuir mais uma vez a pressão realizada. Mas com este novo aumento, o componente ficou demasiado elevado para proceder à impressão, sendo que este não tinha pressão suficiente para deslocar a tela até ao substrato, não ocorrendo uma impressão de tinta, sendo possível perceber que o posicionamento vertical máximo do *squeegee* para esta altura de substrato é nos -1 mm.

5.4.3. Testes efetuados em filmes de PEN

Após as duas primeiras séries de testes efetuados com as placas de PC, e devido aos vários defeitos que foram observados nos resultados obtidos desses mesmos testes, foi decidido alterar o substrato a imprimir, de forma a verificar se, com um outro material a substrato, os defeitos são menos aparentes ou se desaparecem por completo, permitindo concluir que os problemas obtidos anteriormente se devem a uma incompatibilidade do PC com a técnica de serigrafia, como ocorreu com a técnica de gravura a laser.

O material que foi selecionado como solução para testar o processo de impressão por serigrafia foi, novamente, o filme de PEN. Este filme já foi utilizado em diversos testes anteriores, e nunca teve problemas de impressão com a tinta de prata, sendo portanto, o material ideal para realizar uma avaliação deste processo, pois se os defeitos se mantiverem, o problema não se encontra no substrato, mas sim ou nos componentes do equipamento usado, incluindo a tela utilizada, ou também na tinta de prata usada, a tinta HPS FG57B, podendo esta já não se encontrar em condições para ser utilizada no processo de serigrafia, devido ao seu tempo de utilização e de vida já se encontrar ultrapassado.

Deste modo procedeu-se ao início do procedimento de impressão por serigrafia nos filmes de PEN, sendo necessário, em primeiro lugar, proceder à seleção de um desenho dos disponíveis na tela para utilizar, sendo preferível que seja utilizado um dos sensores interdigitais que foi impresso nos testes anteriores com as placas de PC. Assim, foi selecionado o sensor interdigital que possui um espaçamento entre os traços dos elétrodos maiores, sendo este desenho o que se encontra representado na Figura 6, tendo sido impresso novamente o sensor de pequenas dimensões.

Como o objetivo é comparar com os resultados previamente obtidos para as placas de PC, foram usados os mesmos parâmetros de processo dos testes anteriores, apenas tendo de ser efetuada uma alteração no posicionamento vertical do *squeegee*, devido à diferença de espessura a placa de PC (cerca de 2 mm) e o filme de PEN (cerca de 75 μm). Desta forma, foi utilizada a velocidade mínima de movimento do *squeegee* permitida pela máquina, sendo esta de 200 mm/s, um ângulo do mesmo componente de 45° e um posicionamento vertical de +1mm, rodando-se a válvula para este valor, diminuindo assim a altura em 2mm.

Com o percurso e parâmetros selecionados, iniciou-se o processo de impressão, colocando-se a tinta de prata na tela junto ao sensor a imprimir, tendo sido impressos dois filmes, mas estes foram efetuados em dois processos de impressão distintos, tendo sido efetuada uma limpeza da tela entre os dois testes. Após a impressão dos filmes com a tinta de prata, foi efetuado o processo de cura da tinta, sendo necessário definir quais os parâmetros a utilizar, pois não podem ser os mesmos das placas de PC, devido à sua reduzida temperatura de transição vítrea (T_g). Foram então selecionados os valores de 110°C e 15 minutos, para a temperatura e tempo de cura, respetivamente. Os resultados destas duas impressões nos filmes de prata encontram-se nas duas figuras seguintes (Figuras 59 e 60), tendo estes filmes sido denominados de T1-PEN1-S1 e T1-PEN2-S1.

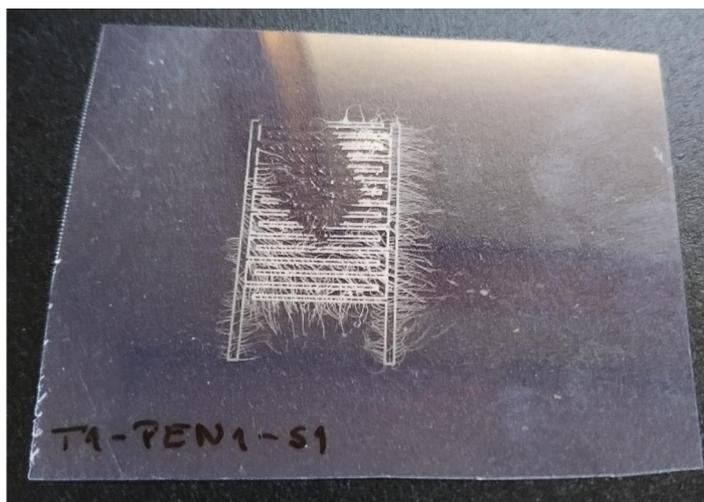


Figura 60: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T1-PEN1-S1

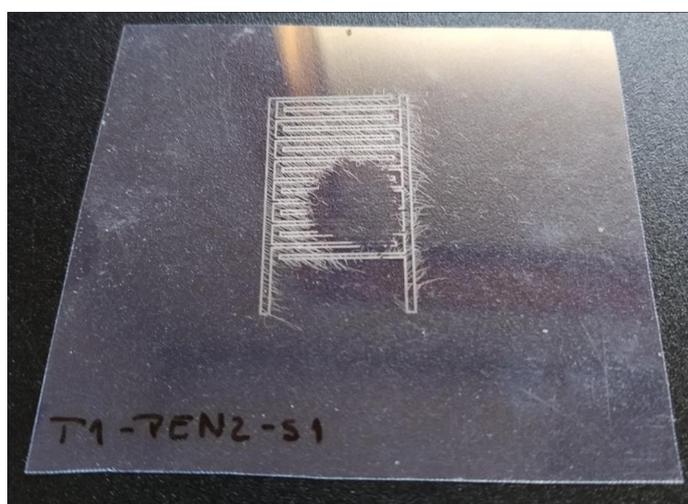


Figura 59: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T1-PEN1-S2

A partir da observação de ambas as figuras, foi claramente notório que os problemas verificados nos testes de impressão nas placas de PC, também se verificaram nos testes com os filmes de PEN.

Iniciando o estudo pelos defeitos de *cobwebbing*, os resultados são em tudo semelhantes aos verificados em todos os testes anteriores, pois ao longo de todo o sensor impresso nos dois filmes se verificam pequenos fios de tinta espalhados pela estrutura, sendo notório que o resultado para o primeiro filme impresso (Figura 59), apresenta piores resultados para este defeito do que o segundo filme (Figura 60), pois os fios são mais extensos e em maior número.

Quanto aos vazios no sensor impresso, estes voltam a surgir mas em zona completamente distintas na estrutura, pois para o primeiro filme, o vazio ocorre no canto superior esquerdo e na zona central, como é possível observar na Figura 59, e para o último filme, o vazio aparece também

na zona central, mas também no canto inferior direito, sendo os resultados completamente opostos, não existindo uma explicação para este sucedido, pois o processo foi completamente igual para as duas impressões.

Dando por terminada a impressão de tinta por serigrafia nos filmes de PEN, é possível perceber que os resultados obtidos para este material são exatamente os mesmos que foram obtidos para as placa de PC, o que permite concluir que o problema para o processo não se encontrar otimizado, não se centra no material que está a ser utilizado como substrato, sendo, então, necessário realizar novas alterações no processo, de forma a tentar evitar o surgimento dos defeitos.

5.4.4. Terceira fase de testes efetuados nas placas de PC

Regressando ao substrato de origem, o problema que mais se tem verificado ao longo de todos os testes efetuados consiste no surgimento dos pequenos fios de tinta extra na superfície da placa, sendo este efeito denominado de *cobwebbing*. Este é um defeito do processo, sendo este explicado pelo excesso de eletricidade estática entre o substrato, a tela e o *squeegee*, que provoca este espalhar de tinta quando a tela é levantada após a o processo de impressão estar concluído.

De forma a tentar controlar o aparecimento deste defeito, é necessário conseguir reduzir ou eliminar a eletricidade estática que se forma durante o processo. Para tal, e recorrendo ao livro denominado de *“How to be a great Screen Printer”*, editado pelo professor Steven Abbott, que possui um guia de resolução para os problemas mais comuns no processo de serigrafia, foi decidido que seria efetuada uma nova experiência de impressão de tinta nas placas de PC, mas antes seria feita uma pequena alteração na máquina, sendo esta a de efetuar uma ligação da máquina à terra através de fios de cobre, de forma a tentar dissipar a energia estática que se acumula no equipamento. Desta forma foram efetuadas ligações com os fios de cobre, em dois pontos do equipamento à terra, sendo estes o *squeegee* e a tela de impressão, pois a suspeita era de que a eletricidade estática é gerada aquando do arraste do *squeegee* ao longo da tela. Na seguinte figura (Figura 61), encontra-se demonstrado como se procedeu a esta experiência, estando na imagem a máquina de impressão por serigrafia ligada com os fios de cobre à terra.

[20]

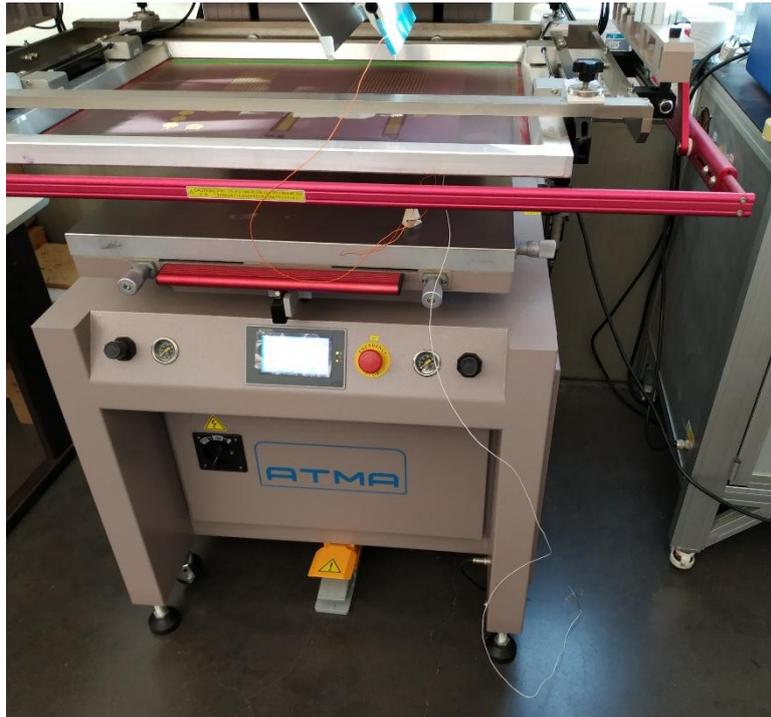


Figura 61: Imagem representativa das ligações efetuadas da máquina à terra através de fios de cobre

Com esta tentativa de dissipar a eletricidade estática pronta a ser testada, procedeu-se ao processo de impressão por serigrafia de forma normal, sendo necessário voltar a efetuar o procedimento para o mesmo.

De forma a facilitar este teste, e para existir também uma forma de comparar os resultados com os que foram obtidos anteriormente, o procedimento efetuado foi o mesmo que foi utilizado nos segundos testes efetuados nas placas de PC (Ponto 5.4.2.), o que significa que o desenho que foi selecionado para o processo foi o do sensor de pequenas dimensões e com um espaçamento entre os traços do elétrodo de 0,5 mm representado na Figura 5 e os parâmetros de processamento correspondem a uma velocidade de movimento do *squeegee* de 200 mm/s, um ângulo de 45° e um posicionamento do componente a -1 mm da posição base, voltando-se a rodar a válvula para este valor.

Selecionados o percurso e os parâmetros a usar, procedeu-se à colocação de tinta na tela junto da estrutura a imprimir e deu-se início ao processo de impressão, tendo sido efetuadas duas impressões em tempos distintos, ou seja, estas não foram efetuadas em sequência, tendo a tela sido limpa entre os dois testes. No final do processo, como em todos os testes anteriores, realizou-se a cura da tinta, sendo que os parâmetros selecionados para este processo foram os mesmos de todos os testes anteriores com as placas de PC, ou seja, 150°C e 15 minutos. Nas seguintes

figuras (Figuras 62 e 63), estão representados os resultados obtidos para esta experiência, sendo estas placas denominadas de T1-PC7-S2 e T1-PC8-S2.

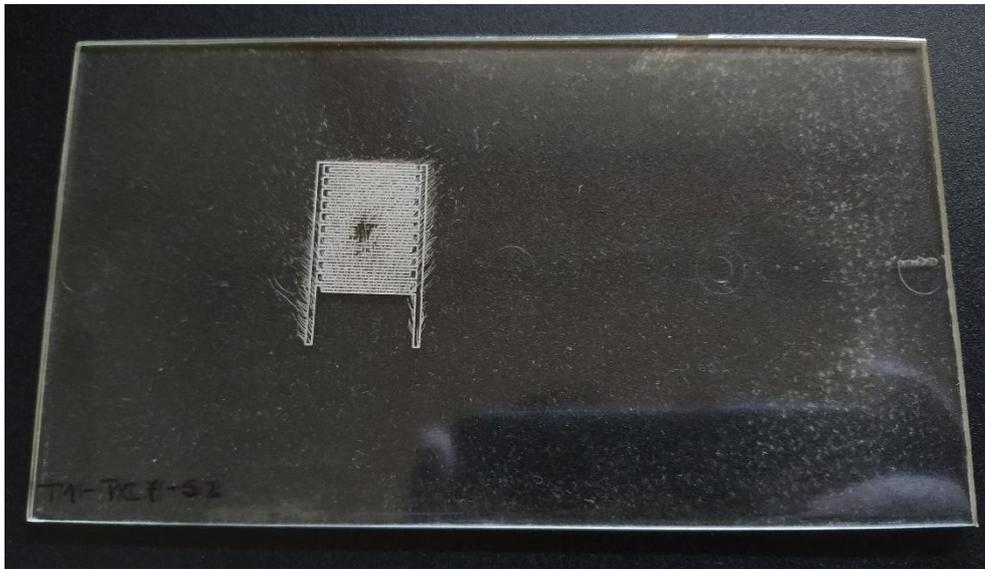


Figura 62: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC7-S2

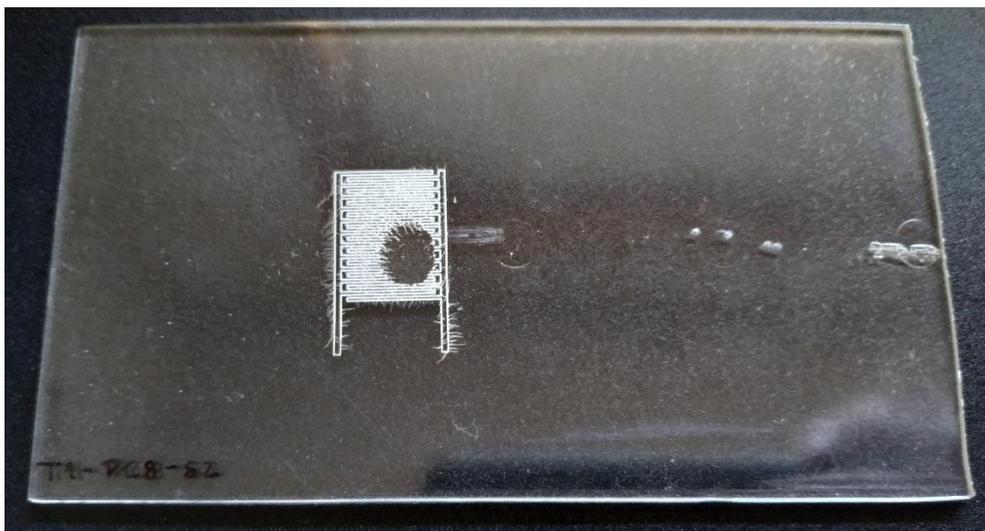


Figura 63: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC8-S2

Por observação das duas figuras anteriores, rapidamente se percebe que a ligação dos componentes do equipamento à terra, não surtiu o efeito desejado, pois não permitiu eliminar o efeito de *cobwebbing*, sendo que este volta a surgir em ambos os testes, sendo mais intenso na primeira placa impressa (T1-PC7-S2), devido aos fios se encontrarem em maior número e serem mais extensos.

Como era espectável, também surgiram vazios de tinta nestas placas, pois nada foi realizado de forma a tentar controlar este defeito nestes testes, mas observando o primeiro

resultado obtido (Figura 62), é perceptível que este defeito foi muito mais pequeno, do que em todos os resultados obtidos previamente, excluindo o único resultado onde este defeito não surgiu (Figura 56), não existindo, novamente, uma explicação para o porquê de esta placa em específico, não apresentar um vazio de tamanho semelhante aos restantes resultados. A segunda placa impressa (Figura 63), já apresentou um vazio em que as suas dimensões já se assemelham aos vazios obtidos em testes anteriores.

Um outro aspeto que já se vinha a verificar nos testes efetuados anteriormente nas placas de PC e que nada tem a ver com o processo de impressão do sensor com a tinta de prata, mas que foi muito mais evidente na última placa impressa (Figura 63), trata-se do surgimento de bolhas numa zona central da placa no seu lado direito. Este aparecimento de bolhas só é verificado após o processo de cura da tinta impressa, em que é utilizada uma temperatura de 150°C, que corresponde ao valor da temperatura de transição vítrea (T_g) do PC, podendo, assim, estas bolhas serem explicadas pela temperatura usada na cura da tinta ser a mesma da T_g, provocando um aquecimento em demasia do PC, provocando o surgimento desta estruturas. Deste modo, nos restantes testes com as placas de PC, o valor da temperatura de cura da tinta durante o processo de impressão é reduzida para 140°C, de modo a evitar o aparecimento das bolhas.

