



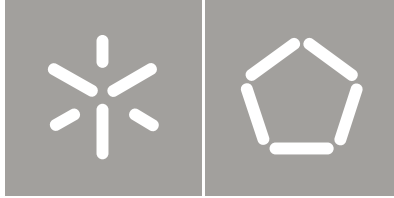
Ana Gabriela Pereira da Cunha

Desenvolvimento e caracterização de sensores  
de força/pressão flexíveis piezoresistivos

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana Gabriela Pereira da Cunha

Desenvolvimento e caracterização de sensores  
de força/pressão flexíveis piezoresistivos

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Têxtil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Hélder Manuel Teixeira Carvalho

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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



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

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

## 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.

Universidade do Minho, dezembro de 2021

Ana Gabriela Pereira da Cunha

Assinatura: *Ana Gabriela Pereira Cunha*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que tornaram este trabalho possível, quer a nível pessoal quer a nível académico. Um especial agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Hélder Carvalho por se ter mostrado sempre disponível para ajudar e responder a questões que foram surgindo durante o trabalho, e me ter facilitado o acesso a todas as infraestruturas e equipamentos necessários à investigação. Um agradecimento também a todos os técnicos de laboratório que foram incansáveis no auxílio à realização da parte prática do trabalho.

Um agradecimento especial à Doutora Juliana Oliveira da empresa Nanopaint, Lda. por, para além de vender as tintas necessárias ao trabalho, também se ter prontificado a ajudar e a responder a quaisquer dúvidas que pudessem surgir.

Por fim, um último agradecimento à minha família e amigos que tiveram um papel crucial no meu apoio durante todo este tempo, sem os quais este trabalho não seria possível.

## RESUMO

A pressão exercida em objetos ou em determinadas partes do corpo aquando da realização de algum movimento pode ser medida através da integração de sensores de pressão num têxtil. No caso da integração em vestuário, a flexibilidade de um sensor tem extrema importância. Uma forma de produzir sensores de pressão flexíveis é através da utilização de tinta piezoresistiva capaz de detetar pressões muito reduzidas. O sensor é constituído pela camada de tinta piezoresistiva, cuja resistência elétrica varia com a pressão que lhe é aplicada e elétrodos para fazer a ligação elétrica.

Este trabalho visa o estudo da aplicação da tinta piezoresistiva em combinação com tinta condutora elétrica ou tecido condutor para constituir os elétrodos. Estas são aplicadas sobre um tecido. Procura também explorar quais as melhores configurações para os sensores, inclusive os parâmetros de produção mais adequados. Neste trabalho descreve-se todo o processo de aplicação das tintas através de estamaria e a avaliação do funcionamento dos sensores resultantes.

Ao analisar os resultados obtidos, concluiu-se que foi possível produzir sensores funcionais utilizando elétrodos em tecido condutor. Por outro lado, a utilização da tinta condutora foi bastante problemática, tendo apenas uma das configurações utilizadas fornecido resultados interessantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estamaria, sensores piezoresistivos, sensores têxteis, tinta condutora, tinta piezoresistiva

## ABSTRACT

The pressure exerted on objects or on certain parts of the body when carrying out a movement can be measured through the integration of pressure sensors in a textile. In the case of garment integration, the flexibility of a sensor is extremely important. One way to produce flexible pressure sensors is through the use of piezoresistive ink capable of detecting very low pressures. The sensor consists of a layer of piezoresistive paint, whose electrical resistance varies with the pressure applied to it and electrodes to make the electrical connection.

This work aims to study the application of piezoresistive ink in combination with electrically conductive ink or conductive fabric to form the electrodes. These are applied over a fabric. It also seeks to explore the best configurations for the sensors, including the most suitable production parameters. This work describes the entire process of applying paints through stamping and the evaluation of the functioning of the resulting sensors.

By analyzing the results obtained, it was concluded that it was possible to produce functional sensors using electrodes in conductive fabric. On the other hand, the use of conductive ink was quite problematic, with only one of the configurations used providing interesting results.

**KEYWORDS:** Conductive ink, piezoresistive ink, piezoresistive sensors, screen-printing, textile sensors



# ÍNDICE

1	Introdução .....	1
1.1	Definição do problema .....	2
1.2	Objetivos do trabalho.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	2
2	Estado da arte .....	4
2.1	Sensores.....	4
2.1.1	Sensores capacitivos .....	4
2.1.2	Sensores piezoelétricos.....	4
2.1.3	Sensores piezoresistivos .....	5
2.2	Construção de um sensor piezoresistivo .....	5
2.2.1	Materiais piezoresistivos .....	6
2.2.2	Materiais dos elétrodos.....	7
2.2.3	Processo de estamaria das tintas.....	10
2.2.4	Trabalho anterior realizado no âmbito deste projeto .....	11
3	Materiais e métodos.....	11
3.1	Configurações dos sensores .....	11
3.2	Materiais de construção dos sensores .....	14
3.2.1	Tintas Nanopaint .....	14
3.2.2	Tecido de algodão .....	16
3.2.3	Tecido condutor.....	18
3.2.4	Rede de colagem termoplástica .....	19
3.3	Métodos de construção dos sensores .....	20
3.3.1	Impressão das tintas por estamaria .....	20
3.3.2	Impressão da tinta piezoresistiva por <i>coating</i> .....	21

3.4	Métodos de medição e análise.....	22
3.4.1	Multímetro.....	22
3.4.2	Ensaio de compressão cíclica .....	22
3.4.3	Programa de processamento de sinal .....	29
3.4.4	Microscopia eletrónica de varrimento .....	32
3.4.5	Medição da espessura das camadas de tinta .....	32
3.4.6	Programa de desenho vetorial.....	33
4	Planeamento experimental.....	34
4.1	Consolidação de experiências anteriores.....	34
4.2	Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tecido condutor .....	34
4.3	Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tinta condutora.....	35
4.3.1	Experiências preliminares com a tinta condutora.....	35
4.3.2	Sensores com eléctrodos coplanares .....	37
4.3.3	Sensores com eléctrodos de lados opostos do tecido .....	39
4.3.4	Sensores sanduíche.....	40
4.3.5	Sensores sanduíche colados.....	44
4.3.6	Sensores com eléctrodos interdigitados .....	45
4.3.7	Sensores produzidos com tecidos diferentes .....	50
5	Resultados e discussão .....	51
5.1	Consolidação de experiências anteriores.....	51
5.2	Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tecido condutor .....	51
5.3	Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tinta condutora.....	54
5.3.1	Experiências preliminares com a tinta condutora.....	54
5.3.2	Sensores com eléctrodos coplanares .....	57
5.3.3	Sensores com eléctrodos de lados opostos do tecido .....	59

5.3.4	Sensores sanduíche.....	61
5.3.5	Sensores sanduíche colados .....	66
5.3.6	Sensores com elétrodos interdigitados .....	67
5.3.7	Sensores produzidos com tecidos diferentes .....	70
6	Conclusões.....	72
7	Perspetivas futuras .....	75
8	Bibliografia .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efeito sofrido no cristal piezoelétrico quando está sob pressão (N.a., n.d.) .....	4
Figura 2. Efeito piezoresistivo (Goy et al., 2015).....	5
Figura 3. Estrutura de um sensor piezoresistivo (P. Gomes et al., 2018).....	5
Figura 4. Velostat (Steren, n.d.).....	6
Figura 5. Estrutura do sensor composto por Ripstop Silver e Velostat (Goy et al., 2015).....	7
Figura 6. Estrutura do sensor composto por EX-STATIC e Velostat (Valle-Lopera et al., 2017).....	8
Figura 7. Estrutura do sensor produzido com fios de cobre costurados no tecido, empresa americana Eeonyx (Baldoli et al., 2016) .....	8
Figura 8. Estrutura do sensor com os elétrodos de tecido EX-STATIC situados do mesmo lado (Valle-Lopera et al., 2017).....	9
Figura 9. Estrutura do sensor de base têxtil (Z. Zhou et al., 2018) .....	9
Figura 10. Processo de estampa ao quadro plano .....	10
Figura 11. Esquema do sensor com os elétrodos de lados opostos com tecido condutor .....	12
Figura 12. Esquema do sensor com os elétrodos de lados opostos com tinta condutora .....	12
Figura 13. Esquema do sensor sanduiche.....	13
Figura 14. Esquema do sensor com elétrodos interdigitados .....	13
Figura 15. Tinta condutora da Nanopaint .....	15
Figura 16. Tinta piezoresistiva da Nanopaint (Nanopaint_Lda., n.d.).....	16
Figura 17. Estrutura de um tecido tafetá (Pereira, n.d.) .....	17
Figura 18. Tecido condutor Statex Bremen.....	18
Figura 19. Prensa de aquecimento .....	19
Figura 20. Mesa de estampa Zimmer Mini MD-F R54 presente no laboratório de estampa da Universidade do Minho .....	20
Figura 21. Técnica de coating com faca (esquerda) (Shim, 2019) e equipamento de coating Mathis CH-8155, presente no laboratório (direita) .....	21

Figura 22. Multímetro para a medição da resistência do sensor (Multímetro Digital, n.d.).....	22
Figura 23. Esquema da configuração de medição .....	23
Figura 24. Configuração do teste de compressão cíclica. Computador com software de aquisição do sinal (amarelo), computador para configuração e aquisição da força (verde), DAQ (azul), máquina de teste Hounsfield (roxo), sensor (rosa) .....	23
Figura 25. Circuito de condicionamento do sensor piezoresistivo (Carvalho et al., 2017).....	24
Figura 26. Gráfico força vs resistência de um sensor produzido com tecido condutor, durante 10 ciclos de ensaio .....	24
Figura 27. Gráfico força vs tensão de um sensor produzido com tecido condutor, durante 10 ciclos de ensaio .....	25
Figura 28. Haste transversal móvel com uma célula de força de 2.5 kN, um punção de compressão (em cima), placa fixa (em baixo) .....	25
Figura 29. Software de configuração e aquisição da força aplicada no sensor .....	26
Figura 30. Software "SensorSignalAquisition" no qual se introduz a tensão de entrada pretendida e a tensão de saída registada pelo sensor.....	26
Figura 31. Gráfico força vs resistência, linha de tendência (branco) e respetiva equação.....	27
Figura 32. Gráfico da tendência do valor da resistência .....	29
Figura 33. Sinais de força e tensão abertos no software .....	30
Figura 34. Picos dos sinais .....	30
Figura 35. Sinais truncados .....	31
Figura 36. Gráficos de força vs tensão e força vs resistência, respetivamente .....	31
Figura 37. Uma camada de tinta piezoresistiva com 20% de aditivo, estampada no tecido de algodão	34
Figura 38. Sensor com elétrodos de tecido condutor e tinta piezoresistiva com 20% de aditivo .....	35
Figura 39. Mapa de experiências com elétrodos de tecido condutor.....	35
Figura 40. Diferentes configurações da tinta condutora .....	36
Figura 41. Elétrodos de tinta condutora curados a 80°C.....	37

Figura 42. Eléttodos de tinta condutora curados a 120°C.....	37
Figura 43. Sensores estampados com uma camada de tinta piezoresistiva e com os eléttodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita).....	38
Figura 44. Sensores estampados com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os eléttodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita).....	38
Figura 45. Sensores estampados com três camadas de tinta piezoresistiva e com os eléttodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita).....	39
Figura 46. Mapa de experiências com eléttodos coplanares .....	39
Figura 47. Sensores estampados com tinta condutora de lados opostos e com uma e duas camadas de tinta piezoresistiva, respetivamente, e com eléttodos espaçados 10 mm um do outro .....	40
Figura 48. Mapa de experiências com eléttodos de lados opostos .....	40
Figura 49. Eléttodos estampados com uma camada de tinta condutora .....	41
Figura 50. Faces dos sensores estampados com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva.....	41
Figura 51. Faces dos sensores estampados com uma camada de tinta condutora e duas camadas de tinta piezoresistiva .....	41
Figura 52. Chapa com espessura de 0,60 mm utilizada para estampar a tinta piezoresistiva .....	42
Figura 53. Uma camada de tinta piezoresistiva estampada utilizando a chapa.....	42
Figura 54. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica.....	43
Figura 55. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva usando a técnica de coating .....	43
Figura 56. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e duas camadas de tinta piezoresistiva usando a técnica de coating .....	44
Figura 57. Mapa de experiências dos sensores sanduiche.....	44
Figura 58. Montagem do sensor com a rede termoplástica.....	45
Figura 59. Mapa de experiências dos sensores sanduiche colados .....	45

Figura 60. Desenho dos eléttodos interdigitados com 2 mm de espaçamento entre linhas, linhas horizontais com 2 mm de espessura e linhas verticais com 3 mm de espessura .....	46
Figura 61. Processo de estamparia da tinta condutora, desde o quadro com o desenho gravado, à colocação da tinta condutora no quadro e à passagem da vareta arrastando a tinta pelo desenho, respetivamente.....	46
Figura 62. Eléttodos interdigitados com 2 mm de espaçamento entre linhas, linhas horizontais com 2 mm de espessura e linhas verticais com 3 mm de espessura .....	47
Figura 63. Desenhos dos eléttodos com 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita) de espaçamento entre linhas condutoras .....	47
Figura 64. Quadro aberto com os desenhos dos eléttodos com espaçamentos entre linhas de 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita) .....	47
Figura 65. Eléttodos interdigitados com espaçamentos entre linhas de 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita) .....	48
Figura 66. Processo de estamparia da tinta piezoresistiva nos eléttodos interdigitados, usando a chapa .....	48
Figura 67. Sensores estampados com 1 camada de tinta condutora, com eléttodos interdigitados com 3 e 4 mm de espaçamento entre as linhas do eléttodo, respetivamente, e 1 camada de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica .....	49
Figura 68. Sensores estampados com 1 camada de tinta condutora, com eléttodos interdigitados com 3 e 4 mm de espaçamento entre as linhas do eléttodo, respetivamente, e 2 camadas de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica .....	49
Figura 69. Mapa de experiéncias com eléttodos interdigitados .....	49
Figura 70. Comparação dos sinais tensão-força de um sensor produzido sem aditivo (esquerda) e de um sensor produzido com 20% aditivo (direita).....	51
Figura 71. Sinal de tensão do sensor estampado com 50% de aditivo e com uma camada de cada lado .....	52
Figura 72. Gráfico força-tensão do sensor estampado com 20% de aditivo e com uma camada de cada lado.....	52

Figura 73. Gráfico força-tensão do sensor estampado com 20% de aditivo e com duas camadas de cada lado.....	52
Figura 74. Gráfico força-tensão do sensor estampado sem aditivo e com duas camadas de cada lado.....	53
Figura 75. Mapa de experiências com elétrodos de tecido condutor e respectivos resultados.....	53
Figura 76. Elétrodos estampados do lado oposto da tinta piezoresistiva curados a 80 e a 120°C, respectivamente.....	55
Figura 77. Imagens SEM do sensor com duas camadas de tinta piezoresistiva, sem aditivo, de cada lado e elétrodos opostos (dimensões das imagens de 200 (a), 100 (b) e 50 (c) $\mu\text{m}$ , respectivamente) .....	56
Figura 78. Sensores estampados com três camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita) .....	57
Figura 79. Sinal de tensão do sensor estampado com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm entre si .....	58
Figura 80. Sinal de tensão do sensor estampado com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm entre si .....	58
Figura 81. Sinal de tensão do sensor estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm entre si .....	58
Figura 82. Sinal de tensão do sensor estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm entre si .....	58
Figura 83. Mapa de experiências com elétrodos coplanares e respectivos resultados .....	59
Figura 84. Face oposta dos sensores estampados com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm (esquerda) e 10 mm (direita).....	60
Figura 85. Imagens SEM do sensor com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos (dimensões das imagens de 100 (a), 40 (b), 100 (c) e 40 (d) $\mu\text{m}$ , respectivamente) .....	60
Figura 86. Mapa de experiências com elétrodos estampados de lados opostos e respectivos resultados .....	61
Figura 87. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face .....	62



Figura 88. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face .....	62
Figura 89. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva em cada face .....	62
Figura 90. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva em cada face .....	62
Figura 91. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a chapa metálica .....	64
Figura 92. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a chapa .....	64
Figura 93. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a técnica de coating .....	64
Figura 94. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a técnica de coating.....	65
Figura 95. Mapa de experiências dos sensores sanduiche e respectivos resultados .....	65
Figura 96. Sensor descolado com a rede termoplástica visível numa das faces.....	66
Figura 97. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face .....	67
Figura 98. Mapa de experiências dos sensores sanduiche colados e respectivos resultados .....	67
Figura 99. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com uma camada de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 3 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo .....	68
Figura 100. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com uma camada de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 4 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo .....	69
Figura 101. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 3 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo .....	69
Figura 102. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 4 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo .....	69
Figura 103. Mapa de experiências com elétrodos interdigitados e respectivos resultados.....	69

Figura 104. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido impermeável com uma camada de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos.....	70
Figura 105. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido de poliéster com uma camada de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos .....	70
Figura 106. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido impermeável com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos interdigitados .....	70
Figura 107. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido de poliéster com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos interdigitados .....	71

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características do tecido utilizado.....	17
Tabela 1 continuação. Características do tecido utilizado .....	18
Tabela 2. Sensores produzidos num tecido impermeável e num tecido de poliéster .....	50
Tabela 3. Resistências por unidade de comprimento registadas nos diferentes tipos de elétrodos estampados .....	54
Tabela 3 continuação. Resistências por unidade de comprimento registadas nos diferentes tipos de elétrodos estampados.....	55
Tabela 4. Espessuras das camadas piezoresistivas dos sensores .....	63
Tabela 5. Espessuras da camada piezoresistiva dos sensores interdigitados .....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AgNW	Nano fios de prata
Bar	Bares (unidade de pressão)
cm	Centímetros
cm <sup>2</sup>	Centímetros quadrados
DAC	Circuito de condicionamento de sinal
DAQ	Placa de aquisição de sinal
F	Força
g	gramas
g/m <sup>2</sup>	gramas por metro quadrado
kN	quilo Newton
kPa	quilo Pascal
m	metros
mm	milímetros
min	minuto
m <sup>2</sup>	metros quadrados
mΩ	mili Ohms
N	Newton
Pa.s	Pascal segundo
PET	Polietileno tereftalato
R	Resistência
R <sub>s</sub>	Resistência do sensor
SEM	Microscópio eletrônico de varrimento (do inglês, Scanning Electron Microscopy)
tex	gramas por 1000 metros (unidade de massa linear do fio)
TPI	Fios por polegada
V	Tensão
V <sub>i</sub>	Tensão de saída
V <sub>o</sub>	Tensão de entrada
°C	Graus centígrados
Ω	Ohms
Ω/□	Ohms por quadrado
μm	micrómetros
%	percentagem

# 1 Introdução

Os têxteis inteligentes têm vindo a tornar-se uma tendência cada vez mais dominante no desenvolvimento dos têxteis, especialmente os que envolvem componentes eletrónicos na sua composição. Estes têm a capacidade de sentir e medir estímulos térmicos, químicos ou mecânicos, e de responder a estes estímulos. Os têxteis inteligentes podem ser ativos, quando sentem os estímulos do ambiente, mas também reagem em função deles, funcionando como sensores e atuadores simultaneamente. Podem ser passivos, quando só sentem os estímulos, funcionando apenas como sensores. E, ainda, podem ser têxteis muito inteligentes que medem, reagem e se adaptam ao ambiente (Van Langenhove et al., 1989). O crescente desenvolvimento dos têxteis inteligentes tem atraído a atenção de áreas como a da saúde, desporto, entretenimento, proteção e segurança.

A aplicação de sensores em têxteis tem sido muito explorada, pois estes têm a capacidade de medir dados biométricos e fisiológicos em tempo real. A pressão exercida em objetos ou noutras partes do corpo aquando da realização de algum movimento pode ser medida através da integração de sensores de pressão num determinado têxtil. Os sensores de pressão são muito procurados pelas áreas da saúde e do desporto, com o intuito de, por exemplo, aumentar o conforto de pessoas acamadas ou em cadeiras de rodas, tentar reduzir lesões e aumentar a performance dos atletas (Francis et al., 2018; Possanzini et al., 2019).

Para que os sensores de pressão atinjam o seu potencial máximo, oferecendo um maior conforto ao utilizador, o próprio sensor tem de ser feito de um material têxtil. Este tem de ser leve, flexível, lavável, fino e respirável, ter elevada sensibilidade e, ainda, ter um baixo custo de produção (Goy et al., 2015). A flexibilidade e a lavabilidade do sensor têm extrema importância para a sua integração em vestuário, e uma forma de incorporar estas propriedades é através da utilização de tintas com propriedades condutoras e tintas piezoresistivas capazes de detetar até pressões muito reduzidas, atuando numa gama altamente sensível (Nanopaint\_Lda., 2017).

Para a produção dos sensores foi usada uma tinta piezoresistiva à base de partículas de carbono e uma tinta condutora composta por partículas de prata. Ambas as tintas foram estampadas sobre um tecido tafetá de algodão, por este ser mais uniforme e absorvente, e permitir uma maior homogeneidade das camadas de tinta impressas. As tintas foram impressas por um processo de estamaria ao quadro plano, uma vez que é um processo barato e que possibilita uma grande variedade de desenhos para os

sensores, desde sensores com elétrodos quadrados a sensores com elétrodos interdigitados. Uma vez produzidos os sensores, estes foram testados, preliminarmente com um multímetro para ver se funcionavam ou não, e depois, caso funcionassem, foram submetidos a um ensaio de compressão cíclica. Por fim, os resultados foram analisados num software de processamento dos sinais obtidos e as conclusões retiradas foram úteis para perspetivas de trabalhos futuros.

## 1.1 Definição do problema

Atualmente, a aplicação de sensores no vestuário tem vindo a crescer, sendo cada vez maior a exigência no seu fabrico. Este tipo de e-têxteis é muito usado na área hospitalar e no desporto, estando muitas das vezes em contacto direto com o corpo, o que faz com que haja interação destes com fluídos corporais. Isto implica que haja uma lavagem regular das peças, o que obriga o sensor a ser lavável e resistente à temperatura da lavagem, para não correr o risco de encolher. Outro aspeto muito importante é a flexibilidade do sensor, uma vez que este não pode influenciar os movimentos do utilizador, afetando negativamente a atividade, tal como acontece com sensores mais rígidos. Com a produção de sensores flexíveis, o conforto para o utilizador e a sua gama de aplicações irão aumentar.

## 1.2 Objetivos do trabalho

Os objetivos deste trabalho focam-se no desenvolvimento de sensores de força/pressão flexíveis, que sejam à base de tintas eletricamente condutoras, tintas piezoresistivas e outros materiais, impressos sobre os têxteis. Para isso, será feita uma seleção e teste de materiais, uma otimização dos processos de construção, a ligação e o encapsulamento flexível dos sensores, terminando com a caracterização dos mesmos.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Uma vez feito o enquadramento da definição do problema e apresentados os objetivos do trabalho, fez-se uma pesquisa sobre o estado da arte de todos métodos de construção de sensores piezoresistivos,

incluindo os diferentes materiais piezoresistivos e os materiais dos elétrodos. De seguida, fez-se uma breve referência a um trabalho realizado anteriormente no qual o presente trabalho se baseou.

No capítulo dos materiais e métodos foram abordados todos os materiais usados para a construção dos sensores desde as tintas, ao tecido de algodão, passando pelo tecido condutor e a rede termoplástica usados em alguns sensores. Foram também detalhados os métodos de impressão das tintas quer por estamaria, quer por *coating*. Na parte final deste capítulo foram identificados os métodos de medição e análise usados, de entre os quais se destacam o multímetro, o ensaio de compressão cíclica, o programa de processamento de sinal e o microscópio eletrónico de varrimento.

Na parte do planeamento experimental, foi apresentado todo o planeamento seguido, em conjunto com todos os processos seguidos. Na fase inicial, foram apresentados os sensores que foram produzidos com tecido condutor e de seguida foram enumeradas todas as configurações de sensores produzidos usando as tintas condutora e piezoresistiva.

No capítulo da discussão de resultados foram analisados os sinais obtidos no programa de processamento de sinal e foram avaliados quais os sensores produzidos que tinham obtido melhores resultados.

Por fim, no capítulo das conclusões foi feita uma análise de todo o trabalho realizado, com o intuito de averiguar se todos os processos e metodologias seguidas foram as melhores opções e se os objetivos do trabalho foram cumpridos.

## 2 Estado da arte

### 2.1 Sensores

Um sensor é um dispositivo capaz de detetar um estímulo físico ou químico convertendo-o num sinal elétrico processável. Existem dois tipos de sensores, os físicos e os químicos. Os primeiros medem calor, temperatura, humidade, pressão, luminosidade, entre outras, enquanto que os segundos medem o valor de ph, força iónica, o potencial eletroquímico e outras variáveis (Elektro4000, n.d.).

Os sensores de pressão medem a pressão exercida num determinado local. Por outras palavras, medem a força por unidade de área, sendo esta expressa em Pascal. E podem ser de três tipos diferentes: capacitivos, piezoelétricos ou piezoresistivos (HBM, n.d.).

