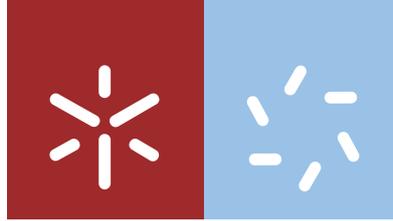


**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Dânia Catarina Costa Alpoim Menezes

**Desenvolvimento de métodos expeditos  
para a caracterização das propriedades  
finais de diferentes substratos**



**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Dânia Catarina Costa Alpoim Menezes

**Desenvolvimento de métodos expeditos  
para a caracterização das propriedades  
finais de diferentes substratos**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Técnicas de Caracterização e Análise Química

Trabalho realizado sob orientação da  
**Engenheira Ana Rute da Silva Sampaio e Portela**  
e da  
**Professora Doutora Maria Gabriela Coutinho  
Soares Lema Botelho**

## DECLARAÇÃO

Nome: Dânia Catarina Costa Alpoim Menezes

Endereço eletrónico: daniamenezes@hotmail.com Telefone: 915453789

Número do Bilhete de Identidade: 14575505

Título da dissertação:

Desenvolvimento de métodos expeditos para a caraterização das propriedades finais de diferentes substratos

Orientadores:

Engenheira Ana Rute da Silva Sampaio e Portela

Professora Doutora Maria Gabriela Coutinho Soares Lema Botelho

Ano de conclusão: 2017

Designação do Mestrado:

Mestrado em Técnicas de Caraterização e Análise Química

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA DISSERTAÇÃO

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura:

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação de mestrado não representa apenas o resultado de várias horas de trabalho, estudo e reflexão, mas também o culminar de um objetivo a que me propus. A concretização deste desafio contou com importantes apoios e incentivos aos quais estarei eternamente grata.

O meu especial agradecimento à minha orientadora Ana Rute Sampaio, por todo o apoio, pelo tempo disponibilizado, pelo saber que me transmitiu, pelas suas críticas e opiniões e pela colaboração no solucionar das adversidades surgidas ao longo do trabalho.

À minha coorientadora Gabriela Botelho, pela competência científica, pelo incentivo a cada momento e pela disponibilidade que sempre demonstrou.

À Maria João Lopes, por todo o conhecimento que me transmitiu, pela ajuda prestada ao longo de todo o trabalho desenvolvido e pela disponibilidade demonstrada no sentido de esclarecer todas as dúvidas que foram surgindo.

Ao CeNTI, pela oportunidade dada para a realização deste trabalho e por me terem facultado as condições, equipamentos e materiais necessários. Gostaria ainda de agradecer a toda a equipa do CeNTI, por todo o apoio dado durante a realização deste projeto, pelos conhecimentos transmitidos e pelo espírito de companheirismo demonstrado.

Às minhas colegas que estiveram comigo no CeNTI e aos meus amigos pelo incentivo e companheirismo demonstrados ao longo desta experiência.

Por fim, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, por me terem proporcionado sempre todas as condições para a minha evolução cívica e académica. Mas acima de tudo, pela confiança depositada em mim, pelo incentivo que me deram perante os desafios e pela forma como ao longo deste tempo, tão bem, souberam ajudar-me.



## **RESUMO**

As propriedades finais e o desempenho dos materiais são características apreciadas por uma sociedade cada vez mais preocupada com o conforto e com fatores de segurança dos materiais com os quais contactam no seu dia-a-dia. Assim, este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de métodos expeditos que permitissem avaliar o desempenho de diferentes materiais em termos de sensação térmica ao toque e de retardância à chama.

No que respeita à perceção térmica ao toque, à temperatura ambiente, foram efetuados estudos qualitativos com recurso a voluntários. Com o objetivo de desenvolver uma escala de avaliação da perceção térmica, tomou-se como ponto de partida a validação de uma ferramenta de análise sensorial. Foram identificados pontos de melhoria e o quadro desenvolvido assumiu novos valores de intensidade de perceção térmica para um conjunto mais alargado de materiais de referência. A efusividade térmica é a propriedade que mais contribui para a diferenciação dos materiais ao nível da perceção térmica. Neste estudo, estabeleceu-se uma relação logarítmica entre os valores de intensidade térmica da escala de perceção e os valores de efusividade térmica dos materiais. Através desta relação, foram calculados os valores teóricos de intensidade térmica para amostras de ABS e PP, a partir dos seus valores de efusividade térmica. Os valores calculados foram semelhantes aos obtidos na avaliação com base no quadro desenvolvido, evidenciando a relação logarítmica entre a efusividade térmica e a perceção da temperatura ao toque dos materiais. Os estudos de desempenho térmico de amostras poliméricas e cerâmicas com propriedades de reflexão no IV revelaram que estas transmitem uma sensação menos quente ao toque e sofrem um aumento menor de temperatura do que os respetivos controlos, em situação de exposição IV e solar. Estes resultados estão relacionados com os valores elevados de refletância no IV e de baixa emissividade observados para estas amostras.

Por fim, na avaliação do desempenho da cortiça em termos de retardância à chama, não se conseguiu distinguir o comportamento ao fogo entre as amostras aditivadas e os seus controlos, uma vez que o método implementado permite apenas atribuir classe E. Para classificações superiores, teria que se efetuar ensaios que requerem equipamento específico, tendo sido a principal limitação para a implementação de outros métodos de ensaio.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Perceção térmica, fluxo de calor, efusividade térmica, reflexão ao IV, retardância à chama



## **ABSTRACT**

The final properties and performance of the materials are characteristics appreciated by a society increasingly concerned with comfort and adequate safety factors of the materials with which they contact in their daily life. The aim of this study was the development of expeditious methods to evaluate the performance of materials in terms of thermal comfort and flame retardancy.

Regarding the temperature perception, at room temperature, qualitative studies were carried out with the use of volunteers. With the objective of developing a scale of evaluation of the thermal perception to the touch, the validation of a sensorial analysis tool was taken as starting point. Improvement points were identified and the developed framework assumed new values of thermal perception intensities for a broader set of reference materials. The thermal effusivity is the property that contributes most to the differentiation of the materials with respect to thermal perception. In this study, a logarithmic relation was established between the thermal intensity values of the perception scale and the thermal effusivity values of the materials. Through this logarithmic relation, the theoretical values of thermal perception intensity for the ABS and PP samples were calculated from their thermal effusivity values. The calculated values were similar to those obtained when the evaluation was performed with the developed framework, evidencing the logarithmic relation between the thermal effusivity and the temperature perception to the touch of the materials. The thermal performance studies of polymeric and ceramic samples with IR reflective properties revealed that the samples transmit a milder sensation to the touch and suffer a lower temperature increase than the respective controls, in situation of IR and solar exposure. These results are related to the high values of reflectance in the IR and low emissivity observed for these samples.

Finally, in the evaluation of the cork performance in terms of flame retardancy, it was not possible to distinguish the fire behavior between the additivated samples and their controls, since the implemented method only allows to assign the class E. For higher classifications, another tests, which require specific equipment, would have to be carried out, and this has been the main limitation for the implementation of other testing methods.

## **KEYWORDS**

Thermal perception, heat flux, thermal effusivity, IR reflection, flame retardancy



# ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| Agradecimentos.....  | iii |
| Resumo.....  | v   |
| Abstract.....  | vii |
| Índice de Figuras .....  | xi  |
| Índice de Tabelas .....  | xix |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....   | xxi |
| 1. Introdução .....  | 3   |
| 1.1. Enquadramento e apresentação do projeto .....   | 3   |
| 1.2. O CeNTI .....   | 4   |
| 1.3. Objetivos da dissertação .....  | 4   |
| 1.4. Estrutura da dissertação .....  | 5   |
| 2. Conforto térmico e sensorial.....   | 9   |
| 2.1 Estado da arte .....   | 9   |
| 2.1.1 Conceitos teóricos gerais do sistema sensorial .....   | 9   |
| 2.1.2 Correlação da perceção térmica com as propriedades intrínsecas dos materiais .....   | 12  |
| 2.1.3 Métodos de avaliação da perceção térmica.....  | 21  |
| 2.2 Materiais e métodos .....  | 26  |
| 2.2.1 Materiais .....  | 26  |
| 2.2.2 Métodos de caracterização e avaliação da perceção térmica de materiais à temperatura ambiente .....  | 29  |
| 2.2.3 Métodos de caracterização e avaliação da perceção térmica e da temperatura de materiais em situação de exposição à radiação IV e solar ..... | 33  |
| 2.3 Análise e discussão dos resultados .....   | 39  |
| 2.3.1 Estudo da perceção térmica à temperatura ambiente .....  | 39  |
| 2.3.2 Validação de uma ferramenta de análise sensorial.....  | 55  |
| 2.3.3 Proposta de método para avaliar e classificar os materiais de acordo com a sensação térmica ao toque.....                                    | 58  |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 2.3.4    | Correlação da percepção térmica com as propriedades térmicas dos materiais .....                    | 65  |
| 2.3.5    | Determinação da refletância solar total (TSR) .....   | 69  |
| 2.3.6    | Determinação da emissividade hemisférica total.....   | 74  |
| 2.3.7    | Determinação da temperatura superficial de materiais expostos à radiação IV e à radiação solar..... | 77  |
| 2.3.8    | Estudo da percepção térmica de materiais expostos à radiação IV e à radiação solar                  | 89  |
| 3.       | Retardância à chama.....  | 97  |
| 3.1      | Estado da arte .....  | 97  |
| 3.1.2    | Conceitos teóricos gerais .....   | 97  |
| 3.1.3    | Enquadramento da norma ISO EN 13501-1 como ferramenta de classificação dos materiais ao fogo .....  | 99  |
| 3.2      | Materiais e métodos .....   | 102 |
| 3.2.1    | Materiais .....   | 102 |
| 3.2.2    | Métodos .....   | 102 |
| 3.3      | Análise e discussão dos resultados .....  | 104 |
| 3.3.1    | Avaliação de amostras de cortiça pelo ensaio baseado na norma EN ISO 11925-2                        | 104 |
| 4.       | Conclusão geral.....  | 109 |
| 4.1      | Sínteses e conclusões.....  | 109 |
| 4.2      | Sugestões de trabalhos futuros .....  | 112 |
| 5.       | Referências Bibliográficas .....  | 115 |
| Anexo 1: | Tratamento de resultados dos ensaios de percepção térmica .....                                     | 119 |
| Anexo 2: | Tratamento estatístico de resultados.....   | 121 |
| Anexo 3: | Validação de uma ferramenta de análise sensorial .....  | 122 |
| Anexo 4: | Estudo estatístico de análise de significância .....  | 125 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Constituição da pele (adaptado de [5]).   | 11 |
| Figura 2.2. Gama de temperatura a que os recetores de frio, os recetores de calor e os nociceptores se encontram ativos (adaptado de [2]).  | 12 |
| Figura 2.3 Esquema do sistema de medição tátil (adaptado de [32]).  | 24 |
| Figura 2.4 Esquema do dispositivo (adaptado de [9]).  | 25 |
| Figura 2.5 Programa de varrimento utilizado para determinação do valor de $C_p$ , pelo método StepScan DSC.   | 32 |
| Figura 2.6 Espectrofotómetro UV-Vis-NIR equipado com uma esfera integradora.  | 33 |
| Figura 2.7 Padrão de refletância (PTFE).  | 34 |
| Figura 2.8 Imagem da representação gráfica da Irradiação Espectral Normal Direta (linha Sólida) e Irradiação Espectral Hemisférica em Superfície Inclinada a $37^\circ$ (linha tracejada).  | 35 |
| Figura 2.9 Emissometer modelo AE1.  | 36 |
| Figura 2.10 Instalação experimental com um suporte para a lâmpada IV e um suporte em XPS para colocar as amostras a serem irradiadas.   | 38 |
| Figura 2.11 Sensação fria ao toque de amostras de PA, ABS, PC/ABS e PP, com base numa escala de perceção térmica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,18 para $(N-1)=12$ graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.   | 40 |
| Figura 2.12 Sensação fria ao toque de duas amostras de base PP prensada cuja matriz polimérica foi incorporada com 2,5% de Si-C e com 2,5% de óxido de alumínio e do respetivo controlo, com base numa escala de perceção térmica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,36 para $(N-1)=7$ graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. | 42 |
| Figura 2.13 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra na qual foram incorporados PCM's (15%) na matriz polimérica de base PP e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).   | 43 |
| Figura 2.14 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra em que foram incorporados CNTs (6%) na matriz polimérica de base PP e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.15 Sensação fria ao toque de duas amostras de base PP incorporadas com 6% e 10% de CNT's e o respetivo controlo, com base numa escala de perceção, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,36 para (N-1)=7 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.....  | 44 |
| Figura 2.16 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP em que foram incorporadas nanopartículas de grafite (20%) na matriz polimérica e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). ....   | 45 |
| Figura 2.17 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP na qual foram incorporadas nanopartículas de grafeno (1,5%) e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).....   | 45 |
| Figura 2.18 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP aditivadas com 10% de CB e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita)....   | 46 |
| Figura 2.19 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de PP prensada e uma amostra em que foi incorporado nitreto de boro (40%) na matriz polimérica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).....  | 46 |
| Figura 2.20 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de PP prensada e uma amostra de base PP, a qual foi incorporada com nitreto de boro (40%) na matriz polimérica, a uma temperatura de 50 °C, sem visualização das amostras. ....  | 47 |
| Figura 2.21 Sensação fria ao toque de amostras, cada uma incorporada com 20% de grafite, 1,5% de grafeno, com 40% de nitreto de boro e 10% CB, na matriz polimérica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita), com base numa escala de perceção térmica. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. .... | 48 |
| Figura 2.22 Frequência relativa de sensação fria ao toque de um grade polimérico de base PA comercial e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). ....  | 49 |
| Figura 2.23 Frequência relativa de sensação fria ao toque de um grade polimérico de base PA comercial e do respetivo controlo, sem visualização das amostras, a uma temperatura de 50 °C.....   | 49 |
| Figura 2.24 Sensação quente ao toque de três amostras de revestimento cerâmico submetidas a diferentes condições de produção/funcionalização e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita), com base numa escala de perceção. Incerteza calculada  |    |

|   |    |
|---|----|
| para um valor de t-student de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. ....  | 51 |
| Figura 2.25 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra cerâmica funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).....   | 52 |
| Figura 2.26 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). ....   | 52 |
| Figura 2.27 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra cerâmica funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).....   | 53 |
| Figura 2.28 Frequência relativa de sensação quente ao toque de duas amostras cerâmicas funcionalizadas com diferentes tipos de tratamento, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). ....   | 54 |
| Figura 2.29 Valores médios de perceção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de madeira envernizada, cerâmica e espuma, numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,10 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.  | 56 |
| Figura 2.30 Valores médios de perceção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PA, PP e ABS, numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,10 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. ....   | 57 |
| Figura 2.31 Esquematização dos quadros de referência de análise sensorial. ....   | 60 |
| Figura 2.32 Valores médios da perceção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra cerâmica, madeira envernizada e espuma, numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original e o desenvolvido. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. .... | 61 |
| Figura 2.33 Valores médios da perceção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PA, PP e ABS, numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original e o desenvolvido. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.....                         | 62 |
| Figura 2.34 Valores médios da perceção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra cerâmica, madeira envernizada e espuma,   |    |

|  |    |
|--|----|
| numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.....  | 63 |
| Figura 2.35 Correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o quadro desenvolvido com as intensidades atribuídas a esses mesmos materiais na escala do método desenvolvido. A linha contínua diz respeito à correlação sem qualquer ajuste e a linha a tracejado corresponde ao ajuste dos valores segundo uma linha de tendência logarítmica. ....     | 67 |
| Figura 2.36 Previsão da correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o quadro desenvolvido com as intensidades atribuídas a esses mesmos materiais após um ajuste na escala. A linha contínua diz respeito à correlação sem qualquer ajuste e a linha a tracejado corresponde ao ajuste dos valores segundo uma linha de tendência logarítmica. .... | 68 |
| Figura 2.37 Comparação dos valores médios de percepção térmica para a amostra de PP e ABS segundo o novo quadro de referências e do valor estimado através da equação logarítmica de ajuste.....   | 69 |
| Figura 2.38 Representação da refletância, em % da amostra revestimento cerâmico funcionalizada #4 com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respectivo controlo 3 (linha contínua), numa gama de $\lambda$ compreendida entre 250 e 2500 nm. ....  | 70 |
| Figura 2.39 Representação da refletância, em %, de uma amostra de revestimento cerâmico funcionalizada #3 com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respectivo controlo 2 (linha contínua), numa gama de $\lambda$ compreendida entre 250 e 2500 nm.....   | 70 |
| Figura 2.40 Representação da refletância, em %, da amostra de base PP aditivada com 10 % do pigmento refletor 1 (linha a tracejado) e do respectivo controlo (linha contínua), numa gama de $\lambda$ compreendida entre 250 e 2500 nm.....  | 72 |
| Figura 2.41 Representação da refletância, em %, da amostra base PP prensada aditivada com 10 % do pigmento refletor 2 (linha a tracejado) e do respectivo controlo (linha contínua), numa gama de $\lambda$ compreendida entre 250 e 2500 nm. ....   | 72 |
| Figura 2.42 Representação da refletância, em %, da amostra de base PA aditivada com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respectivo controlo (linha contínua), numa gama de $\lambda$ compreendida entre 250 e 2500 nm. ....  | 73 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.43 Resultados experimentais da medição da emissividade de amostras cerâmicas controlo e aditivadas. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,06 para (N-1)=23 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.....  | 75 |
| Figura 2.44 Resultados experimentais da medição da emissividade de amostras poliméricas de base PA e PP controlo e aditivadas. Incerteza calculada para um valor de t-student de 2,06 para (N-1)=23 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05. ....   | 76 |
| Figura 2.45 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV. ....  | 77 |
| Figura 2.46 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PP) e as do lado direito correspondem às amostras aditivadas com pigmento refletor 1. ....               | 78 |
| Figura 2.47 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV. ....  | 78 |
| Figura 2.48 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PP) e as do lado direito correspondem às amostras aditivadas com 10% do pigmento refletor 2. ....        | 79 |
| Figura 2.49 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com reflexão no IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.....  | 79 |
| Figura 2.50 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PA) e as do lado direito correspondem ao grade polimérico de base PA comercial para reflexão no IV. .... | 80 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.51 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV. ....  | 82 |
| Figura 2.52 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 15 min de irradiação, a), 30 min de irradiação, b), 45 min de irradiação, c), 60 min de irradiação, d) e 80 min irradiação, e), com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (controlo 3) e as do lado direito correspondem à cerâmica funcionalizada #4.....   | 82 |
| Figura 2.53 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV. ....  | 83 |
| Figura 2.54 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 15 min de irradiação, a), 30 min de irradiação, b), 45 min de irradiação, c), 60 min de irradiação, d) e 80 min irradiação, e), com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (controlo 2) e as do lado direito correspondem às cerâmicas funcionalizadas #3.....  | 83 |
| Figura 2.55 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.....  | 85 |
| Figura 2.56 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.....  | 85 |
| Figura 2.57 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.....  | 85 |
| Figura 2.58 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 30 min de irradiação, a), 60 min de irradiação, b), 80 min de irradiação, c), 90 min de irradiação, d) e 120 min irradiação, e), em exposição solar. Em todas as imagens térmicas, a amostra que se encontra no canto superior esquerdo corresponde à amostra controlo de PA injetado, a amostra do canto superior direito à amostra de PP prensado com 10% pigmento refletor 1, a amostra do canto inferior esquerdo à amostra controlo PP prensado, na posição intermédia encontra-se a |    |

|   |     |
|---|-----|
| amostra de PP prensado com 10% pigmento refletor 2 e a amostra do canto inferior direito ao grade polimérico de base PA comercial para reflexão no IV.....  | 86  |
| Figura 2.59 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar. ....   | 87  |
| Figura 2.60 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar. ....   | 87  |
| Figura 2.61 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 30 min de irradiação, a), 60 min de irradiação, b), 80 min de irradiação, c), 90 min de irradiação, d) e 120 min irradiação, e), em exposição solar. Em todas as imagens térmicas, a amostra que se encontra no canto superior esquerdo corresponde à amostra controlo 3, a amostra do canto superior direito à cerâmica funcionalizada #4, a amostra do canto inferior esquerdo à amostra controlo 2, e a amostra do canto inferior direito à cerâmica funcionalizada #3. .... | 88  |
| Figura 2.62 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo. ....   | 90  |
| Figura 2.63 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo. ....   | 90  |
| Figura 2.64 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo. ....   | 91  |
| Figura 2.65 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo. ....   | 91  |
| Figura 2.66 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo. ....   | 92  |
| Figura 3.1 Representação esquemática das amostras submetidas ao ensaio de retardância à chama (à direita) e aplicação da chama a 4 cm da borda da amostra, que foi colada a uma placa cerâmica (à direita). ....  | 103 |
| Figura 3.2 Amostra de cortiça funcionalizada #1.1 e #1.2 e o respetivo controlo, após ter sido aplicada uma chama a 4 cm da borda da amostra durante 30 segundos. ....  | 104 |
| Figura 3.3 Amostra de cortiça funcionalizada #2.1 e #2.2 e o respetivo controlo, após ter sido aplicada uma chama a 4 cm da borda da amostra durante 30 segundos. ....  | 105 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1 Valores de condutividade térmica de diferentes materiais à temperatura ambiente [15,16] .....  | 16  |
| Tabela 2.2 Amostras utilizadas nos ensaios efetuados à temperatura ambiente, em exposição à radiação solar e em exposição à radiação IV .....   | 28  |
| Tabela 2.3 Valores de condutividade térmica, de calor específico, de difusividade térmica e de efusividade térmica dos materiais de referência. Incerteza calculada para um valor de t-student de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05....   | 66  |
| Tabela 2.4 Valores de refletância, em percentagem, das diferentes amostras de revestimento cerâmico analisadas, nas diferentes regiões do espectro solar e o valor da refletância solar para cada amostra. Incerteza calculada para um valor de t-student de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05..... | 71  |
| Tabela 2.5 Valores de refletância, em %, das diferentes amostras de base polimérica analisadas, nas diferentes regiões do espectro solar e o valor da refletância solar para cada amostra. Incerteza calculada para um valor de t-student de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.....                 | 74  |
| Tabela 3.1 Classificação dos materiais de acordo com os métodos de ensaio descritos na Norma Europeia EN 13501-1[44] .....  | 100 |
| Tabela 3.2 Ensaio de reação ao fogo dos produtos de construção, de acordo com a norma EN 13501-1 [40,41] .....  | 101 |
| Tabela 3.3 Amostras utilizadas no estudo de retardância à chama .....   | 102 |
| Tabela 3.4 Amostras de cortiça funcionalizadas e os respetivos controlos usados nos ensaios de retardância à chama. ....  | 104 |
| Tabela 3.5 Amostras e respetivos parâmetros avaliados no decorrer do ensaio.....  | 105 |



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

|           |   |
|-----------|---|
| A         | Absorvância   |
| ABS       | Acrilonitrilo-butadieno-estireno  |
| ASHRAE    | Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (do inglês <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> ) |
| CB        | Negro de fumo (do inglês <i>Carbon Black</i> )  |
| CEIIA     | Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel  |
| CeNTI     | Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes  |
| CITEVE    | Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal   |
| CNT       | Nanotubos de carbono (do inglês <i>Carbon Nanotubes</i> )   |
| CTIC      | Centro Tecnológico das Indústrias do Couro  |
| IV        | Infravermelho   |
| PA        | Poliamida   |
| PC        | Policarbonato   |
| PCMs      | (do inglês <i>Phase Change Materials</i> )  |
| PP        | Polipropileno   |
| PTFE      | Politetrafluoroetileno  |
| R         | Refletância   |
| Si-C      | Carboneto de silício  |
| T         | Transmitância   |
| TPS       | Método da Fonte Plana Transiente (do inglês <i>Transient Plane Source</i> )   |
| TSR       | Refletância Solar Total (do inglês <i>Total Solar Reflectance</i> )   |
| UV        | Ultravioleta  |
| XPS       | Poliestireno extrudido  |
| $\lambda$ | Comprimento de onda   |
| $C$       | Capacidade térmica  |
| $L$       | Espessura   |
| $Q$       | Calor   |
| $T$       | Temperatura   |

|               |                       |
|---------------|-----------------------|
| $c$           | Calor específico      |
| $e$           | Emissividade          |
| $k$           | Condutividade térmica |
| $\alpha$      | Difusividade térmica  |
| $\varepsilon$ | Efusividade térmica   |
| $\rho$        | Massa específica      |

# Capítulo 1

---

## Introdução



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Enquadramento e apresentação do projeto**

O uso racional dos materiais exige o conhecimento adequado das suas propriedades, visto que só desta forma será possível selecionar, entre as várias opções viáveis, aquele que fornece melhor desempenho. Neste contexto, verifica-se uma crescente preocupação com o desenvolvimento de materiais de alta qualidade, funcionais, com baixo impacto ambiental, seguros e confortáveis.

No mercado global altamente competitivo em que vivemos, o conceito de qualidade torna-se cada vez mais dinâmico, pois, para além do desempenho técnico dos materiais, caracterizados por propriedades como a retardância à chama, a qualidade engloba também parâmetros como o conforto ao toque. Neste segmento, o desafio de atender às expectativas dos consumidores finais assume uma nova escala, na qual os consumidores não interpretam a qualidade de um material apenas pela sua aparência. De forma a assegurar a vanguarda da competitividade, a indústria não pode descurar as solicitações e os requisitos que os materiais têm de cumprir, sendo que a maior vantagem pode ser alcançada pela compreensão da sensação de conforto térmico proporcionada pelos materiais, uma vez que é um atributo cada vez mais apreciado e valorizado pelo consumidor no ato de aquisição de um determinado produto.

Assim, o presente trabalho englobou o levantamento de informação e a compreensão de aspetos práticos e teóricos relacionados com desenvolvimento de metodologias de avaliação de diferentes substratos para a validação do desempenho dos mesmos. Este projeto foi desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular do Projeto Individual do Mestrado em Técnicas de Caracterização e Análise Química, do Departamento de Química, da Universidade do Minho, em Braga, e consistiu no desenvolvimento de métodos expeditos e na reprodução de metodologias existentes na literatura, para a avaliação de propriedades finais de substratos de base polimérica, cerâmica e cortiça, entre elas a de perceção térmica ao toque e de retardância à chama, em ambiente empresarial. O estágio curricular foi realizado no CeNTI (Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes) e decorreu entre setembro de 2016 e setembro de 2017.

## 1.2. O CeNTI

O CeNTI – Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes é uma organização privada sem fins lucrativos, sediado em Portugal, Vila Nova de Famalicão. A instituição encontra-se ativa desde 2006 e resultou de uma forte parceria entre o CITEVE (Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal), o CTIC (Centro Tecnológico das Indústrias do Couro), a Universidade do Minho, a Universidade do Porto e a Universidade de Aveiro. Recentemente, o CEIIA (Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel) tornou-se também acionista do CeNTI. Como centro de investigação e desenvolvimento tecnológico, o seu papel é impulsionar o desenvolvimento de novos materiais e de dispositivos inovadores à escala semi-industrial. As competências técnicas e tecnológicas permitem ao CeNTI ter a seu cargo inúmeros projetos de investigação, com enfoque nas áreas de eletrónica, polímeros, materiais funcionais e simulação numérica de sistemas.

## 1.3. Objetivos da dissertação

O principal objetivo deste estudo consiste no desenvolvimento e na reprodução de metodologias de ensaio, baseadas em métodos de análise simples, capazes de avaliar e autenticar o desempenho de diferentes materiais em termos de sensação ao toque e conforto térmico e de retardância à chama. O desenvolvimento do estudo foi estruturado com base nos seguintes objetivos:

- Estudar métodos de avaliação de desempenho em termos de sensação ao toque e conforto térmico
  - Efetuar estudos qualitativos de materiais de base polimérica e cerâmica em termos de perceção da temperatura ao toque;
  - Validar uma ferramenta de avaliação desenvolvida por um conjunto de empresas, que permite detetar a perceção e classificar os materiais de acordo com a intensidade da sensação térmica;
  - Definir e desenvolver uma escala de avaliação da perceção da temperatura ao toque, inspirada na ferramenta referida anteriormente;
  - Validar a escala e estabelecer uma relação entre as propriedades térmicas dos materiais que a constituem e a avaliação qualitativa baseada na sensação ao toque.

- Efetuar estudos de desempenho térmico, em condições reais (exposição solar) e quando expostos a uma lâmpada de radiação infravermelha (IV), com materiais de base polimérica e cerâmica cuja formulação lhes conferia a característica de refletirem este tipo de radiação
  - Determinar os valores de refletância das amostras com capacidade de refletirem a radiação IV, de forma a averiguar a evidenciar a influência desta propriedade no desempenho térmico destes materiais, nomeadamente na sua temperatura superficial e, conseqüentemente, no conforto térmico ao toque proporcionado.
- Estudar métodos de avaliação de desempenho em termos de retardância à chama
  - Reproduzir uma réplica de metodologia encontrada na literatura para avaliar o desempenho da cortiça em termos de retardância à chama.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho está organizado em três capítulos. No capítulo 1 é feito um breve enquadramento do tema, apresentando o contexto no qual foi desenvolvido este trabalho, sendo expostos os principais objetivos. No capítulo 2 e 3 estão incluídas, em cada um deles, uma secção de estado da arte, uma de materiais e métodos e outra de resultados e discussão. Assim, cada capítulo corresponde a uma propriedade única dos materiais, de forma a facilitar a leitura e a compreensão da dissertação.

Assim, o capítulo 2 corresponde ao conforto térmico e sensorial proporcionado pelos materiais, sendo descritos os conceitos fundamentais e os estudos feitos até ao momento no que respeita ao conforto térmico ao toque. Nesta secção, são ainda exploradas as relações entre a perceção da temperatura e as propriedades térmicas e óticas dos materiais, bem como alguns estudos e métodos desenvolvidos. O capítulo 3 aborda conceitos gerais de retardância à chama e é feito o enquadramento da norma ISO EN 13501-1 como ferramenta de classificação dos materiais ao fogo. Em cada capítulo, na secção de materiais e métodos, são apresentadas as amostras que foram alvo de estudo e são ainda descritos os objetivos e os procedimentos experimentais, bem como os métodos utilizados, na caracterização dos materiais. Na secção de análise de resultados e discussão de cada capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos estudos e análises efetuados durante o desenvolvimento deste projeto. Na secção de conclusão geral, que corresponde ao capítulo 4, são expostas as análises conclusivas do desenvolvimento deste projeto, além das perspetivas futuras sugeridas no âmbito do conforto térmico ao toque, de retardância à

chama e de resistência à descoloração. Por último, no capítulo 5 são apresentadas as referências bibliográficas que suportaram esta dissertação.

## Capítulo 2

---

Conforto térmico e sensorial



## 2. CONFORTO TÉRMICO E SENSORIAL

### 2.1 Estado da arte

#### 2.1.1 Conceitos teóricos gerais do sistema sensorial

Desde sempre que o homem se esforçou no sentido de criar ambientes confortáveis do ponto de vista térmico, o que leva a que o conforto térmico seja um dos parâmetros a ser considerado em ambientes criados para ocupação humana, de forma a atender aos interesses pessoais de cada indivíduo. Mas o que é efetivamente o conforto térmico?

De acordo com a Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE), o conforto térmico é definido como uma “condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” [1]. Assim, o conceito de conforto térmico baseia-se na manutenção do equilíbrio térmico que deve existir entre o ser humano e o ambiente onde este se encontra inserido, ou seja quando a perda de calor do corpo equivale ao calor gerado pelos processos fisiológicos internos (condução, convecção e radiação) [2].

Desde o nascimento do ser humano que o mundo que o rodeia é percebido através de avaliações sensoriais, de forma mais ou menos consciente, fazendo com que a percepção tátil seja uma característica primordial no desenvolvimento do mesmo. Ainda na idade adulta, o ser humano continua a aprimorar a sua percepção tátil, e é pela exploração tátil do mundo que o rodeia que consegue transmitir uma grande quantidade de informação. A percepção tátil refere-se a todo o tipo de sensação relacionada com o sentido do tato e compreende dois componentes independentes: o cutâneo e o cinestésico. O sentido cutâneo recebe estímulos relacionados com a temperatura, pressão, vibração e dor dos recetores que se encontram na pele, e o cinestésico recebe estímulos provenientes dos recetores que se encontram nos músculos, tendões e articulações, responsáveis por sensações tais como movimento e força [3]. Assim, o conforto tátil está relacionado com a sensação do ser humano aquando do contacto direto (toque) de um determinado material com a pele. O toque é um conceito que engloba propriedades de conforto e sensoriais. Assim, a suavidade/aspereza, bem como a sensação de quente/frio aquando do contacto da pele com o material são consideradas propriedades de toque. A mão humana, constitui um perceptor do toque muito sensível. No entanto, esta constitui uma avaliação qualitativa e subjetiva, devido a diferenças na apreciação e preferência do toque, de indivíduo para indivíduo, relacionadas com diferenças

climáticas e culturais. Desta forma, a investigação científica continua a interessar-se para atingir uma linguagem comum e universal, que lhes permita quantificar objetivamente os materiais segundo este parâmetro. Perante este cenário, esta pesquisa foi conduzida, particularmente, em torno de um sentido: o tato.

#### A pele e os seus recetores sensoriais

O tato permite que os seres humanos percebam o toque, uma vez que exige a interação do ser humano com o mundo físico. O sistema sensorial lida com sensações cutâneas, sendo controlado por uma enorme rede de terminações nervosas e recetores da pele. Este sistema inclui a pele, os seus receptores especializados, as fibras nervosas periféricas aferentes e ainda o cérebro. O ser humano é dotado de três principais tipos recetores de toque na pele, entre eles, os mecanoreceptores (sensação de pressão), os termoreceptores (sensação de calor) e os nociceptores (sensação de dor).

A pele, que cobre cerca de dois metros quadrados da superfície corporal de um adulto, é uma barreira que protege o corpo humano do ambiente externo e representa o maior órgão sensorial do ser humano, constituindo um local importante para a receção de vários estímulos. Em particular, a pele glabra, que se caracteriza por não conter qualquer pelo, está presente nas solas dos pés, nos lábios e nas palmas das mãos e difere da pele em que o pelo está presente uma vez que contém uma mistura mais complexa de terminais recetores, sendo, por isso, mais sensível ao toque. Esta característica estará provavelmente relacionada com o facto de o ser humano recorrer a estas áreas mais sensíveis aos estímulos para percecionar as qualidades físicas dos objetos [4].

Na pele conseguem-se distinguir três camadas: a epiderme, a derme e a hipoderme (Figura 2.1) [5]. Vários estudos têm revelado que as interações do ser humano com o mundo exterior são estabelecidas pela epiderme, que têm na sua base terminações nervosas de natureza sensorial, que recebem estímulos sensoriais e fazem a sua transmissão ao sistema nervoso central.

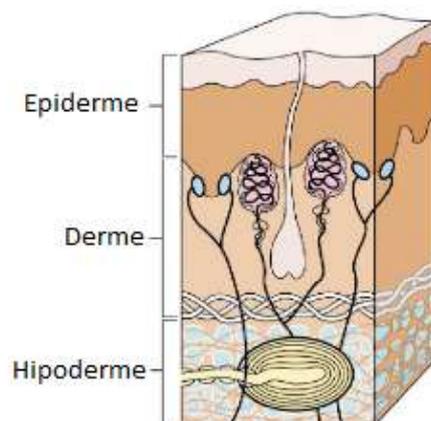


Figura 2.1. Constituição da pele (adaptado de [5]).

O sistema sensorial cutâneo permite ainda ao ser humano detetar alterações de temperatura, quando estímulos térmicos excitam os recetores sensoriais que se encontram na pele. A capacidade do ser humano para detetar alterações de temperatura tem origem em dois tipos de recetores: os termorecetores frios e quentes. Estes diferem na velocidade de condução das fibras aferentes que surgem dos recetores. As fibras aferentes quentes são não mielinizadas, com uma baixa velocidade de condução, que varia entre  $1-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , e as fibras aferentes frias, que contêm fibras mielinizadas, possuem uma velocidade de condução mais elevada, entre  $10-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Devido a estas diferenças na velocidade de condução, é expectável que o tempo de reação para o desenvolvimento de sensações frias seja significativamente mais curto do que para as quentes [6]. A pele também contém recetores de dor sensíveis à temperatura conhecidos como nociceptores térmicos. Os termorecetores do frio e do calor podem ser distinguidos dos nociceptores que respondem a temperaturas baixas e altas prejudiciais. Cada tipo de recetor funciona dentro de uma ampla gama de temperaturas. Os recetores de frio começam a apresentar um aumento crescente de atividade próximo dos  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  atingindo o máximo a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . No caso de um aumento da temperatura, os recetores de calor ficam ativos, começando a responder por volta dos  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , atingindo um máximo de atividade aos  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Em situações em que a temperatura da pele é elevada acima dos  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ , os recetores de calor são inativados e os nociceptores são ativados. Da mesma forma, a temperaturas extremamente baixas, os mesmos nociceptores são ativados. Assim, os nociceptores térmicos respondem a temperaturas superiores a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  e ao frio extremo, sendo que quando são ativados, há uma alteração da sensação térmica para uma de dor. Na zona térmica neutra, entre  $30$  e  $36 \text{ }^\circ\text{C}$ , que é o intervalo normal para a temperatura da pele, os recetores

quentes e frios não respondem, ou seja, nesta gama não se observa sensação térmica (Figura 2.2) [2].

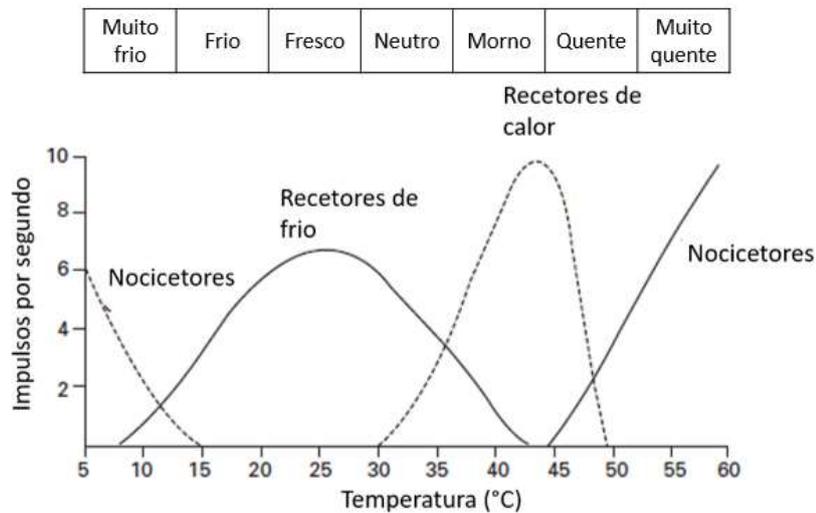


Figura 2.2. Gama de temperatura a que os receptores de frio, os receptores de calor e os nociceptores se encontram ativos (adaptado de [2]).

### 2.1.2 Correlação da percepção térmica com as propriedades intrínsecas dos materiais

No processo de interação da pele com os materiais, é necessário avaliar algumas propriedades intrínsecas destes, uma vez que estas conduzem a diferenças na taxa de transferência de calor entre a pele e um determinado material e, conseqüentemente, a diferentes percepções de temperatura. O calor é a energia transferida entre dois sistemas que se encontram a temperaturas distintas até atingirem o equilíbrio térmico. Nos estudos de transferência de calor, é usual considerar três processos através dos quais esta pode ocorrer:

- **Radiação:** a radiação térmica corresponde à energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero. Os corpos emitem essa energia sob a forma de ondas eletromagnéticas, sendo que quanto mais quente estiver um corpo, mais energia liberta.
- **Convecção:** o modo de transferência de calor por convecção é descrito como a transferência de energia que ocorre no interior de um fluido, devido aos efeitos combinados de condução e movimento de fluxo em massa. A energia que é transferida é a energia interna térmica do fluido. Assim, ocorre a transferência de calor de uma zona para a outra de um fluido, por efeito do movimento relativo das suas partículas, provocado por uma diferença de pressão devida a um diferencial de temperatura.