Concluindo, as alterações efetuadas ao equipamento, em nada melhoraram no processo de impressão por serigrafia, pois o defeito que se tentava controlar, continuou a surgir em todos os testes efetuados, sendo necessário recorrer a outras estratégias para tentar controlar o processo de impressão.

5.4.5. Quarta fase de testes efetuados nas placas de PC

Como referido no último parágrafo do ponto anterior, foi necessário voltar a procurar uma nova estratégia para contrariar o aparecimento do efeito de *cobwebbing*. Para tal, foi necessário voltar a recorrer ao livro "*How to be a great Screen Printer*", de forma a encontrar uma nova forma de proceder para eliminar este defeito. [20]

A nova solução que foi então encontrada, recai sobre a utilização de produtos anti estática que reduzem, ou eliminam por completo esta eletricidade acumulada. Desta forma, foram compradas uma espuma anti estática e um set de toalhetas anti estáticas para limpar a espuma, com a intenção de limpar as superfícies do equipamento e também a superfície da placa onde a tinta vai ser impressa. Em locais onde a espuma não é aconselhada de ser aplicada, como na tela

de impressão, apenas se passou uma toalhita anti estática, de forma a tentar reduzir ao máximo esta acumulação de energia não desejada.

Com esta nova solução apresentada, foi necessário testar os seus efeitos no processo de impressão em si, voltando-se a recorrer ao mesmo processo que foi utilizado no ponto anterior, ou seja, foi utilizado o mesmo desenho de sensor interdigital de pequenas dimensões e com um espaçamento mais reduzido entre os traços Figura 5, sendo assim definido qual o percurso a efetuar na máquina, e ainda os parâmetros de impressão, em que se usou os mesmos valores dos testes anteriores, 200 mm/s para a velocidade do *squeegee*, 45° para o seu ângulo e o posicionamento vertical manteve-se com -1 mm do valor base.

Estando o percurso e os parâmetros selecionados, passou-se para o processo de impressão em si, tendo sido produzidas três diferentes placas impressas com tinta de prata, sendo que os seus processos de impressão foram todos efetuados em separado. Com a impressão concluída, efetuou-se o processo de cura, e como foi referido no ponto anterior deste trabalho, um dos parâmetros deste processo foi alterado de forma a evitar o aparecimento de bolhas nas placas de PC, tendo sido a temperatura de cura reduzida para 140°C, mantendo-se o mesmo valor para o tempo do processo, sendo este de 15 minutos.

Como os resultados que foram obtidos foram bastante distintos, as três placas são apresentadas de forma individual e avaliadas também individualmente, de forma a realizar uma comparação de forma mais sucinta e ordenada. Iniciando-se a avaliação pela primeira placa obtida, esta encontra-se representada na Figura 64 e foi denominada de T1-PC9-S2.

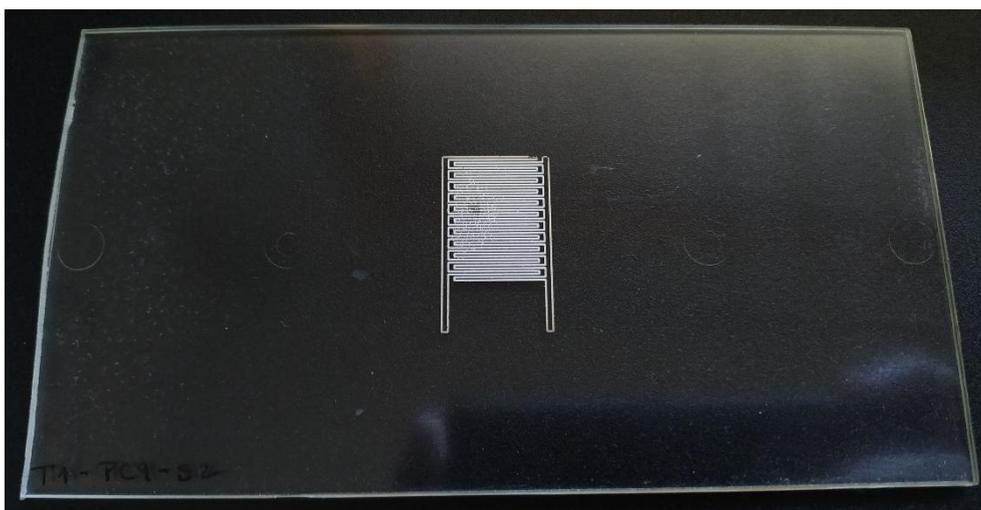


Figura 64: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC9-S2

Como é possível verificar, o resultado para esta primeira impressão foi bastante mais favorável do que as que foram sendo obtidas ao longo de todo o processo, pois o vazio que é costume aparecer, não se encontra neste teste e também o efeito de *cobwebbing* diminuiu consideravelmente, não sendo sequer verificado qualquer fio de tinta em volta de toda a estrutura impressa.

Apesar da melhoria clara, o processo ainda não foi totalmente perfeito, pois ainda existem alguns pontos que podem ser melhorados. O primeiro ponto recai sobre a zona central esquerda do sensor, onde é visível que, apesar de não ser um vazio por completo, a quantidade de tinta num certo ponto desta área é menor do que no restante sensor, sendo que ao observar a tela após a impressão, se voltou a verificar um bloqueio da malha neste mesmo local. Ainda focando no mesmo local, é possível verificar que em volta desta área com menos tinta, volta a existir o efeito de *cobwebbing*, pois verificam-se a existência de fios de tinta aleatórios, de dimensões muito reduzidas, a toda a volta deste ponto, o que permite, numa primeira fase, concluir que este defeito pode estar também associado aos bloqueios de tinta na tela, para além da eletricidade estática acumulada.

Por fim, é ainda verificado que na terminação do traço que se encontra mais acima do eletrodo esquerdo, a tinta não foi impressa com sucesso, existindo uma falha de tinta nesta zona, e ao verificar a tela de impressão após o teste, foi visível que também neste local ocorreu um bloqueio de tinta.

De seguida, e com a limpeza da tela efetuada, obteve-se um segundo resultado para a impressão pretendida, encontrando-se este representado na seguinte figura (Figura 65), sendo esta placa denominada de T1-PC10-S2.

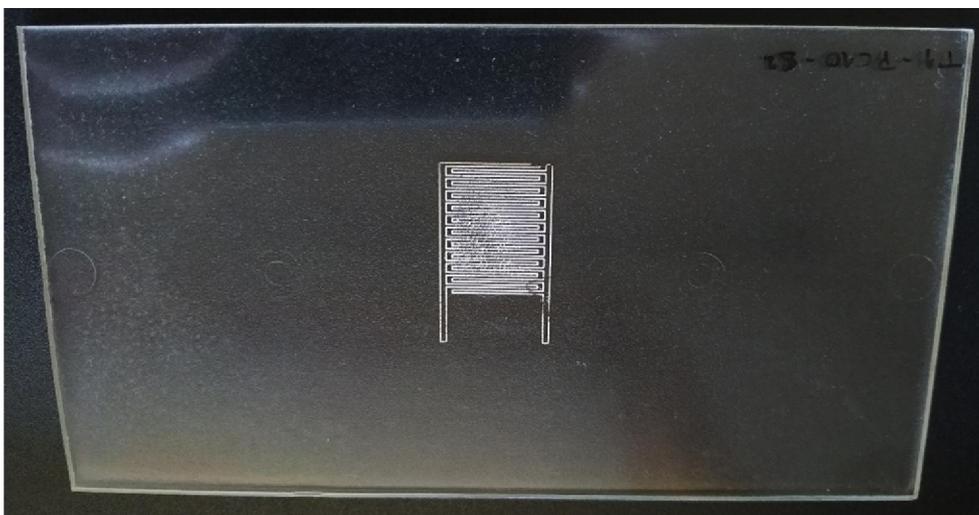


Figura 65: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC10-S2

Ao observar o resultado obtido para a segunda impressão, é claro que o segundo teste não obteve resultados tão favoráveis como o primeiro, apesar de quando avaliada a condição da impressão em termos de redução do efeito de *cobwebbing*, esta apresentar resultados bastante aceitáveis, principalmente em volta do sensor impresso.

Efetuada uma comparação com o primeiro resultado obtido nesta quarta fase de testes, é claramente notório que existiram mais defeitos de impressão nesta segunda impressão. Iniciando a avaliação pela zona central esquerda do sensor obtido, apesar de voltar a não existir um vazão de tinta no local, é perceptível que não existiu uma impressão de tinta completa nesta zona, sendo que quando comparada com a primeira placa, esta zona mal impressa aumentou as suas dimensões consideravelmente, voltando a provocar o surgimento de pequenos fios de tinta aleatórios de pequenas dimensões neste local, causando novamente o defeito de *cobwebbing* no processo de impressão.

Observando novamente o traço mais superior do eletrodo esquerdo, conclui-se que na sua terminação voltou a não existir uma impressão de tinta, exatamente no mesmo local onde tinha ocorrido anteriormente e com a mesma forma, o que significa que durante o processo de limpeza da tela, a zona referida não foi bem limpa, tendo ficado um pouco de tinta bloqueada na estrutura, causando a falha de impressão.

Por fim, e observando o canto inferior esquerdo do sensor e a terminação do eletrodo, verifica-se outra zona onde a impressão não foi efetuada corretamente, voltando a existir um novo bloqueio de tinta na tela de impressão.

Terminada a segunda avaliação de resultados, passou-se para a terceira impressão efetuada, voltando a efetuar-se uma limpeza da tela antes da mesma, sendo que foi necessário efetuar a mesma com uma atenção redobrada, de forma a tentar eliminar os bloqueios de tinta existentes. O resultado da terceira impressão encontra-se na Figura 66, sendo esta placa denominada de T1-PC11-S2.

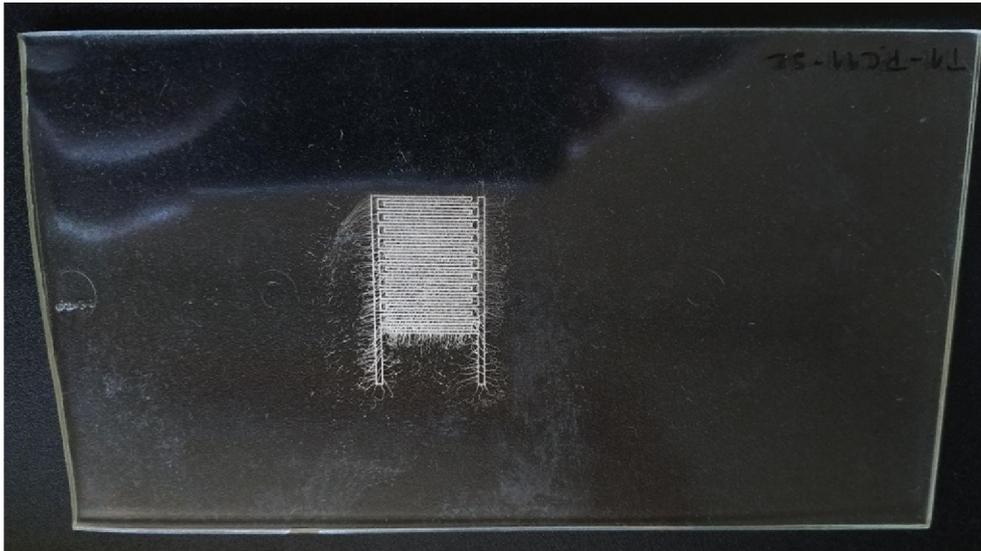


Figura 66: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC11-S2

Avaliando o resultado obtido, percebe-se que os bons resultados que estavam a ser obtidos quanto ao efeito de *cobwebbing*, não foram conseguidos com a terceira impressão, pois como é perceptível na Figura 66, aparecem múltiplos fios em redor do sensor impresso e na totalidade do interior do mesmo, sendo que alguns dos fios exteriores possuem dimensões consideráveis.

O contrário aconteceu tendo em conta a qualidade da impressão, pois não é verificado nenhum vazio de tinta ao longo do sensor, nem um preenchimento insuficiente da mesma, tendo-se conseguido limpar a tela na sua totalidade, de forma a que os erros ocorridos na placa anterior não tenham surgido novamente.

Apesar de só ter sido apresentada uma placa em que o resultado não foi tão favorável como nas duas primeiras, em termos do defeito de *cobwebbing*, foram efetuadas mais algumas experiências em que o processo foi exatamente o mesmo, só que os resultados obtidos são semelhantes ao desta última placa, fazendo com que os mesmos não fossem apresentados devido à semelhança entre os resultados e, de forma a focar o teste nos resultados mais favoráveis, avaliando o porquê destes terem surgido.

Desta forma, é perceptível que com os novos produtos utilizados, os resultados conseguem apresentar melhorias no controlo do defeito que mais surge e que mais preocupa, o efeito de *cobwebbing*, apesar de em nenhuma placa produzida se ter conseguido uma impressão considerada de perfeita, sendo esta quando não aparece o *cobwebbing* e a impressão decorre sem vazios ou preenchimentos incompletos.

Por fim, e de forma a obter uma perceção final da utilização dos produtos anti estática no processo de impressão, foi modificado apenas um último aspeto num último teste, tendo sido

selecionado o outro sensor interdigital disponível na tela e representado na Figura 6, de forma a perceber se os resultados também melhoram neste desenho que foi utilizado nos primeiros testes efetuados (Ponto 5.4.1.), ficando assim definido qual o percurso a utilizar neste último ensaio com os produtos.

Os restantes parâmetros envolvidos na técnica, incluindo os do processo de cura da tinta após a impressão, também são os mesmos que foram utilizados ao longo dos testes efetuado neste mesmo ponto do trabalho. Deste modo, apresenta-se na seguinte figura (Figura 67), o resultado obtido para este teste final, sendo a placa obtida denominada de T1-PC12-S1.



Figura 67: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T1-PC12-S1

Por lapso, durante o processo de impressão do sensor de pequenas dimensões, não foi devidamente tapado o sensor de grandes dimensões, e como tal, no lado direito da Figura 67, aparece uma porção deste mesmo sensor. Aparece ainda uma outra marca no lado direito da placa, pois a tela, por acidente, voltou a baixar após a impressão estar terminada, tendo deixado um pouco de tinta a mais na placa e, com receio de ao tentar limpar esta marca acabar por retirar um pouco do outro sensor, esta foi deixada, tendo-se procedido normalmente ao processo de cura da tinta.

Apesar destes erros, esta foi a placa que esteve mais próxima do resultado ideal, pois focando apenas a atenção no sensor de pequenas dimensões na imagem, não existe o efeito e *cobwebbing* a toda a volta do sensor impresso, surgindo apenas de forma muito reduzida, em alguns dos traços dos elétrodos que foram impressos.

Quanto aos vazios de tinta, estes são também quase nulos, mas não deixam de ser impeditivos para o processo na sua totalidade, sendo que apenas aparecem duas falhas de impressão em dois dos traços dos elétrodos impressos.

Dando por concluída esta quarta fase de testes nas placas de PC com a tinta de prata HPS FG57B, é possível concluir que nenhum dos quatro resultados obtidos durante o processo foram ideais, mas quando estes são comparados com os que tinham sido obtidos nas fases anteriores desta dissertação, existe uma clara melhoria após a aplicação dos produtos anti estáticos, pois nenhuma outra placa apresentou tão baixa apresentação do efeito de *cobwebbing*, assim como apenas uma outra placa (Figura 56) conseguiu apresentar resultados sem que vazios de grandes dimensões surjam.

5.5. Processo de impressão através da técnica de serigrafia com a tinta de prata DM-SIP-2001

Enquanto estavam a ser realizados os testes com a tinta de prata HPS FG57B e como os resultados não estavam de acordo com o que era esperado para este trabalho, surgiu a oportunidade de trabalhar com uma outra tinta também de prata, pois neste tempo foi adquirida outra tinta especializada para serigrafia, também com uma formulação a partir de partículas metálicas, em específico de prata e especializada em impressões com o objetivo de obter boas propriedades elétricas e físicas, especialmente em elasticidade e flexibilidade, sendo esta tinta ideal para o trabalho que se pretende efetuar nesta dissertação.

A tinta é desenvolvida pela empresa *Dycotec Materials* e é denominada comercialmente como DM-SIP-2001, sendo esta a tinta que irá ser usada nos restantes testes planeados, de forma a avaliar se existe algum defeito com a tinta previamente usada, devido ao seu tempo de vida já ter sido ultrapassado, ou se o problema se encontra no processo de impressão em si, como por exemplo na tela de impressão, pois esta já possui um defeito que veio com o seu fabrico, podendo este ter uma grande influência em todos os defeitos que foram sendo observados nos testes anteriores. A utilização de uma nova tinta facilita este estudo. A ficha técnica deste material encontra em anexo (Anexo X).

Com a disponibilização da nova tinta, em primeiro lugar deveria ser efetuada uma série de testes semelhante à que ocorreu com a primeira tinta de prata, mas como o processo de serigrafia já se encontrava pronto, os testes serão efetuados após a impressão.

5.5.1. Testes efetuados em filmes de PI

A disponibilidade de utilização desta nova tinta surge devido a um trabalho de investigação que se encontrava em desenvolvimento em que esta tinta era utilizada num processo de impressão por serigrafia em que o substrato utilizado se trata da poliimida (PI).

Deste modo, como este era o substrato em uso na investigação, e como era um dos substratos sugeridos para uso na ficha técnica da tinta (Anexo X), foi utilizado este mesmo material para um primeiro teste de comportamento da tinta com a tela de impressão que foi usada em todos os testes deste trabalho.