#### 2.1.1 Sensores capacitivos

Um sensor de pressão capacitivo é composto por duas camadas que entre si criam um campo elétrico. Aquando da aplicação de pressão sobre o sensor, a distância entre as camadas diminui e há uma alteração na capacitância, diminuindo proporcionalmente com a força aplicada (Meyer et al., 2006).

#### 2.1.2 Sensores piezoelétricos

Neste tipo de sensor de pressão é criada uma carga piezoelétrica quando uma ação mecânica é aplicada sobre o mesmo. No seu interior encontra-se um cristal que sofre um rearranjo das suas cargas quando a força é aplicada, gerando assim uma tensão elétrica proporcional à força (AvnetAbacus, n.d.).

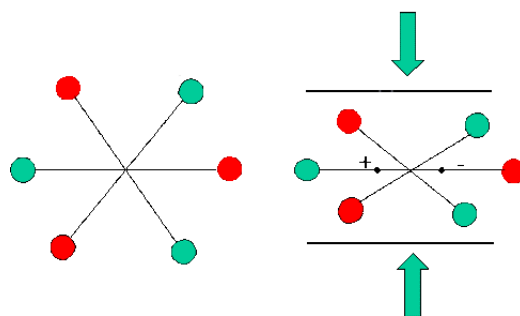


Figura 1. Efeito sofrido no cristal piezoelétrico quando está sob pressão (N.a., n.d.)



### 2.1.3 Sensores piezoresistivos

Um sensor piezoresistivo é um dispositivo que sofre uma variação da sua resistência elétrica quando lhe é aplicada uma força. É composto por três camadas, duas exteriores condutoras e uma intermédia com propriedades piezoresistivas. Quando a pressão é aplicada, as camadas condutoras aproximam-se, a distância entre as partículas diminui, resultando numa diminuição da resistência, e consequente aumento da intensidade da corrente (Goy et al., 2015).

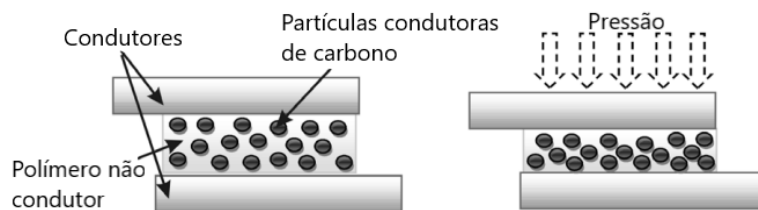


Figura 2. Efeito piezoresistivo (Goy et al., 2015)

### 2.2 Construção de um sensor piezoresistivo

O sensor piezoresistivo é normalmente composto por três camadas, tal como podemos ver na figura abaixo. As camadas exteriores são constituídas por elétrodos flexíveis, através dos quais se faz a conexão elétrica. Entre os elétrodos é colocada uma camada piezoresistiva condutora, que tem como função medir as variações de pressão registadas (P. Gomes et al., 2018).

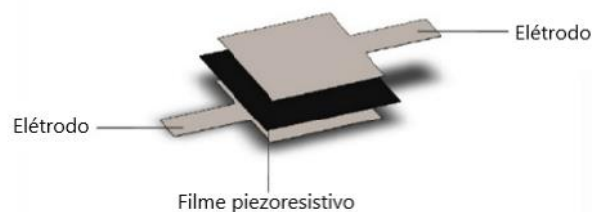


Figura 3. Estrutura de um sensor piezoresistivo (P. Gomes et al., 2018)

### 2.2.1 Materiais piezoresistivos

A camada piezoresistiva, que tem como função medir as diferenças de pressão através da variação da sua resistência, pode ser feita a partir de vários materiais condutores.

Pode ser um polímero baseado em nano carbonáceos ou nano filamentos de metal que aumentam as características metálicas, elétricas e eletromecânicas do próprio polímero (Costa et al., 2018).

Pode ter como base um substrato têxtil ao qual são conferidas propriedades condutoras através da aplicação de materiais condutores nos tecidos ou nas próprias fibras, dando origem a um material piezoresistivo flexível. Temos o exemplo de nanopartículas ou nano fios metálicos, nanopartículas de carbono, ou até mesmo polímeros condutores.

Um material piezoresistivo muito utilizado é o Velostat, que é produzido pela empresa americana 3M, e consiste num filme condutor de polietileno, impregnado com partículas de carbono (Jeong et al., 2011; Valle-Lopera et al., 2017). É resistente à água, mas danifica-se a temperaturas superiores a 65°C. É muito usado devido às suas propriedades anti estáticas e ao seu baixo custo. A sua resistividade situa-se abaixo dos 500  $\Omega$  cm e a sua resistência diminui quando este sofre a ação de uma força de pressão (Jeong et al., 2011).



*Figura 4. Velostat (Stereon, n.d.)*

Pode também ser usada uma tinta piezoresistiva que é impressa sobre o tecido, obtendo-se assim um material flexível. Esta pode ser aplicada em diversos tipos de substratos, como têxteis ou polímeros, e a sua aplicação pode ser feita de várias formas destacando-se a estamperia ao quadro plano. É uma solução barata para aplicação num sensor (Nanopaint\_Lda., 2017).

## 2.2.2 Materiais dos elétrodos

Para a produção de um sensor de pressão têxtil normalmente recorre-se ao uso de tecido ou fios condutores como material dos elétrodos. Podem ser tecidos impregnados com partículas metálicas, tecidos nos quais são adicionados fios metálicos, por revestimento com nano fios ou ainda por estampa dos elétrodos com tintas condutoras.

A empresa americana LessEMF produz vários tecidos condutores que podem ser integrados nos sensores, desde o tecido *Ripstop Silver* ao tecido *EX-STATIC*. O *Ripstop Silver* consiste num tecido de 100% poliamida impregnado com partículas de prata. De acordo com estudos realizados, revelou ter boa sensibilidade, e ter as características desejadas de conforto, tamanho e peso para ser usado como material do elétrodo flexível. No estudo apresentado, foi utilizado um tecido adesivo a quente para fazer a união das camadas, como podemos ver na figura abaixo, onde se apresenta a estrutura do sensor composto por *Velostat* e *Ripstop Silver* (Goy et al., 2015).

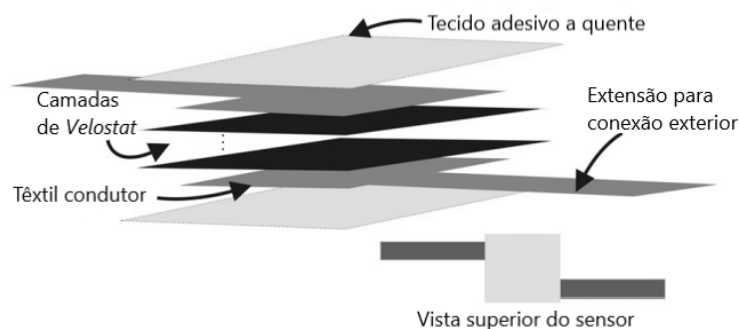


Figura 5. Estrutura do sensor composto por Ripstop Silver e Velostat (Goy et al., 2015)

O *EX-STATIC* consiste num tecido de 87% de poliéster e 13% de *BASF Resistant*, que são fibras de carbono que são tecidas no tecido de poliéster. Este tecido apresenta uma resistividade de  $10^5 \Omega/\square$  o que lhe confere características anti estáticas (LessEMF\_Inc., n.d.).

No caso do tecido *EX-STATIC*, a construção do sensor foi feita como vemos na figura abaixo.

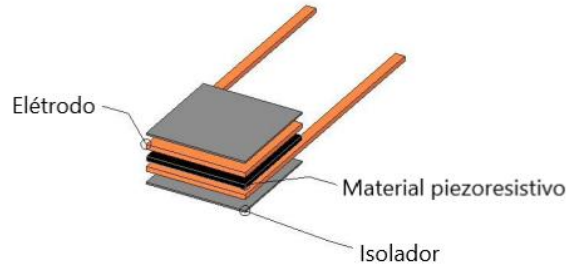


Figura 6. Estrutura do sensor composto por EX-STATIC e Velostat (Valle-Lopera et al., 2017)

Outro tipo de tecido para os eléctrodos, consiste em utilizar tecidos não condutores nos quais são costurados fios de cobre, criando um padrão de riscas alternando regiões condutoras com regiões não condutoras. As camadas dos eléctrodos foram orientadas 90° uma com a outra criando zonas sensíveis à pressão nas interseções das filas com as colunas, como podemos ver na Figura 7 (Baldoli et al., 2016).

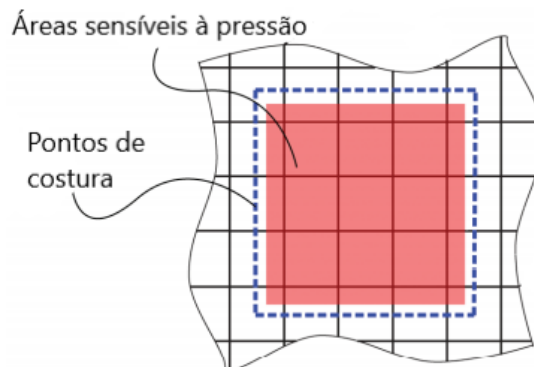


Figura 7. Estrutura do sensor produzido com fios de cobre costurados no tecido, empresa americana Eeonyx (Baldoli et al., 2016)

Este tipo de construção do sensor revelou ter uma boa performance e adequabilidade, ser fino, leve e confortável para o utilizador (Baldoli et al., 2016).

Uma forma alternativa às tradicionais de construção do sensor, é colocar os dois eléctrodos do mesmo lado, sem que haja contacto entre eles. Isto é feito com um desenho especial dos eléctrodos, os quais são interdigitados tal como podemos observar na Figura 8, onde o tecido usado nos eléctrodos é o EX-STATIC e na camada intermédia é usada uma tinta piezoresistiva (Valle-Lopera et al., 2017).

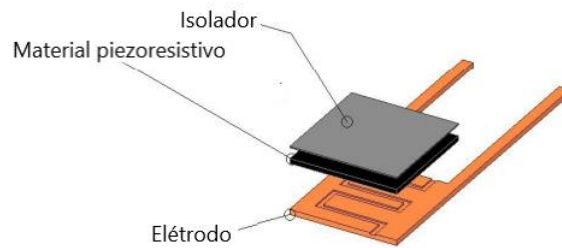


Figura 8. Estrutura do sensor com os elétronos de tecido EX-STATIC situados do mesmo lado (Valle-Lopera et al., 2017)

Estes sensores resistivos são muito conhecidos por ter este tipo de construção. São dispositivos finos e flexíveis, muito comumente utilizados no mundo da música (I. Yaniger, n.d.).

Dentro desta opção alternativa de construção do sensor de pressão, foi estudado o uso de um tecido de algodão revestido com nano fios de prata (AgNW) como camada piezoresistiva, e um tecido de algodão estampado com prata como elétron. É também aplicada uma fita adesiva flexível para fixar as camadas umas às outras. O processo de fabricação deste sensor é simples, tem baixo custo e produz sensores com sensibilidade para uma vasta gama de pressões (Z. Zhou et al., 2018).

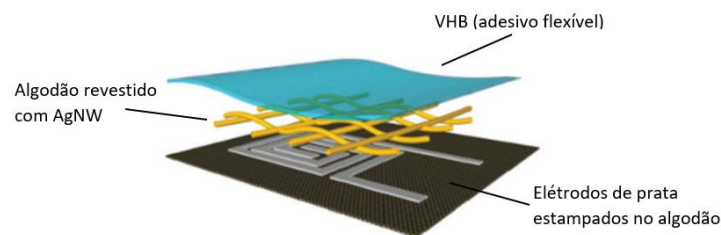


Figura 9. Estrutura do sensor de base têxtil (Z. Zhou et al., 2018)

A utilização de tinta condutora como elétronos é uma alternativa que promove a flexibilidade do sensor e que poderá tornar possível a sua lavagem. Esta tem como função estabelecer a ligação elétrica do sensor e pode ser aplicada por uma técnica de estampa convencional. A tinta é estampada diretamente no substrato têxtil, sem que seja necessária a adição de fixadores à pasta de estampa. Pode ser aplicado em diversos substratos, sendo que o que obteve melhores resultados ao nível da durabilidade da tinta e da condutividade elétrica, depois de sujeitos a processos de lavagem, foi o algodão (Pedro Gomes et al., 2020).

### 2.2.3 Processo de estamaria das tintas

A tinta piezoresistiva pode ser impressa no tecido por meio de vários processos de estamaria. Pode ser feita estamaria ao quadro plano, deposição por spray ou deposição gota a gota da tinta. Num estudo realizado previamente, estas três técnicas foram comparadas, chegando-se à conclusão de que a que se revelou ser a técnica mais adequada foi a estamaria ao quadro plano. Isto deve-se ao facto de através desta se obter estabilidade eletromecânica e uma maior sensibilidade à deformação (Castro et al., 2018).

Um processo de estamaria a quadro plano, é um método que tem como vantagem ser bastante económico, podendo ser utilizado para produção em grande escala. Não altera as propriedades do têxtil e possibilita a estamaria de uma grande variedade de desenhos. À semelhança da tinta piezoresistiva, a técnica de estamaria da tinta condutora também será ao quadro plano.

Na estamaria ao quadro plano o desenho é gravado numa tela de mono filamento de poliéster, em que os quadros são cobertos com um produto fotossensível, que se torna insolúvel quando exposto à luz. As misonetes, nas quais foi previamente gravado o desenho, são colocadas entre a luz e os quadros de forma a impedir que haja solidificação do produto fotossensível na região do desenho. Por fim, o quadro é lavado para retirar o produto fotossensível das zonas que não ficaram expostas à luz (P. M. da C. Gomes, 2013). No que diz respeito à estamaria propriamente dita, a tinta é transferida para o tecido por ação de uma vareta de aço que está sujeita a uma força eletromagnética criada pela própria máquina, podendo-se fazer variar a pressão aplicada.

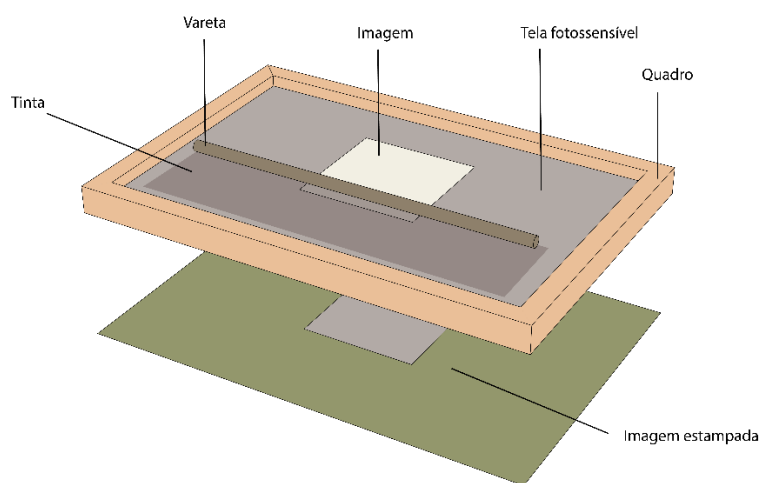


Figura 10. Processo de estamaria ao quadro plano

## 2.2.4 Trabalho anterior realizado no âmbito deste projeto

O presente trabalho tem como base um outro trabalho realizado na Universidade do Minho, no qual foram produzidos sensores piezoresistivos flexíveis, imprimindo tinta piezoresistiva da Nanopaint num tecido de algodão e utilizando um tecido condutor revestido de prata como elétrodos. Ao longo do trabalho foram variados alguns parâmetros como por exemplo, a espessura da tinta e a condutividade, de modo a detetar diferenças no comportamento dos sensores (Obwald, 2020).

Os sensores foram colocados numa máquina de teste de compressão cíclica e, ao mesmo tempo, conectados a um circuito de condicionamento que convertia a variação de resistência do sensor numa variação da sua tensão de saída. As medições mostraram comportamentos quase constantes para sensores com pouca condutividade da tinta e uma gama de variação de resistências bastante ampla, dos 20mΩ aos 200Ω. No entanto, alguns dos sinais obtidos apresentavam histerese, comportamentos mais inconstantes e alguma dispersão de resultados (Obwald, 2020).

Posto isto, o presente trabalho tem como base alguns conceitos da metodologia usada no projeto apresentado, mas em vez de utilizar elétrodos de tecido condutor, tem como objetivo produzir elétrodos utilizando tinta condutora.

## 3 Materiais e métodos

No presente capítulo são apresentados os materiais selecionados para a produção do sensor piezoresistivo e os respetivos métodos de construção. São ainda descritos os métodos de medição usados no teste dos sensores produzidos.

### 3.1 Configurações dos sensores

Ao longo do trabalho foram exploradas quatro variantes diferentes de construção dos sensores piezoresistivos flexíveis.

Numa primeira fase, e dado que o presente trabalho se baseou num outro previamente realizado, foram produzidos sensores nos quais os elétrodos eram constituídos por um tecido condutor e a tinta

piezoresistiva foi estampada no tecido de algodão pelo método de estampa a quadro plano (N.a., 2020).

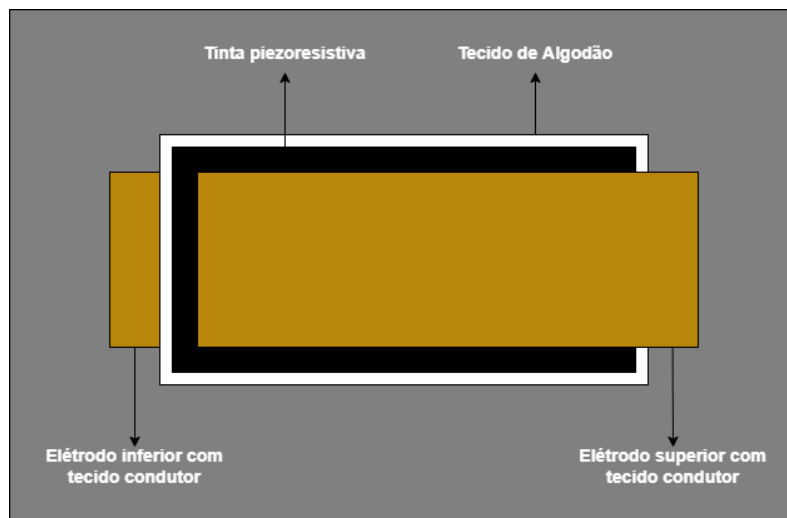


Figura 11. Esquema do sensor com os eléctrodos de lados opostos com tecido condutor

Visto que um dos objetivos do presente trabalho era produzir sensores através da impressão de tintas piezoresistivas e condutoras, a segunda configuração é composta por três camadas de tinta. As exteriores são compostas por tinta condutora e irão dar origem aos eléctrodos, e a do meio é composta por tinta piezoresistiva, ambas estampadas sobre o tecido de algodão.

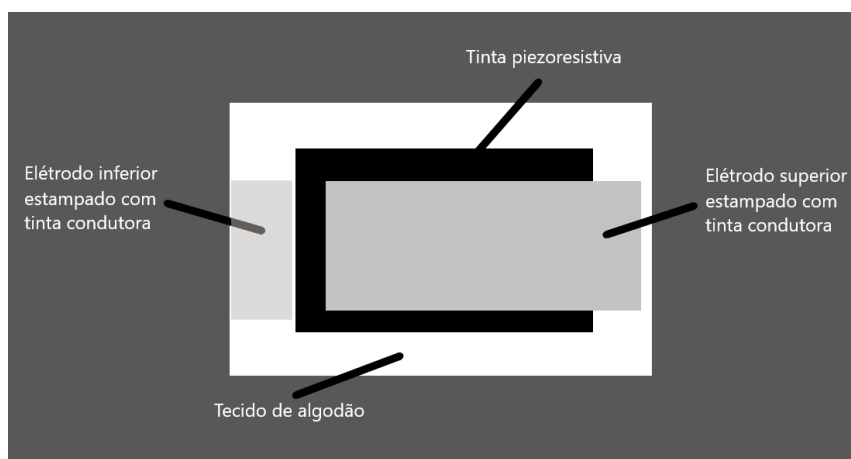


Figura 12. Esquema do sensor com os eléctrodos de lados opostos com tinta condutora

A terceira configuração é a dos sensores sanduiche, em que o processo de impressão se assemelha ao referido anteriormente, mas com a diferença de que o sensor está dividido em duas metades. Num pedaço do tecido de algodão é estampado primeiramente o eléctrodo, seguido da



estamparia da tinta piezoresistiva, repetindo o processo noutra peça diferente do tecido de algodão e juntando os dois, pondo em contacto as duas faces piezoresistivas.

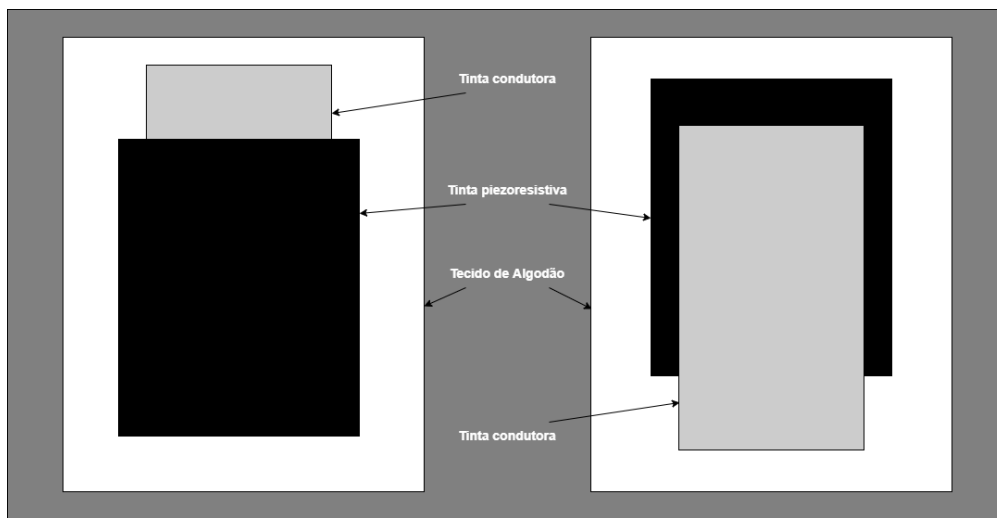


Figura 13. Esquema do sensor sanduíche

Por fim, foram produzidos sensores com elétrodos interdigitados. Primeiro, foram estampados os elétrodos com a tinta condutora e só depois as camadas de tinta piezoresistiva. Na imagem os elétrodos aparecem por cima da tinta piezoresistiva para ser possível ver o padrão dos elétrodos interdigitados.

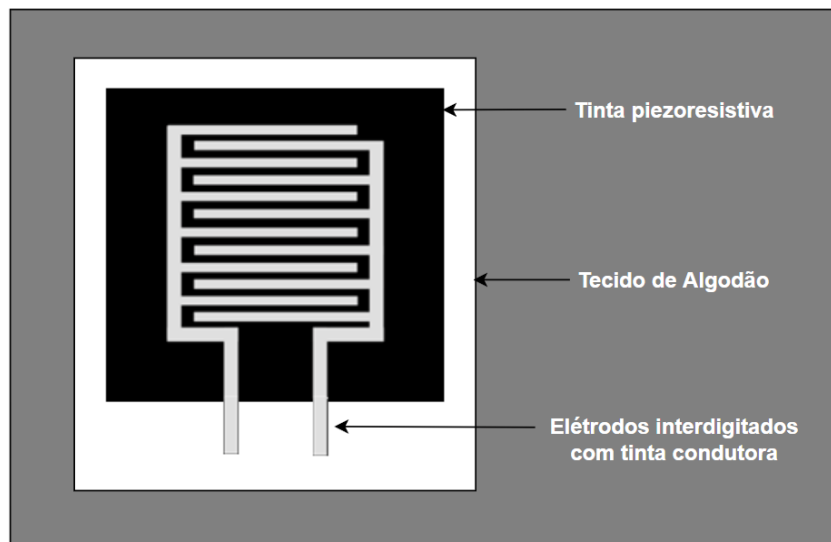


Figura 14. Esquema do sensor com elétrodos interdigitados

## 3.2 Materiais de construção dos sensores

### 3.2.1 Tintas Nanopaint

A Nanopaint é uma *spinoff* da Universidade do Minho, criada em 2016, que se especializou no desenvolvimento e produção de tintas funcionais e sensores impressos. Dentro da sua variedade de produtos destacam-se a tinta piezoresistiva, piezoelétrica, magnética e tintas para produzir baterias impressas. A utilização de tintas impressas no têxtil dá origem a sensores flexíveis e a uma grande gama de desenhos possíveis (Nanopaint\_Lda., n.d.-b). A tinta piezoresistiva é produzida pela Nanopaint enquanto a condutora é fornecida por eles.

#### 3.2.1.1 Tinta condutora da Nanopaint

A tinta condutora Silver100NP é uma pasta de prata com propriedades elásticas, que pode ser usada em diversos substratos como têxteis, PET, poliamida, vidro, entre outros. É impressa por estamaria ao quadro plano e pode ser usada em diversas aplicações como sensores e dispositivos médicos (Nanopaint\_Lda., 2020).