- **Condução:** a condução de calor ocorre sempre na presença de um gradiente de temperatura, sendo que a transferência de energia por condução deve então ocorrer na direção da diminuição da temperatura. As partículas que constituem o corpo (mais energéticas), no ponto onde a temperatura é mais elevada, vibram intensamente, transmitindo a sua energia cinética às partículas vizinhas (menos energéticas), devido à colisão entre elas, sem haver deslocamento das mesmas [7].

#### Condutividade térmica

Alguns materiais possuem a capacidade de transportar melhor o calor que outros. Essa propriedade é expressa pela condutividade térmica ( $k$ ), que é intrínseca dos materiais e relaciona a capacidade de conduzir calor através de uma determinada espessura. Quando há um gradiente de temperatura, o calor flui do objeto quente para o frio. À temperatura ambiente, a temperatura da pele (“corpo quente”) é superior à do objeto (“corpo frio”), uma vez que este se encontra à temperatura ambiente que é inferior à da pele. Desta forma, um material será percebido como frio ao toque se ele conduzir rapidamente o calor extraído pela pele durante o contacto da pele com o objeto. Assim, esta grandeza física é definida como a quantidade de calor ( $Q$ ) transmitida através de uma espessura unitária ( $L$ ) numa direção normal a uma superfície de área unitária ( $A$ ) devido a um gradiente de temperatura unitário ( $\Delta T$ ), em condições de estado estacionário e quando a transferência de calor depende apenas do gradiente de temperatura, e exprime-se em watt por metro kelvin ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ). Em termos matemáticos, a  $k$  expressa-se de acordo com a equação (2.1) [7]:

$$k = \frac{Q \times L}{A \times \Delta T} \quad (2.1)$$

#### Capacidade térmica ou calor específico

A capacidade térmica ( $C$ ) define a quantidade de calor necessária para elevar 1  $K$  a temperatura de um determinado material, ou seja, mede a capacidade do material armazenar energia térmica sem alterar a sua temperatura inicial. Pode ser determinada através da equação (2.2) sendo a sua unidade de medida  $J \cdot K^{-1}$  ou  $cal \cdot K^{-1}$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.2)$$

Onde  $\Delta Q$  é a energia necessária para produzir uma variação de temperatura  $\Delta T$ .

O calor específico ( $c$ ) de um material é definido como o calor que se deve fornecer a uma unidade de massa desse material para aumentar a sua temperatura  $1 K$ . A unidade de medição é  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$  ou  $cal \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$  [8].

#### Difusividade térmica

No processo de transferência de calor, a relação entre a condutividade térmica do material ( $k$ ), a sua massa volúmica específica ( $\rho$ ) e o seu calor específico ( $c$ ) é uma importante propriedade termofísica denominada difusividade térmica,  $\alpha$ , que possui como unidade no SI  $m^2 \cdot s^{-1}$ , sendo definida pela equação (2.3) [7]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c} \quad (2.3)$$

A difusividade térmica é o parâmetro que controla a taxa a que o calor é extraído da pele quando esta contacta com um determinado objeto, constituindo um aspeto crucial na discriminação da temperatura dos materiais por meio do toque. Esta propriedade está relacionada com a velocidade com que o equilíbrio térmico pode ser atingido. Assim, materiais com valores elevados de  $\alpha$  irão responder rapidamente a mudanças nas condições térmicas impostas, enquanto que materiais com valores baixos de  $\alpha$  irão responder mais lentamente, levando mais tempo para atingir uma condição de equilíbrio. À temperatura ambiente, um material com um valor elevado de difusividade térmica conduz o calor rapidamente aquando do contacto da pele com esse objeto e o material sente-se frio. Por outro lado, um material com baixa difusividade térmica sente-se mais quente ao toque [9].

#### Efusividade térmica

A efusividade térmica ( $\varepsilon$ ), que possui como unidade no SI  $W \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ , caracteriza o quão facilmente o calor pode ser absorvido pela superfície do material, ou seja corresponde à taxa à qual o material pode absorver calor. A efusividade tende a ser alta quando quer a condutividade térmica como a capacidade térmica são elevadas. Pode ser obtida através da razão entre a raiz quadrada da condutividade térmica ( $k$ ) pela massa específica ( $\rho$ ) e pelo calor específico ( $c$ ), através da equação (2.4) [10].

$$\varepsilon = \sqrt{k \times \rho \cdot c} \quad (2.4)$$

### Correlação das propriedades térmicas com a percepção da temperatura dos materiais

Quando há contacto da mão com um objeto e estes se encontram a diferentes temperaturas, ocorre uma transferência de calor entre a mão e o objeto. Caso o objeto esteja a uma temperatura inferior à da mão, o fluxo de calor é extraído da pele durante o contacto e o objeto sente-se frio. Por outro lado, se a temperatura do objeto for superior à da mão, o fluxo de calor é direcionado para a mão e o material sente-se mais quente [11]. A temperatura da pele da mão, em repouso, varia entre 25 °C e 36 °C e é geralmente superior à temperatura dos objetos encontrados no ambiente. Isto explica a sensação fria aquando do toque num material metálico, comparativamente à madeira, mesmo ambos estando à mesma temperatura. O fluxo de calor que é extraído da pele durante o contacto com um metal é elevado e superior ao da madeira, devido à sua elevada condutividade térmica e calor específico. No entanto, aquando do toque de um material metálico e outro de madeira, que se encontram à mesma temperatura, mas que é superior à temperatura da pele, a sensação fria e quente dos materiais é invertida, devido à elevada transferência de calor que ocorre com o objeto metálico. Em 2008, um grupo de autores quantificou este efeito denominado “inversão termosensorial”, utilizando blocos de alumínio que variavam apenas na espessura (1-9 mm, com um estímulo de referência de 5 mm) [12]. Os autores verificaram que quando a temperatura do estímulo foi inferior à temperatura da pele, a discriminação da sensação fria é clara quando o estímulo teste é mais fino do que o de referência, observando-se que este último foi quase sempre sentido como o mais frio. Quando o estímulo teste era mais espesso do que o de referência, os voluntários, quase sempre, escolheram o estímulo teste como o mais frio. O teste foi feito também com objetos de espessura semelhante, sendo que a discriminação foi mais difícil. Por outro lado, quando a temperatura do estímulo foi superior à temperatura da pele, o estímulo mais fino é aquele que se sente mais frio. Estes resultados aparentam ser coerentes, uma vez que a geometria do objeto também se relaciona com a sensação fria subjetiva: um objeto mais espesso conduz melhor o calor e pode conduzir o calor, mais facilmente, para longe do dedo do que um objeto mais fino. A discriminação da sensação fria dos objetos foi mais fácil a 20 °C (temperatura próxima da temperatura ambiente) e, a temperaturas superiores (40 °C), a sensação de frio e quente foi invertida, ou seja, o estímulo mais frio à temperatura ambiente passou a ser o mais quente. Os autores conseguiram quantificar o efeito da inversão termosensorial, cuja temperatura de inversão correspondeu a 34 °C.

As propriedades térmicas do objeto determinam a taxa a que o calor é extraído do objeto ou da pele durante o contacto. Vários estudos sustentam esta tentativa de correlacionar as propriedades

térmicas dos materiais como preditores úteis da percepção tátil da temperatura. Atualmente, materiais com elevada condutividade térmica, à temperatura ambiente, têm inúmeras aplicações. De acordo com a literatura quando se pretende que os materiais poliméricos sejam dotados com propriedades condutoras sob o ponto de vista térmico, a via mais fácil passa pela incorporação de aditivos com elevada condutividade térmica na matriz polimérica. Assim, alguns aditivos são utilizados em compósitos poliméricos no sentido de melhorar a dissipação de calor de materiais poliméricos e, conseqüentemente, a sensação fria ao toque [13,14]. Valores de condutividade térmica muito díspares entre materiais conduzem a diferenças na taxa de transferência de calor entre a pele e um material e isto, conseqüentemente, reflete-se na percepção da temperatura ao toque, à temperatura ambiente. Os valores de condutividade térmica de diferentes materiais, à temperatura ambiente, encontram-se descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Valores de condutividade térmica de diferentes materiais à temperatura ambiente [15,16]

| <b>Materiais</b>                      | <b><math>K (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})</math></b> |
|---------------------------------------|---|
| Nanotubos de carbono (CNT)            | 1000-4000   |
| Grafeno                               | 2000-6000   |
| Grafite                               | 100-400   |
| Carboneto de Silício (Si-C)           | 120   |
| Nitreto de Boro                       | 185-300   |
| Negro de fumo (CB)                    | 6-174   |
| Poliâmida (PA)                        | 0,22-0,33   |
| Polipropileno (PP)                    | 0,11-0,17   |
| Policarbonato (PC)                    | 0,19-0,21   |
| Acrlonitrilo-butadieno-estireno (ABS) | 0,15-0,20   |
| Cerâmica                              | 1,4-3,9   |
| Madeira                               | 0,18  |
| Cortiça                               | 0,04  |

A efusividade térmica de um material é uma propriedade térmica útil para descrever a sensação térmica tátil do mesmo. Um estudo que consistiu em tocar em diferentes materiais com o dedo indicador da mão dominante, mostrou que foi encontrada uma forte correlação positiva entre a efusividade térmica e a sensação fria percebida pelos voluntários [17]. Os voluntários tinham que classificar a sensação térmica numa escala de 1 a 5, em que 1 correspondia à sensação quente e 5 à sensação fria. Pareceu haver uma relação aproximadamente linear entre a efusividade

térmica das madeiras e dos polímeros e a sensação fria, sendo que os polímeros apresentaram uma classificação de percepção térmica superior às madeiras e, portanto, mais fria. Apesar de se obterem boas correlações entre as propriedades físicas e a percepção tátil, nem todas as relações foram claramente lineares, como foi o caso dos metais. Isto pode dever-se às restrições da escala perceptual, que impossibilita a percepção de pequenas diferenças nas propriedades físicas entre e dentro das classes de materiais. Por exemplo, devido à disparidade dos valores inerentes de efusividade térmica do conjunto de materiais, os metais ficam aglomerados no topo da escala perceptual e as madeiras e plásticos agrupados na parte inferior. Isto pode ser apontado como uma das limitações do estudo. Outro grupo de investigadores correlacionou a percepção do calor de seis materiais diferentes com os seus parâmetros térmicos, verificando que havia uma forte correlação com o logaritmo da efusividade térmica [18]. Assim, de acordo com uma correlação logarítmica, materiais cujo valor de efusividade térmica é elevado, correspondem a uma percepção mais fria. Estes resultados são concordantes com os de outro estudo efetuado, com o qual os autores pretendiam relacionar o calor tátil da madeira com a efusividade térmica [19]. Os autores demonstraram que os materiais com menor valor de efusividade térmica sentem-se mais quentes quando são tocados que os materiais com maior valor de efusividade térmica, à temperatura ambiente.

Com base num estudo com cinco materiais diferentes, um grupo de autores, sugeriu que o calor específico pode ser um parâmetro térmico relevante para a discriminação térmica destes materiais [20]. O conjunto de materiais avaliados abrangeu uma gama considerável de propriedades térmicas, no entanto, as suas características de superfície eram semelhantes, de modo a que os voluntários fossem obrigados a concentrarem-se em sinais térmicos para discriminar os materiais. As respostas dadas pelos voluntários foram analisadas no que diz respeito ao número de respostas corretas, ou seja, se o voluntário foi capaz de identificar corretamente qual o material que transmitia uma sensação mais quente, quando dois materiais eram comparados. Apenas o nylon foi discriminado de forma confiável dos restantes cinco materiais, revelando-se como aquele que transmitiu a sensação mais quente. Os resultados mostraram que os sinais térmicos podem ser utilizados para discriminar entre materiais, mas apenas quando as diferenças de calor específico e condutividade térmica são grandes. Para os materiais em que a diferença nas características de superfície é reduzida e que, portanto, não auxiliam na discriminação, uma diferença de um fator de quatro no calor específico do material era necessária para os voluntários discriminarem com precisão entre dois materiais. Além disso, a condutividade térmica tinha que ser, pelo menos,

oitenta vezes superior para uma discriminação clara entre os materiais comparados. Visto que as diferenças dos valores de condutividade térmica entre os materiais utilizados para discriminação foram muito maiores, isto sugere que os voluntários conseguem responder melhor às variações de calor específico que de condutividade térmica na discriminação dos materiais. Partindo destes resultados, verifica-se que o calor específico é uma propriedade térmica relevante para os sujeitos discriminarem entre materiais, uma vez que os voluntários não conseguiram distinguir entre materiais que abrangem uma gama muito variável de valores condutividade térmica, mas que tinham valores de calor específico semelhantes. Os resultados propostos anteriormente foram aprimorados por outros autores utilizando seis materiais que apresentavam um melhor espaçamento no que diz respeito aos parâmetros térmicos [21]. Neste estudo, os voluntários foram capazes de discriminar de forma fiável entre pares de materiais quando a proporção dos valores de efusividade térmica excede um fator de três ou mais. Os resultados deste estudo indicam que, quando os sinais de textura estão minimizados, os sinais térmicos podem ser utilizados para a discriminação dos materiais, quando as diferenças nos valores de efusividade térmica são muito elevadas.

A taxa a que o calor é extraído da pele quando esta toca num material está relacionada com a difusividade térmica do material, tornando esta propriedade importante no processo de distinção dos materiais por meio do toque. Em 2009, um estudo avaliou a capacidade de os voluntários discriminarem entre materiais com base na taxa de extração de calor, através de um dispositivo que extrai artificialmente calor do dedo em determinadas taxas [9]. Em diferentes condições experimentais, foi pedido aos voluntários que seleccionassem o arrefecimento mais rápido entre um par de estímulos. Os resultados mostram que os voluntários conseguiram distinguir entre materiais com base nas suas propriedades térmicas e foi encontrado um limite inferior para o limiar de discriminação entre materiais, ou seja, a discriminação entre dois materiais só é possível quando os seus valores de difusividade térmica diferirem, pelo menos, em 43%. Os materiais com uma diferença no valor de difusividade térmica abaixo deste limiar revelam-se difíceis de distinguir.

#### Correlação das propriedades óticas com a percepção da temperatura dos materiais

As propriedades óticas controlam a temperatura superficial dos materiais quando expostos a uma fonte de radiação, daí que, para avaliar o conforto térmico no contacto, também seja necessário avaliar essas propriedades.

A radiação eletromagnética pode ser dividida em diferentes regiões de energia, sendo que o espectro eletromagnético está dividido em regiões que diferem no comprimento de onda. Cerca de 5% da luz solar que atinge a superfície da Terra é na forma de radiação ultravioleta (UV), 42% ocorre na região do visível do espectro eletromagnético e 53% da energia solar total corresponde à região do IV.

Qualquer objeto a uma temperatura acima do zero absoluto emite radiação IV. A intensidade da radiação IV emitida por um material depende da sua temperatura sendo que, quanto maior a temperatura, maior a radiação emitida. A refletância na região do IV está diretamente relacionada com o desempenho térmico dos materiais, uma vez que é a região do espectro solar que contribui para o aumento da temperatura dos materiais. Neste segmento, a região do espectro que terá mais enfoque neste estudo será a região do IV [22,23].

Emissividade, absorvância, transmitância e refletância dos materiais

A emissão da radiação eletromagnética depende de uma propriedade chamada emissividade ( $e$ ), cujos valores estão compreendidos entre 0 e 1, sendo que materiais com baixos valores de  $e$  são bons refletores, enquanto que os que têm valores próximos de 1 são bons emissores. Este parâmetro indica a quantidade de radiação emitida por um material. Assim, materiais com valores de  $e$  baixos emitem menos radiação IV do que materiais com elevada  $e$ , à mesma temperatura. Pode ser definida como a razão entre a emissão efetiva de radiação de uma superfície e o fluxo de radiação que seria emitido por um corpo negro (emissor perfeito), à mesma temperatura. Considera-se que um corpo negro ideal absorve e emite toda a radiação incidente na mesma proporção. A  $e$  irá depender do tipo de material, da zona do espectro que se está a tratar e do ângulo e direção da emissão. Caso a  $e$  seja medida num ângulo normal ( $\theta = 0$ ) é chamada de emissividade normal, quando a medição é feita em todas as direções, a média de todas as direções ao longo de todo o hemisfério corresponde à chamada emissividade hemisférica. A  $e$  é máxima, com o valor de 1, para um corpo negro. Superfícies de materiais reais não emitem tanto como um corpo negro à mesma temperatura, ou seja irão emitir menos que 1, pois apenas uma percentagem da radiação incidente é absorvida, sendo a restante refletida e transmitida [24]. A medição precisa do valor de  $e$  é, sobretudo, importante em materiais cujos valores desta propriedade são baixos. Nestes, a medição da temperatura é particularmente complicada, pois pequenas variações no valor de  $e$  resultam em grandes variações de temperatura, enquanto que

nos objetos com elevados valores de  $e$ , essas variações no valor de  $e$  causam mudanças menores nas temperaturas da superfície resultantes [25].

Além dos processos descritos anteriormente, através dos quais ocorrem as transferências de calor, as propriedades de absorvância, refletância e transmitância também são importantes neste fenômeno. A radiação corresponde ao mecanismo de trocas de calor entre dois corpos, distantes entre si, capazes de absorver e emitir energia térmica. Quando a energia radiante colide com a superfície de um determinado material, este pode absorver, transmitir ou refletir a radiação incidente. Assim, são usados três parâmetros para descrever estes fenômenos: a absorvância ( $A$ ), que corresponde ao quociente entre o fluxo radiante absorvido e o fluxo radiante incidente sobre uma determinada superfície, a refletância ( $R$ ), que é a razão entre o fluxo radiante refletivo por uma superfície e o fluxo radiante sobre esta mesma superfície, e a transmitância ( $T$ ), que é a razão entre o fluxo radiante transmitido e fluxo radiante incidente. Considerando um feixe a incidir num determinado objeto: a  $T(\lambda)$  da superfície é definida como a fração do feixe, no comprimento de onda  $\lambda$ , que é transmitida pelo objeto;  $R(\lambda)$  é a fração que é refletida pela superfície, no comprimento de onda  $\lambda$ , para o meio e a  $A(\lambda)$  é a fração que é absorvida pelo objeto, no comprimento de onda  $\lambda$ . A soma das frações que são absorvidas, transmitidas e refletidas da radiação incidente são dependentes do comprimento de onda e deve ser igual à unidade, de acordo com a equação (2.5):

$$T_{\lambda} + R_{\lambda} + A_{\lambda} = 1 \quad (2.5)$$

É possível estabelecer uma relação entre a emissividade, a absorvância e a refletância. De acordo com a lei de *Kirchhoff*, em equilíbrio térmico, para um determinado comprimento de onda e temperatura, a emissividade de qualquer objeto é igual à sua absorção, de acordo com a equação (2.6):

$$e(\lambda, \theta) = A(\lambda, \theta) \quad (2.6)$$

onde  $\theta$  é o ângulo do observador. No caso de estarmos perante materiais opacos em equilíbrio térmico, a transmissão é zero, portanto a relação entre a emissividade e refletância é expressa pela equação (2.7):

$$e(\lambda, \theta) = A(\lambda, \theta) = 1 - R(\lambda, \theta) \quad (2.7)$$

Uma forma de reduzir os ganhos de calor resultantes da incidência de radiação solar e, conseqüentemente melhorar o conforto térmico e a eficiência energética, principalmente em

períodos de Verão, é pela diminuição de absorção da energia solar, pela utilização de materiais, cujo valor de refletância seja elevada [24,25]. O aumento do valor de refletância da superfície dos materiais pode ser conseguido pelo uso de materiais que são caracterizados por possuírem uma elevada refletância solar e valores de emissão de radiação IV elevados. Vários estudos têm aplicado revestimentos refletivos, que alteram as propriedades de reflexão das superfícies e, conseqüentemente, levam a uma diminuição da temperatura da superfície dos materiais. Para investigar o desempenho térmico de revestimentos refletivos, um grupo de investigadores utilizou sensores de temperatura, que foram colocados no centro da superfície das amostras analisadas. A temperatura da superfície foi medida durante 24 horas, a cada 10 minutos. Segundo os autores, o uso de revestimentos refletivos pode reduzir a temperatura da superfície de telhas de concreto, sob condições de verão, em 4 °C e durante a noite em 2 °C [26]. Outros autores, através dos resultados que obtiveram, demonstraram que, dependendo da localização, estação e orientação, as temperaturas externas e internas da superfície podem ser reduzidas até 20 °C e 4,7 °C, respetivamente, usando diferentes revestimentos [27]. Um estudo avaliou o desempenho térmico de diferentes tipos de refletivos em painéis de concreto, fazendo incidir uma lâmpada de halogénio, durante 12 horas, na superfície dos painéis que fica voltada para o exterior quando aplicado num edifício. A temperatura da superfície foi medida em intervalos de 1 minuto por termopares. Os resultados experimentais demonstraram que os revestimentos com propriedades refletoras podem levar a uma diminuição da temperatura da superfície interior de 3,5 °C, o que indica que tal revestimento pode efetivamente reduzir a absorção de calor [28].

### 2.1.3 Métodos de avaliação da percepção térmica

O sentido do tato é importante na interação consumidor-produto em função de fatores como conforto, nível de satisfação e preferências, uma vez que cada material, com as suas propriedades, induz uma percepção que é única e particular para cada consumidor. A avaliação desses parâmetros qualitativos é particularmente complexa, devido à falta de um único quadro de referência teórico capaz de tornar esses aspetos emocionais intersubjetivos, descritíveis e mensuráveis.

#### Métodos qualitativos: análise sensorial

Até que ponto os sentidos do toque e da visão contribuem para a percepção do calor dos materiais? Os sentidos humanos desempenham um papel importante na forma como as pessoas percebem e interagem com os produtos.

O conceito de análise sensorial surgiu na indústria alimentar, como uma forma de avaliar as reações dos consumidores face a determinadas características dos produtos alimentares [29]. Devido ao sucesso desta ferramenta, esta começou a ser aplicada noutros domínios industriais de forma a caracterizar a qualidade dos produtos e a adquirir vantagem na competição empresarial, ao fornecer novos critérios de design e argumento de vendas. A análise sensorial é uma ferramenta de avaliação do toque. Esta ferramenta utiliza apenas os sensores humanos como instrumento de medida. Na análise sensorial, predomina o carácter qualitativo dos materiais e é utilizada como ferramenta para caracterizar, medir, analisar e interpretar as reações sentidas, da forma como são percebidas pelos órgãos sensoriais. Assim, os ensaios de análise sensorial implicam um painel sensorial, ou seja, um grupo de indivíduos que avaliam uma série de amostras e são utilizados para entender as relações qualitativas dos indivíduos com os produtos ou materiais, avaliando-os quanto à preferência [30].

Atualmente, a avaliação sensorial já abrange uma grande diversidade de indústrias, sendo frequentemente aplicada na indústria automóvel. O facto de, num automóvel, o condutor e os passageiros estarem expostos a uma grande variedade de estímulos por parte dos materiais que o constituem, leva a que os resultados da análise sensorial sejam tomados em consideração na projecção de novos carros, procurando melhorar as perceções pessoais para a condução segura e confortável. Nos dias de hoje, a perceção térmica dos materiais é, frequentemente, avaliada por um grupo de voluntários, que utilizam a ponta dos dedos para quantificar a sensação de calor ou frio após o toque num determinado material. Um estudo avaliou a perceção térmica através de medições realizadas em diferentes tipos de materiais utilizados na indústria automóvel, através de uma escala de materiais de referência que varia entre 1 e 100. O teste consistiu na descrição do nível de sensação de frio ou quente durante um contacto de 3 segundos com a amostra, sendo que, antes de cada teste, o voluntário tinha que colocar os dedos sobre uma placa de madeira durante 10 segundos [31]. Um outro grupo de investigadores também realizou um estudo de análise sensorial com recurso a um suporte para a apresentação dos materiais. Na superfície lateral do suporte foram efetuados dois furos, através dos quais os dedos poderiam ser inseridos para o contacto com a amostra. Os voluntários inseriam os dedos esquerdo e direito em cada compartimento e depois tinham que decidir qual o mais quente dos materiais apresentados, sendo que os materiais eram sempre testados aos pares [20].

A avaliação sensorial não depende exclusivamente do sentido do tato, pelo que é importante considerar o papel da visão na perceção geral de um material. Através das cores, o ser humano

consegue perceber o calor de um dado material. Um estudo avaliou a percepção do calor dos materiais em condições avistadas, cegas e pela combinação do toque e visão [18]. Como o objetivo do estudo foi avaliar materiais que iriam ser usados em aplicações de paredes internas, os materiais foram apresentados verticalmente, à altura dos olhos, sendo colocado um fundo neutro por trás das amostras. Na condição visual, os voluntários apenas poderiam olhar para os materiais sem tocar, enquanto que, na condição tátil, as amostras foram cobertas com um pano preto e os voluntários só podiam tocar nos materiais. No teste com toque e visão, a interação com os materiais foi livre e sem restrições. Para cada amostra, os voluntários deram uma resposta em relação à temperatura percebida com base numa escala que variava entre 1-9 (1 corresponde à sensação fria e 9 à sensação quente). Os resultados evidenciaram que os sentidos utilizados têm um grande impacto na percepção do calor, e que deve ser feita uma distinção entre o calor visual e o calor tátil de um material, sendo que a percepção do calor de um material na condição de combinação do toque e da visão mostrou-se correspondente à sua percepção apenas com a visão.

Um grupo de investigadores, ao realizar o estudo com e sem visão (olhos vendados), conseguiram avaliar o possível efeito da visão sobre a percepção tátil [17]. O estudo consistiu no toque de materiais com o dedo indicador da mão dominante. Os voluntários tocaram nos materiais que eram representativos dos extremos da escala que os investigadores usaram, de modo a terem uma referência para as suas respostas, sendo que poderiam tocar nestes extremos em qualquer momento do teste. Analisando os dados em que a visão da amostra foi controlada, verificou-se que, em alguns casos, existe efetivamente um efeito significativo da condição, ou seja, há uma mudança na percepção tátil entre a condição avistada e sem visão que afeta mais fortemente as amostras de polímero. Por exemplo, os metais foram percebidos como mais frios na condição com visão do que nos testes cegos. Essas mudanças na percepção entre as condições de visão e sem visão são provavelmente devidas ao conhecimento prévio dos participantes e preconceitos dos materiais, sendo enfatizados na condição em que há visualização das amostras. Por exemplo, com os metais, o fato de serem avaliados como mais frios na condição de visão pode sugerir que existe uma expectativa de que os metais são frios.

Desta forma, a análise sensorial, desenvolvida em função das respostas dadas por indivíduos, mostra ser uma importante ferramenta de análise para perceber de que forma os sentidos (tato e visão) influenciam a decisão do consumidor na aquisição de um determinado produto. Atualmente, esta metodologia é utilizada no desenvolvimento de novos produtos, na reformulação de produtos

já existentes no mercado, na determinação das diferenças e similaridades entre produtos concorrentes, na identificação das preferências dos consumidores, tornando-se numa ferramenta estratégica para o desenvolvimento de produtos.

### Métodos quantitativos

Atualmente, ainda existem poucos estudos que estabeleçam uma linguagem abrangente e comum da percepção tátil, que é a base do toque discriminativo. Desta forma, existe uma necessidade de desenvolver métodos para investigar a gama completa de sensações que ocorrem durante as percepções através do toque.

Para a medição da transferência de calor, um grupo de investigadores projetou e descreveu um sistema para a medição da sensação tátil (Figura 2.3) [32]. A ponta de um dedo artificial foi incorporada com um cilindro de cobre, sendo aquecida por uma fonte de alimentação, antes do contato, até que a temperatura de superfície ficasse 10 °C acima da temperatura ambiente (20-24 °C). Um termopar foi colocado no dedo artificial, debaixo da pele. A ponta do dedo artificial foi movida pelo controlo de movimento e teve contacto com as amostras de teste durante 60 segundos com força 1 N. De forma a evitar perdas de calor, a amostra testada foi separada do suporte onde estava apoiada por um material de lã. Após tocarem nos estímulos, que se encontravam em caixas para que não pudessem ser vistos, os participantes tiveram que o classificar, numa escala de 0 a 7. A mudança de temperatura foi monitorizada ao longo do tempo e sua taxa de variação foi calculada. O método proposto pelos autores permitiu estabelecer fortes correlações entre as percepções dos voluntários e o parâmetro físico de taxa de variação da temperatura.

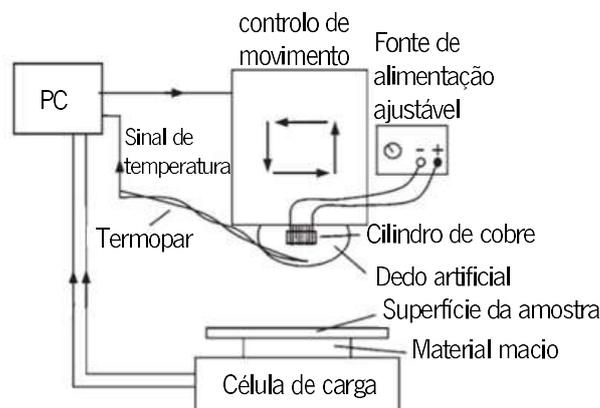


Figura 2.3 Esquema do sistema de medição tátil (adaptado de [32]).

A difusividade térmica de um material é uma propriedade que influencia a percepção sensorial, uma vez que descreve a forma como o calor é transmitido através dele, sendo útil na discriminação de materiais através do toque. Um grupo de investigadores projetou e construiu um dispositivo experimental cujo objetivo foi a medição de limiares precisos de difusividade térmica, sendo que a extração de calor foi realizada de forma controlada (Figura 2.4) [9]. Após o toque, houve uma diminuição acentuada da temperatura, seguida por uma extração contínua de calor. Este dispositivo focou-se na extração contínua de calor que ocorre após a diminuição da temperatura, aquando do toque. O dispositivo consiste num elemento *Peltier*, um termómetro semicondutor e um sistema de contacto através do toque (quadrado de cobre revestido de ouro). O termómetro e o sistema de contacto estavam conectados a um computador, que também controlava a fonte de alimentação que estava ligada ao elemento de *Peltier*. Quando o sistema de contato foi ativado, o dispositivo forneceu um regime de temperatura. A força usada pelo voluntário foi exibida num indicador analógico para que este mantivesse uma força de toque constante e reproduzível. Cada voluntário teve que decidir o resfriamento mais rápido entre dois estímulos. Inicialmente, o sujeito colocou a mão em contacto com uma superfície, que se encontrava dentro de uma caixa e que foi mantida à temperatura de partida. Aquando do sinal do analisador, o voluntário colocou o dedo indicador no sistema de contacto do dispositivo, que inicia um regime de temperatura. Após 10 segundos de contacto, o voluntário retirou a mão e colocou na caixa que se encontra à temperatura de partida, sendo o dispositivo preparado para o segundo estímulo. O procedimento repetiu-se, então, para o segundo estímulo e o voluntário escolheu, entre os dois, aquele que esfriou mais rápido. Nas condições testadas, os autores conseguiram concluir, através deste método que os voluntários, através do toque, podem distinguir entre materiais baseados exclusivamente nas suas propriedades térmicas se os seus valores de difusividade térmica estiverem distanciados em, pelo menos, 43%.

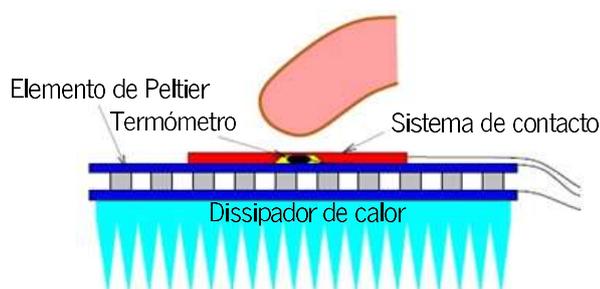


Figura 2.4 Esquema do dispositivo (adaptado de [9]).

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 Materiais

#### Materiais analisados

No desenvolvimento experimental da avaliação da percepção térmica, foram usadas amostras de base polimérica, maioritariamente de base Poliamida (PA) e de Polipropileno (PP), e amostras de revestimento cerâmico (

Tabela 2.2). A seleção dos materiais teve como propósito perceber a sensação térmica de alguns materiais, frequentemente usados em diversas aplicações no quotidiano pelos consumidores, e reunir uma vasta gama de percepções térmicas.

Os estudos de percepção térmica centraram-se em duas propriedades intrínsecas dos materiais, as quais contribuem para um maior conforto térmico ao toque, dependendo das aplicações finais, designadamente a condutividade térmica e a propriedade de reflexão da radiação IV. No global, nestes estudos, foram utilizadas e comparadas amostras controlo e amostras funcionalizadas para melhoria de desempenho térmico.

- Amostras para alteração da condutividade térmica

No que respeita às amostras poliméricas de base PP, o polímero foi misturado, pelo processo de extrusão, com materiais que lhes conferiam valores superiores de condutividade térmica, designadamente Si-C, óxido de alumínio, *PCMs*, *CNTs*, grafite, grafeno, CB e nitreto de boro, que, conseqüentemente, promovem uma maior transferência de calor entre a mão do utilizador e o material, proporcionando uma sensação fria ao toque. Deste processo, resultaram composições poliméricas aditivadas em forma de grânulos que foram, posteriormente, aplicados num molde retangular e prensados nas condições de pressão e temperatura definidas na ficha técnica do produto, de forma a obter as amostras em placas. Relativamente às amostras de base PA, como se tratavam de amostras comerciais, não foi necessária a etapa de mistura por extrusão e, portanto, desenvolveram-se as placas através de processos de prensagem e/ou injeção, nas condições de pressão e temperatura definidas na ficha técnica do produto.

No caso das amostras de revestimento cerâmico, uma vez que o objetivo era proporcionar uma sensação quente ao toque, estas foram aditivadas com materiais de baixa condutividade térmica, por meio da aplicação de dois tratamentos (#1 e #2) na superfície de um revestimento cerâmico (ladrilho cerâmico) convencional. As amostras de revestimento cerâmico funcionalizadas para diminuição da condutividade térmica diferem entre si, não só pelo tratamento funcional aplicado,

mas também devido a diferentes condições de produção/funcionalização, sendo denominadas A, B, C e D, por questões de confidencialidade.

- Amostras para melhoria da reflexão da radiação IV

Tal como nas amostras desenvolvidas para aumento da sensação fria ao toque, o PP foi misturado pelo processo de extrusão com materiais funcionais, neste caso, os pigmentos refletores de radiação IV, tendo resultado em composições poliméricas aditivadas em forma de grânulos. Estes grânulos foram, posteriormente, prensados nas condições de pressão e temperatura definidas na ficha técnica do produto, de forma a obter as amostras em placas. Também para esta funcionalidade, as amostras de base PA consistiam em amostras comerciais, pelo que foi apenas necessário desenvolver as placas através de processos de prensagem e/ou injeção, nas condições de pressão e temperatura definidas na ficha técnica do produto.

No caso das amostras de revestimento cerâmico, a funcionalização com vista ao aumento da sua capacidade de reflexão da radiação IV foi alcançada por meio da aplicação de dois tratamentos contendo pigmentos refletores (#3 e #4) na superfície de dois revestimentos cerâmicos convencionais, que diferiam sobretudo na tonalidade.

Um dos objetivos desta dissertação foi avaliar a refletância solar em amostras de base polimérica, nomeadamente PA e PP com/sem aditivos em composição com propriedades de reflexão na zona do IV e em amostras de base cerâmica, nomeadamente revestimentos cerâmicos com/sem aditivos para a reflexão da radiação IV de modo a influenciar no desempenho térmico dos materiais. A principal característica dos aditivos aplicados nas amostras estudadas é a sua elevada capacidade para refletir a radiação IV incidente, atrasando o aquecimento devido à reflexão da componente IV do espectro solar.

Ou seja, estes absorvem apenas uma pequena fração da radiação solar incidente, mantendo a temperatura superficial dos materiais mais baixa quando comparada com amostras em que o aditivo está ausente. O aditivo aplicado às duas classes de materiais é de base dióxido de titânio, com desempenho melhorado ao nível da reflexão da radiação IV.

Na

Tabela 2.2, apresentam-se todas as amostras testadas que, por questões de confidencialidade, não podem ser referidas as suas características, tais como a densidade, marca, entre outras.

Tabela 2.2 Amostras utilizadas nos ensaios efetuados à temperatura ambiente, em exposição à radiação solar e em exposição à radiação IV

| <b>Amostras poliméricas</b>   |
|---|
| PA prensada   |
| PP prensado   |
| PA injetada   |
| ABS   |
| PC/ABS  |
| <b>Amostras poliméricas com aditivo que lhes confere maior condutividade térmica</b>              |
| PP prensado + 2,5% Si-C   |
| PP prensado + 2,5% óxido de alumínio  |
| PP prensado + <b>Phase Change Materials</b> (PCMs) com ponto de fusão de 24 °C                    |
| PP prensado + CNTs  |
| PP prensado + 10% CNTs  |
| PP prensado + 6% CNTs   |
| PP prensado + 20% Grafite   |
| PP prensado + 1,5% Grafeno  |
| PP prensado + 10% CB  |
| PP prensado + 40% Nitreto de Boro   |
| <b>Grade</b> polimérico de base PA comercial para o aumento da condutividade                      |
| <b>Amostras poliméricas com aditivo que lhes confere a propriedade de reflexão de radiação IV</b> |
| <b>Grade</b> polimérico de base PA comercial para reflexão no IV                                  |
| PP prensada + 10% pigmento refletor 1   |
| PP prensada + 10% pigmento refletor 2   |
| <b>Amostras cerâmicas com aditivo que lhe confere menor condutividade térmica</b>                 |
| Cerâmica convencional branca (controlo 1)   |
| Cerâmica funcionalizada #1_A  |
| Cerâmica funcionalizada #1_B  |
| Cerâmica funcionalizada #1_C  |
| Cerâmica funcionalizada #1_D  |
| Cerâmica funcionalizada #2_A  |
| Cerâmica funcionalizada #2_B  |
| <b>Amostras poliméricas com aditivo que lhes confere a propriedade de reflexão de radiação IV</b> |
| Cerâmica convencional castanha clara (Controlo 2)   |
| Cerâmica funcionalizada #3  |
| Cerâmica convencional castanha escura (Controlo 3)  |

---

## Cerâmica funcionalizada #4

---

### Materiais de referência

Antes de se proceder à criação de um quadro de referência de percepção térmica, foram efetuados alguns estudos com uma ferramenta de análise sensorial que lhe serviu de base, cujos materiais de referência foram o alumínio, o polímero, a madeira, a espuma e o esferovite. Posteriormente, foi projetada a construção de um painel de materiais de referência, no qual constavam o alumínio, a cerâmica, o politetrafluoretileno (PTFE), a madeira, a cortiça e o polietileno extrudido (XPS), inspirado no modelo mencionado acima. De forma a relacionar as propriedades térmicas dos materiais com a escala de percepção térmica definida e estabelecer uma correlação entre os dois métodos, procedeu-se à validação das escalas de percepção associadas aos métodos com os seguintes materiais:

- Cerâmica;
- ABS;
- PA;
- PP;
- Madeira envernizada;
- Espuma.