O filme de PI que foi utilizado foi nesta fase de testes foi o filme da marca *Dupont*, denominado comercialmente como *Kapton MT*, sendo que as suas características mais importantes são a sua espessura ser de cerca de 75 μm e a sua Tg apresenta valores perto dos 360°C.

Com a nova tinta e com o novo substrato devidamente caracterizados, deu-se início ao processo de impressão por serigrafia. Para tal, o primeiro passo volta a ser a seleção de um dos desenhos que se encontram na tela de impressão, que foi efetuada anteriormente (Ponto 3.2.1.), tendo sido escolhido um sensor interdigital que possui o espaçamento entre os seus múltiplos traços dos elétrodos de 0,5 mm, estando este desenho representado na (Figura 5), sendo que foi apenas impresso o sensor de pequenas dimensões, de forma a manter uma certa coerência com os testes que foram efetuados com a tinta anterior.

Dado que o desenho se encontrava escolhido, estando desta forma selecionado o percurso que a máquina vai efetuar para proceder à impressão desta mesma estrutura, apenas falta decidir quais os parâmetros que o equipamento usará para o processo. Desta forma, foi utilizada a velocidade do *squeegee* mínima permitida pela máquina, sendo esta de 200 mm/s, o que é um valor muito elevado para esta tinta, pois na sua ficha técnica (Anexo X), é recomendado o uso de velocidades entre os 30 e os 80 mm/s. O ângulo utilizado pelo componente de impressão manteve-se também nos 45° e a pressão, devido ao substrato ter uma espessura bastante mais reduzida do que as placas de PC, foi necessário reduzir o posicionamento vertical do *squeegee* em 2mm, rodando a válvula de -1 mm para +1 mm, ficando com uma altura igual à que foi utilizada nos filmes de PEN com a tinta anterior.

Escolhidos o percurso e os parâmetros a utilizar, deu-se início ao processo de impressão, tendo sido realizadas duas impressões individuais. Como os produtos anti estáticos apresentaram melhorias nos resultados obtidos anteriormente (Ponto 5.4.5.), estes voltaram a ser utilizados

neste processo, de forma a tentar controlar ao máximo o aparecimento do efeito de *cobwebbing*. Concluída a impressão, passou-se para o processo de cura da nova tinta, e por esta ser diferente, também os seus parâmetros de cura são distintos. Recorrendo à ficha técnica da tinta (Anexo X), encontra-se na mesma descritos os valores para a temperatura e para o tempo de cura, quando o substrato é o PI, sendo estes 200°C e 10 minutos, respetivamente. Os resultados obtidos para ambos os testes se encontram representados nas seguintes figuras (Figuras 68 e 69) e foram denominados de T2-PI1-S2 e T2-PI2-S2.



Figura 68: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PI1-S2



Figura 69: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PI2-S2

Como se trata de uma tinta completamente diferente da anterior e os seus parâmetros são também bastante distintos, era espectável que existissem algumas alterações nos resultados a obter nesta fase de testes, mas, como é possível perceber pela observação das imagens, alguns dos defeitos que surgiram anteriormente voltaram a repetir-se.

O primeiro defeito que é muito evidente em ambas as impressões, trata-se do mau processo de impressão da tinta, pois em ambos os sensores criados, existe o surgimento de um vazio de tinta com dimensões consideráveis na zona central das placas e ainda várias outras zonas, onde a tinta não foi impressa na sua totalidade, provocando diversos bloqueios de tinta na tela de impressão.

De seguida, e focando a atenção no efeito de *cobwebbing*, é notório que com esta tinta de prata, este efeito é muito reduzido, pois ambos os resultados não apresentam qualquer vestígio deste efeito, a não ser em volta do vazio que foi criado com a má impressão de tinta. Deste modo, e como apenas foram testados estes dois únicos filmes de PI, numa primeira instância, pode-se concluir que esta tinta não provoca um defeito de *cobwebbing* tão intenso durante o processo.

Um último aspeto que foi verificado após a impressão, foi de que esta nova tinta, após passar algum tempo de o processo estar terminado, começa a apresentar sinais de oxidação, pois a tinta começa a escurecer bastante após a passagem de um certo período de tempo. Como as imagens das Figuras 68 e 69 não foram obtidas logo após o fim da impressão, estas apresentam estes sinais de oxidação, apesar de nas imagens este efeito não ser completamente notório.

Com estes testes efetuados nos filmes de PI, foi perceptível uma ligeira melhoria no efeito de *cobwebbing*, mas os restantes defeitos continuam a surgir, sendo mesmo registado o aparecimento de um novo defeito, a oxidação da tinta.

5.5.2. Testes efetuados em filmes de PEN

Após a realização dos testes de impressão nos filmes de PI, a intenção seguinte era iniciar os testes com a nova tinta nas placas de PC, mas no dia em que foi efetuada a impressão nos filmes de PI, as placas de PC não se encontravam no local onde o teste estava a ser efetuado, não sendo possível iniciar esse processo. Mas como quando foram efetuados os testes com a primeira tinta de prata com os filmes de PEN, foram cortados mais dois filmes extra, procedeu-se a um teste com estes mesmos filmes, avaliando um comportamento deste substrato com a nova tinta de prata.

Deste modo, como o processo foi efetuado logo de seguida aos testes que foram realizados no ponto anterior, para facilitar a preparação do processo, foram utilizados o mesmo percurso e os mesmos parâmetros de impressão da experiência anterior, ou seja, foi utilizado o sensor de pequenas dimensões representado na (Figura 5), e ainda uma velocidade de 200 mm/s, um ângulo de 45° e o mesmo posicionamento vertical do *squeegee* de +1 mm.

Com todos os dados selecionados, procedeu-se à impressão de dois filmes de PEN, sendo que cada processo decorreu de forma individual, voltando a ser utilizados os produtos anti estáticos antes do início do processo nos diversos componentes da máquina e no filme a usar. Terminada a impressão, procedeu-se ao processo de cura, sendo este o único aspeto a alterar do processo efetuado anteriormente, devido à baixa Tg apresentada pelo PEN. Deste modo, foi utilizada uma temperatura de 110°C, pois já tinha sido a temperatura usada noutros testes com este material e um tempo de cura de 10 minutos, pois é o tempo recomendado pela ficha técnica da tinta de prata usada (Anexo X). Os resultados para ambos os filmes, encontram-se representados nas Figuras 70 e 71, estando os filmes denominados de T2-PEN1-S2 e T2-PEN2-S2.

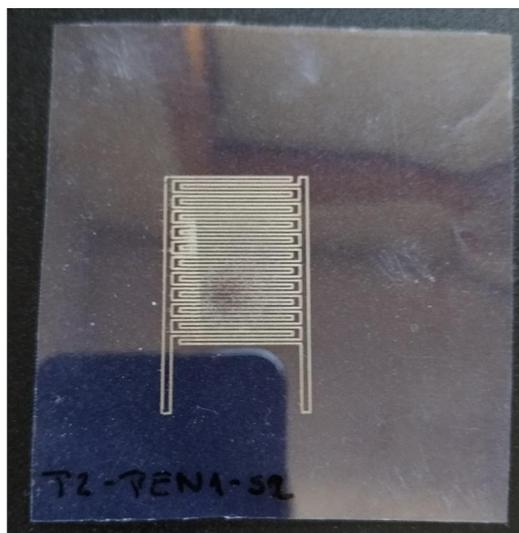


Figura 70: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PEN1-S2

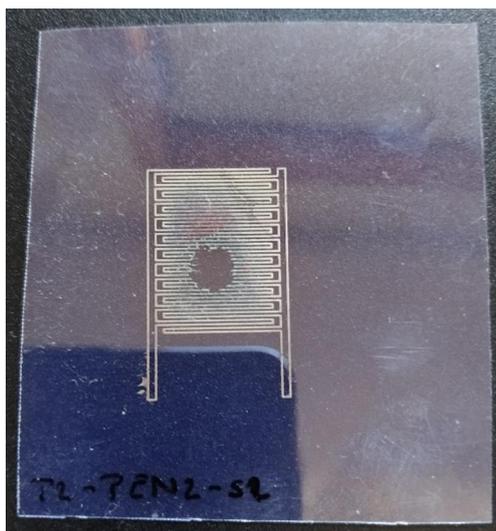


Figura 71: Imagem do resultado da impressão por serigrafia no filme T2-PEN2-S2

Iniciando a avaliação dos resultados, é conclusivo que estes testes efetuados no substrato de PEN apresentam melhores resultados do que os que foram realizados nos filmes de PI, apesar de os dois produtos obtidos apresentarem algumas diferenças entre si.

Em termos de qualidade de impressão, na primeira imagem obtida (Figura 70), observa-se que a impressão não foi ainda perfeita, mas melhorou bastante quanto aos filmes anteriores, pois apenas na zona central do sensor impresso se verifica uma ligeira falha, devido a uma impressão incompleta de tinta neste local, não sendo verificada mais nenhuma falha de impressão na mesma. O mesmo não se pode concluir com a segunda impressão efetuada (Figura 71), pois voltou a surgir um vazio de tinta de dimensões consideráveis no centro do sensor, apesar de esta ser a única falha de impressão no filme.

Quanto ao efeito de *cobwebbing*, os resultados são semelhantes aos obtidos para os filmes de PI, pois no primeiro teste não existiu qualquer vestígio de fios de tinta extra em volta do sensor, só sendo estes visíveis em volta da zona onde a impressão não foi bem conseguida e para o segundo teste acontece o mesmo que no primeiro, pois aparecem fios de tinta em volta do vazio mas também surgem pequenos fios de tinta no canto inferior esquerdo do sensor, na terminação inferior do eletrodo esquerdo.

O último defeito que tinha sido verificado na fase de testes com os filmes de PI, tratava-se do aparecimento de marcas de oxidação e este defeito também volta a aparecer no filmes de PEN impressos com a segunda tinta de prata, sendo visível na Figura 70 na zona central esquerda, onde existe uma mudança de cor no sensor e também na Figura 71, na zona envolvente do vazio

obtido, pois é visível na imagem que essa zona é ligeiramente mais escura do que as restantes zonas, fruto dessa mesma oxidação.

Por fim, de forma a efetuar uma comparação destes resultados com os que foram obtidos para a impressão com a primeira tinta de prata nos filmes de PEN (Ponto 5.4.3.), existe neste segundos testes uma clara evolução do processo de impressão, pois os vazios que são verificados em todos os testes, possuem menores dimensões com a tinta de prata DM-SIP-2001 e o efeito de *cobwebbing* é também é quase nulo nos segundos testes em volta da estruturas impressas, sendo apenas verificado em volta de zonas de má impressão, sendo os fios obtidos muito reduzidos e de baixas dimensões. O mesmo não é verificado nas impressões com a tinta de prata HPS FG57B, em que os vazios obtidos são os que possuem as maiores dimensões de todos os testes efetuados e o efeito de *cobwebbing* é verificado em todas as zonas do sensor.

5.5.3. Primeira fase de testes efetuados nas placas de PC

Terminada a fase de testes com os filmes disponíveis, o passo seguinte voltou a focar-se no substrato que se pretende utilizar no processo final de impressão, o policarbonato (PC). Desta forma, voltou a recorrer-se às placas de PC que foram previamente injetadas (Ponto 4.1.) de forma a proceder à impressão da nova tinta, testando-a num novo tipo de material, voltando a ser necessário caracterizá-la quanto às suas características físicas e elétricas.

Assim, foi necessário voltar a escolher todo o procedimento para a realização de novas impressões nestas placas. O primeiro passo consiste na escolha do primeiro desenho a ser impresso, recaindo a escolha para a primeira fase de testes sobre o sensor interdigital de pequenas dimensões e com um espaçamento entre os seus traços de 0,5 mm, correspondendo ao desenho representado na Figura 5. Com esta escolha procede-se também à escolha do percurso que a máquina terá de efetuar para a realização da impressão desta estrutura.

Estando o percurso final definido, inicia-se a escolha dos parâmetros a utilizar, recaindo todos no *squeegee*, começando pela velocidade do seu movimento, que se mantém no seu valor mínimo de 200 mm/s, de seguida pelo ângulo deste componente durante a impressão, que é de 45° e, por fim, o posicionamento vertical deste, possui o seu valor de base no equipamento, estando a válvula no valor de 0 mm.

Com o percurso e parâmetros selecionados, procede-se à impressão de três diferentes placas de PC com a segunda tinta de prata, sendo que antes da realização destas impressões

todo o equipamento e materiais usados, foram limpos com os produtos anti estáticos, com o objetivo de tentar eliminar ao máximo a produção de eletricidade estática. Terminada a impressão realizou-se o processo de cura da tinta impressa, sendo necessário fazer uma nova seleção dos seus parâmetros devido ao novo substrato utilizado. Seguindo o que é sugerido pela ficha técnica da tinta (Anexo X), foi utilizada uma temperatura de cura de 140°C, seguindo também o que foi concluído nos testes anteriores com as placas de PC, e um tempo para o processo de 10 minutos. Estas três impressões foram realizadas todas individualmente, sendo a tela limpa entre cada uma delas.

Como os resultados obtidos possuem características diferentes entre si, foram avaliados um de cada vez, de forma a que a avaliação seja mais clara. Assim, o primeiro resultado obtido encontra-se representado na seguinte imagem (Figura 72), sendo esta placa denominada de T2-PC1-S2.

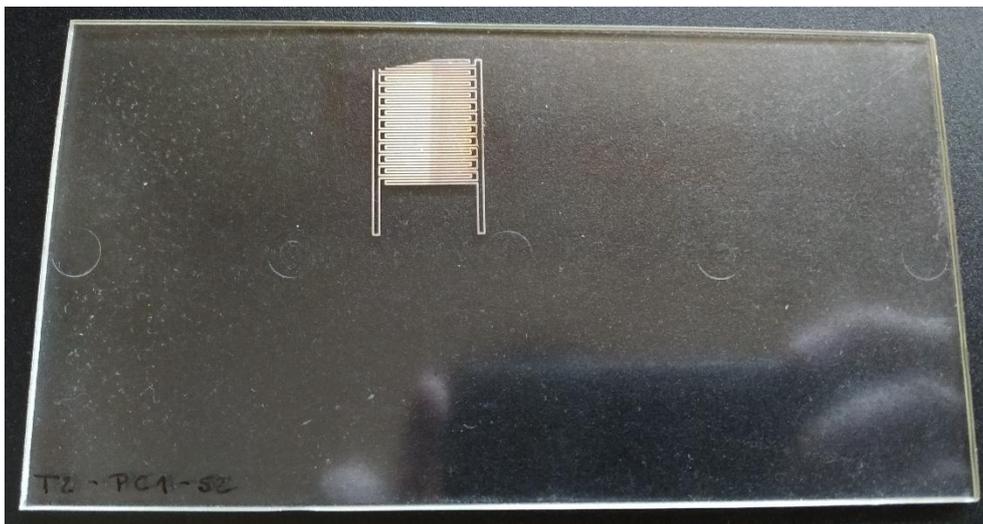


Figura 72: Imagem do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC1-S2

O resultado conseguido com esta impressão foi a que obteve melhores resultados num todo, pois não apresenta nenhum vestígio do efeito de *cobwebbing*, nem nenhum vazio ou impressão incompleta na zona central do sensor impresso, sendo este o único sensor, até este momento, onde este tipo de resultado foi conseguido.

Apesar desta melhoria, a impressão ainda não foi perfeita, pois no canto superior esquerdo da imagem, existiu uma falha de impressão, não estando o sensor completo devido à não existência de qualquer vestígio de tinta nesse local, devido a um novo bloqueio na tela na zona equivalente.

Outro aspeto menos positivo volta a focar-se na oxidação da tinta, mas, neste caso, o defeito não surgiu devido à exposição ao meio ambiente onde ficou guardada, mas sim a um lapso que decorreu durante o armazenamento de todos os testes, onde um dos filmes de PEN impressos anteriormente, ficou a tapar parcialmente o filme, sendo que foi no local que ficou tapado que surgiu a oxidação da estrutura, o que leva à conclusão de que talvez o PEN não seja totalmente compatível com a segunda tinta de prata (DM-SIP-2001), provocando a oxidação das impressões quando em contacto com o material.

Terminando a avaliação do primeiro resultado obtido, apresenta-se na seguinte figura (Figura 73), o resultado da segunda impressão efetuada, sendo de referir que na figura, se encontram representadas duas imagens, devido a uma alteração do fundo utilizado para a captura da mesma, tendo sido obtida uma segunda imagem com o intuito de auxiliar a observação da estrutura impressa. Esta segunda placa de PC impressa foi denominada de T2-PC2-S2.



Figura 73: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC2-S2

O segundo resultado obtido continuou a apresentar bons resultados, pois o processo de impressão na sua totalidade não apresentou qualquer falha, não existindo nenhum vazio de tinta, nem um processo de impressão incompleto, também não provocando o bloqueio de zona na tela de impressão.

Apesar dos bons resultados para a impressão, o efeito de *cobwebbing* voltou a surgir, ainda que muito ligeiramente, pois na zona central do sensor impresso, entre os diversos traços que são impressos, existem pequenos de fios de tinta a ligá-los, como é possível verificar na imagem do lado direito da Figura 73.

Por fim, é ainda possível verificar que nas duas primeiras placas não é verificado o efeito da oxidação por exposição ao ar presente no ambiente onde estas foram guardadas, sendo esta

um aspeto positivo da utilização do PC como substrato no processo de impressão com esta segunda tinta de prata.

Em último lugar, apenas falta avaliar os resultados obtidos para a última placa impressa, estando esta representada na Figura 74, voltando a recorrer-se a duas imagens distintas para a representação do resultado obtido para a placa que foi denominada de T2-PC3-S2.



