

**Mestrado Integrado em Engenharia Química**

***Estudo e integração de sensores/biossensores em  
substratos têxteis para deteção de  
biomarcadores de stress físico e emocional***

**Dissertação de Mestrado**

de

**Ricardo José Abreu Neto**

**Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação**

realizado em

**CITEVE - Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal**



**Orientador na FEUP: Prof. Manuel Fernando Pereira**

**Coordenador no CITEVE: Eng<sup>a</sup> Gilda Santos**



**Departamento de Engenharia Química**

**Fevereiro de 2020**

## Agradecimentos

As minhas primeiras palavras de agradecimento vão para todos os colaboradores do CITEVE, pela forma como me receberam e trataram desde o meu primeiro dia. À Engenheira Gilda Santos, orientadora desta dissertação, agradeço pelo apoio e conselhos dados durante esta etapa do meu percurso académico. À Engenheira Augusta Silva e à Engenheira Cristina Oliveira deixo um agradecimento pela disponibilidade e por todo o conhecimento partilhado. Às pessoas da Planta Piloto de Estruturas Têxteis e Confeção, a Ana Florinda, a Juliana e a Conceição Novais tenho de agradecer toda a ajuda e dúvidas que me esclareceram. Agradeço também ao Flávio Ferreira por todos os desenhos que fez. Tenho ainda de agradecer a todos os colaboradores do Departamento de Tecnologia e Engenharia com quem tive o prazer de conviver todos os dias, em especial aos meus colegas de gabinete por me terem aturado nos meus piores e melhores dias. Agradeço também a toda a equipa do Laboratório de Física Têxtil, sem a qual a obtenção de alguns dos resultados deste trabalho não seria possível.

Ao Professor Fernando Pereira, orientador desta dissertação por parte da FEUP, fico agradecido por todo os esclarecimentos prestados e todas as suas sugestões ao longo dos trabalhos realizados.

Agradeço à Doutora Cristina Cordas da Universidade Nova de Lisboa por todas as dúvidas que esclareceu. Tenho também de agradecer ao Miguel Ribeiro e à Daniela Campanhã do CENTI pela sua disponibilidade e por me terem ajudado no desenvolvimento do projeto.

Agradeço aos meus amigos, principalmente ao Marcelo e à Luísa, por todo o apoio e ajuda que me deram durante esta etapa.

Por último, as pessoas que merecem o meu maior agradecimento, a minha família. Um agradecimento muito especial aos meus pais e primos por me terem ajudado durante todo o meu percurso académico.

## Agradecimentos institucionais

O Professor Manuel Fernando R. Pereira, orientador desta dissertação, é membro integrado do Laboratório Associado LSRE-LCM financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): Financiamento Base UIDB/50020/2020.

O projeto no qual a presente dissertação se insere foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia Projeto PTDC / SAU-SOC / 28390/2017 (STRESSENSE).

## Resumo

Nos últimos anos, o estudo do stress tem passado pelo uso de critérios objetivos, como a análise de biomarcadores presentes nos fluidos corporais, permitindo assim um diagnóstico e posterior tratamento mais individualizado. Os têxteis inteligentes apresentam-se como uma boa alternativa de se ter sistemas de monitorização da saúde do utilizador que são impercetíveis. Com isto em mente, foi elaborada uma prova de conceito para uma peça de vestuário para posterior integração de sensores eletroquímicos que pretendem detetar a presença de biomarcadores de stress presentes no suor.

De modo a servir como substrato do sensor, o que foi pensado inicialmente seria ter algum material têxtil como substrato do sensor. Foram preparados vários substratos de materiais têxteis combinados: malha PA+EA e felpo, malha PA+EA e malha PES, malha PA+EA e malha algodão, malha PA+EA e não-tecido viscose, malha algodão e felpo, malha algodão e não-tecido viscose, malha algodão e malha PES, não-tecido viscose e felpo e não-tecido viscose e malha PES. Os substratos preparados foram estudados de modo a avaliar se seria possível estampar uma tinta condutora nestes e qual a sua capacidade de absorção de soluções de suor simulado. Os melhores substratos têxteis para a estampagem foram o não-tecido viscose e a malha algodão, sendo que o substrato com maior capacidade de absorção foi o de não-tecido viscose e felpo.

Foram estudadas algumas alternativas para servirem de meio condutor do sinal entre o sensor e a placa de circuitos, nomeadamente fios condutores e tintas condutoras, pois são estas as opções mais usadas em têxteis inteligentes. Foram testados dois fios condutores costuráveis. Através dos testes realizados percebeu-se que o fio de cobre tem uma resistência elétrica baixa, o que é necessário num meio condutor, sendo que esta não variou ao fim de 40 lavagens. Já o fio PA revestido com prata não foi uma solução devido à grande variação da sua resistência.

Com a tinta de prata foram testadas duas formas de encapsulamento desta. Uma das formas foi o uso de filmes/membranas de encapsulamento. A *web* utilizada para aderir as membranas mostrou-se pouco eficaz na resistência a lavagens. No entanto, os filmes mostraram-se a melhor opção, pois a resistência elétrica variou pouco após as 40 lavagens. A outra alternativa estudada foi através do uso de transferes condutores que tiveram de ser desenhados e encomendados a uma empresa. Estes transferes tiveram um comportamento em relação às lavagens semelhante aos filmes testados. Avaliando a elasticidade de todos os substratos, verificou-se que os transferes têm maior elasticidade, principalmente devido à menor área de encapsulamento quando comparada com a dos filmes.

### Palavras Chave:

Têxteis inteligentes, Biomarcadores de stress, Sensores, Fios condutores, Tintas condutoras.



## Abstract

In recent years, the study of stress has been directed towards the use of objective criteria, such as the analysis of biomarkers present in body fluids, thus allowing a more individualized diagnosis and subsequent treatment. Smart textiles are a good way of having health monitoring systems that are imperceptible to the user. With this in mind, a proof of concept was elaborated for a garment for later integration of electrochemical sensors that intend to detect the presence of stress biomarkers present in sweat.

In order to serve as a substrate for the sensor, what was initially thought would be to have some textile material as the substrate of the sensor. Various combinations of textile materials were prepared: PA + EA mesh and terry cloth, PA + EA mesh and PES mesh, PA + EA and cotton mesh, PA + EA mesh and non-woven viscose, cotton mesh and terry cloth, cotton mesh and non-woven viscose, cotton mesh and PES mesh, non-woven viscose and terry cloth and non-woven viscose and PES mesh. The prepared substrates were studied in order to evaluate whether it would be possible to stamp a conductive ink directly on them and what is their absorption capacity for simulated sweat solutions. The best textile substrates for printing were the non-woven viscose and the cotton mesh, and the substrate with the greatest absorption capacity was the one composed by the non-woven viscose and the terry cloth.

Some alternatives were studied to serve as a signal-conducting medium between the sensor and the circuit board, namely conductive wires and conductive inks, as these are the most used options in smart textiles. Two sewn conductive threads were tested. Through the tests carried out it was noticed that the copper wire had the lowest electrical resistance, which is necessary in a conductive medium, and this did not vary after 40 washing cycles. The silver-coated PA wire was not a good solution due to the big variation in its resistance.

With the silver ink, two ways of encapsulating it were tested. One way was the use of encapsulation films/membranes. The web used to adhere the membranes proved to be ineffective in resisting the washing cycles. However, the films proved to be the best option, as the electrical resistance variation was small after 40 washing cycles. The other alternative studied was through the use of conductive transfers that had to be designed and ordered from a company. These transfers had a similar behavior in relation to the resistance to the washing cycles, similar to the tested films. It was also found that the transfers have greater elasticity, mainly due to the smaller area of encapsulation when compared to that of the films.

**Keywords:** Smart textiles, Stress biomarkers, Sensors, Conductive threads, Conductive inks.

## Declaração

Eu, Ricardo José Abreu Neto, declaro, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

*Ricardo Neto*

2 de fevereiro de 2020

# Índice

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução.....</b>                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento e Apresentação do Projeto .....                           | 1         |
| 1.2      | Apresentação da Empresa .....                                           | 1         |
| 1.3      | Contributos do Trabalho.....                                            | 2         |
| 1.4      | Organização da Tese .....                                               | 2         |
| <b>2</b> | <b>Contexto e Estado da Arte .....</b>                                  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Os efeitos do stress na saúde .....                                     | 5         |
| 2.2      | Têxteis inteligentes .....                                              | 5         |
| 2.2.1    | Sensores .....                                                          | 6         |
| 2.2.2    | Recolha, interpretação e comunicação de dados .....                     | 7         |
| 2.2.3    | Fonte de energia .....                                                  | 7         |
| 2.2.4    | Têxteis inteligentes na área militar .....                              | 8         |
| 2.3      | Sensores de suor .....                                                  | 8         |
| 2.4      | Métodos de integração de sensores e circuitos em substrato têxtil ..... | 12        |
| 2.4.1    | Fios condutores costurados/bordados.....                                | 13        |
| 2.4.2    | Tintas condutoras .....                                                 | 14        |
| 2.5      | Testes de conforto.....                                                 | 16        |
| 2.5.1    | Gestão de humidade.....                                                 | 17        |
| 2.5.2    | Testes de resistência térmica e evaporativa.....                        | 17        |
| <b>3</b> | <b>Materiais e Métodos .....</b>                                        | <b>19</b> |
| 3.1      | Materiais .....                                                         | 19        |
| 3.1.1    | Substratos têxteis.....                                                 | 19        |
| 3.1.2    | Fios condutores.....                                                    | 19        |
| 3.1.3    | Tintas condutoras .....                                                 | 19        |
| 3.1.4    | Filmes/membranas de encapsulamento .....                                | 20        |
| 3.1.5    | Adesivos.....                                                           | 20        |
| 3.1.6    | Soluções de suor simulado.....                                          | 20        |

|            |                                                                                                                                                |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.2</b> | <b>Métodos para preparação de amostras.....</b>                                                                                                | <b>21</b> |
| 3.2.1      | Estampagem do substrato do sensor.....                                                                                                         | 21        |
| 3.2.2      | Secagem e cura.....                                                                                                                            | 21        |
| 3.2.3      | Laminação.....                                                                                                                                 | 22        |
| 3.2.4      | Costuras dos fios condutores.....                                                                                                              | 23        |
| 3.2.5      | Impressão de circuitos nos filmes/membranas .....                                                                                              | 24        |
| <b>3.3</b> | <b>Métodos de avaliação do desempenho.....</b>                                                                                                 | <b>24</b> |
| 3.3.1      | Solidez às lavagens .....                                                                                                                      | 24        |
| 3.3.2      | Capacidade de absorção dos substratos do sensor .....                                                                                          | 25        |
| 3.3.3      | Deteção de sinal dos substratos do sensor .....                                                                                                | 25        |
| 3.3.4      | Ensaio de avaliação da extensão dos substratos com circuito condutores .....                                                                   | 25        |
| <b>4</b>   | <b>Resultados e Discussão.....</b>                                                                                                             | <b>27</b> |
| 4.1        | Proposta de engenharia do produto.....                                                                                                         | 27        |
| 4.2        | Camisola .....                                                                                                                                 | 29        |
| 4.3        | Sensor .....                                                                                                                                   | 31        |
| 4.3.1      | Substrato do sensor .....                                                                                                                      | 31        |
| 4.3.2      | Testes de deteção de sinal dos substratos do sensor .....                                                                                      | 36        |
| 4.4        | Circuitos condutores .....                                                                                                                     | 37        |
| 4.4.1      | Fios condutores costurados.....                                                                                                                | 37        |
| 4.4.2      | Filmes/membranas de encapsulamento .....                                                                                                       | 39        |
| 4.4.3      | Transferes condutores .....                                                                                                                    | 39        |
| 4.4.4      | Testes de resistência dos circuitos condutores .....                                                                                           | 40        |
| <b>5</b>   | <b>Conclusões .....</b>                                                                                                                        | <b>45</b> |
| <b>6</b>   | <b>Avaliação do trabalho realizado.....</b>                                                                                                    | <b>47</b> |
| 6.1        | Objetivos Realizados .....                                                                                                                     | 47        |
| 6.2        | Apreciação Final .....                                                                                                                         | 47        |
| <b>7</b>   | <b>Referências .....</b>                                                                                                                       | <b>49</b> |
|            | <b>Anexo A - Transferes condutores desenvolvidos .....</b>                                                                                     | <b>55</b> |
|            | <b>Anexo B - Camisola em <i>seamless</i>: estrutura, dimensões e ensaios de medição da resistência evaporativa e avaliação da secagem.....</b> | <b>57</b> |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Anexo C - Diferentes técnicas de voltametria.....</b>                                     | <b>63</b> |
| <b>Apêndice A - Equipamentos utilizados.....</b>                                             | <b>65</b> |
| <b>Apêndice B - Efeito das lavagens .....</b>                                                | <b>75</b> |
| <b>Apêndice C - Análise de custos de aplicação dos circuitos na camisola .....</b>           | <b>77</b> |
| <b>Apêndice D - Ensaios de avaliação da extensão dos substratos com circuitos condutores</b> | <b>79</b> |



## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1 - Esquema representativo de sensores eletroquímicos (amperimétricos, voltamétricos e potenciométricos) e colorimétricos (adaptado de [28]). Onde CE significa contra eléctrodo, WE eléctrodo de trabalho e RE eléctrodo de referência. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <i>9</i>  |
| <i>Figura 2 - Alguns exemplos de circuitos e componentes eletrónicos integrados em têxtil: a) Um cabo de fita em tecido com fios condutores [36]; b) LilyPad Arduino SimpleSnap [38]; c) Tecido condutor a servir de circuito com os componentes eletrónicos soldados à peça [37]. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <i>12</i> |
| <i>Figura 3 - Fio de metal condutor integrado num fio base (Figura à esquerda); Fio revestido com uma tinta condutora (Figura no centro); Fio constituído por multifilamentos de um metal (Figura à direita) (Adaptado de [39]). ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <i>13</i> |
| <i>Figura 4 - Exemplos do uso de fios condutores costurados/bordados em têxteis inteligentes. a) Sensores bordados [35]; b) Malha condutora feita com fios condutores [43]; c) Sensores e placa com microcontrolador própria para uso em substratos têxteis, onde os circuitos são constituídos por fios condutores costurados [42]. ....</i>                                                                                                                                                                                                                               | <i>14</i> |
| <i>Figura 5 - Exemplos do uso de tintas condutoras em têxteis inteligentes. Sensores impressos num substrato têxtil [24]; Tecido de algodão condutor após a aplicação de uma tinta condutora por foulardagem [45]; Circuito eléctrico encapsulado em TPU e laminado num substrato têxtil [46]. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                     | <i>15</i> |
| <i>Figura 6 - Distribuição da tensão plástica numa linha condutora com a forma de ferradura de cavalo [47]. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <i>16</i> |
| <i>Figura 7 - Design com o uso de uma cinta de utilidades militar para transporte do PCB e bateria. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>28</i> |
| <i>Figura 8 - Design com uso de uma caixa removível com o PCB e a bateria. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <i>28</i> |
| <i>Figura 9 - Mapas de distribuição de temperatura corporal (os dois manequins à esquerda) e regiões de transpiração (os dois manequins à direita) usados para elaboração de roupas respiráveis, onde as cores mais escuras representam zonas de maior temperatura e transpiração, respetivamente [48]. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                            | <i>29</i> |
| <i>Figura 10 - Design da camisola em seamless onde as zonas a cinzento escuro são zonas que exigem maior respirabilidade. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>30</i> |
| <i>Figura 11 - Design da camisola em seamless com as diferentes zonas que a compõem. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <i>31</i> |
| <i>Figura 12 - Retângulo de <math>5 \times 1 \text{ cm}^2</math> estampado no substrato composto pela malha PA+EA e não-tecido viscose. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <i>32</i> |
| <i>Figura 13 - Voltamogramas diferenciais representativos dos ensaios obtidos com suor artificial utilizando a técnica DPV em eléctrodos de carbono/MWCNT em contacto com o substrato da malha PA+EA e felpo após absorção da solução. A linha vermelha corresponde aos ensaios na presença do suor artificial com biomarcadores, a linha tracejada cinza corresponde aos ensaios na presença do suor artificial sem biomarcadores, de modo a servir de controlo, e a linha preta tracejada vertical delimita a gama útil de potenciais utilizados nestes ensaios. ....</i> | <i>36</i> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 14 - Imagens das costuras por a) ponto preso, b) zig-zag e c) ponto cadeia com o fio de cobre onde à esquerda está a parte superior da costura e nas figuras à direita está a parte inferior da costura, ou seja, onde o fio condutor está. ....</i>                                    | <i>38</i> |
| <i>Figura 15 - Imagens das costuras por a) ponto preso com o fio condutor na agulha, b) ponto preso com o fio condutor na canela, c) zig-zag com o fio condutor na canela e d) zig-zag com o fio condutor na agulha. Estas costuras foram feitas com o fio PA. ....</i>                           | <i>38</i> |
| <i>Figura 16 - Botões snap aplicados na membrana 1 aderida à malha com a web. ....</i>                                                                                                                                                                                                            | <i>39</i> |
| <i>Figura 17 - Transfere condutores aplicados na malha PA+EA com botões snap nas extremidades. Na figura em cima está o transfere das costas e na figura em baixo o transfere da frente da camisola. ...</i>                                                                                      | <i>40</i> |
| <i>Figura 18 - Desenho dos transferences condutores desenvolvidos para servir de circuito na parte frontal da camisola. ....</i>                                                                                                                                                                  | <i>55</i> |
| <i>Figura 19 - Desenho dos transferences condutores desenvolvido para servir de circuito na parte traseira da camisola. ....</i>                                                                                                                                                                  | <i>56</i> |
| <i>Figura 20 - Camisola em seamless vestida em um manequim. ....</i>                                                                                                                                                                                                                              | <i>57</i> |
| <i>Figura 21 - Pormenor das estruturas da malha mais ventiladas. Na figura da esquerda a zona do ombro e na figura à direita a zona lombar da camisola. ....</i>                                                                                                                                  | <i>57</i> |
| <i>Figura 22 - Pormenor da estrutura de gestão de humidade na figura à esquerda. Pormenor da zona compressível na manga da camisola. ....</i>                                                                                                                                                     | <i>58</i> |
| <i>Figura 23 - Dimensões da camisola em seamless. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                        | <i>58</i> |
| <i>Figura 24 - Imagens da parte frontal da camisola obtidas de 10 em 10 min pela câmara termográfica.</i>                                                                                                                                                                                         | <i>61</i> |
| <i>Figura 25 - Imagens da parte traseira da camisola obtidas de 10 em 10 min pela câmara termográfica. ....</i>                                                                                                                                                                                   | <i>62</i> |
| <i>Figura 26 - Variação do potencial ao longo do tempo e respetivos voltamogramas obtidos com resposta para as diferentes técnicas de voltametria: a) Voltametria de pulso normal, b) Voltametria de pulso diferencial, c) Voltametria em escada e d) Voltametria de onda quadrada [29]. ....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 27 - Mesa de estampar utilizada na estampagem de retângulos <math>5 \times 1 \text{ cm}^2</math> nos materiais candidatos a substrato do sensor. ....</i>                                                                                                                               | <i>65</i> |
| <i>Figura 28 - Quadro de estamparia e vara de metal utilizados na estampagem dos candidatos a substratos do sensor. ....</i>                                                                                                                                                                      | <i>65</i> |
| <i>Figura 29 - Secadeira S.roque com tapete rolante utilizada na secagem após estampagem dos possíveis substratos do sensor. ....</i>                                                                                                                                                             | <i>66</i> |
| <i>Figura 30 - Secadeira Mathis utilizada no processo de cura após o processo de secagem dos materiais candidatos a substrato do sensor. ....</i>                                                                                                                                                 | <i>66</i> |
| <i>Figura 31 - Prensa macpi utilizada no processo de laminação para a criação dos candidatos a substrato do sensor, para a adesão dos filmes/membranas e dos transferences. ....</i>                                                                                                              | <i>67</i> |

|                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 32 - Mathis Labomat FA utilizada para a simulação das lavagens. ....</i>                                                                    | <i>68</i> |
| <i>Figura 33 - Máquina de costura Consew utilizada para a costura em ponto preso. ....</i>                                                            | <i>68</i> |
| <i>Figura 34 - Máquina de costura Juki utilizada para a costura em zig-zag. ....</i>                                                                  | <i>69</i> |
| <i>Figura 35 - Máquina de costura Willcox and Gibbs utilizada para a costura por ponto cadeia. ....</i>                                               | <i>69</i> |
| <i>Figura 36 - Máquina de estampar automática utilizada na estampagem dos circuitos em<br/>filmes/membranas de encapsulamento no CENTI. ....</i>      | <i>70</i> |
| <i>Figura 37 - Quadro de estampagem do circuito e racla que arrasta a tinta.....</i>                                                                  | <i>70</i> |
| <i>Figura 38 - Estufa utilizada na secagem das amostras estampadas no CENTI. ....</i>                                                                 | <i>71</i> |
| <i>Figura 39 - Máquina utilizada para aplicação dos botões snap nos circuitos impressos nos<br/>filmes/membranas e nos transferes condutores.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 40 - Balança de precisão utilizada nas pesagens dos candidatos a substrato do sensor. ....</i>                                              | <i>73</i> |
| <i>Figura 41 - Equipamento utilizado para o ensaio de avaliação da extensão dos substratos com meios<br/>condutores. ....</i>                         | <i>74</i> |
| <i>Figura 42 - Imagens do substrato composto pela membrana 2 e a cola web. À esquerda antes das<br/>lavagens e à direita após 40 lavagens. ....</i>   | <i>75</i> |



## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabela 1 - Exemplos de dispositivos de análise de moléculas presentes no suor .....</i>                                                                                                                                                                                                              | <i>11</i> |
| <i>Tabela 2 - Condições testadas de laminação da membrana 2 e a malha PA+EA com a web .....</i>                                                                                                                                                                                                         | <i>23</i> |
| <i>Tabela 3 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos <math>5 \times 1 \text{ cm}^2</math> com tinta condutora diretamente em um material absorvente .....</i>                                            | <i>32</i> |
| <i>Tabela 4 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos <math>5 \times 1 \text{ cm}^2</math> com tinta condutora na malha PA+EA laminada com os quatro materiais absorventes previamente testados .....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabela 5 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos <math>5 \times 1 \text{ cm}^2</math> com tinta condutora em dois materiais absorventes laminados .....</i>                                          | <i>34</i> |
| <i>Tabela 6 - Pesagens antes e após a absorção de uma solução e capacidade de absorção com os respetivos desvios padrão dos candidatos a substrato do sensor .....</i>                                                                                                                                  | <i>35</i> |
| <i>Tabela 7 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão referente às amostras com fios condutores costurados após várias lavagens.....</i>                                                                                                                                                   | <i>41</i> |
| <i>Tabela 8 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão depois da aplicação dos botões snap e após várias lavagens para os circuitos estampados nos filmes/membranas de encapsulamento .....</i>                                                                                             | <i>42</i> |
| <i>Tabela 9 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão depois da aplicação dos botões snap e após várias lavagens para os circuitos dos transferes condutores.....</i>                                                                                                                      | <i>43</i> |
| <i>Tabela 10 - Condições dos ensaios de medição da resistência evaporativa da camisola .....</i>                                                                                                                                                                                                        | <i>59</i> |
| <i>Tabela 11 - Resultados dos ensaios de resistência evaporativa total.....</i>                                                                                                                                                                                                                         | <i>59</i> |
| <i>Tabela 12 - Valores usados no cálculo da previsão dos custos da camisola com fios condutores .....</i>                                                                                                                                                                                               | <i>77</i> |
| <i>Tabela 13 - Valores usados no cálculo da previsão dos custos da camisola com filmes/membranas de encapsulamento.....</i>                                                                                                                                                                             | <i>78</i> |
| <i>Tabela 14 - Valores obtidos para a extensão e crescimento das amostras da malha PA+EA com os circuitos condutores .....</i>                                                                                                                                                                          | <i>79</i> |



## Notação e Glossário

|          |                                               |                                         |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $A$      | Área                                          | $m^2$                                   |
| $P_s$    | Pressão parcial de saturação do vapor de água | Pa                                      |
| $P_a$    | Pressão parcial do vapor de água              | Pa                                      |
| $H$      | Quantidade de calor transferido               | W                                       |
| $R_{et}$ | Resistência evaporativa                       | $m^2 \text{ Pa } W^{-1}$                |
| $R_t$    | Resistência térmica                           | $m^2 \text{ } ^\circ C \text{ } W^{-1}$ |
| $T_s$    | Temperatura da amostra                        | $^\circ C$                              |
| $T_a$    | Temperatura do ar na câmara                   | $^\circ C$                              |

### Lista de Siglas

|         |                                                                          |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|
| AATCC   | American Association of Textile Chemists and Colorists                   |
| ASTM    | American Society for Testing and Materials                               |
| CEN     | Comité Europeu de Normalização                                           |
| CENTI   | Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes |
| CINAMIL | Centro de Investigação Desenvolvimento e Inovação da Academia Militar    |
| CITEVE  | Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal      |
| EA      | Elastano                                                                 |
| EN      | European Norm                                                            |
| ISO     | International Organization for Standardization                           |
| MMT     | Moisture Management Tester                                               |
| NP      | Norma Portuguesa                                                         |
| PA      | Poliamida                                                                |
| PCB     | Printed Circuit Board                                                    |
| PES     | Poliéster                                                                |
| PU      | Poliuretano                                                              |
| TPU     | Poliuretano Termoplástico                                                |

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

No século XXI, um dos maiores problemas que afetam a saúde é o stress, pois provoca doenças não só psicológicas, como depressão e ansiedade, mas também fisiológicas, principalmente devido ao enfraquecimento do sistema imunitário. As consequências do stress podem ter também efeitos indiretos na saúde através do aumento da incidência de comportamentos prejudiciais, como por exemplo, má alimentação, falta de exercício físico, abuso de substâncias e pouco sono. O estudo do stress sempre foi muito focado em metodologias estatísticas baseadas apenas na análise de populações através de respostas a questionários. No entanto, nos últimos anos, a solução tem passado pelo uso de critérios mais objetivos, como a análise de biomarcadores presentes nos fluidos corporais, permitindo assim um diagnóstico e posterior tratamento mais individualizado [1].