### 2.2.2 Métodos de caracterização e avaliação da percepção térmica de materiais à temperatura ambiente

#### Análise qualitativa da percepção térmica à temperatura ambiente

No âmbito de averiguar a diferença de percepção térmica entre dois ou mais materiais através do toque foram feitos estudos discriminativos, à temperatura ambiente, com recurso a um conjunto de voluntários. Estes estudos também foram realizados, para algumas amostras, numa câmara climática a 50°C.

Os estudos tiveram início com a recruta de um grupo de voluntários do CeNTI, do sexo masculino e do sexo feminino, que formou o grupo de avaliadores da percepção da temperatura dos materiais. É de salientar que o número de voluntários em cada ensaio, não foi sempre o mesmo. Durante os estudos, foi feito o controlo da temperatura e da humidade relativa do local, de forma a manter constante a avaliação. De forma a garantir a estabilidade das amostras, estas foram sempre

acondicionadas no local onde decorreram os ensaios, durante, pelo menos, 1 hora. Além disso, as amostras foram apresentadas de forma anónima para não induzir o voluntário a memorizar a amostra. Os ensaios foram realizados apenas com o toque, sendo que, nesta condição, os voluntários tinham os olhos vendados, e com toque e visão. Os voluntários foram instruídos relativamente ao estudo a realizar, sendo que lhes foi dito para explorar a amostra com a palma da mão dominante. Por fim, os voluntários ordenaram as amostras por ordem crescente ou decrescente, conforme o objetivo pretendido do estudo em questão, relativamente à sensação fria/quente, não tendo de quantificar o grau dessa diferença.

Primeiramente, fez-se a análise simultânea de um grupo de amostras. No entanto, pela avaliação dos resultados, foi claro que a diferenciação em termos de perceção térmica torna-se menos realista seguindo este método, uma vez que os voluntários “forçam” a distinção entre amostras. Desta forma, nos ensaios posteriores foram sempre criados grupos de ensaio (2 amostras).

#### Análise sensorial com base numa escala de referências

A ferramenta de análise em questão, cujo nome não pode ser mencionado por questões de confidencialidade, funciona como um referencial de medida e dispõe de meios instrumentais para uma análise experimental comparativa de características pré-definidas relativamente às sensações táteis de diversos materiais. Cada conceito de perceção está associado a um painel com amostras de materiais distribuídas por uma escala de características variável qualitativamente ou quantitativamente.

Para este estudo, foram selecionados dois descritores do referencial que integravam a componente térmica. Portanto, foram analisados um total de cinco materiais pertencentes a diferentes famílias que diferiam na perceção térmica: alumínio, polímero, madeira, espuma e esferovite. No âmbito de averiguar se o método era adequado para avaliar amostras com perceção térmica semelhante e díspares, este foi validado com um grupo de amostras cuja perceção térmica é semelhante (PP, PA e ABS) e com outro no qual as amostras são muito diferentes no que respeita à perceção térmica (madeira envernizada, cerâmica e espuma).

Esta etapa consistiu em mensurar a perceção térmica conferida pelos materiais em análise, à temperatura ambiente, tendo por base a comparação da sensação ao toque com os materiais do quadro de referências. Para tal, recorreu-se a um grupo de vinte voluntários internos do CeNTI, que tiveram de avaliar a intensidade percebida da temperatura de um determinado material, atribuindo-lhe um valor marcado no quadro de referência. Neste quadro de referência, a grandeza

térmica é apresentada por cinco indicadores distintos que descrevem o fluxo de calor percebido em cinco níveis (0, 20, 50, 70 e 100). A escala varia de frio (a mão liberta calor para o produto – indicador 0) a quente (o produto cede calor à mão – indicador 100). Portanto, o valor zero corresponde ao extremo mais baixo de temperatura e o 100 ao extremo mais elevado de temperatura. Por este método, o voluntário teve de identificar a proximidade de percepção térmica do material em análise com os materiais do quadro de referências e atribuir um valor de percepção térmica de acordo com a escala definida.

Neste estudo, a madeira serviu como material de referência e como estabilizador da temperatura da mão, sendo que os voluntários tocaram neste material, durante 10 segundos, antes e após a mão ter entrado em contacto com os materiais de referência. No processo de avaliação da percepção térmica, o voluntário colocava a mão no material de referência, durante 3 segundos, de seguida no material estabilizador, durante 10 segundos, e, por fim, na amostra em análise, durante 3 segundos, repetindo o processo para todos os materiais de referência, do mais frio ao mais quente. O voluntário quantificou o estímulo de temperatura, sendo que esta avaliação foi realizada três vezes, em diferentes dias, para os mesmos produtos. Houve o cuidado de manter um tempo razoável entre um voluntário e outro, para que as amostras voltassem à temperatura ambiente. A utilização desta ferramenta permitiu a obtenção de dados táteis, relacionados com a temperatura das amostras analisadas. Para realização deste estudo, várias condições do local e do material foram tidas em consideração. As amostras foram acondicionadas uma hora antes dos ensaios decorrerem, numa sala onde a temperatura e a humidade do local foram controladas. Na tentativa de não distrair o voluntário durante a realização do teste, assegurou-se que o local estava com um nível de ruído reduzido.

Os resultados deste estudo foram úteis para a definição da escala da metodologia de percepção ao toque que se pretendeu implementar.

#### Medição das propriedades térmicas dos materiais

Tendo em consideração a relação da sensação térmica ao toque dos materiais com as suas propriedades térmicas, foi necessário recorrer a métodos que permitam medir de forma quantitativa estas propriedades. Desta forma, pretendeu-se estabelecer correlações entre os parâmetros térmicos, nomeadamente da condutividade e difusividade térmica e calor específico dos materiais, e a percepção da temperatura dos mesmos.

A determinação dos valores de  $C_p$  das amostras de PTFE, de madeira e da cortiça foi efetuada pelo método *StepScan DSC*, utilizando o *Diamond DSC* de compensação de potência (*Perkin*

*Elmer*) e o software específico deste equipamento para um varrimento por passos. Esta técnica aplica uma série de intervalos curtos de aquecimento seguida de etapas isotérmicas, na gama de temperatura de interesse. O procedimento teve início com a determinação da massa das amostras e das cápsulas de alumínio usadas como recipiente de amostragem e da referência. Posteriormente, as cápsulas vazias colocadas nos fornos de amostragem e referência e procedeu-se à determinação da linha de base, em condições experimentais idênticas às usadas para a análise das amostras. Por fim, cada amostra foi submetida a programa de varrimento que consistiu em 6 repetições entre 0 e 60 °C, que compreendeu vários passos de aquecimento de 10 °C, a uma velocidade de varrimento de 5 °C/*min* e passos isotérmicos intermédios com duração de 0,8 min (Figura 2.5).

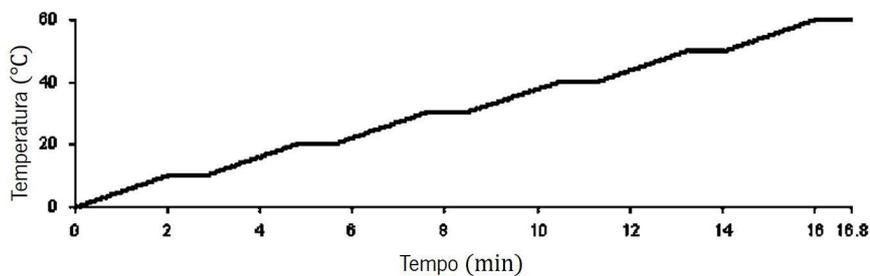


Figura 2.5 Programa de varrimento utilizado para determinação do valor de  $C_p$ , pelo método *StepScan DSC*.

Por impossibilidade de determinação das restantes propriedades térmicas via DSC das amostras referidas anteriormente e ainda das amostras de alumínio, cerâmica e XPS, a medição destas foi avaliada por um equipamento, modelo TPS250 da marca *Hot Disk*, num laboratório externo a uma temperatura de  $23 \pm 0,5$  °C. Este equipamento permite a medição simultânea da condutividade e difusividade térmica, no plano e através do plano, através do método da sonda plana transiente (TPS) e possui capacidade efetiva para medição de condutividade térmica numa gama compreendida entre os  $0,005-1800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Permite ainda avaliar diferentes tipos de materiais, incluindo cerâmicos, polímeros, metais e compósitos, na forma de sólidos, líquidos, pastas ou pós. Para além de possibilitar a avaliação de amostras de pequena dimensão, este equipamento permite ainda a determinação de  $C_p$  em sólidos e líquidos. No módulo para a determinação do  $C_p$ , a amostra a ser testada é colocada num recipiente de ouro isolado, que é aquecido, cuidadosamente, com um efeito de aquecimento bem definido, permitindo cálculos de  $C_p$  precisos. Este método baseia-se no procedimento de um sensor plano aquecido de forma transitória. Este sensor compreende um padrão eletricamente condutor na forma de uma espiral

dupla, que foi gravada numa fina folha de metal, normalmente de níquel, sendo que esta espiral é intercalada entre duas folhas finas de um material isolante. Durante a medição, o sensor é colocado entre duas frações da amostra a analisar. Ao fornecer corrente elétrica, forte o suficiente para aumentar a temperatura do sensor e da amostra, e ao mesmo tempo registar a alteração da resistência do sensor em função do tempo, o sensor funciona como uma fonte de calor e como um sensor de temperatura dinâmico.

### 2.2.3 Métodos de caracterização e avaliação da percepção térmica e da temperatura de materiais em situação de exposição à radiação IV e solar

#### Espetroscopia de refletância com esfera integradora

Como referido anteriormente, uma das formas de diminuir a absorção da energia solar é pela utilização de materiais de elevada refletância. Assim, foi feito um estudo da alteração da refletância, através da aplicação de pigmentos que conferiam a propriedade de reflexão da radiação IV aos materiais. A refletância de um material varia em função do comprimento de onda da radiação incidente. Como tal, o método considerado como o mais correto para calcular a refletância solar de um determinado material é efetuar medições por espectroscopia, onde um feixe de radiação, que abrange os mesmos comprimentos de onda do espectro solar, incide sobre amostra para que se obtenha a refletância da amostra ao longo do espectro solar.

As medições da refletância foram determinadas no espectrofotómetro UV-Vis-NIR da *Cary 5000 Agilent* (Figura 2.6).



Figura 2.6 Espectrofotómetro UV-Vis-NIR equipado com uma esfera integradora.

A espectrofotometria UV-Vis-NIR é uma técnica que permite realizar medições de refletância, absorvância e transmitância de gamas específicas do espectro eletromagnético, entre elas, a gama do UV, do visível e do IV. O espectrofotómetro vem equipado com uma esfera integradora que

oferece uma dimensão adicional às capacidades do equipamento, permitindo a medição da transmitância e refletância de sólidos e líquidos turvos. A geometria da esfera integradora possibilita a recolha da maior parte da radiação refletida ou transmitida por uma amostra, eliminando quaisquer preferências direcionais e apresenta um sinal integrado ao detetor. Normalmente, as esferas de integração são revestidas internamente com uma tinta branca altamente refletora, o PTFE.

Neste estudo, o módulo de medição com esfera integradora foi utilizado para realizar as medições de refletância das amostras, de acordo com a norma ASTM E903-96 [33]. A energia refletida é medida por detetores e a refletância é calculada através da razão entre a energia refletida e a incidente. Os ensaios consistiram em efetuar medições da refletância hemisférica total, ou seja, foi medida a radiação em todas as direções do hemisfério, que representa a radiação total que será refletida. A medição da refletância foi efetuada com recurso ao espectrofotómetro UV-Vis-NIR com a esfera integradora, sendo traçados espectros para diferentes amostras de base polimérica e de revestimento cerâmico a uma velocidade de varrimento de  $600 \text{ nm}/\text{min}$  entre  $250\text{-}2500 \text{ nm}$ . Inicialmente, procedeu-se à calibração do equipamento. Para tal, verificou-se o alinhamento a 0% e a 100% de refletância. O alinhamento a 0% de refletância é feito com as portas de transmissão abertas e colocando a tampa magnética preta de cobertura das amostras sobre a porta de refletância. No alinhamento a 100% de refletância, faz-se a medição em relação ao padrão de refletância recomendado pela marca, um disco de PTFE, que se supõe possuir, teoricamente, 100% de refletância em todo o espectro Figura 2.7. Assim, com a porta de transmissão bloqueada, o padrão de referência é colocado na porta de refletância e fecha-se o compartimento da amostra com a tampa magnética preta. De seguida, o padrão foi substituído pela amostra a analisar e foi traçado o espectro de refletância para todas as amostras. Foram realizadas três leituras de refletância para cada amostra polimérica e de revestimento cerâmico controlo e funcionalizadas.



Figura 2.7 Padrão de refletância (PTFE).

Uma recomendação importante que acompanha a norma ASTM E903-96 é que a amostra deve ficar em contato direto com a borda da abertura da esfera e cobrir todo o espaço do orifício. Ainda assim, a luz externa deve ser impedida de entrar na esfera através do uso de uma proteção, que acompanha o equipamento, colocada sobre a amostra.

Na análise das amostras pelo espectrofotômetro com a esfera integradora a componente refletida do feixe da amostra é coletada pela esfera integradora e detetada pelo detetor da esfera. O sinal do detetor representa, portanto, a parte do feixe da amostra que não é transmitida nem absorvida pela amostra.

Considerando que a intensidade da radiação solar não é constante ao longo do espectro, para a obtenção da refletância solar da amostra, os valores de refletância espectral devem ser corrigidos de acordo com a intensidade da radiação solar para cada comprimento de onda. Essa correção é efetuada com base em dados de irradiação solar global espectral, fornecida a partir de um espectro solar padrão, que acompanha a norma ASTM G173, e que se encontra integrado no intervalo onde foram efetuadas as medições (Figura 2.8) [34].

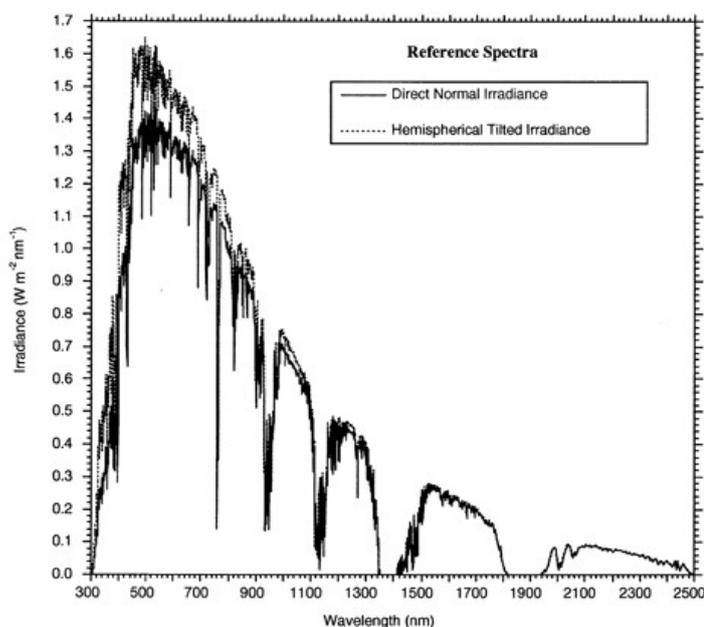


Figura 2.8 Imagem da representação gráfica da Irradiação Espectral Normal Direta (linha Sólida) e Irradiação Espectral Hemisférica em Superfície Inclinada a 37 ° (linha tracejada).

Em termos matemáticos, a refletância solar total ( $TSR$ ) ajustada ao espectro solar, é expressa pela equação (2.8), integrando a refletância espectral ( $\rho_\lambda$ ) sobre a distribuição padrão de

irradiação espectral ( $E_\lambda$ ) na gama de comprimentos de onda compreendida entre 250 *nm* a 2500 *nm*.

$$TSR = \frac{\int \rho_\lambda \cdot E_\lambda}{\int E_\lambda} \quad (2.8)$$

Assim, após a obtenção das medidas de refletância solar das amostras de revestimento cerâmico e de base polimérica, procedeu-se ao cálculo do *TSR* de acordo com a equação (2.8).

Método de determinação e quantificação de emissividade hemisférica total – *emissometer*

O *emissometer*, modelo AE1 (Figura 2.9), é um equipamento desenvolvido com o intuito de medir a emissividade da superfície dos materiais, com base na norma ASTM C 1371 [35].



Figura 2.9 *Emissoímetro* modelo AE1.

Este é composto por um detetor que é aquecido até aos 82 °C, para fornecer a diferença de temperatura necessária entre o detetor e a superfície, de forma a que a amostra a medir não tenha que ser aquecida. O detetor foi projetado de forma a que a tensão que é medida diretamente por ele se relacione linearmente com a emissividade. A medição é feita por comparação com padrões de alta e baixa emissividade e requer que estes se encontrem à mesma temperatura que a superfície da amostra analisada. Este instrumento mede a emissividade num valor único integrado para vários comprimentos de onda, daí ser uma medição total. O facto de ser uma emissão hemisférica deriva de os valores serem obtidos para todas as direções de emissão.

Antes de começarem a ser efetuadas as leituras de emissividade, procedeu-se à calibração do equipamento através do uso de padrões com valores de emissividade conhecidos. O padrão de alta emissividade foi colocado numa extremidade do dissipador de calor e o padrão de baixa emissividade na extremidade oposta. Ambos foram calibrados para um valor de emissividade de

0,88 e 0,06, respetivamente. Para garantir que os dois padrões permanecem à mesma temperatura, deve ser mantida uma boa transferência de calor entre as referências e o dissipador de calor. Como tal, colocaram-se 2-3 gotas de água na superfície do dissipador de calor. Após a etapa de calibração, colocou-se a amostra de material no padrão de baixa emissividade e registou-se o valor de emissividade em comparação com as emissividades dos padrões de referência. Posteriormente, recolocou-se o detetor na referência de emissividade elevada e ajustou-se o valor de forma a produzir uma leitura igual à emissividade de referência (0,88), se necessário. Este procedimento foi repetido para quatro secções de cada uma das amostras, sendo efetuadas seis repetições em cada secção, cada uma com duração de dois minutos. O valor médio de emissividade obtida nas diferentes medições representa o valor da emissividade da amostra analisada.

#### Medição da temperatura superficial de materiais expostos à radiação IV

O estudo realizou-se recorrendo a uma instalação construída no CeNTI, composta por uma lâmpada emissora de radiação IV (OSRAM *Infrared heat lamps*) de 1500 W, presa no topo de um suporte, como fonte de fornecimento de radiação às amostras em análise. A temperatura à superfície dos materiais foi determinada com uma câmara de radiação IV (*Thermo Vision A320*), durante todo o ensaio.

A câmara de radiação IV permite converter a radiação emitida (absorvida) pelas amostras, durante a exposição, produzindo uma imagem térmica da superfície do material, dando a conhecer a temperatura na superfície do material emissor.

Os ensaios devem ser feitos em condições de temperatura e ventilação estáveis, uma vez que, a câmara deteta, simultaneamente, a radiação emitida pelo material, a radiação proveniente da vizinhança, que é refletida pelo objeto, e ainda a contribuição da radiação da atmosfera. Desta forma, para se obterem valores de temperatura mais fidedignos, o operador deveria ajustar os parâmetros relativos à temperatura da atmosfera, à temperatura refletida na vizinhança, à emissividade ( $e$ ) dos materiais, à humidade relativa e à distância do objeto à lente da câmara IV. No entanto, nem sempre é fácil conhecer a  $e$  dos objetos bem como a temperatura refletida na vizinhança para cada ensaio. Neste caso em particular, como o estudo foi realizado a temperaturas elevadas (incidência de radiação IV), haverá uma elevada emissão de radiação por parte dos materiais, sendo que as contribuições radiativas da vizinhança e atmosfera passarão a ser desprezíveis, uma vez que nunca se tornarão superiores à emissão por parte dos materiais.

Neste estudo, o par de amostras (amostra com pigmentos refletivos à radiação IV e o respetivo controlo) foi colocado sobre uma placa de XPS, de forma a minimizar o aquecimento e a transferência de calor entre amostras por condução, e foi irradiado com uma lâmpada IV, de forma a garantir um aquecimento igual para cada par de amostras, em cada ensaio. As medições de temperatura foram feitas fixando-se o mesmo valor de  $e$  na câmara IV para todas as amostras. De forma a determinar os valores exatos de temperatura e obter-se imagens térmicas corretas, no final, foi feito o tratamento dos resultados obtidos no programa *FLIR Tools*, fornecendo-se o valor de  $e$ , medido com o *emissometer*, de cada amostra, de forma a obter o perfil de temperatura em função do tempo, real, para cada amostra analisada.

Na Figura 2.10, apresenta-se a instalação experimental utilizada para estes ensaios.

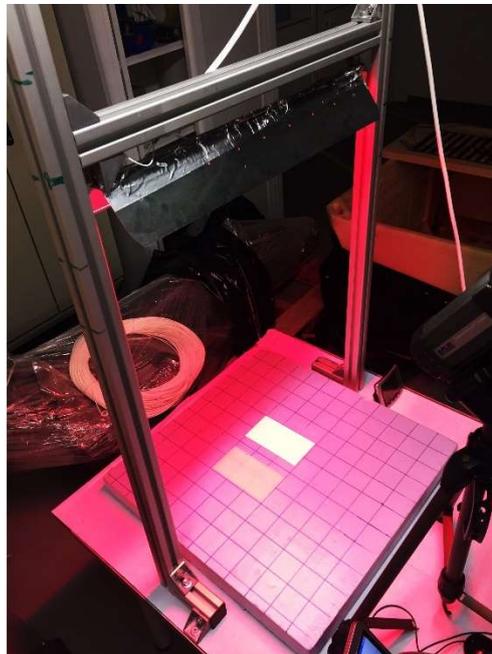


Figura 2.10 Instalação experimental com um suporte para a lâmpada IV e um suporte em XPS para colocar as amostras a serem irradiadas.

O procedimento seguido para todas as amostras teve início com o posicionamento do par de amostras a ensaiar no suporte abaixo da lâmpada e esta foi ligada, verificando-se as respetivas zonas de aquecimento que a câmara identifica através da temperatura superficial. Através do *software* da câmara de IV (*ThermaCAM Researcher Professional*), traçaram-se duas áreas quadrangulares de análise, uma para cada amostra, para ambas as zonas de aquecimento e mantiveram-se as mesmas áreas de análise até ao fim de cada ensaio. Este passo foi repetido para cada par de amostras de revestimento cerâmico e poliméricas ensaiados. Após a definição das áreas de estudo, já com a lâmpada ligada, monitorizou-se a irradiação através da temperatura

superficial lida pela câmara IV até que a temperatura do par de amostras estabilizasse. termográfica

#### Medição da temperatura superficial de materiais expostos à radiação solar

Os ensaios para determinação da temperatura superficial das amostras em estudo em situação de exposição solar foram conduzidos numa zona exterior do CeNTI, com exposição solar direta, e com recurso a uma câmara de radiação IV (*Thermo Vision A320*), tal como nos ensaios realizados em laboratório. À semelhança do procedimento de ensaio acima descrito, o procedimento adotado consistiu em colocar o par de amostras sobre uma placa de XPS, para minimizar a transferência de calor por condução, e em expor as mesmas à radiação solar, normalmente até ao período de exposição solar e temperatura máximas (13h00 / 14h00). Também neste ensaio, procedeu-se ao registo da temperatura superficial das amostras ao longo do tempo, com recurso à câmara termográfica.

#### Análise qualitativa da perceção térmica de materiais expostos à radiação IV e solar

De forma a avaliar a perceção térmica transmitida pelas amostras poliméricas e de revestimento cerâmico em situação de exposição a radiação IV, foram conduzidos ensaios de avaliação da sensação ao toque no seguimento dos ensaios realizados em laboratório, onde os materiais foram expostos a uma luz IV, e em situação de aplicação real de exposição solar.

O procedimento utilizado para avaliar a perceção térmica foi igual ao descrito no estudo efetuado à perceção ambiente, descrito no ponto 2.2.2, com a exceção de que, neste estudo, os voluntários só avaliaram a perceção em condições avistadas, uma vez que, no decurso dos ensaios à temperatura ambiente, não foram verificadas diferenças significativas nos resultados com e sem visão.

## **2.3 Análise e discussão dos resultados**

### 2.3.1 Estudo da perceção térmica à temperatura ambiente

#### Materiais poliméricos

Com o objetivo de avaliar a perceção térmica, à temperatura ambiente, de diferentes amostras de base polimérica e de identificar qual a amostra que transmitia a sensação mais fria, os voluntários foram instruídos a ordenarem-nas, de forma decrescente de sensação térmica, da mais fria para

a menos fria. Para tornar os dados significativos, sempre que foram avaliadas três ou quatro amostras em simultâneo, foi criada uma escala de percepção térmica, em que o 1 correspondia à amostra mais fria ao toque e o 3 ou 4 correspondia à amostra que transmitia uma sensação menos fria. Assim, com base nas respostas dadas pelos voluntários, atribuiu-se, a cada amostra, uma pontuação da escala de percepção térmica e foi traçado um gráfico da média das pontuações obtidas para cada amostra estudada. No entanto, quando se compararam grupos de amostras, as informações coletadas foram organizadas no que respeita às frequências relativas. No Anexo 1, encontra-se um exemplar, descrito de forma mais pormenorizada, dos tratamentos estatísticos descritos anteriormente. Os resultados apresentados posteriormente vieram, sempre que possível, acompanhados do valor de incerteza, na forma de intervalo de confiança, de acordo com o descrito no Anexo 2, com base no Guia Relacre 13 [36]. Em todos os resultados apresentados, o valor de  $N$  (graus de liberdade), varia, uma vez que este valor diz respeito ao número de voluntários e este não foi sempre o mesmo em todos os ensaios.

Os estudos de percepção térmica à temperatura ambiente tiveram início com a avaliação da temperatura de quatro amostras poliméricas comuns, PA, ABS, PC/ABS e PP (Figura 2.11). Para a análise estatística dos resultados obtidos, recorreu-se à escala de percepção referida anteriormente, numerada de 1 (sensação mais fria) a 4 (sensação menos fria), uma vez que foram analisadas as quatro amostras em simultâneo.

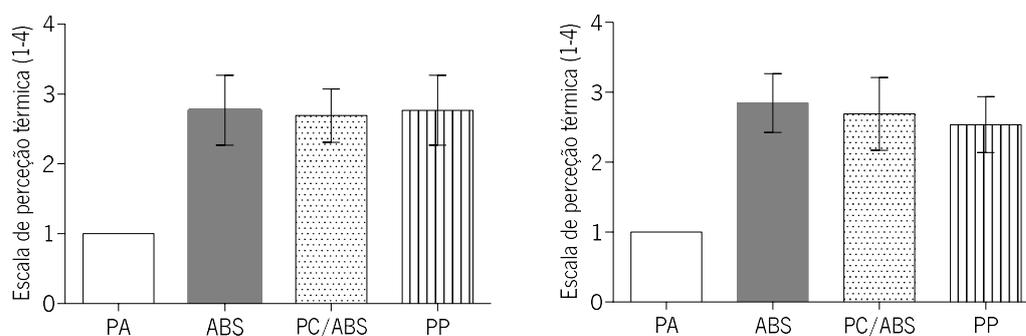


Figura 2.11 Sensação fria ao toque de amostras de PA, ABS, PC/ABS e PP, com base numa escala de percepção térmica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de  $t$ -*student* de 2,18 para  $(N-1)=12$  graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

O objetivo deste primeiro estudo foi perceber, entre as bases poliméricas testadas, a que transmitia uma sensação mais fria ao toque, por natureza, para, posteriormente, se proceder à incorporação de aditivos com elevada condutividade térmica para um aumento da sensação fria ao toque. Pela análise da Figura 2.11, observa-se que a amostra de PA revelou ser a mais fria, com uma

pontuação média de 1 na escala de percepção térmica, quer nos ensaios apenas com o toque, quer com o toque e visão. Relativamente às amostras de ABS, PC/ABS e PP, verifica-se que os voluntários não conseguiram diferenciar de forma clara entre elas, no que respeita à percepção da temperatura ao toque, uma vez que, a média das pontuações obtidas são muito próximas entre si na escala de percepção térmica, nos ensaios com e sem visão. Apesar da amostra de base PA ter sido considerada a amostra mais fria por 100 % dos voluntários, nos ensaios seguintes analisaram-se amostras de PP, nas quais foram incorporados aditivos na matriz polimérica, uma vez que a nível comercial não há muita oferta de bases aditivadas de PP com o objetivo de aumentar a condutividade térmica dos materiais.

Nas figuras seguintes, apresentam-se os gráficos obtidos dos estudos de percepção térmica efetuados por voluntários para as diferentes amostras de base polimérica controlo e aditivadas com substâncias que lhes conferiam um valor superior de condutividade térmica e, conseqüentemente, uma sensação mais fria ao toque, à temperatura ambiente.

Para avaliar o efeito da incorporação de nanopartículas condutoras na matriz polimérica na sensação fria ao toque, comparou-se a percepção térmica de duas amostras funcionalizadas com a mesma percentagem de aditivo, uma com 2,5% de Si-C e outra com 2,5% de óxido de alumínio com o respetivo controlo (amostra de PP prensada) (Figura 2.12).

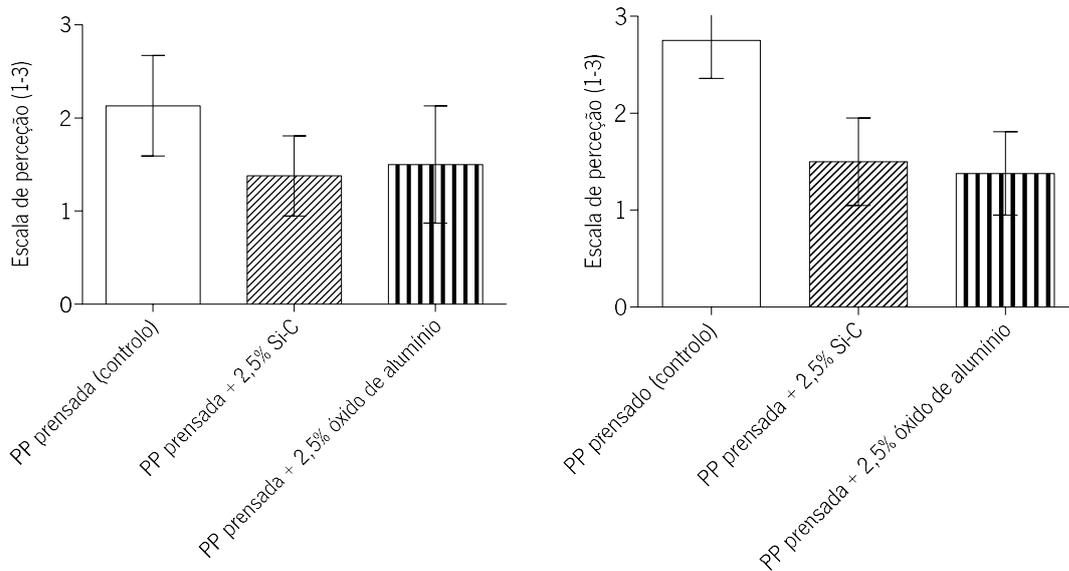


Figura 2.12 Sensação fria ao toque de duas amostras de base PP prensada cuja matriz polimérica foi incorporada com 2,5% de Si-C e com 2,5% de óxido de alumínio e do respetivo controlo, com base numa escala de percepção térmica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,36 para (N-1)=7 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Pela análise da Figura 2.12, verifica-se, para ambos os estudos, isto é, apenas com o toque e com toque e visão, que as matrizes poliméricas de base PP aditivadas com as nanopartículas condutoras conduzem a uma sensação fria ao toque quando comparadas com a amostra controlo, uma vez que os valores médios de pontuação na escala perceptual destas amostras encontram-se próximos de 1. No entanto, apesar de ambos os aditivos estarem a contribuir para o aumento da condutividade térmica, os voluntários não conseguiram distinguir com clareza qual das amostras aditivadas transmitia uma sensação fria ao toque mais elevada, uma vez que os seus valores médios na escala de percepção térmica são idênticos, nos ensaios com e sem visão. Isto impossibilita a escolha do aditivo mais indicado para incorporar na matriz polimérica de amostras de base PP para toque frio.

Os *PCMs* são materiais de elevado calor latente (quantidade de energia necessária que uma unidade de massa de uma determinada substância deve receber ou ceder para mudar de fase, isto é, mudar de estado sólido para líquido e vice-versa, líquido para gasoso e vice-versa), com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando energia do meio envolvente. Durante a mudança de fase a temperatura do *PCM*

mantém-se praticamente estável. Assim, funcionam como materiais termorreguladores, sendo que a sua função é de compensar oscilações bruscas da temperatura ambiente, tornando-os ideais para uma variedade de aplicações diárias que requerem controle de temperatura. Desta forma, também foi efetuado um estudo comparativo de percepção térmica entre amostras de base PP com 15% *PCMs* incorporados com ponto de fusão de 24 °C e o respetivo controlo (amostra de PP prensada) (Figura 2.13).

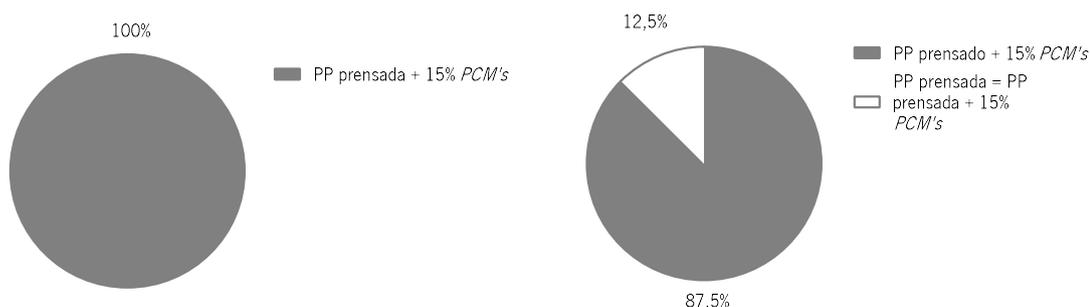


Figura 2.13 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra na qual foram incorporados *PCM*'s (15%) na matriz polimérica de base PP e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Pela análise dos resultados, verifica-se que a incorporação de *PCMs* conduziu ao efeito pretendido de aumentar a percepção fria ao toque das amostras de base PP, considerando a resposta de 100% dos voluntários, nos ensaios sem visão. Apesar de, nos resultados com visão, haver uma pequena percentagem de voluntários que considera as amostras iguais (12,5%), a maioria considerou a matriz polimérica com os *PCMs* incorporados mais fria ao toque (87,5%).

Nas figuras seguintes, apresentam-se os resultados de percepção térmica de amostras poliméricas de base PP funcionalizadas com aditivos de base de carbono.

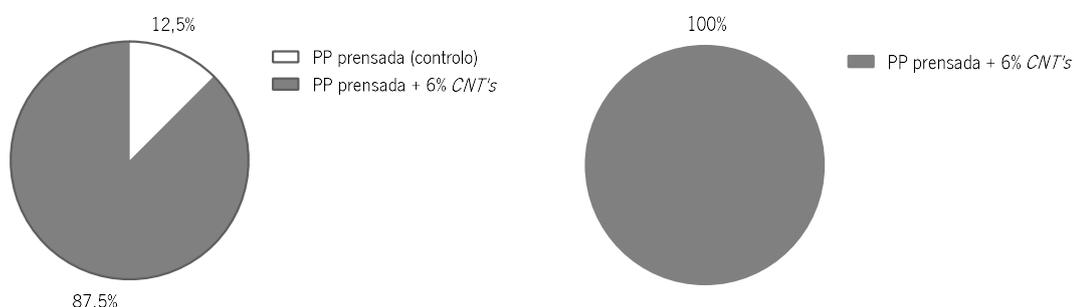


Figura 2.14 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra em que foram incorporados *CNT*'s (6%) na matriz polimérica de base PP e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

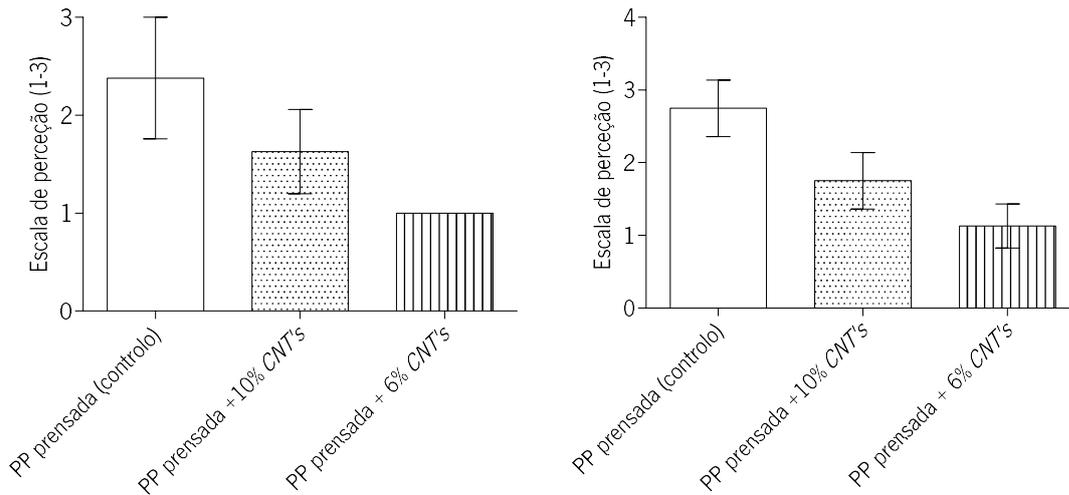


Figura 2.15 Sensação fria ao toque de duas amostras de base PP incorporadas com 6% e 10% de *CNT's* e o respetivo controlo, com base numa escala de percepção, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita). Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,36 para  $(N-1)=7$  graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Primeiramente, comparou-se uma amostra de base PP funcionalizada com 6% *CNTs* e o respetivo controlo (Figura 2.14). Posteriormente, a amostra de base PP funcionalizada com 6% de *CNTs* foi comparada, simultaneamente, com uma amostra de base PP que continha 10% *CNTs* e o respetivo controlo, sendo que o objetivo foi avaliar a influência de diferentes percentagens do mesmo aditivo na sensação fria ao toque (Figura 2.15). A Figura 2.14 revela que 87,5% e 100% dos voluntários considerou a amostra de base PP com aditivos de base de carbono a mais fria ao toque, nos ensaios sem e com visão, respetivamente. A análise da Figura 2.15 mostra que, após comparação de amostras funcionalizadas com *CNTs* em diferentes percentagens e o respetivo controlo, as primeiras foram consideradas mais frias ao toque, sendo que a amostra que continha 6% de *CNTs* foi considerada a mais fria ao toque, visto que a média das pontuações na escala de percepção é de 1. Ou seja, a matriz polimérica aditivada com 6% de *CNTs* revelou ser a mais eficiente na sensação fria ao toque, quer nos ensaios em que os voluntários não podiam visualizar as amostras, quer nos ensaios em que podiam visualizar e tocar nas mesmas.

Posteriormente, com o objetivo de avaliar a influência da adição de nanopartículas de grafite à matriz polimérica no aumento da condutividade térmica e, conseqüentemente, na sensação fria ao toque do compósito, foi comparada uma amostra PP prensada aditivada com 20% de grafite e o respetivo controlo (PP prensada) (Figura 2.16).