Para aplicar a tinta, esta tem de estar à temperatura ambiente e é necessário mexê-la com uma espátula para evitar a incorporação de bolhas de ar. Tem uma condutividade elétrica de cerca de  $29\text{ m}\Omega/\square/\text{mil}$ , é extensível até 140%, tem uma viscosidade de 8-20 Pa.s e a sua temperatura de cura situa-se dos 80 aos 200°C. O diâmetro das suas partículas situa-se entre os 5 e os 7  $\mu\text{m}$  (Nanopaint\_Lda., 2020).



*Figura 15. Tinta condutora da Nanopaint*

### *3.2.1.2 Tinta piezoresistiva da Nanopaint*

A tinta PR-2 da Nanopaint é uma tinta piezoresistiva que contém partículas de carbono com um diâmetro máximo de 10  $\mu\text{m}$ , que pode ser usada em diversas aplicações como sensores de pressão, aplicações para medição da performance de atletas, entre outras. A forte variação da sua resistência elétrica, quando sofre a ação de uma força mecânica, torna-a muito adequada para aplicação em sensores de pressão. A sua elevada flexibilidade e extensibilidade permitem a produção de sensores flexíveis inovadores (Nanopaint\_Lda., 2017).

A tinta piezoresistiva pode ser aplicada por diversas técnicas de estampa, mas a que se destaca é a estampa ao quadro plano. Antes da sua utilização é necessário colocar a tinta num banho de ultrassons durante 60 minutos, seguida de agitação mecânica durante 30 a 60 minutos. Devido às suas propriedades inerentes, não é preciso nenhum tipo de tratamento para ativar as propriedades eletroativas da tinta piezoresistiva. Depois de estampada, a tinta é curada durante 10 minutos a 60°C (Nanopaint\_Lda., 2017).



Figura 16. Tinta piezoresistiva da Nanopaint (Nanopaint\_Lda., n.d.)

- **Aditivo da Nanopaint adicionado à tinta piezoresistiva**

Em algumas das amostras produzidas foi aplicado um aditivo à tinta piezoresistiva, uma vez que, no trabalho realizado anteriormente, ao produzir sensores com áreas de maiores dimensões, os valores de resistência baixavam, o que criava dificuldades no condicionamento de sinal. Sendo assim, o aditivo foi utilizado para aumentar a resistência elétrica da tinta piezoresistiva.

### 3.2.2 Tecido de algodão

O algodão é uma fibra natural com origem numa planta e é a fibra natural mais usada no mundo. Dá origem a têxteis respiráveis, leves e macios. Pode ser lavado a altas temperaturas, é hidrófilo e tem elevada resistência à tração, principalmente a molhado. Sendo assim, é aplicado em vestuário, têxteis-lar, como toalhas, cobertores e lençóis, e ainda, em têxteis médicos (Dias et al., 1999).

Um tecido é um substrato têxtil que consiste no cruzamento ortogonal dos fios de teia com os fios de trama. Os fios de teia estão presentes na direção longitudinal do tecido, os fios de trama se encontram na direção transversal. Os três tipos de estruturas mais básicas são o tafetá, a sarja e o cetim. O tafetá é o mais simples de todos e consiste em tecer alternadamente os fios de teia com os fios de trama (Leite, 2003).

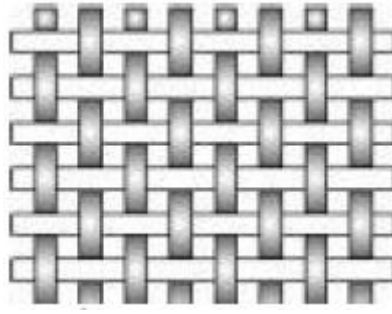


Figura 17. Estrutura de um tecido tafetá (Pereira, n.d.)

Um estudo desenvolvido pela Universidade de Bolonha em Itália mostra que, quando este tipo de tecido é usado em sensores de pressão, se obtém uma estabilidade muito boa, a espessura do sensor varia com a pressão aplicada, obtém-se uma faixa de deformação dinâmica muito baixa e, devido à sua rigidez, origina um sensor menos sensível, mas mais confiável (Possanzini et al., 2019).

O tecido tafetá foi o substrato selecionado para este projeto devido à sua uniformidade, o que permite uma distribuição das tintas mais homogénea na etapa da estampanaria e uma distribuição da pressão equilibrada. É também de realçar que o algodão foi selecionado devido à sua rápida e ótima absorção das tintas (Pedro Gomes et al., 2020).

Com o intuito de determinar as características do tecido de algodão utilizado foram realizados ensaios de caracterização básica como:

- Espessura do tecido
- Contextura do tecido ou número de fios por unidade de comprimento
- Massa linear dos fios de teia e de trama
- Massa por unidade de área

Tabela 1. Características do tecido utilizado

Caraterísticas do tecido utilizado		
Caraterística	Norma	Valor médio medido
Espessura do tecido	NP EN ISO 5084 1999	0,25 mm
Contextura do tecido ou número de fios por unidade de comprimento	NP EN 1049-2 1995	32 fios/cm à teia 28 fios/cm à trama

Tabela 1 continuação. Características do tecido utilizado

Massa linear dos fios de teia e de trama	NP 4105 1990	Fios de teia: 19 tex Fios de trama: 20 tex
Massa por unidade de área	NP EN 12127 1999	118 g/m <sup>2</sup>

### 3.2.3 Tecido condutor

Os tecidos condutores elétricos têm a capacidade de conduzir corrente elétrica e, por isso, podem ser usados, por exemplo, em sistemas de aquecimentos, tanto de automóveis como de roupas, ou então, podem ser utilizados para produzir sensores ou serem integrados em circuitos eletrônicos no vestuário. Os têxteis condutores podem existir sob a forma de fibras, fios, tecidos, malhas ou mesmo não tecidos. Podem ser integrados fios condutores na produção dos substratos ou então estes serem impregnados com partículas condutoras (Mattila, 2015).

O tecido Statex Bremen, consiste num tecido de poliamida, impregnado com prata. É um tecido especialmente resistente devido à sua tecelagem com debuxo tafetá, com dois fios a serem introduzidos à teia e dois fios à trama, criando assim uma estrutura quadrada visível. A poliamida confere elasticidade e resistência, por sua vez, a prata confere propriedades condutoras e antibacterianas ao tecido, tornando-o adequado para aplicação em vestuário junto ao corpo. A resistividade da superfície do tecido é inferior a  $0,3 \Omega/\square$ , e é um tecido de peso e espessuras reduzidas, o que é vantajoso, pois assim quase não aumenta a espessura nem o peso do sensor (Statex, n.d.).



Figura 18. Tecido condutor Statex Bremen

### 3.2.4 Rede de colagem termoplástica

Para unir as camadas dos sensores sanduiche e dos sensores produzidos com tecido condutor foi usada uma rede de colagem termoplástica. No caso dos sensores sanduiche, a cola é colocada entre as faces piezoresistivas, no caso dos sensores produzidos com tecido condutor, é colocada entre a camada piezoresistiva e o tecido condutor. A forma de rede permite que continue a haver contacto entre as camadas, o que é fundamental para o funcionamento dos sensores. A rede consiste num poliuretano éster alifático, que é um material muito elástico e transparente. Tem um peso que vai dos 35 aos 50 g/m<sup>2</sup>, e um intervalo de fusão dos 109 aos 119°C. Apresenta bons resultados de colagem em TPU, poliamida, tecidos e pele, daí ser bastante adequado para esta aplicação uma vez que se está a trabalhar com poliamida e algodão (Protechnic, 2018).

Posto isto, para colar as camadas do sensor foi colocada entre elas a rede termoplástica e, de seguida, o sensor foi colocado numa prensa de aquecimento a 110°C durante 10 segundos e a uma pressão de 2,5 bar.



*Figura 19. Prensa de aquecimento*

### 3.3 Métodos de construção dos sensores

#### 3.3.1 Impressão das tintas por estamaria

Para a produção do sensor são seguidas algumas etapas, desde a estamaria da tinta condutora à estamaria da tinta piezoresistiva no tecido de algodão, ambas por um método de estamaria ao quadro plano.

O equipamento utilizado para a estamaria das tintas foi a “*Zimmer Mini MD-F R54*” presente no laboratório de estamaria da Universidade do Minho. A máquina está equipada com um sistema magnético responsável pela deslocação de uma vareta de metal através de um quadro, aplicando a tinta a uma pressão constante. Esta pressão pode ser variada do nível 1 ao nível 6, sendo o 1 o mais baixo, ou seja, menos pressão aplicada, e o 6 o mais alto. A velocidade a que a vareta se move também pode ser variada dos 0 aos 100%.



Figura 20. Mesa de estampar Zimmer Mini MD-F R54 presente no laboratório de estamaria da Universidade do Minho

##### 3.3.1.1 Estamaria da tinta condutora dos eléttodos

A tinta condutora foi estampada a uma velocidade de 50%, com uma força magnética de 4 e foi usado um quadro de 110 TPI's. Foi estampada apenas 1 camada de tinta, mas foram feitas 2 passagens da vareta pelo desenho de modo que o estampado ficasse mais uniforme. A tinta foi curada a 120°C durante 10 minutos na estufa, para se dar a sua polimerização. Este processo foi seguido para todas as configurações de sensores produzidos.



### 3.3.1.2 Estamparia da tinta piezoresistiva

A tinta piezoresistiva foi estampada a uma velocidade de 50%, com uma força magnética de 2, usando um quadro com 81 TPI's. O quadro escolhido tinha menos fios por polegada do que o usado para estampar a tinta condutora porque o tamanho das partículas da tinta piezoresistiva é maior. À semelhança da tinta condutora, também foi curada na estufa para se dar a sua polimerização, mas a uma temperatura de 60°C durante 10 minutos. O número de camadas de tinta foi variado de acordo com o planeamento de experiências.

### 3.3.2 Impressão da tinta piezoresistiva por *coating*

Como alternativa à estamparia tradicional, foi explorada a opção da estamparia da tinta piezoresistiva pela técnica de *coating* com faca. Este consiste em aplicar uma camada superficial de um produto num têxtil, que está sob tensão, e que é posteriormente fixado por um processo de cura. No *coating* é possível selecionar a altura a que a faca passa com a tinta, sendo esta altura a distância entre a faca e o substrato. Isto dá origem a impressões com espessuras mais uniformes e faz com que esta técnica seja adequada para a produção de sensores de maiores dimensões. A espessura do produto antes de ser curado é de cerca de metade da altura a que a faca está do substrato, mas pode variar dependendo da energia superficial do substrato, da tensão superficial do produto e da sua viscosidade (Joshi & Butola, 2013).

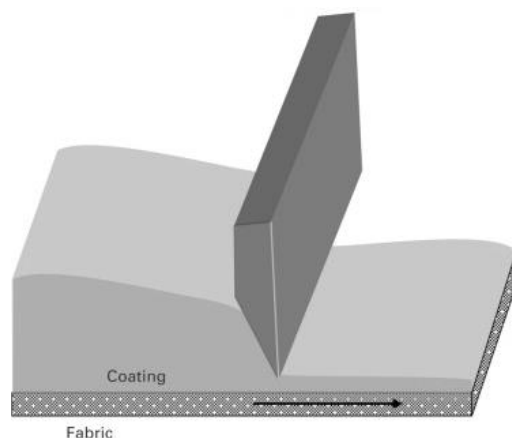


Figura 21. Técnica de coating com faca (esquerda) (Shim, 2019) e equipamento de coating Mathis CH-8155, presente no laboratório (direita)

## 3.4 Métodos de medição e análise

### 3.4.1 Multímetro

Uma vez produzidos os sensores, a forma mais rápida e simples de avaliar a sua funcionalidade é através da utilização de um multímetro. O aparelho conecta-se aos elétrodos e a resistência é medida. Ao ser aplicada pressão se houver uma variação da resistência significa que estamos na presença de um sensor funcional. Caso isto não aconteça, ou seja, se ao ser aplicada pressão a resistência for zero ou se não variar, significa que estamos na presença de um sensor não funcional, ou então que ocorreu um curto-circuito entre os elétrodos.



Figura 22. Multímetro para a medição da resistência do sensor (Multímetro Digital, n.d.)

### 3.4.2 Ensaio de compressão cíclica

Para uma avaliação mais detalhada do funcionamento do sensor é usada uma máquina de teste universal da *Hounsfield*, montada adequadamente para realizar testes de pressão cíclicos. Este teste consiste na aplicação de uma força durante um determinado número de ciclos, para que seja possível avaliar o comportamento do sensor durante a aplicação variável e cíclica de força. Sendo assim, o sensor é colocado na máquina de teste da Hounsfield para que seja sujeito a uma compressão cíclica. O equipamento está ligado a um computador, no qual se fazem os ajustes do ensaio, desde o número de ciclos à velocidade do ensaio, entre outros, e no qual também é guardada a informação relativa à força aplicada. Simultaneamente, o sensor está ligado a um circuito de condicionamento do sinal, que converte a variação de resistência do sensor numa variação de tensão, e, que por sua vez, está ligado a uma placa

de aquisição de sinal (DAQ). Esta converte um sinal de tensão de saída analógico num sinal digital. Por fim, temos um outro computador que está ligado à placa de aquisição e que irá registar o sinal da tensão de saída fornecido por esta. Depois de obtidos os sinais de força e de tensão, é altura de analisar o comportamento do sensor e tirar conclusões. No entanto, estes são adquiridos separadamente, e para se fazer a avaliação de um sensor é necessário que os sinais sejam analisados juntos. Para isso, foi utilizado um programa no software *Labview* que sincroniza e analisa os dados obtidos. A configuração para a realização da medição está representada no esquema abaixo.

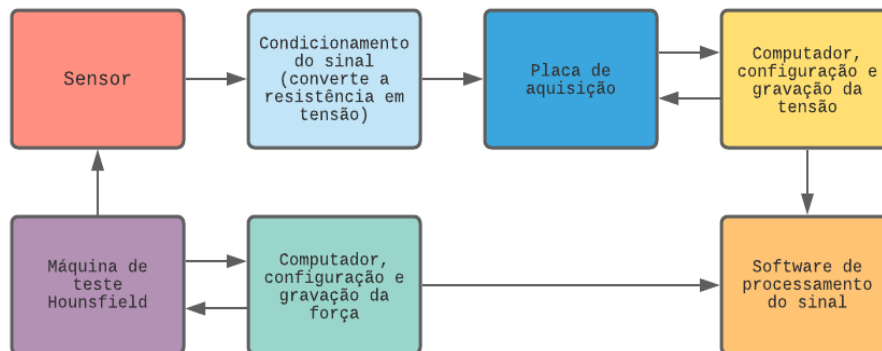


Figura 23. Esquema da configuração de medição



Figura 24. Configuração do teste de compressão cíclica. Computador com software de aquisição do sinal (amarelo), computador para configuração e aquisição da força (verde), DAQ (azul), máquina de teste Hounsfield (roxo), sensor (rosa)

Tal como já foi referido, a placa de aquisição de sinal está ligada a um circuito de condicionamento do sinal (Figura 25) que converte a variação de resistência registada no sensor em tensão, para que esta possa ser adquirida na placa de aquisição.

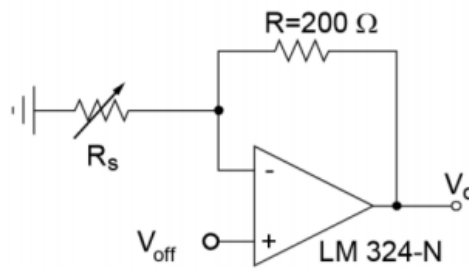


Figura 25. Circuito de condicionamento do sensor piezoresistivo (Carvalho et al., 2017)

A equação abaixo representa a conversão que se dá no circuito de condicionamento (Carvalho et al., 2017), onde  $V_o$  é a tensão de saída,  $V_i$  é a tensão de entrada,  $R_s$  é a resistência variável do sensor e  $R$  é a resistência colocada no circuito de condicionamento de sinal.

Equação 1

$$V_o = V_i \left( 1 + \frac{R}{R_s} \right)$$

Sendo a função da tensão de saída vs resistência aproximadamente o inverso da função força vs resistência, o circuito de aquisição de sinal tem um efeito adicional de linearização da característica do sensor como se pode ver nas figuras abaixo. A tensão de entrada irá depender de  $R$  e de  $R_s$  e será variada dependendo da resistência do sensor.

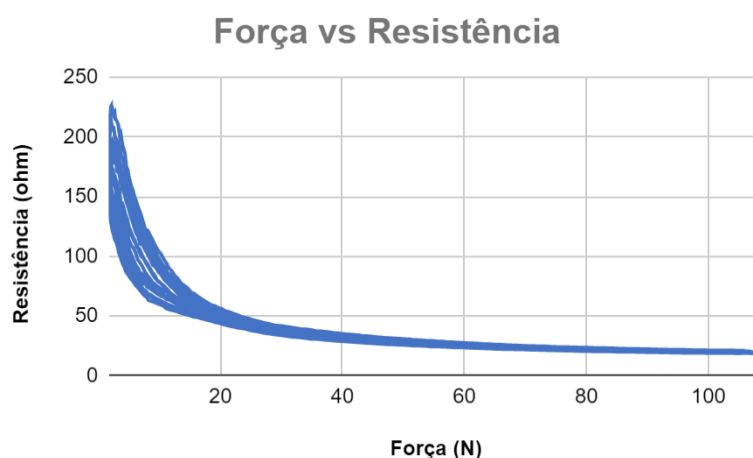
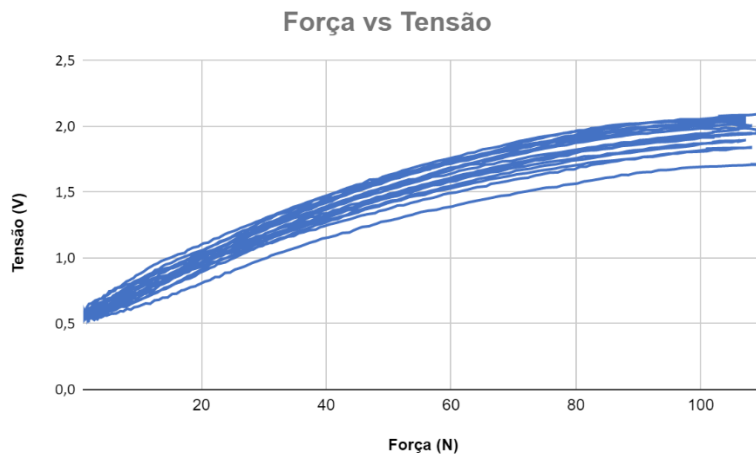


Figura 26. Gráfico força vs resistência de um sensor produzido com tecido condutor, durante 10 ciclos de ensaio



*Figura 27. Gráfico força vs tensão de um sensor produzido com tecido condutor, durante 10 ciclos de ensaio*

A máquina de teste contém na sua base uma placa fixa, sobre a qual é pousado o sensor. Em paralelo com esta, tem uma haste transversal móvel, no qual é ligada uma célula de carga de 2,5 kN juntamente com um punção de compressão, na parte inferior do braço.

De forma a proteger mecanicamente o sensor e o equipamento e para haver amplitude no teste, é colocada uma espuma de cada lado do sensor.



*Figura 28. Haste transversal móvel com uma célula de força de 2.5 kN, um punção de compressão (em cima), placa fixa (em baixo)*

Tal como já foi referido anteriormente, a máquina de teste está ligada a um computador no qual se ajustam os parâmetros do ensaio. Sendo assim, foram realizados 10 ciclos, a uma velocidade de 30 mm/min e com uma variação da força aplicada de 2 a 100 N.

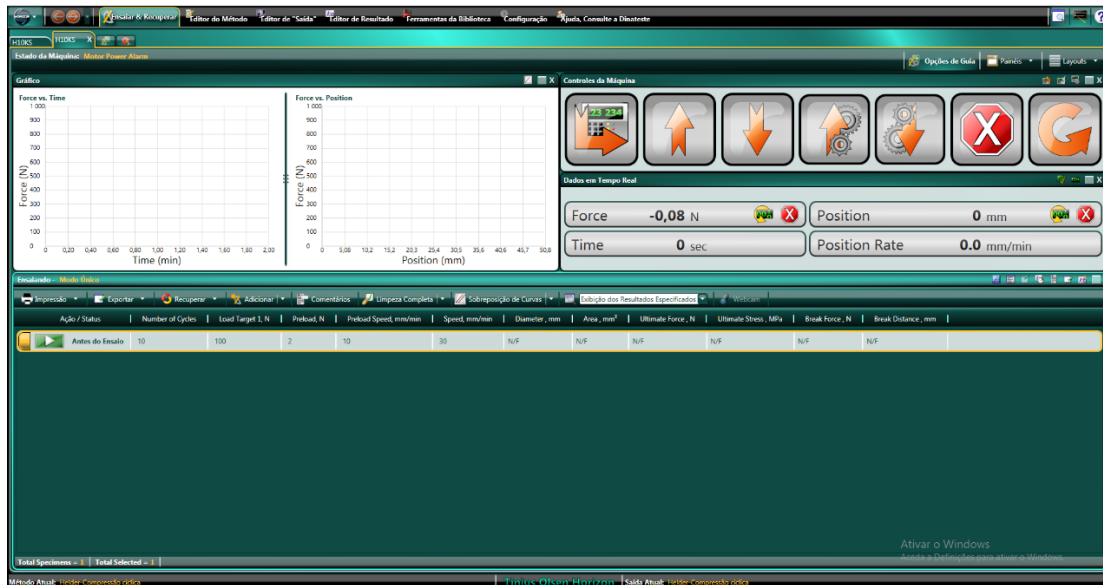


Figura 29. Software de configuração e aquisição da força aplicada no sensor

Paralelamente a isto, temos a placa de aquisição que, por sua vez, está ligada a outro computador, no qual através do programa “SensorSignalAquisição”, criado em Labview, é possível registar as variações de tensão durante os ciclos de compressão.

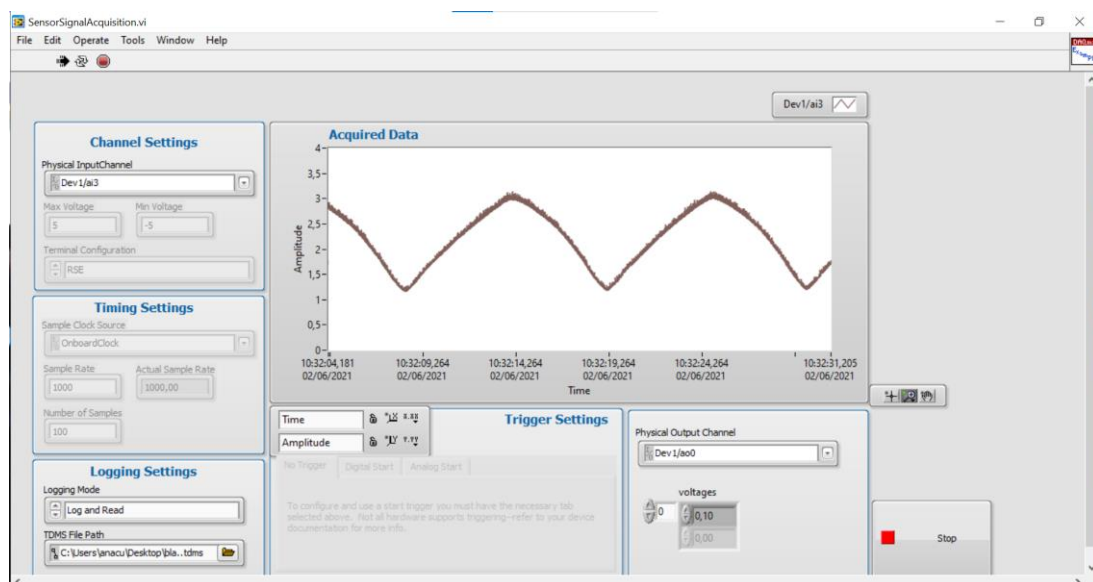


Figura 30. Software “SensorSignalAquisição” no qual se introduz a tensão de entrada pretendida e a tensão de saída registada pelo sensor

### 3.4.2.1 Determinação do valor de resistência mais adequada para o circuito de condicionamento

Para determinar qual o valor mais adequado para a resistência,  $R$ , do circuito de condicionamento, foi empreendido um estudo que tinha como objetivo estudar qual a influência do seu valor na variação do sinal de saída ao longo da gama de forças a medir.

Numa primeira fase, os sensores já produzidos foram submetidos à máquina de teste de compressão cíclica e a variação da sua tensão foi medida e processada pelo software de processamento de sinal. Este mesmo software, para além de dar os gráficos força vs tensão, também dá os gráficos força vs resistência, uma vez que utiliza a Equação 1 para fazer a conversão de tensão em resistência. Os gráficos de força vs resistência obtidos foram então transferidos para o Excel, e a sua linha de tendência foi determinada juntamente com a sua equação. O gráfico abaixo dá a variação da resistência registada de um sensor para uma determinada gama de forças aplicadas, durante os 10 ciclos de ensaio. A linha de tendência dá, tal como o nome indica, a tendência dos valores de resistência em função da força exercida, sendo que o valor de  $F$  é a força aplicada e o valor de  $R_s$  a resistência do sensor.