Hoje em dia, o mercado dos têxteis inteligentes está em crescimento exponencial [2]. As áreas onde os têxteis inteligentes têm visto maior uso passam pelo vestuário de trabalho e pela saúde, onde a contínua monitorização do utilizador pode ajudar a detetar sinais preliminares de certas doenças [3]. Os têxteis inteligentes para a área da saúde são compostos normalmente por sensores que estão conectados a uma placa de circuitos, que é um dispositivo que recolhe, interpreta e comunica os dados, sendo que todos estes componentes eletrónicos têm de ser alimentados através de uma bateria [4].

A presente dissertação está inserida num projeto de investigação e desenvolvimento com o objetivo de desenvolver sensores/biossensores para a deteção e monitorização contínua de marcadores bioquímicos de stress físico e emocional através de uma metodologia não-invasiva, usando o suor como fluido alvo, e também uma solução que permita a sua integração em substratos têxteis. Este projeto tem o potencial de contribuir para a monitorização do estado físico e emocional dos seus utilizadores, neste caso da área militar, detetar precocemente doenças ou contribuir para tratamentos personalizados. O consórcio deste projeto é composto pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pelo CITEVE e pelo CINAMIL. Contudo, o papel do CITEVE, e consequentemente da investigação conduzida na presente dissertação, incide apenas na procura de uma solução para a integração dos sensores em substratos têxteis para atender aos requisitos de funcionalidade, conforto e ergonomia.

## 1.2 Apresentação da Empresa

O CITEVE, Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal, é uma organização privada sem fins lucrativos, sediado em Vila Nova de Famalicão, ativo desde 1989,

e com delegações comerciais no Brasil, Tunísia, Argentina, Paquistão, Chile e México, cuja principal missão é dar apoio às empresas do Sector Têxtil e do Vestuário. Para esse efeito o CITEVE tem disponíveis vários serviços como ensaios laboratoriais, certificação de produtos, consultoria técnica e tecnológica, I&D+inovação, formação, moda e design [5].

### **1.3 Contributos do Trabalho**

No presente trabalho pretendeu-se criar uma primeira prova de conceito de uma camisola para posterior integração de sensores. Para tal foram avaliados substratos têxteis para servirem como substrato de um sensor para deteção de biomarcadores de stress físico e emocional, bem como qual a melhor opção como circuito elétrico presente na camisola, comparando técnicas que utilizam fios condutores com técnicas que utilizam tintas condutoras.

Grande parte do trabalho realizado na presente dissertação foi realizado por mim, nas instalações do Departamento de Tecnologia e Engenharia do CITEVE, desde a preparação das amostras, métodos de análise e de avaliação do desempenho das amostras. Mais concretamente, na Planta Piloto de Tinturaria e Estamparia e na Planta Piloto de Estruturas Têxteis e Confeção. Contudo, os ensaios de avaliação da extensão dos circuitos condutores foram realizados no Laboratório de Física Têxtil também no CITEVE.

Os testes de deteção de sinal através dos substratos do sensor foram realizados na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A impressão de circuitos em filmes/membranas de encapsulamento foi realizada no Laboratório de Química do CENTI, onde pude acompanhar a impressão. Os transferes condutores foram encomendados a uma empresa especialista nesta área denominada Tecpress, onde, infelizmente não acompanhei o seu desenvolvimento.

### **1.4 Organização da Tese**

A presente dissertação está dividida em seis capítulos cuja descrição se encontra nos parágrafos seguintes.

No capítulo 1 - Introdução está exposto qual o tema do trabalho desenvolvido nesta dissertação, quais os seus objetivos, uma pequena apresentação do centro tecnológico onde esta foi realizada e ainda uma breve descrição da organização da tese.

O capítulo 2 - Contexto e Estado da Arte contém uma descrição dos conceitos mais importantes e que foram utilizados para a elaboração da presente dissertação. Neste capítulo estão também apresentados alguns desenvolvimentos existentes até ao momento na área dos têxteis inteligentes.

No capítulo 3 - Materiais e Métodos são descritos todos os materiais utilizados no decorrer dos trabalhos realizados, bem como todos os processos necessários para preparação de amostras e avaliação do desempenho destas.

O capítulo 4 - Resultados e Discussão foi dividido em quatro subcapítulos. No primeiro é descrita uma proposta de engenharia do produto. Os três subcapítulos seguintes descrevem com mais detalhe cada uma das partes principais do produto, a camisola, o sensor e os circuitos condutores. Em todos estes subcapítulos foram apresentados os resultados obtidos e uma discussão acerca destes.

No capítulo 5 - Conclusões são tiradas as principais ilações de toda a análise apresentada e discutida no capítulo anterior.

O capítulo 6 - Avaliação do Trabalho Realizado apresenta uma apreciação final de todo o projeto, na qual se discute a concretização dos objetivos, onde estão também expostas algumas das limitações que ocorreram.



## 2 Contexto e Estado da Arte

### 2.1 Os efeitos do stress na saúde

O stress pode ser definido como um estado de ameaça (real ou imaginária) à homeostasia, que é provocado por um “stressor” psicológico, fisiológico ou ainda dependente do meio ambiente. De modo a responder ao stress, o cérebro ativa uma resposta adequada denominada de “reação de luta ou fuga”. Esta reação é caracterizada por certas mudanças internas como um aumento da atenção e vigilância inibindo certas funções vegetativas como os sistemas que regulam o crescimento, a reprodução e o sistema imunitário. Existem ainda algumas mudanças fisiológicas como o aumento do ritmo cardíaco, da pressão arterial e respiração de modo a redirecionar o oxigénio e nutrientes para os órgãos mais importantes para lidar com o stress. Durante esta resposta ao stress descrita acima são inibidas algumas funções que são importantes para a sobrevivência do indivíduo e da espécie a longo prazo, mas que oferecem baixas hipóteses de sobrevivência no caso de uma possível situação de vida ou morte [6].

O stress provoca doenças não só psicológicas, como depressão e ansiedade, mas também fisiológicas, principalmente devido ao aumento de sensibilidade a infeções e inflamações. Existem estudos que comprovam que o stress pode agravar várias doenças como o cancro, doença devido ao HIV e doenças inflamatórias intestinais. O stress também pode causar aumentos permanentes em certas atividades do sistema nervoso simpático, incluindo a pressão arterial e frequência cardíaca, aumentando assim o risco de doenças cardiovasculares. Pode ter também efeitos indiretos na saúde através do aumento da incidência de comportamentos prejudiciais, como por exemplo, má alimentação, abuso de substâncias e pouco sono [1].

O estudo do stress sempre foi muito focado em metodologias estatísticas baseadas apenas na análise de populações através de respostas a questionários, o que oferece pouca ou nenhuma aplicação direta aos pacientes. No entanto, nos últimos anos, a solução tem passado pelo uso de critérios mais objetivos, como a análise de biomarcadores presentes nos fluidos corporais, permitindo assim um diagnóstico e posterior tratamento mais individualizado [1]. Uma das alternativas para se ter sistemas de monitorização da saúde do utilizador de forma não invasiva e que são impercetíveis são os têxteis inteligentes.

### 2.2 Têxteis inteligentes

Hoje em dia, tanto as tecnologias como o mercado dos têxteis inteligentes estão em crescimento exponencial [2]. Continuam a surgir novos produtos com novas funcionalidades, desde camisolas com um sistema de ar condicionado [7], camisolas para monitorizar a saúde de

atletas [8] ou ainda casacos com airbag incorporado [9]. Os têxteis inteligentes eletrônicos (em inglês são denominados por *eletronic textiles* ou *e-textiles*) são peças de tecido ou malha que apresentam componentes e circuitos eletrônicos integrados de modo a proporcionar novas características à peça, tentando manter, na medida do possível, o conforto desta. Estes componentes e circuitos, ao estarem integrados na peça, tornam-se pouco visíveis, não suscetíveis de se emaranharem ou ficarem presos em objetos ao redor e ainda resistentes a lavagens [4].

Os têxteis inteligentes são compostos normalmente por sensores que estão conectados a uma placa de circuitos, que é um dispositivo que recolhe, interpreta e comunica os dados. Todos estes componentes eletrônicos têm de ser alimentados através de uma bateria que pode ser recarregável por métodos convencionais ou então através da recolha de energia do utilizador ou do meio ambiente [4]. Devido a todas estas características os têxteis inteligentes são utilizados em diversas áreas principalmente para comunicação e na monitorização da saúde, essencialmente em atletas e profissões de alto risco, como no caso de militares, onde a continua monitorização do utilizador pode ajudar não só a melhorar o seu desempenho, mas também a detetar sinais preliminares de certas doenças [3].

### 2.2.1 Sensores

Um sensor pode ser definido como um dispositivo que recebe um estímulo não-elétrico e responde com um sinal elétrico, que pode ser de voltagem, corrente ou carga. Um sensor não consegue funcionar sozinho. Faz sempre parte de um sistema complexo que pode incorporar muitos outros sensores, condicionadores de sinal, processadores de sinal, dispositivos de análise e aquisição de dados e atuadores. Pode funcionar como “input” de um dispositivo de modo a detetar variações de estímulos externos e avisar o sistema sobre essas mudanças, ou alternativamente, pode monitorizar o próprio dispositivo de modo a detetar problemas internos. O sensor perfeito responde apenas e só à propriedade que se pretende medir, não influenciando essa propriedade [10].

Um sensor apresenta várias características que permitem ao utilizador avaliar o desempenho do sensor para perceber a veracidade dos valores obtidos por este. A precisão, que na realidade significa imprecisão, corresponde ao maior desvio do valor representado pelo sensor em relação ao valor real. Normalmente é representado em percentagem após o valor medido pelo sensor, por exemplo  $5\text{ V} \pm 0,5\%$ . A histerese é uma característica que não é desejada em sensores e corresponde à diferença nas curvas de resposta de um sensor quando, no mesmo ponto, esta tem valores diferentes quando se aproxima desse ponto por direções opostas. Isto significa que, por exemplo, num sensor de temperatura o sensor responde com voltagens diferentes para o mesmo valor de temperatura quando a temperatura aumenta e quando diminui, passando por esse valor. Um erro comum é o erro da repetibilidade que está

relacionado com o facto de o sensor não responder com o mesmo sinal em ocasiões diferentes sob as mesmas condições. Um sensor tem de ser calibrado com frequência de modo a não comprometer a repetibilidade, pois existem vários fatores que podem influenciar o seu desempenho, como as condições de armazenamento, a temperatura e a pressão do meio ambiente [11].

### 2.2.2 Recolha, interpretação e comunicação de dados

Os sinais enviados pelos sensores têm de ser adquiridos, interpretados e enviados, preferencialmente por comunicação sem fios, para um computador ou um dispositivo móvel de modo a serem armazenados, sendo que, normalmente utilizam-se placas com microcontroladores. O programa a ser executado pela placa é elaborado num computador e posteriormente é enviado para a placa. Normalmente fabrica-se uma placa de circuitos (em inglês *printed circuit board* (PCB)) adequada à aplicação pretendida, adicionando os componentes eletrónicos que se pretende. Um PCB é uma placa que contém linhas condutoras e componentes eletrónicos soldados na placa que estão interligados, como microcontroladores, botões e resistências [12]. Existem placas com microcontroladores no mercado que são baratas, fáceis de utilizar e podem ser usadas em todo o tipo de projetos, sem custos adicionais para o utilizador, como o caso do Arduino [13]. Na última década desenvolveram-se também algumas placas com microcontroladores construídas para serem integradas em substratos têxteis pois resistem a lavagens e podem ser costuradas, sendo que os circuitos elétricos são compostos por fios de costura condutores [14].

### 2.2.3 Fonte de energia

O modo de alimentação de energia dos componentes dos têxteis inteligentes continua a ser um dos maiores desafios nesta área. Isto deve-se ao facto de a principal fonte de energia continuar a ser pilhas de lítio recarregáveis, que continuam a ter dimensões consideráveis para serem completamente integradas nos têxteis inteligentes, sendo que, normalmente, são conectadas à peça pelo utilizador. No sentido de ultrapassar este problema têm-se desenvolvido alternativas às baterias comuns através da implementação de métodos de recolha de energia do utilizador ou a partir do meio ambiente [4].

Swallow et al. (2008) desenvolveram um pequeno gerador de energia elétrica numas luvas onde transformavam a energia mecânica devido ao movimento das mãos em energia elétrica através do uso de materiais piezoelétricos flexíveis [15]. Um grupo de investigadores na China desenvolveu um painel que consegue transformar simultaneamente energia solar e mecânica em energia elétrica, que é posteriormente armazenada numa bateria de lítio [16]. Lee et al. (2016) desenvolveram uma estrutura têxtil capaz de produzir energia através da diferença de temperatura entre o utilizador e o meio ambiente [17]. Para que estes tipos de dispositivos de recolha de energia sejam utilizados em têxteis inteligentes, ou estes são

compostos por um sistema simples que utiliza pouca energia ou então os sistemas de recolha de energia têm de se tornar mais eficientes.

## **2.2.4 Têxteis inteligentes na área militar**

O uso de têxteis inteligentes pelos soldados pode ajudar imenso a melhorarem o modo como atuam nas suas missões, principalmente porque, na maior parte dos casos, têm de lidar com situações perigosas e imprevisíveis. As principais funcionalidades destes têxteis na área militar passam pela monitorização da saúde, a detecção de ameaças no meio ambiente, como a presença de gases nocivos, sistema de comunicação com o posto de comando e monitorização da localização dos soldados através de GPS [18].

Um grupo de investigadores do MIT desenvolveu um sensor químico de baixo custo com nanotubos de carbono que permite a detecção de gases tóxicos no meio ambiente e comunica sem fios que pode vir a ser integrado em uniformes militares [19]. Uma outra equipa de investigadores do MIT, em colaboração com a marinha americana, desenvolveu umas botas com sensores de carga integrados na sola que permitem medir a distribuição do peso do utilizador, de modo a melhorar a postura e a movimentação dos soldados no terreno [20]. A empresa Intelligent Textiles Limited desenvolveu vários projetos na área militar, entre eles o “e-jacket” que é um casaco com um computador incorporado, onde o teclado é composto pelo mesmo tecido do casaco, que permite facilitar a comunicação entre soldados no terreno e o posto de comando [21].

Na criação de têxteis inteligentes para militares é necessário ter em consideração o facto de os militares já transportarem muito peso, sendo que o primeiro passo na criação de têxteis inteligentes deve ser no sentido de reduzir o peso que transportam, ou pelo menos não o aumentar significativamente. Para que os soldados melhorem o seu desempenho em missão o conforto também não pode ser esquecido, tanto o conforto térmico, relacionado com a gestão do calor e da humidade, como o conforto relacionado ao movimento do corpo. Os têxteis inteligentes para a área militar têm de ter também uma elevada durabilidade de acordo com o tipo de local onde vai ocorrer a missão, ou seja, a peça poderá ser ligeiramente diferente caso a missão seja em ambiente quente ou frio [18].

## **2.3 Sensores de suor**

O sangue continua a ser o fluido corporal onde se pode obter mais informação sobre a saúde de um indivíduo, no entanto, as análises de sangue são bastante demoradas e requerem pessoas e equipamento especializados. De modo a ultrapassar este problema, nos últimos anos têm surgido cada vez mais estudos sobre sensores de suor [22]. O suor é o fluido corporal mais atrativo quando se pensa em monitorização não invasiva e em contínuo, sendo que também possui uma elevada quantidade de analitos, como o lactato [23], o ião sódio [24], a glucose

[25], o etanol [26], o cortisol [27], entre outros. Devido a estas características do suor e também devido aos recentes avanços e miniaturização de componentes eletrónicos, é possível, nos dias de hoje, qualquer pessoa usar um pequeno dispositivo que, através da análise da concentração de certas moléculas no suor, consiga tirar algumas conclusões sobre o estado de saúde do utilizador [22].

Para a detecção de biomarcadores no suor são usados essencialmente sensores colorimétricos ou eletroquímicos [28]. Na Figura 1 é possível ver uma representação desse tipo de sensores.

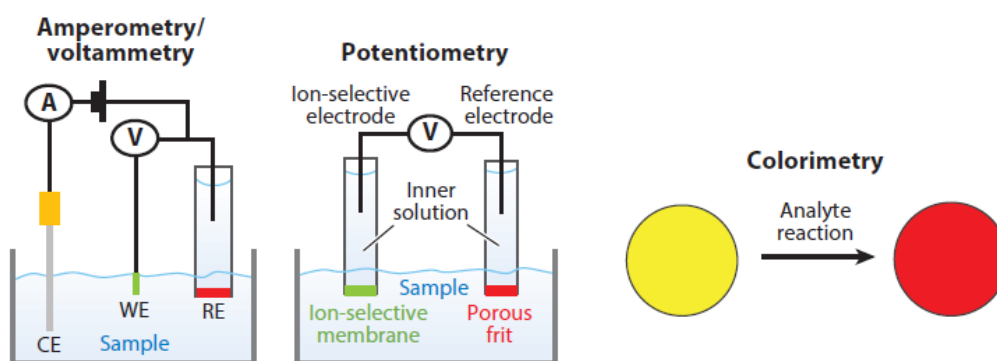


Figura 1 - Esquema representativo de sensores eletroquímicos (amperimétricos, voltamétricos e potenciométricos) e colorimétricos (adaptado de [28]). Onde CE significa contra eletrodo, WE eletrodo de trabalho e RE eletrodo de referência.

Os sensores colorimétricos baseiam-se na mudança de cor devido à presença do composto a ser analisado, sendo que esta cor é diferente para diferentes concentrações do analito. Um utilizador deste tipo de sensores rapidamente determina a presença do analito, sendo que a concentração do analito pode ser determinada através da análise da cor, comparando-a com a relação entre cor e concentração dada pelo fornecedor, tal como no papel indicador de pH. Estes sensores são mais qualitativos que quantitativos, tornando mais frequente o uso de sensores eletroquímicos quando se pretende obter os dados da concentração continuamente [28].

Os sensores eletroquímicos detetam a concentração de analitos através da medição do sinal elétrico entre dois eletrodos que é produzido quando o analito reage. Os sensores voltamétricos fazem variar o potencial ao longo do tempo no eletrodo de referência, registrando a corrente correspondente a cada potencial aplicado num gráfico denominado de voltamograma. Devido a esta variação de potencial, os sensores voltamétricos permitem a análise quantitativa de vários analitos que tenham um potencial de oxidação ou redução dentro da gama de potenciais aplicada. Estes sensores incluem um eletrodo de trabalho onde o analito reage, um eletrodo de referência para definir os potenciais no eletrodo de trabalho e um contra eletrodo que serve para detetar as mudanças na corrente que estão relacionadas com a

concentração do analito. A amperometria é um método voltamétrico que é adequado para a análise quantitativa de um único analito, trabalhando por isso a um potencial fixo, o potencial de redução ou oxidação desse analito. A potenciometria permite a detecção de eletrólitos. Um sensor potenciométrico normal inclui um eletrodo seletivo a um íão específico e um eletrodo de referência. O potencial do eletrodo de referência é fixo, enquanto que o do outro eletrodo varia de acordo com a concentração que é calculada pela equação de Nernst [29].

Apesar de o suor ter algumas vantagens na detecção de biomarcadores relacionados com certas doenças, este também apresenta alguns desafios. Para haver uma análise contínua de suor, tem de haver um fluxo contínuo de modo a alimentar o sensor com suor fresco. No entanto, o ritmo a que as glândulas sudoríparas excretam o suor varia para diferentes partes do corpo e para indivíduos diferentes [30]. Existe ainda alguma variação da composição do suor para diferentes zonas do corpo [31]. Não é claro como o consumo de certas comidas pode afetar a composição do suor, pode haver contaminação do suor ou do sensor devido a moléculas e bactérias presentes na pele e também ainda são necessários mais estudos de modo a perceber qual a relação entre alguns biomarcadores no suor e no sangue [32]. Na Tabela 1 estão representados alguns exemplos de sensores de suor, os analitos que deteta, o tipo de sensor e substrato e ainda o modo de aquisição do suor.

Tabela 1 - Exemplos de dispositivos de análise de moléculas presentes no suor

| Analitos              | Tipo de sensor  | Tipo de substrato | Aquisição de suor          | Referência |
|-----------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|------------|
| Glucose               | Colorimétrico   | Elastómero        | Canal microfluídico        | [25]       |
| Lactato               | Amperimétrico   | Elastómero        | Canal microfluídico        | [23]       |
| Cortisol              | Voltamétrico    | Elastómero        | Canal microfluídico        | [27]       |
| Iões sódio e potássio | Potenciométrico | Substrato têxtil  | Contacto direto com a pele | [24]       |
| pH e Iões cálcio      | Potenciométrico | Elastómero        | Contacto direto com a pele | [33]       |
| Etanol                | Amperimétrico   | Elastómero        | Contacto direto com a pele | [26]       |
| Cortisol e lactato    | Amperimétrico   | Elastómero        | Contacto direto com a pele | [34]       |
| Glucose e lactato     | Amperimétrico   | Substrato têxtil  | Contacto direto com a pele | [35]       |

Os sensores de suor podem estar em contacto direto com a pele ou então pode-se usar um pequeno reservatório de suor, onde este entra através de um canal microfluídico. Ao estar em contacto direto com a pele o sensor consegue analisar o suor em tempo real. No entanto existe uma mistura de suor “velho” com suor “novo” e o sensor pode impedir a normal evaporação do suor, caso tenha uma elevada resistência à transferência de calor e vapor de água [28]. Com o uso de um canal microfluídico com um pequeno reservatório de suor já é possível ter um fluxo contínuo de suor “novo”, no entanto o suor demora algum tempo até chegar aos elétrodos, isto é, o sensor não analisa o suor em tempo real, mas sim com um certo atraso [23].

Para os sensores analisarem o suor têm de estar colocados num substrato flexível, como um elastómero ou um substrato têxtil. Os elastómeros permitem a criação de substratos mais diversos onde se consegue, por exemplo, criar canais microfluídicos e um reservatório de suor onde este é analisado [23]. No entanto os elastómeros cobrem a pele não permitindo que, naquela zona da pele, o suor evapore normalmente. De modo a que a zona onde é feita a análise de suor seja mais respirável pode-se usar um tecido ou malha como substrato do sensor, mas em contrapartida apenas em tecido não se consegue fazer um reservatório de suor [24].

## 2.4 Métodos de integração de sensores e circuitos em substrato têxtil

Existem vários métodos de integração de sensores, circuitos e componentes eletrónicos na criação de têxteis inteligentes. Para servir de circuito, é possível usar um fio condutor que não pode ser costurado nem bordado sendo este adaptado para ser integrado em têxteis inteligentes. Uma destas formas é através do uso de um cabo de fita em tecido que é lavável, flexível e pode ser costurado à peça [36]. Para servir de circuito, outra possibilidade passa por colar pedaços de tecido condutor ou membrana condutora a um outro tecido que não conduza através de laminação, onde os componentes eletrónicos podem ser adaptados para serem costurados, podem ser soldados à peça ou ainda colados com uma cola condutora [37]. Através do uso de botões *snap* é possível ter vários componentes eletrónicos que sejam removíveis como é o caso do *LilyPad Arduino SimpleSnap* [38]. Na Figura 2 estão representados os exemplos supracitados.