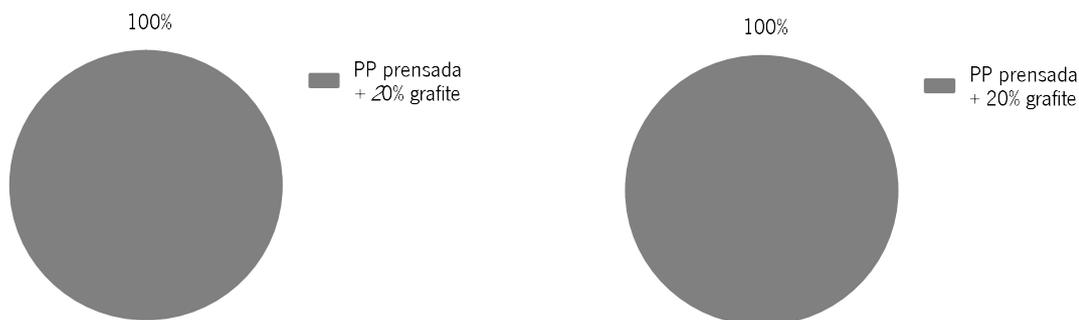


Figura 2.16 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP em que foram incorporadas nanopartículas de grafite (20%) na matriz polimérica e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Pela análise dos resultados, verifica-se que 100% dos voluntários considerou a amostra funcionalizada com grafite a mais fria ao toque, nos ensaios com e sem visão, evidenciando a contribuição das nanopartículas de grafite para a sensação fria ao toque.

Com o mesmo objetivo, comparou-se a amostra de PP prensada aditivada com 1,5% de grafeno e o respetivo controlo (Figura 2.17).

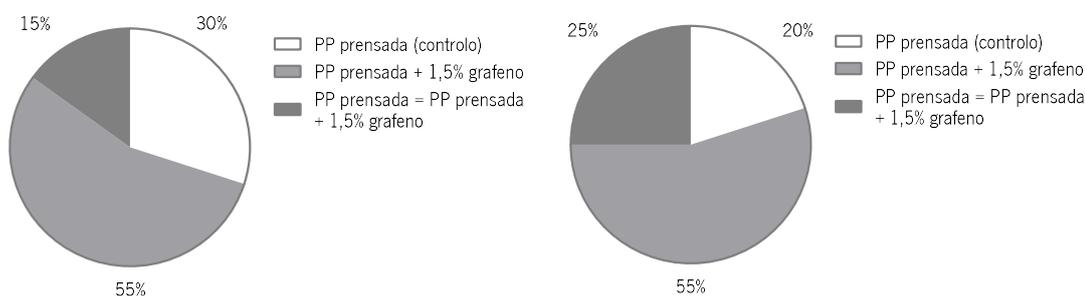


Figura 2.17 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP na qual foram incorporadas nanopartículas de grafeno (1,5%) e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

A análise de resultados mostra que 55% dos voluntários considerou a amostra de base PP funcionalizada com 1,5% de grafeno a mais fria das amostras, nos ensaios com e sem visão. 30% dos voluntários, em condições cegas, considerou a amostra controlo a amostra mais fria. No entanto, aquando da visualização das amostras, esta percentagem reduziu e apenas 20% dos voluntários considerou a amostra controlo mais fria. Os restantes 25% e 15% dos voluntários não conseguiram distinguir, no que respeita à sensação fria, entre a amostra funcionalizada e o respetivo controlo, em condições em que poderiam visualizar as amostras e em condições cegas, respetivamente.

A Figura 2.18 mostra os resultados da comparação de uma amostra de base PP funcionalizada com 10% de CB com o respetivo controlo.

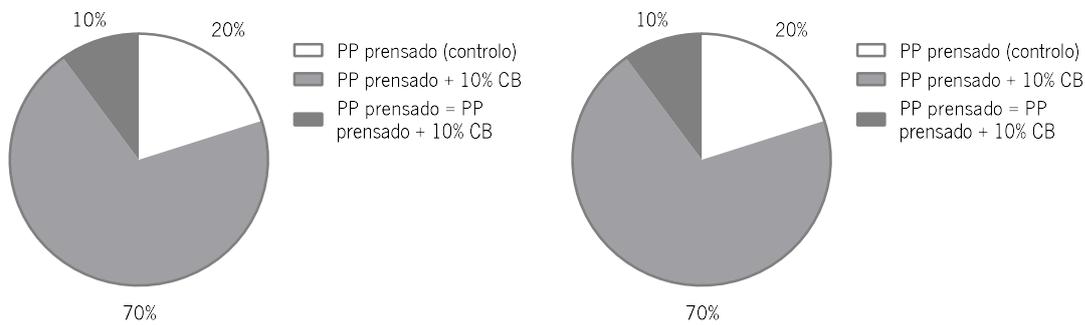


Figura 2.18 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de base PP aditivadas com 10% de CB e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Os resultados revelam que 70% dos voluntários identificaram a amostra aditivada com CB como sendo mais fria ao toque, nos resultados com e sem visão, o que sugere que o aditivo está a desempenhar o efeito pretendido. Apenas 10% dos voluntários não conseguiu distinguir entre a amostra funcionalizada e o respetivo controlo no que respeita à perceção térmica e 20% dos voluntários mencionou que era a amostra controlo que transmitia uma sensação mais fria ao toque, nos ensaios com e sem visão.

Na Figura 2.19, encontram-se os resultados de perceção térmica ao toque de um estudo que comparou uma amostra funcionalizada com 40% de nitreto de boro e o respetivo controlo.

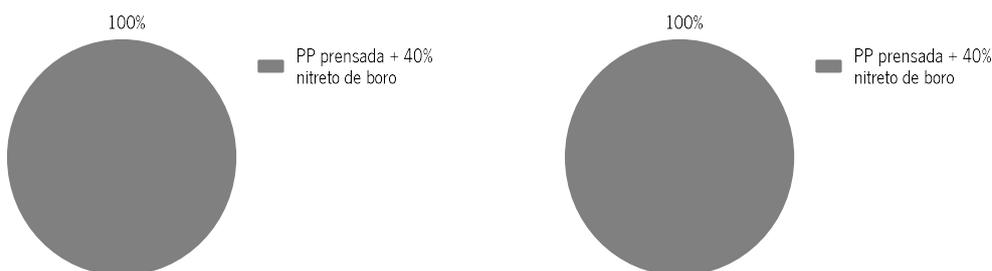


Figura 2.19 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de PP prensada e uma amostra em que foi incorporado nitreto de boro (40%) na matriz polimérica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Pela análise dos resultados, verifica-se que 100% dos voluntários identificou a amostra aditivada com nitreto de boro como a mais fria ao toque, independentemente de poderem visualizar ou não as amostras, o que sugere que o aditivo está a desempenhar o efeito pretendido.

Os mesmos ensaios foram efetuados a 50 °C, numa câmara climática, sem visualização das amostras (Figura 2.20), no sentido de validar o desempenho do aditivo em condições de temperatura superior à temperatura ambiente

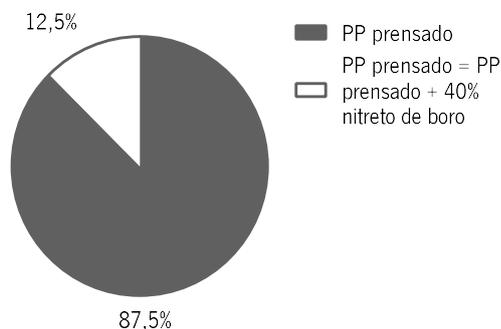


Figura 2.20 Frequência relativa de sensação fria ao toque de uma amostra de PP prensada e uma amostra de base PP, a qual foi incorporada com nitreto de boro (40%) na matriz polimérica, a uma temperatura de 50 °C, sem visualização das amostras.

De acordo com os resultados, a amostra que foi considerada mais fria à temperatura ambiente (PP prensada + 40% nitreto e boro) revelou-se a mais quente quando o ensaio foi realizado a 50 °C, sendo que 87,5% considerou a amostra de PP prensada como a mais fria e os restantes 12,5% a amostra aditivada com 40% de nitreto de boro. Os resultados demonstram que ocorreu o efeito de inversão termosensorial. Este efeito é frequentemente observado em materiais com valores de condutividade térmica elevados, dado que, à temperatura ambiente, estes materiais vão extrair mais rapidamente o calor da mão e, quando sujeitos a temperaturas superiores, a transferência de calor também vai ser mais notável, embora seja no sentido inverso (da amostra para a mão), conduzindo a uma maior sensação de calor (sensação menos fria) [12]. Além disso, os resultados estão de acordo com o facto de a sensação fria dos materiais ser determinada pelo fluxo de calor da mão do voluntário para o material. Assim, caso o objeto esteja a uma temperatura inferior à da mão, o calor é extraído da pele durante o contacto e o objeto sente-se frio. No entanto, quando o objeto se encontra a uma temperatura superior à da mão, o sentido do fluxo de calor é invertido e é direcionado para a pele durante o contacto e o objeto sente-se quente. Neste ensaio, ambas as amostras, isto é, a amostra de PP prensada (controlo) e a amostra aditivada com 40% de nitreto de boro, encontram-se a uma temperatura de 50 °C, que é superior à temperatura da pele, que varia entre 25 °C e 36 °C. Isto explica a sensação fria aquando do toque na amostra de PP prensada, comparativamente à amostra aditivada com nitreto de boro, mesmo ambas estando à temperatura de 50 °C. A esta temperatura, verificou-se a inversão da sensação fria e quente dos

materiais, devido à elevada transferência de calor que ocorre com a amostra aditivada com nitreto de boro de boro.

Por último, foram comparadas, simultaneamente, amostras de base PP aditivadas com 20% de grafite, com 1,5% de grafeno, com 40% de nitreto de boro e com 10% CB, com o objetivo de concluir acerca do aditivo que conduzia a uma sensação mais fria ao toque (Figura 2.21).

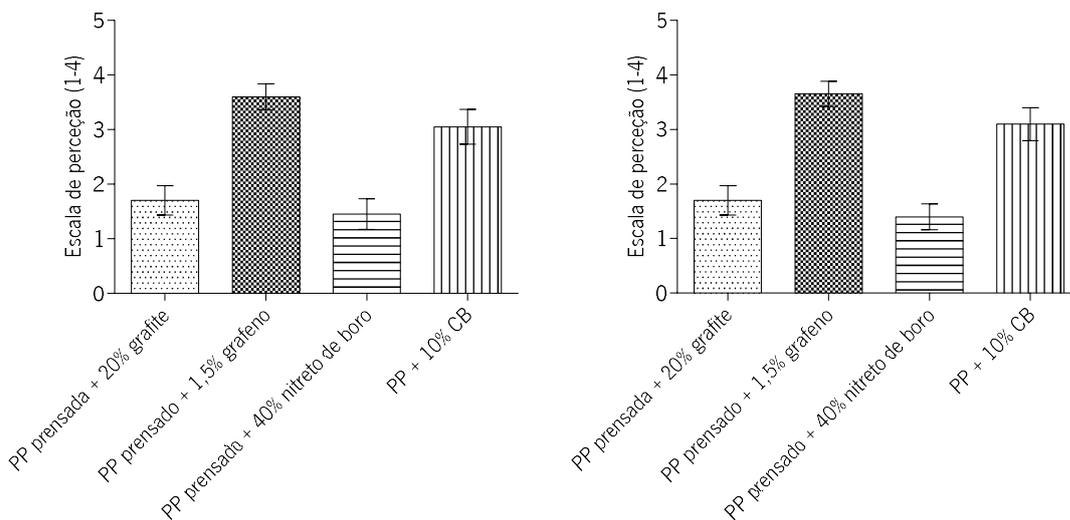


Figura 2.21 Sensação fria ao toque de amostras, cada uma incorporada com 20% de grafite, 1,5% de grafeno, com 40% de nitreto de boro e 10% CB, na matriz polimérica, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita), com base numa escala de percepção térmica. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Pela análise dos resultados, verifica-se que a amostra que os voluntários identificaram como a mais fria ao toque foi a amostra aditivada com 40% de nitreto de boro, seguida da aditivada com 20% de grafite, nos ensaios com e sem visão. Por outro lado, a amostra que conduziu a uma sensação menos fria ao toque foi a que continha 1,5% de grafeno. A amostra aditivada com 10% de CB foi considerada mais fria ao toque que esta última, no entanto, não tão fria como a aditivada com nitreto de boro e grafeno. Assim, por comparação das amostras aditivadas com diferentes aditivos, em diferentes percentagens, conclui-se que o aditivo que leva a uma sensação mais fria ao toque é o nitreto de boro.

Também foi feito um estudo comparativo de uma amostra de base PA com um aditivo para toque frio e o respetivo controlo (amostra de PA) (Figura 2.22).

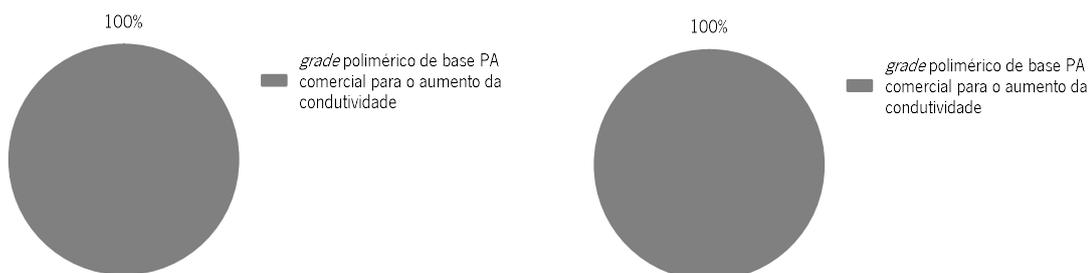


Figura 2.22 Frequência relativa de sensação fria ao toque de um *grade* polimérico de base PA comercial e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

A análise de resultados demonstra que 100% dos voluntários considerou a amostra do *grade* polimérico de base PA comercial para o aumento de condutividade a mais fria ao toque, relativamente ao controlo, o que sugere que o aditivo incorporado nesta amostra comercial contribuiu para um aumento da sensação fria ao toque.

Na Figura 2.23, apresenta-se o estudo com as mesmas amostras mas, desta vez, os ensaios foram realizados numa câmara climática a 50 °C, no sentido de validar o desempenho das amostras em condições de temperatura superior à temperatura ambiente

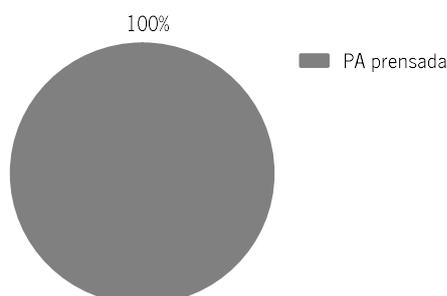


Figura 2.23 Frequência relativa de sensação fria ao toque de um *grade* polimérico de base PA comercial e do respetivo controlo, sem visualização das amostras, a uma temperatura de 50 °C.

Neste estudo, verificou-se, tal como anteriormente referido, o fenómeno de inversão sensorial [12]. Ou seja, aquando do toque da amostra de PA prensada e de um *grade* polimérico de base PA comercial, ambas a uma temperatura de 50 °C e superior à temperatura da pele, o fluxo de calor é direcionado para a mão e a sensação fria e quente dos materiais é invertida, devido à elevada transferência de calor que ocorre com o *grade* polimérico de base PA comercial. Desta forma, a amostra controlo foi considerada a mais fria ao toque por 100 % dos voluntários, ao contrário do que aconteceu nos estudos realizados à temperatura ambiente, nos quais o *grade* polimérico de base PA comercial foi considerado o mais frio por 100% dos voluntários.

Da análise dos resultados das amostras de base polimérica concluiu-se que a base polimérica PA foi a amostra que transmitiu uma sensação mais fria ao toque.

De um modo geral, as amostras de base polimérica que foram aditivadas com materiais que lhes conferiam valores superiores de condutividade térmica transmitiram uma sensação mais fria ao toque do que os respetivos controlos, sendo que os voluntários conseguiram discriminar com bastante clareza entre o par de amostras estudado. Os resultados obtidos dos ensaios de perceção térmica realizados numa câmara climática a 50 °C estão concordantes com o facto de a sensação fria dos materiais ser determinada pelo fluxo de calor da mão do voluntário para o material. Assim, verificou-se que, quando o material em estudo se encontra a uma temperatura superior à da mão, o fluxo de calor é direccionado para a pele durante o contacto e o material sente-se quente. Ou seja, como há inversão do fluxo de calor durante o contacto com o material, a sensação fria e quente dos materiais é também invertida. Deste modo, verificou-se que, para todas as amostras testadas, a amostra que foi considerada mais fria à temperatura ambiente revelou-se a mais quente quando o ensaio foi realizado a 50 °C.

#### Materiais cerâmicos

O mesmo estudo de perceção térmica foi efetuado, à temperatura ambiente, com amostras de revestimento cerâmico, mas desta vez, as amostras foram ordenadas de forma crescente de sensação térmica da menos quente para a mais quente, de acordo com o objetivo pretendido. Para a análise estatística dos resultados obtidos, recorreu-se à escala de perceção térmica usada anteriormente no tratamento estatístico das amostras poliméricas. Uma vez que o objetivo é a amostra de revestimento cerâmico que proporciona um toque mais quente, a escala foi numerada de 1 (sensação menos quente) e 3 ou 4 (sensação mais quente).

Na Figura 2.24, observam-se os resultados comparativos de perceção térmica ao toque de quatro amostras, uma amostra de revestimento cerâmico convencional e três amostras funcionalizadas, cujo tratamento funcional era o mesmo, mas em diferentes condições de produção/funcionalização.

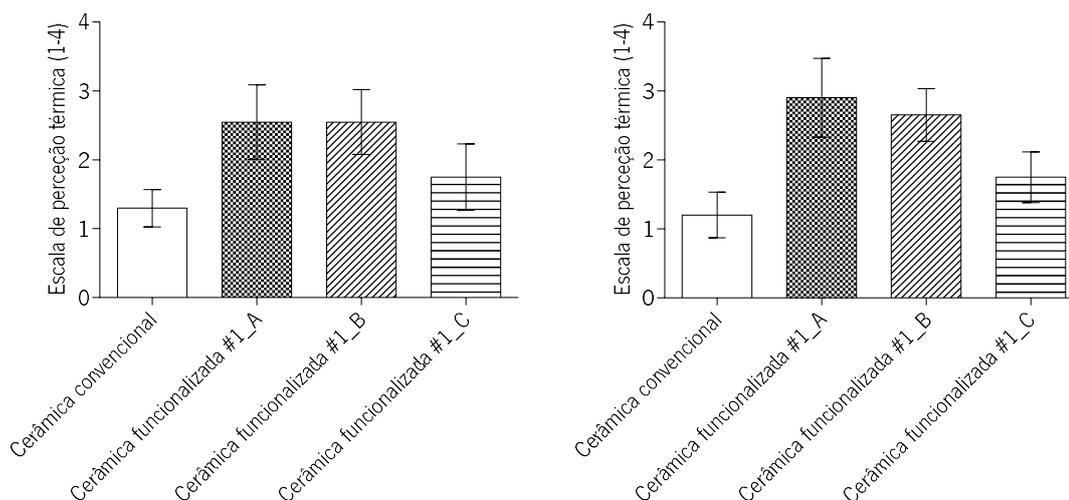


Figura 2.24 Sensação quente ao toque de três amostras de revestimento cerâmico submetidas a diferentes condições de produção/funcionalização e o respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita), com base numa escala de percepção. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Os resultados sugerem que, quer em condições sem visão, quer com visualização das amostras, as amostras funcionalizadas A e B foram identificadas pela maioria dos voluntários como as mais quentes ao toque. Embora estas tenham sido consideradas as amostras mais quentes, os voluntários não conseguiram distinguir, de forma clara, qual delas é que transmitia a sensação mais quente, uma vez que estas tiveram a mesma pontuação média na escala de percepção térmica. A amostra funcionalizada C foi considerada mais quente ao toque que o respetivo controlo, no entanto, menos quente que as amostras A e B funcionalizadas. A análise de resultados indica que o tratamento utilizado (#1) nas cerâmicas funcionalizadas está a despoletar o efeito pretendido de diminuir a condutividade térmica destas amostras levando a uma sensação mais quente ao toque, quando comparadas com o respetivo controlo. No entanto, este tratamento é, provavelmente, mais eficaz na diminuição do valor de condutividade térmica das amostras e, consequentemente, no aumento da sensação quente ao toque das amostras de revestimento cerâmico, nas condições de produção/funcionalização A e B.

Posteriormente, fez-se a comparação, em termos de percepção térmica entre uma amostra funcionalizada, cuja produção/funcionalização diferia de todas as amostras anteriores, mas com igual tratamento aplicado, e o respetivo controlo (Figura 2.25).

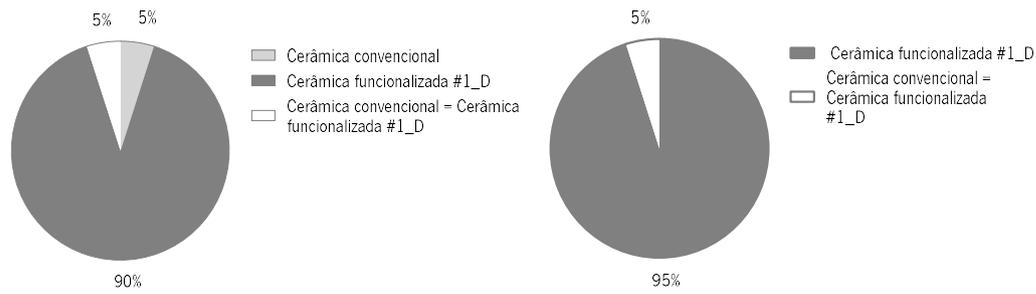


Figura 2.25 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra cerâmica funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Pela análise da figura, verifica-se que a amostra de revestimento cerâmico funcionalizada D foi considerada a mais quente ao toque por 90% e 95% dos voluntários nos ensaios sem e com visão, respetivamente. Apenas 5% dos voluntários não conseguiu discriminar em termos de ao toque entre a amostra funcionalizada e o respetivo controlo e apenas 5% identificou a amostra convencional como a mais quente ao toque, na condição em que não podiam visualizar as amostras. Assim, verificou-se que as condições de produção/funcionalização D também conduzem a resultados satisfatórios no que respeita à sensação quente ao toque das amostras de revestimento cerâmico.

Com o objetivo de avaliar um novo tratamento para diminuir a condutividade térmica das amostras, foi comparada a amostra cerâmica funcionalizada com o tratamento #2 (produzida nas condições A) e o respetivo controlo (Figura 2.26).

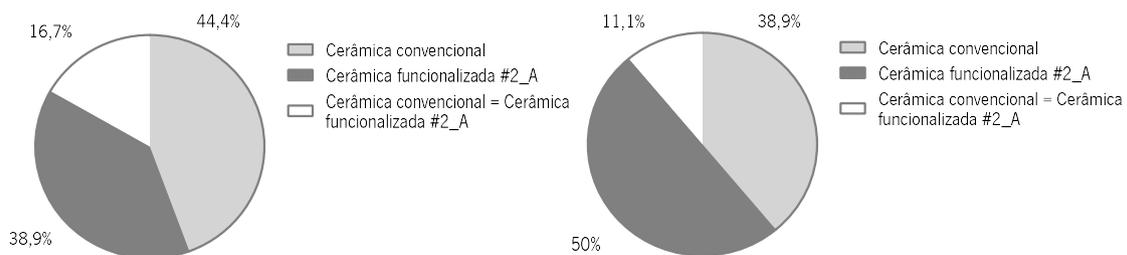


Figura 2.26 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

A análise de resultados demonstra uma dificuldade por parte dos voluntários na discriminação da temperatura entre as amostras comparadas. Nos ensaios em que os voluntários não podiam visualizar as amostras, 38,9% dos voluntários identificou a amostra funcionalizada como a mais quente das amostras, sendo que este valor percentual aumentou para 50% quando os voluntários puderam visualizar as amostras. No entanto, o número de voluntários que identificou a amostra

controlo como a mais quente ao toque foi de 44,4% nos ensaios sem visão e de 38,9% nos ensaios com visão. Perante estes resultados, não se consegue retirar nenhuma conclusão clara acerca do efeito deste tratamento na diminuição do valor de condutividade térmica da amostra de revestimento cerâmico e, conseqüentemente, no efeito de aumento da sensação de calor ao toque. Face aos resultados obtidos neste primeiro ensaio com a amostra cerâmica funcionalizada com o tratamento #2, procedeu-se à avaliação de uma amostra produzidas com a mesma tipologia de materiais (#2), mas em condições processuais diferentes (condições B). Na Figura 2.27, apresenta-se a frequência relativa de sensação quente ao toque para a amostra funcionalizada #2\_B, quando comparada com o respetivo controlo.

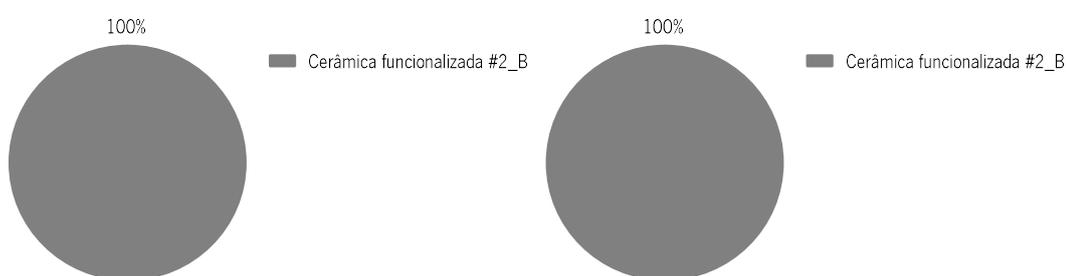


Figura 2.27 Frequência relativa de sensação quente ao toque de uma amostra cerâmica funcionalizada e do respetivo controlo, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

Perante estes resultados, consegue-se verificar que o tratamento aplicado está a satisfazer o efeito pretendido de reduzir os valores de condutividade térmica, levando a uma sensação quente ao toque das amostras de revestimento cerâmico, uma vez que 100% dos voluntários, em condições com e sem visão, identificaram a amostra funcionalizada como a mais quente ao toque. Este resultado demonstra que a percepção térmica transmitida pelas amostras de revestimento cerâmico está dependente não só do tratamento funcional aplicado, mas também das condições processuais utilizadas na funcionalização da amostra.

O último estudo de percepção consistiu em comparar os diferentes tipos de tratamento para a sensação quente ao toque, comparando duas amostras de revestimento cerâmico com tratamento funcional e condições de produção/funcionalização diferentes (Figura 2.28).

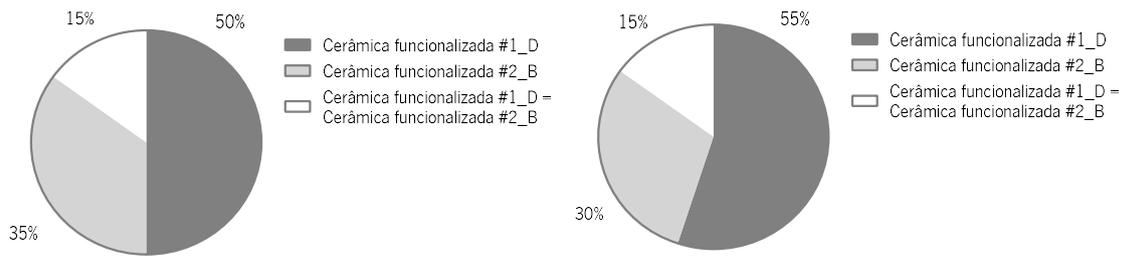


Figura 2.28 Frequência relativa de sensação quente ao toque de duas amostras cerâmicas funcionalizadas com diferentes tipos de tratamento, sem visão (à esquerda) e com visão (à direita).

A figura demonstra que 50% e 55% dos voluntários referiram que a amostra funcionalizada com o tratamento #1 leva a uma sensação mais quente do revestimento cerâmico do que as amostras com o tratamento #2, nos ensaios com e sem visão, respectivamente. A percentagem de voluntários que não conseguiu distinguir as amostras no que respeita à sensação quente ao toque, nas condições com e sem visão, foi de 15%. Pelos resultados obtidos, verifica-se que houve dificuldade por parte dos voluntários na discriminação da temperatura entre as amostras comparadas, dado que ambas as amostras funcionalizadas transmitem maior sensação quente ao toque do que o revestimento cerâmico convencional. Verifica-se, no entanto, que o tratamento #1, aplicado nas condições D, apresenta uma maior tendência para promover uma maior sensação quente ao toque, em comparação com o tratamento #2 nas condições B.

Relativamente às amostras de revestimento cerâmico, de um modo geral, os resultados experimentais levam a concluir que os tratamentos para baixar o seu valor de condutividade térmica, conduziram também ao efeito pretendido, na medida em que as amostras funcionalizadas transmitiam uma sensação mais quente ao toque. De uma forma geral, os voluntários conseguiram distinguir, com clareza, a perceção térmica de todos os pares de amostras estudados, classificando os materiais funcionalizados como mais quentes ao toque. Com base nos resultados apresentados, consegue-se ainda perceber que a sensação térmica transmitida pelas amostras depende não só do tratamento aplicado mas também das condições de produção/funcionalização.

Pela análise de todos os resultados apresentados anteriormente, quer para amostras poliméricas, quer para amostras de revestimento cerâmico, verifica-se que a análise de amostras em simultâneo dificulta a diferenciação das amostras em termos de perceção térmica. Desta forma, para os dois tipos de substratos, em ensaios posteriores, foram criados grupos de ensaio, com 2 amostras em cada grupo, verificando-se uma melhor discriminação térmica das mesmas por parte

dos voluntários. Além disso, os resultados sugerem que a condição em que os voluntários podem ver e tocar nas amostras, durante a realização dos ensaios de percepção não influenciou, em grande extensão, os resultados, daí serem deixados de serem executados ensaios sem visualização das amostras. O facto de os resultados se manterem praticamente constantes quando se passa das condições cegas para as condições com visão também revela, de certa forma, a vantagem de serem criados grupos de ensaio durante os estudos de percepção térmica à temperatura ambiente. A criação de grupos de ensaio leva a que o voluntário não tenha que memorizar a percepção térmica das amostras de forma igual quando estas lhe são apresentadas em simultâneo. Ou seja, a criação de grupos ajuda na capacidade de memorização da percepção da temperatura, levando a melhores discriminações térmicas entre amostras.

### 2.3.2 Validação de uma ferramenta de análise sensorial

Antes de se proceder à criação de um quadro de referência de percepção térmica, foram feitos estudos para validar a ferramenta que serviu como base e para avaliar a coerência dos resultados obtidos por este método. Tal como referido na secção de materiais e métodos, esta ferramenta consiste num quadro de referência, sendo que a grandeza térmica é apresentada por cinco indicadores distintos no que respeita à percepção da temperatura ao toque, sendo que cada um corresponde a um material dos cinco existentes no quadro. Assim, às intensidades marcadas na escala 0, 20, 50, 70 e 100, correspondem o alumínio, o polímero, a madeira, o esferovite e uma espuma, respetivamente.

Para a validação desta ferramenta de análise sensorial, procedeu-se ao tratamento de dados recolhidos para todas as amostras, avaliadas por 20 voluntários. Inicialmente, validou-se o método para amostras claramente distintas do ponto de vista térmico (Figura 2.29).

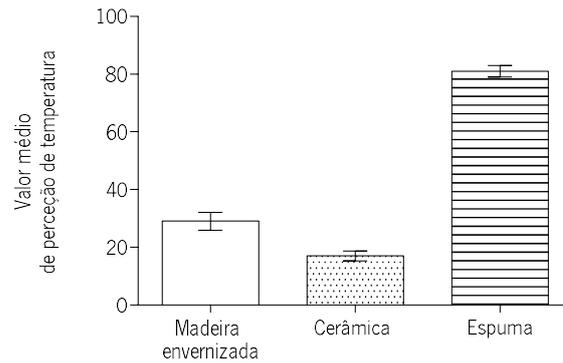


Figura 2.29 Valores médios de percepção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de madeira envernizada, cerâmica e espuma, numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,10 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Pela análise dos resultados obtidos dos materiais com sensações térmicas distantes, verifica-se que, no caso da madeira envernizada, a maioria dos voluntários classificou este material como um intermediário entre o polímero (intensidade 20) e a madeira (intensidade 50) do quadro de referência. No que respeita à amostra cerâmica, a maioria dos voluntários classificou-o como sendo um material muito próximo do polímero que se encontra no quadro de referência. Por fim, à espuma testada, foi-lhe atribuída uma intensidade térmica intermédia entre o esferovite (intensidade 100) a espuma do quadro de referência (intensidade 70). Pode ainda concluir-se que a amostra identificada como a mais quente foi a espuma e a amostra que conduziu a uma sensação mais fria foi a cerâmica.

Posteriormente, o método foi validado para materiais com sensações térmicas semelhantes (Figura 2.30)

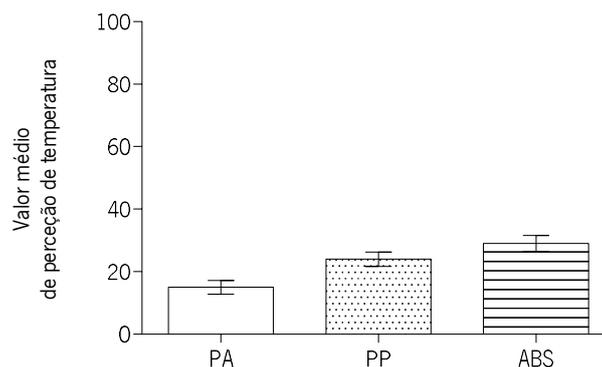


Figura 2.30 Valores médios de percepção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PA, PP e ABS, numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,10 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Quando se analisaram os resultados dos materiais com sensações térmicas próximas e, por isso, mais difíceis de distinguir pelo toque, verificou-se que as intensidades atribuídas pelos voluntários para as diferentes amostras foram muito próximas. Os resultados revelam que os voluntários consideraram que as amostras de ABS e PP se encontravam entre o polímero e a madeira do quadro de referência, embora mais próximas do polímero, e que a amostra PA transmitia uma sensação mais fria que o polímero do quadro de referência. A amostra de ABS foi considerada a amostra que transmitiu uma sensação mais quente ao toque das três amostras poliméricas analisadas.

Sendo que o objetivo foi que a classificação atribuída pelos voluntários se mantivesse entre sessões, analisou-se a média e o intervalo de confiança, para os ensaios realizados em três dias diferentes, para verificar se os voluntários se repetiam convenientemente. Assim, foi feito o cálculo do valor médio e intervalo de confiança dos resultados obtidos com as três medições da amostra de madeira envernizada, de cerâmica e espuma (Anexo 3), efetuadas em três dias diferentes. O método também foi avaliado para amostras com propriedades térmicas semelhantes, de forma a avaliar se os voluntários eram capazes de discriminar entre materiais com sensações térmicas próximas. Da mesma forma, o tratamento de resultados incluiu o cálculo do valor médio e do intervalo de confiança dos resultados obtidos para as três amostras analisadas, ABS, PA, e PP (Anexo 3), em três dias diferentes.

Deste estudo, verificou-se que os valores médios da intensidade térmica atribuída pelos voluntários são semelhantes para cada amostra, ou seja, a resposta dos voluntários manteve-se constante entre sessões para o grupo de amostras constituído pela madeira envernizada, a cerâmica e a

espuma. Para o grupo de amostras do qual fazem parte a amostra de ABS, PA e PP, também se verificou que os resultados da média das intensidades se mantêm praticamente constantes para todas as amostras, nos três dias em que foi efetuado o estudo, de acordo com os resultados apresentados no Anexo 3.

Perante estes resultados, esta ferramenta de análise mostra-se pertinente para avaliar a percepção térmica de amostras, uma vez que o grupo de voluntários se mostrou homogéneo nas classificações atribuídas entre as três sessões. Além disso, os resultados evidenciam que é um método adequado para avaliar materiais com propriedades térmicas distintas, uma vez que os voluntários conseguiram atribuir, com clareza, cada material do grupo de materiais constituído pela madeira envernizada, a cortiça e a espuma, a um valor intercalar de intensidade da escala de percepção da ferramenta em análise e, conseqüentemente, estabelecer uma relação de similaridade entre o material em estudo e um material presente na escala.

### 2.3.3 Proposta de método para avaliar e classificar os materiais de acordo com a sensação térmica ao toque

Na tentativa de criar um método de percepção da temperatura ao toque, foi projetada a construção de um modelo de painel que fosse representativo da sensação térmica e que foi inspirado na ferramenta de análise descrita e validada anteriormente.

O primeiro passo neste estudo foi a projeção da melhor estratégia para avaliar a sensação térmica ao toque. Este planeamento incluiu:

- Análise dos resultados da metodologia validada no passo anterior e o planeamento e desenvolvimento de uma metodologia, considerando alguns pontos de melhoria, que pudessem conduzir a melhores resultados;
- Escolha dos materiais constituintes do quadro de percepção tátil. Estes materiais devem transmitir diferentes percepções térmicas e devem assegurar a existência de um gradiente de temperaturas com os extremos “frio” e “quente”;
- Validação da coerência dos resultados pela análise dos resultados obtidos com a metodologia criada e a que lhe serviu como base, para os mesmos materiais.

Antes de proceder à construção do quadro de referências, foi necessário definir a escala de avaliação de percepção térmica mais adequada. Para tal, foram analisados os resultados obtidos da validação do método descrito anteriormente, no ponto 2.3.2.

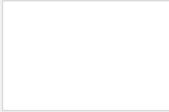
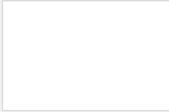
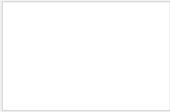
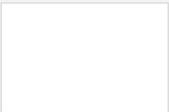
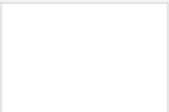
Durante a realização dos testes de percepção térmica, com recurso ao quadro de referência utilizado nos ensaios anteriores, verificou-se que os voluntários tinham dificuldade em comparar as amostras testadas com as do quadro de referência, particularmente quando se analisaram as três amostras com sensações térmicas próximas (PP, PA e ABS). As opiniões dos voluntários demonstraram que as regiões do quadro de referência que suscitaram maiores dúvidas foram a região entre 0 e 20 e entre 20 e 50. Isto pode dever-se ao facto de a escala do quadro de referência estar muito espaçada em termos de intensidade da percepção térmica nestas zonas. Desta forma, seria benéfico, em termos de resultados obtidos, se a escala deste quadro de referência tátil fosse menos espaçada, ou seja, se fossem introduzidos materiais de forma a reduzir o espaçamento observado em termos de intensidade térmica e, conseqüentemente, a diferença existente em termos de percepção da temperatura através do toque. Por outro lado, no quadro de referências original, o polímero estava identificado com uma intensidade de 20, o que, numa visão global do quadro, significava que este material transmitia uma sensação ao toque muito mais próxima do alumínio (intensidade 0) do que do esferovite (intensidade 100).

Assim, uma vez considerados alguns pontos de melhoria, procedeu-se à seleção dos materiais que iriam integrar o quadro de percepção térmica. Os materiais foram selecionados de modo, por um lado, a não confundir os voluntários, com sensações próximas e, por outro lado, a não serem completamente díspares. O objetivo desta escolha foi permitir aos voluntários o uso da plenitude da escala. A seleção das amostras de materiais foi feita de forma a contemplar as famílias de materiais poliméricos, metálicos, cerâmicos, naturais e espumas. As diferenças em termos de percepção térmica e a representatividade destes materiais, dentro de uma gama extensa de possibilidades, foram condicionantes desta seleção. De forma a estabilizar a temperatura da mão, usou-se a cortiça.