Figura 74: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC3-S2

Este último resultado acaba por ser o pior dos três obtidos, pois apenas neste volta a surgir uma zona com impressão incompleta na zona central do sensor impresso, o que volta a provocar um bloqueio de tinta na tela de impressão. Também como já vinha a ser observado em resultados semelhante, a toda a volta da zona onde a impressão não se encontra em boas condições, volta a surgir o efeito de *cobwebbing*, sendo os fios provocados por este defeito, visíveis na imagem do lado direito da Figura 74.

Um aspeto positivo desta última impressão da primeira fase de testes, volta a ser o não aparecimento de oxidação da tinta de prata impressa, confirmando as suspeitas de que com o PC, esta tinta não irá sofrer este tipo de efeito.

Após terminada as impressões das três placas de PC, é possível retirar algumas conclusões acerca deste processo com a nova tinta de prata. A primeira recaí sobre o efeito de *cobwebbing*, pois pela primeira vez desde o início deste trabalho, não foi verificado este defeito numa das placas obtidas, o que é bastante positivo, pois este defeito é bastante impeditivo para a obtenção de um valor certo para as características elétricas do sensor impresso. Ainda assim, as restantes placas ainda apresentaram este defeito, sempre numa zona central do sensor, e a explicação pode ser devido à proximidade dos traços pretendidos, pois o espaçamento entre eles é muito reduzido e o equipamento não possui a capacidade de produzir estruturas de tamanhos tão reduzidos, pois a sua velocidade de impressão é muito elevada e não é possível reduzi-la mais.

O outro aspeto mais preocupante para este trabalho recai sobre os diversos maus resultados de impressão observados, pois apenas numa destas três placas não surgiu este defeito. A explicação para este problema não é muito clara, pois nem sempre o bloqueio de tinta na tela, que provoca este erro, ocorre no mesmo local, sendo por vezes muito aleatório, apesar de ocorrer com maior probabilidade numa zona central do sensor. É possível que o valor de velocidade demasiado elevado, para o que é recomendado pela ficha técnica da tinta (Anexo I), tenha algum efeito negativo, mas não existem evidências de que isto é verdade, devido à velocidade já se encontrar no mínimo permitido pela máquina.

Quanto à evidência de oxidação da tinta, esta não foi verificada em nenhum dos casos, a não ser na primeira impressão, onde metade do sensor apresenta marcas de oxidação, mas esta deveu-se a um contacto dessa zona afetada com um filme de PEN, podendo-se concluir que quando a tinta de prata DM-SIP-2001 é impressa numa placa de PC, esta não irá oxidar num período de tempo reduzido.

Por fim, quando comparados todos os testes efetuados com a primeira tinta de prata nas placas de PC, com o sensor selecionado nesta primeira fase de testes, com os resultados obtidos com a segunda tinta, é bastante perceptível que a segunda apresenta resultados bastante superiores, ainda que o processo não apresente resultados ideais, podendo-se concluir que a primeira tinta de prata possui uma grande influência nas dimensões dos defeitos que foram sendo obtidos nos testes com a mesma.

5.5.4. Segunda fase de testes efetuados nas placas de PC

Após a conclusão da primeira fase de testes de impressão nas placas de PC, e como os resultados apresentavam algumas melhorias quanto aos defeitos que vinham a ser apresentados em ensaios anteriores, foi necessário testar outros tipos de sensores que se encontravam na tela de impressão, de forma a obter uma perceção dos efeitos que cada desenho apresenta no processo de impressão.

Deste modo, foi selecionado o outro desenho de um sensor interdigital, continuando a usar o sensor de pequenas dimensões, sendo o espaçamento entre os traços dos dois elétrodos de 1 mm, estando este sensor representado pela Figura 6. A partir desta seleção da estrutura a imprimir, procedeu-se à seleção do percurso que a máquina faz para o produzir.

O passo seguinte requer a seleção dos parâmetros a utilizar no *squeegee*, para efetuar a impressão, tendo sido selecionados exatamente os mesmos parâmetros que foram utilizados no ponto anterior, de forma a manter uma certa coerência, que facilita a avaliação dos resultados, no caso de estes serem distintos. Assim, foi utilizada uma velocidade para o *squeegee* de 200 mm/s, um ângulo de 45° e o posicionamento vertical do componente encontra-se na sua posição base de 0 mm.

Com ambas as seleções efetuadas, procede-se à limpeza da placa e do equipamento com os produtos anti estáticos, de forma a controlar a eletricidade estática inerente ao processo e deu-se início ao mesmo, tendo sido efetuada a impressão em duas placas, sendo os seus processos completamente individuais. Após o término da impressão, efetuou-se a cura da tinta, recorrendo-se aos parâmetros que foram utilizados no ponto anterior, sendo estes de 140°C para a temperatura de cura e 10 minutos para o tempo do processo.

De forma a que a avaliação dos resultados seja efetuada de forma coerente, os resultados obtidos serão avaliados um de cada vez, iniciando-se pela primeira placa impressa que se encontra representada nas duas seguintes imagens da Figura 75, em que a placa é denominada de T2-PC4-S1.



Figura 75: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC4-S1

Com o primeiro resultado obtido, é possível perceber que o processo de impressão na sua totalidade volta a apresentar defeitos. Assim, é possível observar que o efeito denominado de *cobwebbing*, voltou a surgir neste teste, pois ao longo de todo o sensor é visível pequenos fios de dimensões muito reduzidas, mas que implicam a obtenção das características elétricas da tinta no formato esperado. Este defeito não foi verificado em volta do sensor impresso, mantendo a coerência com os resultados obtidos na fase de testes anteriores.

Apesar deste defeito, o processo de impressão da tinta em si foi perfeito, pois não existiu uma única falha de tinta ao longo de todo o sensor, melhorando consideravelmente os resultados obtidos anteriormente, para este dimensionamento de sensor interdigital.

Também é possível concluir que o defeito de oxidação da tinta não volta a surgir na tinta de prata, confirmando o que foi concluído no final dos testes do ponto anterior.

De seguida, na Figura 76, encontra-se representado em duas imagens o resultado para a segunda e última impressão da segunda fase de testes, sendo esta denominada de T2-PC5-S2.



Figura 76: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC5-S1

O segundo resultado obtido é muito semelhante ao que foi obtido anteriormente no primeiro teste efetuado neste ponto, pois volta a ser obtida uma impressão de tinta perfeita, sem que exista uma única falha de tinta ou uma impressão incompleta, assim como voltam a surgir os pequenos fios do efeito de *cobwebbing*, influenciando novamente o processo de obtenção das características elétricas dos resultados. Também foi obtido o mesmo resultado para a oxidação da tinta, pois esta também não foi detetada neste teste.

Com as avaliações terminadas e com resultados tão semelhantes entre si, é possível retirar algumas conclusões sobre o processo de impressão, para a segunda tinta de prata DM-SIP-2001, nas placas de PC, com o sensor interdigital em que é utilizado um espaçamento de traços maiores.

A primeira conclusão parte do desenho selecionado, pois com esta estrutura a imprimir, o processo torna-se bastante mais simples de efetuar, o que acaba por se verificar ao avaliar a qualidade da impressão das duas placas obtidas, não existindo qualquer defeito de impressão quanto ao preenchimento do sensor na placa. O mesmo não se pode concluir quanto ao *cobwebbing*, pois este aumentou a sua influência neste desenho, tendo surgido ao longo de todos os traços impressos para o sensor.

Os resultados obtidos corroboram o que foi concluído na primeira fase de testes, em que é perceptível que a tinta de prata usada, quando impressa em placas de PC, não apresenta quaisquer sinais de oxidação, sendo um aspeto importante para o trabalho.

Por fim, comparando os resultados obtidos neste ponto do trabalho, com os que foram obtidos com a primeira tinta e com o mesmo desenho de sensor (Pontos 5.4.1. e 5.4.5), é notável uma grande melhoria de resultados, pois ao contrário do que aconteceu com os resultados anteriores (ignorando o resultado obtido na Figura 67, em que a impressão também foi boa), não existiu qualquer vazio de tinta ou impressão incompleta, tendo a impressão sido considerada como perfeita. Apesar de nos resultados deste ponto, assim como na Figura 67, também surgirem alguns fios de pequenas dimensões entre os traços impressos, criando um efeito de *cobwebbing* reduzido, nos restantes resultados o efeito possui dimensões muito superiores, chegando a apresentar fios de tinta a toda a volta do sensor, influenciando as dimensões finais dos mesmos. Deste modo, é possível concluir novamente, que a tinta de prata usada nesta fase de testes possui um comportamento superior à primeira tinta, apresentando resultados, na sua maior parte, mais perto do que é esperado neste trabalho.

5.5.5. Terceira fase de testes efetuados nas placas de PC

Esta terceira fase de testes com a segunda tinta, corresponde à última que será efetuada e como os resultados anteriores apresentaram diversas melhorias, foi selecionado o último sensor da tela que ainda não tinha sido testado neste trabalho para realizar os testes, sendo este o sensor com um formato circular, representado na Figura 7, sendo que apenas se procedeu à impressão de um dos sensores de pequenas dimensões. Apesar de existirem mais estruturas disponíveis para impressão, como a rede verificada na Figura 8, esta não foi testada, devido às suas grandes dimensões, pois esta tinta que se encontrava em uso não estava disponível em muita quantidade, sendo necessário controlar a quantidade de tinta a usar, sendo também este o motivo pelo qual nunca foi testada nenhuma versão de grandes dimensões dos sensores impressos anteriormente.

Com a estrutura a imprimir e o percurso necessário para a efetuar selecionados, o passo seguinte recai na escolha dos valores para os parâmetros do processo a utilizar, sendo que como o substrato a usar é o mesmo do ponto anterior e o desenho não possui influência nesta seleção, foram escolhidos os exatos valores que foram utilizados na fase de testes anterior, sendo estes de

200 mm/s para a velocidade do *squeegee*, 45° para o seu ângulo e o posicionamento vertical do componente manteve-se no seu valor base de 0 mm.

Terminadas as seleções para o percurso e os parâmetros, procedeu-se novamente à limpeza do equipamento e das placas a imprimir, com os produtos adquiridos para remover a eletricidade estática acumulada durante os processos, realizando-se de seguida os processos de impressão de duas placas, sendo os seus resultados obtidos de forma individual, não existindo uma impressão sequencial. Após a impressão, efetuou-se o processo de cura das tintas impressas, tendo sido selecionados os mesmos parâmetros dos testes anteriores para as placas de PC, sendo estes de 140°C para a temperatura de cura e 10 minutos para o tempo do processo.

Os resultados obtidos para ambas as placas são muito semelhantes, de forma a que as suas avaliações serão efetuadas em simultâneo, comparando, assim, os resultados logo à partida. Deste modo, nas seguintes figuras (Figura 77 e 78), encontram-se representados os resultados obtidos para as impressões dos sensores circulares, tendo sido obtidas duas imagens distintas para cada uma das figuras e foram ainda denominadas de T2-PC6-S3 e T2-PC7-S3.



Figura 77: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC6-S3



Figura 78: Imagens do resultado da impressão por serigrafia na placa T2-PC7-S3

A partir das duas figuras obtidas, é perceptível que a impressão deste novo sensor decorreu de forma normal, pois ambos os testes não apresentam qualquer tipo de falha, quanto ao processo de impressão em si, pois não se verificam nem vazios, nem zonas em que a impressão não foi completada na sua totalidade, o que permite concluir que também é possível proceder à impressão de um sensor com dimensões físicas diferentes dos que foram obtidos anteriormente, nos restantes testes efetuados.

Apesar da boa impressão de tinta, também nestas novas estruturas se verificou a existência do defeito de *cobwebbing*, pois em ambos os resultados obtidos se encontram pequenos fios de tinta entre os traços impressos, sendo que na primeira placa impressa com este sensor (Figura 77), este defeito é mais notório do que no segundo (Figura 78), pois os fios são em maior número e com maiores dimensões. Este defeito volta a provocar diferenças nas características elétricas no sensor, pois cria ligações extra entre os traços, comprometendo o efeito desejado com o sensor.

Para terminar a avaliação destes resultados, apenas falta referir que mais uma vez, não existe qualquer vestígio de oxidação da tinta impressa, corroborando o que foi concluído nas duas fases de impressão anteriores, de que as placas de PC não promovem a oxidação desta tinta de prata.

Para concluir e como não existem mais resultados semelhantes com sensores iguais a este, efetua-se uma pequena comparação global com todos os resultados obtidos para as placas de PC, em que com esta segunda tinta de prata (DM-SIP-2001), os resultados obtidos neste último teste são muito semelhantes a todos os outros, pois existe algum efeito de *cobwebbing* dentro das estruturas impressas, ainda que reduzido, e o processo de impressão em si, é considerado como ideal, pois não existe qualquer falha.

5.6. Realização de testes de caracterização física e elétrica nos resultados obtidos

Dando por concluída a fase de testes de impressão por serigrafia de múltiplos filmes e placas com as duas tintas de prata disponíveis, foi necessário efetuar alguns testes com o objetivo de caracterizar os resultados obtidos quanto às suas propriedades físicas e elétricas. Deste modo, foram efetuados três testes distintos, a obtenção do valor da resistência elétrica da tinta impressa nos substratos, um teste de dobra em algumas das placas obtidas e ainda um novo registo dos

valores para a resistência elétrica após a dobra das placas, verificando as alterações que esta provoca nos resultados.

5.6.1. Obtenção da resistência elétrica dos resultados impressos

Como um dos aspetos mais importantes na realização deste trabalho, recai sobre a capacidade de fornecer características elétricas a substratos, através de impressão de tintas com partículas condutoras, é necessário após o processo de impressão, caracterizar os resultados quanto à sua capacidade elétrica.

Para tal, voltou a recorrer-se à obtenção dos valores de resistência elétrica através do método de dois pontos, que foi descrito num ponto anterior do trabalho (Ponto 3.2.2.2.). A intenção principal deste teste, seria de obter a resistência elétrica da tinta em cada resultado, de forma a calcular a resistividade elétrica para cada um dos filmes e placas, mas tal não foi possível devido ao defeito que a tela de impressão apresenta, que dificulta o cálculo da área da estrutura impressa, assim como também devido aos múltiplos efeitos que influenciam os resultados obtidos, não sendo possível comparar os resultados que seriam obtidos, com os que são fornecidos nas fichas técnicas das tintas ou em bases de dados. Assim, apenas foram obtidos os valores de resistência elétrica, de forma a obter informações sobre a ordem de grandeza desta característica, que já auxilia na caracterização elétrica.

Como com este método, se recorre às amarras do multímetro utilizado para obter o valor pretendido, o teste foi efetuado duas vezes para cada sensor realizado, pois estes são compostos por dois elétrodos que não se deveriam tocar, apesar de em alguns dos resultado obtidos isso não acontecer devido ao efeito de *cobwebbing*, sendo necessário obter o valor para cada elétrodo. Assim, colocou-se cada amarra nas zonas inferiores e superiores de cada elétrodo, e registou-se o valor obtido para cada peça testada.

Os primeiros resultados a serem testados foram as placas de PC impressas com a primeira tinta de prata no Ponto 5.4.1., tendo sido o teste efetuado como referido no parágrafo anterior, obtendo-se dois valores para cada elétrodo, sendo estes elétrodos denominados como esquerdo e direito de forma a facilitar a descrição dos resultados, que se encontram registados na seguinte tabela (Tabela 16).

Tabela 16: Resultados da resistência elétrica para a primeira fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T1-PC1-S1	5,43 Ω	5,09 Ω
T1-PC2-S1	17,9 Ω	7,91 Ω
T1-PC3-S1	22,61 Ω	<i>Overload</i>

Como era expectável para a primeira tinta usada (HPS FG57B), tendo em conta os resultados que foram sendo obtidos ao longo dos restantes testes em que foi obtido um valor para a resistência elétrica desta tinta (Ponto 5.2.), os valores apresentados encontram-se na ordem das unidades e dezenas de ohm (Ω), apesar de estes serem um pouco mais elevados do que os anteriormente obtidos, mas isto é explicado pelo dimensionamento muito mais pequeno das estruturas impressas nos testes em estudo, que provoca um aumento da capacidade elétrica do sensor.

Apenas numa das placas, não foi possível obter um valor para a resistência elétrica de um dos eléctrodos, o do lado direito, em que o aparelho de medição não conseguiu obter um valor dentro dos seus limites mínimos e máximos, fornecendo o resultado de *Overload* (sobrecarga). Este pode ser explicado pelo mau processo de impressão, principalmente do lado direito do sensor, o que afeta o desempenho elétrico da mesma, como é possível verificar na Figura 55.

De seguida, foram obtidos os valores para a segunda fase de testes para a primeira tinta de prata ainda impressa nas placas de PC, estando estes resultados descritos no Ponto 5.4.2. De igual modo, foram obtidos os valores para ambos os eléctrodos impressos, estando estes resultados descritos na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados da resistência elétrica para a segunda fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T1-PC4-S2	26,33 Ω	18,13 Ω
T1-PC5-S2	9,91 Ω	13,27 Ω
T1-PC6-S2	<i>Overload</i>	20,91 Ω

Os resultados voltam a ser muito semelhantes aos da primeira fase de impressão, em que se mantém no mesmo intervalo de valores, sendo este das unidades e dezenas de ohm (Ω), apesar de apresentarem valores ligeiramente mais elevados, e isto pode ser explicado pelas dimensões

geométricas mais reduzidas para o sensor impresso nesta segunda fase de testes, pois o espaçamento entre os traços dos elétrodos é menor, favorecendo o aumento dos valores obtidos.