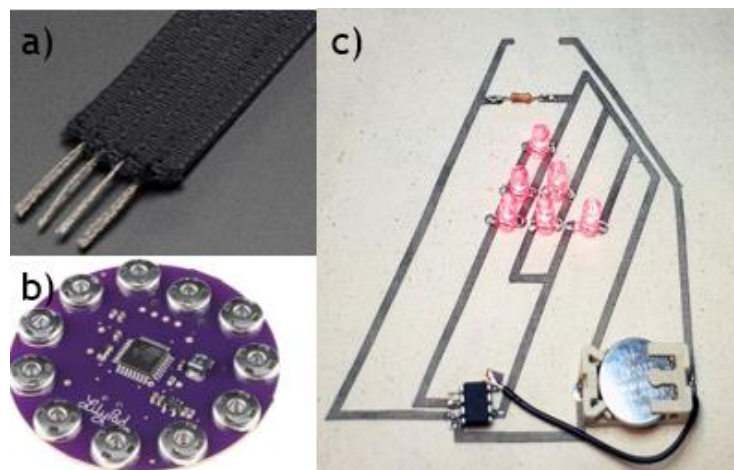


Figura 2 - Alguns exemplos de circuitos e componentes eletrónicos integrados em têxtil: a) Um cabo de fita em tecido com fios condutores [36]; b) *LilyPad Arduino SimpleSnap* [38]; c) Tecido condutor a servir de circuito com os componentes eletrónicos soldados à peça [37].

No entanto os métodos mais estudados nos últimos anos passam pelo uso de fios condutores que podem ser costurados ou bordados ou tintas condutoras estampadas na peça [4].

### 2.4.1 Fios condutores costurados/bordados

De modo a fabricar fios condutores existem três métodos principais. Pode-se optar por incorporar um fio condutor metálico com um fio comum, como algodão ou poliéster, para servir de base; pode-se construir um fio composto por multifilamentos metálicos, ou então revestir um fio já existente com uma tinta condutora [39]. Na Figura 3 estão exemplos de fios condutores para uso na indústria têxtil.

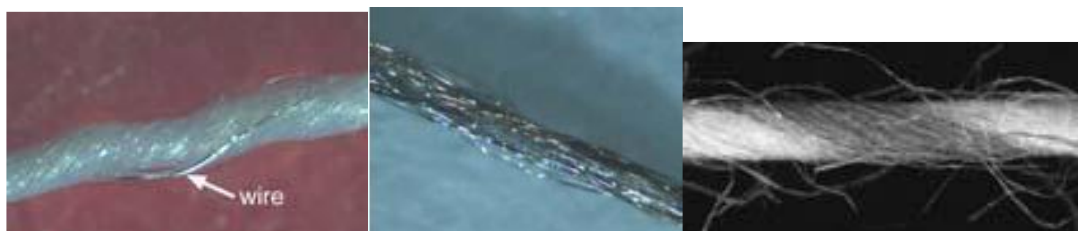


Figura 3 - Fio de metal condutor integrado num fio base (Figura à esquerda); Fio revestido com uma tinta condutora (Figura no centro); Fio constituído por multifilamentos de um metal (Figura à direita) (Adaptado de [39]).

Para incorporar fios de metal num fio de base utiliza-se uma máquina de fiação normal onde se coloca, para além do fio base, um fio de pequeno diâmetro de um metal bom condutor. O fio de costura pode ter o fio de metal no seu núcleo, sendo revestido pelo fio base como poliéster; o fio de metal pode estar enrolado à volta do fio base ou os dois fios podem estar dispostos como na Figura 3 [40]. O revestimento é feito num aparelho próprio para esse efeito onde se pode usar uma tinta com vestígios de um metal condutor ou então, alternativamente, uma tinta com polímeros condutores ou materiais condutores à base de carbono [41].

Estes fios condutores de eletricidade têm várias aplicações como bordar sensores [35], costurar sensores e placas com microcontroladores próprias para uso em substratos têxteis [42], para servirem como circuito elétrico ou ainda para fazer tecidos ou malhas condutores por tecelagem ou tricô, respetivamente [43]. Na Figura 4 estão representados exemplos de têxteis inteligentes com fios condutores costurados/bordados.

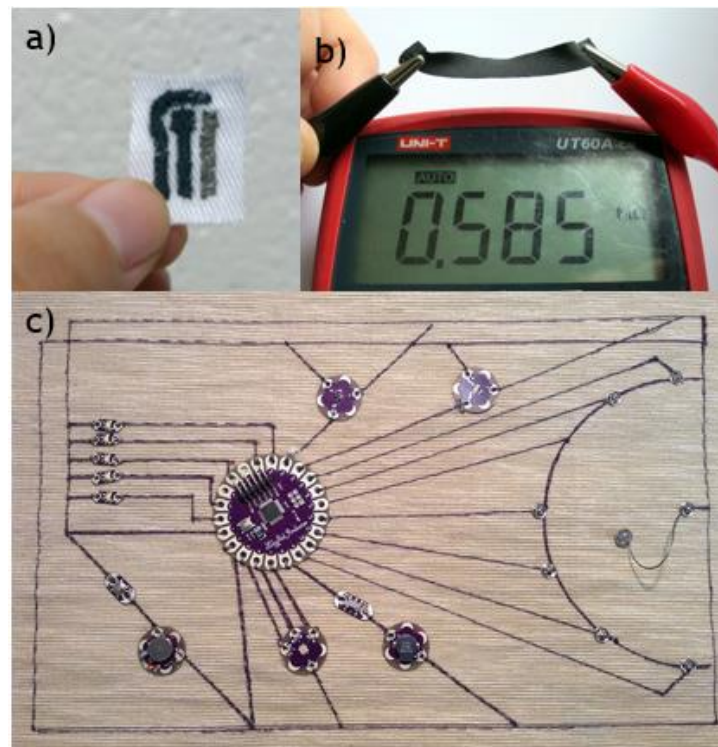


Figura 4 - Exemplos do uso de fios condutores costurados/bordados em têxteis inteligentes. a) Sensores bordados [35]; b) Malha condutora feita com fios condutores [43]; c) Sensores e placa com microcontrolador própria para uso em substratos têxteis, onde os circuitos são constituídos por fios condutores costurados [42].

As vantagens dos fios condutores metálicos são a sua resistência mecânica, o facto de serem biologicamente inertes e o facto de serem fáceis de utilizar, pois a sua forma de costura é igual à dos fios têxteis comuns. Os bordados e costuras com fios condutores permitem desenhos diferentes e com funcionalidades bastante variadas. No entanto, estes são mais pesados que a maioria dos fios mais comuns, tornando a peça mais rígida podendo ainda reduzir a elasticidade da peça. Têm também a desvantagem a nível estético de as costuras/bordados atravessarem ambas as faces de um substrato têxtil. Pode ocorrer a quebra deste tipo de fios e consequentemente a perda de condutividade elétrica ao serem utilizados em máquinas de fiação, de costura e de bordar [4].

#### 2.4.2 Tintas condutoras

As tintas condutoras são tintas com vestígios de um material bom condutor que pode ser um metal, como prata ou cobre, polímeros condutores ou materiais de carbono, como grafeno ou nanotubos. Estas tintas podem ser aplicadas em substratos têxteis por técnicas tradicionais como serigrafia ou estampagem, com quadros e digital [44].

Estas tintas são utilizadas principalmente como meio de condução da eletricidade, mas também já existem sensores estampados em têxteis inteligentes com este tipo de tintas [24]. É possível fabricar um tecido condutor fazendo algum tipo de revestimento de um tecido ou

malha com este tipo de tintas. Normalmente, este tipo de substrato têxtil é usado como um elemento flexível de aquecimento ou como sensor de atividade pois a sua resistência elétrica varia com as deformações do substrato [45]. As tintas condutoras, tipicamente, não são estampadas diretamente no substrato têxtil, sendo em vez disso impressas num polímero e encapsuladas com uma segunda camada desse polímero, ficando assim com um substrato com quatro camadas: o substrato têxtil, o polímero, a tinta condutora e novamente o polímero para encapsular. Este tipo de encapsulamento tem como vantagem tornar o circuito mais resistente em relação a lavagens e à abrasão [46]. Existem duas metodologias principais para o encapsulamento de tintas condutoras: o uso de filmes/membranas de encapsulamento e o uso de transferes condutores. Enquanto que com os filmes/membranas de encapsulamento a impressão é feita com o filme/membrana já laminado no substrato têxtil e só depois é que é encapsulado, com os transferes condutores a tinta já vem encapsulada num filme ou membrana, fazendo com que a laminação destes no substrato têxtil ocorra numa só fase.

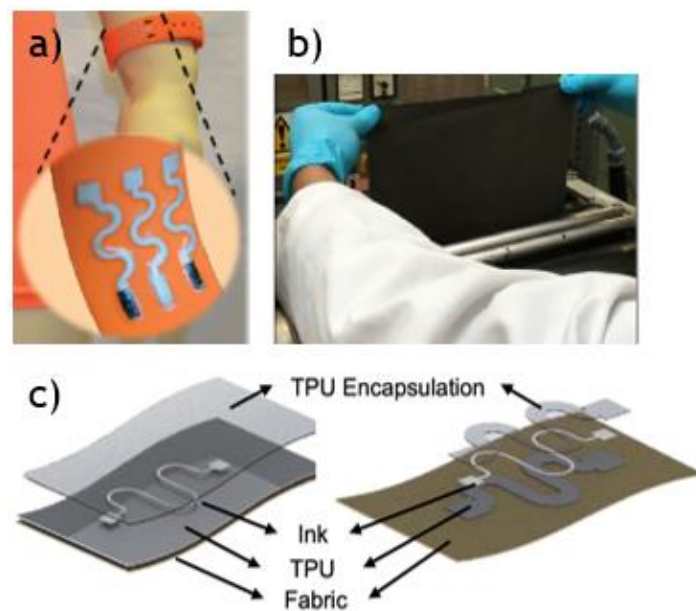


Figura 5 - Exemplos do uso de tintas condutoras em têxteis inteligentes. a) Sensores impressos num substrato têxtil [24]; b) Tecido de algodão condutor após a aplicação de uma tinta condutora por fouldagem [45]; c) Circuito elétrico encapsulado em TPU e laminado num substrato têxtil [46].

A impressão de tintas condutoras em substratos têxteis é uma técnica bastante utilizada devido à facilidade de aplicação da tinta, pois é estampada do mesmo modo que outras tintas e é a opção mais fina, leve e flexível para a integração de eletrónica em têxteis [39]. Contudo, estas tintas necessitam de uma proteção especial, sendo normalmente encapsuladas entre dois filmes/membranas à base de um polímero. Isto torna o processo bastante complicado devido à necessidade de otimizar vários parâmetros, que podem ser diferentes para os diferentes

materiais que são utilizados, relativos à impressão, como o número de passagens, e às laminações, como temperatura e pressão [46].

De modo a combater o problema de falta de elasticidade de têxteis inteligentes devido à presença de circuitos com tintas condutoras, Gonzalez et al. (2008) [47] avaliaram vários designs. Chegaram à conclusão que a melhor solução seria dispor os circuitos usando uma forma tipo ferradura de cavalo, como a representada na Figura 6. Com esta disposição de circuitos a peça continua a ter elasticidade sem comprometer a integridade do circuito.

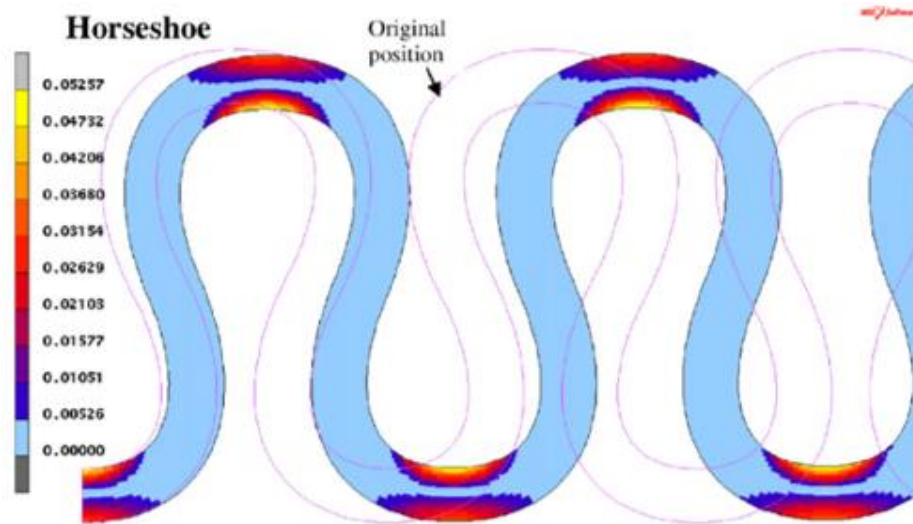


Figura 6 - Distribuição da tensão plástica numa linha condutora com a forma de ferradura de cavalo [47].

## 2.5 Testes de conforto

O conforto pode ser definido como a ausência de desconforto e dor e pode ser dividido em três categorias: conforto termofisiológico, conforto neurofisiológico, e conforto no movimento do corpo. O conforto termofisiológico está relacionado com a maneira como a roupa afeta a transferência de calor, de humidade e de ar, assim como a maneira como o corpo interage com a roupa. O conforto neurofisiológico está relacionado com a maneira como as pessoas se sentem quando a roupa entra em contacto com a pele. Por fim, o conforto de movimento do corpo está relacionado com a capacidade da roupa para permitir liberdade nos movimentos [3].

As propriedades relacionadas com a transferência de calor, de vapor de água e de humidade são as características mais importantes para o conforto de peças de vestuário. Na fase de desenho das peças é importante determinar as zonas que necessitam de maior respirabilidade através da análise de mapas de suor e de temperatura da pele [48]. Para determinar como uma amostra gere a humidade é utilizado um *moisture management tester* (MMT) [49] e para determinar as resistências térmica e evaporativa é utilizado o *skin model*

[50]. Os dois testes supramencionados servem para testar pequenas amostras de substratos têxteis de modo a selecionar o melhor. Quando se pretende saber qual o comportamento de alguma peça de vestuário em relação à gestão de humidade e determinação de resistências térmica e evaporativa utiliza-se o ensaio com um manequim térmico [51].

### 2.5.1 Gestão de humidade

No *moisture management tester* (MMT) realizam-se testes de modo a medir e avaliar o modo como o tecido ou malha responde à presença de humidade. Neste teste o tecido ou malha é colocado entre duas placas horizontais com sensores elétricos. Uma certa quantidade de uma solução de cloreto de sódio é inserida no centro da face superior da amostra de modo a ajudar a medir mudanças da condutividade elétrica. Deste teste obtém-se um gráfico da humidade em função do tempo para as faces superior e inferior e são determinados dez parâmetros que permitem caracterizar a capacidade da amostra de gerir a humidade [49]:

- Tempo de molhagem para as faces superior e inferior ( $WT_T$  e  $WT_B$ , respetivamente): o tempo, em s, até que as faces superior e inferior comecem a ficar húmidas a partir do momento em que o teste começa.
- Taxa de absorção para as faces superior e inferior ( $AR_T$  e  $AR_B$ , respetivamente): a velocidade média, em  $\% s^{-1}$ , com que a humidade é absorvida nas superfícies superior e inferior da amostra durante a fase inicial do teste.
- Raio de humidade máximo para as faces superior e inferior ( $MWR_T$  e  $MWR_B$ , respetivamente): o maior raio, em milímetros, onde a humidade chegou para cada uma das faces.
- Velocidade de espalhamento para as faces superior e inferior ( $SS_T$  e  $SS_B$ , respetivamente): velocidade, em  $mm s^{-1}$ , a que a humidade avança desde o ponto de aplicação da solução até ao raio de humidade máximo de cada uma das faces.
- Capacidade de transporte unidirecional ( $R$ ): a diferença entre as áreas das curvas de humidade em função do tempo das faces superior e inferior.
- Capacidade geral de gestão de humidade ( $OMMC$ ): índice, de 0 a 1, que representa a capacidade da amostra de transportar a humidade. Quanto mais próximo este índice estiver de 1 mais confortável é a amostra, sendo calculado através da equação (1).

$$OMMC = 0,25 \times AR_B + 0,5 \times R + 0,25 \times SS_B \quad (1)$$

### 2.5.2 Testes de resistência térmica e evaporativa

O teste *skin model* serve para simular a transferência de vapor de água e de calor que ocorre através de pequenas amostras de peças de vestuário, em estado estacionário, sendo que é possível também variar condições ambientais através de diferentes combinações de temperatura, humidade e velocidade do ar envolvente [50]. Este teste utiliza uma placa que é

capaz de aquecer e humidificar a amostra e encontra-se dentro de uma câmara climatizada. A norma internacional ISO 11092 especifica os métodos de determinação das resistências térmica e evaporativa em estado estacionário [52].

De modo a determinar a resistência térmica, a amostra é colocada na placa aquecida onde se recolhem informações sobre a temperatura da amostra ( $T_s$ ), em °C, a temperatura do ar dentro da câmara ( $T_a$ ), em °C, a humidade relativa, em %, e a quantidade de calor transferido para a amostra ( $H$ ), em W. A resistência térmica da amostra ( $R_t$ ) é então calculada pela equação (2) [50].

$$R_t = \frac{(T_s - T_a) \times A}{H} - R_{t0} \quad (2)$$

Onde  $A$  representa a área da amostra, em  $m^2$ , e  $R_{t0}$  representa a resistência térmica da placa, em  $m^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$ .

Para determinar a resistência evaporativa a placa é coberta com uma membrana que é permeável ao vapor de água e impermeável à água líquida. A água é alimentada à placa aquecida sendo que evapora e passa através da amostra na forma de vapor. O fluxo de calor que é necessário para manter a temperatura constante na placa está relacionado com a taxa de evaporação da água. A resistência evaporativa ( $R_{et}$ ) é então calculada pela equação (3) [50].

$$R_{et} = \frac{(P_s - P_a) \times A}{H} - R_{et0} \quad (3)$$

Onde  $P_s$  representa a pressão parcial de saturação do vapor de água, em Pa,  $P_a$  representa a pressão parcial do vapor de água, em Pa, dentro da câmara e  $R_{et0}$  representa a resistência evaporativa da placa, em  $m^2 \text{ Pa W}^{-1}$ .

O teste por manequim térmico é em tudo semelhante ao teste no *skin model*, sendo que a principal diferença é que se usa um manequim para vestir a peça de vestuário a ser testada. Este manequim tem a forma e tamanho de um humano adulto (cerca de 1,70 m de altura e 1,70  $m^2$  de área da superfície do corpo), está dividido em vários segmentos, onde as pernas e braços se podem mover durante o teste, sendo que se pode aquecer internamente cada segmento do manequim [51]. Neste teste também se utiliza uma câmara climática, com dimensões de pelo menos 2 m X 2 m X 2 m segundo a norma portuguesa NP 15831 - Vestuário - Efeitos Fisiológicos - Medição do isolamento térmico através de um manequim térmico [53], de modo a se poder regular a temperatura, humidade e velocidade do ar do meio envolvente.

## 3 Materiais e Métodos

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Substratos têxteis

**Malha PA+EA** é uma malha teia composta por poliamida (88 %) e elastano (12 %) com uma massa por unidade de superfície de  $290 \text{ g m}^{-2}$  para servir de substrato para testar as possibilidades para circuitos elétricos na camisola desenvolvida e também para a elaboração do substrato do sensor. Esta malha foi escolhida por ser semelhante em termos de composição e flexibilidade à malha da camisola desenvolvida.

Foram selecionados mais quatro substratos têxteis, todos bons absorventes para serem utilizados nos ensaios relacionados com o substrato do sensor. **Não-tecido viscose** é um não-tecido branco com uma massa por unidade de superfície de  $90 \text{ g m}^{-2}$ . **Felpo** é um tecido branco parecido com o felpo presente nas toalhas composto 100 % por algodão com uma massa por unidade de superfície de  $280 \text{ g m}^{-2}$ . A **malha PES** é uma malha branca composta por poliéster (PES) microfilamento, que lhe confere boa absorção, e PES amador para ter propriedades antibacterianas, pois este é utilizado em fraldas, com uma massa por unidade de superfície de  $215 \text{ g m}^{-2}$ . Por fim, a **malha algodão** é uma malha branca *jersey* fina com uma massa por unidade de superfície de  $140 \text{ g m}^{-2}$ .

#### 3.1.2 Fios condutores

Na presente dissertação foram testados dois fios condutores costuráveis. Um é um **fio de cobre** flexível revestido por um polímero de modo a fazer o isolamento, revestido também por um fio de poliéster preto enrolado à sua volta e um fio de poliamida para dar elasticidade. Este fio tem um diâmetro de cerca de 0,20 mm e resistência elétrica de  $4,2 \Omega \text{ m}^{-1}$ , segundo as informações do fornecedor. O **fio PA** é um fio de poliamida com um revestimento de prata. Este fio já tem um diâmetro mais pequeno e tem uma resistência elétrica de cerca de  $2,67 \Omega \text{ cm}^{-1}$ , segundo os fornecedores.

#### 3.1.3 Tintas condutoras

A **tinta de carbono** é uma tinta condutora preta que é uma dispersão aquosa à base de poliuretano e carbono, sendo que vem pronta para aplicação em racla ou por estampagem. A **tinta de prata** é uma tinta condutora à base de prata que, segundo os fornecedores, é flexível, tem boa resistência à abrasão e elevada condutividade elétrica.

### 3.1.4 Filmes/membranas de encapsulamento

Foram utilizados três filmes e duas membranas de modo a encapsular o circuito impresso com uma tinta condutora de prata. O circuito é impresso no filme/membrana após este ter sido laminado à malha PA+EA, sendo que, para encapsular o circuito, posteriormente o filme/membrana utilizado como base para a impressão é laminado por cima do circuito, ficando a tinta entre dois substratos poliméricos. A principal diferença entre os filmes e as membranas é que os filmes têm pelo menos duas camadas, uma onde a estampagem é feita e a outra contém adesivo para aderir ao substrato têxtil, enquanto que as membranas não contém adesivo. As membranas utilizadas têm também a vantagem de serem respiráveis. O **filme 1** é um filme de poliuretano termoplástico (TPU) com uma espessura de 125  $\mu\text{m}$  de cor beije que apresenta um papel de silicone como suporte. O **filme 2** é um filme também à base de TPU que é transparente e resistente a lavagens com uma espessura de 50  $\mu\text{m}$ . O **filme 3** é composto por poliuretano (PU), é transparente e apresenta uma espessura de 25  $\mu\text{m}$ . As membranas utilizadas foram a **membrana 1** e a **membrana 2**, ambas à base de polietileno e ambas transparentes.

### 3.1.5 Adesivos

Para as laminações dos substratos do sensor foi usada uma **cola por pontos** de modo ao substrato se manter permeável à água. Esta cola tem uma massa por unidade de superfície de cerca de 20  $\text{g m}^{-2}$ , é leve e flexível. Para a adesão das membranas de encapsulamento foi utilizada uma **web** que é à base de copoliéster, é branca, tem uma massa por unidade de superfície de 48  $\text{g m}^{-2}$  e boa resistência às lavagens para temperaturas baixas, isto é, até 60 °C.

### 3.1.6 Soluções de suor simulado

As soluções de suor ácido e alcalino simulado utilizadas nos testes de determinação da capacidade de absorção foram preparadas nos laboratórios do CITEVE, segundo a norma NP EN ISO 105-E04:2013 - Têxteis; Ensaio de solidez dos tintos; Parte E04: Solidez dos tintos ao suor [54]. A solução de suor alcalino é composta por mono clorohidrato de L-histidina, cloreto de sódio, hidrogenofosfato de di-sódio di-hidratado, onde é utilizada uma solução de hidróxido de sódio 0,1 M de modo a ficar com um pH de cerca de 8. A solução de suor ácido é composta por mono clorohidrato de L-histidina, cloreto de sódio, Di-hidrogenofosfato de sódio di-hidratado, onde é utilizada uma solução de hidróxido de sódio 0,1 M de modo a ficar com um pH de cerca de 5,5. Em ambas as soluções, os reagentes utilizados são dissolvidos em água destilada até perfazer 1 L.

A solução de suor usada para a detecção do sinal obtido através dos substratos do sensor é uma base tampão com fosfato e cloreto de sódio, com concentração de 86 mM e 18 mM, respetivamente, pH 7,02 e uma concentração  $10^{-5}$  M de vários biomarcadores de stress. A solução é constituída pelos seguintes biomarcadores: cloreto de acetilcolina, adenosina,

creatinina, D-(+)glucose, hidrocloreto de dopamina, epinefrina, cortisol, monohidrocloreto de L-arginina, L-ácido ascórbico, L-ácido glutâmico, L-glutamina, L-histidina HCl, L-isoleucina, L-leucina, L-lisina, L-fenilalanina, L-triptofano, L-tirosina, norepinefrina, hidrocloreto de serotonina, DL-lactato de sódio e ascorbato de sódio.