Desta forma, em vez de ter um quadro de referência cuja escala incluiria somente as intensidades de percepção térmica de 0, 20, 50, 70 e 100, foi introduzido um novo material, a cerâmica, entre a intensidade 0 e 20 e outro, a cortiça, entre 70 e 100, facilitando a quantificação da sensação térmica por parte dos voluntários. Esta alteração nos materiais de referência conduziu a uma alteração dos valores de intensidade atribuídos, nomeadamente ao nível do polímero / PTFE, que foi colocado com um nível intermédio de sensação de temperatura, e ao nível da madeira, à qual se atribui uma intensidade de maior calor.

Desta forma, a escala assume uma nova gama de intensidades de percepção térmica, 0, 25, 50, 70, 85 e 100 (Figura 2.31).

#### Quadro de referências original

|   |   |   |   |  |
|---|---|---|---|--|
|  |  |  |  |  |
| Alumínio<br><b>0</b>  | Polímero<br><b>20</b>   | Madeira<br><b>50</b>  | Espuma<br><b>70</b>   | Esferovite<br><b>100</b>   |

#### Quadro de referências desenvolvido

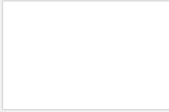
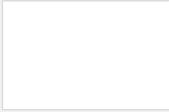
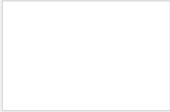
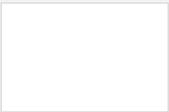
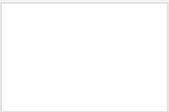
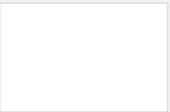
|   |   |   |   |  |   |
|---|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |  |
| Alumínio<br><b>0</b>  | Cerâmica<br><b>25</b>   | PTFE<br><b>50</b>   | Madeira<br><b>70</b>  | Cortiça<br><b>85</b>   | XPS<br><b>100</b>   |

Figura 2.31 Esquemática dos quadros de referência de análise sensorial.

Com estas alterações, pretendeu-se obter resultados mais fidedignos e uma diminuição do valor de desvio padrão obtido, uma vez que o quadro de referências original tinha uma gama de sensação térmica mais reduzida. Com esta nova escala, poderá haver uma maior probabilidade de obter correspondências mais corretas entre a sensação térmica percebida de uma amostra e o material do quadro de referência. Assim, com esta escala, pretendeu-se avaliar, em termos de percepção ao toque, os mesmos grupos de materiais testados com o quadro de referências original (madeira envernizada, cerâmica, espuma, PA, PP e ABS) com resultados mais confiáveis.

Assim, o passo seguinte teve como base a validação da coerência dos resultados pela análise dos resultados obtidos com o quadro de referências desenvolvido e o de quadro de referências original, que lhe serviu como base, para os mesmos materiais. Desta forma, fez-se a comparação para as amostras de cerâmica, madeira envernizada e espuma, do valor médio de percepção de temperatura, realizado em 3 diferentes dias, para o quadro de referências original e para o desenvolvido (Figura 2.32).

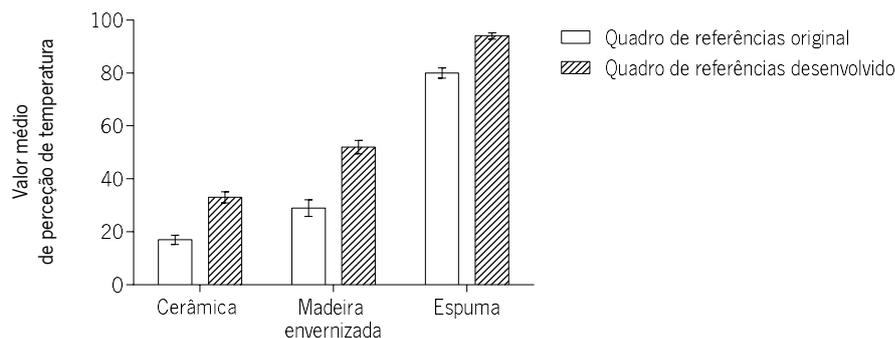


Figura 2.32 Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra cerâmica, madeira envernizada e espuma, numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original e o desenvolvido. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Perante estes resultados, verifica-se que a amostra de cerâmica, de madeira envernizada e de espuma assumem valores diferentes de intensidade térmica quando se comparam os dois quadros. No quadro de referências original, a percepção térmica da cerâmica encontrava-se entre o alumínio e o polímero, enquanto que no quadro de referências desenvolvido, passou a ser incluída entre o material cerâmico e o PTFE do quadro de referências. No caso da madeira envernizada, observa-se que esta, segundo o quadro de referências original, se encontrava entre o polímero e a madeira, mas mais próxima do polímero, enquanto que, no quadro de referências desenvolvido, esta se encontra entre o polímero e a madeira, mas com uma percepção mais próxima da madeira. Relativamente à espuma, no quadro de referências original, este material encontrava-se entre a espuma e o esferovite, embora mais próximo da espuma, enquanto que, segundo o quadro de referências desenvolvido, a espuma passa a estar no intervalo entre a cortiça e o XPS, embora mais próximo do XPS. De um modo geral, ao passar do quadro de referências original para o desenvolvido, verificou-se uma atribuição de calor maior para os três materiais estudados.

Também foi feita uma comparação com o grupo de amostras do qual faziam parte a amostra de PA, de PP e de ABS, do valor médio de percepção de temperatura, realizado em 3 diferentes dias, para ambos os quadros de referência (Figura 2.33).

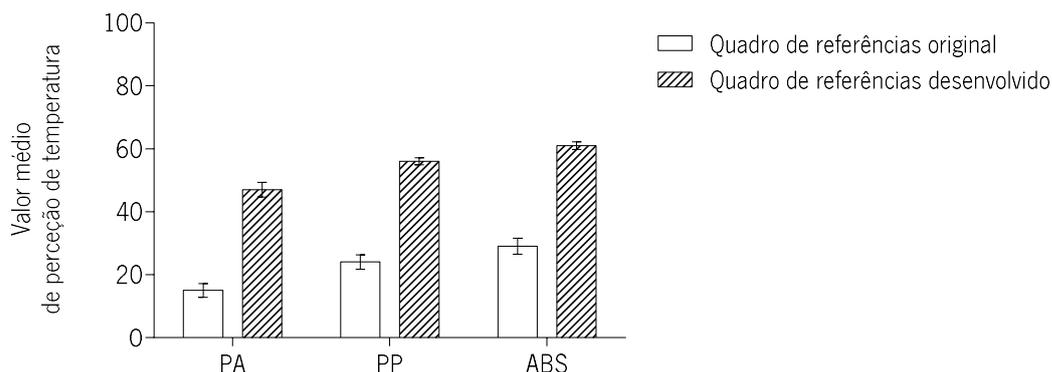


Figura 2.33 Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PA, PP e ABS, numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original e o desenvolvido. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Quando se avaliaram materiais que são muito próximos do ponto de vista térmico (PA, PP e ABS), verificou-se que, segundo o quadro de referências desenvolvido, para todos os materiais foi atribuída uma intensidade de calor maior, comparativamente ao quadro de referências original. O PA, cuja intensidade atribuída pelos voluntários estava contida no intervalo entre o alumínio e o polímero, no quadro de referências original, passou a estar no intervalo que engloba o teflon e a madeira, embora o seu valor de intensidade atribuído estivesse mais próximo do teflon. No que respeita à amostra de PP, no quadro de referências original, esta encontrava-se entre o polímero e a madeira, embora mais próximo do polímero, e passou a posicionar-se entre o teflon e a madeira, embora o seu valor de intensidade térmica esteja mais próximo da madeira. Relativamente à amostra de ABS, no quadro de referências original esta encontrava-se entre o polímero e a madeira, embora mais próximo do polímero, enquanto que no quadro de referências desenvolvido este se encontra entre o teflon e a madeira, e tem um valor de percepção intermediário entre estes dois materiais.

No entanto, apesar de, para todas as amostras haver um aumento de intensidade de calor ao passar do método original para o desenvolvido, verifica-se que os materiais que eram mais quentes/frios no método original continuam a ser no método desenvolvido.

De forma a verificar se a percepção térmica da amostra cerâmica, da madeira e da espuma seria influenciada pela inversão da escala do quadro de referências desenvolvido, ou seja, em vez de os voluntários começarem do material mais frio (alumínio) para o mais quente (XPS), estes foram instruídos a iniciarem o ensaio ao contrário, ou seja, a começar na amostra que transmite uma sensação mais quente Figura 2.34.

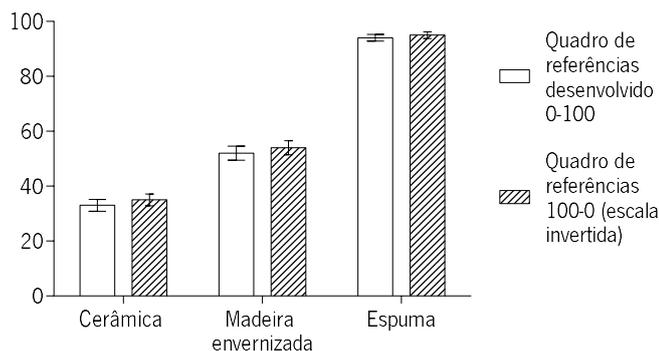


Figura 2.34 Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra cerâmica, madeira envernizada e espuma, numa escala de temperatura que variou entre 0-100, para o quadro de referências original. Incerteza calculada para um valor *de t-student* de 2,00 para (N-1)=59 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Com base nestes resultados, verifica-se que o facto de se iniciar o teste pelo material que transmite a sensação mais fria, o alumínio, ou começar pelo XPS, que é a amostra que transmite uma sensação mais quente, não influencia os valores médios de percepção térmica para as amostras analisadas, uma vez que os valores de intensidade atribuídos pelos voluntários foram semelhantes.

#### Estudo estatístico de análise de significância - ANOVA

No estudo realizado de percepção térmica com recurso aos quadros de referência original e desenvolvido, detetou-se que existem duas fontes de variação principais, o fator “voluntários” e o fator “dia”. Desta forma, para perceber como estas duas fontes de variação poderão estar a influenciar os valores médios de percepção para ambos os quadros, recorreu-se à ferramenta de análise estatística ANOVA 2 fatores.

A ANOVA é uma ferramenta estatística que permite avaliar sobre a média das medições que são afetadas por vários efeitos em simultâneo, para decidir as causas mais importantes e estimar a amplitude dos efeitos. Neste caso em particular, o que se pretende é estimar a amplitude do fator “voluntário” e “dias”, ou seja, a probabilidade de cada um destes fatores afetar os resultados. Assim, a ANOVA mostra como separar e avaliar as diferentes causas de variabilidade, a fim de verificar se existe uma diferença significativa entre elas. Aplicando esta ferramenta, é determinada a relação das variâncias (teste F) dos fatores separados que podem estar a afetar as médias das medições. Se o teste F indicar significância, rejeita-se a hipótese nula. Aceita-se a hipótese alternativa, quando existe uma diferença estatística real, entre as médias dos grupos. Posto isto, a análise consiste no valor de  $p$  e/ou de  $F$ , para cada fator. Caso  $p < 0,05$  e/ou  $F > F_{crítico}$ , significa que existem diferenças significativas entre a variação de um determinado fator [37].

Neste estudo foi aplicada a ferramenta ANOVA a diferentes materiais testados com o intuito de perceber se havia diferenças significativas entre as médias de percepção térmica entre ambos os quadros de referência utilizados, considerando o fator “voluntários” e o fator “dia”.

Análise ANOVA: dois fatores ( $\alpha=0,05$ )

Hipótese nula: “Não existem diferenças significativas entre os valores médios com 95% de confiança”.

As tabelas com os valores de  $F$  e  $F_{crítico}$  utilizados para esta análise encontram-se no Anexo 4. Para a amostra de madeira envernizada, segundo o quadro de referências original, o valor de  $F < F_{crítico}$  para ambos os fatores, pelo que a hipótese nula é aceite, ou seja, a variação entre voluntários e diferentes dias não estará a influenciar os resultados. Segundo o quadro de referências desenvolvido, o valor de  $F > F_{crítico}$  para o fator de variação “voluntário”, pelo que a hipótese nula é rejeitada, ou seja, existem diferenças significativas entre variação do fator “voluntário”. Para o fator de variação “dia”, o valor de  $F < F_{crítico}$ , não existem diferenças significativas entre variação do fator “dia”.

Para a amostra de espuma, cerâmica e PP, em ambos os quadros de referência, o valor de  $F > F_{crítico}$  para o fator de variação “voluntário”, ou seja, existem diferenças significativas entre variação deste para ambos os quadros de referência. Para o fator variação “dia”, o valor de  $F < F_{crítico}$ , também para ambos os quadros de referência, ou seja, não existem diferenças significativas entre dias para ambos os quadros de referência.

No que respeita à amostra de PA, para ambos os quadros de referência, o valor de  $F > F_{crítico}$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, ou seja, ambos os fatores estão a influenciar os resultados. Para de amostra de ABS, para ambos os quadros de referência, o valor de  $F > F_{crítico}$ , para o fator de variação “voluntário”, e portanto existem diferenças significativas entre voluntários para ambos os quadros de referência. Relativamente ao fator de variação “dia”, segundo o quadro de referências original, o valor de  $F < F_{crítico}$ , pelo que não se rejeita a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas entre dias para este quadro. No entanto, para o quadro de referências desenvolvido, o valor de  $F > F_{crítico}$ , pelo que existem diferenças significativas entre dias para o quadro de referências desenvolvido.

Perante estes resultados, e sabendo que quanto maior o valor de  $F$  em relação ao  $F_{crítico}$ , maior a amplitude da fonte de variação, é possível afirmar que o fator de variação “voluntário” é um fator marcante, ou seja, é uma forte fonte de variação dos resultados obtidos. Em relação ao fator “dia”,

este já não pronuncia tanto, ou seja, neste estudo, não foi o fator que mais se destacou como uma fonte de variação dos resultados. Isto vai de encontro ao esperado, uma vez que as variações entre voluntários, por natureza, são elevadas e difíceis de controlar, pelo que, qualquer estudo que utilize voluntários terá sempre esta componente de variação, impossível de eliminar.

#### 2.3.4 Correlação da percepção térmica com as propriedades térmicas dos materiais

O desenvolvimento da escala de percepção térmica teve também como objetivo relacionar as sensações térmicas ao toque transmitidas pelos materiais com as suas propriedades térmicas. As opiniões dos consumidores de que um determinado material deve ser “quente/frio” são ainda informações imprecisas para decisões acerca da seleção do material, mas podem tornar-se informações objetivas após se estabelecer uma correlação com as suas propriedades térmicas. Assim, tornou-se necessário transformar algumas informações e medidas qualitativas em informações objetivas.

Seguindo as etapas que compõe este estudo, logo após de ter sido feita a escolha dos materiais e de ter sido validada a metodologia adotada para esses materiais, foram realizadas as medições dos parâmetros térmicos, para que, posteriormente, seja possível correlacionar esses valores com aqueles que foram percebidos através do sentido do tato. Assim, os valores de  $C_p$  das amostras de PTFE, da cerâmica e da cortiça do quadro de referências, foram determinadas via método *StepScan DSC*, utilizando o *Diamond DSC* existente no CeNTI. Por impossibilidade de determinação dos valores de condutividade e difusividade térmica e dos valores de  $C_p$  dos restantes materiais, as medições dos parâmetros térmicos foi realizada em laboratório externo, pela técnica de *hot disk*. Os valores de efusividade térmica de todos os materiais foram determinados através da (2.9):

$$\varepsilon = \sqrt{k \times \rho \times C_p} \quad (2.9)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\rho$  é a densidade do material ( $g/m^{-3}$ ) e  $C_p$  é o calor específico ( $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ).

Para os materiais cujo valor de  $C_p$  não foi determinado via *hot disk*, os seus valores de densidade foram determinados pela equação (2.10):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.10)$$

onde  $m$  é a massa da amostra ( $g$ ) e  $V$  é o volume ( $m^3$ ).

O cálculo do volume foi efetuado considerando o comprimento, a largura e a espessura da amostra, medidas com um paquímetro. Posteriormente, após terem sido determinados todos os fatores necessários para o cálculo da efusividade térmica, este foi então determinado para cada material. No caso dos materiais cujo valor de  $C_p$  foi determinado via *hot disk*, este já inclui o valor da densidade do material, uma vez que este equipamento efetua medições de  $C_p$  sob volume constante, não tendo sido, por isso, necessário determinar os valores de densidade para esses materiais.

Tabela 2.3 Valores de condutividade térmica, de calor específico, de difusividade térmica e de efusividade térmica dos materiais de referência. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05

| <b>Material</b> | <b>K (<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>)</b> | <b>Calor específico (<math>J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}</math>)</b> | <b>Difusividade térmica (<math>mm^2 \cdot s^{-1}</math>)</b> | <b>Efusividade térmica (<math>W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{1/2}</math>)</b> |
|-----------------|---|--|--|---|
| Alumínio        | 234 ± 9   | 24 × 10 <sup>-6</sup> ± 3 × 10 <sup>-1</sup>                       | 102 ± 4  | 23703   |
| Cerâmica        | 1,68  | 20 × 10 <sup>-7</sup> ± 5 × 10 <sup>-2</sup>                       | 0,86   | 1810  |
| Teflon          | 0,34  | 22 × 10 <sup>-7</sup> ± 5 × 10 <sup>-2</sup>                       | 0,16   | 861   |
| Madeira         | 0,15  | 8 × 10 <sup>-7</sup> ± 7 × 10 <sup>-2</sup>                        | 0,24   | 347   |
| Cortiça         | 0,07  | 30 × 10 <sup>-7</sup> ± 7 × 10 <sup>-2</sup>                       | 0,23   | 144   |
| XPS             | 0,03  | 5 × 10 <sup>-4</sup>   | 0,65   | 39  |

Segundo a literatura, a propriedade térmica que mais contribui para a diferenciação dos materiais no que respeita à perceção térmica é a efusividade térmica [9,21]. A temperatura da superfície da pele ao contactar com um material depende das propriedades térmicas e da temperatura inicial da pele e do material. A propriedade térmica que influencia mais este processo é a efusividade térmica, que por sua vez depende da condutividade térmica e do calor específico. Portanto, a efusividade térmica determina a temperatura intermediária que é inicialmente estabelecida

quando uma superfície quente (mão) entra em contacto com uma superfície fria (material), atuando, assim, como um fator de ponderação, que determina se a temperatura da superfície da pele se aproxima mais da temperatura da pele ou do material, durante o contacto.

Dentro das possibilidades de correlacionar a percepção térmica dos materiais com os parâmetros térmicos normalmente estudados, este estudo focou-se então na correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o novo quadro desenvolvido com os respetivos valores de intensidade atribuídos para esses materiais na escala do novo método.

Depois de ser estabelecida a correlação, de forma a obter um valor de coeficiente de correlação de *Pearson* (R) razoável, o melhor ajuste de valores que se conseguiu obter foi com base na adição de uma linha de tendência logarítmica, obtendo-se um valor de R satisfatório, de 0,96. (Figura 2.35).

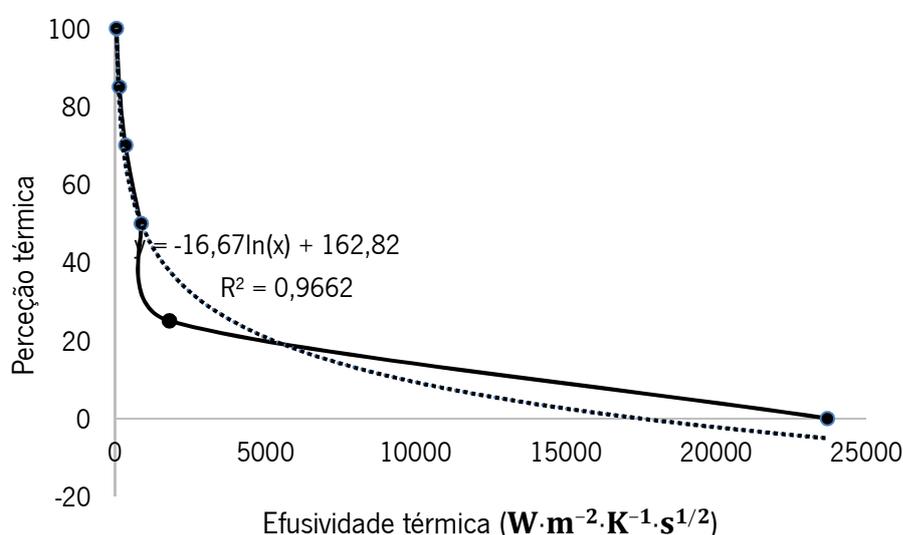


Figura 2.35 Correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o quadro desenvolvido com as intensidades atribuídas a esses mesmos materiais na escala do método desenvolvido. A linha contínua diz respeito à correlação sem qualquer ajuste e a linha a tracejado corresponde ao ajuste dos valores segundo uma linha de tendência logarítmica.

Pela análise da figura, verifica-se que há uma correlação logarítmica ( $y = -16,67 \ln(x) + 162,82$ ) entre a escala de percepção térmica e os valores de efusividade térmica determinados dos materiais do novo quadro de referência desenvolvido, observando-se um aumento do valor de efusividade térmica com o aumento da sensação fria (valor 0 da escala). Assim, há um aumento do valor de efusividade térmica ao passar do extremo mais quente da escala, que corresponde ao XPS, para o alumínio, o extremo mais frio. Estes resultados estão de acordo com a literatura que

refere que, os materiais com menor valor de efusividade térmica sentem-se mais quentes ao toque que os materiais com valor de efusividade superior [19].

O facto de a diferença de intensidade térmica entre o alumínio (0) e a cerâmica (25) ser da mesma ordem da diferença entre a cerâmica (25) e o teflon (50), leva a que correlação entre os valores de efusividade térmica e os valores de intensidade da escala atribuídos aos materiais seja menos realista. De facto, a diferença de percepção térmica entre o alumínio e a cerâmica é bastante superior à diferença observada entre a cerâmica e o teflon. Assim, caso se fizesse um ajuste da escala, atribuindo-se um valor de intensidade de 35 á cerâmica, tornando-a mais espaçada e portanto, mais quente, na escala em relação ao alumínio, era possível obter uma melhor correlação logarítmica entre a escala de percepção térmica e os valores de efusividade térmica determinados para os materiais de referência (Figura 2.36).

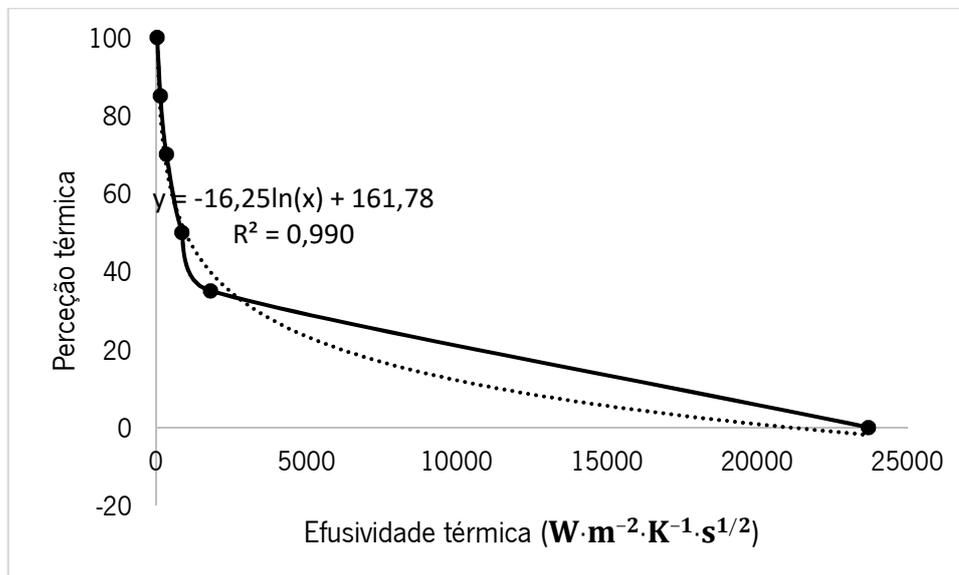


Figura 2.36 Previsão da correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o quadro desenvolvido com as intensidades atribuídas a esses mesmos materiais após um ajuste na escala. A linha contínua diz respeito à correlação sem qualquer ajuste e a linha a tracejado corresponde ao ajuste dos valores segundo uma linha de tendência logarítmica.

Posteriormente, a partir dos valores de efusividade térmica dos polímeros PP e ABS, foram calculados os valores de intensidade térmica atribuídos pelos dois materiais poliméricos, através da equação do ajuste logarítmico apresentando na Figura 2.35. Desta forma, conhecendo-se os valores de efusividade térmica da amostra de PP e ABS, por substituição na equação apresentada na Figura 2.35 do valor de  $x$  pelo valor de efusividade térmica das amostras, obteve-se um valor de  $y$ , portanto de intensidade térmica da escala de percepção, de 59 e 57, para a amostra de ABS e PP, respetivamente. Perante estes resultados, verifica-se que, os valores estimados para a

amostra de ABS e PP através da equação logarítmica de ajuste foi semelhante aos valores médios da percepção térmica dos voluntários quando testaram o novo quadro de referências com estes materiais (Figura 2.37).

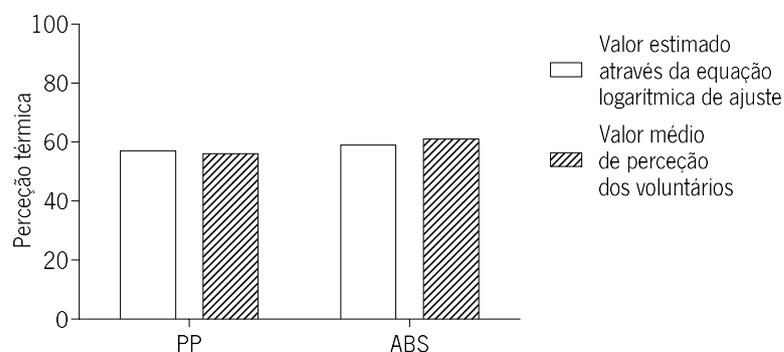


Figura 2.37 Comparação dos valores médios de percepção térmica para a amostra de PP e ABS segundo o novo quadro de referências e do valor estimado através da equação logarítmica de ajuste.

Este estudo focou-se então na correlação dos valores de efusividade térmica dos materiais que constituem o novo quadro desenvolvido com os resultados qualitativos das amostras de ABS e PP. Perante estes resultados, é possível aferir que existe efetivamente uma correlação logarítmica entre a escala de percepção do novo método e os valores de efusividade térmica, uma vez que, os valores de percepção térmica atribuídos pelos voluntários para a amostra de ABS e PP, de acordo com a escala de percepção térmica, vão ao encontro do valor de percepção térmica estimado através da equação logarítmica de ajuste, após se substituir na equação da reta o valor de efusividade térmica pelo das amostras de PP e ABS, determinados experimentalmente.

### 2.3.5 Determinação da refletância solar total (TSR)

Nas figuras seguintes (Figura 2.38 e Figura 2.39) apresentam-se os espectros de refletância obtidos com recurso ao espectrofotómetro de UV-Vis-NIR com esfera integradora, na gama de comprimentos de onda entre 250 e 2500 nm, para as amostras de revestimento cerâmico aditivadas com pigmentos que lhes conferem a propriedade de reflexão da radiação IV e respetivos controlos. Efetuaram-se três leituras em zonas diferentes para cada amostra, no entanto, uma vez que os espectros obtidos para as três zonas foram muito semelhantes optou-se pela representação gráfica de uma réplica por amostra.

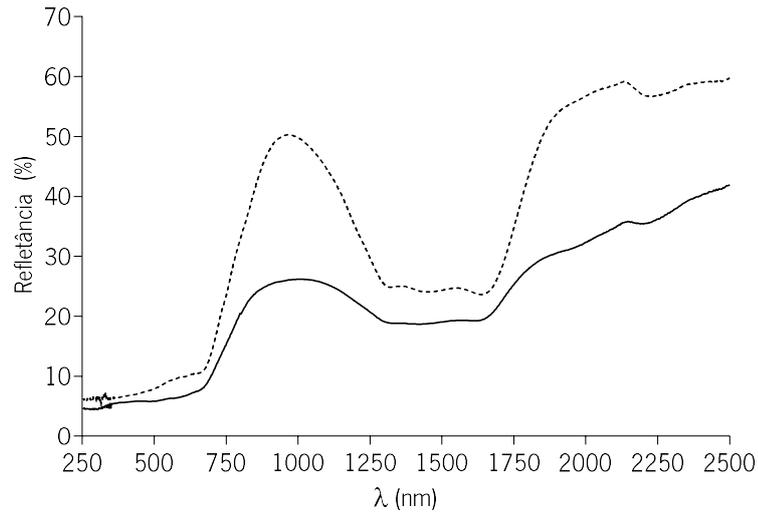


Figura 2.38 Representação da refletância, em % da amostra revestimento cerâmico funcionalizada #4 com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respetivo controlo 3 (linha contínua), numa gama de  $\lambda$  compreendida entre 250 e 2500 nm.

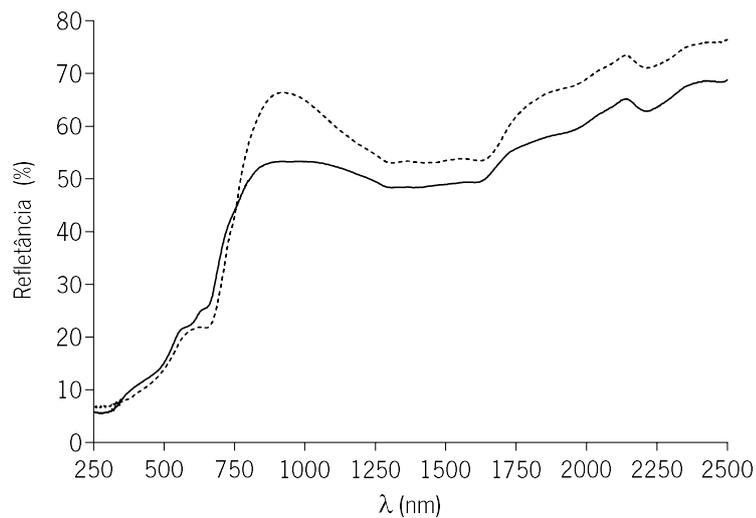


Figura 2.39 Representação da refletância, em %, de uma amostra de revestimento cerâmico funcionalizada #3 com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respetivo controlo 2 (linha contínua), numa gama de  $\lambda$  compreendida entre 250 e 2500 nm.

Perante estes resultados observa-se que as amostras funcionalizadas com os pigmentos que lhes conferem a propriedade de reflexão da radiação IV apresentam, em todos os casos, uma % R significativamente superior, quando comparadas com os respetivos controlos, particularmente na gama de ação dos pigmentos refletores compreendida entre os 720 - 2500 nm (zona do IV próximo e médio). Assim, verifica-se que a presença dos pigmentos refletores nas amostras de revestimento cerâmico está a aumentar os seus valores de % R.

De acordo com o método descrito anteriormente no ponto 2.2.3 efetuou-se a correção das % R com base nos valores de irradiância solar global espectral, obtendo-se assim os valores de refletância solar. Na Tabela 2.4 apresentam-se os valores de % R solar médios obtidos tendo em conta as três leituras efetuadas por amostra. Verifica-se que a % R solar total, na região do IV, é de  $38,2 \pm 0,2\%$  para a amostra cerâmica funcionalizada #4 e de  $22,9 \pm 0,1\%$  para o respetivo controlo 3. No que respeita à amostra funcionalizada #3, registou-se um valor percentual de refletância de, aproximadamente,  $58,6 \pm 0,1\%$  e de  $51,57 \pm 0,1\%$ , para o respetivo controlo 2, na região do IV.

Tabela 2.4 Valores de refletância, em percentagem, das diferentes amostras de revestimento cerâmico analisadas, nas diferentes regiões do espectro solar e o valor da refletância solar para cada amostra. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05

| Amostras  | Refletância Solar Total (TSR) (%) |                      |                  |                           |
|---|-----------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------|
|   | UV (280-399 nm)                   | Visível (400-720 nm) | IV (721-2500 nm) | Total (280 – 2500 nm) (%) |
| <b>Controlo 2</b>   | 8,91±0,06                         | 30,3±0,5             | 51,5±0,1         | 35,2±0,2                  |
| <b>Cerâmica funcionalizada #3</b>                         | 7,7±0,5                           | 18,23±0,06           | 58,6±0,1         | 37,73±0,01                |
| <b>Cerâmica convencional castanha escura (controlo 3)</b> | 5,37±0,08                         | 6,8±0,6              | 22,9±0,1         | 14,7±0,2                  |
| <b>Cerâmica funcionalizada #4</b>                         | 6,4±0,1                           | 9,5±0,1              | 38,3±0,2         | 23,6±0,5                  |

Traçaram-se também os espectros de refletância das amostras de base polimérica PA e PP, com pigmentos de reflexão ao IV incorporados na matriz polimérica, e dos respetivos controlos, nas mesmas condições que as amostras de revestimento cerâmico (Figura 2.40, Figura 2.42 e Figura 2.41).

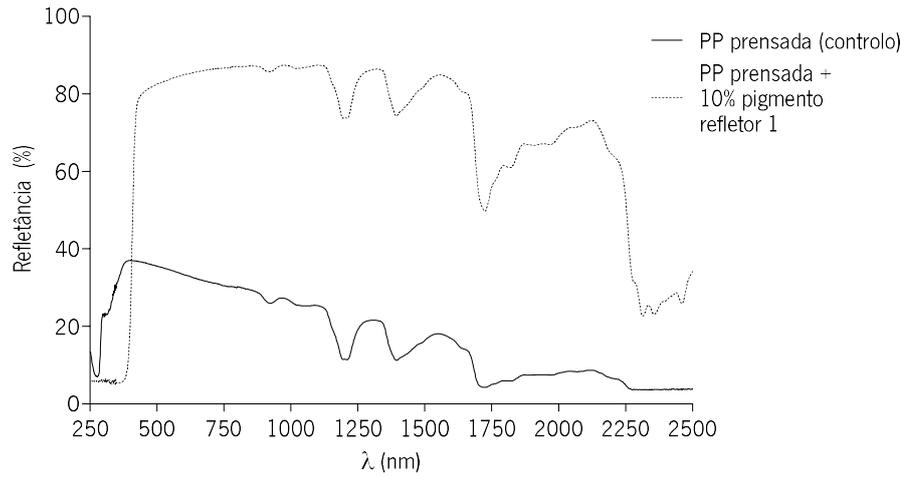


Figura 2.40 Representação da refletância, em %, da amostra de base PP aditivada com 10 % do pigmento refletor 1 (linha a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), numa gama de  $\lambda$  compreendida entre 250 e 2500 nm.

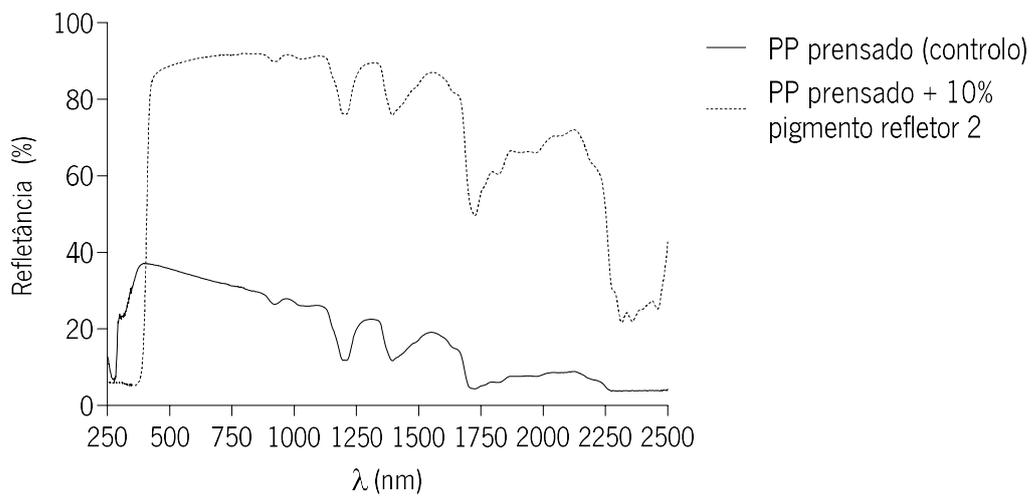


Figura 2.41 Representação da refletância, em %, da amostra base PP prensada aditivada com 10 % do pigmento refletor 2 (linha a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), numa gama de  $\lambda$  compreendida entre 250 e 2500 nm.



Figura 2.42 Representação da refletância, em %, da amostra de base PA aditivada com pigmentos refletores à radiação IV (linha a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), numa gama de  $\lambda$  compreendida entre 250 e 2500 nm.

Pela análise de resultados, tal como nas amostras de revestimento cerâmico, observa-se que as amostras funcionalizadas com os pigmentos que lhes conferem a propriedade de reflexão da radiação IV apresentam, em todos os casos, um aumento significativo de % R na região do IV, quando comparadas com os respetivos controlos. Assim, verifica-se que a presença dos pigmentos refletores nas amostras de base polimérica está a aumentar a % R das amostras aditivadas em relação aos respetivos controlos na gama de comprimento de onda estudada. Tal como efetuado nos resultados anteriores, procedeu-se à correção dos valores de irradiância solar global espectral, obtendo-se assim os valores de refletância solar. Na

Tabela 2.5 apresentam-se os valores de % R solar médios obtidos tendo em conta as três leituras efetuadas por amostra. Verifica-se que, na região do IV, a amostra de PP prensada com 10 % do pigmento refletor 1 apresenta uma % R na ordem dos  $88 \pm 2$  %, enquanto que ao respetivo controlo está associado a uma % R na ordem dos  $23,6 \pm 0,7$  %. Relativamente à amostra de PP prensada com 10% do pigmento refletor 2, na região do IV, esta apresenta uma % R de, aproximadamente,  $85,8 \pm 0,6$  %, sendo este valor bastante superior ao valor do respetivo controlo ( $23,6 \pm 0,7$  %). Quando se comparou um *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV e o respetivo controlo, verificou-se que, na região do IV, a primeira amostra apresentou um valor de % R bastante superior ao respetivo controlo, de aproximadamente  $87,0 \pm 0,2$  %, enquanto que à amostra controlo correspondeu uma valor de  $17,6 \pm 0,2$  %.

Tabela 2.5 Valores de refletância, em %, das diferentes amostras de base polimérica analisadas, nas diferentes regiões do espectro solar e o valor da refletância solar para cada amostra. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 4,30 para (N-1)=2 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05

| Amostras   | Refletância Solar Total (%) |                      |                  |                           |
|--|-----------------------------|----------------------|------------------|---------------------------|
|  | UV (280-399 nm)             | Visível (400-720 nm) | IV (721-2500 nm) | Total (280 – 2500 nm) (%) |
| <b>PP prensada (controle)</b>                                    | 33,02±0,08                  | 34,7±0,5             | 23,6±0,7         | 29,1±0,6                  |
| <b>PP prensada + 10% pigmento refletor 1</b>                     | 7±1                         | 85±2                 | 88±2             | 82,0±1,8                  |
| <b>PP prensada + 10% pigmento refletor 2</b>                     | 7,92±0,01                   | 86,6±0,7             | 85,8±0,6         | 83,0±0,6                  |
| <b>PA injetada</b>   | 16,1±0,1                    | 33,5±0,2             | 17,6±0,2         | 24,8±0,2                  |
| <b>Grade polimérico de base PA comercial para reflexão no IV</b> | 14,1±0,2                    | 95,2±0,2             | 86,0±0,2         | 87,3±0,1                  |

Perante estes resultados, verifica-se que ambos os pigmentos refletores 1 e 2 conduzem a valores de % R muito próximos, ou seja, possivelmente eles têm um efeito semelhante como compostos que refletem a radiação IV. Relativamente ao *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV, este apresenta uma % R elevada na região do IV, ou seja, eles conduzem ao efeito pretendido de refletirem a radiação IV quando comparados com os respetivos controlos, apresentando resultados bastante satisfatórios.