Também nesta segunda fase, é observado que o valor para o elétrodo esquerdo da terceira placa impressa, não foi registado com sucesso, devido novamente a ter sido fornecido pela máquina a informação de *overload*. Este pode ser explicado pelo vazio de tinta de grandes dimensões que é encontrado nesta placa (Figura 58), mais proeminente no lado esquerdo do sensor, provocando a alteração das características elétricas da placa.

Os testes que foram efetuados de seguida, correspondem aos resultados obtidos para a impressão da primeira tinta de prata, nos filmes de PEN, encontrados no Ponto 5.4.3. Foram novamente obtidos os valores para ambos os elétrodos de cada impressão, estando estes representados na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da primeira tinta nos filmes de PEN

Substrato	Elétrodo esquerdo	Elétrodo direito
T1-PEN1-S1	6,94 Ω	7,39 Ω
T1-PEN2-S1	16,95 Ω	23,53 Ω

Os valores obtidos, voltam a ser mais uma vez muito semelhantes aos apresentados nas duas tabelas anteriores, apesar do substrato ter sido alterado, mantendo num intervalo entre as unidades e dezenas de ohm (Ω), ainda que tenham baixado um pouco para valores mais semelhantes aos da Tabela 16, sendo isto explicado pelo uso do mesmo tipo de sensor nestes dois testes.

Um aspeto positivo desta terceira obtenção de valores, foca-se no sucesso de obtenção dos mesmos para todos os elétrodos em estudo, pois os sensores encontram-se em bastante mau estado, como verificado nas Figuras 59 e 60.

Após este terceiro teste, voltou a reter-se novamente o foco nas placas de PC, nos testes onde foi efetuada uma ligação do equipamento de serigrafia à terra, de forma a tentar controlar, ainda que sem sucesso, o efeito de *cobwebbing*, avaliando também esta alteração quanto às características elétricas dos resultados obtidos, descritos no Ponto 5.4.4. Deste modo, foram obtidos os valores para ambos os elétrodos de cada sensor, estando estes representados na seguinte tabela (Tabela 19).

Tabela 19: Resultados da resistência elétrica para terceira fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T1-PC7-S2	2,87 Ω	3,37 Ω
T1-PC8-S2	2,97 Ω	7,61 Ω

Estes resultados são algo diferentes dos que vinham sendo obtidos até esta fase, pois os valores diminuíram consideravelmente, apenas sendo apresentados em unidades de ohm (Ω), não sendo totalmente claro o porquê de isto ocorrer. Talvez, devendo-se ao facto de se ter tentado controlar a eletricidade estática, os valores possam ter sofrido alguma alteração, mas os resultados apresentados nas Figuras 62 e 63, são muito semelhantes em termos de aspeto, aos que vinham sendo obtidos, não sendo clara a razão para esta ocorrência.

Tal como já tinha ocorrido para os valores anteriores, voltou a não surgir nenhuma falha na obtenção dos valores de resistência elétrica para estes resultados, apesar do mau estado das impressões obtidas.

Por fim, foram registados os últimos valores de resistência elétrica, para os últimos resultados obtidos para a impressão de placas de PC, com a primeira tinta de prata HPS FG57B. Este último teste, foi efetuado tendo em conta a utilização de produtos anti estáticos, com o objetivo de tentar, mais uma vez, controlar o aparecimento do efeito de *cobwebbing*, tendo este apresentado alguns casos de sucesso, como é possível verificar no Ponto 5.4.5. Assim, os valores obtidos para ambos os eléctrodos dos sensores encontram-se descritos na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados da resistência elétrica para a última fase de impressão da primeira tinta nas placas de PC

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T1-PC9-S2	10,64 Ω	56,74 Ω
T1-PC10-S2	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>
T1-PC11-S2	1,65 k Ω	61,05 k Ω
T1-PC12-S1-1	3,26 Ω	1,58 Ω
T1-PC12-S1-2	20,03 Ω	13,14 Ω

Os resultados obtidos são bastante diferentes entre si, não sendo possível fazer uma avaliação conjunta dos mesmos. Desta forma, iniciando-se a avaliação pela primeira placa (T1-PC9-S2), o seu resultado encontra-se um pouco acima dos que estavam a ser obtidos, mas talvez seja o resultado mais real que se pode esperar, pois este teste de impressão foi um dos melhores

obtidos para a primeira tinta de prata com este sensor, como é possível verificar na Figura 64. Os seus valores são apresentados em dezenas de ohm (Ω).

De seguida, tentou-se obter o valor para a placa T1-PC10-S2, mas tal não foi possível, pois para ambos os elétrodos do sensor foi obtido o sinal de *overload* no equipamento de medição. Este pode ser explicada pelas falhas de impressão na placa, vistas na Figura 65, sendo que estas falhas se encontram posicionadas nas terminações dos elétrodos, impedindo uma obtenção corretas da resistência elétrica.

O resultado seguinte apresenta-se como o mais elevado dos que foram obtidos até este ponto nesta experiência, pois os seus valores encontram-se em valores de unidades e dezenas de kilohm ($k\Omega$). Estes valores podem talvez ser explicados pelo efeito de grandes dimensões de *cobwebbing* (Figura 66), ainda que não seja o primeiro teste onde este efeito possui esta relevância, não possuindo os outros resultados valores de resistência elétrica tão elevados, não sendo claro que este seja o motivo para esta discrepância.

Por fim, foram obtidos os valores para a placa T1-PC12-S1, em que por lapso tinham sido impressos dois sensores (Figura 67), com um espaçamento entre os traços inferior às três placas inferiores, sendo que cada um possui também um comprimento distinto, tendo sido registados os valores para ambos os valores impressos.

Começando pelo sensor de comprimento inferior, denominado na tabela anterior como T1-PC12-S1-1, os valores obtidos apresentaram-se em unidades de (Ω), possuindo valores bastante baixos, podendo ser explicados pelo maior espaçamento entre os traços, e também devido ao facto de a impressão ser quase perfeita, existindo apenas um pouco de *cobwebbing*.

O último sensor impresso, o que possui um comprimento mais longo, denominado na tabela anterior como T1-PC12-S1-2, apresenta valores superiores ao do sensor anterior, estando estes nas dezenas de ohm (Ω). Os valores apresentam-se como superiores, devido ao facto de o seu comprimento ser também superior, não possuindo novamente qualquer falha de impressão, a não ser um pouco de *cobwebbing*.

Terminadas as avaliações de resistência elétrica para a primeira tinta de prata HPS FG57B, é possível concluir que o comportamento da tinta se manteve constante ao longo da maior parte dos resultados, sendo observados alterações entre as unidades e as dezenas de ohm. Os resultados menos favoráveis, na sua maioria, estão relacionados com falhas de impressão, que influenciam a capacidade de uma boa obtenção dos resultados.

É ainda possível observar que a utilização dos produtos anti estáticos e da alteração que foi efetuada no equipamento, com o objetivo de reduzir ou eliminar o efeito de *cobwebbing*, diminuí os valores obtidos, quando considerados os resultados com valores aceitáveis, apresentando-se mais baixos e quase sempre nas unidades de ohm, não passando para as dezenas.

Concluída a obtenção dos resultados para a resistência elétrica para primeira tinta, passou-se para os resultados obtidos com a segunda tinta de prata DM-SIP-2001. Iniciando-se com a fase de impressão da tinta nos filmes de PI, forma avaliados os dois filmes equivalentes ao Ponto 5.5.1. Os valores obtidos para ambos os elétrodos dos sensores impressos encontram-se representados na Tabela 21.

Tabela 21: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da segunda tinta nos filmes de PI

Substrato	Elétrodo esquerdo	Elétrodo direito
T2-PI1-S2	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>
T2-PI2-S2	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>

Como é possível perceber a partir da tabela anterior, não foi possível obter nenhum resultado para nenhum dos elétrodos impressos em cada sensor, sendo que no aparelho de medição surgiu sempre o alerta de *Overload*. Como a impressão destes filmes possui diversas falhas, como vazios de tinta, impressões incompletas e oxidação da tinta (Figuras 68 e 69), a tinta não se apresenta nas suas melhores condições, após o seu processo de impressão, sendo este o motivo para as más características elétricas desta tinta nos filmes de PI.

De seguida, mudou-se o substrato a utilizar no processo, obtendo-se os valores para os filmes de PEN impressos com a segunda tinta de prata, tendo sido realizados os testes nos dois filmes que se encontram descrito no Ponto 5.5.2. Estes valores para ambos os elétrodos dos sensores impressos, encontram-se descritos na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados da resistência elétrica para a fase de impressão da segunda tinta nos filmes de PEN

Substrato	Elétrodo esquerdo	Elétrodo direito
T2-PEN1-S2	1,92 k Ω	11,95 Ω
T2-PEN2-S2	7,22 Ω	<i>Overload</i>

Tal como aconteceu com os resultados anteriores, nenhum dos resultados obtidos se apresenta como um bom resultado, pois para o primeiro filme, o valor para o elétrodo esquerdo apresenta um valor muito elevado, na ordem das unidades de kiloohm, enquanto que o elétrodo

direito do mesmo filme apresenta um valor na ordem das dezenas de ohm, existindo uma grande discrepância entre os dois resultados obtidos. Isto possível explicação para o sucedido, pode ser devido a alguma oxidação observada no filme junto ao elétrodo esquerdo (Figura 70), que pode ter provocado esta alteração nos valores.

Quanto ao segundo filme, os resultados são bastante semelhantes ao primeiro, pois o elétrodo esquerdo possui um valor considerado como normal e o outro elétrodo não possui um valor, tendo sido mais um caso de *overload*. O motivo para estes valores, pode estar mais uma vez relacionado com a oxidação da tinta numa zona central do sensor, como é possível verificar na Figura 71.

Terminada a avaliação nos filmes de PEN, voltamos ao substrato principal deste trabalho, as placas de PC, avaliando a primeira fase de testes com a segunda tinta de prata utilizada. Neste teste foram avaliadas as três placas impressas com a segunda tinta, representadas no Ponto 5.5.3, estando os valores obtidos para os dois elétrodos impressos, para cada sensor, descritos na seguinte tabela (Tabela 23).

Tabela 23: Resultados da resistência elétrica para a primeira fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC

Substrato	Elétrodo esquerdo	Elétrodo direito
T2-PC1-S2	9,53 Ω	9,20 Ω
T2-PC2-S2	0,14 k Ω	13,04 Ω
T2-PC3-S2	9,43 Ω	10,55 Ω

Pela observação dos valores apresentados na tabela anterior, o primeiro e o último resultado obtidos apresentam valores para esta propriedade em estudo muito semelhantes, ficando estes num intervalo muito curto entre eles de cerca de 1 Ω , na zona de transição entre as unidades e as dezenas de ohm, estando de acordo com os valores que são esperados, tendo em conta os resultados que foram sendo obtidos neste ponto do capítulo.

O mesmo não pode ser dito da segunda placa testada, pois para o elétrodo esquerdo sensor, o valor obtido é muito mais elevado do que os restantes valores descritos no parágrafo anterior, na ordem de grandeza das décimas de kilohm. Para o elétrodo do lado direito, os valores são iguais aos das outras duas placas testadas, mantendo-se nas dezenas de ohm. A diferença nestes valores, não tem um motivo muito claro, apesar de na Figura 73, onde é caracterizada a impressão da placa, ser visível um pouco do efeito de *cobwebbing*, que pode ter provocado esta alteração no elétrodo esquerdo.

De seguida, foi avaliada a segunda fase de impressão da segunda tinta de prata nas placas de PC, sendo a diferença da segunda para a primeira, a alteração do sensor a imprimir, passando-se para o sensor onde o espaçamento entre os traços dos elérodos é superior (1 mm), tendo sido avaliados as duas placas impressas, que foram descritas no Ponto 5.5.4. Os valores obtidos para os dois elérodos de cada sensor impresso estão representados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultados da resistência elétrica para a segunda fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC

Substrato	Eléetrodo esquerdo	Eléetrodo direito
T2-PC4-S1	0,54 k Ω	0,15 k Ω
T2-PC5-S1	57,64 Ω	9,45 Ω

O primeiro resultado apresentado para a segunda fase de impressões, volta a produzir um aparecimento de valores muito elevados para a propriedade em estudo, estando estes na ordem das décimas de kilohm, podendo ser explicado novamente pelo surgimento do efeito de *cobwebbing* (Figura 75), implicando a obtenção destes valores.

O segundo apresenta valores considerados como mais normais, apesar de serem ainda um pouco mais elevados para o eléetrodo esquerdo do que nos restantes testes efetuados, podendo também ser explicado pela mesma situação do teste anterior, a existência de *cobwebbing*, ainda que tenha tido um efeito menos notável (Figura 76).

Terminada esta segunda avaliação nas placas de PC, passou-se para a última fase de impressão efetuada nesta dissertação, tendo sido realizada a impressão de um sensor circular em duas placas distinta (Ponto 5.5.5.), não existindo qualquer outro resultado semelhante ao qual se possam efetuar comparações de valores obtidos. Os resultados obtidos para os dois elérodos de ambos os sensores, encontram-se descritos na Tabela 25.

Tabela 25: Resultados da resistência elétrica para a terceira fase de impressão da segunda tinta nas placas de PC

Substrato	Eléetrodo esquerdo	Eléetrodo direito
T2-PC6-S3	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>
T2-PC7-S3	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>

Para ambas as placas impressas com o sensor circular, não foi possível obter um resultado para esta propriedade em estudo, pois a máquina de medição utilizada apenas apresentou o alerta de *overload* em todos os elérodos. Isto, pode ser explicado pelo mesmo motivo de todos os maus resultados que vem sendo obtidos ao longo desta série de testes, que se deve

ao facto de ambas as placas impressas (Figuras 77 e 78) possuírem o efeito de *cobwebbing*, entre os traços dos elétrodos, impedindo, mais uma vez, a obtenção correta do valor da resistência elétrica.

Com a finalização desta grande série de testes, efetuados para todos os resultados obtidos para a impressão por serigrafia, é possível concluir que os diversos defeitos de impressão, sejam estes vazios, impressões completas ou *cobwebbing*, possuem uma grande influência nos resultados obtidos, ainda que não seja totalmente conclusivo que se deve sempre as estes defeitos, o aparecimento dos maus resultados de resistência elétrica, pois existem valores que são considerados como normais, em que as placas ou filmes também apresentam os mesmos defeitos, o que acaba por dificultar a procura por uma causa fixa para os maus resultados e possíveis soluções para os mesmos.

5.6.2. Testes de dobra efetuados nas placas de PC impressas com a segunda tinta de prata

Com a finalização da obtenção dos valores de resistência elétrica, para os resultados obtidos para as diversas impressões por serigrafia, foi efetuado um novo teste, sendo este um teste de dobra das placas de PC impressas com a nova tinta de prata (DM-SIP-2001), pois esta nunca foi testada quanto à sua flexibilidade e elasticidade, apesar de a empresa que a desenvolve (*Dycotec Materials*) apresentar esta tinta como sendo muito flexível e extensível.

Deste modo, foram selecionados os resultados obtidos nas placas de PC, pois os filmes de PEN e PI apresentavam defeitos de oxidação da tinta, sendo desconsiderados para estes testes devido a esta fragilização do material impresso, assim como da primeira placa impressa com a tinta (T2-PC1-S2 – Figura 72), que também apresenta sinais de oxidação em metade da estrutura impressa.

Devindo os testes de dobra por estrutura impressa, iniciou-se os testes pelo sensor interdigital com um espaçamento de 0,5 mm, correspondendo aos resultados obtidos nas Figuras 73 e 74. Para proceder à dobra destas placas, foi necessário voltar a recorrer à utilização da pistola de ar quente, devido à estrutura rígida da placa que não permite que esta seja dobrada manualmente. Assim, com o auxílio deste equipamento, procedeu-se à dobra destas duas placas, até cerca de 90°, pois é o ângulo máximo que a tinta tem de suportar neste trabalho, estando os resultados apresentados nas duas figuras seguintes (Figuras 45 e 46).

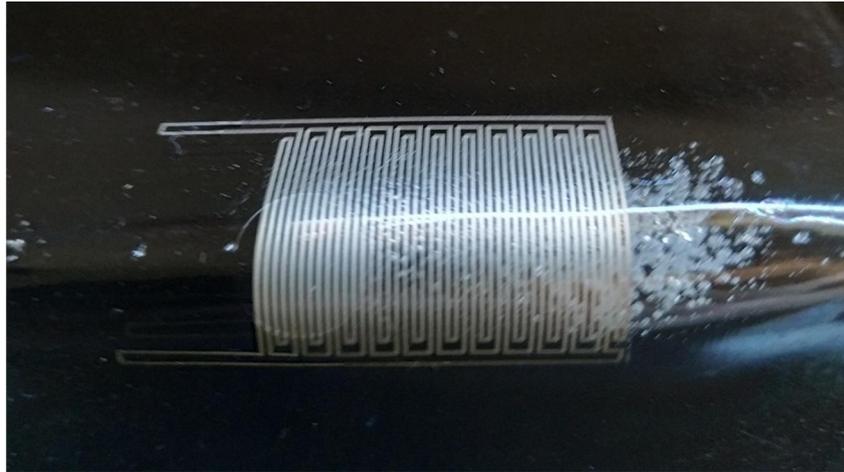


Figura 79: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC2-S2

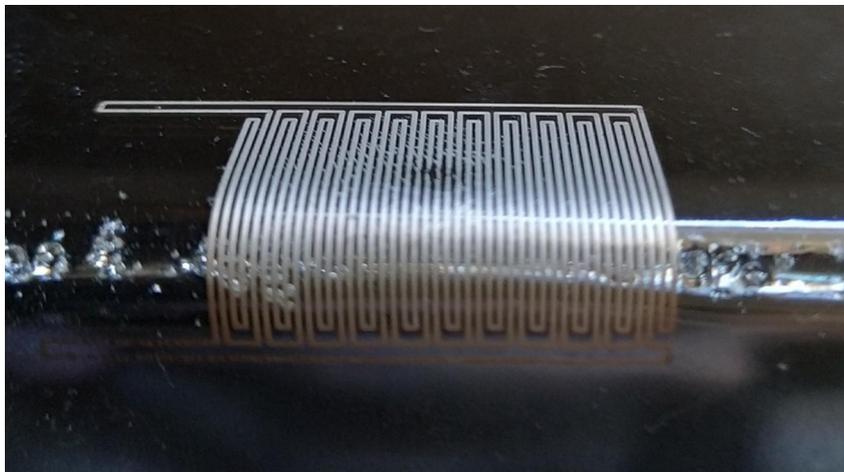


Figura 80: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC3-S2

Pela observação das imagens anteriores, é possível concluir que para os dois resultados obtidos os resultados foram excelentes, pois na zona da dobra do sensor, sendo que esta foi efetuada no sentido dos traços, não existe nenhuma marca de quebra ou danificação da tinta, comprovando o que é dito pela empresa que a desenvolve sobre a grande flexibilidade desta tinta para produções de produtos funcionais deste género.