## **3.2 Métodos para preparação de amostras**

### **3.2.1 Estampagem do substrato do sensor**

Na estampagem faz-se um tingimento localizado de um substrato têxtil através do uso de quadros de estamparia com diferentes padrões disponíveis. Não havendo disponível o padrão pretendido, utilizou-se uma folha de papel onde foi recortado este padrão. Na mesa de estampar plana usada colocou-se o substrato têxtil em baixo, em seguida a folha de papel com o padrão recortado e depois o quadro de estamparia. Em cima do quadro estava a vara metálica, que é controlada pelo utilizador através de um magneto que se encontra por baixo da superfície onde a amostra e o quadro estão pousados. A tinta de carbono foi colocada no quadro perto da vara metálica. Em seguida, com o magneto ativo o utilizador move a vara na direção da amostra e, quando a tinta tiver passado completamente o padrão desejado, desliga-se o magneto, move-se a vara para o outro lado da tinta, liga-se o magneto e move-se novamente a vara na direção oposta ao passo anterior, ou seja, a vara passa novamente por cima da amostra. No caso da mesa utilizada, a intensidade do magneto é variável, numa escala de 1 a 5, e podem-se fazer o número de passagens que se quiser.

Nestas estampagens foi utilizada a tinta de carbono. Inicialmente, foram utilizadas 10 passagens com intensidade do magneto de 3. No entanto, após as primeiras estampagens percebeu-se que, para alguns dos substratos era demasiado, pois a tinta saía pela outra superfície deste. Sendo assim, os ensaios que estão descritos neste documento acabaram por ser conseguidos com 5 passagens e intensidade do magneto de 2.

### **3.2.2 Secagem e cura**

Após a estampagem, o substrato têxtil tem de passar por um processo de secagem, de modo à tinta formar uma camada sólida que não é facilmente removida. A temperatura e o tempo para estes processos são informações fornecidas pelos produtores das tintas nas fichas técnicas destas. No caso da estampagem dos substratos do sensor com a tinta de carbono, a secagem foi a 90 °C durante 5 min e o processo de cura foi a 140 °C durante 3 min. Para a estampagem dos circuitos no CENTI com a tinta de prata esta foi curada termicamente durante 15 min a 100 °C.

### 3.2.3 Laminação

A laminação é a união de várias camadas de tecido/malha/filme/membrana através do uso de adesivos, aplicando uma certa pressão e temperatura durante um certo intervalo de tempo numa prensa, sendo que as condições a colocar na prensa são dadas pelos fornecedores destes adesivos. Independentemente do tipo de adesivo usado, após cada laminação o substrato laminado deve repousar por pelo menos 24 horas antes de se conseguir verificar se os substratos aderiram bem e realizar qualquer tipo de testes.

Para a preparação das amostras dos substratos para o sensor foi utilizada uma cola por pontos para unir os substratos têxteis. Estas amostras foram preparadas numa prensa a 140 °C e a uma pressão de 4 bar durante 20 s.

No caso dos filmes/membranas para encapsulamento da tinta achou-se necessário realizar alguns testes de resistência às lavagens antes da impressão dos circuitos, de modo a otimizar as condições de laminação. Para isso, após o repouso recomendado de 24 horas, verificou-se se o filme/membrana não se desprendia da malha e se, mesmo após 20 lavagens, este não se separava. No caso dos filmes, visto que estes já vêm com um adesivo, a laminação ocorre em apenas uma fase, onde se coloca o filme com o lado que contém o adesivo encostado à malha. Todos os filmes utilizados foram aderidos à malha de poliamida a 150 °C e 3 bar por 15 s, segundo as recomendações dos fornecedores.

De modo a aderir as membranas à malha a melhor opção seria usar uma cola em *web*, pois este tipo de adesivo permite que o substrato se mantenha flexível e respirável. A laminação ocorre numa só fase, onde se coloca a malha, a *web* e depois a membrana. Posto isto com a *web* laminou-se a membrana 1 à malha a 130°C, a 3 bar e durante 15 s e, mesmo após as lavagens, o substrato permaneceu intacto. No entanto, a membrana 2, com estas mesmas condições, não laminou corretamente pois a membrana era facilmente separada da malha, sendo que, apenas para esta membrana foram testadas as condições de laminação presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições testadas de laminação da membrana 2 e a malha PA+EA com a *web*

| Ensaio | Temperatura / °C | Pressão / bar | Tempo / s |
|--------|------------------|---------------|-----------|
| 0      | 130              | 3             | 15        |
| 1      | 130              | 3             | 30        |
| 2      | 130              | 3             | 45        |
| 3      | 130              | 4             | 15        |
| 4      | 130              | 5             | 15        |
| 5      | 130              | 4             | 30        |

Após a preparação destas amostras não se verificou nenhuma diferença significativa decorrente tanto da variação do tempo como da variação da pressão. No entanto, de modo a ter uma amostra para o teste preliminar de resistência a lavagens, foi colocada uma amostra referente ao ensaio 5 da Tabela 2 a lavar, sendo este ensaio escolhido por ter valores de pressão e tempo intermédios. Após as lavagens, o substrato permaneceu intacto. É importante notar que, segundo a Tabela 2, a temperatura não foi um dos parâmetros de laminação variados. Isto aconteceu porque era visível que a cola fundia bem e também não era recomendado expor as membranas a temperaturas demasiado elevadas.

Para a adesão dos transferes condutores à malha PA+EA foi utilizada uma temperatura de 150 °C e uma pressão de 4 bar durante cerca de 1 min. Em seguida, o substrato é deixado a arrefecer durante mais 1 min e só após esta espera é que se remove o polímero que serve de suporte ao transfere.

### 3.2.4 Costuras dos fios condutores

A costura do fio de cobre acabou por ser um enorme desafio, pois este fio tem um diâmetro considerável para ser costurado, é mais rígido, para além do facto de a malha ser fina e flexível. Primeiramente testou-se as melhores condições para a costura deste, tais como se era melhor colocar o fio na agulha ou na canela da máquina de costura, usando para isso o tipo de costura mais simples e que menos material gasta, a costura em ponto preso. Após várias tentativas chegou-se então à conclusão que, de modo a costurar este fio, este tem de estar na canela, a agulha utilizada foi uma agulha 90 e a malha PA+EA teve de ser dobrada em dois. Sendo assim, costurou-se este fio por ponto preso, por zig-zag e por ponto cadeia, sendo estes denominados como 301, 304 e 406, respetivamente, na norma NP 3801:1991 - Têxteis. Tipos de pontos de costura. Classificação e terminologia [55].

Com o fio PA, por ponto preso, este acabou por não criar alguns pontos, no entanto com a malha dobrada a costura já ficou bem conseguida. Na costura em zig-zag o fio é costurado

corretamente, não havendo necessidade de dobrar a malha. É aparentemente indiferente este fio estar na canela ou na agulha. Não fazia sentido costurar este fio por ponto cadeia, pois este fio é revestido com prata e não tem isolamento, sendo impossível perceber qual seria o caminho dos elétrons de modo a quantificar a resistência em  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ .

### 3.2.5 Impressão de circuitos nos filmes/membranas

A impressão de circuitos em filmes/membranas foi feita numa máquina de estampar automática no CENTI. Esta máquina tem uma base com orifícios onde o substrato a ser estampado é colocado. Os orifícios permitem criar vácuo com uma bomba, segurando a amostra no lugar. Em cima desta base, encontra-se o quadro de estampagem com o desenho do circuito que se pretende com uma racla por cima deste. Sendo esta máquina automática foi necessário definir alguns parâmetros. A altura entre o quadro e a base durante a impressão, que, neste caso, foi de 5,5 mm, sendo esta dependente do tipo de tinta a imprimir e da *mesh* do quadro utilizado. Foi necessário ainda definir as posições da direita e da esquerda do padrão e a pressão na racla necessária para a tinta ser transferida através do quadro, que neste caso foi de 8 bar. Após se terem definido estes parâmetros colocou-se a tinta em cima do quadro, carregou-se num pedal, o quadro desceu e a racla espalhou a tinta ao longo do desenho e esta ficou impressa no substrato.

No caso dos filmes 2 e 3 e das membranas aderidas à malha através da *web* foi necessário fazer duas passagens com a tinta, pois era visível que o circuito apresentava algumas quebras, no entanto, com o filme 1 apenas uma passagem bastou. O filme 1 foi o único onde o circuito era impresso com este filme ainda no papel de silicone que serve de suporte.

## 3.3 Métodos de avaliação do desempenho

### 3.3.1 Solidez às lavagens

Os ensaios de solidez às lavagens foram realizados com o intuito de perceber qual das situações estudadas nesta dissertação apresentava melhor resistência ao uso diário, onde foram utilizadas as condições presentes na norma NP EN ISO 105-C08:2010 - Têxteis; Ensaios de solidez dos tintos; Parte C08: Solidez dos tintos à lavagem doméstica e comercial utilizando um detergente de referência não fosfatado contendo um ativador de branqueamento a baixa temperatura [56]. Posto isto, foram definidas umas condições de lavagem de vestuário comum, a 40 °C com ciclos de lavagem de 30 min. Os recipientes utilizados têm um volume de 400 mL e utilizou-se 250 mL de uma solução com 4 g de detergente por litro de água. Este detergente é não fosfatado com branqueador ótico. Na norma de têxteis inteligentes CEN/TR 16298 - Textiles and textile products - Smart textiles - Definitions, categorisation, applications and standardization needs [57] não são referidas as condições de lavagem mais indicadas, pois existe uma grande variedade de têxteis inteligentes.

### 3.3.2 Capacidade de absorção dos substratos do sensor

Uma amostra de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  de cada substrato foi pesada seca e após a absorção em 2 mL de uma solução que pretende simular o suor durante cerca de 30 s, seguido de um período de 1 min para retirar o excesso em malha. Nestes ensaios, cinco para cada substrato, foram utilizadas duas soluções de suor simulado, uma alcalina e outra ácida. Com a diferença de massa é possível perceber a capacidade de absorção dos diferentes substratos, que foi calculada dividindo a massa da água que foi absorvida pela massa da amostra antes da absorção. Este procedimento é baseado na norma ISO 9073-6:2000 - Textiles – Test methods for nonwovens – Part 6: Absorption [58].

### 3.3.3 Detecção de sinal dos substratos do sensor

Os provetes de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  de cada substrato preparado, após a absorção de uma solução que simula o suor, foram colocados em contacto direto com a superfície dos elétrodos comerciais impressos em cerâmica com tinta de carbono/nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Estes ensaios eletroquímicos para detecção de sinal foram realizados utilizando a técnica de voltametria de pulso diferencial (DPV do inglês differential pulse voltammetry) utilizando um potencióstato AUTOLAB 30. As diferentes técnicas de voltametria variam essencialmente na maneira como o potencial varia com o tempo, sendo que no anexo C estão exemplos de algumas das técnicas de voltametria mais utilizadas. Para a detecção dos picos de oxidação foi utilizada uma gama de potenciais de 0 a 1,9 V vs NHE, pois é dentro desta gama que a maior parte dos biomarcadores é detetado. A escala de potenciais utilizada é referente ao potencial normal do hidrogénio (NHE).

### 3.3.4 Ensaios de avaliação da extensão dos substratos com circuito condutores

Para os ensaios de determinação da extensão dos substratos com circuitos condutores foi seguido o procedimento da norma EN 1470-1:2005 - Determination of the elasticity of fabrics - Part 1: Strip tests [59]. Na amostra foram marcados dois riscos com uma distância de 10 cm entre eles. Esta foi colocada entre duas garras, sendo aplicada uma força com intensidade que depende da quantidade de elastano e da largura da amostra. Neste caso, foi utilizada uma força de 25 N a uma velocidade de extensão e retração de  $500 \text{ mm min}^{-1}$ . Este ensaio é composto por cinco ciclos de extensão e retração, sendo que no último ciclo a amostra fica durante 1 min em extensão, seguido de 1 min em repouso. Após este minuto de repouso, com uma régua foi medida a distância entre os dois riscos marcados previamente, que após este ensaio é maior que 10 cm.



## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Proposta de engenharia do produto

No âmbito da presente dissertação foi elaborada uma primeira prova de conceito para um produto que pretende avaliar a presença de biomarcadores de stress físico e emocional no suor a ser usada por militares. Com isto em mente pensou-se numa camisola que teria os sensores, a placa de circuitos (PCB), a bateria e os respetivos circuitos integrados nela.

Os sensores que vão detetar a presença dos biomarcadores de stress no suor poderiam estar localizados em várias zonas da camisola, desde que devidamente calibrados [60]. As zonas mais atrativas seriam as costas e a zona lombar devido à elevada taxa de transpiração [61]. No entanto, a composição do suor varia para diferentes zonas do corpo [31], o que acaba por tornar mais importante a recolha de suor em pelo menos duas zonas do corpo diferentes, sendo que, neste caso, se optou pela zona lombar, no local da coluna vertebral, e outro acima do abdómen, na zona onde começa a parte central da caixa torácica.

Em seguida, os sensores estariam conectados a uns circuitos condutores até uma zona inferior e no lado esquerdo da peça, entre o cotovelo e a cintura, onde estariam colocados botões *snap* de modo a conectar posteriormente o PCB e a bateria. Esta zona foi escolhida pois esta foi considerada a zona mais conveniente para o utilizador em relação a manter o seu conforto. Estes circuitos podem ser obtidos de várias formas, no entanto as estratégias estudadas na presente dissertação foram o uso de fios condutores que podem ser costurados ou bordados, o uso de filmes/membranas de encapsulamento e ainda o uso de transferes condutores.

O PCB e a bateria estariam numa bolsa numa cinta de utilidades militar e seriam conectados à peça através de fios de cobre que, na ponta, teriam botões *snap* para conectar à camisola. Estes fios teriam uma certa extensão de modo a não perturbar a liberdade dos movimentos do utilizador. Na Figura 7 está representada uma proposta de design para a incorporação de sensores de suor com o uso de uma cinta de utilidades militar para transportar o PCB e a bateria.

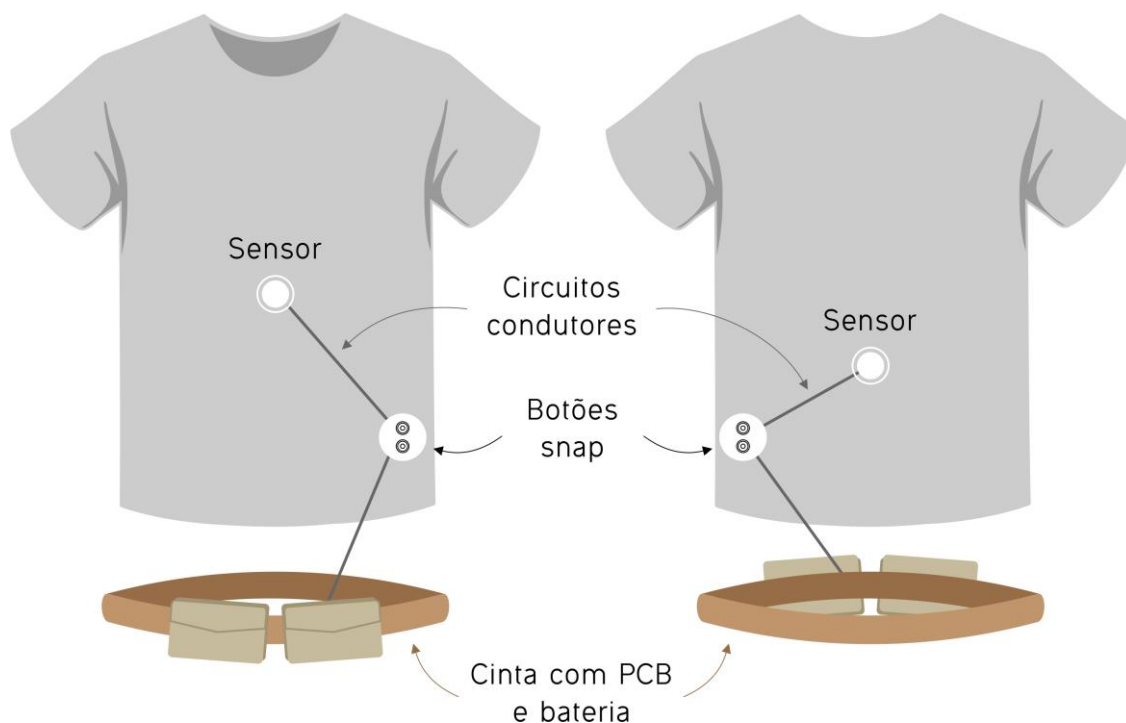


Figura 7 - Design com o uso de uma cinta de utilidades militar para transporte do PCB e bateria.

No caso de o PCB e a bateria serem pequenos pode-se optar por uma disposição em tudo semelhante à anterior, mas sem a cinta de utilidades onde o conjunto PCB e bateria seria removível da camisola para a lavagem da mesma, através do uso de, por exemplo, uma caixa de pequenas dimensões com botões *snap*. Esta proposta de design está representada na Figura 8.

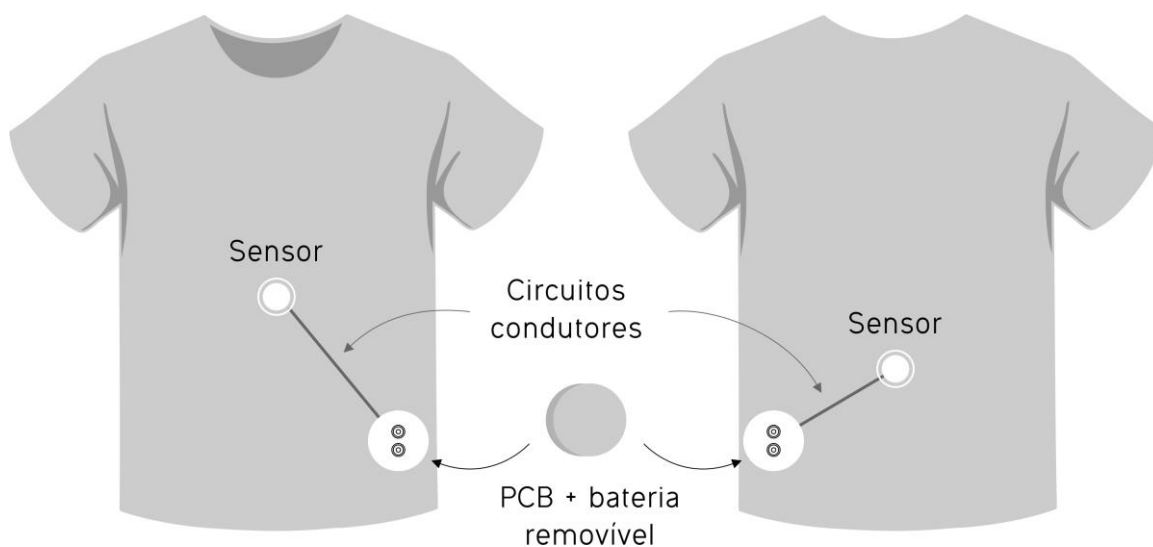


Figura 8 - Design com uso de uma caixa removível com o PCB e a bateria.

## 4.2 Camisola

O vestuário que usamos tem um papel fundamental na transferência de calor entre a nossa pele e o meio ambiente, dificultando a sua transferência. De modo a aumentar o conforto termofisiológico é necessário ter em atenção não só as zonas onde se suam mais, mas também as zonas de maior temperatura da pele. Isto permite aos designers criarem roupas que consigam maximizar a perda de calor devido à evaporação do suor e a perda de calor seco, isto é, por condução, convecção e radiação [48]. No sentido de ter uma camisola com a funcionalidade pretendida e manter o conforto dos militares foi elaborada uma camisola em *seamless* e respirável cujo design preliminar está representado na Figura 10 baseado nos mapas de temperatura e suor da Figura 9.



Figura 9 - Mapas de distribuição de temperatura corporal (os dois manequins à esquerda) e regiões de transpiração (os dois manequins à direita) usados para elaboração de roupas respiráveis, onde as cores mais escuras representam zonas de maior temperatura e transpiração, respetivamente [48].

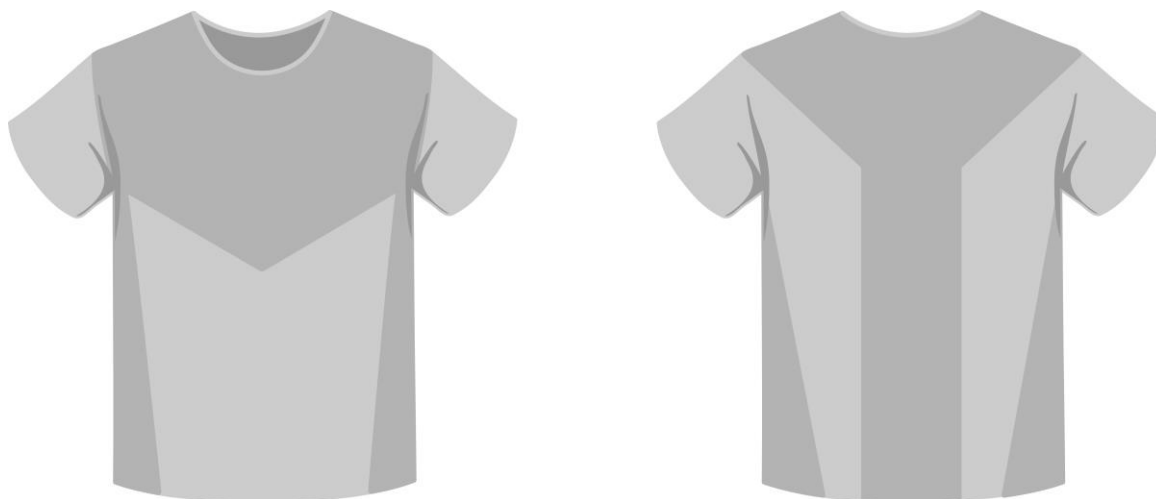


Figura 10 - Design da camisola em *seamless* onde as zonas a cinzento escuro são zonas que exigem maior respirabilidade.

A camisola seria em *seamless*, isto é, sem ou com muito poucas costuras, pois este tipo de vestuário é normalmente mais confortável. A maioria das peças de vestuário em *seamless* são compostas por fibras sintéticas como poliéster e poliamida. No entanto as peças mais eficientes, principalmente a nível de respirabilidade e gestão de humidade existentes no mercado utilizam as fibras mencionadas com ligeiras modificações. Estas modificações são feitas através do uso de aditivos que conferem novas propriedades a fibras já existentes e o uso de fibras com designs diferentes, melhorando assim o desempenho da peça.

A camisola representada na Figura 10 foi uma primeira proposta. Posto isto, procedeu-se à sua otimização tendo-se desenvolvido uma camisola em *seamless* (com composição 62 % PES, 33 % PA e 5 % EA) para elaboração da prova de conceito que apresenta várias estruturas diferentes na sua malha, de modo a ter outras funcionalidades importantes como gestão de humidade e zonas de maior ventilação, como se pode verificar na Figura 11. No anexo B encontram-se pormenores da sua estrutura, bem como resultados referentes a ensaios de medição da resistência evaporativa e avaliação da secagem desta camisola. Esta camisola é composta por poliéster *Coolmax* e poliamida *Q-SKIN*. Na malha *Coolmax* são utilizados fios de poliéster, com quatro ou seis canais nas superfícies, tendo assim uma maior área superficial permitindo o fácil transporte de humidade da pele para o exterior onde evapora mais rapidamente [62]. *Q-SKIN* é uma fibra de poliamida 6,6 na qual iões de prata são inseridos diretamente durante o processo de fiação, o que limita o crescimento bacteriano, diminuindo o odor corporal [63].

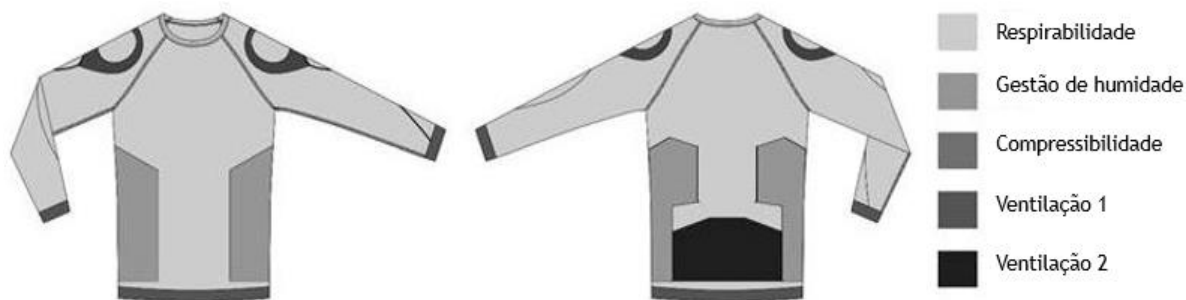


Figura 11 - Design da camisola em *seamless* com as diferentes zonas qua a compõem.