### 2.3.6 Determinação da emissividade hemisférica total

A medição de emissividade hemisférica total foi feita com recurso ao *emissometer*, para as amostras de revestimento cerâmico e poliméricas aditivadas com pigmentos que lhes conferem reflexão à radiação IV, e para os respetivos controlos. No gráfico da Figura 2.43, encontram-se os valores de emissividade que correspondem à média dos resultados obtidos para as seis leituras efetuadas em quatro secções diferentes das amostras de revestimento cerâmico controle e aditivadas.

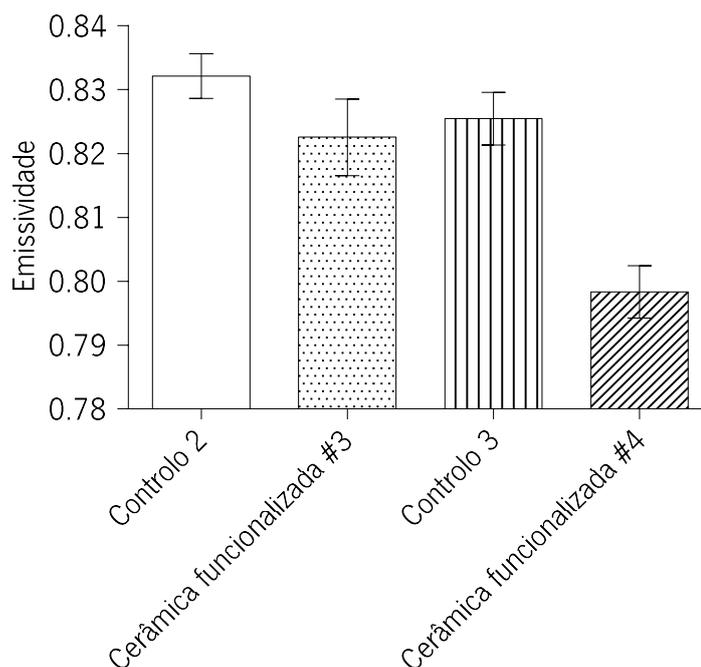


Figura 2.43 Resultados experimentais da medição da emissividade de amostras cerâmicas controle e aditivadas. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,06 para (N-1)=23 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Pela análise de resultados, observa-se que as amostras aditivadas com pigmentos reflexivos à radiação IV demonstraram uma tendência para valores inferiores de emissividade quando comparadas com os respectivos controles, nomeadamente para a amostra de cerâmica funcionalizada #4. Relativamente aos valores da incerteza obtidos para as amostras de base cerâmica, estes são baixos e muito próximos entre as amostras controle e as respectivas amostras aditivadas, o que poderá indicar que, nas secções onde foram efetuadas as medições, as amostras revelaram-se homogêneas.

A leitura da emissividade hemisférica total também foi efetuada para as amostras poliméricas aditivadas e respectivos controles (Figura 2.44). Tal como nas amostras cerâmicas, também foram feitas seis leituras em quatro secções diferentes da amostra, sendo que na tabela encontram-se os valores de emissividade que correspondem à média dos resultados obtidos para cada secção.

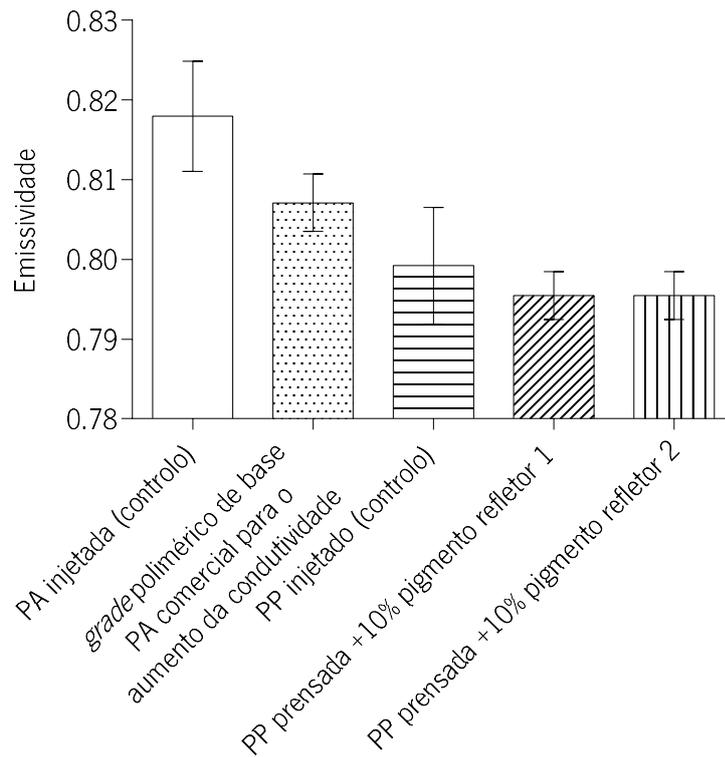


Figura 2.44 Resultados experimentais da medição da emissividade de amostras poliméricas de base PA e PP controle e aditivadas. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,06 para (N-1)=23 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

Pela análise dos valores de emissividade obtidos para as amostras de base polimérica controle e aditivadas, foi possível constatar que as amostras aditivadas apresentam valores de emissividade relativamente menores quando comparadas com as respectivas amostras controle, embora para as amostras de base PP essas diferenças não sejam significativas. Relativamente aos valores da incerteza obtidos para as amostras de base polimérica, apesar de estes serem baixos, são ligeiramente diferentes entre as amostras controle e as respectivas amostras aditivadas, o que poderá dever-se a variações de temperatura durante os ensaios, fazendo com que os padrões de calibração e a superfície da temperatura medida não estivessem à mesma temperatura, condição necessária para leituras corretas de emissividade.

Estes resultados estão concordantes com as medições de refletância efetuadas. Pelo facto de as amostras controle não conterem o pigmento, que lhes confere a propriedade de refletir a radiação IV, irão absorver mais a radiação incidente e, conseqüentemente, irão emitir mais, daí os seus valores de emissividade serem superiores relativamente às amostras aditivadas com pigmentos refletores de IV. Estes resultados poderão indicar que os aditivos incorporados nas amostras de

base polimérica e cerâmica poderão estar a ter o efeito pretendido, ou seja, diminuem a absorção de radiação IV e por conseguinte, contribuem para valores mais baixos de emissividade.

### 2.3.7 Determinação da temperatura superficial de materiais expostos à radiação IV e à radiação solar

#### Exposição à radiação IV

Os resultados seguintes dizem respeito à representação gráfica da monitorização da temperatura média em função do tempo, em minutos, e algumas imagens térmicas captadas com a câmara térmica em diferentes instantes do ensaio, para as amostras de base polimérica e de revestimento cerâmico. Em cada ensaio, foi sempre comparada a temperatura superficial de uma amostra controlo e de outra que continha pigmentos que lhes conferiam a propriedade de reflexão da radiação IV, expostas a uma lâmpada IV. Em todas as representações gráficas, está representado o tempo que as amostras com pigmentos refletivos e respetivos controlos foram irradiadas com a lâmpada IV até a sua temperatura superficial se manter constante. Em cada ensaio, assegurou-se que a temperatura inicial do par de amostras analisadas era o mesmo. No que respeita às imagens térmicas captadas com a câmara IV durante os ensaios, apenas as áreas das amostras assinaladas, com um quadrado, foram usadas para análise da temperatura superficial, visto que foram as zonas em que a radiação proveniente da lâmpada IV incidiu de forma similar.

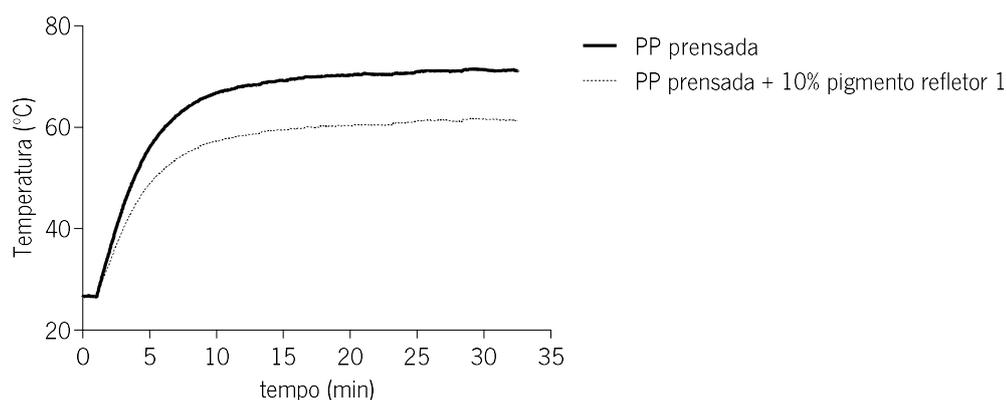


Figura 2.45 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com aditivos refletivos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.

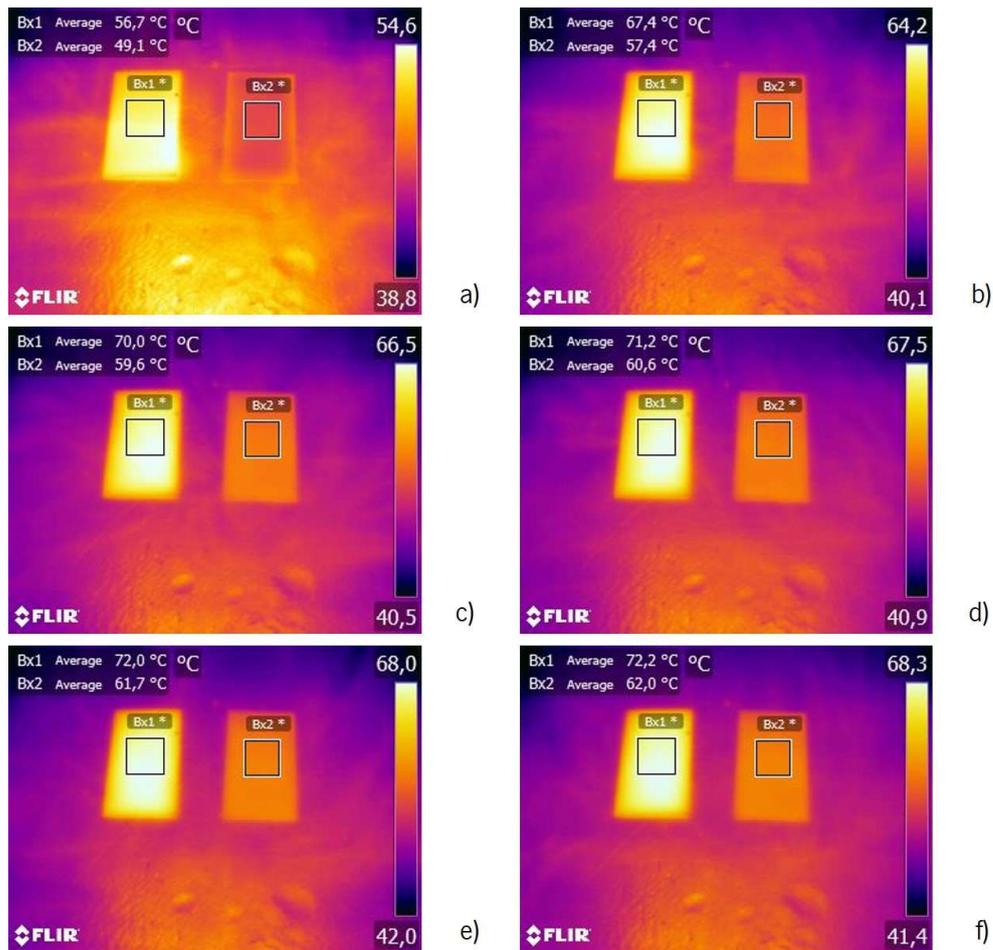


Figura 2.46 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PP) e as do lado direito correspondem às amostras aditivadas com pigmento refletor 1.

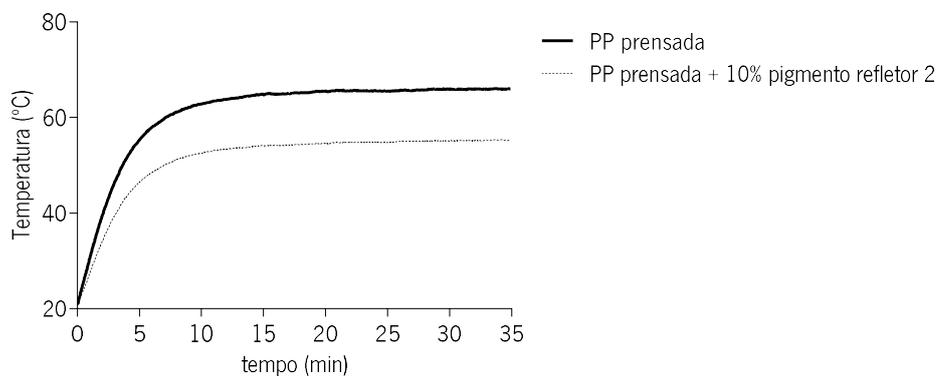


Figura 2.47 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.

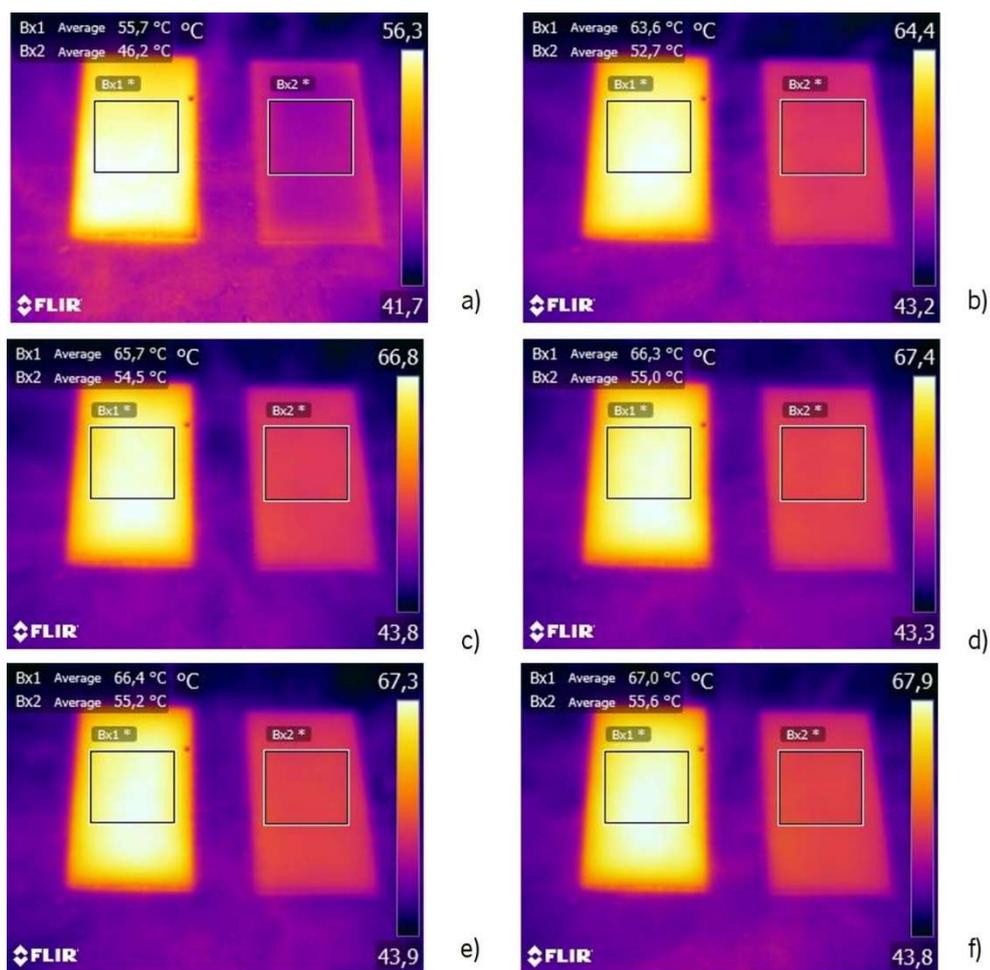


Figura 2.48 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PP) e as do lado direito correspondem às amostras aditivadas com 10% do pigmento refletor 2.

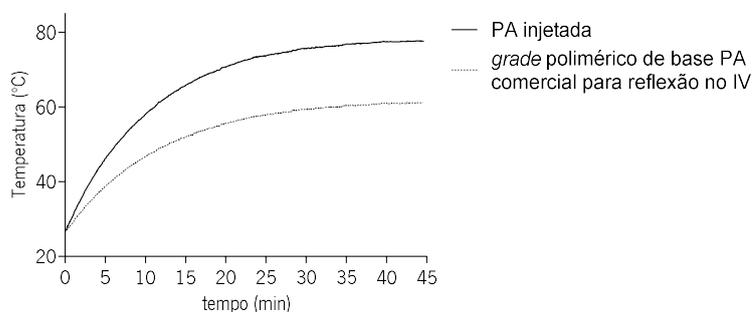


Figura 2.49 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra polimérica com reflexão no IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.

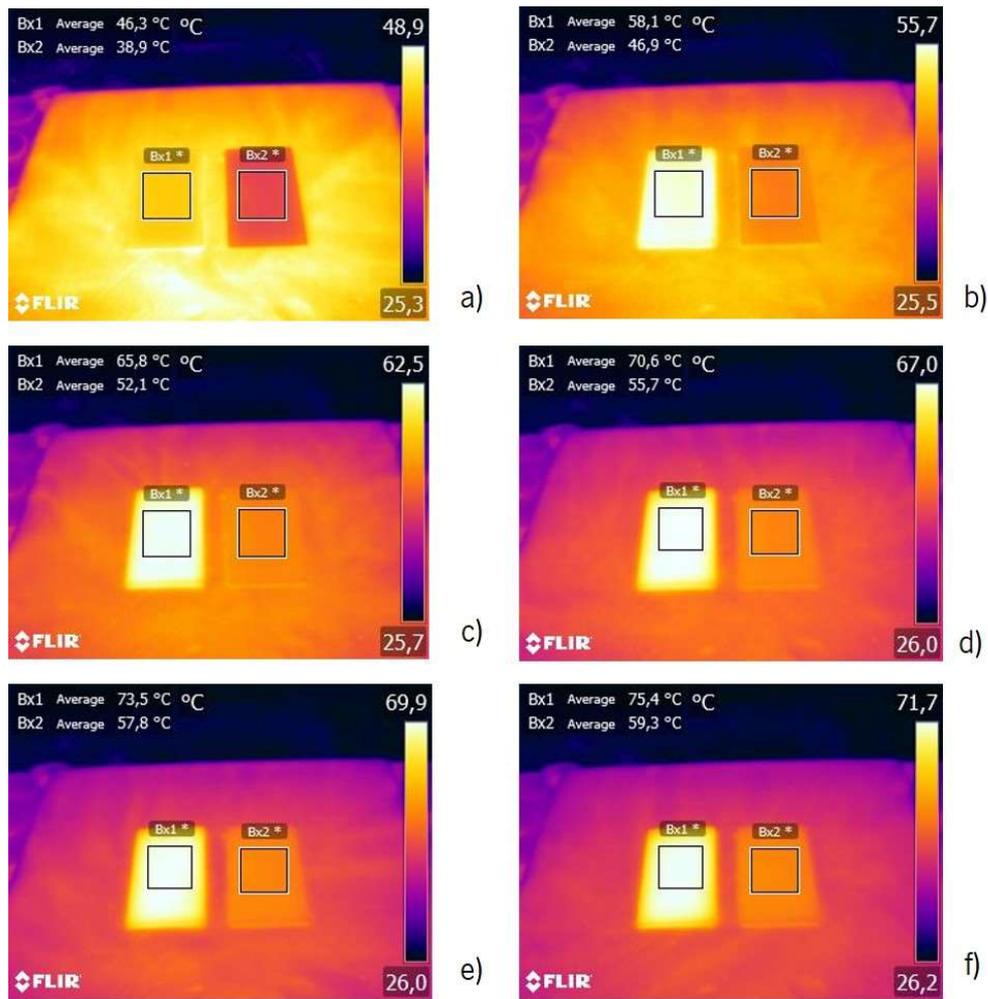


Figura 2.50 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 5 min de irradiação, a), 10 min de irradiação, b), 15 min de irradiação, c), 20 min de irradiação, d), 25 min irradiação, e) e 30 min de irradiação, f) com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (amostra de PA) e as do lado direito correspondem ao *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV.

De um modo geral, pela análise dos resultados obtidos verifica-se que, para todas as amostras que continham pigmentos refletoras à radiação IV, existem diferenças na sua temperatura superficial desde os primeiros minutos de irradiação com a lâmpada IV, relativamente aos respetivos controlos, sendo que esta diferença de temperatura sofre um aumento gradual ao longo do tempo até a temperatura superficial das amostras estabilizar. Além disso, as amostras que contêm o pigmento refletor IV aumentam menos a sua temperatura do que os respetivos controlos à medida que são irradiadas. Isto é consequência do efeito dos pigmentos refletoras, que levam a uma menor absorção de radiação IV por parte das amostras e, conseqüentemente, a um menor aquecimento.

Analisando os resultados da amostra aditivada com o pigmento refletor 1 (Figura 2.45 e Figura 2.46) e do respetivo controlo, observam-se diferenças na temperatura superficial logo aos 5 minutos de irradiação, na ordem dos 8 °C. Esta diferença de temperatura superficial vai aumentando gradualmente, ao longo do tempo, sendo que quando a temperatura de ambas as amostras estabilizou, foram observadas diferenças na ordem dos 10 °C. Quando se comparou outro par de amostras, sendo que a amostra funcionalizada contém o pigmento refletor 2 (Figura 2.47 e Figura 2.48), observam-se diferenças de temperatura na ordem dos 10 e 11 °C, aos 5 minutos e quando a temperatura superficial das amostras estabilizou, respetivamente. Assim, apesar dos pigmentos refletores analisados serem diferentes, essa diferença não influencia, em grande extensão, a temperatura superficial das amostras poliméricas. No entanto, quando se compara uma amostra de PA com um *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV, são verificadas diferenças bastantes superiores às verificadas anteriormente, que rondam os 16 °C, aquando da estabilização da temperatura superficial das amostras (Figura 2.49 e Figura 2.50).

As imagens térmicas captadas em diferentes instantes, apresentam, de forma evidente, as diferenças de temperatura entre as amostras funcionalizadas com os pigmentos refletores à radiação IV e respetivos controlos, corroborando os resultados representados graficamente para as amostras em estudo. Pela análise dos termogramas, verifica-se que as amostras funcionalizadas e os respetivos controlos se comportam de forma diferenciada. Tomando como base a amplitude mostrada na escala de temperatura (lado direito dos termogramas), as amostras aditivadas com pigmentos refletores apresentaram uma temperatura inferior aos respetivos controlos, ao longo do tempo em que são irradiadas, tal como se verificou nos gráficos analisados anteriormente. Possivelmente, estas diferenças de temperatura superficial são uma consequência da alta refletividade no IV e da baixa emissividade das amostras nas quais foram incorporados pigmentos refletores à radiação IV.

O mesmo estudo foi feito para as amostras de revestimento cerâmico, ou seja, foi efetuada a monitorização da temperatura superficial média em função do tempo, em minutos, e captaram-se imagens, com a câmara térmica, em diferentes instantes do ensaio.

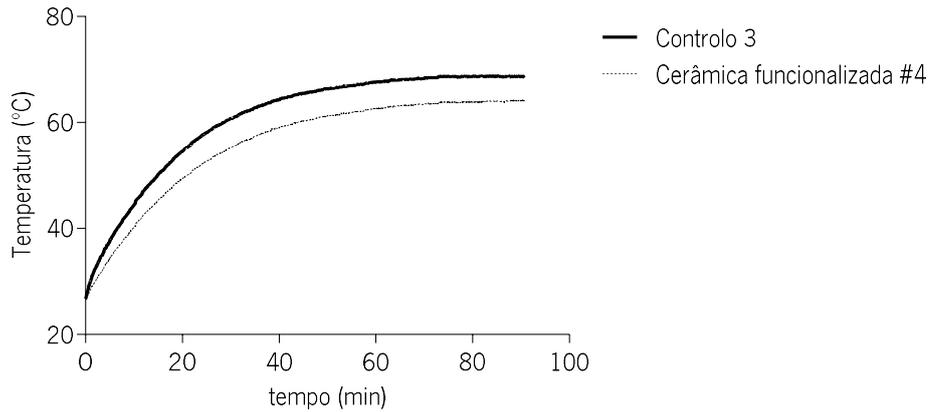


Figura 2.51 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletivos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.

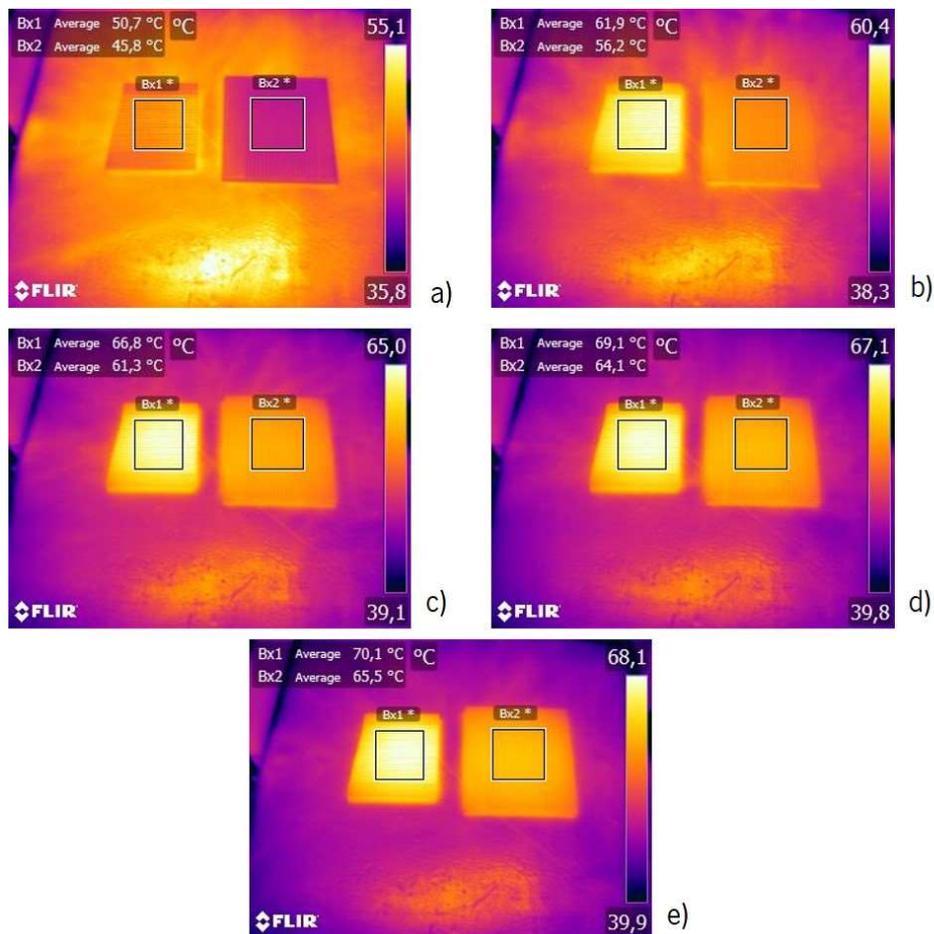


Figura 2.52 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 15 min de irradiação, a), 30 min de irradiação, b), 45 min de irradiação, c), 60 min de irradiação, d) e 80 min irradiação, e), com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (controlo 3) e as do lado direito correspondem à cerâmica funcionalizada #4.

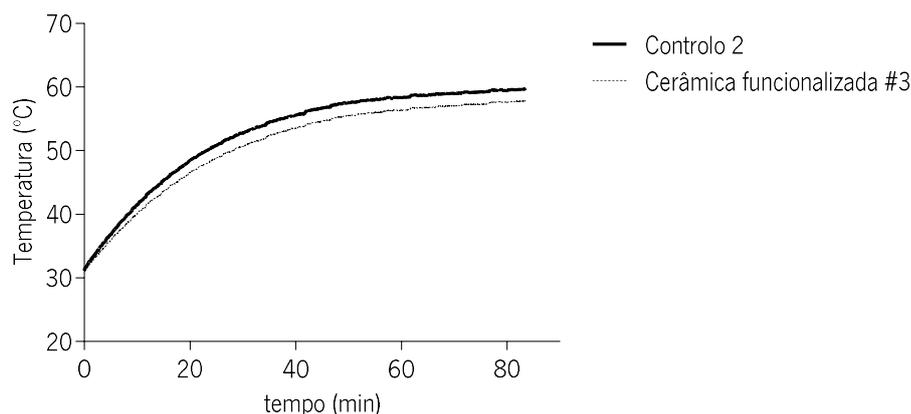


Figura 2.53 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletores de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação IV.

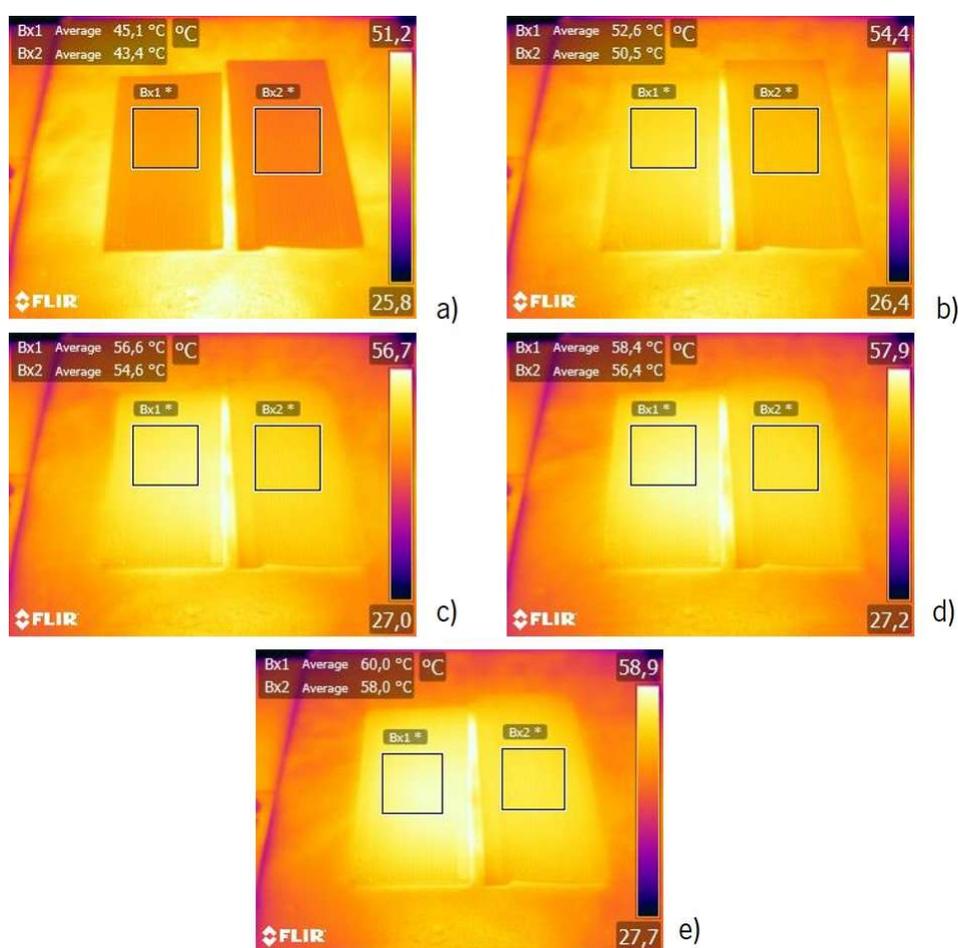


Figura 2.54 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 15 min de irradiação, a), 30 min de irradiação, b), 45 min de irradiação, c), 60 min de irradiação, d) e 80 min irradiação, e), com lâmpada IV. Em todas as imagens térmicas, as amostras que se encontram do lado esquerdo correspondem ao controlo (controlo 2) e as do lado direito correspondem às cerâmicas funcionalizadas #3.

De acordo com os gráficos e imagens apresentados nas figuras anteriores, nas amostras de revestimento cerâmico, não se alcançaram as mesmas diferenças de temperatura entre as amostras funcionalizadas e respetivos controlos, como as verificadas nas amostras de base polimérica. No entanto, foram verificadas diferenças, sendo que, tal como aconteceu com as amostras de base polimérica, as amostras que continham os pigmentos de reflexão no IV, alcançaram temperaturas inferiores comparativamente aos respetivos controlos, quando irradiadas com a lâmpada IV.

Pela análise das figuras (Figura 2.51 e Figura 2.52), observa-se uma diferença de temperatura superficial entre a amostra funcionalizada #4 e o respetivo controlo na ordem dos 5 °C, após 80 minutos de irradiação, quando as amostras atingem um valor de temperatura constante. No entanto, quando se comparou o controlo 2 com a cerâmica funcionalizada #3, a diferença na temperatura superficial entre amostras foi mínima, na ordem dos 2 °C , após 80 minutos de irradiação (Figura 2.53 e Figura 2.54).

#### Exposição à radiação solar

De seguida, são apresentadas as representações gráficas da monitorização da temperatura média em função do tempo, em minutos, e algumas imagens térmicas captadas com a câmara térmica em diferentes instantes do ensaio, para as amostras de base polimérica e de revestimento cerâmico, expostas à radiação solar, até se atingir uma intensidade máxima de radiação solar (12h00 / 13h00). Tal como nos ensaios de temperatura quando as amostras foram expostas à radiação IV, em cada ensaio foi sempre comparada a temperatura superficial de uma amostra controlo e de outra que continha pigmentos que lhes conferiam a propriedade de reflexão da radiação IV.

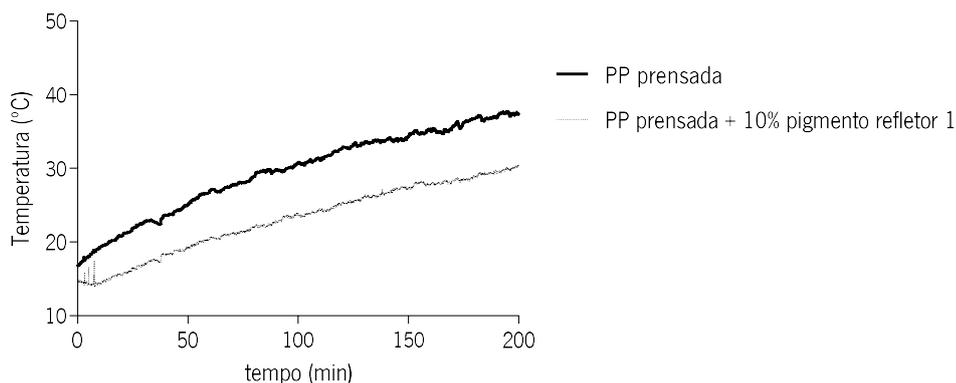


Figura 2.55 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletor de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.

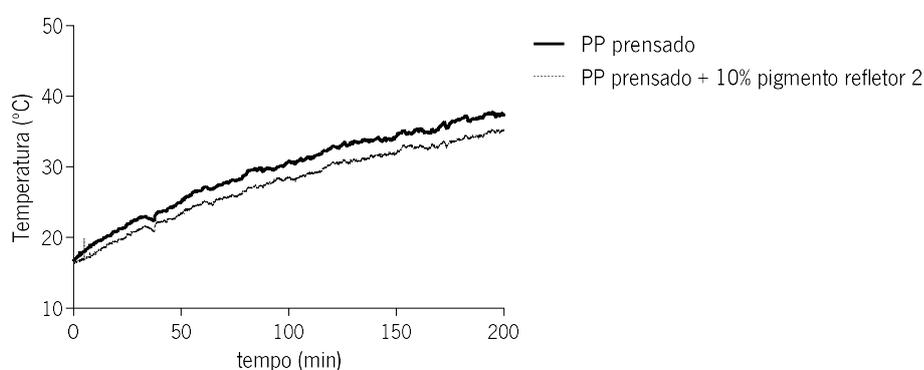


Figura 2.56 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletor de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.

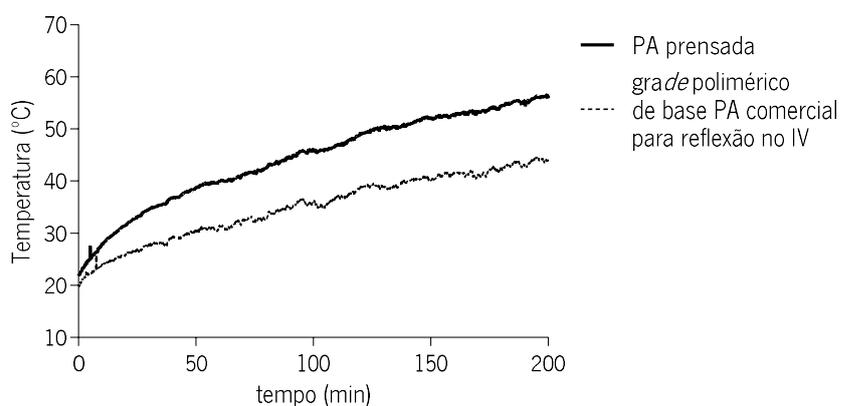


Figura 2.57 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de base polimérica com aditivos refletor de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.