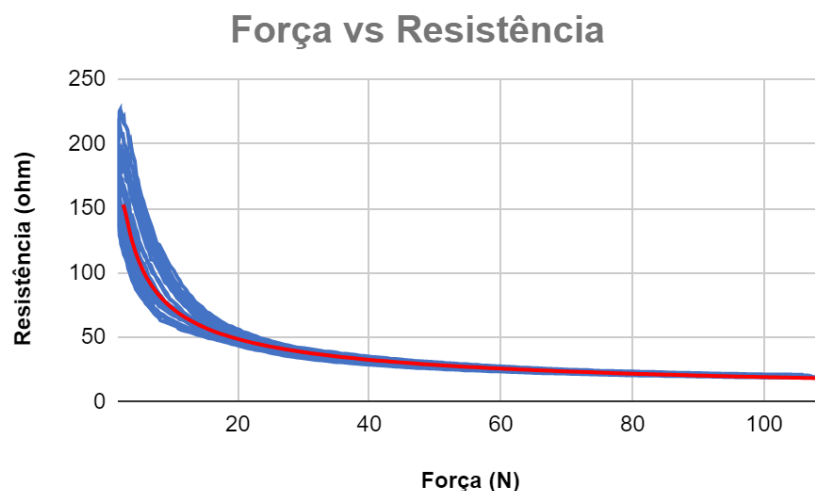


Figura 31. Gráfico força vs resistência, linha de tendência (branco) e respetiva equação

A equação da linha de tendência é a seguinte:

Equação 2

$$R_s = 274,928546086336 \times F^{-0,577239232440526}$$

De seguida, recorrendo à equação da linha de tendência, foram calculados os valores da resistência do sensor,  $R_s$ , para os valores de força na gama de forças aplicada. Por exemplo, para uma força de 4N,

*Equação 3*

$$R_s = 274,928546086336 \times 4^{-0,577239232440526}$$

$$R_s = 123,5058 \Omega$$

Uma vez calculado o valor da resistência do sensor e recorrendo à fórmula apresentada anteriormente para o cálculo da tensão de saída, é possível calcular as tensões de saída do sensor para cada força. Por exemplo, para uma resistência  $R$  de  $330 \Omega$  e um  $V_i$  de  $0,1V$ .

*Equação 4*

$$V_o = V_i \times \left(1 + \frac{R}{R_s}\right)$$

$$V_o = 0,1 \times \left(1 + \frac{330}{123,5058}\right)$$

$$V_o = 0,367194 V$$

Estes cálculos foram realizados no Excel para todos os valores de força.

Para saber qual é a influência da resistência colocada e qual seria a mais adequada para o circuito, o valor de  $R$  foi variado e os cálculos enumerados acima foram realizados novamente. Destes foi possível retirar o valor de tensão de saída para a máxima e mínima forças aplicadas, sendo que o valor mínimo corresponde a uma força de 1N e o valor máximo a uma força de 100N. A partir disto calcula-se a variação percentual de um valor para o outro, para cada valor de resistência introduzido.

*Equação 5*

$$\text{Variação percentual da tensão} = \frac{V_o \text{ máx} - V_o \text{ mín}}{V_o \text{ máx}} \times 100$$

Com isto, é elaborado um gráfico com os valores de percentagem de modo a perceber em que valor de resistência é que não vale a pena esta aumentar mais, uma vez que o gráfico se torna constante a partir de determinado ponto. Chegou-se à conclusão de que a partir dos  $330 \Omega$  não há vantagem em continuar a aumentar a resistência.



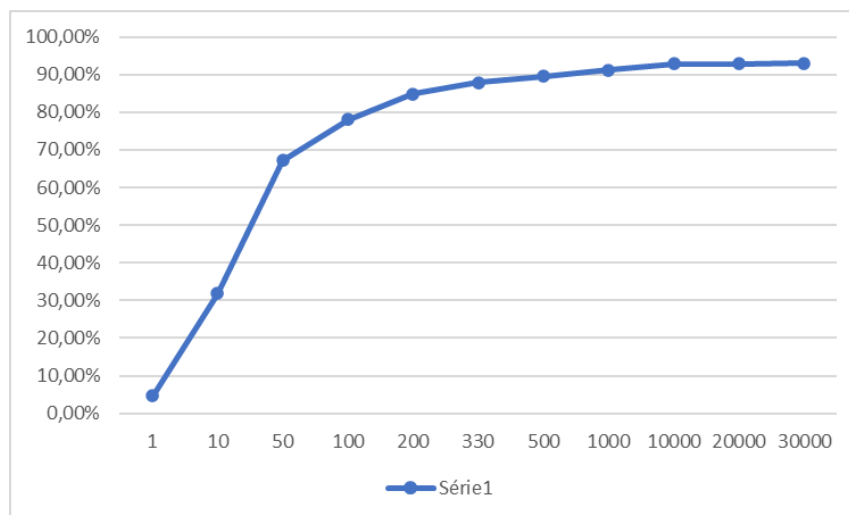


Figura 32. Gráfico da tendência do valor da resistência

### 3.4.3 Programa de processamento de sinal

O ensaio de pressão realizado tem como objetivo avaliar o comportamento da tensão quando o sensor é sujeito a compressão durante 10 ciclos. Com o ensaio realizado e obtidos os sinais de tensão e de força, estes são processados em conjunto num outro programa elaborado em *Labview* com o nome de “DynamometerConvertAndSynch”. É utilizado este programa, uma vez que, como os sinais são adquiridos em separado, o início e o fim dos sinais não coincidem. Sendo assim, é necessário trabalhá-los de modo que o instante em que se regista uma tensão coincida com o instante em que se regista a força correspondente.

Na imagem abaixo podemos ver o exemplo dos sinais de um sensor, onde o sinal superior é o de força e o inferior é o de tensão. O primeiro passo a fazer no *software* é abrir os sinais na opção “*open signals*”.



Figura 33. Sinais de força e tensão abertos no software

Uma vez selecionados os sinais a analisar, são detetados os picos de ambos os gráficos, representados pelas linhas verticais amarelas, para que seja possível sincronizar os sinais.

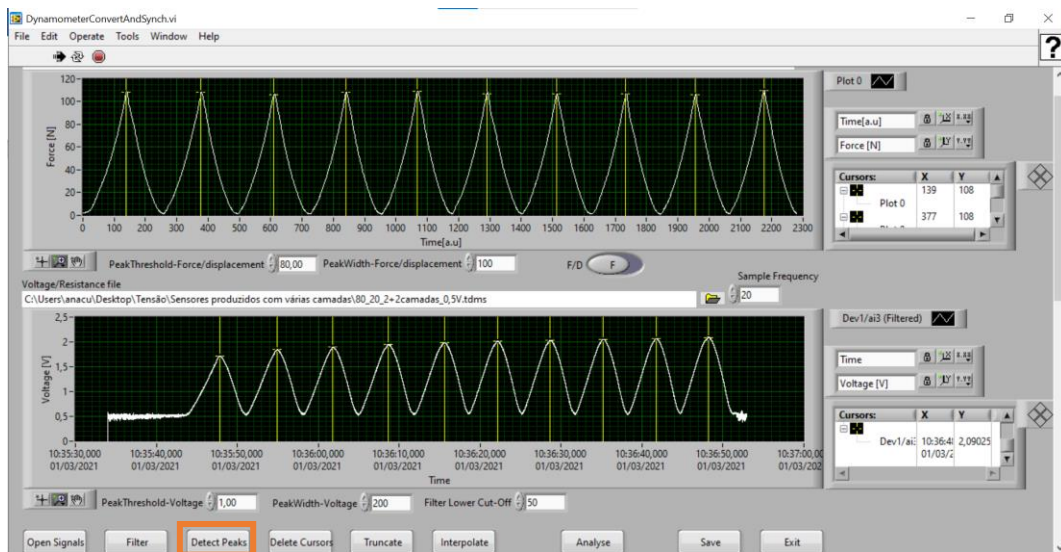


Figura 34. Picos dos sinais

Depois de detetados os picos, o sinal é truncado, no comando “truncate” para fazer coincidir o início e o fim de ambos os sinais, sendo assim possível fazer corresponder um sinal ao outro. De seguida, os sinais são interpolados, no comando “interpolate”, e pode-se proceder à análise dos gráficos resultantes, na opção “analyse”. A interpolação tem como objetivo fazer com que ambos os sinais tenham o mesmo número de pontos e assim possam ser representados em conjunto. Como podemos ver na figura, é originado um gráfico tensão vs força.

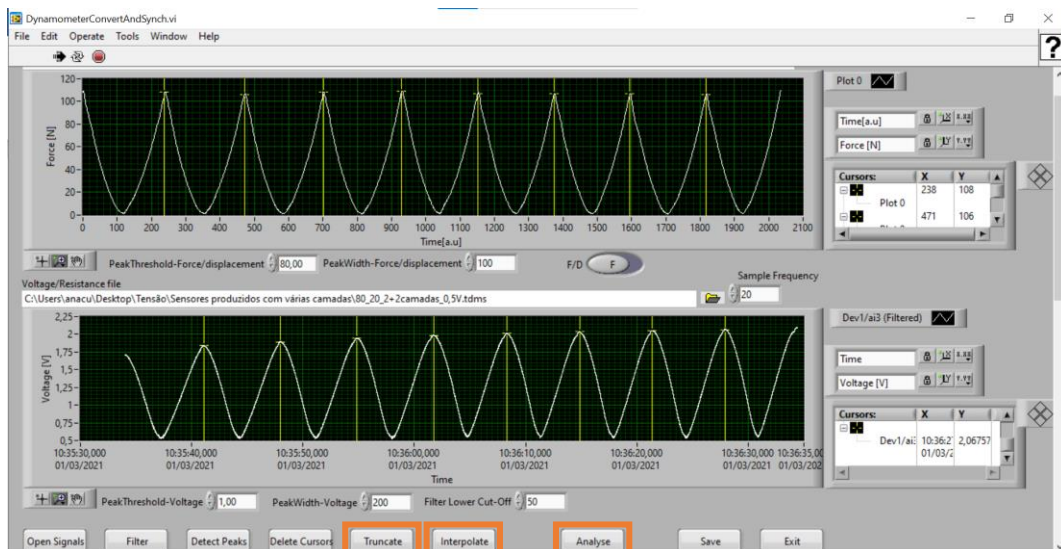


Figura 35. Sinais truncados

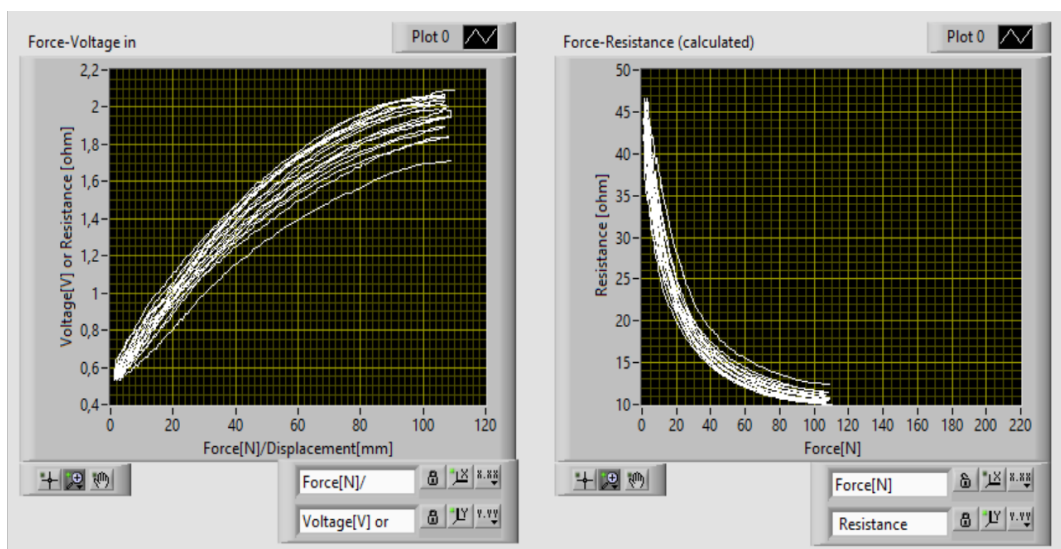


Figura 36. Gráficos de força vs tensão e força vs resistência, respetivamente

Com os testes feitos, passa-se para a análise dos resultados. Esta consiste na avaliação da qualidade do sinal de tensão, da histerese, da sensibilidade do sensor, da gama de variação da resistência e da avaliação qualitativa das curvas tensão-força.

A qualidade do sinal de tensão é avaliada através de diversos parâmetros. O primeiro é o ruído presente no sinal. O segundo, é a histerese da curva força-tensão, bem como a estabilidade da mesma de ciclo para ciclo. A histerese consiste no desvio da curva de tensão de saída consoante os valores de entrada (as forças) estejam a aumentar ou a diminuir (Carvalho et al., 2018). A histerese é considerada um problema pois não é possível determinar exatamente que força é que se regista quando é medida uma determinada tensão. A gama de variação do sensor será avaliada registando os valores máximo e

o mínimo da resistência. Os valores de resistência são estimados pelo software a partir dos valores de tensão, de R e de  $V_i$ , segundo a Equação 1. Sendo possível fazer uma análise quantitativa destes parâmetros, numa primeira fase é feita uma análise qualitativa das curvas tensão-força, avaliando-se as tensões registadas, a constância dos gráficos e a sua forma.

#### 3.4.4 Microscopia eletrónica de varrimento

A microscopia eletrónica de varrimento é uma técnica muito usada para fazer a análise da composição química e morfológica de uma amostra e é mais conhecida por SEM que vem do inglês *Scanning Electron Microscopy*. O SEM pode fornecer informação acerca da topografia da superfície, composição química, estrutura cristalina e comportamento elétrico de uma amostra. O SEM utiliza um feixe de eletrões que faz o varrimento de toda a superfície da amostra, produzindo um grande número de sinais que são posteriormente processados e convertidos num sinal visual dando origem às imagens obtidas (W. Zhou et al., 2007). Neste microscópio é possível fazerem-se ampliações até 1 000 000 de vezes e tem resoluções que vão de 1  $\mu\text{m}$  a 1 nm. As amostras são submetidas a uma preparação prévia e só depois são colocadas no microscópio (Vernon-Parry, 2000). Para se observar a presença de partículas de prata é utilizada a técnica de contraste de imagem de forma que as partículas de prata fiquem realçadas, comparativamente com os restantes elementos da amostra.

#### 3.4.5 Medição da espessura das camadas de tinta

Com espessuras mais baixas da camada de tinta piezoresistiva, as partículas de carbono estão mais próximas umas das outras, logo a variação da tensão é menor. Sendo assim, ao longo do trabalho foram exploradas várias formas de impressão da tinta piezoresistiva, e com isto foi necessário fazer uma comparação das espessuras da camada de tinta, uma vez que a espessura influenciava a variação de tensão do sensor. Para isso, foi usado um medidor de espessura com um calcador de 20  $\text{cm}^2$  de área que aplica uma pressão de 1 kPa, de acordo com a norma NP EN ISO 5084 1999.

### 3.4.6 Programa de desenho vetorial

Para as experiências iniciais com a tinta condutora foram criados os padrões desejados num programa de desenho vetorial, uma vez que era necessário que os desenhos fossem feitos com as medidas corretas, para que as impressões dos elétrodos coincidisse com a impressão da tinta condutora. Para isso, foi usado o Adobe Illustrator, pois tem as ferramentas necessárias à criação dos desenhos pretendidos.

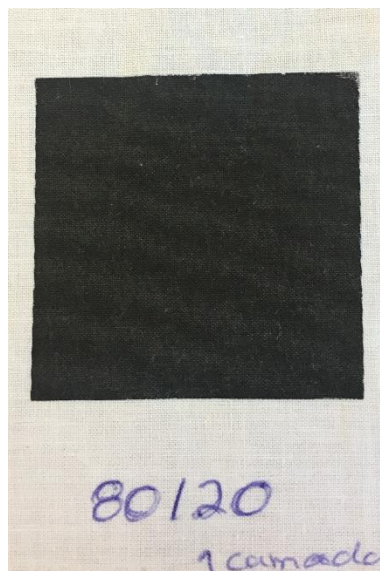
## 4 Planeamento experimental

### 4.1 Consolidação de experiências anteriores

Numa fase inicial do trabalho e visando a consolidação do trabalho no qual esta investigação se baseia, foram testados sensores previamente produzidos, estampados com tinta piezoresistiva, mas nos quais os elétrodos são feitos de tecido condutor. Com estes, foi possível concluir qual a resistência mais adequada para a aplicação no circuito da DAC, e quais das configurações dos sensores produzidos revelaram ter os melhores resultados, desde o número de camadas aplicadas, à força do íman e à quantidade de aditivo utilizado.

### 4.2 Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tecido condutor

Com o intuito de fazer alguns testes e consolidar resultados, foram estampados alguns sensores de acordo com as conclusões tiradas anteriormente. Sendo assim, foram estampados sensores sem aditivo, com 20% e com 50% de aditivo. Para cada um destes foram estampadas uma ou duas camadas de cada lado do tecido. Nas figuras abaixo está apresentado o exemplo do sensor produzido com 20% de aditivo.



*Figura 37. Uma camada de tinta piezoresistiva com 20% de aditivo, estampada no tecido de algodão*



Figura 38. Sensor com elétrodos de tecido condutor e tinta piezoresistiva com 20% de aditivo

Na figura abaixo está um mapa das experiências que foram realizadas e com as respectivas amostras que foram produzidas.

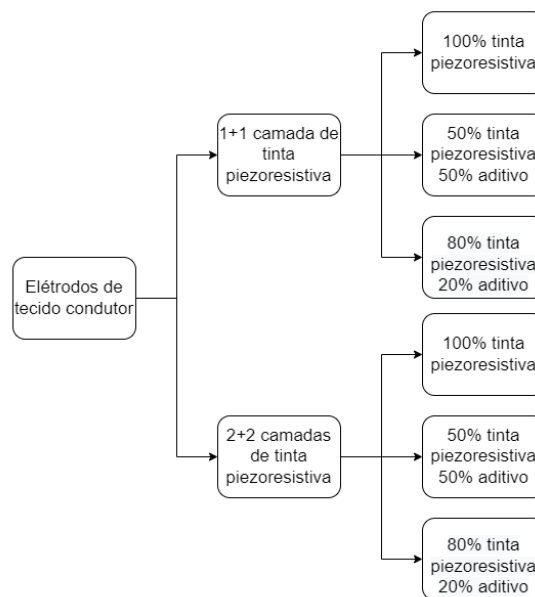


Figura 39. Mapa de experiências com elétrodos de tecido condutor

### 4.3 Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tinta condutora

#### 4.3.1 Experiências preliminares com a tinta condutora

Numa fase preliminar foram estampadas várias configurações da tinta condutora com o objetivo de testar a sua influência na condutividade da tinta. Foram estampadas riscas com larguras diferentes e com direções de passagem da vareta diferentes, foi simulado um canto, e ainda foram estampados elétrodos diretamente na tinta piezoresistiva, do mesmo lado ou coplanares e de lados opostos da camada piezoresistiva.

Foi estampada uma camada de tinta com duas passagens consecutivas, a uma velocidade média de 50%, com força magnética média de 4, tal como já tinha sido referido em 3.3.1.1.

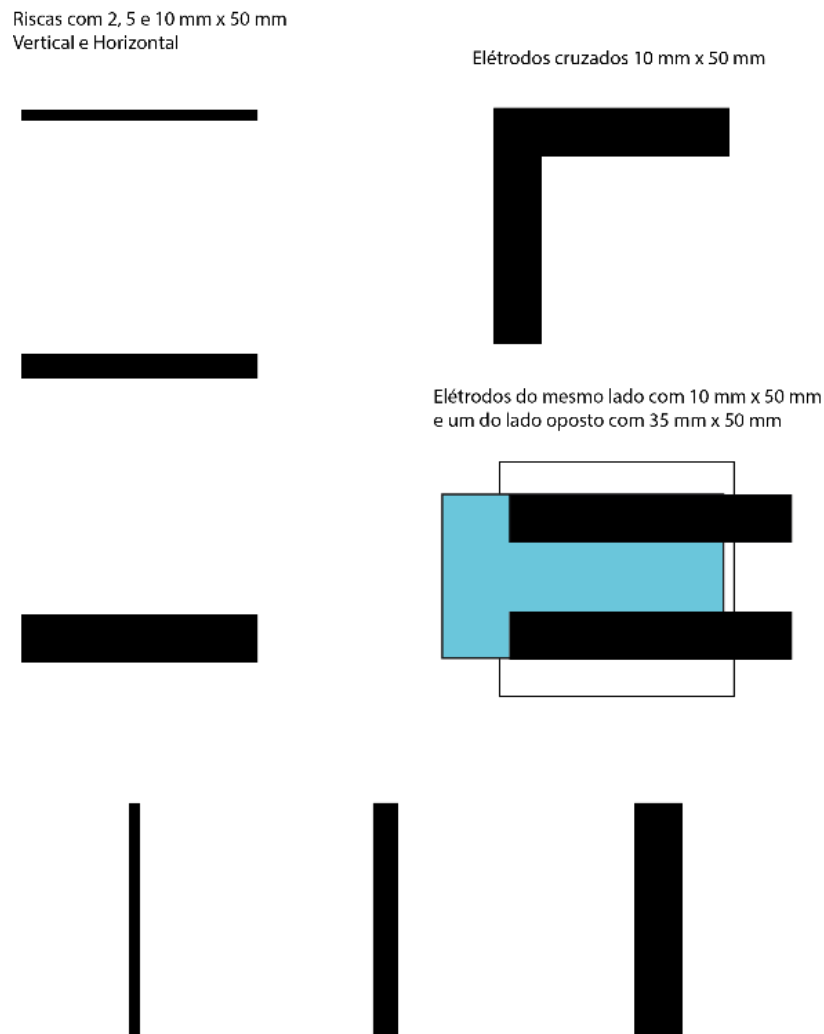


Figura 40. Diferentes configurações da tinta condutora

Simultaneamente ao teste da tinta condutora isolada, foi feito um ensaio preliminar de teste da interação desta com a piezoresistiva. Para isso, o primeiro passo foi estampar eléttodos coplanares numa amostra já estampada com tinta piezoresistiva. Eléttodos coplanares são eléttodos estampados no mesmo plano, ou seja, do mesmo lado do tecido, mas sem que haja contacto entre um e outro. Neste caso, os eléttodos tinham de dimensões 10 x 50 mm e estavam espaçados de 15 mm entre si.

Estas configurações foram produzidas a duas temperaturas de cura diferentes e os eléttodos podem ser observados na figura abaixo. Isto deve-se ao facto de a tinta condutora poder ser curada a 120°C durante 10 minutos, mas como a tinta piezoresistiva é curada a 60°C, esta corre risco de ficar danificada quando se pretende estampar o eléttodo posteriormente à estampa da camada



piezoresistiva. Sendo assim, testou-se também a cura da tinta condutora a 80°C durante 40 minutos, para ver qual das duas seria a melhor opção.



Figura 41. Eléttodos de tinta condutora curados a 80°C



Figura 42. Eléttodos de tinta condutora curados a 120°C

#### 4.3.2 Sensores com eléctrodos coplanares

De seguida, e de forma a serem testadas variações desta configuração, foram estampados os eléctrodos coplanares com 10 mm de largura e 50 mm de comprimento, mas com espaçamentos de 2 e 10 mm entre eles. Nestes sensores, foi estampada primeiro a tinta condutora, seguida do processo de cura, e só depois a piezoresistiva, sendo assim, e por questões de otimização de processo, a tinta foi curada a 120°C durante 10 minutos, mantendo-se o resto do processo igual aos estampados anteriormente. O espaçamento de 2 mm serviu para perceber se, com os eléctrodos tão próximos, havia contacto de partículas de tinta de um eléctrodo para o outro. Isto para perceber se a tinta migrava no tecido, e se um espaçamento tão reduzido levava a que houvesse contacto entre os eléctrodos e conseqüente curto-circuito, ao produzir eléctrodos interdigitados em experiências futuras. Recorrendo ao

multímetro, testou-se e verificou-se que não havia curto-circuito, sendo assim possível estampar elétrodos com um espaçamento reduzido entre eles.

A tinta piezoresistiva foi estampada depois da condutora e o número de camadas de tinta foi variado. Foram estampados sensores com uma, duas e três camadas para os dois espaçamentos diferentes dos elétrodos.