### 4.3 Sensor

Os sensores vão ser impressos utilizando uma tinta de carbono com modificações com nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Optou-se por não permitir que os sensores estejam em contacto direto com a pele, pois ainda não se percebeu se poderá causar alguma alergia ou desconforto, para além do eventual desgaste da superfície do sensor. O sensor servirá para identificar padrões de biomarcadores relacionados com situações de stress e não biomarcadores individuais, sendo que estes padrões de biomarcadores são identificados pelo conjunto dos seus potenciais de oxidação. Este sensor terá também de ser descartável, pois os biomarcadores vão oxidar, visto que se vão determinar potenciais de oxidação, o que vai comprometer a posterior deteção destes.

De modo a ter um sensor que analise o suor sem este estar em contacto com a pele pensou-se inicialmente em duas opções para o material do substrato. Desenvolver um substrato num polímero adequado, fazendo um canal microfluídico por onde o suor entrava até um reservatório onde se encontraria o sensor, sendo depois expelido por um outro canal microfluídico. A outra hipótese seria utilizar um material têxtil absorvente como substrato do sensor, sendo que neste caso uma das faces do material estaria em contacto direto com a pele e na outra face estaria o sensor impresso diretamente no têxtil. Alternativamente, e visto que normalmente não se estampam sensores diretamente em têxtil, seria possível fazer uma espécie de bolso com o material têxtil onde o sensor descartável seria colocado. Posto isto, optou-se por começar a estudar a hipótese de construir um substrato para o sensor com algum material absorvente.

#### 4.3.1 Substrato do sensor

Foram seleccionados quatro substratos têxteis absorventes e estamparam-se retângulos de  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  com a tinta de carbono, cujo procedimento e condições utilizadas encontram-se no capítulo 3 - Materiais e Métodos. Optou-se pela tinta supramencionada por ser à base de carbono, tal como a dos sensores vai ser. Na Figura 12 está um exemplo do retângulo estampado

num dos substratos estudados. Estes testes tiveram o intuito de perceber qual dos materiais daria um bom substrato para o sensor através da pesagem da quantidade de tinta que aderiu e de medições da resistência elétrica em pontos que distam 1 cm, sendo que estes dados se encontram na Tabela 3.

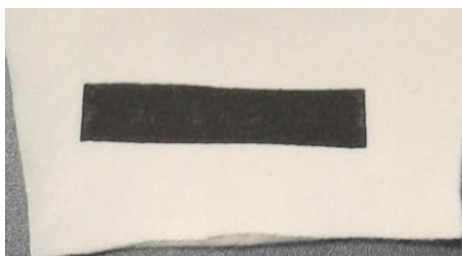


Figura 12 - Retângulo de  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  estampado no substrato composto pela malha PA+EA e não-tecido viscose.

Tabela 3 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  com tinta condutora diretamente em um material absorvente

| Amostra            | Massa de tinta / g | Resistência / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ |
|--------------------|--------------------|----------------------------------------|
| Malha algodão      | 0,037              | $99 \pm 27$                            |
| Malha PES          | 0,053              | Não conduz                             |
| Felpo              | 0,024              | Não conduz                             |
| Não-tecido viscose | 0,031              | $253 \pm 42$                           |

Como se pode verificar na Tabela 3, tanto na malha algodão como no não-tecido viscose a tinta aderiu bem e apresenta uma resistência elétrica razoável. No entanto, ambos os materiais não são indicados para substrato do sensor pois têm pouca espessura e deformam-se e perdem a sua consistência quando molhados. O felpo e a malha PES apresentavam uma superfície demasiado rugosa criando muitas quebras de condutividade, sendo esta a razão principal para que a tinta não conduza a eletricidade, quando estampada nestes materiais. A resistência num sensor não deve ser muito elevada, pois pode impedir a condução do sinal, nem muito baixa, pois torna mais difícil detetar as variações da propriedade que se está a determinar, podendo ainda haver maior incidência de ruído.

Após estes primeiros ensaios chegou-se então à conclusão de que apenas um material absorvente como substrato do sensor não seria uma boa opção. Posto isto achou-se por bem testar combinações dos materiais absorventes com outro material diferente para construção do substrato do sensor. Primeiramente, utilizou-se a malha PA+EA que é composta por fibras sintéticas que não absorvem bem a humidade. Neste caso, o material absorvente estaria em

contacto com a pele e na outra face estaria a malha PA+EA onde seria feita a estampagem. A ideia seria testar se um substrato composto por um material absorvente e um material que não acumula a humidade, ou seja, um material que deixa passar a humidade, seria uma boa opção.

Sendo assim, fizeram-se um total de quatro novos substratos. Nestes substratos estamparam-se também os retângulos de  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  na face da malha PA+EA, foram pesados antes e após aplicação da tinta e medidas as resistências elétricas em pontos que distam 1 cm. Estes dados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  com tinta condutora na malha PA+EA laminada com os quatro materiais absorventes previamente testados

| Amostra                          | Massa de tinta / g | Resistência média / $\text{k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ |
|----------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|
| Malha PA+EA e felpo              | 0,028              | $26,1 \pm 2,9$                                       |
| Malha PA+EA e Malha PES          | 0,022              | $27,4 \pm 3,8$                                       |
| Malha PA+EA e malha algodão      | 0,023              | $45,6 \pm 6,6$                                       |
| Malha PA+EA e não-tecido viscose | 0,015              | $16,7 \pm 1,2$                                       |

Pela análise da Tabela 4 é possível verificar que na estampagem na malha PA+EA o meio condutor fica com uma resistência elétrica bastante elevada, o que leva a concluir que a tinta não adere bem a esta malha. Isto também é comprovado pela menor quantidade de tinta aderida quando comparada com os valores da Tabela 3. Posteriormente, estes quatro substratos teriam de ser testados com a tinta que vai ser usada no sensor ou então por outra técnica de estampagem da tinta, de modo a perceber se a resistência elétrica continua elevada. Caso não resulte, estes substratos poderiam ser utilizados como uma espécie de bolso no interior da camisola onde o sensor descartável seria colocado.

Em seguida realizou-se o mesmo tipo de testes, desta vez com o uso de dois materiais absorventes laminados a fazer de substrato, onde a estampagem era feita apenas na face do substrato onde se obteve resultados promissores nos primeiros ensaios, ou seja, na malha algodão e no não-tecido viscose. O objetivo aqui era utilizar dois materiais absorventes para dar um pouco de consistência ao substrato. Sendo assim, produziram-se seis amostras cujos dados obtidos estão representados na Tabela 5, onde o primeiro material indicado para cada amostra foi a face do substrato escolhida para a estampagem.

Tabela 5 - Quantidade de tinta que aderiu a cada substrato e resistência elétrica média e respetivo desvio padrão após estampagens de retângulos  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  com tinta condutora em dois materiais absorventes laminados

| Amostra                            | Massa de tinta / g | Resistência média / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ |
|------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|
| Malha algodão e felpo              | 0,034              | $458 \pm 118$                                |
| Malha algodão e não-tecido viscose | 0,022              | $253 \pm 114$                                |
| Malha algodão e malha PES          | 0,077              | $541 \pm 193$                                |
| Não-tecido viscose e felpo         | 0,024              | $277 \pm 63$                                 |
| Não-tecido viscose e malha PES     | 0,055              | $510 \pm 149$                                |
| Não-tecido viscose e malha algodão | 0,031              | $196 \pm 14$                                 |

Os valores de resistência elétrica presentes na Tabela 5 são um pouco elevados quando comparados com os da Tabela 3. Este problema surgiu principalmente devido ao facto de o quadro de estampagem estar obstruído por resíduos da tinta utilizada que é de difícil lavagem, não permitindo assim a estampagem de um padrão uniforme. Apesar disso, estes substratos continuam a apresentar valores de resistência elétrica razoáveis.

Após estes ensaios chegou-se então à conclusão que teríamos dez substratos possíveis para o sensor, as quatro amostras presentes na Tabela 4 e as seis da Tabela 5, que passariam a uma fase seguinte de testes. Os primeiros testes serviram para perceber qual o melhor material para a tinta condutora ser estampada, enquanto que os testes seguintes tiveram o intuito de perceber qual a capacidade de absorção de cada um dos substratos.

De modo a determinar esta capacidade de absorção, foram realizadas pesagens antes e depois da absorção de uma solução de acordo com os ensaios descritos no capítulo 3 - Materiais e Métodos, com amostras de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  de cada substrato. Aqui não se fizeram pesagens com o substrato não-tecido viscose e malha algodão, pois em termos de capacidade de absorção será igual ao substrato malha algodão e não-tecido viscose. Foram utilizadas duas soluções de suor, uma alcalina e outra ácida, para perceber se haveria alguma diferença entre elas. Todos os valores referentes às pesagens realizadas nestes testes encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Pesagens antes e após a absorção de uma solução e capacidade de absorção com os respectivos desvios padrão dos candidatos a substrato do sensor

|                                    | Suor ácido     |                  |              | Suor alcalino  |                  |              |
|------------------------------------|----------------|------------------|--------------|----------------|------------------|--------------|
| Substrato                          | Peso seco / mg | Peso Húmido / mg | Absorção / % | Peso seco / mg | Peso Húmido / mg | Absorção / % |
| Malha PA+EA e felpo                | 60 ± 4         | 385 ± 14         | 539 ± 33     | 57 ± 3         | 384 ± 27         | 577 ± 51     |
| Malha PA+EA e malha PES            | 53 ± 3         | 233 ± 14         | 343 ± 25     | 56 ± 3         | 248 ± 20         | 344 ± 12     |
| Malha PA+EA e malha algodão        | 46 ± 2         | 161 ± 8          | 254 ± 8      | 42 ± 1         | 143 ± 6          | 242 ± 16     |
| Malha PA+EA e não-tecido viscose   | 39 ± 2         | 244 ± 13         | 523 ± 28     | 38 ± 5         | 222 ± 33         | 485 ± 41     |
| Malha algodão e felpo              | 44 ± 3         | 396 ± 24         | 802 ± 57     | 42 ± 2         | 386 ± 46         | 819 ± 66     |
| Malha algodão e não-tecido viscose | 27 ± 2         | 224 ± 16         | 740 ± 28     | 23 ± 3         | 189 ± 17         | 732 ± 35     |
| Malha algodão e malha PES          | 37 ± 4         | 174 ± 14         | 370 ± 19     | 38 ± 2         | 194 ± 13         | 408 ± 16     |
| Não-tecido viscose e felpo         | 37 ± 5         | 414 ± 48         | 1027 ± 58    | 37 ± 3         | 467 ± 30         | 1161 ± 148   |
| Não-tecido viscose e malha PES     | 37 ± 3         | 285 ± 29         | 659 ± 24     | 32 ± 4         | 254 ± 33         | 704 ± 35     |

Pela análise da Tabela 6 é possível verificar que não existem diferenças significativas em termos da taxa de absorção para as duas soluções de suor usadas, pelo menos para a maioria dos substratos. Comparando as amostras com a malha PA+EA, verifica-se que o substrato têxtil com maior capacidade de absorção é o felpo, o segundo o não-tecido viscose, em terceiro a malha PES e por fim a malha algodão. Posto isto, seria de esperar que o substrato com maior capacidade de absorção fosse o substrato composto por não-tecido viscose e felpo, o que se acabou por confirmar como se pode ver na Tabela 6.

#### 4.3.2 Testes de deteção de sinal dos substratos do sensor

Estes dez candidatos a substrato do sensor, sem o estampado, os quatro presentes na Tabela 4 e os seis da Tabela 5, foram posteriormente enviados para a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, onde realizaram alguns testes com o sensor que estão a desenvolver. Estes testes pretendiam perceber qual dos materiais seria o melhor substrato para o sensor através da deteção do sinal obtido após absorção de uma solução que simula o suor. O primeiro substrato a ser estudado foi o da malha PA+EA e felpo que foi encostado à superfície do sensor de modo a verificar se era possível obter um bom sinal, sendo que se obteve o voltamograma da Figura 13. As linhas representadas no voltamograma foram obtidas através da média de sete ensaios. O procedimento da deteção de sinal através dos substratos do sensor está descrito no capítulo 3 sobre Materiais e Métodos.

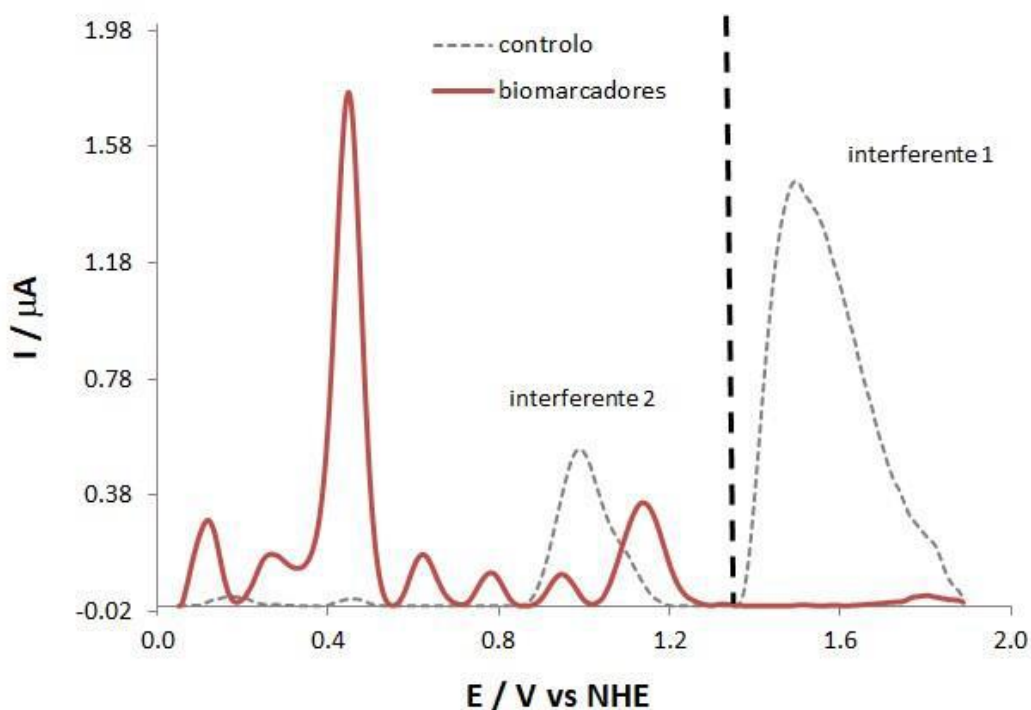


Figura 13 - Voltamogramas diferenciais representativos dos ensaios obtidos com suor artificial utilizando a técnica DPV em eléctrodos de carbono/MWCNT em contacto com o substrato da malha PA+EA e felpo após absorção da solução. A linha vermelha corresponde aos ensaios na

presença do suor artificial com biomarcadores, a linha tracejada cinza corresponde aos ensaios na presença do suor artificial sem biomarcadores, de modo a servir de controlo, e a linha preta tracejada vertical delimita a gama útil de potenciais utilizados nestes ensaios.

Pela análise da Figura 13, é possível verificar a presença de dois interferentes na curva de controlo dentro da gama de potenciais utilizada de 0,05 a 1,9 V vs NHE. Existe um pico de corrente a potenciais próximos de 1,6 V, denominado por interferente 1, que foi identificado como sendo característico do material do eletrodo, pois já era detetado em ensaios anteriores onde a solução era aplicada diretamente nos eletrodos. Foi detetado também um pico de corrente a valores próximos de 1 V, denominado por interferente 2, sendo que foi assumido resultar de interferência do substrato do sensor. Sendo assim, a gama de potenciais útil utilizando estes eletrodos e o substrato da malha PA+EA e felpo deverá ser considerada entre 0,05 e 0,95 V vs NHE, pois a interferência deste substrato impede uma medição correta dos biomarcadores com potenciais de oxidação entre 0,95 V e 1,2 V, enquanto que os eletrodos têm um interferente para potenciais superiores a 1,3 V. Posto isto, este substrato não parece ser indicado para ser substrato do sensor, pois a gama útil de potenciais fica mais pequena. No entanto, de modo a concluir qual o melhor substrato do sensor estes testes teriam de ser realizados para os restantes candidatos, o que não foi possível durante o período de realização da presente dissertação.

## 4.4 Circuitos condutores

Após um estudo intensivo sobre as melhores opções para servir como circuito condutor na camisola, em termos de conforto para o utilizador e durabilidade, chegou-se à conclusão de que as melhores hipóteses seriam o uso de fios condutores ou tintas condutoras. Assim sendo, nesta dissertação foram estudadas três opções: o uso de fios condutores costurados, o uso de filmes/membranas de encapsulamento de modo a proteger a tinta condutora e o uso de transferes condutores. De modo a determinar qual destas seria a melhor opção, foi necessário realizar ensaios de resistência a lavagens, verificar a variação da resistência elétrica após várias lavagens e ensaios de avaliação da extensão.

### 4.4.1 Fios condutores costurados

Na presente dissertação foram testados dois fios condutores. O primeiro fio a ser testado foi o fio de cobre onde foram testados três tipos de costura: por ponto preso, por zig-zag e por ponto cadeia, com as condições descritas no capítulo 3 - Materiais e Métodos. Na Figura 14 estão imagens destas costuras aplicadas, sendo que estas foram selecionadas por serem as mais comuns em camisolas.

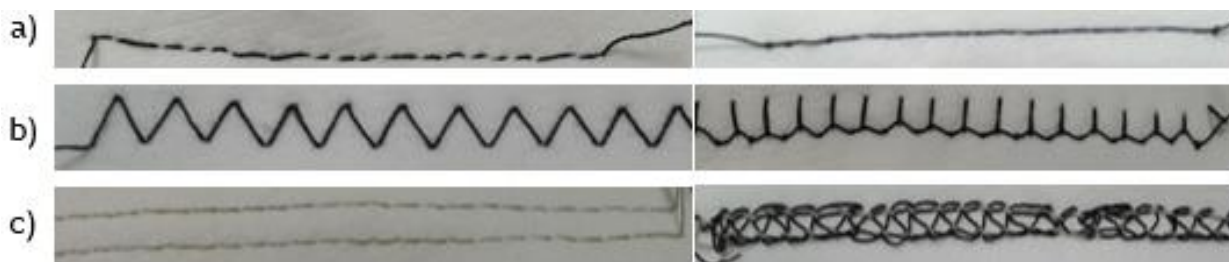


Figura 14 - Imagens das costuras por a) ponto preso, b) zig-zag e c) ponto cadeia com o fio de cobre onde à esquerda está a parte superior da costura e nas figuras à direita está a parte inferior da costura, ou seja, onde o fio condutor está.

Pela análise da Figura 14 verifica-se que, por ponto preso, a costura fica bem feita. Por outro lado, tanto por zig-zag como por ponto cadeia, a costura não fica bem conseguida, sendo que o fio condutor não consegue criar alguns pontos. Existem correlações conhecidas que relacionam a distância de costura com os consumos dos fios, sendo isto necessário para o cálculo da resistência elétrica dos fios em  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ . No entanto estas correlações não serão verídicas na costura em zig-zag e na costura por ponto cadeia visto que estas não ficaram como era suposto. Posto isto, apenas a amostra com o fio costurado em ponto preso passou para a próxima fase de testes.

Em seguida foi então utilizado o fio PA. Este fio tem um diâmetro próximo de um fio de costura normal, sendo por isso mais fácil de costurar que o fio condutor anterior. Foi então possível costurar este fio por ponto preso e por zig-zag como se pode verificar na Figura 15.

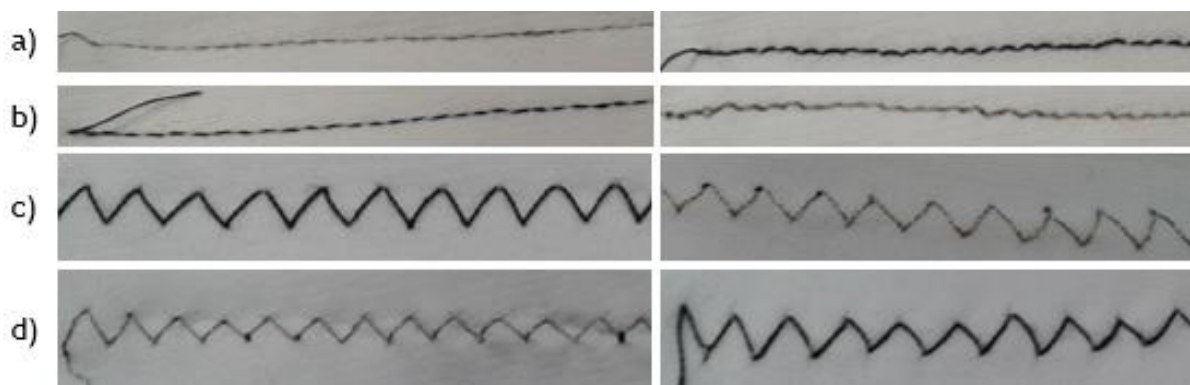


Figura 15 - Imagens das costuras por a) ponto preso com o fio condutor na agulha, b) ponto preso com o fio condutor na canela, c) zig-zag com o fio condutor na canela e d) zig-zag com o fio condutor na agulha. Estas costuras foram feitas com o fio PA.

Observando a Figura 15 verifica-se que é aparentemente indiferente o fio condutor estar na canela ou na agulha, pois tanto numa situação como na outra as costuras ficam bem conseguidas. Posto isto, com este fio condutor, tanto a costura por ponto preso como a costura em zig-zag passaram à fase seguinte de testes de resistência às lavagens e respetivas medições de resistência elétrica.

#### 4.4.2 Filmes/membranas de encapsulamento

Após a preparação de amostras com fios condutores costurados foram utilizados três filmes e duas membranas para a estampagem de circuitos realizada no CENTI. Tanto as condições otimizadas de laminação destes filmes/membranas como a descrição do procedimento da impressão dos circuitos estão descritas no capítulo 3 - Materiais e Métodos. Posto isto, foram preparados substratos com cerca de  $15 \times 5 \text{ cm}^2$  de modo a se imprimir um circuito com dimensões de cerca de  $12 \times 2 \text{ cm}^2$ . Estes foram impressos nos três filmes e nas duas membranas com as duas colas diferentes, fazendo um total de sete substratos.

Após a estampagem dos circuitos foi necessário encapsular os circuitos com o filme/membrana onde foi estampado. No entanto, ao encapsular o circuito este fica isolado eletricamente, não sendo possível assim medir resistências elétricas ao fim de algumas lavagens. Teve-se então de pensar em algumas alternativas de modo a encapsular o circuito e, mesmo assim, conseguir medir a resistência. A primeira alternativa que surgiu foi fazer dois orifícios no filme/membrana deixando assim um pouco do circuito exposto em ambos os extremos, mas esta tinta não pode ficar exposta, pois pode ser removida nas lavagens. Posto isto, utilizou-se botões *snap* para tapar esses orifícios, como se pode ver na Figura 16, sendo que assim estes botões permitem a medição da resistência elétrica ao longo do circuito mantendo este isolado. Estes botões têm também a vantagem de poderem vir a servir como conexão entre o circuito e os restantes componentes do sistema, como já foi descrito no subcapítulo 4.1 - Proposta de engenharia do produto.

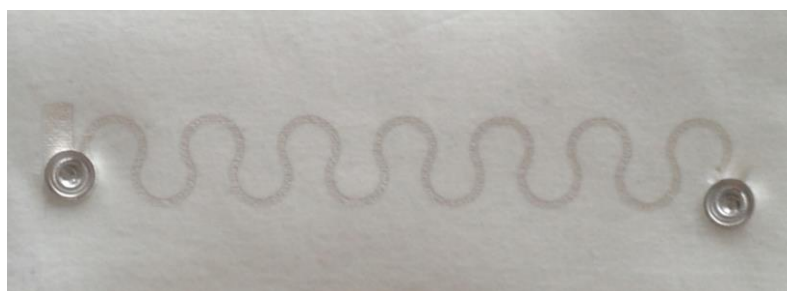


Figura 16 - Botões *snap* aplicados na membrana 1 aderida à malha com a *web*.