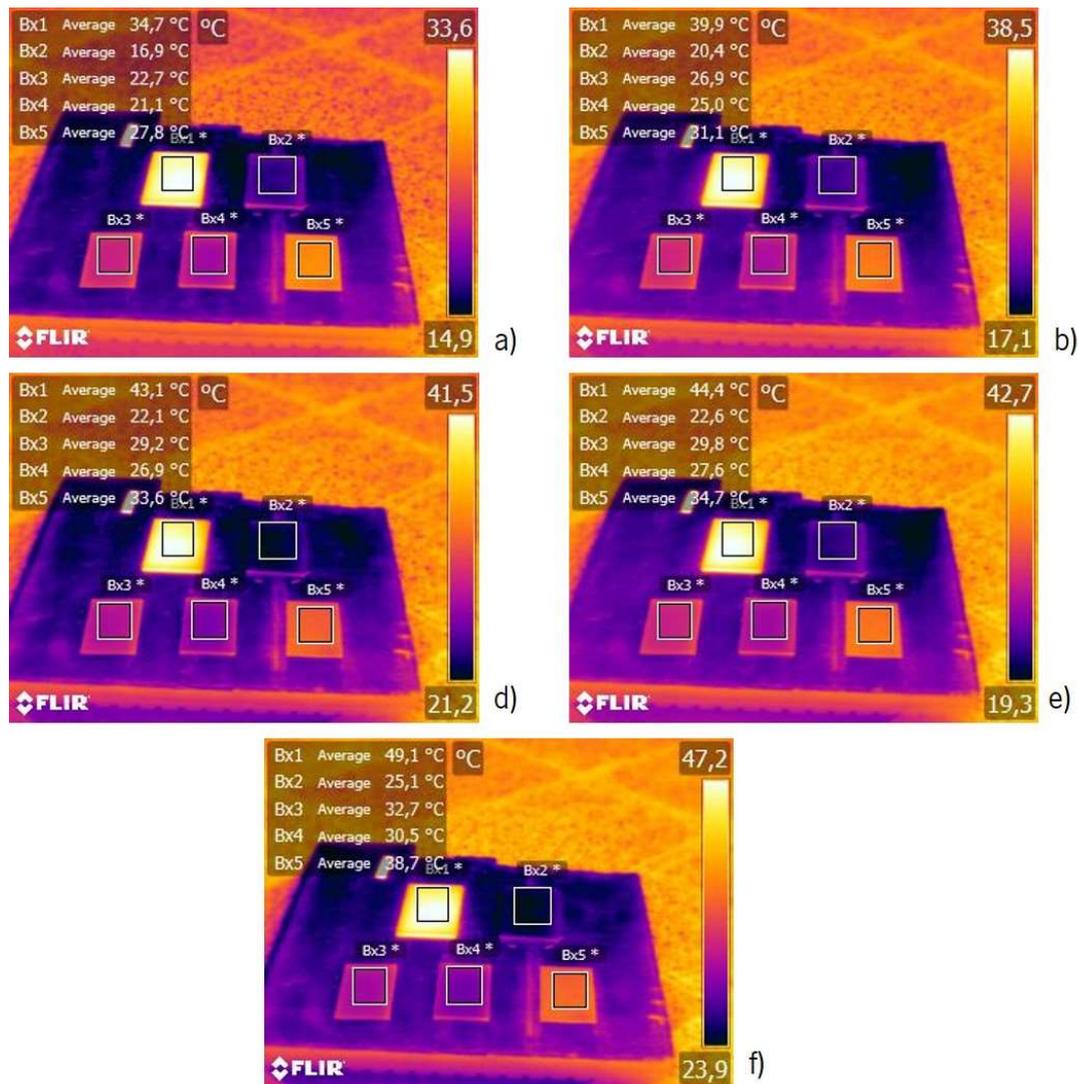


Figura 2.58 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 30 min de irradiação, a), 60 min de irradiação, b), 80 min de irradiação, c), 90 min de irradiação, d) e 120 min irradiação, e), em exposição solar. Em todas as imagens térmicas, a amostra que se encontra no canto superior esquerdo corresponde à amostra controlo de PA injetado, a amostra do canto superior direito à amostra de PP prensado com 10% pigmento refletor 1, a amostra do canto inferior esquerdo à amostra controlo PP prensado, na posição intermédia encontra-se a amostra de PP prensado com 10% pigmento refletor 2 e a amostra do canto inferior direito ao grade polimérico de base PA comercial para reflexão no IV.

O mesmo estudo foi feito para as amostras de revestimento cerâmico, ou seja, foi efetuada a monitorização da temperatura superficial média em função do tempo, em minutos, e captaram-se imagens, com a câmara térmica, em diferentes instantes do ensaio.

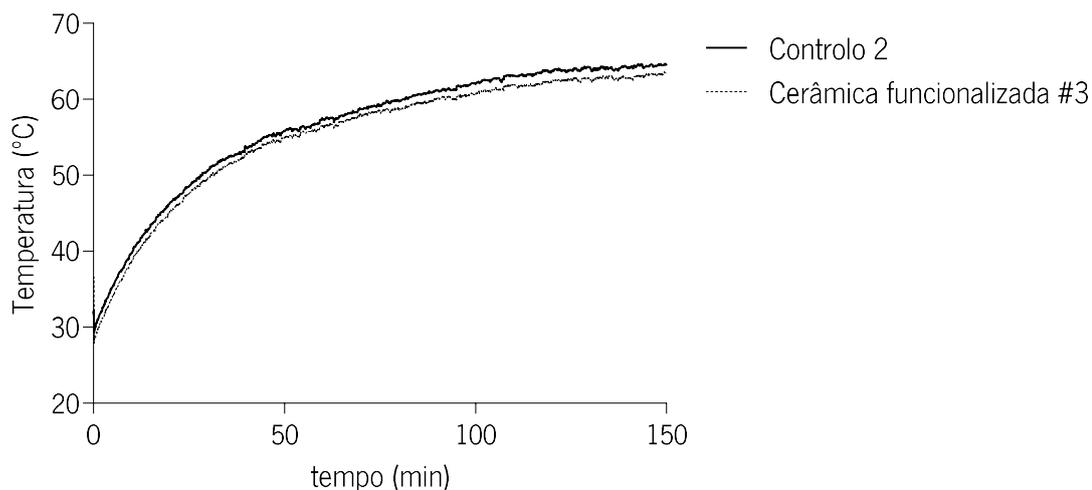


Figura 2.59 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletivos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.

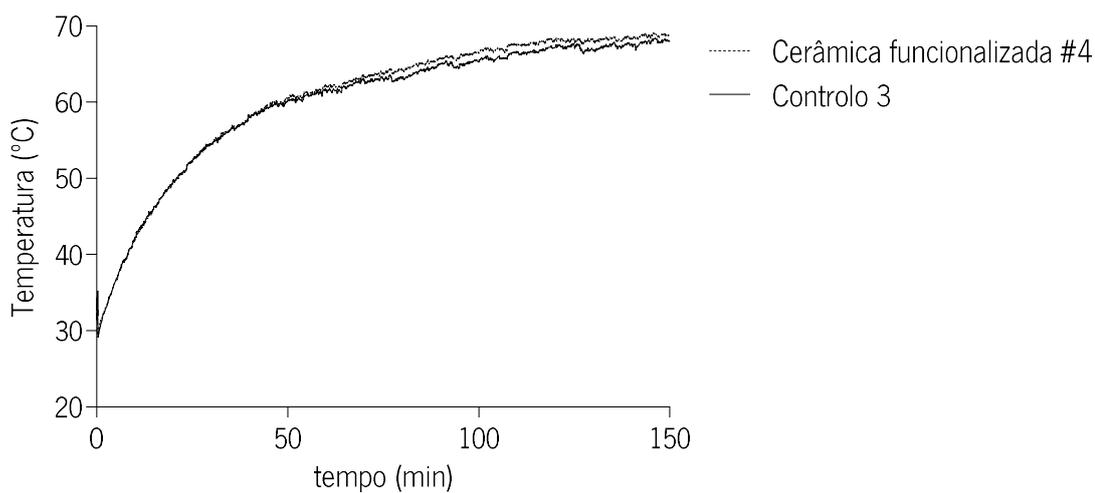


Figura 2.60 Representação gráfica da temperatura superficial (°C) de uma amostra de revestimento cerâmico com aditivos refletivos de IV (a tracejado) e do respetivo controlo (linha contínua), em função do tempo, em minutos, expostas à radiação solar.

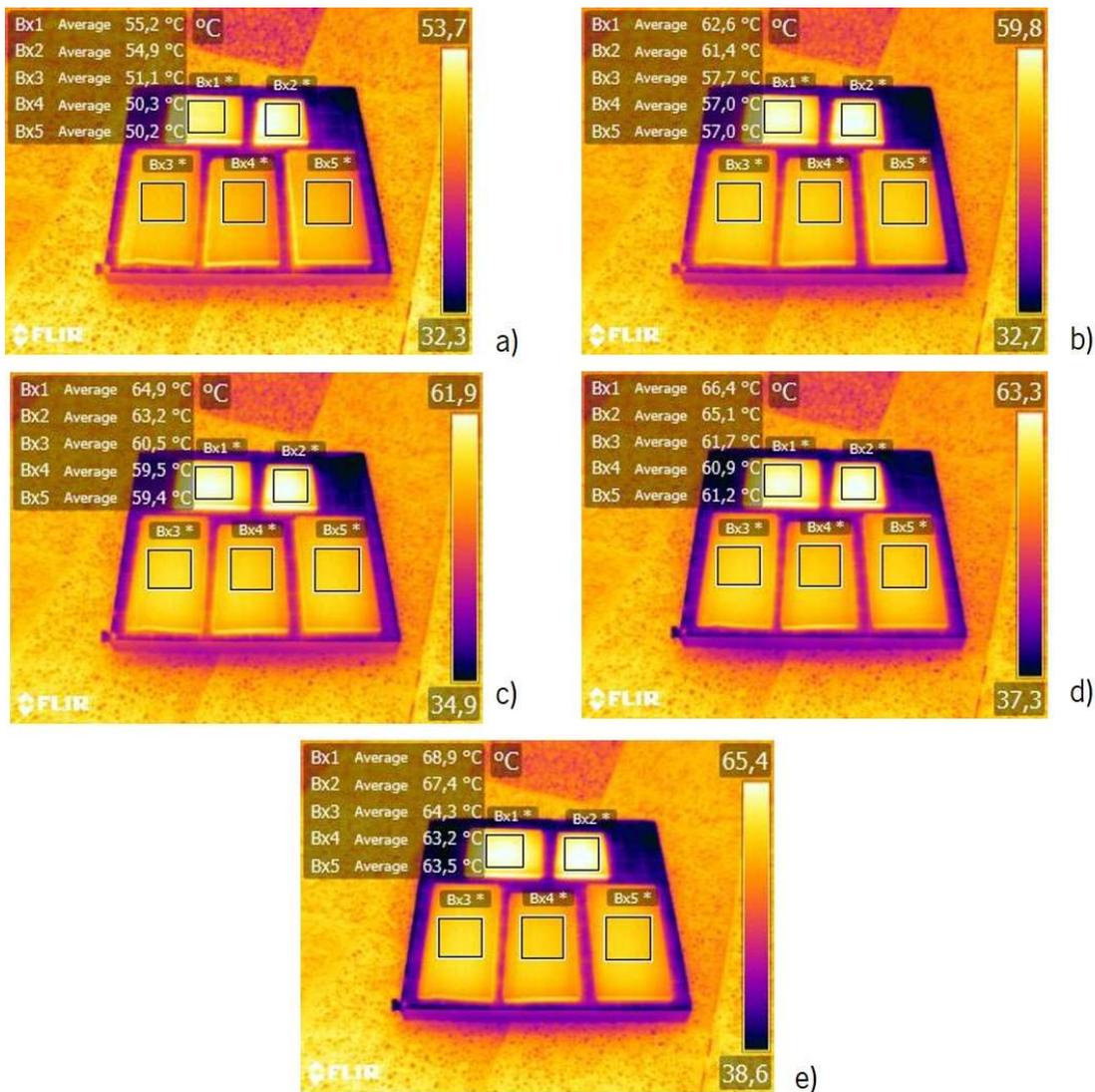


Figura 2.61 Termografias captadas com recurso à câmara IV, após 30 min de irradiação, a), 60 min de irradiação, b), 80 min de irradiação, c), 90 min de irradiação, d) e 120 min irradiação, e), em exposição solar. Em todas as imagens térmicas, a amostra que se encontra no canto superior esquerdo corresponde à amostra controlo 3, a amostra do canto superior direito à cerâmica funcionalizada #4, a amostra do canto inferior esquerdo à amostra controlo 2, e a amostra do canto inferior direito à cerâmica funcionalizada #3.

A exposição das amostras à radiação solar é fundamental para correlacionar com os resultados de exposição à radiação IV, simulada por uma lâmpada.

Nos ensaios da exposição dos materiais de base polimérica à radiação IV, observou-se que, de uma forma geral, as amostras atingiram um valor médio de temperatura constante ao fim de 30 minutos de exposição. Quando estas foram expostas à radiação solar, apesar de terem sido irradiadas até à hora de intensidade máxima solar (14h), estas não atingiram um valor médio de temperatura constante (Figura 2.55, Figura 2.56 e Figura 2.57).

No que respeita às amostras cerâmicas, estas atingiram um valor médio de temperatura constante por volta dos 80 minutos, quando expostas à radiação IV, no entanto, quando irradiadas pelo sol, o seu valor médio de temperatura só se tornou aproximadamente constante por volta dos 150 minutos (Figura 2.59 e Figura 2.60).

No entanto, pela análise da Figura 2.58 e Figura 2.59, quer para as amostras cerâmicas, quer para as amostras poliméricas, foram sempre verificadas diferenças de temperatura entre as amostras que continham os pigmentos de reflexão no IV e os respetivos controlos, sendo que as primeiras alcançaram sempre temperaturas inferiores comparativamente aos respetivos controlos. O facto de as amostras cerâmicas e poliméricas não alcançarem um valor médio de temperatura constante ao mesmo tempo, quando expostos à radiação solar e/ou IV poderá dever-se às diferentes condições de ensaio de irradiação com uma lâmpada IV, em laboratório, e a irradiação, em ambiente externo, com luz solar. Uma simulação em laboratório está associada a condições de ensaio mais controladas, enquanto que, em ambiente externo, há uma série de fatores ambientais que não se conseguem controlar de forma tão eficiente. Por exemplo, enquanto que a intensidade de uma lâmpada IV é constante ao longo de todo o ensaio, a radiação proveniente do sol varia em diferentes momentos do dia. Além disso, estes valores também poderão estar a ser influenciados pela distância da lâmpada IV à amostra, sendo que, nesta situação, a distância a que as amostras são irradiadas é muito inferior à distância a que são irradiadas pelo sol, quando expostas em ambiente externo.

#### 2.3.8 Estudo da perceção térmica de materiais expostos à radiação IV e à radiação solar

De forma a avaliar a perceção térmica de amostras de revestimento cerâmico, os voluntários tiveram que indicar qual a amostra, entre os diferentes grupos comparados, que transmitia a sensação menos quente ao toque. Neste estudo, foi sempre comparada uma amostra aditivada com pigmentos refletores à radiação IV e o respetivo controlo. Como nos ensaios à temperatura ambiente não se verificaram diferenças significativas no que respeita à perceção térmica na condição em que os voluntários podiam ver e tocar nas amostras e apenas tocar, optou-se por, nos ensaios sob ação de uma lâmpada IV, realizar apenas o ensaio com o toque e visão. Tal como nos ensaios de perceção à temperatura ambiente, os dados coletados foram organizados em termos de frequências relativas, de forma a ser mais perceptível a frequência com que uma determinada resposta ocorreu.

Na Figura 2.62, encontram-se os resultados da percepção térmica entre uma amostra de cerâmica funcionalizada #4 e o respetivo controlo (Controlo 3).

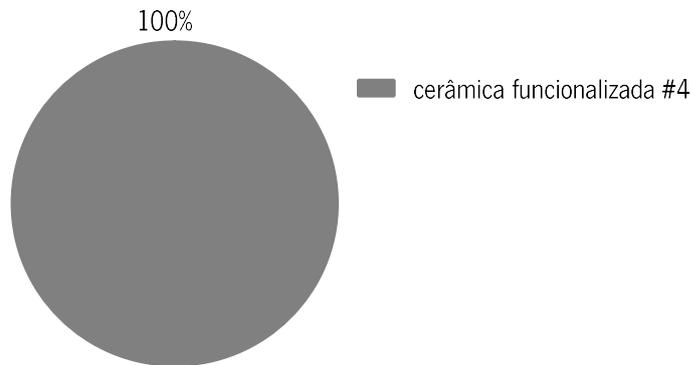


Figura 2.62 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletivos ao IV e do respetivo controlo.

O mesmo estudo foi efetuado de forma a comparar uma amostra cerâmica funcionalizada #3 com o respetivo controlo (controlo 2) (Figura 2.63).

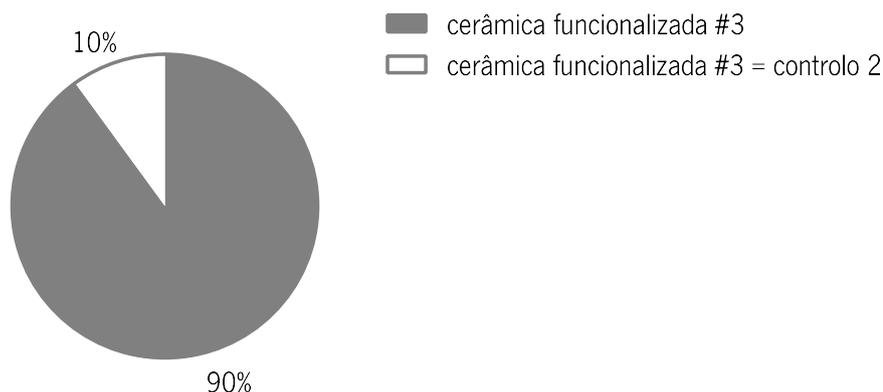


Figura 2.63 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletivos ao IV e do respetivo controlo.

Analisando a Figura 2.62 e a Figura 2.63, verifica-se que os voluntários identificaram as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV como as amostras menos quente ao toque. Estes estudos de percepção térmica também foram realizados para amostras de base polimérica de PA e PP, sendo que foram igualmente comparadas amostras aditivadas com pigmentos refletivos à radiação IV e respetivos controlos. Assim, foi feita a comparação de amostras controlo e de amostras funcionalizadas com a mesma percentagem de dois pigmentos refletivos diferentes, 10% do pigmento refletor 1 (Figura 2.63) e 10 % do pigmento refletor 2 (Figura 2.65).

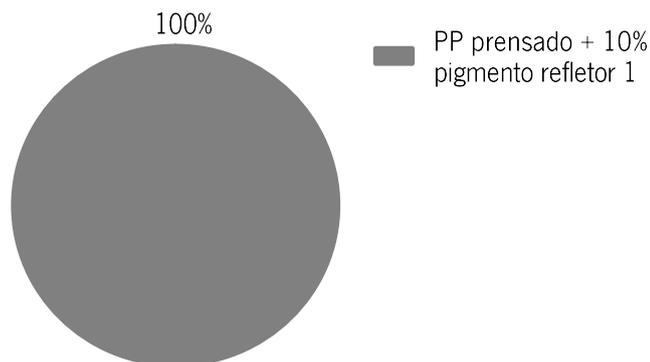


Figura 2.64 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo.

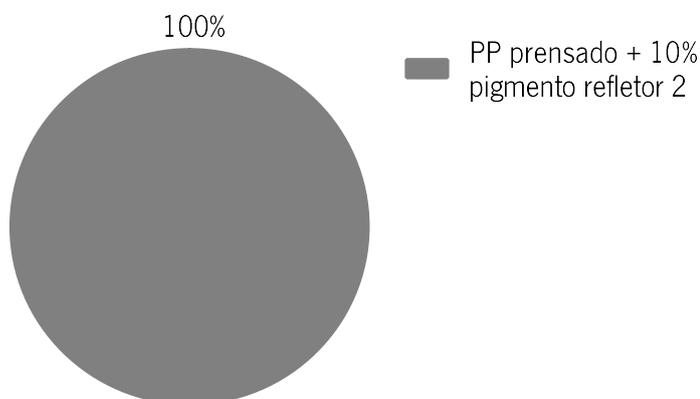


Figura 2.65 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletores ao IV e do respetivo controlo.

Pela análise das figuras, depreende-se que ambos os pigmentos refletores à radiação IV estão a desempenhar a sua função, ou seja, estão a contribuir para uma menor absorção da radiação IV e, conseqüentemente, para um aumento de temperatura menor relativamente à amostra controlo, uma vez que 100% dos voluntários considera as amostras em que estes estão presentes menos quentes ao toque.

Também foi feita a comparação entre uma amostra de base PA (controlo) e de um *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV, de acordo com a Figura 2.66.

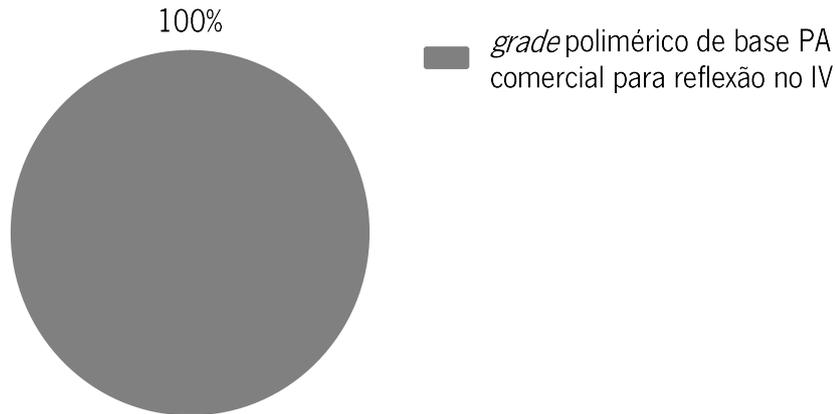


Figura 2.66 Frequência relativa de sensação menos quente ao toque de uma amostra aditivada com pigmentos refletivos ao IV e do respetivo controlo.

O resultado mostra que o *grade* polimérico de base PA comercial para reflexão no IV foi considerado, por 100% dos voluntários, menos quente ao toque, relativamente ao controlo, evidenciando o desempenho melhorado deste *grade* em situação de exposição a radiação IV.

Na tentativa de se avaliar a perceção da temperatura de materiais expostos à radiação solar, pediu-se a dois voluntários que distinguissem a temperatura de amostras de revestimento cerâmico com pigmentos refletivos à radiação IV, expostas à luz solar, num ambiente exterior da empresa. No entanto, os voluntários não conseguiram distinguir as amostras relativamente à sua temperatura e além disso, houve uma sensação de queimadura em poucos segundos. Como tal, não se conseguiu avançar com o estudo de perceção térmica com os voluntários descalços, como pretendido, uma vez que as temperaturas alcançadas pelos materiais foram muito elevadas.

A literatura refere que, em situações em que a temperatura da pele é elevada acima dos 45 °C, os recetores de calor são inativados e os nociceptores, recetores de dor, são ativados, impossibilitando a distinção da temperatura entre amostras. Possivelmente, foi devido a este facto que os voluntários não conseguiram distinguir os materiais expostos à radiação solar [2]. No entanto, nos ensaios em que as amostras foram expostas à radiação IV, embora as amostras tenham atingido temperaturas superiores a 45 °C os voluntários conseguiram fazer a distinção da temperatura das amostras de forma clara, provavelmente devido ao meio ambiente mais controlado.

Através dos resultados relativos ao estudo da perceção térmica pela exposição de amostras à radiação IV, verifica-se que quer para as amostras de revestimento cerâmico quer para as de base polimérica, os voluntários identificaram as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV como as amostras menos quente ao toque. Estes resultados vão de encontro aos da

determinação da temperatura superficial de materiais expostos à radiação IV e à radiação solar, onde se observou que as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV e os respectivos controlos se comportam de forma diferenciada, sendo que as primeiras aumentam menos a sua temperatura do que os respetivos controlos à medida que são irradiadas. Isto é consequência do efeito dos pigmentos refletivos, que levam a uma menor absorção de radiação IV por parte das amostras e, conseqüentemente, a um menor aquecimento. Possivelmente, as diferenças de temperatura superficiais observadas relacionam-se com os valores elevados de refletividade no IV e de baixa emissividade observados para as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV.



## Capítulo 3

---

Retardância à chama



### **3. RETARDÂNCIA À CHAMA**

#### **3.1 Estado da arte**

##### 3.1.2 Conceitos teóricos gerais

O fogo é entendido como uma mistura de gases a altas temperaturas que resulta de um processo químico denominado por combustão. O processo de combustão pode ser definido como uma reação química rápida e exotérmica e, para que esta ocorra, é necessária a ação conjunta de uma fonte de ignição (energia de ativação necessária para iniciar a reação), do combustível (componente inflamável, normalmente um componente orgânico) e do comburente (elemento capaz de oxidar o combustível, normalmente o oxigênio). Uma vez iniciado o processo de combustão, ele é mantido por um fenómeno de reação em cadeia, em que são produzidos radicais livres, resultantes da decomposição das moléculas nos átomos que lhe deram origem. Os radicais livres formados combinam-se rapidamente com outras moléculas, formando mais radicais livres levando a que o processo de combustão sofra uma expansão no espaço e no tempo. É desta forma que é mantido o ciclo de combustão, denominado tetraedro do fogo [38].

A propriedade de resistência ao fogo de um material define-se como o período de tempo que o material mantém a sua segurança estrutural e as suas propriedades físicas e mecânicas intactas, quando se encontra sob a ação do fogo. Um material com propriedades de retardância à chama indica que este foi alvo de algum tratamento para que, quando exposto a uma chama, retarde o crescimento e propagação desta. Esta propriedade não implica que o material não queime, no entanto irá queimar de forma mais lenta. Por vezes, num material com propriedades de retardância à chama, esta pode autoextinguir-se após o material ser inflamado, quando a chama é removida. Noutros casos, o material, uma vez colocado em contacto com a chama, queima lentamente, da chama se autoextinguir [39].

A necessidade de prevenir riscos de incêndio fortalece as perspetivas do mercado para desenvolver materiais com comportamentos melhorados ao fogo. Posto isto, deve ser feita uma escolha cuidadosa de materiais de revestimento usados em construções, uma vez que o seu comportamento face ao fogo tem uma grande influência na forma como a estrutura vai responder a uma situação de incêndio.

Atualmente, uma grande variedade de materiais naturais como a madeira ou as suas imitações, bem como a combinação de materiais naturais e sintéticos, são usados como revestimentos de pisos. A combustibilidade da madeira é uma das principais razões pela qual muitos regulamentos e padrões de construção restringem o seu uso como material de construção. No entanto, a madeira possui a capacidade de formação de uma camada carbonizada, fruto de uma rápida combustão que ocorre na superfície do material, que atrasa o processo de combustão e permite que o interior de um produto de madeira não seja afetado pela ação do fogo. Debaixo desta camada existe uma outra, que corresponde a madeira alterada, mas que não se encontra completamente degradada. Sob estas duas camadas, a madeira mantém-se inalterada. A combinação de dois fatores, a baixa condutividade térmica e a existência de uma camada protetora de carvão fazem com que a madeira forneça uma boa resistência ao fogo. Com recurso a uma câmara, um estudo comparou o desempenho ao fogo de sete materiais diferentes usados como revestimentos de pavimentos. Todos os materiais analisados foram pesados antes da aplicação da chama e após 10 minutos de exposição permanente à mesma. A cada 10 centímetros percorridos pela chama, foi registado o tempo de propagação. Os resultados revelam que a taxa de propagação da chama dos materiais à base de madeira foi inferior à dos materiais sintéticos e que estes últimos revelam uma maior perda de massa, garantindo uma menor segurança em retardância à chama [40].

A cortiça, sendo um material natural, tem vindo a adquirir uma expansão significativa de aplicação. Um grupo de autores avaliou materiais de isolamento de base de cortiça no que respeita à reação ao fogo recorrendo ao ensaio de pequena chama, segundo a norma EN 11925-2:2011, que especifica a capacidade de inflamação de um material durante a aplicação de uma pequena chama. O objetivo foi avaliar se a amostra inflama, ou se a chama atinge a altura de 150 mm acima do ponto onde é aplicada, durante 20 ou 60 segundos e o tempo a que isso ocorre. A chama foi aplicada na borda e a uma pequena distância da borda da amostra. Os resultados obtidos fornecem a base para a classificação do material para uma classe de reação ao fogo de acordo com a norma EN 13501-1. Quando a chama é aplicada durante 15 segundos todas as amostras são classificadas como E. No entanto, quando a chama foi aplicada durante 30 segundos, que é o tempo necessário para que uma amostra possa pertencer à classe D, C e B de reação ao fogo, o critério de classificação válido para estas classes, só foi satisfeito com as amostras nas quais a chama foi aplicada a uma pequena distância da borda, o que levou a concluir que a borda é mais sensível. Apesar da inclusão da cortiça na classe E de reação ao fogo, o estudo

apontou para o comportamento favorável das tábuas de cortiça, sendo que este material é considerado um retardador de fogo natural, por ser um material que arde lentamente, constituindo uma barreira contra o fogo [41].

De forma a estudar o comportamento dos materiais num cenário simplificado de fogo, é frequentemente usada, como referência, uma curva padrão representada por uma relação temperatura-tempo, descrita na norma EN 13501-2. Para tal, os materiais são submetidos a um regime térmico do qual se retiram curvas de incêndio reais dos diferentes elementos e comparam-se com a curva padrão para uma análise geral do seu comportamento ao fogo. O desempenho de materiais face ao fogo de compósitos em sanduiche tem vindo a ser debatido nos últimos anos, uma vez que têm sido frequentemente usados como componentes estruturais em paredes e pavimentos de construções. O aglomerado de cortiça tem sido visto como um material de núcleo alternativo com custos semelhantes e com um peso reduzido, face aos materiais comumente usados. Um estudo, que recorreu a um forno vertical para aplicar a curva padrão temperatura-tempo, revelou que entre vários materiais de núcleo testados, o aglomerado de cortiça revelou ser o mais eficaz para alcançar altas resistências ao fogo [42].

É, portanto, crucial utilizar materiais de combustibilidade limitada nas superfícies principais de um ambiente, como nos pavimentos e paredes, dado que, o uso destes pode reduzir drasticamente a velocidade de propagação das chamas, numa determinada área, bem como minimizar a sua contribuição para o incêndio.

### 3.1.3 Enquadramento da norma ISO EN 13501-1 como ferramenta de classificação dos materiais ao fogo

Há uns anos atrás, cada país da União Europeia tinha como hábito desenvolver os seus próprios testes de resistência à chama, apoiando-se em regulamentos nacionais de construção e orientação. No entanto, este processo dificultava a comparação dos dados resultantes destes diferentes métodos de ensaio. Como tal, recomendou-se a criação de um sistema uniforme de classificação europeu da reação ao fogo, de forma a prever o comportamento e a contribuição dos produtos de construção para a geração e propagação de um incêndio numa determinada área. Este sistema tem como base um conjunto de normas para diferentes métodos de ensaio e sistemas de classificação [43].

A norma europeia EN 13501-1 estabelece os procedimentos de ensaio a seguir para estabelecer a classificação de reação ao fogo dos produtos de construção. O seu principal objetivo assenta na definição de um procedimento que permita a classificação de reação ao fogo de produtos de construção através de ensaios no âmbito das exigências de segurança. Esta norma inclui sete classes de reação ao fogo, A1, A2, B, C, D, E e F. Os produtos classificados para uma determinada classe satisfazem todos os requisitos de qualquer classe inferior. Enquanto alguns materiais não reagem significativamente à presença do fogo, outros reagem rapidamente, mesmo quando expostos a chamas muito pequenas. Assim, esta norma disponibiliza vários procedimentos teste para serem utilizados, sendo selecionados de acordo com o nível de classificação. A Tabela 3.1 descreve sucintamente os métodos de ensaio utilizados para determinar as sete classes europeias de reação ao fogo, sendo que a classe A1 corresponde à melhor classificação e F à classificação mais baixa.

Tabela 3.1 Classificação dos materiais de acordo com os métodos de ensaio descritos na Norma Europeia EN 13501-1[44]

| <b>Testes de ensaio</b>                                     | <b>Classes</b> |
|---|----------------|
| <b>EN ISO 1182</b><br><b>EN ISO 1716</b>                    | A1             |
| <b>EN ISO 1182</b><br><b>EN ISO 1716</b><br><b>EN 13823</b> | A2             |
| <b>EN 13823</b><br><b>EN ISO 11925-2</b>                    | B              |
| <b>EN 13823</b><br><b>EN ISO 11925-2</b>                    | C              |
| <b>EN 13823</b><br><b>EN ISO 11925-2</b>                    | D              |
| <b>EN ISO 11925-2</b>                                       | E              |
| <b>Nenhum desempenho determinado.</b>                       | F              |

Nos ensaios, procura-se ter em atenção a condição da aplicação final. Isto significa que os materiais deverão ser testados de uma forma representativa da sua aplicação específica de uso final, com o tipo de suporte final sobre o qual será aplicado e com as particularidades associadas

(fixações, colas, juntas, camadas subjacentes, entre outras) usadas na aplicação real. A avaliação do desempenho dos produtos de construção é efetuada mediante os resultados dos cinco ensaios europeus de reação ao fogo dos produtos de construção, descritos sucintamente na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Ensaio de reação ao fogo dos produtos de construção, de acordo com a norma EN 13501-1 [40,41]

| <b>Ensaio</b>                                       | <b>Descrição</b>  |
|---|---|
| <b>Não combustibilidade (EN ISO 1182)</b>           | Avalia a produção de calor e de chama dos materiais quando sujeitos a temperaturas na ordem dos 750 °C no interior de um forno.   |
| <b>Bomba calorimétrica (EN ISO 1716)</b>            | Uma amostra em pó é inflamada em atmosfera pressurizada de oxigénio no interior de uma bomba calorimétrica, sendo avaliado o poder calorífico superior de um produto homogéneo resultante da sua combustão total.   |
| <b>Objeto isolado em combustão (SBI) (EN 13823)</b> | Avalia diversos aspetos do desempenho ao fogo dos materiais quando submetidos à ação das chamas, tais como a taxa de desenvolvimento do fogo (índice FIGRA), a taxa de desenvolvimento de fumo (índice SMOGRA), o calor total libertado e a produção total de fumo, a propagação lateral da chama, a ocorrência de queda de gotas ou partículas inflamadas e a duração das inflamações. |
| <b>Pequena chama (EN ISO 11925-2)</b>               | Avalia a facilidade de ignição de um produto quando sujeito à incidência direta de uma pequena chama em intervalos de tempos fixos (20 ou 60 segundos desde a aplicação da fonte de ignição).   |
| <b>Painel radiante (EN ISO 9239-1)</b>              | Avalia o desempenho ao fogo de produtos destinados a revestimentos de piso. No ensaio, determina-se a propagação da chama num revestimento de piso quando sujeito a um gradiente térmico radiativo, complementado por uma chama piloto.   |

Para aplicações de materiais, quer seja em pavimentos quer não, são necessários, geralmente, dois dos testes descritos na tabela para caracterizar o desempenho de qualquer produto. Para pavimentos, o papel desempenhado pela EN ISO 13823 é assumido pela EN ISO 9239. Os detalhes completos encontram-se descritos no documento de classificação EN 13501 [44].

## 3.2 Materiais e métodos

### 3.2.1 Materiais

No âmbito do estudo de retardância à chama, foram testados materiais de base de cortiça usados como revestimento de parede, para aferir o seu desempenho. Neste conjunto de materiais, englobam-se as amostras controlo e as amostras funcionalizadas, as quais foram aditivadas com duas tipologias de materiais retardantes à chama. Na Tabela 3.3, apresentam-se listados e descritos os materiais utilizados no estudo de retardância à chama.

Tabela 3.3 Amostras utilizadas no estudo de retardância à chama

| <b>Amostras de cortiça</b>   |
|--|
| Substrato de cortiça natural (controlo 1)  |
| Substrato de cortiça natural aditivado com aditivo retardante à chama intumescente (funcionalizada #1.1)       |
| Substrato de cortiça natural aditivado com aditivo retardante à chama inorgânico (funcionalizada #1.2)         |
| Substrato de aglomerado de cortiça (controlo 2)  |
| Substrato de aglomerado de cortiça aditivado com aditivo retardante à chama intumescente (funcionalizada #2.1) |
| Substrato de aglomerado cortiça aditivado com aditivo retardante à chama inorgânico (funcionalizada #2.2)      |

### 3.2.2 Métodos

Dependendo dos materiais testados e da sua aplicação final, utilizam-se diferentes métodos para determinar a sua resistência à chama. A norma europeia EN 13501-1 estabelece os procedimentos de ensaio a seguir para estabelecer a classificação de reação ao fogo dos produtos de construção.

#### Ensaio baseado na norma EN ISO 11925-2

O ensaio de chama pequena, baseado na norma EN ISO 11925-2, é um dos ensaios descritos na norma EN 13501-1 para avaliação da reação ao fogo e tem como objetivo avaliar a facilidade de ignição de um material, quando está sujeito à incidência direta de uma pequena chama [47]. Este ensaio é realizado numa câmara de combustão, na qual a amostra teste é fixada verticalmente num suporte em forma de U e submetida a uma pequena chama de gás propano, colocada em contacto com a amostra num ângulo de 45°. Posteriormente, a chama é aplicada no bordo inferior do provete ou a meio da superfície com incidência lateral. O papel de filtro é colocado sob o suporte da amostra para monitorar a queda de detritos flamejantes. A duração do teste depende da classe do produto, sendo possível utilizar dois tempos diferentes de aplicação da chama. Para

a classe E, o tempo de aplicação da chama é de 15 segundos e a duração do teste é 20 segundos, a partir do momento em que a chama é aplicada pela primeira vez. Com um tempo de aplicação de chama de 30 segundos para as classes B, C e D, a duração máxima do teste é de 60 segundos, a partir do momento em que a chama é aplicada pela primeira vez. Os critérios de classificação baseiam-se no registo da posição da aplicação da chama, em observações da extensão da propagação da chama ( $F_s$ ) no final dos períodos de 20 ou 60 segundos após a remoção da fonte de ignição, a ocorrência de inflamações persistentes de uma folha de papel localizada debaixo da amostra, devido à deposição de detritos flamejantes e na observação do comportamento físico do provete.

O ensaio foi realizado numa *hotte* e foi aplicada uma pequena chama com um isqueiro de gás propano. A amostra a analisar foi marcada aos 4 cm e aos 15 cm e foi, posteriormente, colada a uma placa cerâmica, colocando-se um papel abaixo da amostra para verificar a queda de gotas/partículas em combustão (Figura 3.1). Tal como consta na norma, a avaliação da inflamabilidade da cortiça é medida pela propagação da chama durante 15 s ou 30 s, para obtenção da classe E e igual ou superior a D, respetivamente. Neste caso em particular, como o objetivo era a obtenção da classe D ou superior, a chama foi deslocada manualmente e aplicada a 4 cm da borda da amostra durante 30 segundos. É fundamental garantir que a chama seja colocada em contacto com a amostra num ângulo de  $45^\circ$ . O teste foi repetido 3 vezes para cada amostra.

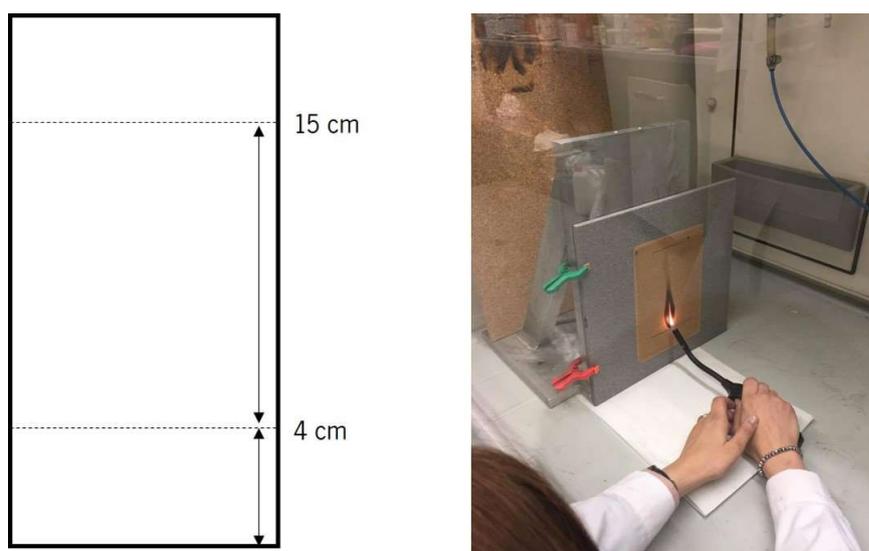


Figura 3.1 Representação esquemática das amostras submetidas ao ensaio de retardância à chama (à esquerda) e aplicação da chama a 4 cm da borda da amostra, que foi colada a uma placa cerâmica (à direita).

### 3.3 Análise e discussão dos resultados

#### 3.3.1 Avaliação de amostras de cortiça pelo ensaio baseado na norma EN ISO 11925-2

Na Tabela 3.4, encontram-se as amostras de cortiça que foram testadas nos ensaios de retardância à chama, e nas figuras seguintes (Figura 3.2 e Figura 3.3), encontram-se ilustradas as amostras após serem submetidas ao ensaio de resistência ao fogo.