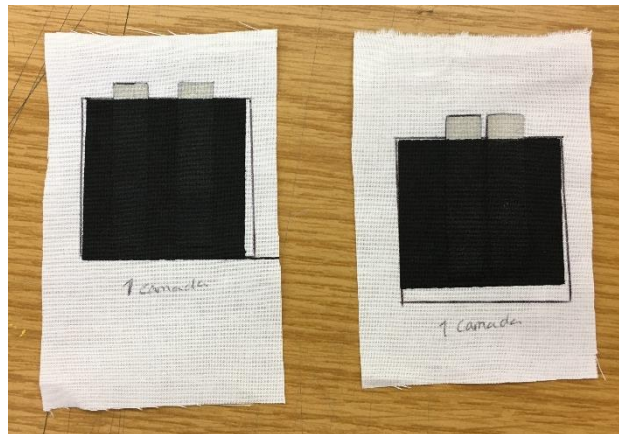


Figura 43. Sensores estampados com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita)

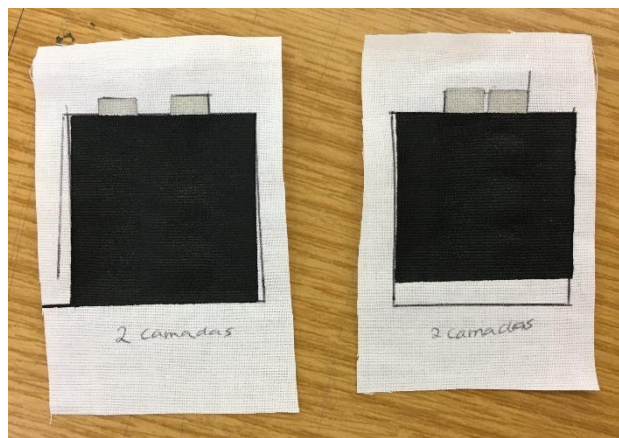


Figura 44. Sensores estampados com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita)

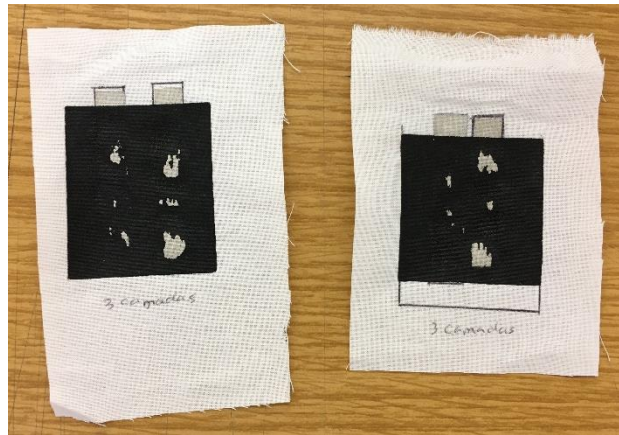


Figura 45. Sensores estampados com três camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita)

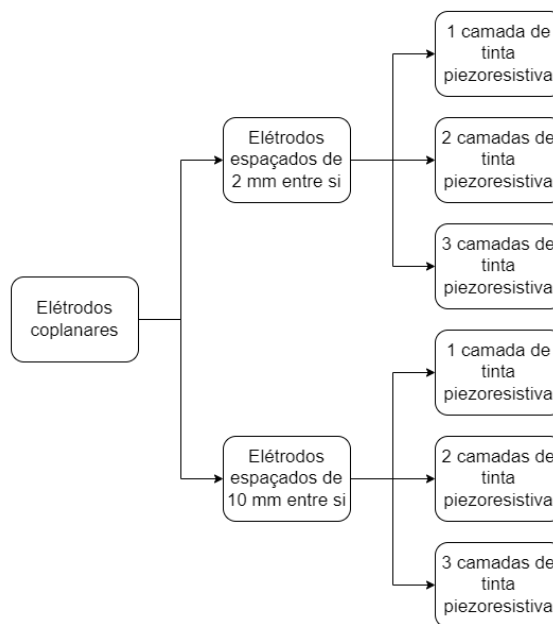


Figura 46. Mapa de experiências com elétrodos coplanares

#### 4.3.3 Sensores com elétrodos de lados opostos do tecido

Para produzir sensores com elétrodos de lados opostos, primeiro foi estampada a tinta condutora sobre o tecido de algodão, seguida da estamparia de uma e duas camadas de tinta piezoresistiva e, por fim, a estamparia de outra camada de tinta condutora. As camadas de tinta foram todas estampadas na mesma face do tecido e os parâmetros de estamparia das tintas mantiveram-se iguais. Depois de produzidos, os sensores foram testados com o multímetro.

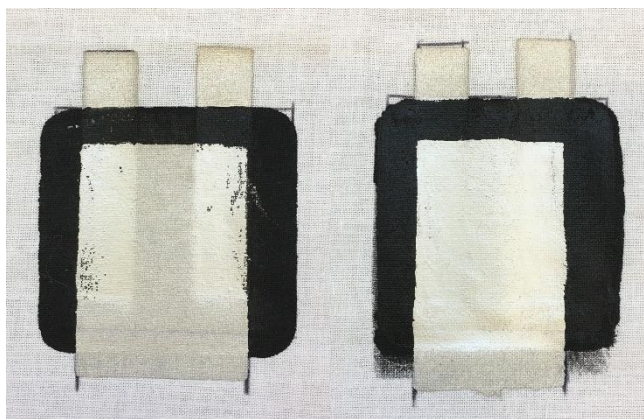


Figura 47. Sensores estampados com tinta condutora de lados opostos e com uma e duas camadas de tinta piezoresistiva, respectivamente, e com eléttodos espaçados 10 mm um do outro

Abaixo é apresentado um mapa das experiências que foram realizadas e com as respectivas amostras produzidas.

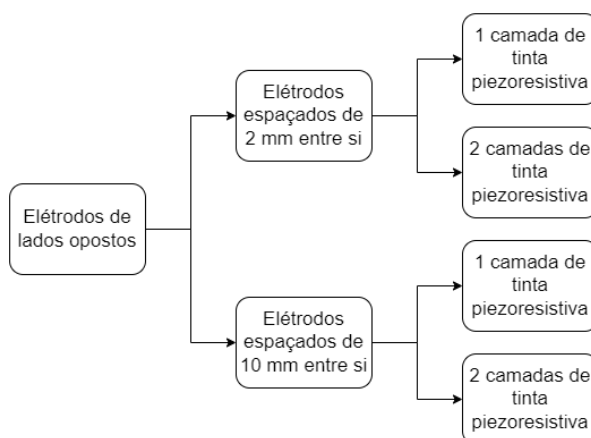
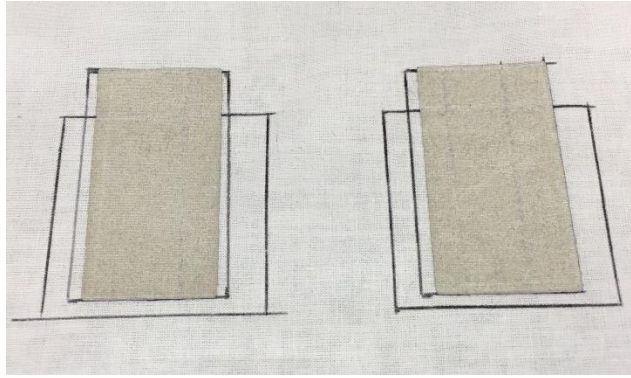


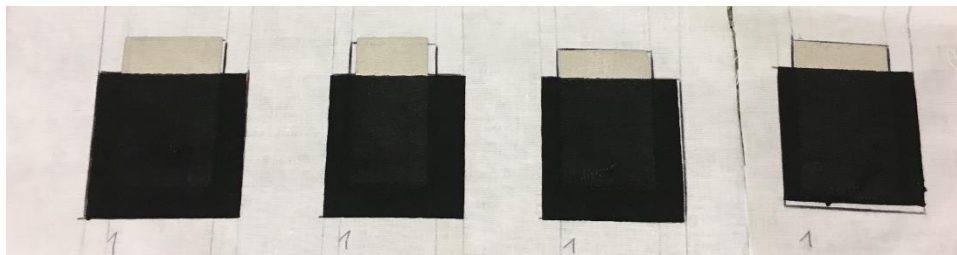
Figura 48. Mapa de experiências com eléttodos de lados opostos

#### 4.3.4 Sensores sanduíche

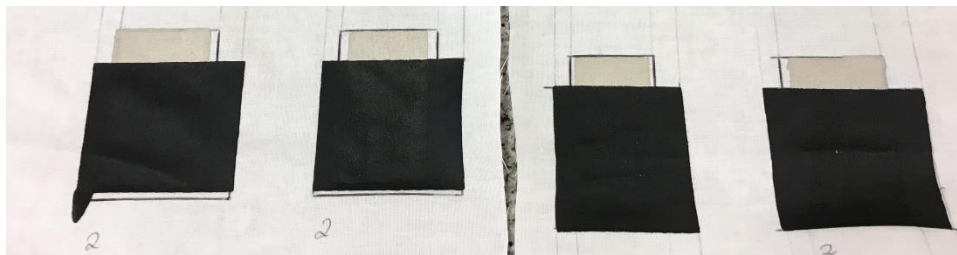
Como alternativa a estampar os dois eléttodos no mesmo tecido, pensou-se em estampar um eléttodo e uma camada de tinta piezoresistiva num tecido e repetir o mesmo processo noutro tecido e depois juntar os dois, encostando uma camada piezoresistiva à outra. Foram produzidos sensores com uma e duas camadas de tinta piezoresistiva, seguindo o mesmo procedimento utilizado anteriormente.



*Figura 49. Eléttodos estampados com uma camada de tinta condutora*



*Figura 50. Faces dos sensores estampados com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva*



*Figura 51. Faces dos sensores estampados com uma camada de tinta condutora e duas camadas de tinta piezoresistiva*

À medida que se avançou no trabalho chegou-se à conclusão de que a espessura da camada piezoresistiva era insuficiente para que o sensor funcionasse, pois, ao ter uma camada de material piezoresistivo tão fina, as partículas ficavam todas muito juntas e sem espaço para se poder dar deformação aquando da aplicação de pressão. Daí ser preciso aplicar uma maior quantidade de material, dando origem a uma camada piezoresistiva mais grossa, permitindo assim que o material consiga deformar mais facilmente e, conseqüentemente, que se obtenham variações de resistência maiores (Gonçalves et al., 2016).

No entanto, estampar muitas camadas demora muito tempo, havendo um grande desperdício de material e o facto de ser usada uma vareta que exerce pressão sobre o tecido faz com que a espessura da tinta aumente muito pouco de camada para camada. Sendo assim, utilizou-se uma chapa com uma espessura de 0,60 mm cujo propósito é deixar passar mais tinta, fazendo com que a espessura da

camada piezoresistiva seja substancialmente maior logo na primeira camada. O processo de estamparia é o mesmo, mas apenas se usa a chapa e uma racla, não sendo necessário o quadro de estampar, pois, estampa-se diretamente sobre o tecido.



*Figura 52. Chapa com espessura de 0,60 mm utilizada para estampar a tinta piezoresistiva*

Na imagem abaixo é possível observar uma camada de tinta piezoresistiva estampada no tecido de algodão.



*Figura 53. Uma camada de tinta piezoresistiva estampada utilizando a chapa*

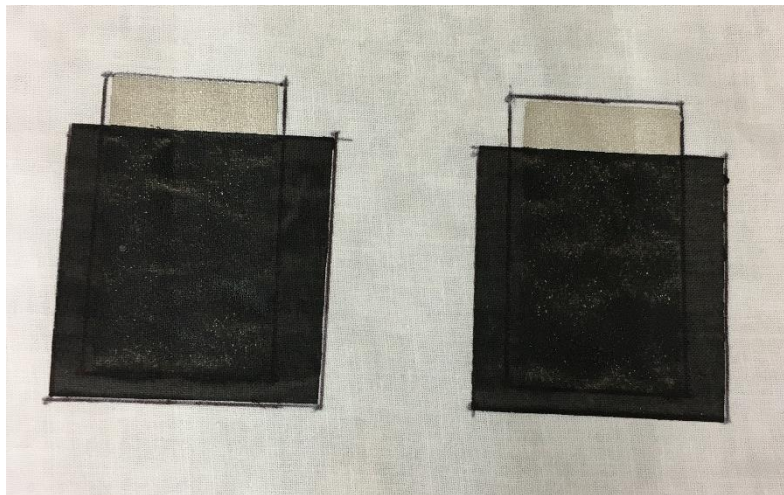
Sendo assim, seguiu-se o mesmo processo que nos restantes sensores sanduiche e estampou-se uma camada de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica. É de realçar que é necessário colocar uma quantidade de tinta elevada na chapa, uma vez que se usa muito material para se obter estas espessuras. Nas primeiras experiências com a chapa foi cometido este erro e os sensores ficaram

defeituosos, o que levou a uma repetição das experiências, cuja amostra está apresentada na figura abaixo.



*Figura 54. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica*

Como alternativa à utilização da chapa e com o objetivo de obter igualmente uma espessura elevada, foi testada a técnica de *coating*. A primeira camada foi feita com a faca a uma altura de 3,9 cm e ficou com 0,04 mm de espessura. Para a segunda camada, a altura foi aumentada para 4 cm, obtendo-se uma espessura da camada piezoresistiva de 0,1 mm.



*Figura 55. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e uma camada de tinta piezoresistiva usando a técnica de coating*

Com apenas uma camada de tinta piezoresistiva, a tinta condutora ficou visível, tal como se pode observar na figura acima, o que levou a que se desse curto-circuito quando as duas faces do sensor eram encostadas uma à outra, sendo imediatamente descartadas.

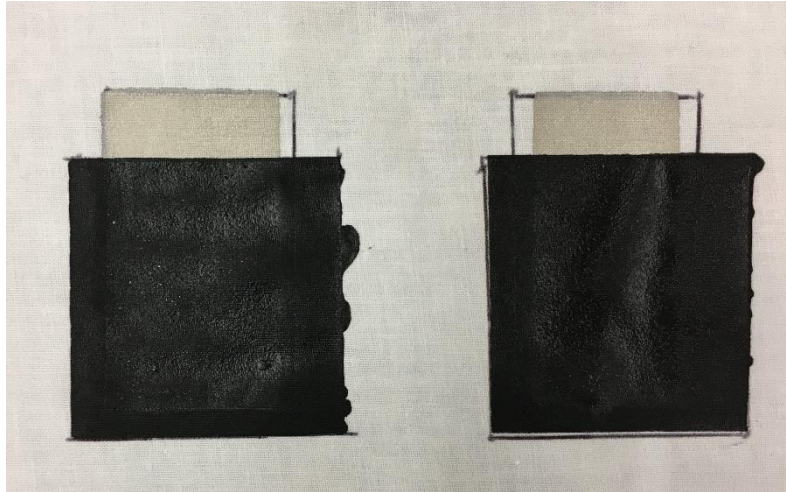


Figura 56. Faces do sensor estampado com uma camada de tinta condutora e duas camadas de tinta piezoresistiva usando a técnica de coating

Dos sensores sanduiche foram produzidas cinco amostras tal como podemos ver no mapa de experiências abaixo.

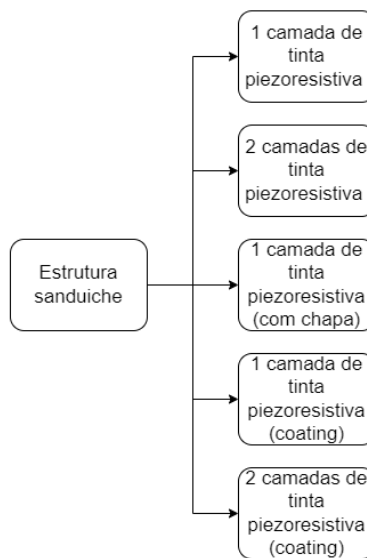


Figura 57. Mapa de experiências dos sensores sanduiche

#### 4.3.5 Sensores sanduíche colados

Depois de produzidos os sensores sanduiche e testados apenas com as faces encostadas uma à outra, passou-se para a junção das duas faces através de colagem, de modo a se obter um sensor mais estável.



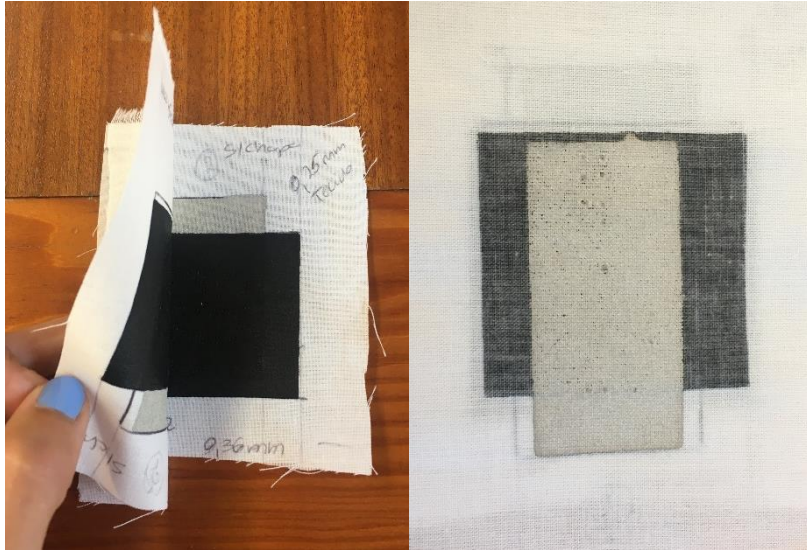


Figura 58. Montagem do sensor com a rede termoplástica

Sendo assim, as amostras são as mesmas produzidas em 4.3.4, tal como se pode ver no mapa de experiências apresentado abaixo.

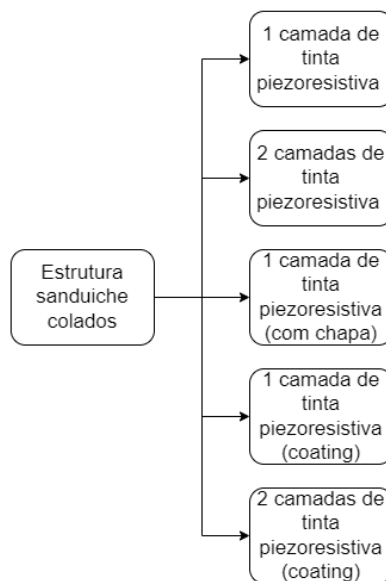


Figura 59. Mapa de experiências dos sensores sanduiche colados

#### 4.3.6 Sensores com elétrodos interdigitados

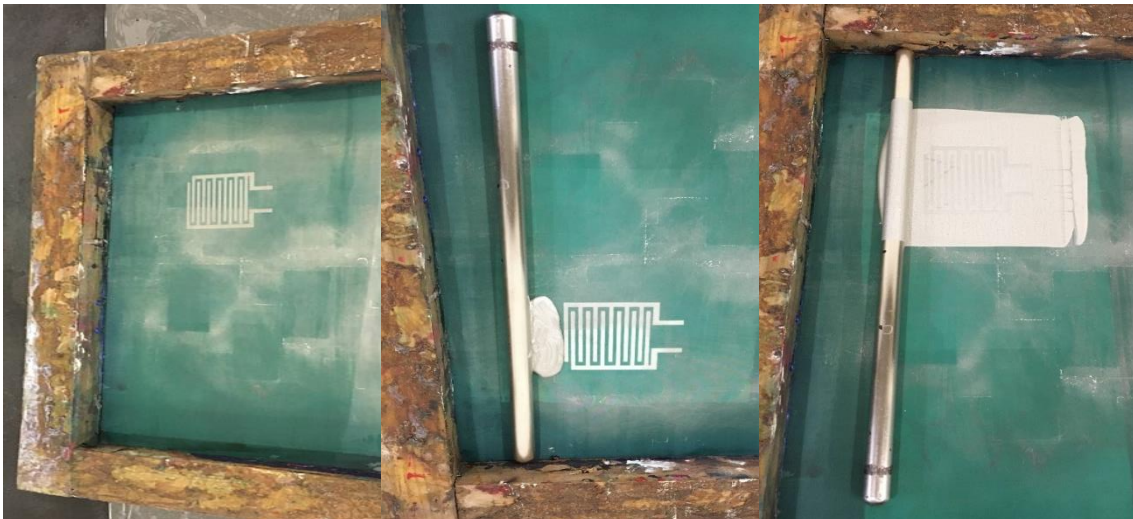
Numa fase mais avançada foram então desenvolvidos elétrodos interdigitados. Para a conceção do elétrodo foi utilizado um programa de desenho vetorial. Como já tinha sido testado anteriormente, o espaçamento utilizado foi de 2 mm entre linhas, tendo as linhas horizontais 2 mm de espessura e as linhas verticais 3 mm. Quanto menor for o número de linhas, ou seja, quanto maior for o espaçamento

entre elas, maior será a área útil do sensor, pois há uma menor área do sensor coberta com tinta condutora. O material piezoresistivo nas áreas em que está em contacto com o eletrodo torna-se uma superfície com resistência muito baixa, igual à do eletrodo, e apenas a área livre de eletrodos varia a sua resistência, constituindo a área útil do sensor. No entanto, primeiramente foi testado este espaçamento entre as linhas dos eletrodos.

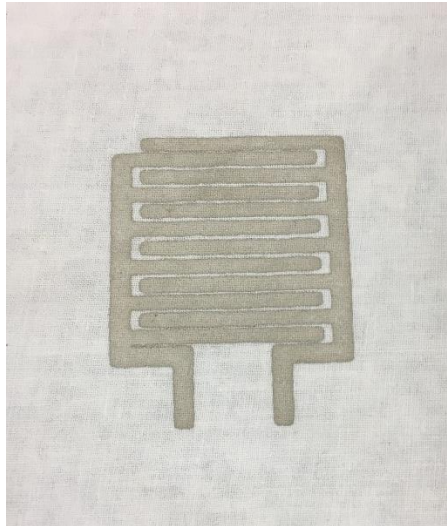


*Figura 60. Desenho dos eletrodos interdigitados com 2 mm de espaçamento entre linhas, linhas horizontais com 2 mm de espessura e linhas verticais com 3 mm de espessura*

Depois de feito o padrão, imprimiram-se as misonetes e passou-se para a abertura do quadro de estampar. De seguida, estamparam-se os eletrodos com a tinta condutora, como se pode observar nas figuras abaixo. Estes foram curados a 120°C durante 10 minutos.

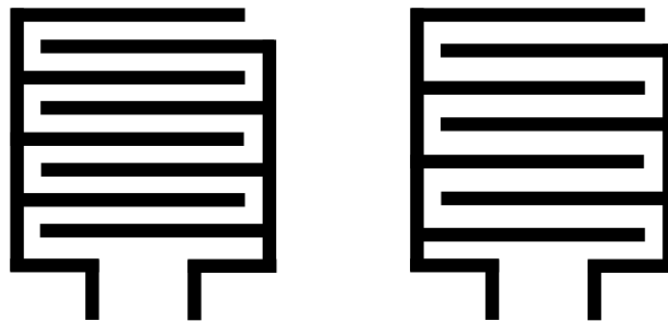


*Figura 61. Processo de estampagem da tinta condutora, desde o quadro com o desenho gravado, à colocação da tinta condutora no quadro e à passagem da vareta arrastando a tinta pelo desenho, respetivamente*

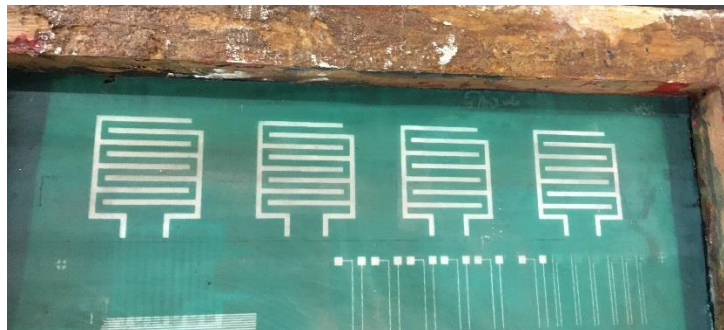


*Figura 62. Eléttodos interdigitados com 2 mm de espaçamento entre linhas, linhas horizontais com 2 mm de espessura e linhas verticais com 3 mm de espessura*

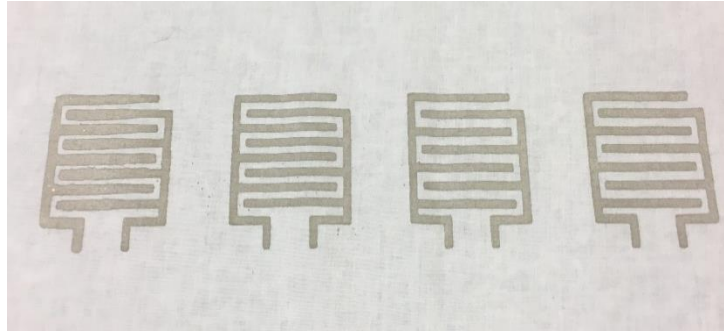
Como se pode constatar pela imagem acima, a tinta condutora migrou no tecido, fazendo com que as linhas condutoras se tocassem, provocando um curto-circuito. Para evitar que isto aconteça foram então desenhados novos eléttodos com as mesmas medidas nas linhas condutoras, mas com espaçamentos maiores entre elas, um com 3 e outro com 4 mm.