#### 4.4.3 Transferees condutores

Para a produção de transferes condutores foi necessário primeiro fazer um desenho indicado para a aplicação desejada, de modo a abrir quadros adequados. Nos sensores comerciais de três elétrodos, os elétrodos têm uma espessura de 1 mm e distam entre eles 1,5 mm. Posto isto, a tinta condutora que vai servir de circuito tem também estas dimensões. Na frente da camisola, a pista tem um comprimento de 33 cm, sendo que a diferença de alturas entre o sensor e a zona com botões *snap* é de 21 cm. Na parte traseira da camisola, o comprimento da pista é de 22 cm, com uma diferença de alturas entre o sensor e os botões

*snap* de 7 cm. Para os botões *snap* foram deixados círculos com um diâmetro de 1,2 cm com tinta condutora nas zonas onde estes vão ser aplicados. Os transferes tem três pistas paralelas, estando dispostas de modo a ocupar uma área pequena da camisola. Como encapsulante foi utilizado um material transparente sobre cada uma das pistas com uma largura de 2 mm. Este encapsulante não é usado no início e no final das pistas condutoras visto que estas zonas são zonas onde se vão conectar os sensores e os botões *snap*, por isso precisam de estar expostas. No anexo A estão mais informações relativas aos transferes desenvolvidos. Na Figura 17 é possível ver os transferes condutores aplicados na malha PA+EA com botões *snap* nas extremidades.

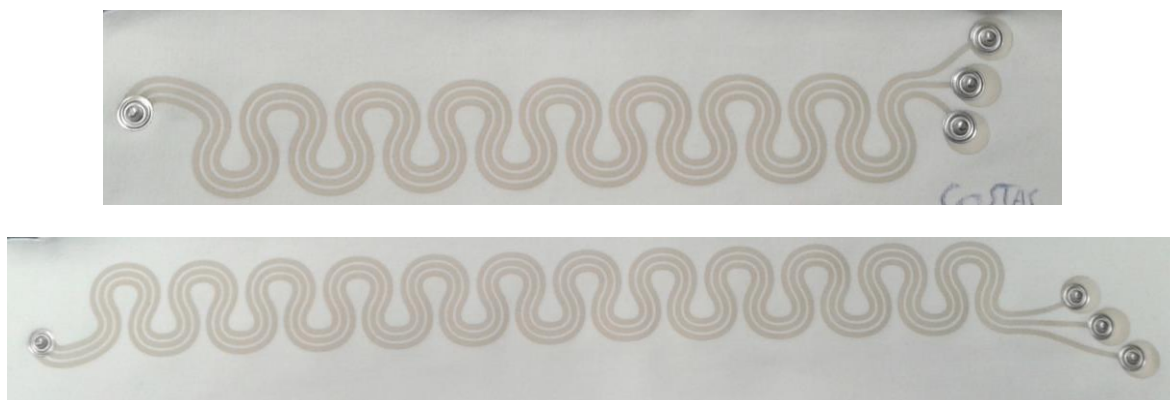


Figura 17 - Transferes condutores aplicados na malha PA+EA com botões *snap* nas extremidades. Na figura em cima está o transfere das costas e na figura em baixo o transfere da frente da camisola.

#### 4.4.4 Testes de resistência dos circuitos condutores

Antes de se passar para os testes de resistência às lavagens, foram medidas as resistências elétricas de todos os meios condutores estudados. Para se poder comparar os diferentes meios condutores foi necessário colocar todas as resistências elétricas em  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ . No caso dos fios condutores costurados existem correlações que relacionam o fio gasto com o metro de costura. Para as costuras por ponto-preso (301) e zig-zag (304) o consumo do fio condutor por metro de costura é de 1,40 e 2,65 metros, respetivamente. Na Tabela 7 encontram-se os valores da resistência elétrica média ao longo das lavagens dos fios condutores costurados.

Tabela 7 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão referente às amostras com fios condutores costurados após várias lavagens

| Amostra           | Resistência / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 10 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 20 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 30 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 40 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Aumento resistência / % |
|-------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Fio de cobre 301  | $0,18 \pm 0,09$                        | $0,14 \pm 0,04$                                    | $0,22 \pm 0,10$                                    | $0,11 \pm 0,02$                                    | $0,16 \pm 0,02$                                    | -12                     |
| Fio PA 301 agulha | $18,64 \pm 1,67$                       | $19,10 \pm 2,16$                                   | $25,53 \pm 2,38$                                   | $23,94 \pm 2,70$                                   | $30,70 \pm 1,75$                                   | 65                      |
| Fio PA 301 canela | $1,59 \pm 0,12$                        | $2,68 \pm 0,13$                                    | $4,45 \pm 0,37$                                    | $5,27 \pm 0,93$                                    | $4,87 \pm 0,58$                                    | 206                     |
| Fio PA 304 agulha | $5,60 \pm 0,13$                        | $6,91 \pm 0,05$                                    | $8,93 \pm 0,07$                                    | $9,90 \pm 0,16$                                    | $10,38 \pm 0,09$                                   | 85                      |
| Fio PA 304 canela | $1,28 \pm 0,03$                        | $1,91 \pm 0,09$                                    | $2,73 \pm 0,02$                                    | $2,40 \pm 0,11$                                    | $2,49 \pm 0,16$                                    | 94                      |

Pela análise da Tabela 7 é possível verificar que a resistência elétrica, após as 40 lavagens efetuadas, se mantém praticamente constante para o fio de cobre. No entanto, para as costuras com o fio PA a resistência aumentou significativamente após as 40 lavagens, em cerca de 65 %, 206 %, 85 % e 94 % para as costuras 301 com o fio na agulha, 301 com o fio na canela, 304 com o fio na agulha e 304 com o fio na canela, respetivamente. É importante também realçar que o fio PA, que inicialmente parecia ser indiferente se era costurado na agulha ou na canela da máquina, apresenta uma maior resistência elétrica quando é costurado na agulha, indicando, possivelmente, que este fio deva ser costurado na canela.

Sendo assim, conclui-se que, quando avaliado em termos de menor resistência elétrica e melhor resistência às lavagens, o fio de cobre é claramente a melhor opção. No entanto, com este fio seria necessário estudar outras formas alternativas de integrá-lo na camisola, visto que os tipos de costura estudados não são os mais indicados para este fio, deixando o substrato têxtil com pouca elasticidade, de acordo com os ensaios descritos no apêndice D.

O circuito estampado nos filmes/membranas tem um comprimento em linha reta de cerca de 12 cm, no entanto a distância que a tinta efetivamente percorre é de 28 cm, sendo que foi este o valor que foi usado para determinar as resistências elétricas em  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ . Na Tabela 8 encontram-se os valores referentes às medições de resistência elétrica média para os circuitos estampados nos filmes/membranas de encapsulamento.

Tabela 8 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão depois da aplicação dos botões *snap* e após várias lavagens para os circuitos estampados nos filmes/membranas de encapsulamento

| Amostra                 | Resistência / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 10 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 20 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 30 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 40 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Aumento resistência / % |
|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Filme 1                 | $0,35 \pm 0,01$                        | $0,31 \pm 0,02$                                    | $0,33 \pm 0,01$                                    | $0,37 \pm 0,01$                                    | $0,46 \pm 0,01$                                    | 31                      |
| Filme 2                 | $0,54 \pm 0,03$                        | $0,48 \pm 0,01$                                    | $0,72 \pm 0,01$                                    | $0,66 \pm 0,01$                                    | $0,77 \pm 0,01$                                    | 43                      |
| Filme 3                 | $1,13 \pm 0,02$                        | $1,20 \pm 0,01$                                    | $1,39 \pm 0,01$                                    | $1,29 \pm 0,01$                                    | $1,31 \pm 0,01$                                    | 15                      |
| Membrana 1 e <i>web</i> | $2,56 \pm 0,04$                        | $2,29 \pm 0,01$                                    | $3,60 \pm 0,02$                                    | $3,79 \pm 0,03$                                    | Não conduz                                         | Não conduz              |
| Membrana 2 e <i>web</i> | $0,23 \pm 0,01$                        | $0,25 \pm 0,01$                                    | $0,33 \pm 0,01$                                    | $0,36 \pm 0,01$                                    | $0,53 \pm 0,02$                                    | 133                     |

Pela análise da Tabela 8, verifica-se que o substrato com a membrana 1 e *web* deixou de conduzir. Muito provavelmente, o que aconteceu foi que havia ainda um pouco de tinta condutora exposta que foi removida com as lavagens e provocou uma quebra no circuito, pois seria normal a resistência elétrica aumentar, mas nunca deixar completamente de conduzir. Isto demonstra que este método de encapsulamento é de difícil reprodução. Ao fim das 40 lavagens, o substrato com a membrana 2 e a *web* foi o único que ficou visivelmente estragado, o que pode ser consultado no apêndice B.

Posto isto, conclui-se que, quando avaliado em termos de melhor resistência às lavagens, as melhores opções seriam os três filmes. Apesar de a *web* oferecer uma boa elasticidade ao substrato não é uma boa solução para esta aplicação pois não resiste às lavagens testadas, sendo necessário testar outras colas deste tipo. Em relação aos filmes, o com maior elasticidade é o filme 3, seguido do filme 2 e, por último, o filme 1, segundo os ensaios descritos no apêndice D.

Por fim, foram realizados os mesmos ensaios de lavagens para os transferes condutores desenvolvidos. Os transferes desenvolvidos têm três pistas, portanto na Tabela 9 estão representados os valores resultantes da resistência elétrica média entre as pistas. Para o transfeire da frente da camisola a tinta condutora percorre uma distância média de cerca de 87 cm, enquanto que no transfeire das costas a tinta percorre cerca de 57,5 cm, sendo estes valores necessários para a determinação da resistência elétrica em  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ .

Tabela 9 - Resistência elétrica média e respetivo desvio padrão depois da aplicação dos botões *snap* e após várias lavagens para os circuitos dos transferes condutores

| Transfere | Resistência / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 10 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 20 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 30 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Resistência 40 lavagens / $\Omega \text{ cm}^{-1}$ | Aumento resistência / % |
|-----------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Frente    | $0,14 \pm 0,00$                        | $0,14 \pm 0,00$                                    | $0,20 \pm 0,00$                                    | $0,19 \pm 0,03$                                    | $0,19 \pm 0,01$                                    | 37                      |
| Costas    | $0,17 \pm 0,02$                        | $0,17 \pm 0,02$                                    | $0,21 \pm 0,03$                                    | $0,27 \pm 0,01$                                    | $0,26 \pm 0,04$                                    | 53                      |

Através da Tabela 9 verifica-se que a resistência elétrica dos transferes condutores não varia muito ao fim das 40 lavagens, variando, no máximo em cerca de 53 %. Em termos do aspeto destes após as lavagens realizadas não há nada de relevante a apontar.



## 5 Conclusões

O estudo feito aos substratos têxteis que farão parte do substrato do sensor permitiu determinar que as melhores superfícies para a estampagem de uma tinta condutora foram o não-tecido viscoso e a malha algodão, obtendo-se valores de resistência elétrica entre 100 e 500  $\Omega \text{ cm}^{-1}$ . Estes são valores bons para a resistência num sensor, pois esta não deve ser muito elevada, pois pode impedir a condução do sinal, nem muito baixa, pois torna mais difícil de detetar as variações da propriedade que se está a determinar, podendo ainda haver maior incidência de ruído no sinal obtido. Na malha PA+EA, a tinta de carbono é estampada na sua superfície, no entanto fica com uma resistência elétrica demasiado elevada. Posteriormente, estes substratos com a malha PA+EA teriam de ser testados com a tinta que vai ser usada no sensor ou então por outra técnica de estampagem da tinta, de modo a perceber se a resistência elétrica continua elevada. Caso não resulte, estes substratos poderiam ser utilizados como uma espécie de bolso no interior da camisola onde o sensor descartável seria colocado. Durante o período do decorrer da presente dissertação não foi possível realizarem-se mais ensaios de detecção do sinal através dos substratos preparados, tornando impossível concluir qual deles seria a melhor solução.

Em relação ao circuito condutor na camisola foi estudado um fio de cobre cuja resistência elétrica se mantinha ao fim de 40 lavagens. No entanto, com este fio seria necessário estudar outras formas alternativas de integrá-lo em substratos têxteis, visto que as formas de integração estudadas não são as mais indicadas para este fio. O fio PA revestido com prata mostrou-se pouco resistente a lavagens, sendo que a sua resistência elétrica aumentava bastante ao fim das 40 lavagens, sendo que, no melhor caso, aumentou cerca de 65 %.

Apesar de a *web* oferecer uma boa elasticidade aos substratos com as membranas, esta não é uma boa solução para esta aplicação pois não resiste às lavagens testadas, sendo que se teria de testar uma cola do mesmo tipo que fosse mais resistente a lavagens. Com este estudo, concluiu-se então que as melhores soluções para o uso de filmes/membranas de encapsulamento seriam os filmes, quando avaliado em termos de melhor resistência às lavagens. Comparando em termos de elasticidade, o melhor filme seria o filme 3, em seguida o filme 2 e o menos elástico seria o filme 1. No entanto, também ficou claro que este tipo de encapsulamento é difícil de reproduzir.

Os transferes condutores desenvolvidos foram desenhados de modo a terem três pistas paralelas, sendo que assim ficam com uma área de encapsulamento mais reduzida. A resistência elétrica destes transferes era bastante baixa, devido à tinta de prata utilizada, sendo que também não variou muito durante as lavagens, variando cerca de 53 % no pior dos casos.

Através de uma análise de custos foi possível prever o custo de aplicação dos circuitos estudados na camisola, obtendo-se os valores de 6,82 €, 11,62 € e 22,04 €, para os fios condutores, filmes de encapsulamento e transferes condutores, respetivamente. Apesar de os transferes serem a solução mais cara foram também a melhor solução em termos de resistência elétrica, resistência às lavagens e elasticidade.

Em suma, as conclusões obtidas no decorrer da presente dissertação contribuíram para o desenvolvimento do projeto no qual esta se insere, indicando soluções que se revelaram promissoras para servirem como circuito condutor. No entanto, no decorrer deste projeto, ainda há muitas conclusões a tirar até se conseguir encontrar uma solução para o substrato do sensor.

## **6 Avaliação do trabalho realizado**

### **6.1 Objetivos Realizados**

A presente dissertação teve como principal objetivo a criação de uma primeira prova de conceito de uma camisola para posterior integração de sensores. Posto isto, foram preparados e avaliados substratos têxteis para servirem como substrato de um sensor para deteção de biomarcadores de stress físico e emocional. Foi feito ainda um estudo comparativo entre técnicas que utilizam fios condutores e técnicas que utilizam tintas condutoras como circuito elétrico em substratos têxteis.

Sendo assim, apenas alguns dos objetivos traçados foram cumpridos. No final foi possível concluir qual seria a melhor opção como circuito elétrico na camisola, após a realização de alguns ensaios adequados. As conclusões relativas ao substrato do sensor ficaram aquém do esperado, pois durante o decorrer dos trabalhos realizados não foi possível realizar mais ensaios de deteção do sinal através dos candidatos a substrato do sensor. No entanto, acredito que os resultados e as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido na presente dissertação apresentam soluções importantes no âmbito do projeto em que a dissertação se insere.

### **6.2 Apreciação Final**

Em primeiro lugar é importante referir alguns dos obstáculos que atrasaram e dificultaram a realização dos trabalhos práticos. Primeiramente, a dependência de outros parceiros envolvidos no projeto para a delineação da estratégia a seguir na presente dissertação acabou por atrasar o começo dos ensaios. Os resultados sobre os substratos do sensor acabaram por ficar incompletos devido à falta de tempo para a realização de mais ensaios de deteção do sinal obtido por parte dos parceiros da Universidade Nova de Lisboa. Acabou por haver uma demora de algumas semanas para a impressão de circuitos em filmes/membranas devido à constante ocupação da máquina de estampar automática, visto que este equipamento é dos mais utilizados no CENTI. Também ocorreram alguns problemas com os transferes condutores. Nomeadamente, estes inicialmente tinham grandes dimensões para os equipamentos que a empresa tinha disponível, pelo que se tiveram de fazer alguns ajustes ao seu design, o que atrasou o começo dos ensaios relativos aos transferes.

É sempre importante referir quais os próximos passos do projeto, visto que algumas das conclusões ficaram aquém do esperado. Em relação ao substrato do sensor é necessário aguardar por mais resultados referentes à deteção do sinal obtido através dos substratos de modo a se poderem tirar mais ilações. Ao longo do desenvolvimento do projeto é preciso perceber, assim que estiverem definidas, as dimensões do PCB e da bateria, pois isto pode levar

ao desenvolvimento ou de uma cinta de utilidades militar para armazenamento destes componentes ou uma caixa de pequenas dimensões que seja removível. Depois de a camisola ter circuitos e sensor integrado vão ser necessários novos ensaios de medição da resistência evaporativa e avaliação da secagem, de modo a se poder comparar com os resultados obtidos antes de estes estarem integrados na camisola.

Por fim, penso que foi bastante positivo ter realizado a dissertação num centro tecnológico do setor Têxtil e do Vestuário. Foi uma ótima oportunidade para adquirir conhecimento num setor tão presente em Portugal, principalmente no Norte, e estar em contacto com a área de investigação e desenvolvimento, onde aprendi, acima de tudo, a melhorar a minha proatividade e espírito crítico.

## 7 Referências

- [1] G. D. Marshall Jr., “The adverse effects of psychological stress on immunoregulatory balance: applications to human inflammatory diseases,” *Immunology and Allergy Clinics of North America*, vol. 31, pp. 133-140, 2011.
- [2] C. Gonçalves, A. Ferreira da Silva, J. Gomes e R. Simões, “Wearable E-Textile Technologies: A Review on Sensors, Actuators and Control Elements,” *Inventions*, 2018.
- [3] G. Cho, S. Lee e J. Cho, “Review and Reappraisal of Smart Clothing,” *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 25, nº 6, pp. 582-617, 2009.
- [4] M. Stoppa e A. Chiolerio, “Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review,” *Sensors*, vol. 14, nº 7, pp. 11957-11992, 2014.
- [5] “Sobre o CITEVE,” CITEVE, [Online]. Available: [https://www.citeve.pt/sobre\\_nos](https://www.citeve.pt/sobre_nos). [Acedido em 4 novembro 2019].
- [6] P. H. Black, “Central nervous system-immune system interactions: psychoneuroendocrinology of stress and its immune consequences,” *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, vol. 38, nº 1, pp. 1-6, 1994.
- [7] “The Sun,” [Online]. Available: <https://www.thesun.co.uk/tech/9592019/sony-reon-pocket-air-conditioner/>. [Acedido em 21 outubro 2019].
- [8] Hexoskin, [Online]. Available: <https://www.hexoskin.com/>. [Acedido em 10 outubro 2019].
- [9] Dainese, [Online]. Available: <https://www.dainese.com/row/en/corporate/d-air/tech-specs/>. [Acedido em 22 outubro 2019].
- [10] J. Fraden, “Data Acquisition,” em *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications*, Springer, 2004, pp. 1-11.
- [11] J. Fraden, “Sensor Characteristics,” em *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications*, Springer, 2004, pp. 13-36.
- [12] “PCB Basics,” Sparkfun, [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pcb-basics/all>. [Acedido em 30 outubro 2019].
- [13] “Frequently Asked Questions,” Arduino, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ#toc2>. [Acedido em 13 novembro 2019].
- [14] Make:, [Online]. Available: <https://makezine.com/2015/01/28/body-boards/>. [Acedido em 15 outubro 2019].

- [15] L. M. Swallow, J. K. Luo, E. Siores, I. Patel e D. Dodds, "A piezoelectric fibre composite based energy harvesting device for potential wearable applications," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, nº 2, pp. 1-7, 2008.
- [16] W. Ma, X. Li, H. Lu, M. Zhang, X. Yang, T. Zhang, L. Wu, G. Cao e W. Song, "A flexible self-charged power panel for harvesting and storing solar and mechanical energy," *Nano Energy*, vol. 65, nº 104082, pp. 2211-2855, 2019.
- [17] J. A. Lee, A. E. Aliev, J. S. Bykova, M. J. d. Andrade, D. Kim, H. J. Sim, X. Lepró, A. A. Zakhidov, J.-B. Lee, G. M. Spinks, S. Roth, S. J. Kim e R. H. Baughman, "Advanced Materials," *Woven-Yarn Thermoelectric Textiles*, vol. 28, pp. 5038-5044, 2016.
- [18] R. Nayak, L. Wang e R. Padhye, "Electronic textiles for military personnel," em *Electronic Textiles: Smart Fabrics and Wearable Technology*, 2015, pp. 239-256.
- [19] R. Matheson, MIT News, 30 junho 2016. [Online]. Available: <http://news.mit.edu/2016/wireless-wearable-toxic-gas-detector-0630>. [Acedido em 22 outubro 2019].
- [20] "New Wearable Technology to Lighten the Load for Marines," Marines, [Online]. Available: <https://www.marines.mil/News/News-Display/Article/1191904/new-wearable-technology-to-lighten-load-for-marines/>. [Acedido em 13 novembro 2019].
- [21] [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=B7NxMz80iv8>. [Acedido em 22 outubro 2019].
- [22] C. Legner, U. Kalwa, V. Patel, A. Chesmore e S. Pandey, "Sweat sensing in the smart wearables era: Towards integrative, multifunctional and body-compliant perspiration analysis," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 296, pp. 200-221, 2019.
- [23] A. Martín, J. Kim, J. F. Kurniawan, J. R. Sempionatto, J. R. Moreto, G. Tang, A. S. Campbell, A. Shin, M. Y. Lee, X. Liu e J. Wang, "Epidermal Microfluidic Electrochemical Detection System: Enhanced Sweat Sampling and Metabolite Detection," *ACS Sensors*, vol. 2, nº 12, pp. 1860-1868, 2017.
- [24] M. Parrilla, R. Cánovas, I. Jeerapan, F. J. Andrade e J. Wang, "A Textile-Based Stretchable Multi-Ion Potentiometric Sensor," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 5, nº 9, pp. 996-1001, 2016.
- [25] J. Xiao, Y. Liu, L. Su, D. Zhao, L. Zhao e X. Zhang, "Microfluidic Chip-Based Wearable Colorimetric Sensor for Simple and Facile Detection of Sweat Glucose," *Analytical Chemistry*, 2019.
- [26] J. Kim, I. Jeerapan, S. Imani, T. N. Cho, A. Bandodkar, S. Cinti, P. P. Mercier e J. Wang, "Noninvasive Alcohol Monitoring Using a Wearable Tattoo-Based Iontophoretic-Biosensing System," *ACS Sensors*, vol. 1, nº 8, pp. 1011-1019, 2016.

- [27] O. Parlak, S. T. Keene, A. Marais, V. F. Curto e A. Salleo, “Molecularly selective nanoporous membrane-based wearable organic electrochemical device for noninvasive cortisol sensing,” *Science Advances*, vol. 4, nº 7, pp. 1-10, 2018.
- [28] A. J. Bandonkar, W. J. Jeang, R. Ghaffari e J. A. Rogers, “Wearable Sensors for Biochemical Sweat Analysis,” *Annual Review of Analytical Chemistry*, vol. 12, pp. 1-22, 2019.
- [29] D. Harvey, “Electrochemical Methods of Analysis,” em *Modern Analytical Chemistry*, McGraw-Hill, 1999, pp. 461-542.
- [30] M. L. Thomson, “A comparison between the number and distribution of functioning eccrine sweat glands in Europeans and Africans,” *The Journal of Physiology*, vol. 123, nº 2, pp. 225-233, 1954.
- [31] M. J. Patterson, S. D. R. Galloway e M. A. Nimmo, “Variations in regional sweat composition in normal human males,” *Experimental Physiology*, vol. 85, nº 6, pp. 869-875, 2000.
- [32] M. McCaul, T. Glennon e D. Diamond, “Challenges and opportunities in wearable technology for biochemical analysis in sweat,” *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 3, nº 1, pp. 46-50, 2017.
- [33] H. Y. Y. Nyein, W. Gao, Z. Shahpar, S. Emaminejad, S. Challa, K. Chen, H. M. Fahad, L.-C. Tai, H. Ota, R. W. Davis e A. Javey, “A Wearable Electrochemical Platform for Noninvasive Simultaneous Monitoring of Ca<sup>2+</sup> and pH,” *ACS Nano*, vol. 10, nº 7, 2016.
- [34] S. K. Tuteja, C. Ormsby e S. Neethirajan, “Noninvasive Label-Free Detection of Cortisol and Lactate Using Graphene Embedded Screen-Printed Electrode,” *Nano-Micro Letters*, vol. 10, nº 41, pp. 1-10, 2018.
- [35] X. Liu e P. B. Lillehoj, “Embroidered electrochemical sensors for biomolecular detection,” *Lab on a Chip*, vol. 16, nº 11, pp. 2093-2098, 2016.
- [36] Adafruit, [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1424>. [Acedido em 20 novembro 2019].
- [37] “CNC Conductive Fabric Circuit,” Instructables, [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/CNC-Conductive-Fabric-Circuit/>. [Acedido em 20 novembro 2019].
- [38] “LilyPad Arduino SimpleSnap,” Sparkfun, [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10941>. [Acedido em 20 novembro 2019].
- [39] I. Locher, “Technologies for system-on-textile integration,” Tese de doutoramento, ETH Zurich, 2006.