São ainda observáveis nas duas imagens anteriores, algumas bolhas na zona da dobra e estas surgem devido à aplicação do ar quente nesta zona, para facilitar o processo de dobra, o que acaba por provocar este efeito de bolhas, devido à temperatura elevada do ar incidido sobre a placa.

De seguida, realizaram-se os testes de dobra o segundo sensor impresso, sendo este o outro sensor interdigital, em que o espaçamento entre os traços dos eléctodos é superior, sendo o seu valor de 1 mm, correspondendo aos resultados obtidos nas Figuras 75 e 76. Assim, voltou-

se a recorrer à pistola de ar quente, para dobrar as placas num ângulo de 90°, estando os resultados apresentados nas Figuras 81 e 82.

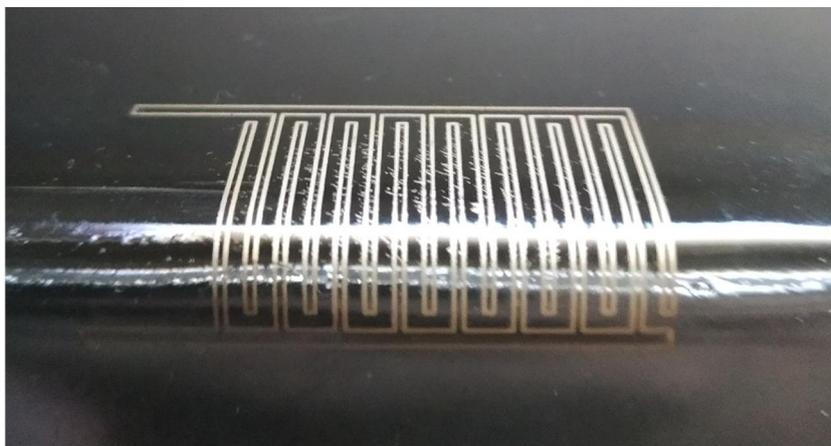


Figura 81: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC4-S1

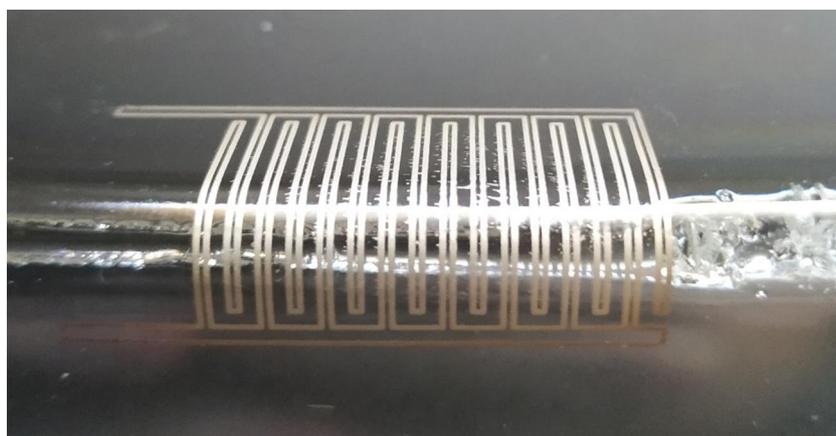


Figura 82: Imagem do resultado do teste de dobra na placa T2-PC5-S1

Avaliando os resultados obtidos nas figuras anteriores, estes foram novamente excelentes, pois a dobra voltou a ser efetuada na zona central dos sensores, alinhada com os traços, e não foi verificada qualquer marca ou quebra na tinta.

Também nestas placas, principalmente na representada na Figura 82, se verificou algumas bolhas nas placas, mas estas são mais reduzidas, tendo existido um maior cuidado durante o amolecimento da placa, de forma a evitar o seu surgimento, ainda que não tenha sido possível eliminar este defeito totalmente.

Por fim, realizaram-se os testes de dobra para as últimas placas impressas com a segunda tinta de prata, sendo que nestes foram impresso um sensor com um formato circular, estando os resultados da impressão destes sensores nas Figuras 77 e 78. Recorrendo uma última vez à

pistola de ar quente, voltou-se a dobrar as placas até cerca de 90° de ângulo, apresentando-se os resultados nas Figuras 83 e 84.

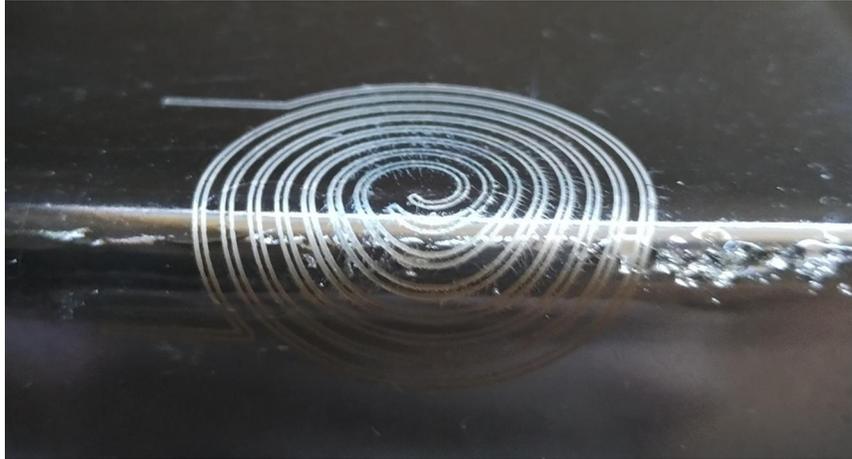


Figura 83: Imagem do resultado do teste da dobra na placa T2-PC6-S3

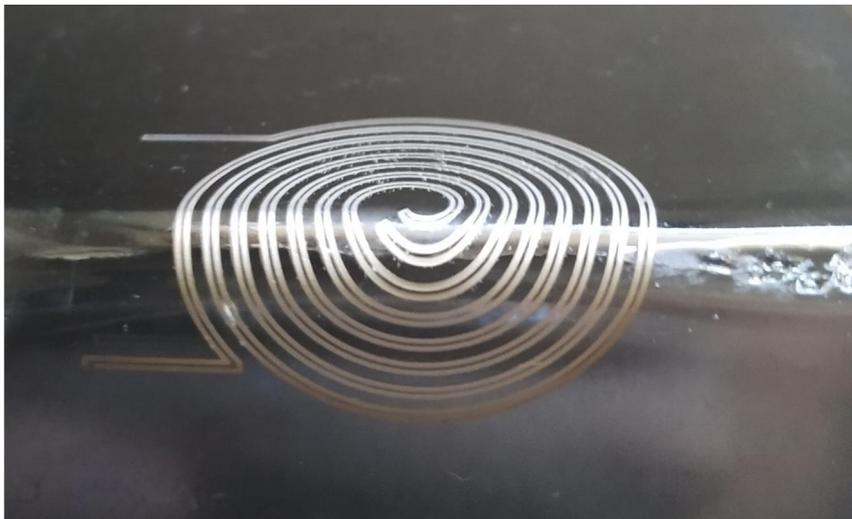


Figura 84: Imagem do resultado do teste da dobra na placa T2-PC7-S3

Os resultados obtidos voltam a ser excelentes, o que era expectável devido aos dois ensaios anteriores, tendo em conta que a dobra foi efetuado o mais no centro do sensor possível para que os traços impressos ficassem alinhados com a dobra, semelhante ao que ocorreu com as placas anteriores, não existindo vestígios de danos ou quebras na tinta.

Também foi avaliado novamente o aparecimento de bolhas na zona central, sendo que nestes dois resultados voltou a aumentar a quantidade de bolhas na dobra, sendo o motivo o mesmo que para os anteriores, ou seja, devido à alta temperatura incidida para provocar o amolecimento da placa, de forma a efetuar a dobra da placa.

Deste modo, terminou-se a série de testes de dobra, sendo possível concluir que a tinta possui excelentes características físicas, quanto à sua flexibilidade e elasticidade, pois todos os resultados apresentaram uma dobra excelente da tinta, sendo este aspecto muito importante para as fases seguintes previstas para este trabalho.

5.6.3. Obtenção da resistência elétrica para os resultados obtidos nas placas de PC após o teste da dobra

Com os resultados obtidos após o teste de dobra, de forma a caracterizar a segunda tinta de prata, efetuou-se novamente o processo de obtenção da resistência elétrica para estas mesmas placas, efetuando uma comparação com os resultados antes do teste, de forma a entender a influência deste teste, nas características elétricas da tinta. O procedimento para a obtenção dos valores foi exatamente o mesmo do Ponto 5.6.1., recorrendo-se ao método de dois pontos e às amarras do multímetro utilizado.

Deste modo, voltou-se a proceder a obtenção de valores de forma sequencial, de acordo com o tipo de estrutura que foi impressa, de forma a facilitar a comparação com valores obtidos no Ponto 5.6.1.

Iniciando-se a avaliação pelas placas que foram primeiro dobradas e, em que os resultados deste teste se encontram nas Figuras 79 e 80, foram obtidos os valores para os dois eletrodos de cada sensor, estando os resultados apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Resultados da resistência elétrica para as primeiras placas de PC dobradas

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T2-PC2-S2	30,48 Ω	41,20 Ω
T2-PC3-S2	0,33 k Ω	15,17 Ω

Os resultados obtidos apresentam valores muito interessantes, pois os valores que foram obtidos antes do teste de dobra (Tabela 23), são completamente distintos dos que foram obtidos após a mesma, pois considerando a placa T2-PC2-S2, antes da dobra, os seus valores possuem ordens de grandeza diferentes, estando um deles na ordem dos décimos de kilohm, o que não acontece após a dobra, em que os seus valores possuem valores semelhantes, na ordem das dezenas de ohm, apesar de estes serem um pouco mais elevados do que o que é considerado comum consoante todos os resultados obtidos.

Para a segunda placa (T2-PC3-S2), o inverso acontece, pois antes da dobra, os resultados são muito semelhantes entre si, na ordem das unidade e dezenas de ohm, e após o teste da dobra, estes distanciam-se por completo, estando um valor semelhante aos que foram obtidos antes do teste e o restante na ordem dos décimos de kiloohm.

Esta inversão dos resultados obtidos após a dobra, trata-se de uma ocorrência estranha, não existindo um motivo aparente para esta diferença obtida.

Terminada a primeira fase, iniciou-se logo de seguida a segunda, onde o foco passa para as placas que foram dobradas em segundo lugar, com um sensor distinto das primeiras placas, estando os seus resultados nas Figuras 81 e 82, sendo que foram obtidos os valores para ambos os elétrodos de cada sensor, descritos na seguinte tabela (Tabela 27).

Tabela 27: Resultados da resistência elétrica para as segundas placas de PC dobradas

Substrato	Eléctrodo esquerdo	Eléctrodo direito
T2-PC4-S1	22,61 Ω	71,57 Ω
T2-PC5-S1	0,44 k Ω	79,72 Ω

Com estes resultados obtidos para a segunda fase de dobra das placas de PC, é perceptível que a ocorrência da inversão dos resultados na primeira fase, não foi um caso único, pois exatamente o mesmo foi verificado nos resultados apresentados na Tabela 26.

Assim, para a placa T2-PC4-S1, em que na Tabela 24, os resultados obtidos eram completamente distintos nas suas ordens de grandeza, após a realização da dobra os valores obtidos para cada eléctrodo ficam bastante mais próximos, estando na mesma ordem de grandeza, ainda que exista um intervalo considerável entre eles.

O inverso ocorre na placa T2-PC5-S1, pois os valores também encontravam próximos um do outro para os dois elétrodos, e após a dobra, estes foram completamente diferentes, estando em ordens de grandeza muito afastadas.

Por fim, foi efetuada a última obtenção dos valores de resistência elétrica para as últimas placas dobradas, impressas com um sensor circular, estando o resultado das dobras das placas registadas nas Figuras 83 e 84. Deste modo, mais uma vez foram obtidos os valores para cada um dos dois elétrodos do sensor impresso, estando os resultados descritos na Tabela 28.

Tabela 28: Resultados da resistência elétrica para as últimas placas de PC dobradas

Substrato	Elétrodo esquerdo	Elétrodo direito
T2-PC6-S3	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>
T2-PC7-S3	<i>Overload</i>	<i>Overload</i>

Para estas últimas placas, os resultados já foram iguais aos que foram obtidos antes do teste de dobra (Tabela 25), pois mais uma vez, não foi possível observar valores para estes sensores, sendo que o equipamento de medição apenas registou em todos os elétrodos o alerta de *overload*. Isto pode ajudar a perceber que talvez este tipo de sensores circulares, não apresentem boas características elétricas, não sendo a estrutura ideal para utilizar na produção de um componente funcional, apesar de serem necessários mais testes para comprovar este facto.

Por fim, é possível concluir que o processo de dobra, nesta segunda tinta utilizada neste trabalho, possui uma grande influência nos valores de resistência elétrica obtidos, possuindo um efeito curioso, de transformar os maus resultados em bons resultados e os bons resultados em maus resultados, não existindo uma razão clara para esta ocorrência.

Capítulo 6. Conclusões

Na presente dissertação, foi efetuado um extenso estudo de produção de uma película funcional, através de técnicas não convencionais de moldação por injeção, como IMD-FIM, em que se procedeu à produção de uma película, através de processos de impressão, sendo o objetivo final torná-la funcional.

Deste modo, na primeira fase deste trabalho, procedeu-se à realização de diversos testes de impressão com três tintas, em primeiro lugar para efetuar uma seleção de qual a tinta a usar no processo final de impressão, sendo esta a tinta condutora formulada com partículas de prata HPS FG57B, e de seguida para testar o comportamento de adesão, propriedades físicas e características elétricas da tinta selecionada, com o substrato que foi também selecionado, o PC, tendo sido usadas umas placas deste mesmo material, que foram injetadas com o propósito de utilização destes testes.

Estes testes permitiram definir quais os parâmetros a usar em todos os processos por aí em diante, consoante o substrato a utilizar, desde espessuras ótimas para impressão, como valores para o processo de cura da tinta, e permitiram ainda, concluir algumas informações essenciais sobre a tinta HPS FG57B, sendo estas, de que a esta tinta, quanto à sua adesão aos vários substratos utilizados, é excelente, pois nunca apresentou qualquer tipo de falha de adesão em qualquer processo de impressão efetuado com o *Doctor Blade*, de que a tinta, quanto à sua flexibilidade e elasticidade, apresenta resultados que também foram favoráveis, pois em todos os testes a tinta aguentou dobras, no mínimo, até cerca de 90°, sendo este o ângulo mínimo necessário de atingir e, por fim, de que a tinta possui valores normais para a resistividade elétrica após a impressão, efetuando-se uma comparação com os valores descritos na ficha técnica da tinta, para esta característica (Anexo VII) , sendo os resultados novamente os esperados, sendo que apenas num teste, o valor apresentado foi muito elevado, podendo-se considerar que ocorreu algum erro, ou durante o processo de impressão, ou durante a obtenção do valor da resistividade elétrica. Desta forma, conclui-se que, segundo estes testes, a tinta HPS FG57B, se encontra em excelentes condições para utilização no processo de impressão seguinte.

De seguida, e devido ao facto da tela de serigrafia encomendada ainda não se encontrar pronta nesta fase do trabalho, surgiu a oportunidade de trabalhar com um equipamento de corte e gravura a laser, tendo sido testados dois processos distintos da técnica selecionada para a fase

da impressão, sendo esta a realização de uma máscara através do corte de um filme de PEN e a realização de gravuras com os desenhos dos sensores efetuados nas placas de PC.

Assim sendo, nenhum destes processos foram bem conseguidos, pois no caso da máscara de PEN, o filme utilizado possui uma espessura muito reduzida (75 μm), e ao efetuar a máscara neste material de pequena espessura, devido às estruturas a cortar possuírem também elas possuírem tamanhos reduzidos, o material não suportou o peso das estruturas cortadas e acabou por ficar a máscara completamente destruída. No caso das gravuras nas placas de PC, à partida já era esperado que os resultados não fossem os melhores, pois o material selecionado não é muito compatível com a tecnologia de laser, devido a este queimar quando incidido, mas de forma a testar esta tecnologia, foram efetuados alguns testes com as placas, notando-se marcas escuras nas zonas de gravura e nas zonas envolventes, sendo estas maiores consoante o valor de potência utilizada.