*Figura 63. Desenhos dos eléttodos com 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita) de espaçamento entre linhas condutoras*



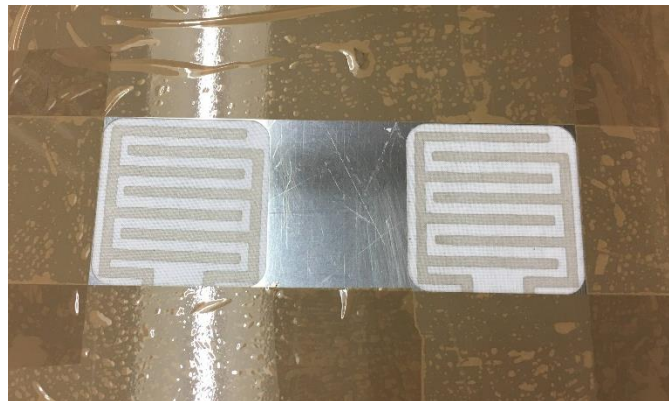
*Figura 64. Quadro aberto com os desenhos dos eléttodos com espaçamentos entre linhas de 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita)*



*Figura 65. Eléttodos interdigitados com espaçamentos entre linhas de 3 mm (esquerda) e 4 mm (direita)*

Acima pode-se comprovar que com um maior espaçamento entre as linhas dos eléttodos, estas deixam de se tocar. De qualquer das formas, para comprovar se não houve partículas a migrarem, os eléttodos foram testados com um multímetro. Concluiu-se que apresentavam excelente condutividade, e que não havia ligação elétrica entre os eléttodos.

De seguida passou-se para a estamperia da tinta piezoresistiva e, para isso, foi utilizada a chapa metálica, fazendo a passagem da tinta com a racla.



*Figura 66. Processo de estamperia da tinta piezoresistiva nos eléttodos interdigitados, usando a chapa*

Abaixo veem-se as amostras dos sensores com os eléttodos interdigitados com uma e duas camadas de tinta piezoresistiva.

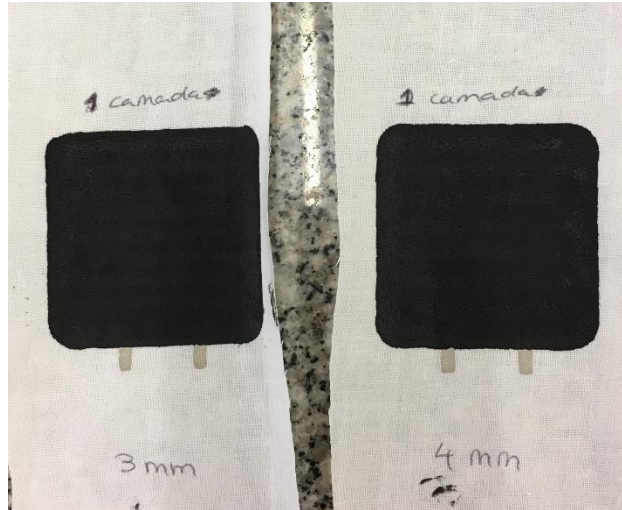


Figura 67. Sensores estampados com 1 camada de tinta condutora, com elétrodos interdigitados com 3 e 4 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo, respetivamente, e 1 camada de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica

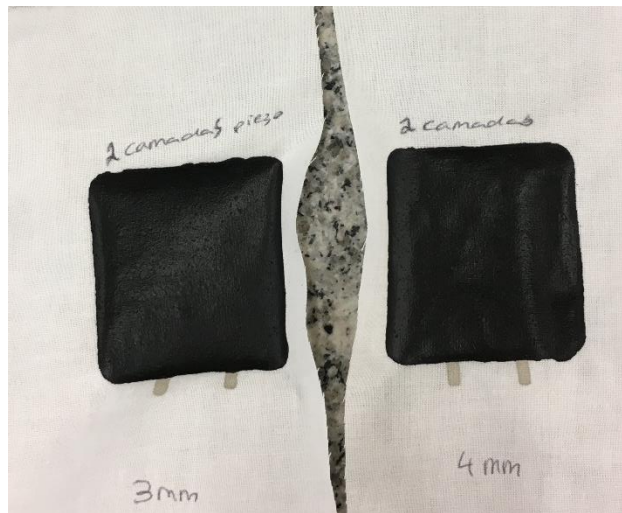


Figura 68. Sensores estampados com 1 camada de tinta condutora, com elétrodos interdigitados com 3 e 4 mm de espaçamento entre as linhas do elétrodo, respetivamente, e 2 camadas de tinta piezoresistiva usando a chapa metálica

Na figura abaixo está o mapa das experiências que foram realizadas e as respetivas amostras produzidas.

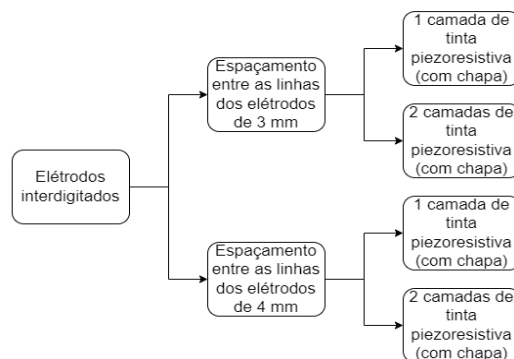
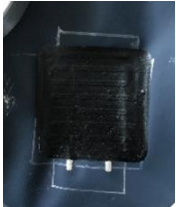

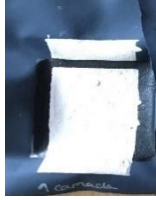

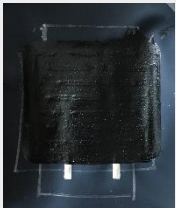





Figura 69. Mapa de experiências com elétrodos interdigitados

#### 4.3.7 Sensores produzidos com tecidos diferentes

Numa fase final do trabalho e com o objetivo de perceber a influência do tecido na produção dos sensores e nos resultados obtidos, foram produzidos sensores em dois tecidos com características diferentes do algodão. Um dos tecidos era completamente impermeável com um toque plastificado e o outro era um tecido de poliéster. Foram estampados quatro sensores com elétrodos interdigitados e quatro com os elétrodos de lados opostos da tinta piezoresistiva, tal como se pode observar no plano de amostras apresentado abaixo. Para a produção destes sensores foi utilizado o mesmo método usado em 4.3.3, no qual se estampou primeiro a camada de tinta condutora, depois a tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e, por fim, outra vez a tinta condutora. Para os sensores interdigitados foi usado o mesmo método do subcapítulo 4.3.6, no qual se estamparam primeiro os elétrodos interdigitados e posteriormente a tinta piezoresistiva, utilizando a chapa metálica.

*Tabela 2. Sensores produzidos num tecido impermeável e num tecido de poliéster*

	Elétrodos interdigitados		Elétrodos opostos	
	Tecido impermeável	Tecido poliéster	Tecido impermeável	Tecido poliéster
<b>1 camada de tinta piezoresistiva com chapa</b>				
<b>2 camadas de tinta piezoresistiva com chapa</b>				

## 5 Resultados e discussão

### 5.1 Consolidação de experiências anteriores

Na consolidação de experiências anteriores fez-se uma análise dos resultados dos sensores que tinham sido produzidos no trabalho anteriormente realizado na Universidade do Minho que concernia o mesmo tema (Obwald, 2020). Com esta análise concluiu-se que a tensão era mais elevada quando se tinha uma camada de tinta piezoresistiva de cada lado do tecido e quando era aplicada menos força magnética sobre a vareta, ou seja, nível 2. Em relação à quantidade de aditivo, que foi usado para obter uma mistura de tinta mais homogênea e maiores resistências elétricas, uma quantidade de aditivo de 20% seria suficiente, uma vez que os sinais obtidos eram mais lineares, com menos ruído e apresentavam menos histerese do que quando não se adicionava aditivo, tal como se pode comprovar nas figuras abaixo.

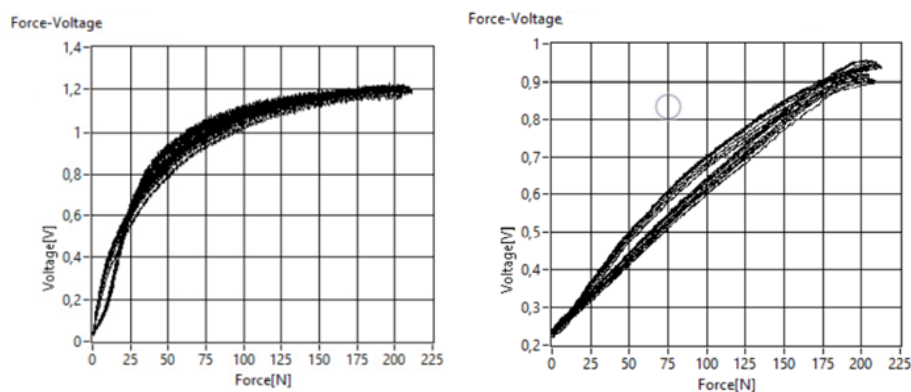


Figura 70. Comparação dos sinais tensão-força de um sensor produzido sem aditivo (esquerda) e de um sensor produzido com 20% aditivo (direita)

### 5.2 Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tecido condutor

Depois da produção dos sensores, procedeu-se à realização de testes de compressão a cada um deles. Tal como se pode observar na figura abaixo, o sinal de tensão registado para o sensor em que se aplica 50% de aditivo não é o esperado, sendo caracterizado apenas pela presença de ruído. O mesmo se observou no sensor que foi produzido com duas camadas de cada lado do tecido. Posto isto, foi excluído como opção utilizar 50% de aditivo.

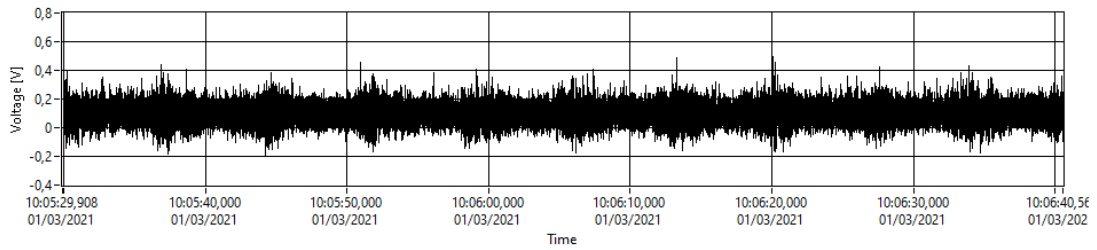


Figura 71. Sinal de tensão do sensor estampado com 50% de aditivo e com uma camada de cada lado

Nas figuras abaixo estão apresentados os gráficos obtidos para os sensores em que foi adicionado apenas 20% de aditivo.

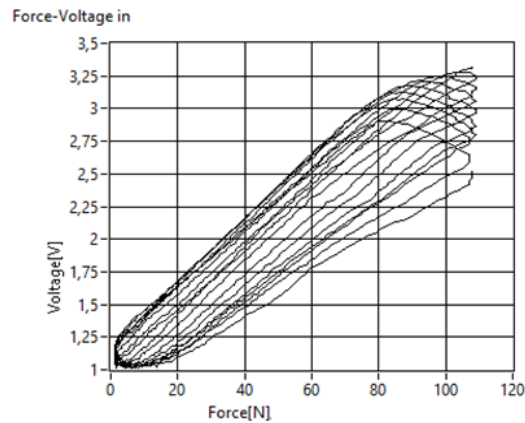


Figura 72. Gráfico força-tensão do sensor estampado com 20% de aditivo e com uma camada de cada lado

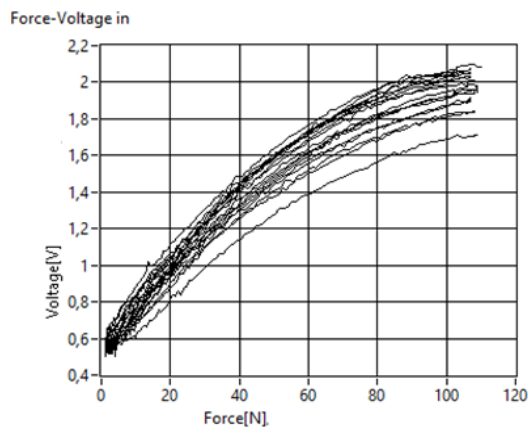


Figura 73. Gráfico força-tensão do sensor estampado com 20% de aditivo e com duas camadas de cada lado

Tanto quando se aplica apenas uma camada de cada lado como quando se aplicam duas, os sinais obtidos são bons. Sendo que, apesar de a gama de variação das tensões ser maior quando se aplica apenas uma camada de cada lado, o gráfico apresenta muita histerese. Ao contrário do que acontece no sensor em que se aplicam duas camadas de cada lado, em que a qualidade do sinal de tensão obtido é melhor e regista-se menos histerese.



À semelhança dos sensores com 20% de aditivo, quando não se usa aditivo o sensor que apresenta melhores resultados é o que foi estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva de cada lado. Uma vez que a gama de variação de resistências é elevada, a curva é linear, a histerese é muito reduzida e as tensões obtidas são elevadas. Nas experiências seguintes, o aditivo não foi utilizado, poupando assim material.

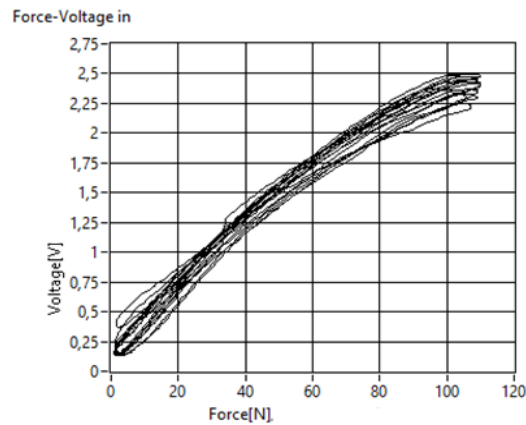


Figura 74. Gráfico força-tensão do sensor estampado sem aditivo e com duas camadas de cada lado

Abaixo está apresentado um quadro resumo das experiências realizadas e dos respetivos resultados.

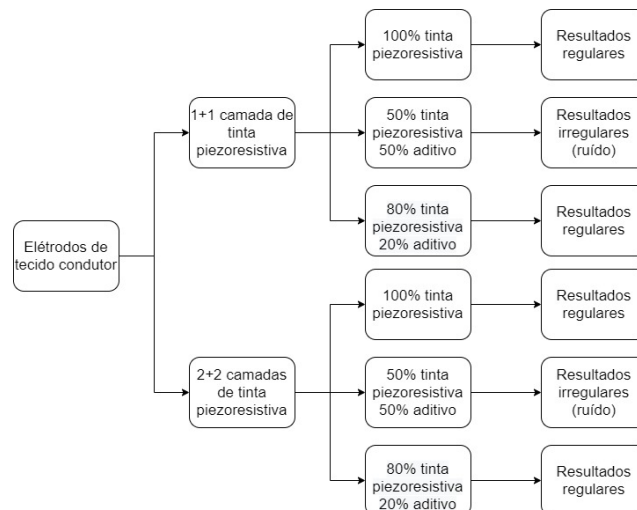


Figura 75. Mapa de experiências com elétrodos de tecido condutor e respetivos resultados

### 5.3 Sensores produzidos com tinta piezoresistiva e tinta condutora

#### 5.3.1 Experiências preliminares com a tinta condutora

Com o auxílio de um multímetro testaram-se os elétrodos estampados e observou-se que a tinta condutora estava a funcionar para as duas temperaturas de cura diferentes. As resistências registadas estão apresentadas na tabela abaixo, sendo que todas as riscas têm um comprimento de 5 cm.

*Tabela 3. Resistências por unidade de comprimento registadas nos diferentes tipos de elétrodos estampados*

Tipo de elétrodo	Temperatura de cura (°C)	Largura das riscas (mm)	Resistência por unidade de comprimento ( $\Omega/m$ )
Riscas verticais	80	2	100
		5	70
		10	52
Riscas horizontais	80	2	66
		5	52
		10	50
Elétrodos cruzados	80	-	90
Riscas verticais	120	2	80
		5	52
		10	48

Tabela 3 continuação. Resistências por unidade de comprimento registadas nos diferentes tipos de elérodos estampados

Riscas horizontais	120	2	60
		5	50
		10	44
Elérodos cruzados	120	-	52

As resistências por unidade de comprimento são mais baixas quando a temperatura de cura é de 120°C, embora não sejam diferenças muito significativas.

No caso dos sensores estampados com os elérodos coplanares, nenhum dos dois estava a funcionar. Sendo assim, não foi possível concluir se a temperatura de 120°C danificava ou não a tinta piezoresistiva.

Depois de estampados e testados os elérodos coplanares, passou-se para a estampa dos elérodos do lado oposto do tecido. Tal como foi feito anteriormente, a tinta foi curada a 80°C e a 120°C, e de seguida foram testados os sensores com o multímetro.



Figura 76. Elérodos estampados do lado oposto da tinta piezoresistiva curados a 80 e a 120°C, respetivamente

Observou-se que estes não estavam a funcionar e que os valores de resistência obtidos, perto de zero, indicavam que o sensor estava em curto-circuito. Isto pode-se ter devido a uma passagem da tinta condutora de um lado para o outro da tinta piezoresistiva, apesar de não ser visível a olho nu, fazendo com que os elétrodos estivessem em contacto provocando um curto-circuito. Para comprovar se realmente houve migração de tinta condutora através da tinta piezoresistiva e do tecido, uma das amostras foi submetida a uma análise no SEM. Nas imagens retiradas do microscópio será possível ver as fibras de algodão, as partículas de carbono e as partículas de prata.

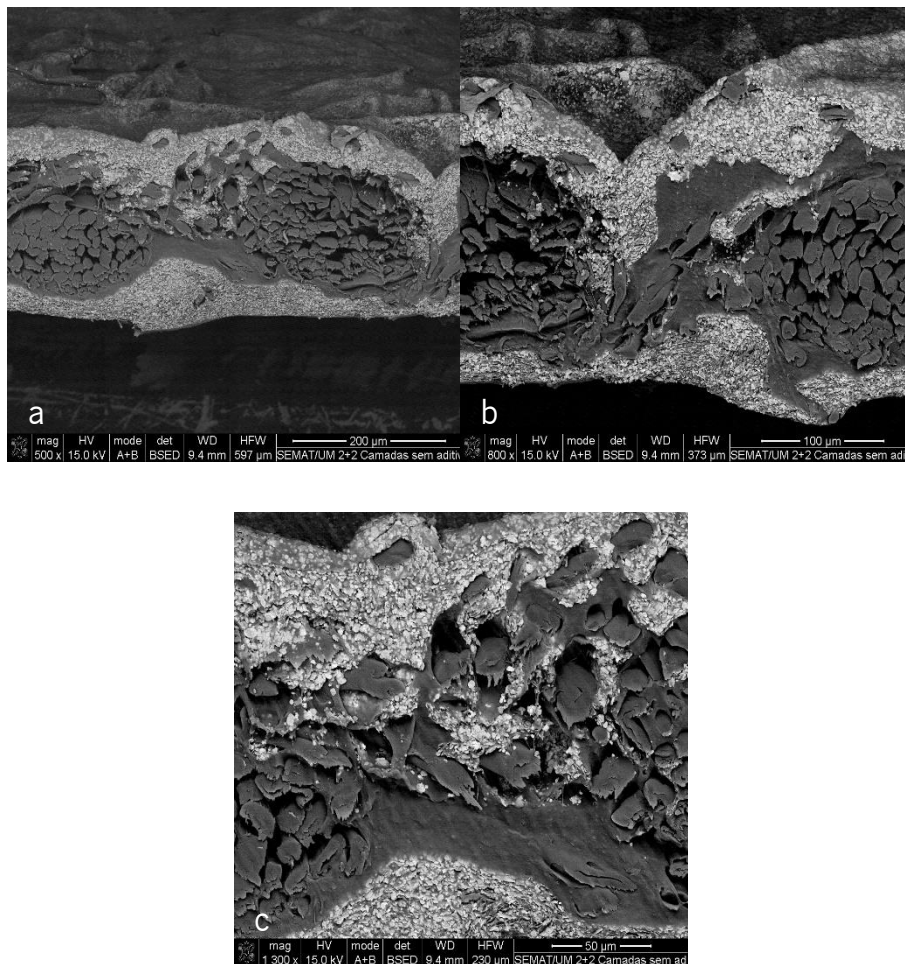


Figura 77. Imagens SEM do sensor com duas camadas de tinta piezoresistiva, sem aditivo, de cada lado e elétrodos opostos (dimensões das imagens de 200 (a), 100 (b) e 50 (c) µm, respetivamente)

Nas imagens acima é possível identificar o tecido de algodão pela secção transversal das suas fibras, como se pode ver na imagem mais ampliada. É também possível visualizar a tinta condutora, identificada pelas partículas mais brilhantes que constituem as partículas de prata, e ainda, a tinta piezoresistiva que é a camada a preto que se encontra abaixo da camada de tinta condutora. Para que

as partículas de prata fossem visíveis, que era o que se pretendia, foi utilizada a ferramenta de contraste na imagem, aumentando assim a intensidade da cor das partículas.

A primeira imagem, dá uma visão mais geral do que acontece pelo tecido, enquanto que a segunda e a terceira já ampliam zonas mais específicas do tecido. Nas imagens (b) e (c), vê-se a penetração das partículas de tinta condutora na camada piezoresistiva, o que sugere que a explicação para o curto-circuito possa de facto ser a migração das partículas, que se poderão tocar em alguns pontos do sensor.

### 5.3.2 Sensores com eléctrodos coplanares

Com o intuito de testar novas variantes do sensor e de perceber se o que aconteceu em 5.3.1, ao estampar a tinta condutora por cima da piezoresistiva, tinha origem em algum erro na produção do sensor ou se acontecia sempre, foram então produzidos os sensores coplanares referidos em 4.3.2.

Como se pode observar na Figura 78, ao estampar a terceira camada, a tinta piezoresistiva saiu nas zonas onde tem tinta condutora, tendo ficado agarrada ao quadro. Isto pode-se ter devido ao facto da segunda camada não ter ficado bem curada ou mesmo ao facto de nessas zonas o tecido, como já absorveu a tinta condutora, ter mais dificuldade para absorver uma terceira camada de tinta piezoresistiva. Sendo assim, os sensores produzidos com 3 camadas foram logo descartados, uma vez que deixaram de funcionar por haver falhas na tinta piezoresistiva.

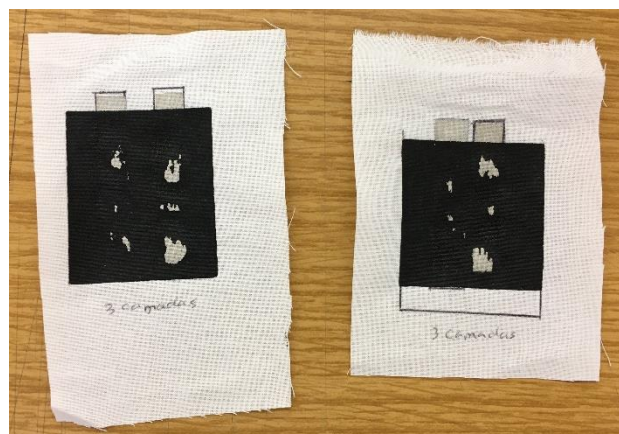


Figura 78. Sensores estampados com três camadas de tinta piezoresistiva e com os eléctrodos espaçados 10 mm (esquerda) e 2 mm (direita)

Quanto aos sensores produzidos com uma e duas camadas, foram ambos testados com o multímetro. Verificou-se que a resistência variava, mas em vez de diminuir quando lhe era aplicada pressão, aumentava. Isto pode dever-se ao facto de o substrato utilizado ser um têxtil, que é um material com elevado estiramento, o que faz com que, quando se aplica pressão sobre o sensor, as partículas se afastem, por causa do tecido estirar para os lados. Este fenómeno acontece quando temos ambas as tintas estampadas no mesmo tecido.

Sendo assim, os sensores estampados com uma e duas camadas de tinta piezoresistiva foram submetidos à máquina de teste de compressão cíclica. Nas imagens abaixo apresentam-se os sinais de variação das tensões dos sensores testados.