- [40] H. Qu e M. Skorobogatiy, “Conductive polymer yarns for eletronic textiles,” em *Electronic Textiles: Smart Fabrics and Wearable Technology*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 21-54.
- [41] K. Chatterjee, J. Tabor e T. K. Ghosh, “Electrically Conductive Coatings for Fiber-Based E-Textiles,” *Fibers*, vol. 7, nº 51, pp. 1-45, 2019.
- [42] “LilyPad Arduino Sensor Demo Mat,” Instructables, [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/LilyPad-Arduino-Sensor-Demo-Mat/>. [Acedido em 20 novembro 2019].
- [43] “Resistive Sensors,” How to Get What You Want, [Online]. Available: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=5689>. [Acedido em 20 novembro 2019].
- [44] J. Kastner, T. Faury, H. M. Auberhuber, T. Obermuller, H. Leichtfried, M. J. Haslinger, E. Liftinger, J. Innerlohinger, I. Gnatiuk, D. Holzinger e T. Lederer, “Silver-based reactive ink for inkjet-printing of conductive lines on textiles,” *Microelectronic Engineering*, vol. 176, pp. 84-88, 2017.
- [45] N. Karim, S. Afroj, S. Tan, P. He, A. Fernando, C. Carr e K. S. Novoselov, “Scalable Production of Graphene-Based Wearable E-Textiles,” *ACS Nano*, vol. 11, nº 12, p. 12266–12275, 2017.
- [46] M. A. Yokus, R. Foote e J. S. Jur, “Printed Stretchable Interconnects for Smart Garments: Design, Fabrication, and Characterization,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, nº 22, pp. 7967-7976, 2016.
- [47] M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke, D. Brosteaux, B. Vandeveld e J. Vanfleteren, “Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits,” *Microelectronics Reliability*, vol. 48, nº 6, pp. 825-832, 2008.
- [48] C. J. Smith e G. Havenith, “Sweat mapping in humans and applications for clothing design,” em *The Fourth International Conference on Human-Environment System*, Sapporo, Japão, 2011.
- [49] AATCC, “Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics,” em *AATCC Technical Manual*, 2010, pp. 361-365.
- [50] J. Huang, “Sweating guarded hot plate test method,” *Polymer Testing*, vol. 25, nº 5, pp. 709-716, 2006.
- [51] F. Wang, D. Lai, W. Shi e M. Fu, “Effects of fabric thickness and material on apparent ‘wet’ conductive thermal resistance of knitted fabric ‘skin’ on sweating manikins,” *Journal of Thermal Biology*, vol. 70, nº 10, pp. 69-76, 2017.
- [52] “Textiles – Physiological effects – Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test),” ISO 11092:2014, 2014.

- [53] “Vestuário - Efeitos Fisiológicos - Medição do isolamento térmico através de um manequim térmico,” NP EN ISO 15831, 2006.
- [54] “Têxteis; Ensaio de solidez dos tintos; Parte E04: Solidez dos tintos ao suor,” NP EN ISO 105-E04, 2013.
- [55] “Têxteis. Tipos de pontos de costura. Classificação e terminologia,” NP 3801, 1991.
- [56] “Têxteis; Ensaio de solidez dos tintos; Parte C08: Solidez dos tintos à lavagem doméstica e comercial utilizando um detergente de referência não fosfatado contendo um activador de branqueamento a baixa temperatura,” NP EN ISO 105-C08, 2010.
- [57] “Textiles and textile products - Smart textiles - Definitions, categorisation, applications and standardization needs,” CEN/TR 16298, 2011.
- [58] “Textiles – Test methods for nonwovens – Part 6: Absorption,” ISO 9073-6, 2000.
- [59] “Determination of the elasticity of fabrics - Part 1: Strip tests,” EN 14704-1, 2005.
- [60] C. Zeagler, M. Gandy e P. M. A. Baker, “The Assistive Wearable: Inclusive by Design,” *Assistive Technology Outcomes and Benefits*, vol. 12, pp. 11-36, 2018.
- [61] C. J. Smith e G. Havenith, “Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia,” *Journal of Applied Physiology*, vol. 111, nº 7, pp. 1391-1404, 2010.
- [62] Coolmax, “Lavtec,” [Online]. Available: <http://www.lavtecfabrics.com/pdf/coolmax.pdf>. [Acedido em 29 outubro 2019].
- [63] “Q-SKIN,” Fulgar, 7 fevereiro 2020. [Online]. Available: <https://www.fulgar.com/eng/products/q-skin>.
- [64] “Standard Test Method for Measuring the Evaporative Resistance of Clothing Using a Sweating Manikin,” ASTM F2370 - 05, 2005.



## Anexo A - Transferees condutores desenvolvidos

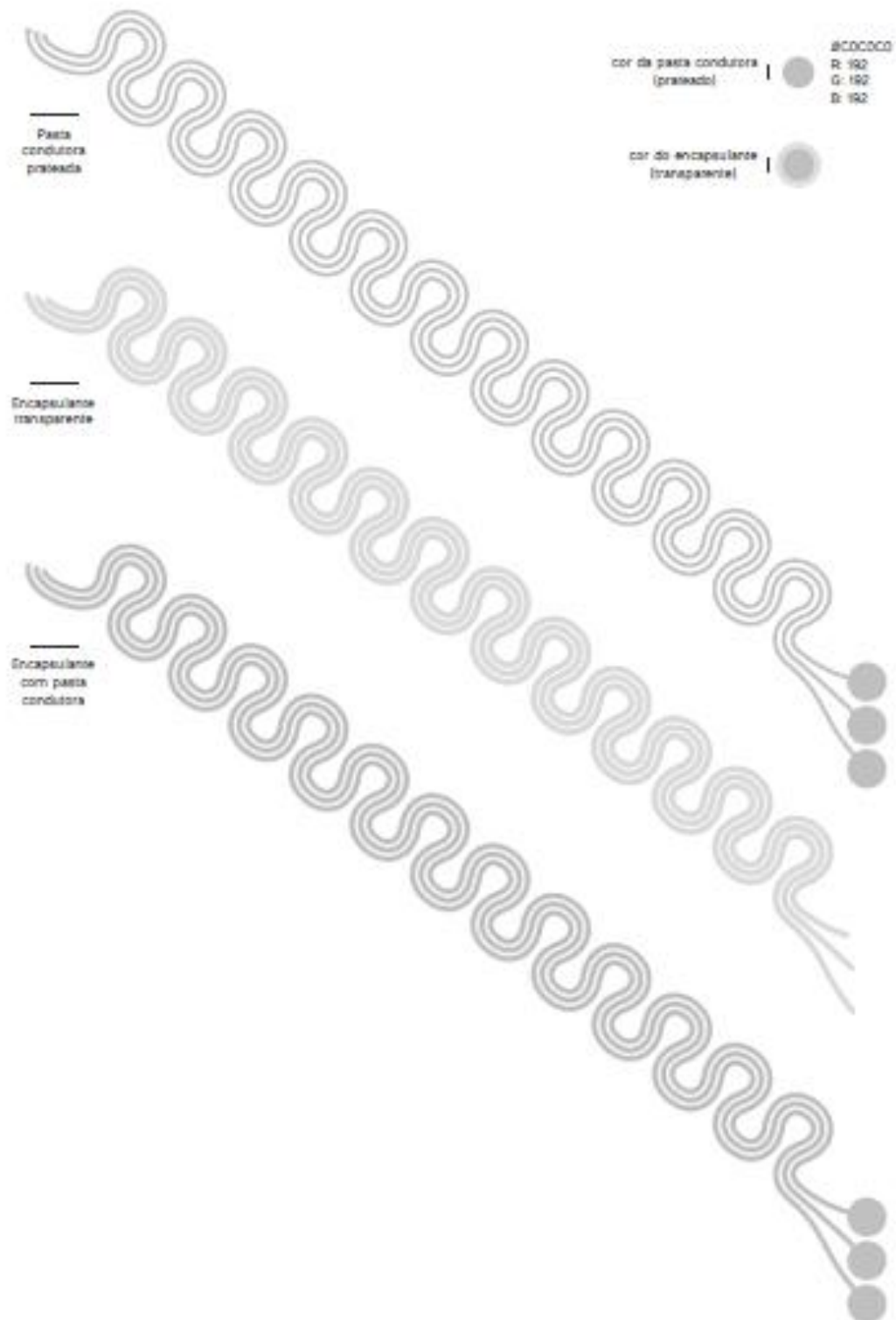


Figura 18 - Desenho dos transferes condutores desenvolvidos para servir de circuito na parte frontal da camiseta.

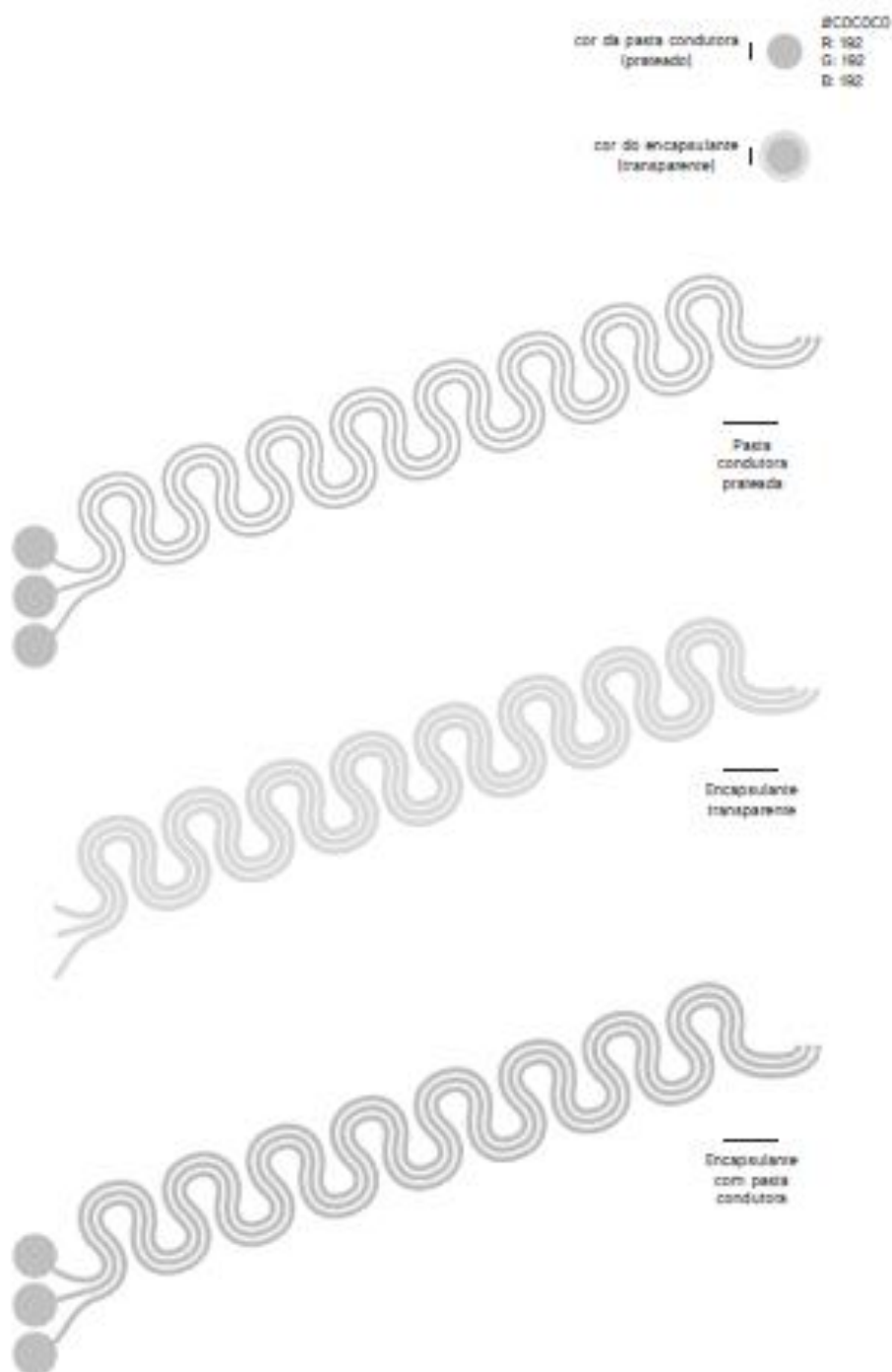


Figura 19 - Desenho dos transferes condutores desenvolvido para servir de circuito na parte traseira da camiseta.

## Anexo B - Camisola em *seamless*: estrutura, dimensões e ensaios de medição da resistência evaporativa e avaliação da secagem



Figura 20 - Camisola em *seamless* vestida em um manequim.

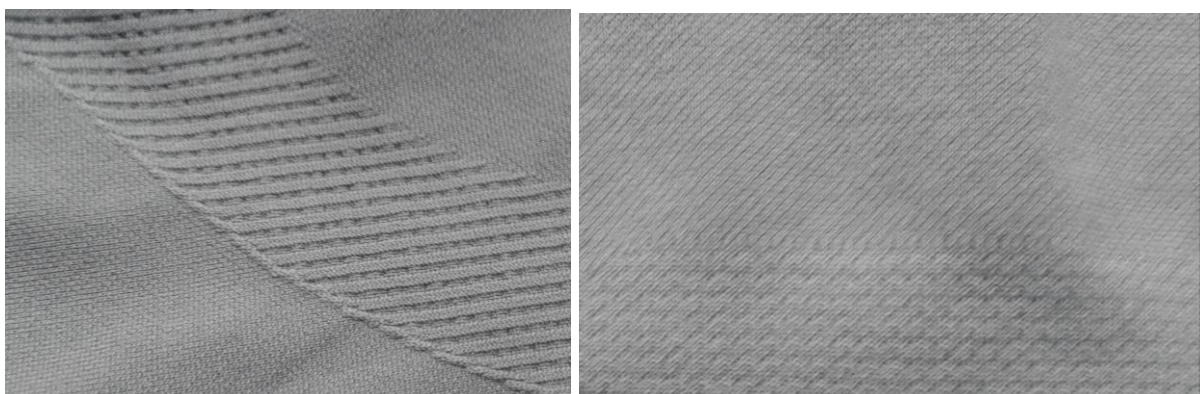


Figura 21 - Pormenor das estruturas da malha mais ventiladas. Na figura da esquerda a zona do ombro e na figura à direita a zona lombar da camisola.



Figura 22 - Pormenor da estrutura de gestão de humidade na figura à esquerda. Pormenor da zona compressível na manga da camisola.

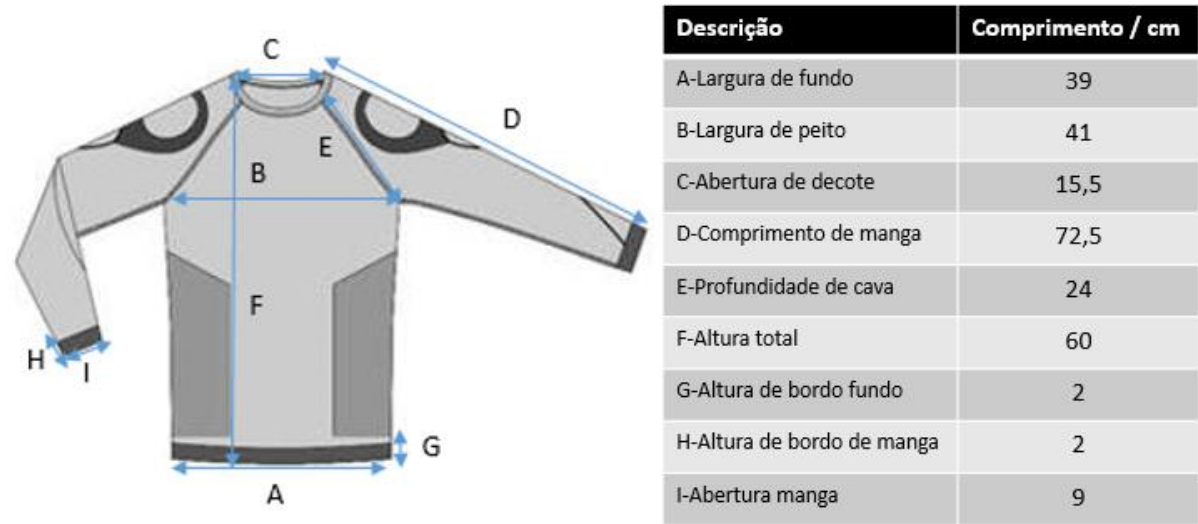


Figura 23 - Dimensões da camisola em *seamless*.

Inicialmente foi medida a resistência evaporativa da camisola em condições isotérmicas e em estado estacionário utilizando como base para os ensaios a norma ASTM F 2370 - 05 Standard Test Method for Measuring the Evaporative Resistance of Clothing Using a Sweating Manikin [64]. O equipamento utilizado foi um manequim térmico NEWTON MTNW e a câmara climática FITOCLIMA 24000 ARALAB. As condições destes ensaios realizados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Condições dos ensaios de medição da resistência evaporativa da camisola

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| Temperatura do ar / °C               | 35,61 ± 0,04 |
| Temperatura do manequim térmico / °C | 35,0 ± 0,0   |
| Humidade relativa / %                | 40,06 ± 0,15 |
| Velocidade do ar / m s <sup>-1</sup> | 0,49 ± 0,37  |
| Tempo de aquisição / min             | 30           |

Após a realização destes ensaios foi calculada a resistência evaporativa da área superficial média usando o modelo paralelo através da equação (6).

$$R_{et} = \frac{(P_s - P_a) \times A}{\lambda \left( \frac{dm}{dt} \right)} \quad (6)$$

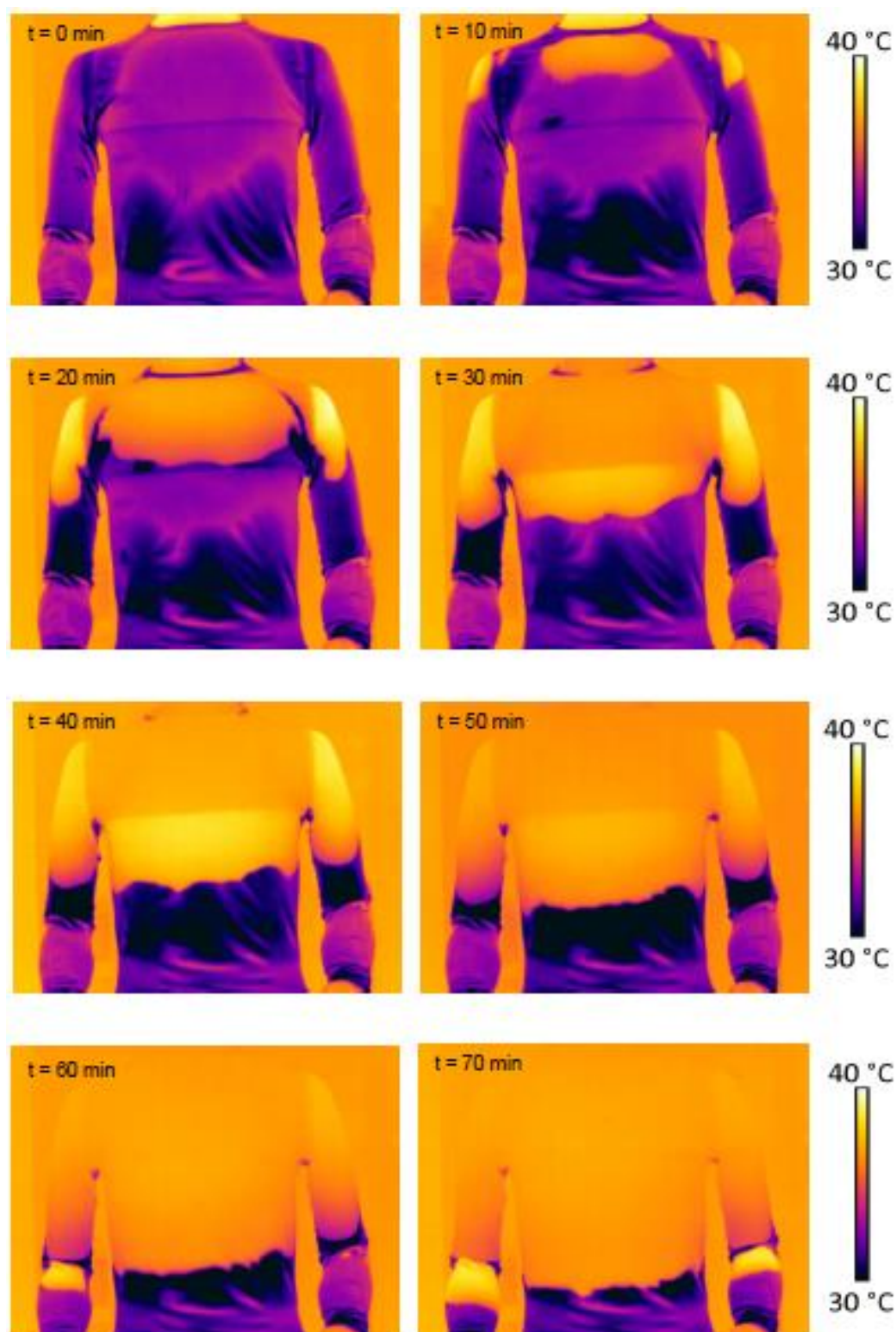
Onde  $R_{et}$  representa a resistência evaporativa, em m<sup>2</sup> Pa W<sup>-1</sup>,  $P_s$  a pressão de vapor de água superficial do manequim com sudação, em Pa,  $P_a$  a pressão de vapor de água no ar que circula sobre o vestuário, em Pa,  $A$  a área da superfície do manequim com sudação, em m<sup>2</sup>,  $\lambda$  o calor de vaporização da água na superfície, em W e  $\frac{dm}{dt}$  a velocidade de evaporação da humidade à superfície do manequim com sudação, em g min<sup>-1</sup>.

Após efetuados os cálculos obtiveram-se os valores representados na Tabela 11 para a resistência evaporativa.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de resistência evaporativa total

| Ensaio | $R_{et}$ / m <sup>2</sup> Pa W <sup>-1</sup> |
|--------|----------------------------------------------|
| 1      | 19,9                                         |
| 2      | 19,0                                         |
| 3      | 21,0                                         |
| Média  | 20 ± 1                                       |

Em paralelo com o ensaio descrito anteriormente, foi realizado outro ensaio para a avaliação da secagem da camisola via termografia com as mesmas condições da Tabela 10 com exceção do tempo de aquisição que foi de cerca de 150 min. O manequim térmico e a câmara climática foram os mesmos que no ensaio de determinação da resistência evaporativa. Adicionalmente foi utilizada uma câmara térmica FLIR A320G e os vídeos gerados pelo *software FLIR tools*. Nas figuras abaixo estão apresentadas imagens obtidas pela câmara termográfica para a parte frontal da camisola, na Figura 24, e para a parte traseira desta na Figura 25.