Apesar das queimaduras presentes nas placas gravadas, efetuou-se um processo de impressão com a tinta de prata selecionada (HPS FG57B), preenchendo-se as estruturas que foram gravadas, mas o processo também não foi bem sucedido, pois a tinta nunca foi preenchida na sua totalidade, existindo sempre vazios e irregularidades de espessura de tinta em alguns canais, e ainda foi impressa tinta nas zonas envolventes das estruturas gravadas, o que impediu uma obtenção dos valores de resistividade elétrica, tendo apenas sido registados os valores de resistência elétrica, os quais foram muito irregulares.

Após terminados os testes com a máquina de corte e gravura a laser, deu-se início ao processo de impressão por serigrafia, mas logo no início desta fase, foi perceptível que nenhum dos testes que fossem ser realizados com a tela de impressão que foi encomendada, seriam utilizáveis nas fases seguintes do trabalho, pois esta chegou com um defeito nos desenhos que foram transferidos, em que apenas uma fina linha de tinta seria impressa em torno do sensor que se pretendia imprimir, comprometendo todo o processo de impressão. Apesar de existir uma intenção de proceder à encomenda de uma nova tela de impressão, com os desenhos corretos, antes de se proceder a esse procedimento, foi decidida a realização de alguns testes de modo a compreender se a técnica de impressão escolhida e a tinta e substratos selecionados são compatíveis.

Deu-se, então início aos testes de impressão com a técnica de serigrafia e com a tinta de prata HPS FG57B, nos primeiros testes, onde foram impressos os dois tipos de sensores interdigitais disponíveis, os resultados apresentaram diversos defeitos, começando por impressões

incompletas ou vazios de tinta nas zonas centrais dos sensores, que podem ser atribuídos ao problema com a tela ou à velocidade de impressão estar demasiado elevada, sendo este já o seu valor mínimo, pois foram efetuadas mudanças de parâmetros ao longo do processo (Pressão) e em nada se alteraram os resultados. Também surgiu com grande influência, o efeito denominado de *cobwebbing*, que produz o aparecimento de fios de tinta extra ao desenho pretendido, sendo o motivo para este aparecimento atribuído a um acumular de eletricidade estática durante o processo.

Deste modo, tentou-se arranjar soluções para diminuir a eletricidade estática acumulada no processo, tendo sido a primeira solução, a ligação do equipamento de impressão à terra a partir de fios de cobre, mas em nada melhorou os resultados, pois foram exatamente os mesmos. A outra solução encontrada, foi a aquisição de produtos anti estáticos, com a mesma intenção do processo anterior, onde se procede a uma limpeza de todos os componentes envolvidos no processo, de forma a dissipar a energia acumulada.

Esta solução apresentou melhorias nos resultados, pois conseguiu eliminar os fios extra de tinta que se verificavam a toda a volta dos sensores impressos, mas não os conseguiu eliminar na sua totalidade, ficando vestígios desses fios entre os traços dos sensores impressos. Também apresentou melhorias nos processos de impressão, pois diminuiu os vazios e impressões incompletas, podendo estes dois defeitos estarem interligados e surgirem devido à tela de impressão não se encontrar otimizada para o processo. Outra possível explicação para estes defeitos encontrados, pode ser atribuída a estado da tinta, pois esta já se encontrava com o seu tempo de validade expirado há algum tempo.

Como os resultados obtidos para a tinta HPS FG57B, não estavam a ser os esperados, surgiu a oportunidade de testar uma outra tinta de prata DM-SIP-2001, que possui características semelhantes, no processo de impressão por serigrafia com a mesma tela, de forma a comparar com os resultados da tinta anterior e perceber a influência de estado em que a primeira tinta se encontra.

Numa primeira fase, foram apenas testados os filmes que se encontravam disponíveis para o processo, sendo estes os filmes de PEN e de PI. Os resultados obtidos voltaram a não ser muito animadores, pois, apesar de terem sido utilizados os produtos anti estáticos que produziram melhores resultados com a primeira tinta, estes voltaram a apresentar grandes falhas de impressão, o que provocou o aparecimento de *cobwebbing*, nas zonas em redor das falhas, apesar das melhorias nas zonas envolventes dos sensores.

De seguida voltou-se ao substrato principal, o PC, onde os resultados foram os melhores obtidos ao longo de todos os testes de impressão efetuados, pois o processo de impressão foi quase perfeito em todas as placas, surgindo por vezes uma pequenas marca de impressão insuficiente na zona central do sensor, apenas são sendo possível controlar ao máximo o efeito de *cobwebbing*, continuando este a surgir, ainda que em menor escala. Uma conclusão obtida com estes últimos testes, é de que com o sensor onde o espaçamento entre os traços dos elétrodos é maior, o efeito de *cobwebbing*, aparece em menor quantidade, podendo a proximidade dos traços dos diversos sensores possuir alguma influência neste defeito.

Por fim, como os últimos resultados foram mais favoráveis com a segunda tinta, foram efetuados testes semelhantes aos que foram efetuados nos testes de seleção das tintas, recorrendo-se à dobra das placas impressas e à obtenção do valor da resistência elétrica da tinta, de forma a também caracterizar o comportamento da segunda tinta de prata.

Iniciou-se os testes para todos os resultados obtidos, pela obtenção dos valores de resistência elétrica, e, apesar de existirem alguns testes onde não foi possível obter um registo, devido ao mau estado da impressão, os que se encontravam em bom estado, apresentaram valores considerados como normais, sendo apenas a exceção o sensor com formato redondo, onde não foi possível obter qualquer registo para essas impressões.

De seguida, efetuou-se os testes de dobra apenas nas placas de PC, onde a impressão se encontrava em bom estado, em que os resultados obtidos, encontraram-se dentro do esperado, pois no teste, todas as placas suportaram a dobra de 90°, sem que qualquer quebra seja percebida na tinta, possuindo esta uma excelente característica elástica e flexível.

Após a dobra concluída, voltou a registar-se os valores de resistência elétrica para as placas envolvidas, sendo possível concluir que a dobra possui alguma influência, produzindo algumas alterações nos valores para a resistência de alguns sensores. Para os sensores circulares, voltou a não ser possível registar qualquer valor para esta característica elétrica.

Terminada esta avaliação de todos os processos que foram efetuados nesta dissertação, é possível concluir que os principais aspetos que influenciaram os resultados que foram sendo obtidos, foram o defeito que foi encontrado na tela de impressão, não permitindo fazer uma boa avaliação do que era pretendido imprimir; um possível mau estado em que a tinta de prata HPS FG57B possa estar, pois a sua data de validade já expirou e, por fim, as limitações no processo de impressão, pois um parâmetro que seria importante controlar melhor seria a velocidade, com

a intenção de aumentar a precisão durante a impressão, não sendo tal possível com o equipamento disponível.

Como sugestão para trabalhos futuros, é sugerida a produção de uma nova tela de impressão sem o defeito que surgiu neste trabalho, de forma a entender a influência que este possui em todo o processo de impressão, ou então testar uma nova técnica de impressão que forneça uma maior precisão ao processo, de forma a reduzir os defeitos que foram verificados nesta dissertação e avançar para as seguintes técnicas previstas num processo normal de IMD-FIM, a termoformação e sobre moldação por injeção, para dar por terminada a produção de um componente funcional.

Referências Bibliográficas

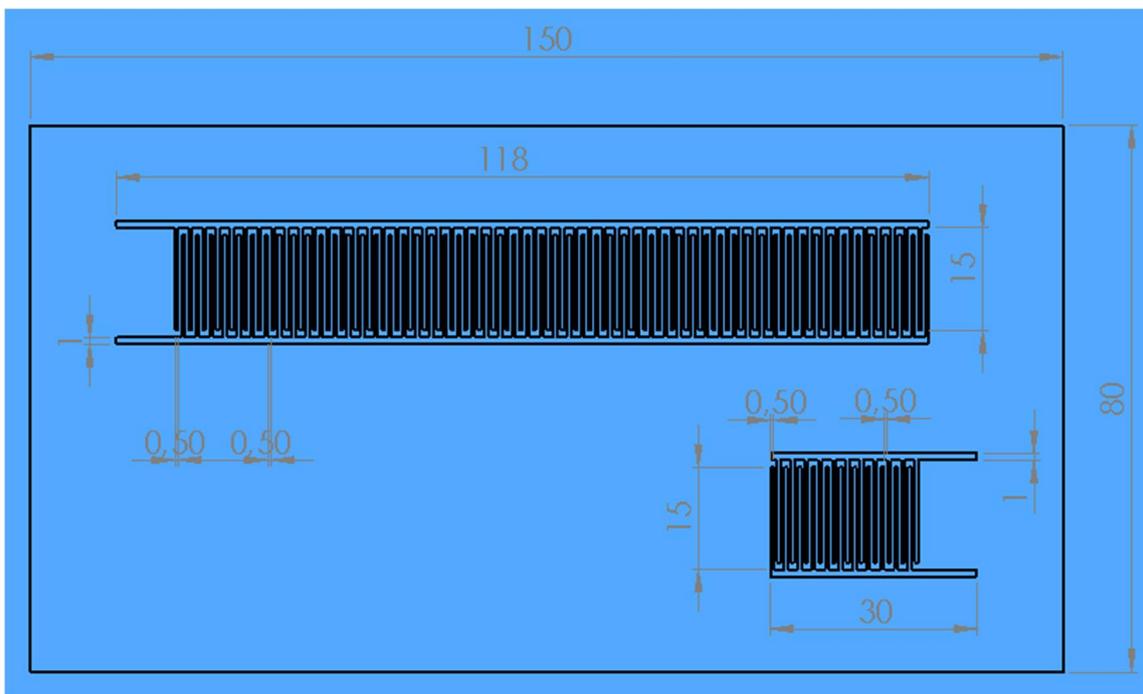
- [1] - Arrese, J., Vescio, G., Xuriguera, E., Medina-Rodriguez, B., Cornet, A., & Cirera, A. (2017). Flexible hybrid circuit fully inkjet-printed: Surface mount devices assembled by silver nanoparticles-based inkjet ink. *Journal of Applied Physics*, 121(10). <https://doi.org/10.1063/1.4977961>
- [2] - Izdebska, J., Thomas, S. (2015). Printing on polymers - fundamentals and applications (pp. 245-259). *PDL HANDBOOK SERIES*. William Andrew, Elsevier Science
- [3] - Mościcki, A., Smolarek-Nowak, A., Felba, J., & Kinart, A. (2017). Ink for Ink-Jet Printing of Electrically Conductive Structures on Flexible Substrates with Low Thermal Resistance. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4100–4108. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5320-4>
- [4] - Zhang, L., Gao, M., Wang, R., Deng, Z., & Gui, L. (2019). Stretchable pressure sensor with leakage-free liquid-metal electrodes. *Sensors (Switzerland)*, 19(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s19061316>
- [5] - Chtioui, I., Bossuyt, F., Vanfleteren, J., & Bedoui, M. H. (2018). 2.5/3D dynamically stretchable and permanently shaped electronic circuits. *Microsystem Technologies*, 24(2), 831–853. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3582-7>
- [6] - Alajoki, T., Koponen, M., Juntunen, E., Petäjä, J., Heikkinen, M., Ollila, J., Sitomaniemi, A., Kosonen, T., Aikio, J., & Mäkinen, J. T. (2009). In-mould integration of electronics into mechanics and reliability of overmoulded electronic and optoelectronic components. *2009 European Microelectronics and Packaging Conference, EMPC 2009*.
- [7] - Xu, M., Qi, J., Li, F., & Zhang, Y. (2018). Transparent and flexible tactile sensors based on graphene films designed for smart panels. *Journal of Materials Science*, 53(13), 9589–9597. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2216-5>
- [8] - Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M. (2004). Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE*, 92(5), 808–844. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.826603>
- [9] - Mukhopadhyay, S. C. (2005). Novel planar electromagnetic sensors: Modeling and performance evaluation. *Sensors*, 5(12), 546–579. <https://doi.org/10.3390/s5120546>
- [10] - Fendri, A., Ramalingame, R., Ghariani, H., & Kanoun, O. (2017). Investigation of interdigital sensor geometry for oil quality measurement. *2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2017, 2017-January*, 738–743. <https://doi.org/10.1109/SSD.2017.8167028>
- [11] - Wimmer, A., Reichel, H., & Schmidt, K. (2018). New standards for 3D-userinterfaces-manufactured by a Film Insert Molding process. *2018 13th International Congress Molded*

- Interconnect Devices, MID 2018, 2017*(2 mm), 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICMID.2018.8526978>
- [12] - Liu, R. H., Young, W. Bin, & Ming, H. P. (2018). Design of the printing pattern on film for three-dimensional molded interconnect devices. *Advances in Polymer Technology*, 37(6), 1722–1731. <https://doi.org/10.1002/adv.21830>
- [13] - Marabu The in-mold decoration process with Ultra Mold UVPC – UV-curable screen printing inks (n.d.). *Marabu Hand-out*.
- [14] – Love, J. C., Goodship, V. (2002). In-Mould Decoration of Plastics. *Rapra Review Reports* 13(2), 3–22.
- [15] - Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2015). Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal*, 15(6), 3164–3185. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2375203>
- [16] - Mun, M. K., Park, J. W., & Yeom, G. Y. (2016). Linewidth Control and the Improved Adhesion of Inkjet-Printed Ag on Polyimide Substrate, Textured Using Near-Atmospheric Pressure Plasmas. *Plasma Processes and Polymers*, 13(7), 722–729.
<https://doi.org/10.1002/ppap.201500222>
- [17] - Cano-Raya, C., Denchev, Z. Z., Cruz, S. F., & Viana, J. C. (2019). Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review. *Applied Materials Today*, 15, 416–430. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.02.012>
- [18] - Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2014). Screen printed flexible pressure sensors skin. *ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings*, 219–224.
<https://doi.org/10.1109/ASMC.2014.6847002>
- [19] - Jabbour, G. E., Radspinner, R., & Peyghambarian, N. (2001). *Screen-Printing for the Fabrication of Organic Light-Emitting Devices*. 4466, 72–79.
- [20] - Abbott, S., Church, T., Parker, D. & Harris, A. (2008). How to be a great Screen printer (pp. 1–133). A Macdermid Autotype How To ebook. Macdermid Autotype Limited.
- [21] - Karlović, I., Stančić, M., Novaković, D., & Tomić, I. (2012). Influence of Substrate and Screen Thread Count on Reproduction of Image Elements in Screen Printing. *Acta Graphica : Znanstveni Časopis Za Tiskarstvo i Grafičke Komunikacije*, 23(1–2), 1–12.
- [22] - Moschos, A., Syrový, T., Syrova, L., & Kaltsas, G. (2017). A screen-printed flexible flow sensor. *Measurement Science and Technology*, 28(5), aa5fa0.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5fa0>
- [23] - Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2014). Bendable piezoresistive sensors by screen printing MWCNT/PDMS composites on flexible substrates. *Conference Proceedings - 10th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics, PRIME 2014*, 4–7.
<https://doi.org/10.1109/prime.2014.6872702>