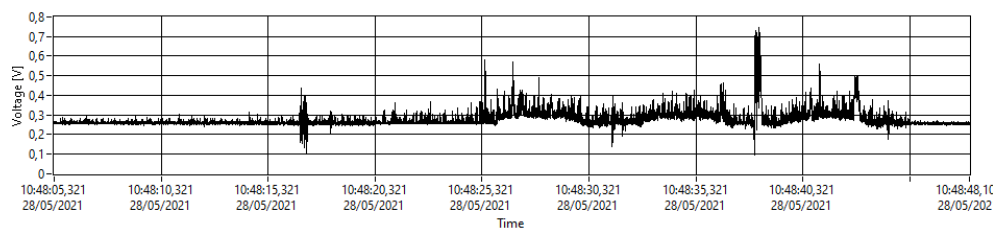


Figura 79. Sinal de tensão do sensor estampado com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm entre si

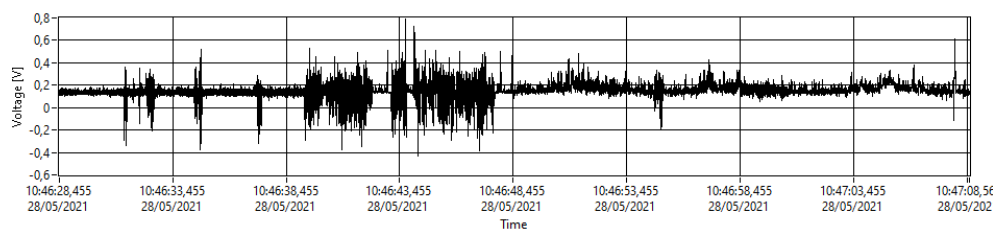


Figura 80. Sinal de tensão do sensor estampado com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm entre si

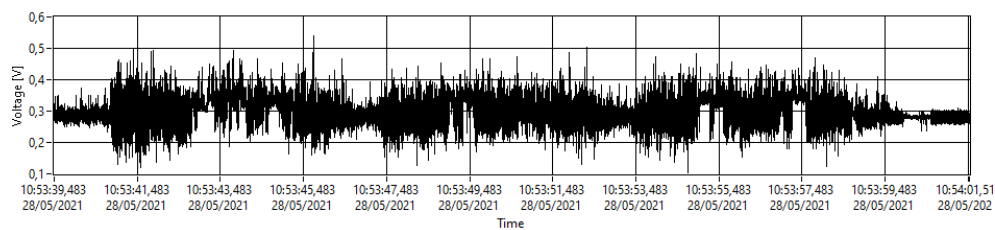


Figura 81. Sinal de tensão do sensor estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm entre si

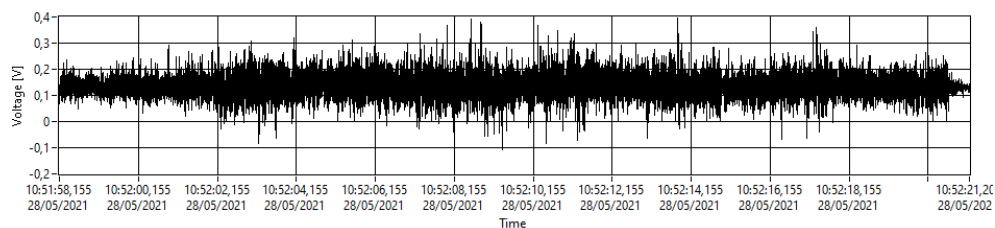


Figura 82. Sinal de tensão do sensor estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 10 mm entre si

Pode-se observar que existe variação da tensão, mas muito pequena e muito irregular, não podendo ser considerado um resultado regular. Com isto, podemos também concluir que a análise feita com o multímetro não é suficiente.

Abaixo está apresentado o mapa de experiências e os respectivos resultados obtidos.

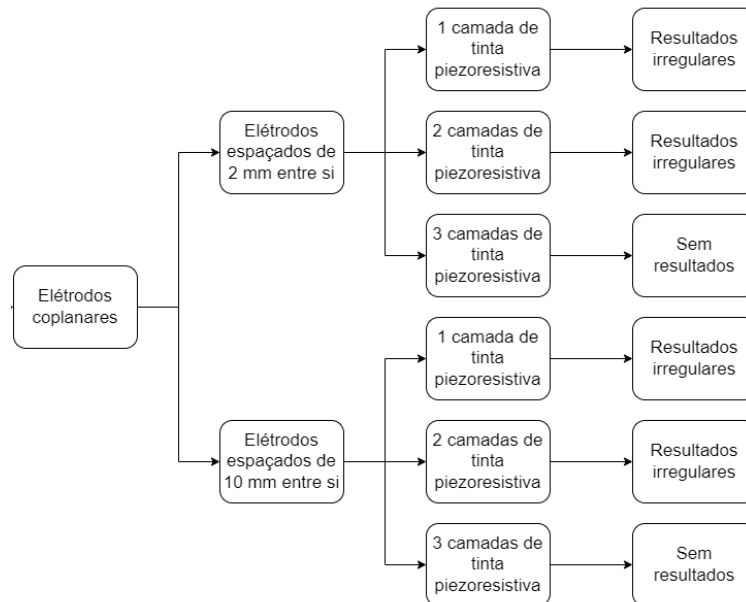


Figura 83. Mapa de experiências com elétrodos coplanares e respectivos resultados

### 5.3.3 Sensores com elétrodos de lados opostos do tecido

Uma vez testados os sensores foi possível verificar que se deu curto-circuito em todos eles, independentemente do número de camadas de tinta piezoresistiva aplicadas no tecido. A figura abaixo mostra que a tinta condutora não fica uniforme quando se estampa a piezoresistiva, havendo zonas onde a piezoresistiva é absorvida pelo tecido através da condutora. Isto mostra que a capacidade de absorção do tecido é elevada, e que ao estampar outra camada de tinta condutora por cima esta será bastante absorvida, acabando por se misturar com os elétrodos já estampados.

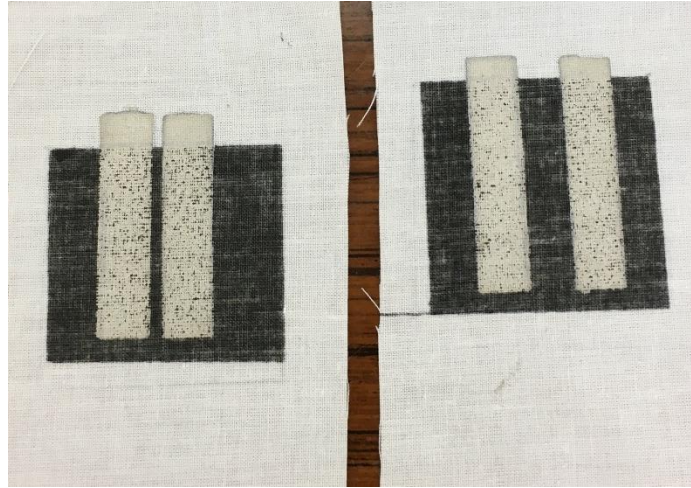


Figura 84. Face oposta dos sensores estampados com uma camada de tinta piezoresistiva e com os elétrodos espaçados 2 mm (esquerda) e 10 mm (direita)

Mais uma vez, as amostras foram submetidas ao microscópio eletrônico com o intuito de se observar a passagem de partículas de prata através da tinta piezoresistiva, uma vez que neste sensores as camadas de tinta são todas estampadas na mesma face do tecido.

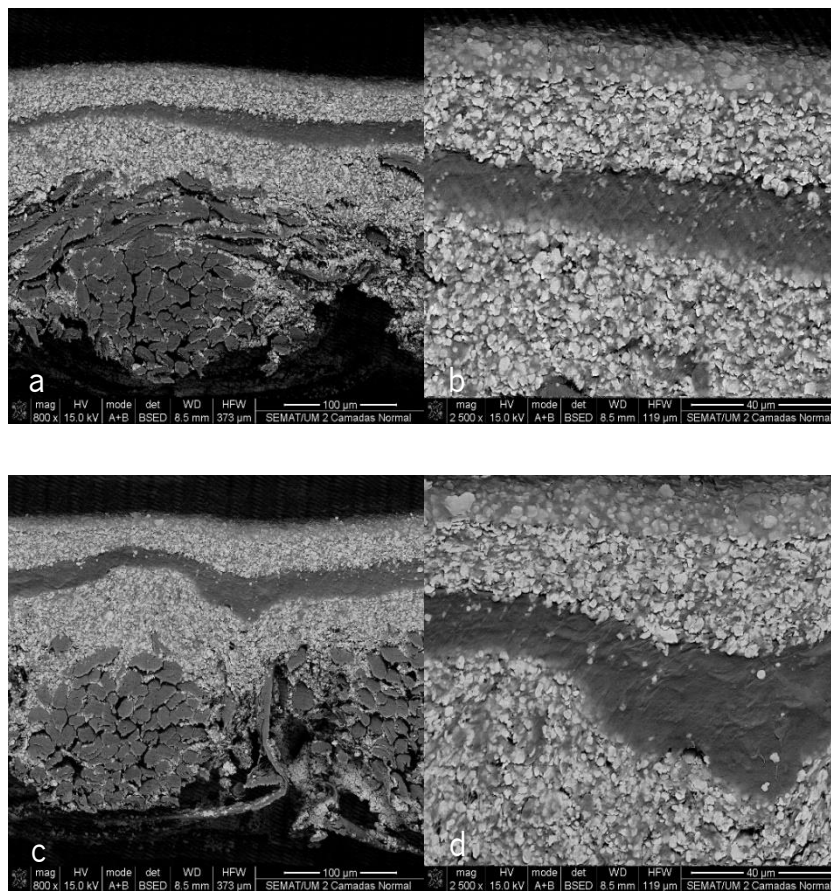


Figura 85. Imagens SEM do sensor com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos (dimensões das imagens de 100 (a), 40 (b), 100 (c) e 40 (d) μm, respetivamente)



As imagens (a) e (c) foram retiradas de zonas diferentes do tecido, enquanto as imagens (b) e (d) são aproximações de áreas específicas destas zonas, onde era mais visível a passagem de partículas da tinta condutora através da tinta piezoresistiva. Na imagem (d) é possível observar algumas partículas de prata de dimensões maiores comparativamente com as restantes. Isto deve-se ao facto de no corte das amostras para serem colocadas no SEM, algumas partículas serem arrastadas da camada condutora superior pela faca. No entanto, apesar disto, é visível que há migração da tinta condutora de uma camada para a outra através da tinta piezoresistiva, levando então assim à ocorrência de um curto-circuito. A forma de distinguir as partículas que são arrastadas das que sofreram migração é pelo facto de as primeiras serem de maiores dimensões e estarem mais brilhantes do que as restantes.

Através destas imagens consegue-se também comprovar a capacidade de absorção do tecido de algodão, uma vez que nas imagens (a) e (c) se vê que as partículas de prata são muito absorvidas pelas fibras de algodão.

Assim sendo, também se excluiu a hipótese de estampar duas camadas opostas de tinta condutora na mesma face do tecido.

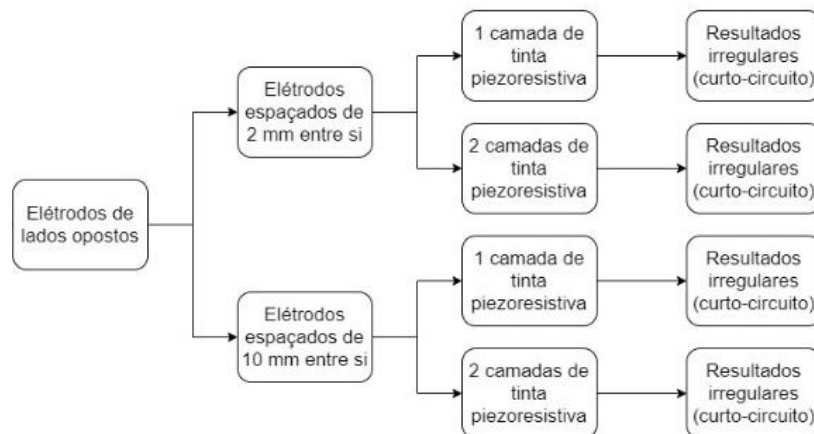


Figura 86. Mapa de experiências com elétrodos estampados de lados opostos e respetivos resultados

### 5.3.4 Sensores sanduíche

Os sensores sanduíche foram então testados, inicialmente, com o multímetro e, posteriormente, com a máquina de teste de compressão, encostando uma superfície piezoresistiva à outra. Com o multímetro concluiu-se logo que estavam a funcionar e que apresentavam valores de resistência acima

dos 100  $\Omega$ . Abaixo estão apresentados os sinais registados por alguns dos sensores testados na máquina de teste de compressão cíclica e analisados no programa de processamento de sinal.

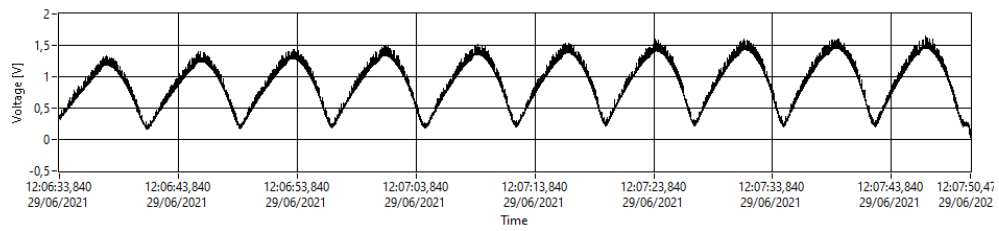


Figura 87. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face

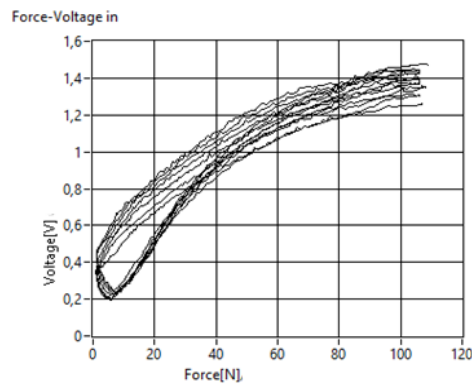


Figura 88. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face

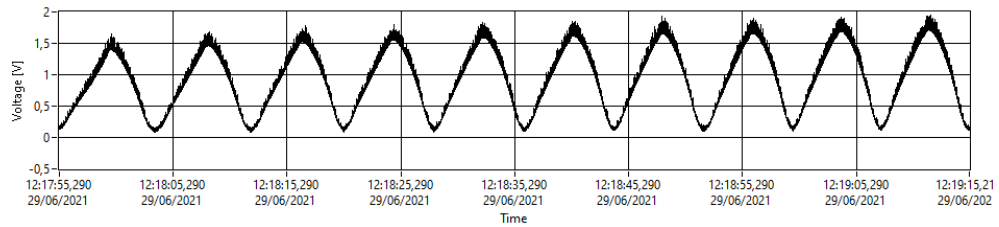


Figura 89. Sinal de tensão do sensor sanduiche estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva em cada face

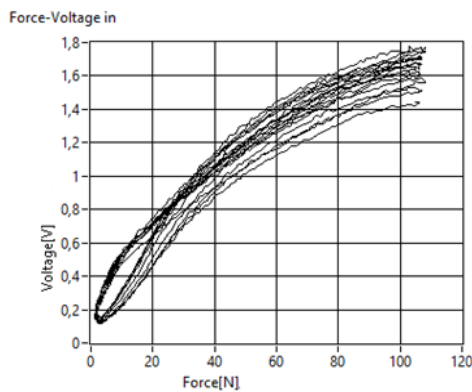


Figura 90. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva em cada face

Analisando os gráficos acima, no que diz respeito às tensões obtidas no teste de compressão, com uma camada de tinta piezoresistiva, as tensões variam dos 0,2 aos 1,4V, mas as curvas apresentam bastante histerese e são pouco lineares. Com duas camadas de tinta, a gama de variação da tensão aumenta, variando dos 0,1 aos 1,8V. Nestes as curvas são mais lineares que as anteriores e apresentam menos histerese.

Uma vez que foram estampados sensores com a chapa metálica de modo a aumentar a espessura da tinta piezoresistiva, os valores de espessura das camadas piezoresistivas de cada um dos sensores foram medidos e estão apresentados na tabela abaixo.

*Tabela 4. Espessuras das camadas piezoresistivas dos sensores*

Sensor	Espessura média (mm)
1 camada de tinta piezoresistiva (amostra 1)	0,05
1 camada de tinta piezoresistiva (amostra 2)	0,07
2 camadas de tinta piezoresistiva (amostra 1)	0,1
2 camadas de tinta piezoresistiva (amostra 2)	0,08
1 camada com chapa	0,2

Como se pode analisar na tabela acima, tal como era de esperar, a espessura obtida apenas com uma camada de tinta piezoresistiva é muito mais elevada quando se utiliza a chapa do que quando se utiliza o quadro de estampar. Para uma camada de tinta piezoresistiva estampada sem chapa as espessuras têm um valor médio de 0,06 mm e para duas camadas de tinta de 0,09 mm. Ao utilizar a chapa, apenas com uma camada, a espessura obtida foi de 0,2 mm.

Ao utilizar a chapa, as tensões registadas são mais elevadas do que quando não se usa e a gama de variação também é maior, como se pode observar no gráfico da Figura 91. Em relação às curvas força vs tensão, são mais lineares e apresentam muito menos histerese que as dos sensores produzidos com o quadro.

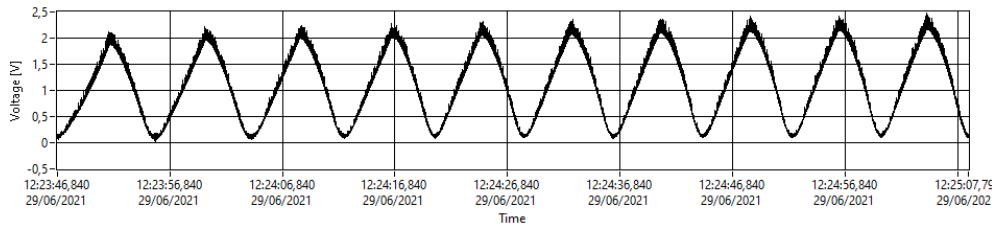


Figura 91. Sinal de tensão do sensor sanduíche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a chapa metálica

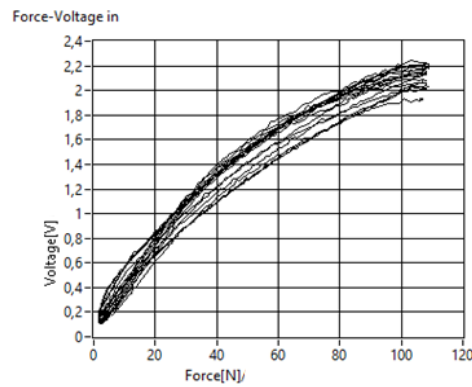


Figura 92. Gráfico força-tensão do sensor sanduíche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a chapa

Ao utilizar a técnica do *coating*, quando se aplicam duas camadas de tinta, foram obtidos sinais de tensão melhores do que pela técnica de estampa. As tensões registadas variam entre os 0,25 e os 3V, sendo a gama de variação da tensão mais ampla que as anteriores. Em relação às curvas, estas são bastante lineares e apresentam muito pouca histerese, tal como podemos ver na Figura 94.

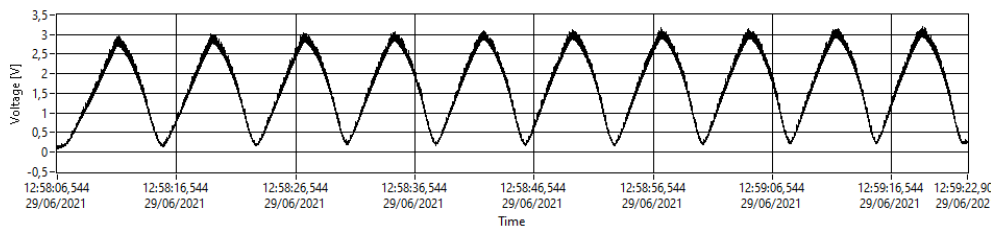


Figura 93. Sinal de tensão do sensor sanduíche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a técnica de coating

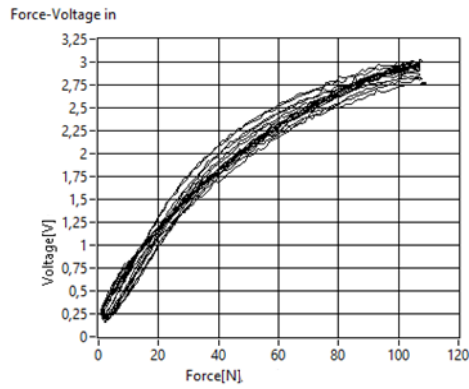


Figura 94. Gráfico força-tensão do sensor sanduiche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face utilizando a técnica de coating

Daqui é possível observar que, apesar de a espessura da camada piezoresistiva ser menor do que nos sensores estampados recorrendo à chapa, o sinal obtido é melhor. Isto pode-se dever ao facto de nesta técnica ser necessário colocar o tecido sob tensão, fazendo com que a superfície fique mais lisa, obtendo-se assim uma impressão mais homogênea, uma vez que são eliminadas as rugosidades naturais do tecido. No entanto, a desvantagem da técnica de *coating* é a necessidade de serem feitos muitos ensaios para determinar qual a melhor altura da faca, de modo a se obter a espessura mais adequada para o sensor, sendo necessário despende muito tempo.

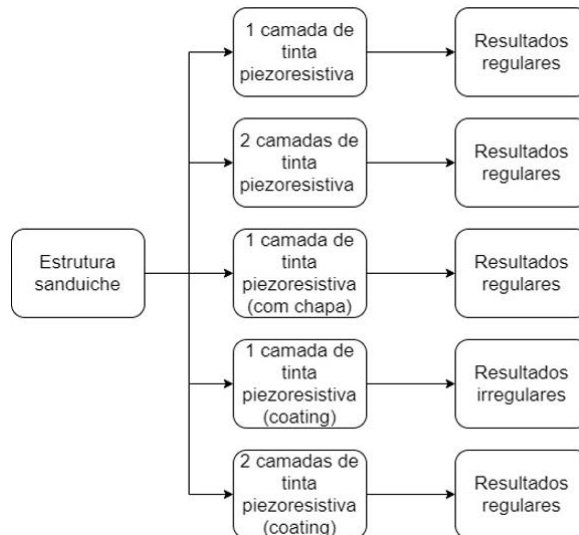


Figura 95. Mapa de experiências dos sensores sanduiche e respetivos resultados

### 5.3.5 Sensores sanduíche colados

Depois de colar as faces dos sensores umas às outras com a rede termoplástica conforme foi explicado anteriormente, estes foram testados com o multímetro, e observou-se que deixaram de funcionar. A resistência era muito baixa e não variava. No entanto, ao separar as faces foi possível notar que a cola não tinha ficado bem fixada e que, uma vez separadas as faces, o sensor voltava a funcionar. A rede promove o contacto entre as camadas piezoresistivas, exibindo o sensor um comportamento como se estivesse a ser pressionado, com resistências baixas e sem variação adicional. Ao descolar o sensor, recupera-se o comportamento anterior.



Figura 96. Sensor descolado com a rede termoplástica visível numa das faces

#### 5.3.5.1 Experiências adicionais

Visto que com os parâmetros de colagem anteriores não se obteve resultados positivos, fez-se uma segunda tentativa de colagem. Sendo assim, diminui-se a pressão de modo que as camadas não fiquem tão juntas e tenham por onde deformar, mas aumentado o tempo. A temperatura manteve-se nos 110°C durante 20 segundos a uma pressão de 1 bar.

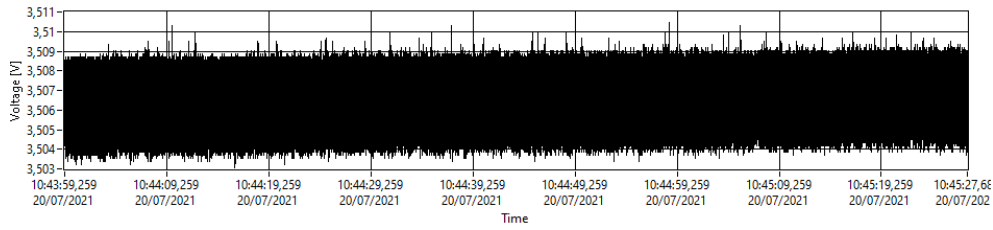


Figura 97. Sinal de tensão do sensor sanduíche estampado com uma camada de tinta piezoresistiva em cada face

Tal como se pode observar no exemplo acima, e à semelhança do que aconteceu aos outros sensores, não se obtiveram sinais de tensão regulares. Isto, tal como já foi explicado anteriormente, pode-se dever ao facto de a cola promover um contacto tão forte entre as duas camadas que o sensor atinge logo o seu valor mínimo de resistência, sem que seja aplicada qualquer pressão. Tal como se pode ver no valor de tensão que ronda os 3,5V, e que está acima da tensão registada nos sensores produzidos sem cola. Mais uma vez, ao separar as camadas, viu-se que o sensor continuava a funcionar.

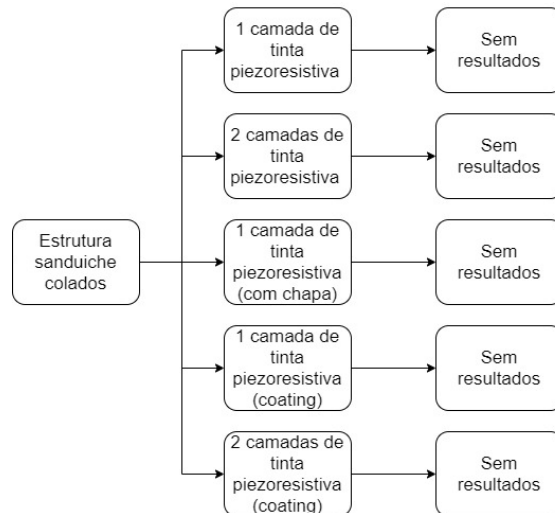


Figura 98. Mapa de experiências dos sensores sanduíche colados e respetivos resultados

### 5.3.6 Sensores com elétrodos interdigitados

Primeiramente, foi medida a espessura da camada piezoresistiva obtida para cada um dos sensores, mais uma vez com o intuito de comparar a influência da espessura da camada piezoresistiva nos sinais obtidos. As espessuras estão apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 5. Espessuras da camada piezoresistiva dos sensores interdigitados

Sensor	Espessura média (mm)
1 camada de tinta piezoresistiva (sensor de 3 mm de distância entre linhas)	0,14
1 camada de tinta piezoresistiva (sensor de 4 mm de distância entre linhas)	0,10
2 camadas de tinta piezoresistiva (sensor de 3 mm de distância entre linhas)	0,28
2 camadas de tinta piezoresistiva (sensor de 4 mm de distância entre linhas)	0,22

De seguida, os sensores foram testados com o multímetro e com a máquina de teste de compressão cíclica. Ao testar com o multímetro foi logo possível concluir que os sensores não estavam a funcionar uma vez que as resistências obtidas eram muito baixas e não variavam, indicando que teria ocorrido um curto-circuito. Tal como já tinha acontecido anteriormente, isto pode-se dever à elevada capacidade de absorção das tintas por parte do tecido de algodão, o que levou a uma mistura das partículas. De qualquer das formas, os sensores foram colocados na máquina de teste para ver se se comprovava a informação dada pelo multímetro.