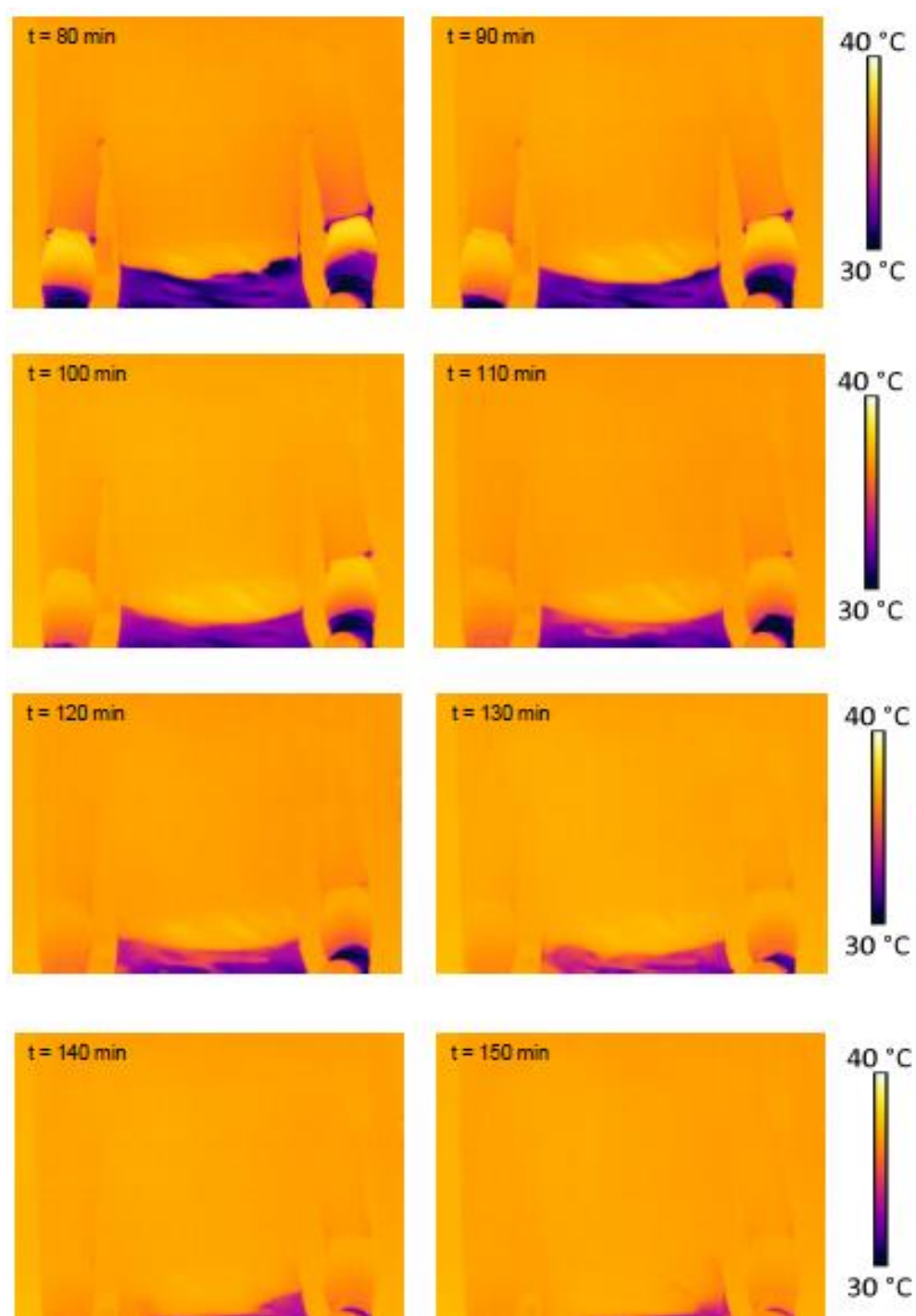


Figura 24 - Imagens da parte frontal da camisola obtidas de 10 em 10 min pela câmara termográfica.

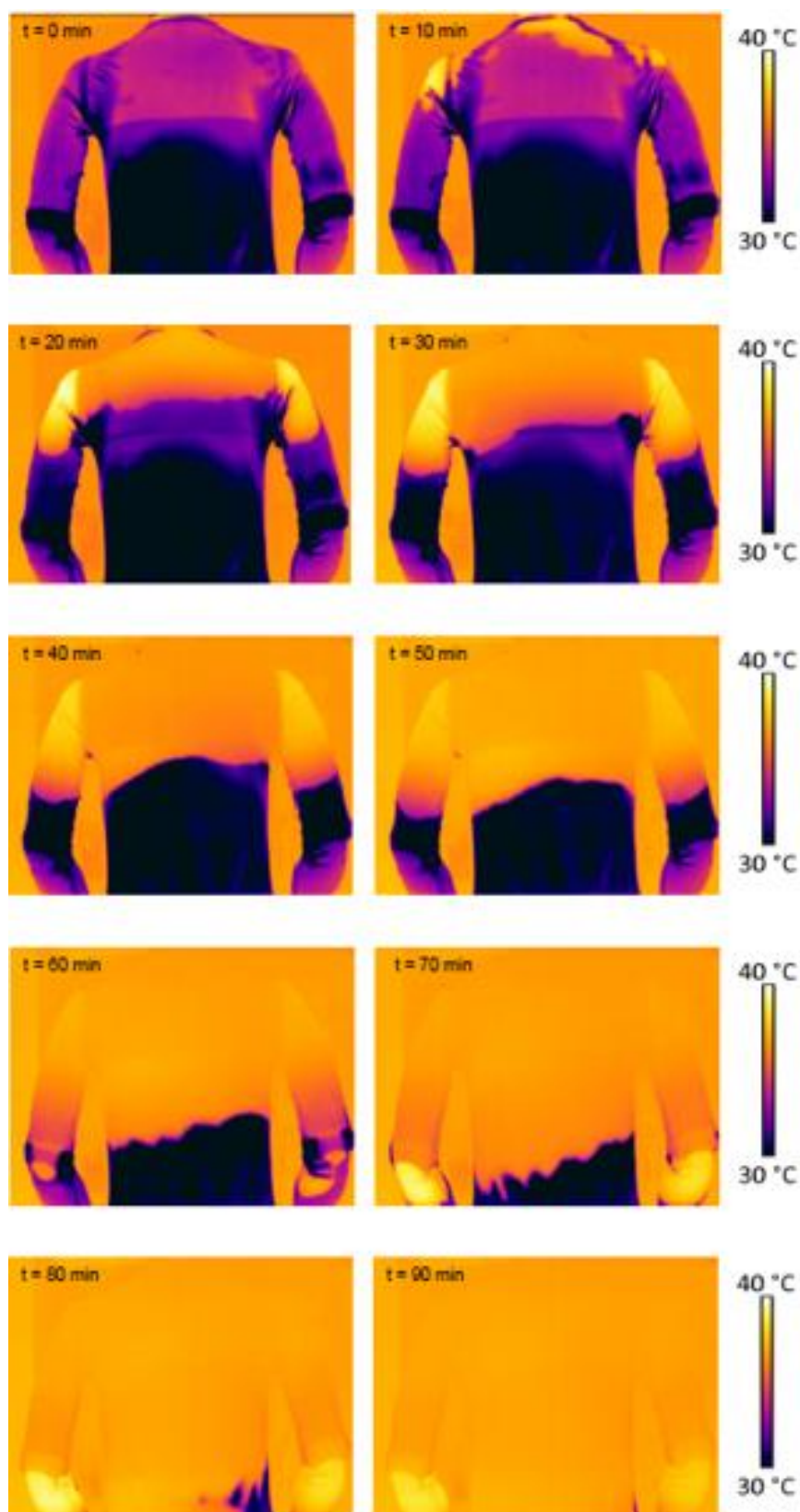


Figura 25 - Imagens da parte traseira da camisola obtidas de 10 em 10 min pela câmara termográfica.

## Anexo C - Diferentes técnicas de voltametria

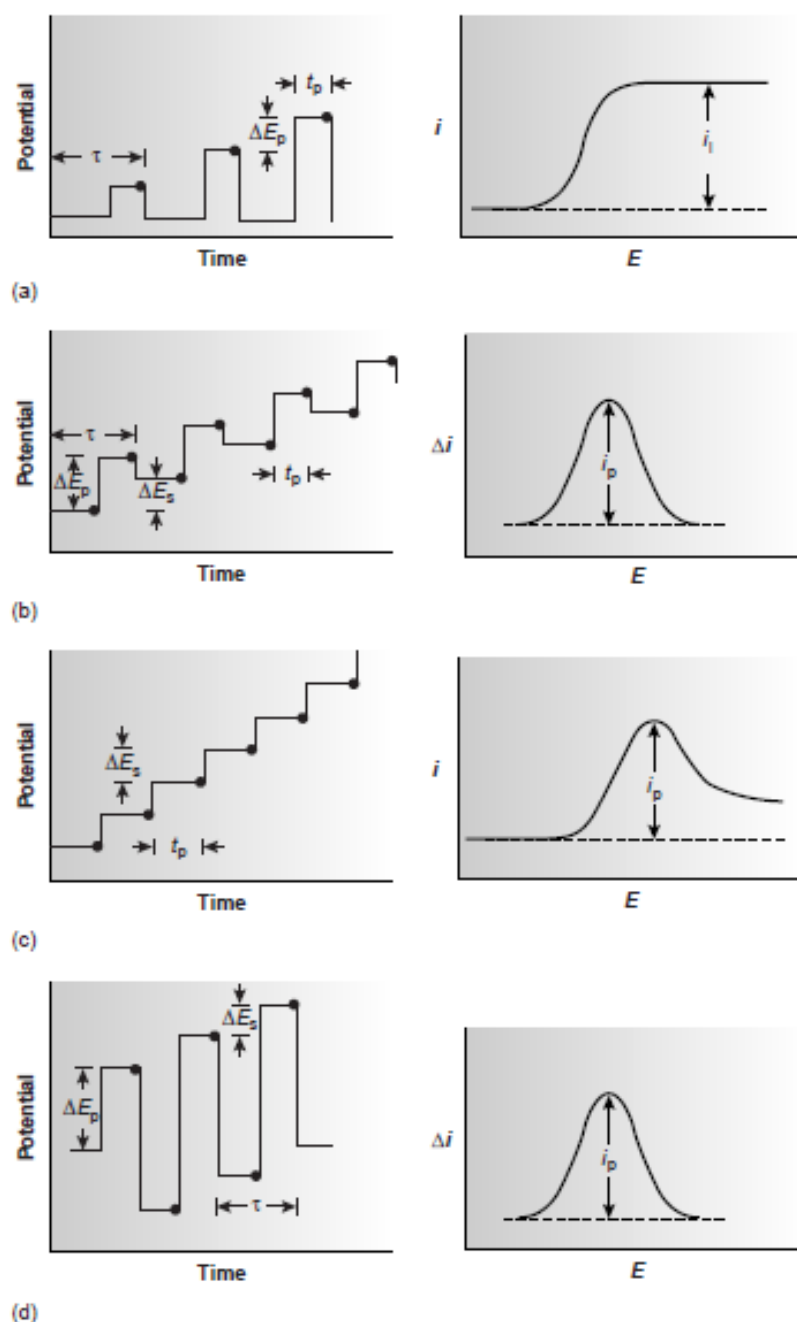


Figura 26 - Variação do potencial ao longo do tempo e respetivos voltamogramas obtidos com resposta para as diferentes técnicas de voltametria: a) Voltametria de pulso normal, b) Voltametria de pulso diferencial, c) Voltametria em escada e d) Voltametria de onda quadrada [29].



## Apêndice A - Equipamentos utilizados

Neste apêndice encontram-se imagens dos equipamentos utilizados na elaboração da presente dissertação que estão descritos no capítulo 3 sobre Materiais e Métodos.

### A.1 Mesa de estampar plana



Figura 27 - Mesa de estampar utilizada na estampagem de retângulos  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  nos materiais candidatos a substrato do sensor.

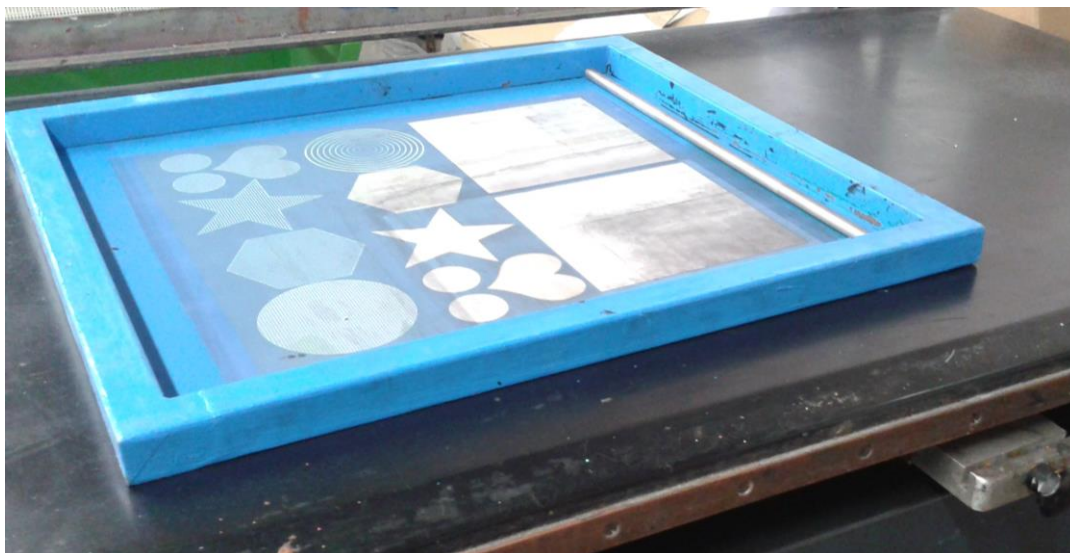


Figura 28 - Quadro de estamparia e vara de metal utilizados na estampagem dos candidatos a substratos do sensor.

### A.2 Secadeiras



Figura 29 - Secadeira S.roque com tapete rolante utilizada na secagem após estampagem dos possíveis substratos do sensor.



Figura 30 - Secadeira Mathis utilizada no processo de cura após o processo de secagem dos materiais candidatos a substrato do sensor.

### A.3 Prensa



Figura 31 - Prensa macpi utilizada no processo de laminação para a criação dos candidatos a substrato do sensor, para a adesão dos filmes/membranas e dos transferes.

#### A.4 Máquina utilizada para simulação de lavagens

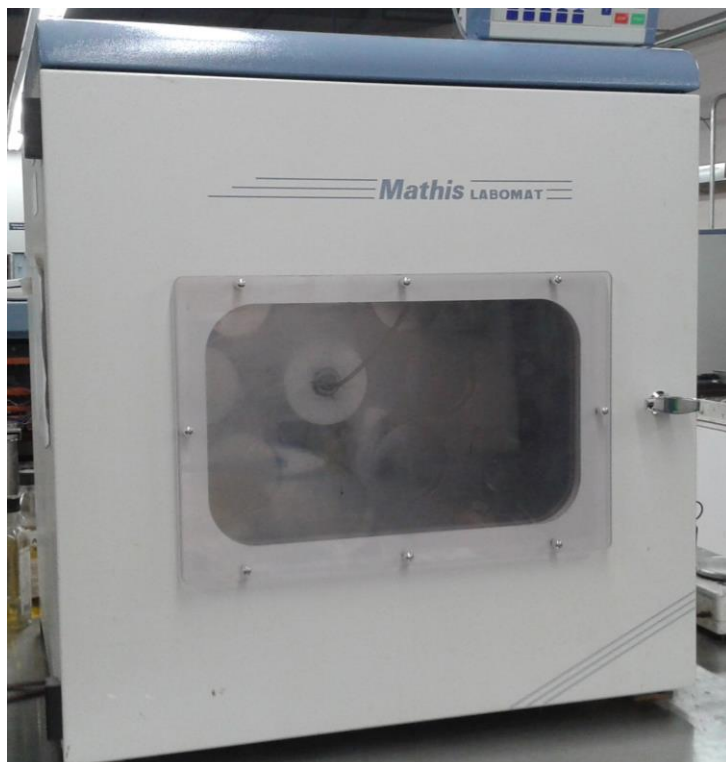


Figura 32 - Mathis Labomat FA utilizada para a simulação das lavagens.

#### A.5 Máquinas de costura



Figura 33 - Máquina de costura Consew utilizada para a costura em ponto preso.



Figura 34 - Máquina de costura Juki utilizada para a costura em zig-zag.



Figura 35 - Máquina de costura Willcox and Gibbs utilizada para a costura por ponto cadeia.

#### A.6 Máquina de estampar automática



Figura 36 - Máquina de estampar automática utilizada na estampagem dos circuitos em filmes/membranas de encapsulamento no CENTI.

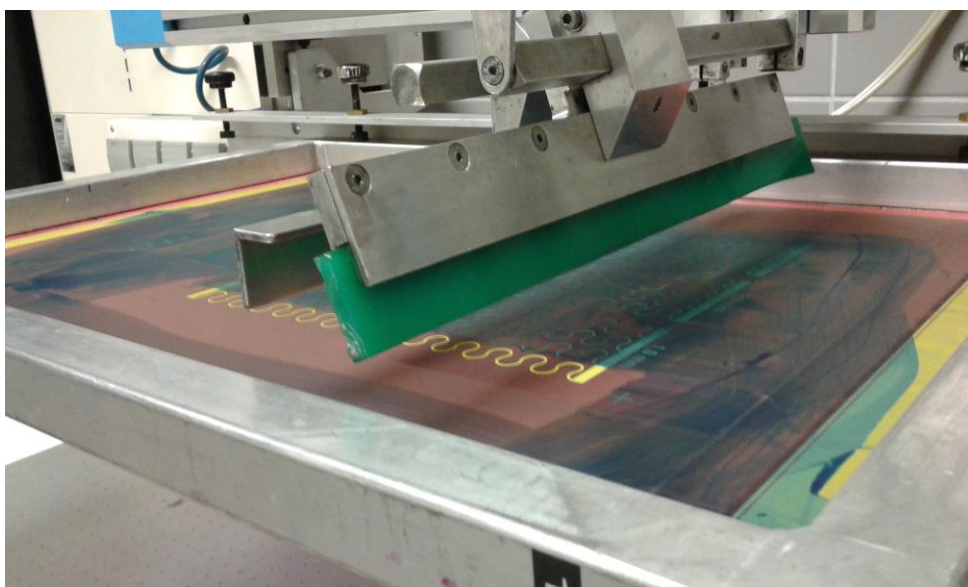


Figura 37 - Quadro de estampagem do circuito e racla que arrasta a tinta.

#### A.7 Estufa



Figura 38 - Estufa utilizada na secagem das amostras estampadas no CENTI.

#### A.8 Máquina para aplicação de botões *snap*



Figura 39 - Máquina utilizada para aplicação dos botões *snap* nos circuitos impressos nos filmes/membranas e nos transferes condutores.

#### A.9 Balança de precisão



Figura 40 - Balança de precisão utilizada nas pesagens dos candidatos a substrato do sensor.

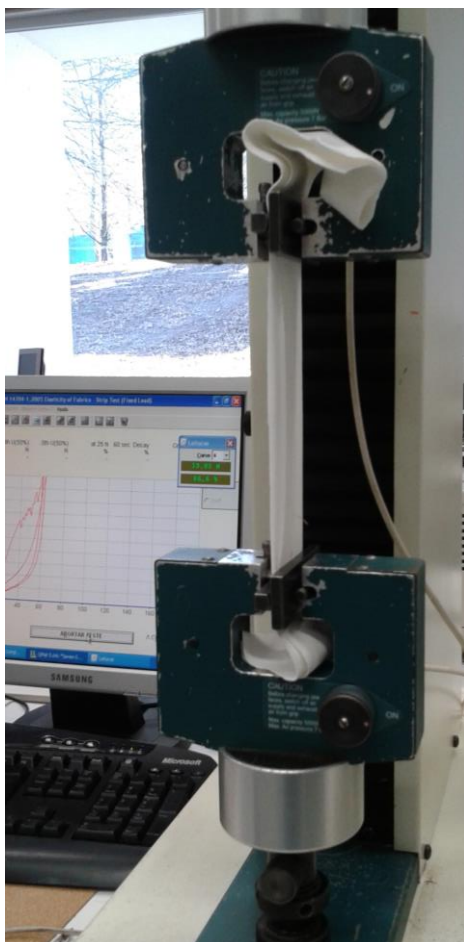


Figura 41 - Equipamento utilizado para o ensaio de avaliação da extensão dos substratos com meios condutores.

## Apêndice B - Efeito das lavagens

Neste apêndice encontram-se imagens do antes e após as lavagens dos substratos onde foram detetadas diferenças notórias.



Figura 42 - Imagens do substrato composto pela membrana 2 e a cola *web*. À esquerda antes das lavagens e à direita após 40 lavagens.



## Apêndice C - Análise de custos de aplicação dos circuitos na camisola

De modo a ser possível comparar as diferentes opções para a camisola desenvolvida nesta dissertação optou-se por também comparar os custos associados à sua produção. Nesta secção são apenas contabilizados os custos associados aos circuitos, pois os restantes componentes da camisola serão os mesmos. Na Tabela 12 encontram-se os valores utilizados no cálculo dos custos associados à produção de uma camisola com o fio de cobre costurado, que já foi escolhido como a melhor opção em termos de fios condutores. O custo de mão de obra da costura foi assumido 20 € hr<sup>-1</sup> com base em preços praticados no CITEVE.

Tabela 12 - Valores usados no cálculo da previsão dos custos da camisola com fios condutores

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| Custo de mão de obra (C) / € hr <sup>-1</sup>            | 20   |
| Tempo de costura (t) / min                               | 20   |
| Custo fio de cobre (C <sub>f</sub> ) / € m <sup>-1</sup> | 0,07 |
| Comprimento circuito frente (L <sub>f</sub> ) / m        | 0,33 |
| Comprimento circuito costas (L <sub>c</sub> ) / m        | 0,22 |
| Consumo de fio por metro de costura                      | 1,4  |

Com os dados presentes na Tabela 12 calculou-se o custo de aplicação dos fios na camisola através da equação (4). O valor obtido foi de 6,82 € por uma camisola.

$$C \times t + 1,4 \times 3 \times L_f \times C_f + 1,4 \times 3 \times L_c \times C_f \quad (4)$$

Na Tabela 13 encontram-se os valores utilizados no cálculo dos custos associados à produção de uma camisola com os filmes de encapsulamento, sendo que todos têm um preço semelhante. O custo de mão de obra da impressão dos circuitos foi assumido 26 € hr<sup>-1</sup> com base em preços praticados por empresas que têm equipamento semelhante ao usado. Para a laminação foi considerado um custo de mão de obra de 20 € hr<sup>-1</sup>, com um tempo de produção de 15 min tanto para a impressão dos circuitos como para a laminação.

Tabela 13 - Valores usados no cálculo da previsão dos custos da camisola com filmes/membranas de encapsulamento

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| Custo de impressão ( $C$ ) / € hr <sup>-1</sup>   | 26    |
| Tempo de produção ( $t$ ) / min                   | 15    |
| Custo de laminação ( $C_l$ ) / € hr <sup>-1</sup> | 20    |
| Custo filme ( $C_f$ ) / € m <sup>-2</sup>         | 1,50  |
| Área ocupada ( $A$ ) / m <sup>2</sup>             | 0,041 |

O valor da área ocupada pelos filmes foi calculado com base nos circuitos impressos. Na frente existem três circuitos com 33 cm de comprimento e 2,5 cm de largura, enquanto que na zona lombar estes circuitos têm a mesma largura e um comprimento de 22 cm. Com os dados da Tabela 13 calculou-se o custo de aplicação dos filmes de encapsulamento numa camisola através da equação (5), obtendo-se o valor de 11,62 €.

$$C \times t + C_l \times t + 2 \times A \times C_f \quad (5)$$

De acordo com a empresa que forneceu os transferes condutores, cada um deles custa cerca de 7,69 €. Visto que a camisola tem um transfere na frente e outro nas costas e assumindo também um custo de laminação de 20 € hr<sup>-1</sup> com um tempo de produção de 10 min, obtém-se um custo para a aplicação dos transferes na camisola de 22,04 €.

## Apêndice D - Ensaios de avaliação da extensão dos substratos com circuitos condutores

Com estes ensaios foi possível perceber qual a extensão máxima sofrida pelo substrato e qual o crescimento deste em relação ao tamanho original, ambos em %, após aplicação de uma força de 25 N. A malha PA+EA utilizada apresenta diferente elasticidade nas diferentes direções desta. Normalmente, uma malha estende mais, para a mesma força aplicada, quando estendida no sentido das colunas. Posto isto, foi testada uma amostra de cada substrato com as melhores opções para circuito condutor segundo o ensaio descrito no capítulo 3 - Materiais e Métodos. Um dos substratos tinha o fio de cobre costurado por ponto preso, outro com um transfere condutor e mais três com cada um dos três filmes estudados, tudo aplicado no sentido das colunas. Na Tabela 14 encontram-se apresentados os dados obtidos neste ensaio para cada substrato.

Tabela 14 - Valores obtidos para a extensão e crescimento das amostras da malha PA+EA com os circuitos condutores

| Substrato    | Extensão máxima / % | Crescimento / % |
|--------------|---------------------|-----------------|
| Malha PA+EA  | 141                 | 25              |
| Fio de cobre | 82                  | 10              |
| Transfere    | 99                  | 15              |
| Filme 1      | 14                  | 2               |
| Filme 2      | 63                  | 14              |
| Filme 3      | 80                  | 12              |

Pela análise da Tabela 14 verifica-se que, de modo geral, os substratos que estendem mais também são os que apresentam uma percentagem de crescimento maior. Os valores relativos ao fio de cobre não devem ser tidos em conta, pois a costura não resistiu a este teste. Entre os filmes, o filme 1 tem claramente menor elasticidade que os restantes, o que já era esperado devido ao facto de apresentar maior espessura. Comparando os restantes substratos vê-se que têm todos uma percentagem de crescimento semelhante, no entanto o transfere apresenta uma maior extensão máxima. O transfere estende mais principalmente devido ao facto de a área de encapsulamento ser menor quando comparada com a área ocupada pelos filmes.