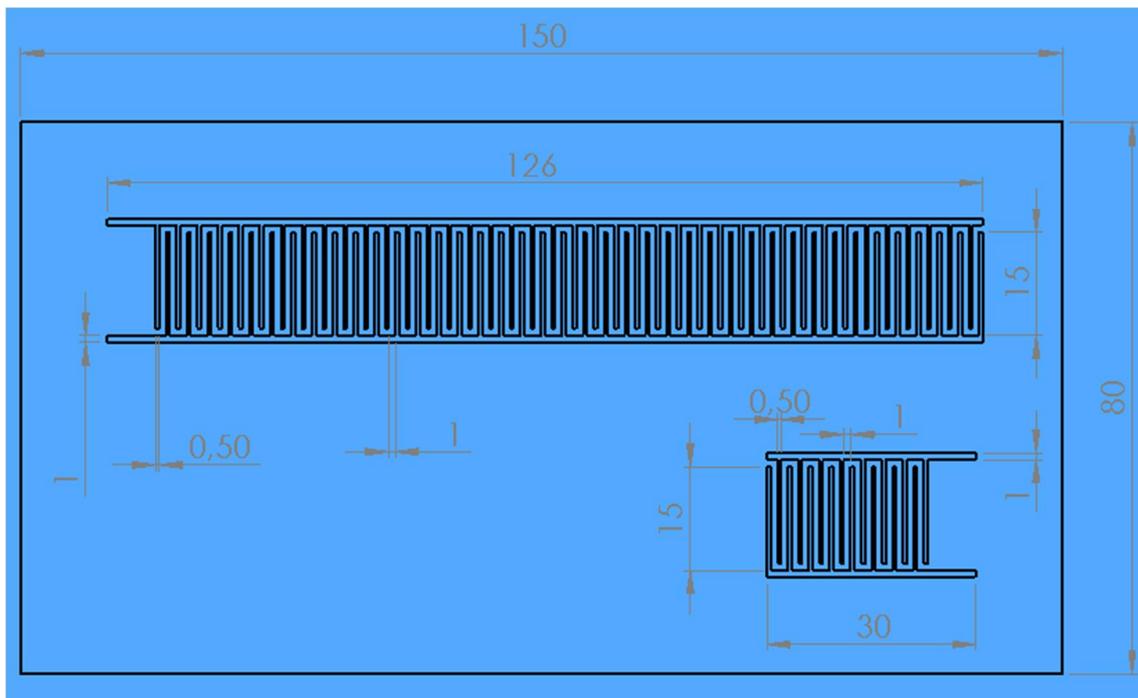
- [24] – Liang, T. X., Sun, W. Z., Wang, L.D., Wang, Y. H., & Li, H. D. (1996). Effect of Surface Energies on Screen Printing Resolution. *IEEE Transactions - Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging*, 19(2), 423–426.
- [25] - Ng, L. W. T., Zhu, X., Hu, G., Macadam, N., Um, D., Wu, T. C., Le Moal, F., Jones, C., & Hasan, T. (2019). Conformal Printing of Graphene for Single- and Multilayered Devices onto Arbitrarily Shaped 3D Surfaces. *Advanced Functional Materials*, 29(36), 1–12. <https://doi.org/10.1002/adfm.201807933>
- [26] - El Jazairi, I., Trigaud, T., & Moliton, J.-P. (2010). OTFT with Silk Screen Printed Drain and Source. *Micro and Nanosystems*, 1(1), 46–49. <https://doi.org/10.2174/1876402910901010046>
- [27] - Soukup, R., Hamáček, A., & Řeboun, J. (2012). Organic based sensors: Novel screen printing technique for sensing layers deposition. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 19–24. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2012.6273101>
- [28] - Gonzalez, M., Axisa, F., Bulcke, M. Vanden, Brosteaux, D., Vandeveld, B., & Vanfleteren, J. (2008). Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. *Microelectronics Reliability*, 48(6), 825–832. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.03.025>
- [29] – Ashter, S. A. Thermoforming of Single and Multilayer Laminates. (2016). In *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates*. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-02821-9>
- [30] - Simula, T., Niskala, P., Heikkinen, M., & Rusanen, O. (2018). Component Packages for IMSE™ (Injection Molded Structural Electronics). *Proceedings - 2018 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging, NORDPAC 2018, Fig 2*, 50–54. <https://doi.org/10.23919/NORDPAC.2018.8423845>
- [31] - Tenchine, L., & Dasonville, O. (2016). Randomly shaped 3D electronics using innovative combination of standard surface mount technologies and polymer processing. *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices - Scientific Proceedings, MID 2016, Mid*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMID.2016.7738937>
- [32] - Anisimov, A. S., Brown, D. P., Mikladal, B. F., Súilleabháin, L. Ó., Parikh, K., Soininen, E., Sonninen, M., Tian, D., Varjos, I., & Vuohelainen, R. (2014). Printed touch sensors using carbon nanobud material. *Information Display*, 30(4), 16–22. <https://doi.org/10.1002/j.2637-496x.2014.tb00731.x>
- [33] - Gaucchi, P., Fruehauf, N., Ilchmann, A., Polzinger, B., Eberhardt, W., & Kueck, H. (2018). Organic thin film transistors on back molded plastic foil. *Flexible and Printed Electronics*, 3(1), 15008. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/aaacda>
- [34] - Abdul Rahman, M. S., Mukhopadhyay, S. C., & Yu, P. L. (2014). Novel planar interdigital sensors. In *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* (Vol. 10, pp. 11–35). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04274-9_2

- [35] - He, X., Shen, G., Xu, R., Yang, W., Zhang, C., Liu, Z., Chen, B., Liu, J., & Song, M. (2019). Hexagonal and square patterned silver nanowires/PEDOT:PSS composite grids by screen printing for uniformly transparent heaters. *Polymers*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/polym11030468>
- [36] - Sawdai, A. H. (1988). *United States Patent – METHOD OF AND APPARATUS FOR COMPENSATING ADJUSTING DOCTOR BLADE*
- [37] - Widmer, M. (1976). *United States Patent - CONSTANT BEVEL DOCTOR BLADE AND METHOD AND APPARATUS USING SAME*
- [38] - Michael B. (2003). "Electrical Conductivity and Resistivity." *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays* (Chap. 7, pp 7.1-7.8). John G. Webster, CRC Press
- [39] – Jinan Sudio CNC Router Co., Ltd. *Máquina de corte Laser MDF*. [Online]
Available at: <http://pt.routersudio.com/laser-machine/laser-cutting-machine/mdf-laser-cutting-machine.html>
- [40] – SEFAR AG. *SEFAR PME*. [Online]
Available at: <https://www.sefar.com/pt/609/Tela-de-serigrafia-SEFAR-PME.htm?Product=1634403>

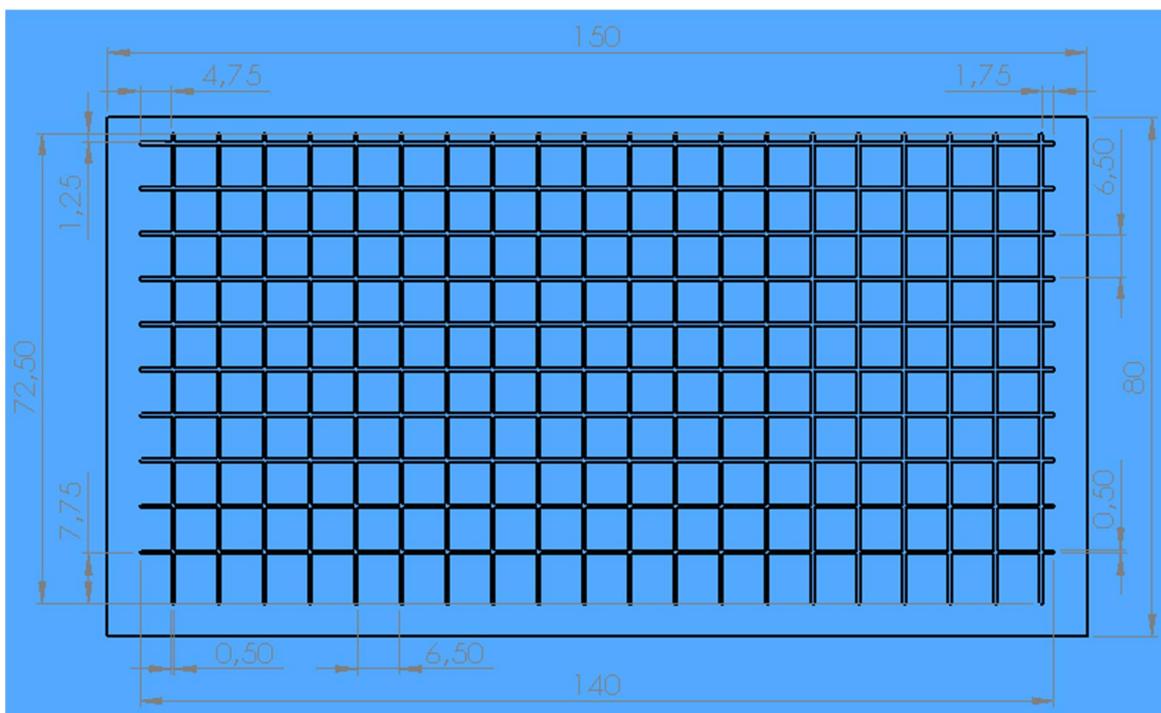
Anexo I – Desenho Técnico do Primeiro Sensor Interdigital (0,5 mm de espaçamento)



Anexo II – Desenho Técnico do Segundo Sensor Interdigital (1 mm de espaçamento)



Anexo IV – Desenho Técnico do Sensor em Forma de Rede



Anexo VI – Ficha Técnica para o Filme *Teonex Q83*



Product Information
Teijin Film Solutions Limited

Film Type Teonex® Q83

Product Description

Teonex® is biaxially oriented polyethylene naphthalate (PEN) films.

Q83 is slightly hazy film with excellent handling properties and high dimensional stability.

MD: Machine Direction

TD: Transverse Direction

Properties	Units		Q83	Test Method
Thickness	[μm]	(CMT)	75.0	JIS C-2151
Tensile strength	[MPa]	MD	204	JIS C-2318
		TD	257	
Elongation at break	[%]	MD	131	JIS C-2318
		TD	94	
Heat shrinkage (150°C × 30min)	[%]	MD	0.1	JIS C-2318
		TD	0.0	
Heat shrinkage (200°C × 10min)	[%]	MD	0.2	JIS C-2318
		TD	-0.1	

*Q83 is off line annealed product of Q83, which is lower heat shrinkage type PEN film.

*Off line annealing is process to heat stabilize the film to for lower shrinkage.

*Thickness, tensile strength and elongation at break of Q83 is base film data which measured before annealing.

These values are typical performance data for Teonex® PEN film; they are not intended to be used as design data. We believe this information is the best currently available on the subject. It is offered as a possible helpful suggestion in experimentation you may care to undertake along these lines. It is subject to revision as additional knowledge and experience is gained. Teijin Film Solutions makes no guarantee of results and assumes no obligation or liability whatsoever in connection with this information. This publication is not a license to operate under, or intended to suggest infringement of, any existing patents.

CAUTION: Do not use in medical applications involving permanent implantation in the human body.
Teonex® is registered trademarks of Teijin Film Solutions for polyester films.

Anexo VIII – Ficha Técnica do Material LEXAN LUX2180T



LEXAN™ RESIN LUX2180T

REGION EUROPE

DESCRIPTION

Global grade. LEXAN LUX2180T is an injection moulding grade especially designed for manufacturing optical parts requiring easy flow properties combined with very high transmission and color stability. UV stabilized

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20170706

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	10	mg/1000cy	SABIC method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	62	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	69	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	6	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	100	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2350	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Hardness, H35B/D0	95	MPa	ISO 2009-1
IMPACT			
Izod Impact, unnotched 80°10°3 +23°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80°10°3 -30°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80°10°3 +23°C	65	kJ/m²	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80°10°3 -30°C	15	kJ/m²	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	65	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	12	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
THERMAL			
Thermal Conductivity	0.2	W/m·°C	ISO 8302
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	140	°C	ISO 308
Vicat Softening Temp, Rate B/120	141	°C	ISO 308
HDT/Ba, 0.45MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	133	°C	ISO 75/Ba
HDT/Aa, 1.8 MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	122	°C	ISO 75/Aa
Relative Temp Index, Elec	130	°C	UL 746B

© 2017 Copyright by SABIC. All rights reserved

CHEMISTRY THAT MATTERS™

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Relative Temp Index, Mech w/impact	125	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o Impact	125	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow (Z) (5)	0.5 – 0.7	%	SABIC method
Density	1.2	g/cm ³	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/last)	0.35	%	ISO 62
Molature Absorption (23°C / 50% RH)	0.15	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 300°C/1.2 kg	18	cm ³ /10 min	ISO 1133
OPTICAL			
Light Transmission, 2.54 mm	> 90	%	ASTM D 1003
Light Transmission, 5.0 mm	> 89	%	SABIC method
Light Transmission, 2.54 mm, 420nm	> 88	%	SABIC method
Haze, 2.54 mm	< 0.5	%	ASTM D 1003
Refractive Index	1.586	-	ISO 489
ELECTRICAL			
Volume Resistivity	> 1.E+15	Ohm-cm	IEC 60093
Surface Resistivity, ROA	> 1.E+15	Ohm	IEC 60093
Dielectric Strength, in oil, 3.2 mm	17	kV/mm	IEC 60243-1
Relative Permittivity, 1 MHz	2.7	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 50/60 Hz	0.001	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 1 MHz	0.01	-	IEC 60250
Comparative Tracking Index	250	V	IEC 60112
Relative Permittivity, 50/60 Hz	2.7	-	IEC 60250
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Compliant, 94V-2 Flame Class Rating (3)(4)	0.8	mm	UL 94 by SABIC-IP
Glow Wire Flammability Index 850°C, passes at	1	mm	IEC 60695-2-12
Glow Wire Ignitability Temperature, 1.0 mm	> 875	°C	IEC 60695-2-13
Oxygen Index (LOI)	25	%	ISO 4589
UV-light, water exposure/immersion	F1	-	UL 746C
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	120	°C	
Drying Time	2 – 4	hrs	
Maximum Moisture Content	0.02	%	
Melt Temperature	280 – 300	°C	
Nozzle Temperature	270 – 290	°C	
Front - Zone 3 Temperature	280 – 300	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	270 – 290	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	260 – 280	°C	

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Hopper Temperature	60 – 80	°C	
Mold Temperature	80 – 100	°C	

DISCLAIMER

The information contained herein may include typical properties of our products or their typical performances when used in certain typical applications. Actual properties of our products, in particular when used in conjunction with any third party material(s) or for any non-typical applications, may differ from typical properties.

It is the customer's responsibility to inspect and test our product(s) in order to satisfy itself as to the suitability of the product(s) for its and its customers particular purposes. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of all product(s) purchased from us.

Nothing herein is intended to be nor shall it constitute a warranty whatsoever, in particular, warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

SABIC as referred to herein means any legal entity belonging to the group of companies headed by Saudi Arabia Basic Industries Corporation.

Anexo IX – Parâmetros de Processamento Utilizados no Processo de Injeção

Temperaturas do molde	Valores atribuídos
Temperatura na injeção	90 °C
Temperatura na extração	90 °C

Temperaturas do injeção	Valores atribuídos
Bico	280 °C
Zona 4	290 °C
Zona 3	285 °C
Zona 2	280 °C
Zona 1	270 °C
Tremonha	60 °C

Injeção	Valores atribuídos	
Pressão	1880 bar	
Velocidade	1 ^a – 10 mm/s	2 ^a – 40 mm/s
Curso	1 ^o - 15 mm	2 ^o - 64,9 mm
Comutação	15 mm	

Compactação	Valores atribuídos
Pressão	800 bar
Tempo	5 segundos

Tempos	Valores atribuídos
Injeção	0,84 segundos
Dosagem	4 segundos
Arrefecimento	9,84 segundos
Ciclo	40,80 segundos

Informações adicionais	Valores atribuídos
Descompressão	3 mm
Dosagem	70 mm
Rotação do fuso	100 rpm
Contrapressão	100 bar
Almofada	4,7 mm

Anexo X – Ficha Técnica para a Tinta de Prata DIM-SIP-2001

DM-SIP-2001



Product Description

Dycotec Materials DM-SIP-2001 is a screen printable silver paste that is used in stretchable applications such as wearable devices, sensors and medical devices. The paste can be applied to elastomeric and textile substrates.

Product Benefits

- Low temperature curing temperature (80-200°C)
- Stretchable up to 140% and compatible with a wide variety of substrates
- Excellent electrical conductivity (<29 mΩ/□/mil)
- Compatible with Dycotec Materials stretchable encapsulation pastes (DM-ENC-2500)

Paste Preparation

DM-SIP-2001 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 the Uncured Paste

Test	Properties
Viscosity after mixing (Pa.s) (Cone and plate 50x ³ , 20°C)	8 - 20
Screen residence time	1 hour
Thinner	For slight adjustments in viscosity, use DM-SIP-2001-DT
Coverage	240 cm ² /g at 5-7 μm
Density	2.1 g/cm
Solids Content	66-73 %

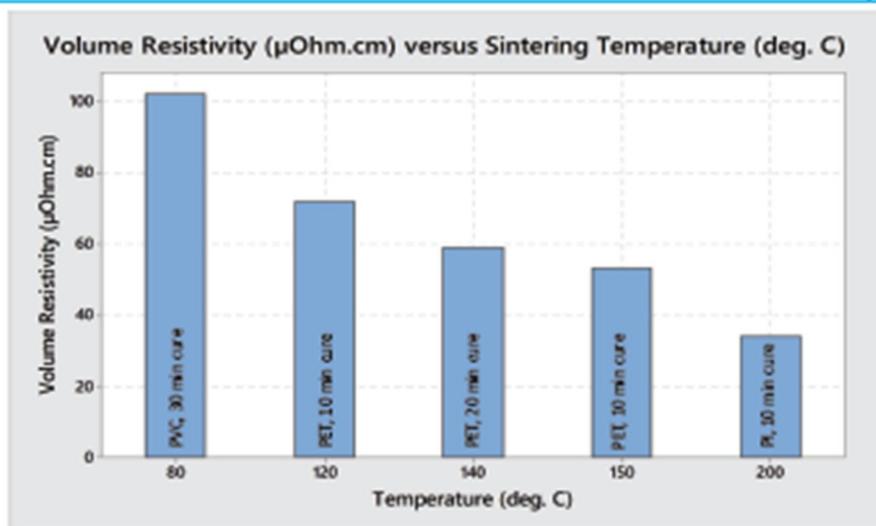
Paste Processing Conditions

Parameter	Typical Properties
Substrate	Textiles, elastomer films, PET, polyimide, glass, PVC
Screen	325 thread per inch stainless steel, 13 μm emulsion
Print speed	30-80 mm/s
Squeegee type	80A Shore

Pastes should be dried, before curing, at 60-80°C for 15 mins to remove solvents in an IR or convection oven. Typical curing parameters used are 80°C-200°C for 10 mins. Drying and curing times may be reduced to achieve the optimum resistivity depending on manufacturing process set-up. Line/space resolution of 250 μm can be achieved depending on print set-up.

Properties of the Cured Paste

Test	Properties
Sheet Resistance	<29 mΩ/□/mil (120°C)
Volume Resistivity	<72 μΩ.cm (120°C)
Adhesion	5B (depending on substrate)
Mechanical hardness	2B-5B – depending on curing temperature
Resistivity change after 2 Kg crease test	<5%
Stretchability	up to 140%
Repeatability	Resistance change <10%, 100 cycles at 20% elongation



Encapsulation Layers

Please contact Dycotec Materials regarding suitable stretchable encapsulating layers for your application.

Clean-Up

Equipment can be cleaned using benzyl alcohol then wipe dry with isopropanol.

Storage and Shelf-life

For optimum results, the containers should be stored in a fridge (4°C) with lids tightly sealed. The paste shelf-life for an unopened container is 6 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 12, Star West
 Westmoor, Westlea
 Swindon, Wiltshire
 SN5 7SW 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 use production method variations based on and to adjust such variations as may be advisable for the protection of operators and 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 Materials' 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 derivations of patents owned by others or as a license under any Dycotec Materials' 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.