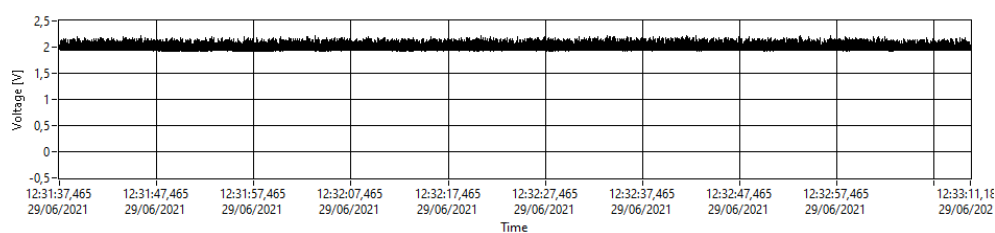


Figura 99. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com uma camada de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 3 mm de espaçamento entre as linhas do eletrodo



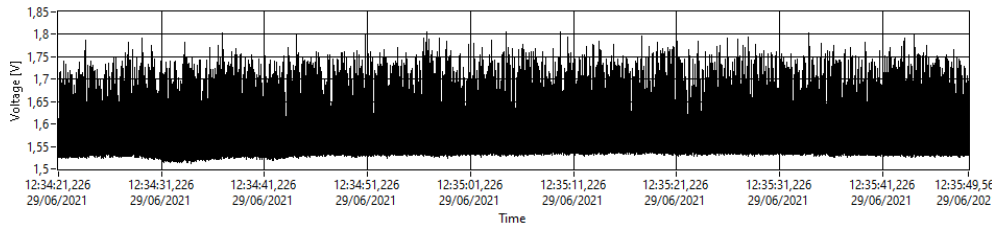


Figura 100. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com uma camada de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 4 mm de espaçamento entre as linhas do eletrodo

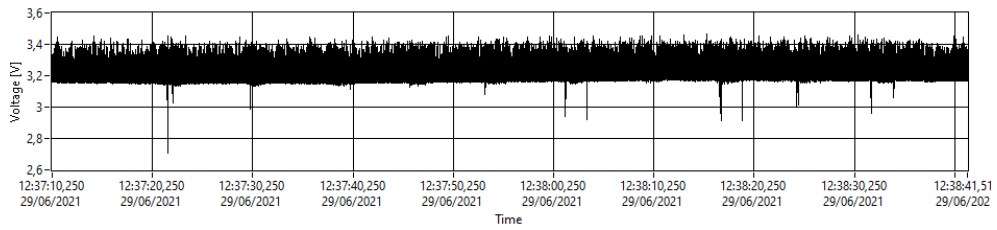


Figura 101. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 3 mm de espaçamento entre as linhas do eletrodo

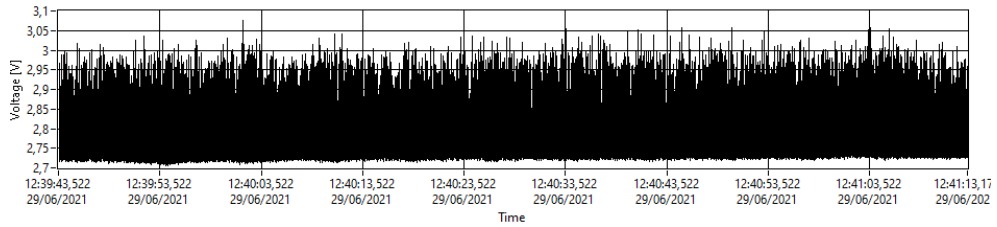


Figura 102. Sinal de tensão do sensor interdigitado estampado com duas camadas de tinta piezoresistiva utilizando a chapa metálica e com 4 mm de espaçamento entre as linhas do eletrodo

Com estes sinais apenas é possível concluir que não há variação de sinal.

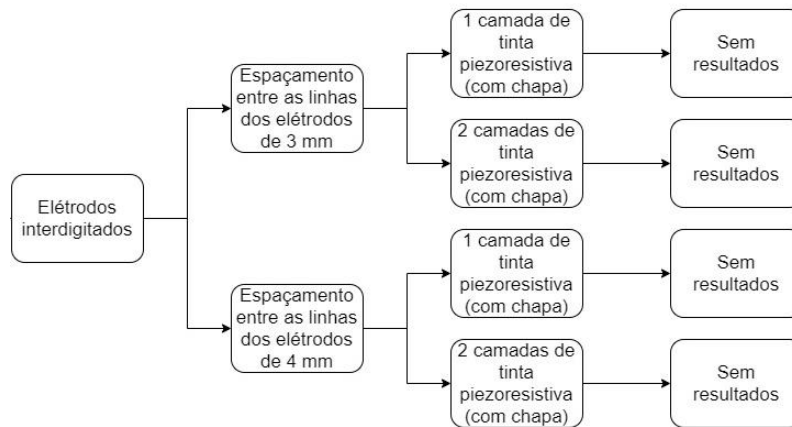


Figura 103. Mapa de experiências com eletrodos interdigitados e respectivos resultados

### 5.3.7 Sensores produzidos com tecidos diferentes

Depois de produzidos os sensores interdigitados e com elétrodos opostos nos tecidos impermeável e de poliéster, estes foram testados com o multímetro e com a máquina de compressão. Em ambos os testes foi possível verificar que quando os elétrodos são colocados em lados opostos da tinta piezoresistiva, os sensores não funcionam, estando em curto-circuito, tal como se pode comprovar pelo sinal abaixo.

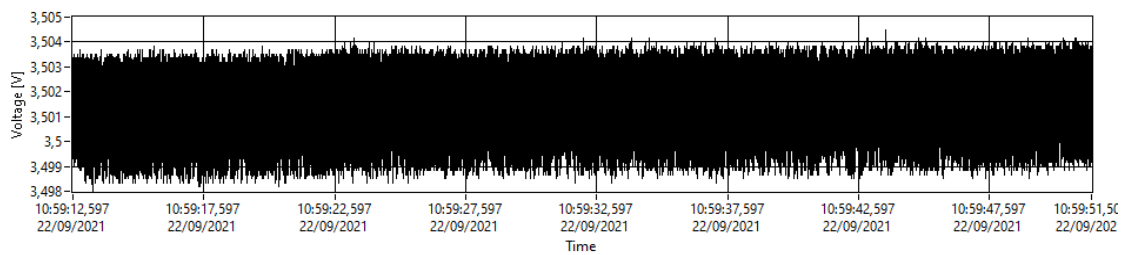


Figura 104. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido impermeável com uma camada de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos

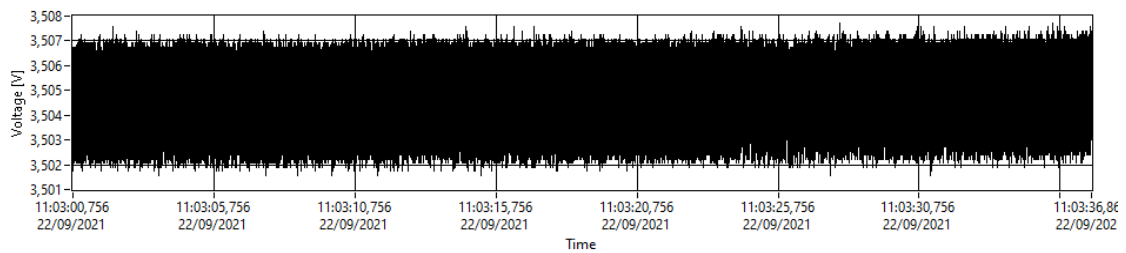


Figura 105. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido de poliéster com uma camada de tinta piezoresistiva e elétrodos opostos

No que diz respeito aos sensores impressos com elétrodos interdigitados, apresentaram sinais muito irregulares e com um grau muito elevado de ruído, apesar de ter sido utilizada a chapa para estampar a tinta piezoresistiva.

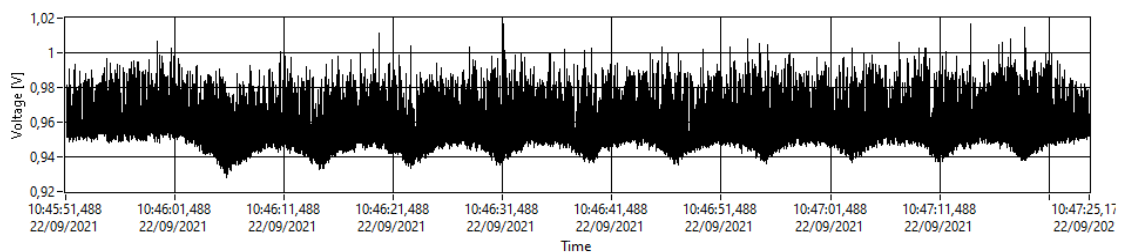
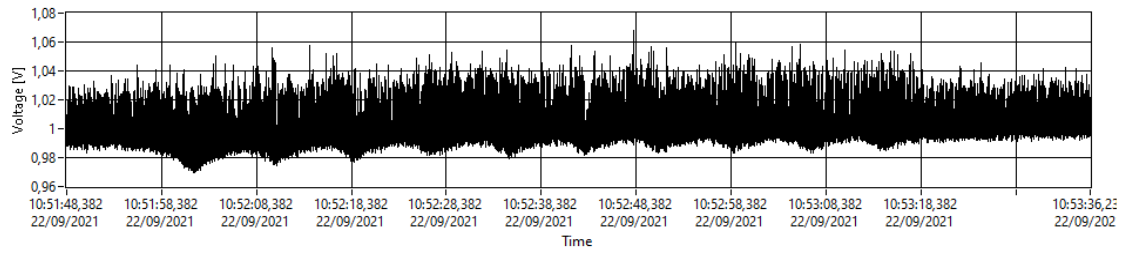


Figura 106. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido impermeável com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos interdigitados



*Figura 107. Sinal de tensão obtido do sensor produzido em tecido de poliéster com duas camadas de tinta piezoresistiva e elétrodos interdigitados*

## 6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de sensores de força/pressão piezoresistivos flexíveis. Para isso, foram utilizadas duas tintas da empresa Nanopaint, que foram impressas num tecido de algodão. Uma das tintas é condutora, composta por partículas de prata, e serviu para produzir os elétrodos do sensor. A outra tinta é piezoresistiva e constitui, tal como o nome indica, a camada piezoresistiva, sendo esta composta por micropartículas de carbono.

Na primeira fase do trabalho foram produzidos sensores em que os elétrodos eram feitos de tecido condutor, de modo a consolidar experiências anteriores. Daqui foi possível concluir que a força magnética mais adequada a ser aplicada na estamperia da tinta piezoresistiva era de 2, numa escala de 1 a 6 de força do íman, e uma velocidade de passagem da vareta de 50%, numa escala que vai dos 0 aos 100%. Ao estamparem-se duas camadas de tinta piezoresistiva os sinais eram mais lineares, apresentavam menos histerese e as obtinham-se gamas de variação das tensões mais elevadas. Estas experiências foram importantes para definir os parâmetros mais adequados para a produção dos sensores seguintes que foram feitos utilizando as tintas condutora e piezoresistiva.

Foi também necessário fazer experiências preliminares à tinta condutora, mais uma vez com o intuito de perceber quais os parâmetros mais adequados para a sua impressão no tecido de algodão. Daqui foi possível concluir que a velocidade de passagem da vareta mais adequada era de 50%, a força do íman era de 4, que duas passagens da vareta davam origem a uma camada mais uniforme do que apenas uma passagem e que a cura a uma temperatura de 120°C durante 10 minutos otimiza o processo.

Posto isto, passou-se para a impressão de sensores com elétrodos coplanares, com distâncias entre os elétrodos de 2 e 10 mm, e com uma, duas e três camadas de tinta piezoresistiva. Ao serem testados com o multímetro, ao ser aplicada pressão, em vez de haver uma diminuição da resistência, esta aumentava, devido ao afastamento das partículas causado pelo estiramento elevado do têxtil. No entanto, ao se submeter as amostras à máquina de teste de compressão cíclica vê-se que houve uma variação do sinal de tensão, embora muito pequena e muito irregular, levando mesmo a serem considerados como resultados irregulares.

Visto que os sensores com elétrodos coplanares não deram bons resultados, foram produzidos sensores com os elétrodos de lados opostos da tinta piezoresistiva. Todos os sensores produzidos deram

curto-circuito. Depois de uma análise das amostras no SEM, foi possível observar que houve migração de algumas partículas de prata através da tinta piezoresistiva, podendo esta ser uma possível razão para a ocorrência do curto-circuito, pois as partículas de uma camada condutora podem ter entrado em contacto com as da outra.

Para tentar evitar que o que aconteceu anteriormente se repita, foram desenvolvidos os sensores sanduiche, em que os elétrodos estão em dois tecidos diferentes. Em primeiro lugar foram testados com o multímetro e apresentaram valores de resistência acima dos 100  $\Omega$ , e depois foram testados na máquina de teste de compressão cíclica. Concluiu-se que nos sensores com duas camadas de tinta piezoresistiva a gama de variação de tensões é maior, há menos histerese e as curvas são mais lineares do que nos sensores com apenas uma camada. Com estas experiências concluiu-se ainda que ao utilizar a chapa metálica para estampar, a espessura aumenta substancialmente apenas com uma camada de tinta, comparativamente com quando não se usa a chapa. Em relação aos sinais obtidos, são mais lineares do que quando não se utiliza a chapa, apresentam menos histerese e têm gamas de variação maiores. Como alternativa à técnica de estamperia, ao utilizar o *coating*, imprimiram-se duas camadas de tinta piezoresistiva e os sinais obtidos apresentam uma gama de variação de tensões muito maior que os anteriores, são bastante lineares e apresentam muito pouca histerese.

Numa fase mais avançada do trabalho apostou-se na colagem das camadas do sensor sanduiche. Nenhum dos sensores colados deu sinal, o que se pode ter devido ao facto de a cola promover um contacto tão forte entre as duas camadas, que fez com que o sensor atingisse logo o seu valor mínimo de resistência, sem que lhe fosse aplicada pressão.

Foram ainda produzidos sensores com elétrodos interdigitados, nos quais a camada piezoresistiva foi estampada recorrendo à chapa metálica, de modo a obterem-se espessuras maiores desta camada, e que foi o que aconteceu. Tanto ao testar com o multímetro como com a máquina de teste, uma vez que as resistências registadas eram muito baixas e não variavam, dando indícios de que um curto-circuito poderia ter ocorrido. Isto pode-se ter devido a uma grande capacidade de absorção das tintas por parte do algodão, o que pode ter levado a uma migração de tinta que não era visível a olho nu.

Por fim, e para perceber se a razão para terem sido obtidos tão poucos resultados positivos era o tecido de algodão e da sua elevada capacidade de absorção, foram produzidos sensores num tecido de poliéster, menos hidrófobo, e num tecido completamente impermeável. Os sensores que foram produzidos com elétrodos de lados opostos da tinta piezoresistiva curto-circuitaram, em ambos os

tecidos, independentemente do número de camadas de tinta piezoresistiva. Já os sensores que foram produzidos com elétrodos interdigitados apresentaram variações, mas muitos irregulares, muito pequenas e com muito ruído.

## 7 Perspetivas futuras

Este trabalho mostrou que algumas das configurações testadas não obtiveram bons resultados.

Os sensores “sanduíche” mostraram resultados interessantes antes de serem consolidados através de colagem deixando de funcionar por ficaram sob pressão através da cola. Uma solução para resolver este problema seria procurar uma forma de colar as camadas do sensor sem que lhe fosse aplicada pressão durante o processo.

Uma vez que o método de impressão de ambas as tintas no mesmo tecido não funcionou nem num tecido de algodão nem em tecidos com fibras sintéticas, é recomendado fazerem-se as mesmas experiências usando uma folha de PET e mantendo o mesmo método de impressão das tintas. Caso os sensores produzidos funcionem melhor, o problema será do substrato que foi usado, sendo assim recomendado experimentar em materiais diferentes. Caso os sensores não funcionem, o problema será do método, e será necessário idealizar uma nova forma de produção dos sensores. Como alternativa podia-se ainda apostar numa tinta piezoresistiva menos porosa, para perceber se o problema estaria na própria tinta.

Com base nos resultados obtidos nos sensores impressos pelo método de *coating* das tintas, seria também interessante ser explorada esta alternativa de produção dos sensores. Esta técnica necessita de mais experimentação prévia para se chegar à altura ideal da faca, de modo que a camada piezoresistiva tenha a espessura ideal, e com a qual serão obtidos os melhores sinais.

## 8 Bibliografia

- AvnetAbacus. (n.d.). *Piezoelectric Pressure Sensors | The Design Engineer's Guide*. Acedido a 17 de outubro de 2020, em <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric/>
- Baldoli, I., Mazzocchi, T., Paoletti, C., Ricotti, L., Salvo, P., Dini, V., Laschi, C., Di Francesco, F., & Menciassi, A. (2016). Pressure mapping with textile sensors for compression therapy monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, *230*(8), 795–808.
- Carvalho, H., Tama, D., Gomes, P., Abreu, M. J., Yao, Y., & Souto, A. P. (2018). Flexible piezoresistive pressure sensors for smart textiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *459*(1).
- Carvalho, H., Yao, Y., & Gonçalves, L. M. (2017). Flexible force sensors for e-textiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *254*(7).
- Castro, H. F., Correia, V., Pereira, N., Costab, P., Oliveiraa, J., & Lanceros-Méndez, S. (2018). Printed Wheatstone bridge with embedded polymer based piezoresistive sensors for strain sensing applications. *Additive Manufacturing*, *20* (December 2017), 119–125.
- Costa, P., Oliveira, J., Horta-Romarís, L., Abad, M. J., Moreira, J. A., Zapiráin, I., Aguado, M., Galván, S., & Lanceros-Mendez, S. (2018). Piezoresistive polymer blends for electromechanical sensor applications. *Composites Science and Technology*, *168*(September), 353–362.
- Dias, S., Vasconcelos, R., Santos, M., Amorim, M. T., & Amaral, L. (1999). *ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO ALGODÃO COM TÉCNICAS DE DATA MINING*. 1–14.
- Elektro4000. (n.d.). *Induktive, aktive & passive Sensoren - Elektro4000 Magazin*. Acedido a 16 de novembro de 2021, em <https://www.elektro4000.de/magazin/induktive-sensoren-aktive-sensoren-passive-sensoren/>
- Flexible textile printed piezoresistive pressure sensors for smart textiles Master of Science*. (2020).
- Francis, M. P., Kemper, N., Maghdouri-White, Y., & Thayer, N. (2018). Additive manufacturing for biofabricated medical device applications. In *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications* (pp. 311–344). Elsevier.



- Gomes, P. M. da C. (2013). *Aplicação de nano partículas de sílica coloridas na estamperia*. 207.
- Gomes, P., Tama, D., Yao, Y., Abreu, M. J., Souto, A. P., & Carvalho, H. (2018). Development of pressure sensors for smart textiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 460(1).
- Gomes, Pedro, Tama, D., Carvalho, H., & Souto, A. P. (2020). Resistance variation of conductive ink applied by the screen printing technique on different substrates. *Coloration Technology*, 136(2), 130–136.
- Gonçalves, B. F., Costa, P., Oliveira, J., Ribeiro, S., Correia, V., Botelho, G., & Lanceros-Mendez, S. (2016). Green solvent approach for printable large deformation thermoplastic elastomer based piezoresistive sensors and their suitability for biomedical applications. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 54(20), 2092–2103.
- Goy, C. B., Menichetti, V., Yanicelli, L. M., Lucero, J. B., Gómez López, M. A., Parodi, N. F., & Herrera, M. C. (2015). Design, fabrication and metrological evaluation of wearable pressure sensors. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 39(3), 208–215.
- HBM. (n.d.). *HBM*. Acedido a 18 de outubro de 2020, em <https://www.hbm.com/pt/7646/o-que-e-um-sensor-de-pressao/>
- I. Yaniger, D. S. (n.d.). *Force sensing resistors: a review of the technology*. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Jeong, E., Lee, J., & Kim, D. E. (2011). Finger-gesture recognition glove using velostat (ICCAS 2011). *International Conference on Control, Automation and Systems, Iccas*, 206–210.
- Joshi, M., & Butola, B. S. (2013). Application technologies for coating, lamination and finishing of technical textiles. In *Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles* (pp. 355–411).
- Leite, A. J. F. (2003). *Estudo da compatibilidade entre estruturas e formas geométricas nos tecidos Jacquard*. 1–99. <http://hdl.handle.net/1822/382>
- LessEMF\_Inc. (n.d.). *EX-STATIC™ Static Dissipative Fabric*. 12208.
- Mattila, H. (2015). Yarn to Fabric: Intelligent Textiles. In *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology* (pp. 355–376). Woodhead Publishing.
- Meyer, J., Lukowicz, P., & Tröster, G. (2006). Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection. *Proceedings - International Symposium on Wearable Computers, ISWC*, 69–74.

- Multímetro Digital*. (n.d.). Acedido a 28 de abril 2021, em [https://www.wish.com/product/590bd27302ea8926f77b6590?hide\\_login\\_modal=true&from\\_ad=goog\\_shopping&\\_display\\_country\\_code=PT&\\_force\\_currency\\_code=EUR&pid=googleadwords\\_int&c=%7BcampaignId%7D&ad\\_cid=590bd27302ea8926f77b6590&ad\\_cc=PT&ad\\_lang=PT&ad\\_curr=EUR&ad](https://www.wish.com/product/590bd27302ea8926f77b6590?hide_login_modal=true&from_ad=goog_shopping&_display_country_code=PT&_force_currency_code=EUR&pid=googleadwords_int&c=%7BcampaignId%7D&ad_cid=590bd27302ea8926f77b6590&ad_cc=PT&ad_lang=PT&ad_curr=EUR&ad)
- N.a. (n.d.). *Piezoelectricity*. Acedido a 18 de outubro de 2020, em <http://www.tedlind.net/piezoelectricity.htm>
- Nanopaint\_Lda. (n.d.-a). *Functional Inks - Nanopaint*. Acedido a 18 de outubro de 2020, em <https://nanopaint-tech.com/products/functional-inks/>
- Nanopaint\_Lda. (n.d.-b). *Home - Nanopaint*. Acedido a 1 de março de 2021, em <https://nanopaint-tech.com/>
- Nanopaint\_Lda. (2017). *Technical Data Sheet PR-2 Ink*. 2–4.
- Nanopaint\_Lda. (2020). *Technical Data Sheet Silver100NP Ink*. 4710.
- OBwald, E. (2020). *Flexible textile printed piezoresistive pressure sensors for smart textiles Master of Science - Relatório de trabalho da unidade curricular de Tecnologia e Produtos Emergentes*.
- Pereira, G. (n.d.). *Curso Têxtil Em Malharia E Confecção Módulo 2 Introdução À Tecnologia Têxtil*. De, G., Pereira, S. (n.d.). *CURSO TÊXTEL EM MALHARIA E CONFECÇÃO MÓDULO 2 INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA TÊXTEL*. abnt., abnt.
- Possanzini, L., Tessarolo, M., Mazzocchetti, L., Campari, E. G., & Fraboni, B. (2019). Impact of Fabric Properties on Textile Pressure Sensors Performance. *Sensors (Switzerland)*, 1–15.
- Protechnic. (2018). *Technical data sheet UT1 net*. 33(0), 30178.
- Shim, E. (2019). Coating and laminating processes and techniques for textiles. *Smart Textile Coatings and Laminates*, 11–45.
- Statex. (n.d.). *Shieldex® Bremen PW*.
- Steren. (n.d.). *Hoja conductiva tipo Velostat Steren Tienda en Línea*. Acedido a 17 de outubro de 2020, em <https://www.steren.com.mx/hoja-conductiva-tipo-velostat.html>
- Valle-Lopera, D. A., Castaño-Franco, A. F., Gallego-Londoño, J., & Hernández-Valdivieso, A. M. (2017). Test and fabrication of piezoresistive sensors for contact pressure measurement. *Revista Facultad*

*de Ingenieria*, 2017(82), 47–52.

Van Langenhove, L., Hertleer, C., Westbroek, P., & Priniotakis, J. (1989). *Textile sensors for healthcare*. 106.

Vernon-Parry, K. D. (2000). ScanningElectronMicroscopy: An introduction. *III-Vs Review*, 13(4), 40–44.

Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2007). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 1–40.

Zhou, Z., Li, Y., Cheng, J., Chen, S., Hu, R., Yan, X., Liao, X., Xu, C., Yu, J., & Li, L. (2018). Supersensitive all-fabric pressure sensors using printed textile electrode arrays for human motion monitoring and human-machine interaction. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(48), 13120–13127.