Tabela 3.4 Amostras de cortiça funcionalizadas e os respectivos controlos usados nos ensaios de retardância à chama.

#### Amostras de cortiça

|  |
|--|
| Substrato de cortiça natural (controlo 1)  |
| Substrato de cortiça natural aditivado com aditivo retardante à chama intumescente (funcionalizada #1.1)       |
| Substrato de cortiça natural aditivado com aditivo retardante à chama inorgânico (funcionalizada #1.2)         |
| Substrato de aglomerado de cortiça (controlo 2)  |
| Substrato de aglomerado de cortiça aditivado com aditivo retardante à chama intumescente (funcionalizada #2.1) |
| Substrato de aglomerado cortiça aditivado com aditivo retardante à chama inorgânico (funcionalizada #2.2)      |

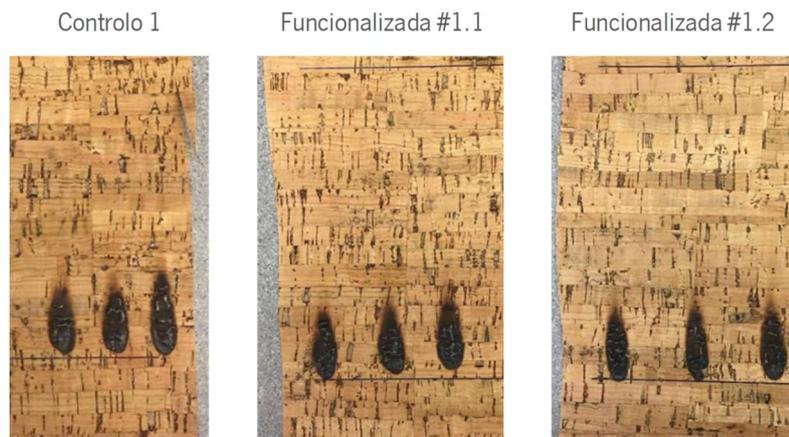


Figura 3.2 Amostra de cortiça funcionalizada #1.1 e #1.2 e o respetivo controlo, após ter sido aplicada uma chama a 4 cm da borda da amostra durante 30 segundos.

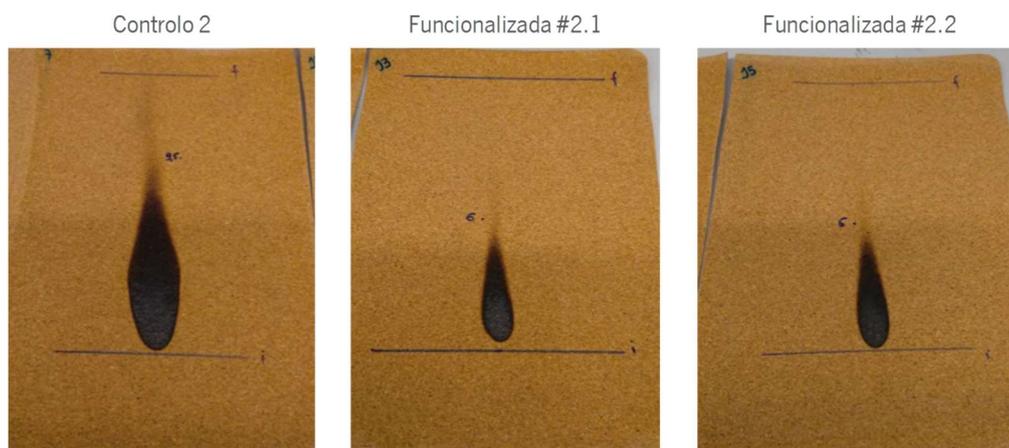


Figura 3.3 Amostra de cortiça funcionalizada #2.1 e #2.2 e o respetivo controlo, após ter sido aplicada uma chama a 4 cm da borda da amostra durante 30 segundos.

Os resultados deste ensaio consistem na verificação de ocorrência de inflamação da amostra, na queda de gotas sob a forma de partículas inflamadas que caem sobre o papel de filtro colocado por baixo da amostra, na medição da zona destruída e ainda se a ponta da chama atinge 150 mm acima do seu ponto de aplicação e o tempo em que tal acontece. feitas observações relativas á produção de fumo e do comportamento físico da amostra. As observações registadas ao nível destes parâmetros para as amostras ensaiadas encontram-se apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Amostras e respetivos parâmetros avaliados no decorrer do ensaio

| <b>Amostra</b>             | <b>Ignição da amostra</b> | <b>Alcance da marca de 150 mm</b> | <b>Tempo de alcance da marca de 150 mm (s)</b> | <b>Formação de gotículas</b> | <b>Ignição do papel de filtro</b> | <b>Fumo gerado</b>        |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| <b>Controlo 1</b>          | Sim                       | Não                               | n.a. <sup>1</sup>                              | Não                          | Não                               | Pouco fumo branco         |
| <b>Funcionalizada #1.1</b> | Sim                       | Não                               | n.a.   | Não                          | Não                               | Pouco fumo branco         |
| <b>Funcionalizada #1.2</b> | Sim                       | Não                               | n.a.   | Não                          | Não                               | Pouco fumo branco         |
| <b>Controlo 2</b>          | Sim                       | Não                               | n.a.   | Não                          | Não                               | Não houve geração de fumo |

<sup>1</sup> n.a.: não aplicável

|                                |     |     |      |     |     |                                 |
|--------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|---------------------------------|
| <b>Funcionalizada<br/>#2.1</b> | Sim | Não | n.a. | Não | Não | Não houve<br>geração de<br>fumo |
| <b>Funcionalizada<br/>#2.2</b> | Sim | Não | n.a. | Não | Não | Não houve<br>geração de<br>fumo |

Pela análise dos resultados obtidos, verifica-se que o método não permite diferenciar entre amostras. Além disso, pela análise da figura Figura 3.2 e da Figura 3.3, observa-se que as amostras sem funcionalização (controlos) apresentam já um desempenho satisfatório recorrendo a este método de ensaio.

Para efeitos de classificação da reação ao fogo através deste ensaio, apenas interessa saber a distância de propagação da chama traduzida pelo índice  $F_s$  da EN ISO 11925-2 e que este não seja superior a 150 mm num período de tempo inferior a 20 s (para obter a classe E) ou a 60 s (para classes superiores a E). Uma vez que nenhuma das amostras testadas alcançou a marca dos 150 mm num período de tempo de 60 segundos, todas as amostras testadas têm classificação E ou superior.

Ou seja, com o ensaio baseado na norma EN ISO 11925-2 apenas se consegue aferir a classificação E, sendo que apenas as amostras com classificação inferior a E não passam este teste. De forma a obter uma classificação superior a E e se conseguir diferenciar entre elas, seria necessário realizar o ensaio do objeto isolado em combustão, segundo a norma EN 13823.

A norma EN 13823 (ensaio SBI) pretende avaliar vários parâmetros do desempenho dos materiais face à ação de um elemento isolado em combustão. Este teste foi desenvolvido no âmbito do sistema de Euroclasses de reação ao fogo para produtos de construção, com exceção aos revestimentos de piso. O provete a ensaiar consiste na colagem das placas de material a um suporte não combustível que forma duas abas retangulares ortogonais, uma com dimensões de 1500 mm x 500 mm x 1 mm e outra com 1500 mm x 1500 mm x 1 mm, de forma a traduzir a aplicação em condições reais. O teste baseia-se num cenário de incêndio real, em que um produto fica sob ação de uma situação de fogo desfavorável, sendo atacado de forma direta pelo fogo e pela radiação térmica originada pela combustão de um elemento ou componente isolado, como é o caso da combustão de um elemento no interior de um compartimento. A classificação dos materiais através deste ensaio engloba alguns parâmetros entre eles, a taxa de desenvolvimento do fogo ( $FIGRA$ ), a propagação lateral da chama ( $LFS$ ) e o calor total libertado ( $THR_{600s}$ ). São

definidos parâmetros de classificação adicionais para a produção de fumo como índice de taxa de desenvolvimento de fumo (*SMOGRA*) e produção total de fumo (*TSP<sub>600s</sub>*), e para gotículas e partículas flamejantes de acordo com sua ocorrência durante os primeiros 600 segundos do teste. A determinação dos índices *FIGRA* e *THR<sub>600</sub>* têm como base a medição e o registo contínuo de vários parâmetros, nomeadamente a temperatura e a diminuição da concentração de oxigénio, numa secção de conduta de exaustão dos gases de combustão. A determinação dos índices *SMOGRA* e *TSP<sub>600</sub>* têm como base a medição e o registo em contínuo da temperatura, da diferença de pressão e da atenuação luminosa (devido ao fumo) numa secção da conduta de exaustão dos gases de combustão.

A classificação dos materiais através deste ensaio engloba alguns parâmetros, mencionados anteriormente, sendo que para isso é necessário algum equipamento específico. No entanto, o CeNTI apresenta algumas limitações nesse sentido, impossibilitando a determinação dos índices *FIGRA*, *THR<sub>600</sub>*, *SMOGRA* e *TSP<sub>600</sub>* visto que é necessário algum equipamento que o CeNTI não possui, nomeadamente, uma secção de conduta de exaustão dos gases em combustão. Desta forma, não foi possível, no âmbito do trabalho realizado, reunir as condições necessárias para a implementação desta norma.



## **4. CONCLUSÃO GERAL**

### **4.1 Sínteses e conclusões**

O presente estudo teve como objetivo a reprodução e desenvolvimento de métodos expeditos que permitissem avaliar o desempenho de diferentes materiais em termos de conforto térmico ao toque e de retardância à chama.

De forma a responder aos objetivos propostos, começou-se por efetuar estudos qualitativos, à temperatura ambiente, de materiais de base polimérica e cerâmica em termos de perceção de temperatura ao toque. De um modo geral, as amostras de base polimérica que foram aditivadas com materiais que lhes conferiam valores superiores de condutividade térmica transmitiram uma sensação mais fria ao toque do que os respetivos controlos. Tais resultados eram esperados, uma vez que os materiais com valores de condutividade térmica elevados promovem uma maior transferência de calor e este é transmitido rapidamente ao longo do material, conduzindo a uma sensação fria ao toque. Quando estes estudos foram realizados numa câmara climática, a 50 °C, conseguiu-se verificar a ocorrência do fenómeno de inversão termosensorial, frequentemente observado em amostras com valores de condutividade térmica elevados. À temperatura ambiente, materiais com valores elevados de condutividade térmica promovem uma maior transferência de calor. Quando sujeitos a temperaturas superiores, a transferência de calor também vai ser mais significativa, mas no sentido inverso, uma vez que os materiais estão a uma temperatura superior à da mão, ou seja, o sentido do fluxo de calor é invertido e é direcionado para a mão durante o contacto e o objeto sente-se quente. Assim, para todas as amostras testadas, a amostra que foi considerada mais fria à temperatura ambiente revelou-se a mais quente quando o ensaio foi realizado a 50 °C. No que respeita aos resultados dos ensaios de perceção ao toque, à temperatura ambiente, para as amostras cerâmicas, verificou-se que as amostras funcionalizadas transmitiram uma sensação mais quente ao toque do que os respetivos controlos, o que leva a concluir que os tratamentos para baixar o seu valor de condutividade térmica conduziram ao efeito pretendido. Para ambos os substratos testados, verificou-se que a criação de grupos de ensaio conduziu a melhores resultados em termos de diferenciação térmica, possivelmente, porque ajuda na capacidade de memorização da sensação de temperatura, ou seja, o voluntário não tem que memorizar a perceção térmica de tantas amostras como quando estas lhes são apresentadas em

simultâneo. Os resultados destes estudos sugerem que a condição em que os voluntários não podem ver as amostras durante a realização dos ensaios de percepção não influenciou, em grande extensão, os resultados, daí serem deixados de serem executados ensaios sem visualização das amostras.

Um dos objetivos propostos passava pelo desenvolvimento de uma escala de avaliação da percepção da temperatura, com base numa ferramenta de análise que permite detetar a percepção e classificar os materiais de acordo com a intensidade da sensação térmica. A validação deste quadro de referências original foi efetuada para amostras claramente distintas (madeira envernizada, cerâmica e espuma) e próximas (PA, PP e ABS) do ponto de vista térmico, em 3 dias diferentes. Os resultados revelaram que este método é adequado para avaliar a percepção térmica de amostras, uma vez que as respostas dadas pelos voluntários mantiveram-se aproximadamente iguais, ao longo dos 3 dias. Além disso, é uma ferramenta pertinente para avaliar materiais díspares do ponto de vista térmico, uma vez que, para a amostra de madeira envernizada, cerâmica e espuma, os voluntários conseguiram estabelecer, sem dificuldade, uma relação de similaridade entre o material em estudo e um dos materiais presentes na escala e atribuir um valor de intensidade intercalar na escala.

Na perspetiva de implementar um método de percepção de temperatura ao toque, foi desenvolvido um quadro de referências, inspirado na ferramenta de análise descrita e validada anteriormente. Na projeção deste quadro de referência foram tidos em consideração alguns pontos de melhoria, com vista a atingir melhores resultados. Após validação do quadro de referências original, concluiu-se que se a escala de referências fosse ajustada ao nível dos valores de intensidade térmica e dos materiais de referência, particularmente, na região entre 0 e 20 e entre 20 e 50, poderiam ser alcançados melhores resultados. Por exemplo, na região entre 0 e 20, o polímero estava identificado com uma intensidade 20, ou seja, numa visão global, este transmitia uma sensação térmica ao toque mais próxima do alumínio (intensidade 0) do que do esferovite (intensidade 100), quando, na verdade, ele é um intermédio entre estes dois materiais. Desta forma, foram introduzidos novos materiais nestas regiões, a cerâmica na região com intensidade entre 0 e 20, e a cortiça, entre 70 e 100, com vista a reduzir o espaçamento observado em termos de intensidade térmica e, conseqüentemente, a diferença existente em termos de percepção da temperatura através do toque, facilitando a quantificação da sensação térmica por parte dos voluntários. Com esta alteração, ultrapassou-se a discrepância referida anteriormente do polímero, sendo que, no quadro de referências desenvolvido, este foi colocado num nível intermédio de

sensação de temperatura. Aquando da validação da coerência dos resultados pela análise dos resultados obtidos com o quadro de referências desenvolvido e os do quadro de referências original, para a madeira envernizada, a cerâmica, a espuma, o PA, o PP e o ABS, verificou-se que, de um modo geral, no quadro de referências desenvolvido os voluntários fizeram uma atribuição de calor maior para todos os materiais estudados, comparativamente ao quadro de referências original. Os resultados demonstram que os voluntários conseguem distinguir entre amostras com valores de propriedades térmicas díspares, no entanto, para materiais próximos do ponto de vista térmico, revelaram mais dificuldade na diferenciação da percepção da temperatura. A inversão da escala do novo quadro de referências não influenciou a percepção térmica da madeira envernizada, da cerâmica e da espuma, uma vez que os valores de intensidade térmica atribuídos para estes materiais foram semelhantes. Através de um estudo de análise estatística (ANOVA), é possível afirmar que o fator de variação “voluntário” é uma forte fonte de variação dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o quadro de referências desenvolvido. Em relação ao fator “dia”, este já não ocupa uma posição de destaque ou seja, neste estudo, não foi o fator que mais afetou a fiabilidade dos resultados. Importa referir que era expectável que o fator “voluntário” fosse um fator marcante neste tipo de estudos, tais como em todos os estudos de percepção térmica, uma vez que as variações entre voluntários, por natureza, são elevadas e difíceis de controlar, pelo que esta é uma fonte de variação impossível de eliminar.

O desenvolvimento da escala de percepção térmica teve também como objetivo relacionar as sensações térmicas ao toque transmitidas pelos materiais com os seus valores de efusividade térmica, uma vez que esta é a propriedade que mais contribui para a diferenciação dos materiais no que respeita à percepção térmica. Concluiu-se que há uma correlação logarítmica entre os valores de intensidade térmica da escala e os respetivos valores de efusividade térmica, obtendo-se um valor de R satisfatório, de 0,97. De forma a validar a relação encontrada, estabeleceu-se uma correlação dos valores de intensidade térmica atribuídos pelos voluntários do PP e ABS, com os que seria suposto obter através da equação obtida e verificou-se que os valores estimados de percepção térmica para ambas as amostras foram semelhantes aos valores médios de percepção térmica atribuídos pelos voluntários, evidenciando que existe de facto uma correlação da efusividade térmica com a percepção da temperatura ao toque dos materiais.

Durante este projeto também foi avaliada a influência da refletância de materiais de base polimérica e cerâmica com capacidade de reflexão da radiação IV no desempenho térmico destes,

nomeadamente da sua temperatura superficial e, conseqüentemente, no conforto térmico ao toque proporcionado. Os estudos da percepção térmica das amostras irradiadas com uma lâmpada IV revelaram que, para ambos os substratos, os voluntários identificaram as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV como as que transmitiam uma sensação menos quente ao toque. Estes resultados foram corroborados pela determinação da temperatura superficial de materiais expostos à radiação IV e solar, que evidenciou que as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV aumentam menos a sua temperatura do que os respetivos controlos à medida que são irradiadas. Isto é consequência do efeito dos pigmentos refletivos, que levam a uma menor absorção de radiação IV por parte das amostras e, conseqüentemente, a um menor aquecimento. O facto de as amostras funcionalizadas com pigmentos refletivos à radiação IV transmitirem uma sensação menos quente ao toque e aumentarem menos a sua temperatura do que os respetivos controlos está relacionado com os valores elevados de refletividade no IV e de baixa emissividade observados para estas amostras. Relativamente ao estudo efetuado de retardância à chama, baseado na norma EN ISO 11925-2, não foi possível distinguir o comportamento ao fogo entre as amostras aditivadas com retardantes à chama e os seus controlos, uma vez que o método implementado permite apenas atribuir classe E. Desta forma, para todas as amostras de cortiça testadas foi-lhes atribuída classificação E. Para se conseguir uma classificação superior, teriam que ser efetuados outros ensaios, que devido a limitações em termos de equipamento, não se conseguiram concretizar.

## **4.2 Sugestões de trabalhos futuros**

Mesmo sendo este um projeto ambicioso, os objetivos inicialmente propostos foram parcialmente atingidos. Ainda assim, existem alguns pontos que podem ser considerados como sugestões para trabalho futuro.

Durante a realização deste projeto, foi possível desenvolver uma metodologia expedita para avaliar a percepção térmica ao toque, com o objetivo de ultrapassar a barreira entre a percepção térmica qualitativa e quantitativa. O quadro de referências de percepção térmica desenvolvido não produz resultados infalíveis. Desta forma, mais do que um projeto já concluído, ele deverá ser visto como uma base para iniciar estudos de percepção térmica, devendo, em estudos posteriores, ser adaptado a cada caso de estudo, segundo as características particulares dos materiais em questão. Os resultados obtidos com este quadro de referência revelaram que os voluntários conseguem distinguir entre amostras com valores de propriedades térmicas díspares, sendo que quando

passam para materiais próximos do ponto de vista térmico, têm mais dificuldade na diferenciação da percepção da temperatura. Como tal, o trabalho futuro, para a continuação do desenvolvimento deste projeto, prende-se com a tentativa de melhorar a escala do quadro de referências desenvolvido. Assim, a dificuldade em estabelecer uma comparação das amostras testadas com os materiais do quadro de referência poderá ser atenuada se houver uma divisão da escala. Posto isto, a escala poderá ser dividida entre 0-30 para a percepção fresca, entre 30-70 para uma sensação intermédia e entre 70-100 para a sensação quente, o que levaria a que o voluntário fizesse uma melhor distinção das sensações opostas. Esta divisão da escala também ajudaria o voluntário na atribuição da intensidade térmica, uma vez que diminui o número de amostras que este tem que memorizar para avaliar a sensação térmica dos materiais, facilitando a quantificação da sensação térmica.

Uma outra sugestão futura seria, como referido anteriormente na secção da discussão dos resultados, ajustar a escala do quadro de referências desenvolvido na região compreendida entre os 0-25, uma vez que a diferença da intensidade térmica entre o alumínio (0) e a cerâmica (25) é exatamente da mesma ordem da diferença entre a cerâmica (25) e o teflon (50), ou seja, é pouco realista, porque na verdade a cerâmica é mais próxima do teflon do que do alumínio, do ponto de vista de percepção térmica. Assim, fazendo um ajuste na escala, atribuindo, por exemplo, um valor de intensidade de 35 à cerâmica, tornando-a mais quente em relação ao alumínio, conseguia-se obter um melhor ajuste para a correlação logarítmica entre a escala de percepção térmica e os valores de efusividade térmica determinados para os materiais de referência. A escala do quadro de referências também poderia ser ajustada pela introdução de um novo material. Um dos possíveis materiais poderá ser o vidro, um material cujo valor de efusividade térmica se encontra na ordem dos  $910 \text{ (} J \cdot m^{-2} \cdot K \cdot s^{1/2} \text{)}$ , ou seja, na escala de percepção térmica poderia posicionar-se entre a cerâmica e o teflon. Assim, introduzindo este material e fazendo um ajuste nos valores de intensidade de percepção atribuídos, poderiam ser obtidos resultados mais fidedignos, uma vez que poderia haver uma maior probabilidade de obter correspondências mais corretas entre a sensação térmica percebida de uma amostra e o material do quadro de referência. Como trabalho futuro, seria também interessante estudar materiais com valores de efusividade térmica entre o alumínio e a cerâmica, uma vez que existe uma elevada discrepância de valores entre estes materiais e seria importante validar a relação logarítmica entre a percepção e a efusividade térmica nessa gama de valores.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “ASHARE Standard 55P. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.” 2003.
- [2] E. Arens and Z. Hui, “The skin’s role in human thermoregulation and comfort,” in *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, 2006, pp. 560–571.
- [3] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini, “Tactile Sensing - From Humans to Humanoids,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, pp. 1552–3098, 2009.
- [4] R. Ackerley, I. Carlsson, H. Wester, H. Olausson, and H. Backlund Wasling, “Touch perceptions across skin sites: differences between sensitivity, direction discrimination and pleasantness,” *Front. Behav. Neurosci. Neurosci.*, vol. 8, p. 54, 2014.
- [5] L. Constanzo, “Fisiologia,” Elsevier Brasil, 2014, p. 76.
- [6] E. B. Goldstein, “Encyclopedia of Perception,” SAGE, 2010, p. 984.
- [7] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” John Wiley & Sons Ltd, 2007, pp. 3–9.
- [8] W. D. Callister, “Materials Science and Engineering: An introduction,” John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 721–725.
- [9] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, “Tactile perception of thermal diffusivity,” *Attention, Perception, Psychophys.*, vol. 71, pp. 481–489, 2009.
- [10] J. A. Balderas-López, “Measurements of the thermal effusivity of transparent liquids by means of a photopyroelectric technique,” *Rev. Mex. Fis.*, vol. 49, pp. 353–357, 2003.
- [11] S. S. Kajimoto H, Konyo M, “Pervasive Haptics: Science, Design, and Application,” in *Psychophysical Dimensions of Material Perception and Methods to Specify Textural Space*, Springer, 2016, pp. 11–12.
- [12] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, “Thermosensory reversal effect quantified,” *Acta Psychol. (Amst).*, vol. 127, pp. 46–50, 2008.
- [13] W. Cheewawuttipong, D. Fuoka, S. Tanoue, H. Uematsu, and Y. Iemoto, “Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Boron Nitride Composites,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 808–817, 2013.
- [14] B. Debelak, “Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties,” *Carbon N. Y.*, vol. 45, pp. 1727–1734, 2007.
- [15] H. Chen, V. V Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang, L. Du, and B. Chen, “Thermal

- conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 59, pp. 41–85, 2016.
- [16] A. Roja, J. Hussain, A. A. Alahyari, S. A. Eastman, C. Thibaud-Erkey, S. Johnston, and M. J. Sobkowicz, “Review of polymers for heat exchanger applications: Factors concerning thermal conductivity,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 113, pp. 1118–1127, 2017.
- [17] S. Wongsriuksa, P. Howes, M. Conreen, and M. Miodownik, “The use of physical property data to predict the touch perception of materials,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 238–244, 2012.
- [18] L. Wastiels, H. N. J. Schifferstein, A. Heylighen, and I. Wouters, “Relating material experience to technical parameters: A case study on visual and tactile warmth perception of indoor wall materials,” *Build. Environ.*, vol. 49, pp. 359–367, 2012.
- [19] Y. Obata, K. Takeuchi, Y. Furuta, and K. Kanayama, “Research on better use of wood for sustainable development: Quantitative evaluation of good tactile warmth of wood,” *Energy*, vol. 30, pp. 1317–1328, 2005.
- [20] L. A. Jones and M. Berris, “Material discrimination and thermal perception,” *Proc. - 11th Symp. Haptic Interfaces Virtual Environ. Teleoperator Syst.*, pp. 171–178, 2003.
- [21] H.-N. Ho and L. a. Jones, “Contribution of thermal cues to material discrimination and localization.,” *Percept. Psychophys.*, vol. 68, pp. 118–128, 2006.
- [22] T. Karlessi, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, and I. Livada, “Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures,” *Sol. Energy*, vol. 83, pp. 538–551, 2009.
- [23] E. Coser, V. F. Moritz, A. Krenzinger, and C. A. Ferreira, “Development of paints with infrared radiation reflective properties,” vol. 25, pp. 305–310, 2015.
- [24] K. Rakrueangdet, N. Nunak, T. Suesut, and E. Sritham, “Emissivity Measurements of Reflective Materials using Infrared Thermography,” vol. 1, pp. 16–19, 2016.
- [25] P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, and J. Molleda, “Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing,” *Sensors*, vol. 14, pp. 12305–12348, 2014.
- [26] A. Synnefa, M. Santamouris, and I. Livada, “A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment,” vol. 80, pp. 968–981, 2006.
- [27] H. Shen, H. Tan, and A. Tzempelikos, “The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption — An experimental study,”

- Energy Build.*, vol. 43, pp. 573–580, 2011.
- [28] A. Zhou, Z. Yu, C. Lun, and D. Lau, “Enhanced solar spectral reflectance of thermal coatings through inorganic additives,” *Energy Build.*, vol. 138, pp. 641–647, 2017.
- [29] J. W. Park, “Application of Sensory Science to Surimi Seafood,” in *Surimi and Surimi Seafood*, CRC Press, 2013, pp. 554–558.
- [30] X. Zeng, D. Ruan, and L. Koehl, “Intelligent sensory evaluation: Concepts, implementations, and applications,” *Math. Comput. Simul.*, pp. 443–452, 2007.
- [31] A. Sarda, R. Deterre, and C. Vergneault, “Heat perception measurements of the different parts found in a car passenger compartment,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 35, pp. 65–75, 2004.
- [32] F. Shao, X.-J. Chen, C. J. Barnes, and B. Henson, “A novel tactile sensation measurement system for qualifying touch perception,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 224, pp. 97–105, 2010.
- [33] “ASTM E903-96: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.” 1996.
- [34] “ASTM G173: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.” 2004.
- [35] “Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room,” 2009.
- [36] “Guia Relacre 13 - Validação de Métodos Internos de Ensaio em Análise Química.” .
- [37] W. Penny and R. Henson, “Analysis of Variance,” 2006. [Online]. Available: [citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.380.6877&rep=rep1&type=pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.380.6877&rep=rep1&type=pdf). [Accessed: 25-Sep-2017].
- [38] NFPA and the International Association of Fire Chiefs (IAFC), “Fundamentals of Fire Fighter Skills.” Jones & Bartlett Learning, pp. 124–125, 2004.
- [39] C. A. Wilkie and A. B. Morgan, *Fire Retardancy of Polymeric Materials*. CRC Press, 2009.
- [40] R. Michalovi, “Fire Safety Assessment on Seven Flooring Materials,” vol. 3, pp. 59–62, 2014.
- [41] I. Mitterová, E. Ruzinska, M. Zachar, M. Sihelská, and K. J. Krajewski, “Reaction to fire of an insulating material on the basis of the cork,” *For. Wood Technol.*, vol. 152, pp. 148–152, 2014.
- [42] D. Pereira, A. Gago, J. Proença, and T. Morgado, “Fire performance of sandwich wall assemblies,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 93, pp. 123–131, 2016.

- [43] B. A. L. Östman and E. Mikkola, “European classes for the reaction to fire performance of wood products,” *Holz als Roh - und Werkst.*, vol. 64, pp. 327–337, 2006.
- [44] “EN 13501-1:2007+A1: Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.,” 2009.
- [45] P. Van Hees and P. Blomqvist, “A summary of fire regulations, requirements and test methods for technical textiles used in buildings,” 2007.
- [46] “ISO 9239-1: Reaction to fire tests for floorings - Part 1: Determination of the burning behaviour using a radiant heat source,” 2010.
- [47] “ISO 11925-2 Reaction to fire tests - Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test.” 2010.

## ANEXO 1: TRATAMENTO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERCEÇÃO TÉRMICA

De forma a simplificar o tratamento estatístico dos resultados, foi criada uma escala de percepção térmica compreendida entre 1 e 3 ou 1 e 4, quando se analisaram 3 ou 4 amostras em simultâneo, respetivamente. Nesta escala, o 1 corresponde à amostra mais fria ao toque e o 3 ou 4 corresponde à amostra que transmite uma sensação menos fria ao toque, sendo atribuída, com base nas respostas de percepção térmica dadas pelos voluntários, uma pontuação da escala de percepção térmica cada amostra. Posteriormente, foi traçado um gráfico com base na média das pontuações das respostas dadas pelos voluntários para cada amostra analisada.

Tabela 1. Pontuações de acordo com as respostas dadas pelos voluntários, com base numa escala de percepção térmica compreendida entre 1 (sensação mais fria) e 4 (sensação menos fria).

| PA | ABS | PC/ABS | PP |
|----|-----|--------|----|
| 1  | 2   | 3      | 2  |
| 1  | 3   | 2      | 2  |
| 1  | 3   | 2      | 4  |
| 1  | 2   | 2      | 3  |
| 1  | 3   | 2      | 3  |
| 1  | 2   | 3      | 2  |
| 1  | 4   | 3      | 2  |
| 1  | 4   | 3      | 2  |
| 1  | 2   | 4      | 3  |
| 1  | 4   | 3      | 2  |
| 1  | 2   | 3      | 3  |
| 1  | 2   | 3      | 4  |
| 1  | 3   | 2      | 4  |

Tabela 2. Valor médio das pontuações obtidas para cada amostra analisada e o respetivo intervalo de confiança.

| PA        | ABS       | PC/ABS    | PP        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,0 ± 2,1 | 2,8 ± 0,5 | 2,7 ± 0,4 | 2,8 ± 0,5 |

No entanto, sempre que foram comparados grupos de amostras, os resultados foram organizados em termos de frequências relativas, de forma a verificar a frequência com que uma dada resposta

ocorreu, sendo esta efetuada apresentada de forma percentual e definida como a razão entre a frequência absoluta e o número total de observações.

Tabela 3. Ordem decrescente de sensação fria ao toque, com base na resposta de 20 voluntários, com uma amostra de PP prensado e outra de PP prensado + 1,5% grafeno.

| <b>Voluntários</b> | <b>Grupo de amostras (PP prensado e PP prensado + 1,5% grafeno)</b> |
|--------------------|---|
| 1                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 2                  | PP prensado + 1,5% grafeno = PP prensado                            |
| 3                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 4                  | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 5                  | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 6                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 7                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 8                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 9                  | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 10                 | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 11                 | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 12                 | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 13                 | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 14                 | PP prensado + 1,5% grafeno = PP prensado                            |
| 15                 | PP prensado + 1,5% grafeno = PP prensado                            |
| 16                 | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 17                 | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 18                 | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |
| 19                 | PP prensado > PP prensado + 1,5% grafeno                            |
| 20                 | PP prensado + 1,5% grafeno > PP prensado                            |

Tabela 4. Frequência absoluta e frequência relativa calculadas com base nas respostas dadas pelos 20 voluntários.

| <b>Amostras</b>                | <b>PP prensado</b> | <b>PP prensado + 1,5% grafeno</b> | <b>PP prensado = PP prensado + 1,5% grafeno</b> |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---|
| <b>Frequência absoluta</b>     | 6                  | 11                                | 3   |
| <b>Frequência relativa (%)</b> | 30                 | 55                                | 15  |

## ANEXO 2: TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE RESULTADOS

Sempre que possível, os resultados estatísticos de percepção térmica ao toque, bem como os valores médios de condutividade térmica,  $C_p$  e difusividade térmica, foram apresentados ao longo da dissertação com os respectivos valores de incerteza, na forma de intervalo de confiança.

Assim, de seguida encontra-se descrita, detalhadamente, a avaliação efetuada para a obtenção do intervalo de confiança, baseada em pressupostos teóricos [36].

### Teste *t-student* para o cálculo do intervalo de confiança

Após se encontrar o valor médio das réplicas efetuadas, fez-se uma estimativa do valor de desvio padrão e determinou-se o intervalo em que se deve encontrar a média da população, com um nível de confiança ( $\alpha$ ) de 95%. Para tal, consultou-se a tabela dos valores de *t-student* (teste bilateral) para  $N - 1$  graus de liberdade, em que  $N$  corresponde ao número de réplicas, para um nível de confiança de 0,05. De salientar que em todos os ensaios de percepção ao toque, o  $N$  corresponde ao número de voluntários e este diferiu de ensaio para ensaio.

### Intervalo de confiança da média

O intervalo de confiança corresponde ao intervalo de valores no qual se espera que a média da população,  $\mu$ , determinada experimentalmente, esteja contida, considerando um certo grau de probabilidade (nível de confiança) e é calculado de acordo com a equação.

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Onde  $\bar{x}$  corresponde ao valor médio calculado,  $N$  é o número de ensaios efetuados,  $t$  é o parâmetro *t-student* determinado para  $N - 1$  graus de liberdade e  $s$  corresponde ao desvio padrão associado à média dos valores.

### ANEXO 3: VALIDAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE SENSORIAL

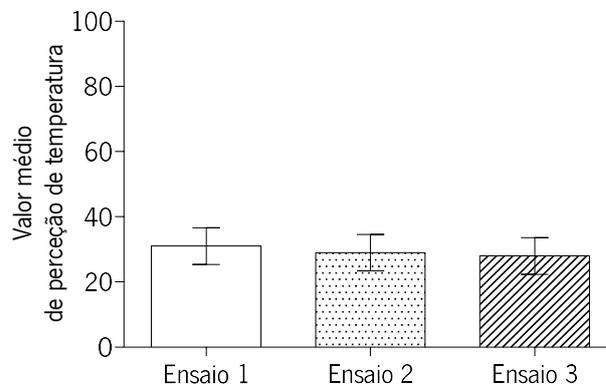


Figura 1. Valores médios de percepção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de madeira envernizada numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

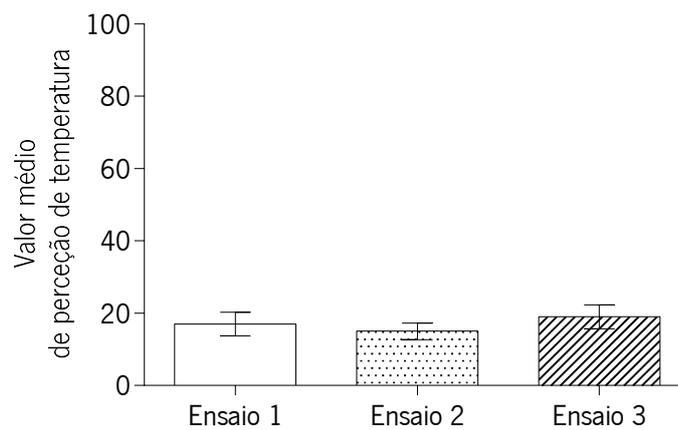


Figura 2. Valores médios de percepção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de cerâmica numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

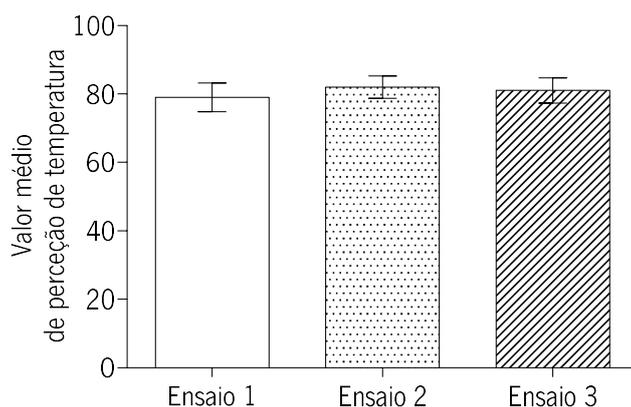


Figura 3. Valores médios de percepção de temperatura dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para uma espuma numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

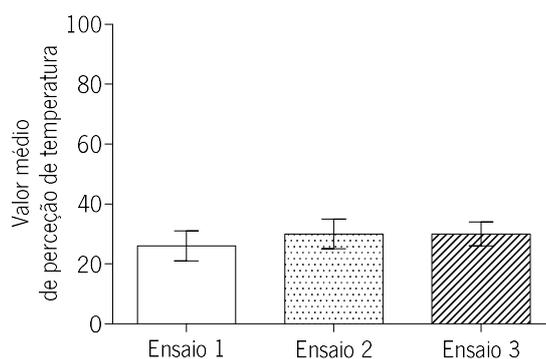


Figura 4. Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de ABS numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

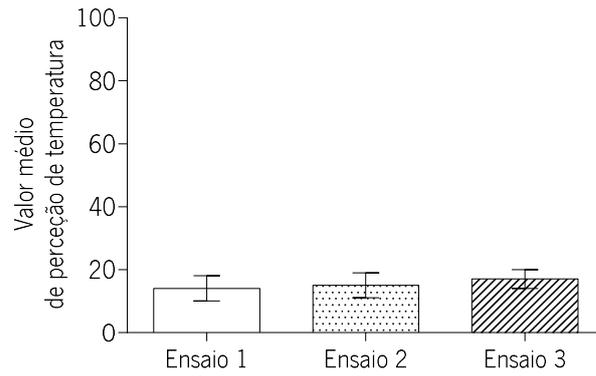


Figura 5. Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PA numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

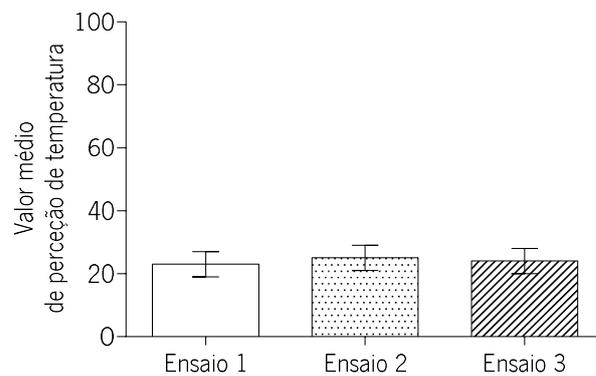


Figura 6. Valores médios da percepção térmica dos três ensaios efetuados, à temperatura ambiente, com 20 voluntários, para a amostra de PP numa escala de temperatura que variou entre 0-100. Incerteza calculada para um valor de *t-student* de 2,09 para (N-1)=19 graus de liberdade, com um nível de confiança de 0,05.

#### ANEXO 4: ESTUDO ESTATÍSTICO DE ANÁLISE DE SIGNIFICÂNCIA

Tabela 5. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de madeira envernizada segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 190         | 63,33        | 8,33             |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 190         | 63,33        | 8,33             |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 170         | 56,66        | 108,33           |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 165         | 55           | 25               |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 130         | 43,33        | 208,33           |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 160         | 53,33        | 108,33           |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 170         | 56,66        | 108,33           |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 160         | 53,3         | 58,33            |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 180         | 60           | 25               |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 145         | 48,33        | 108,33           |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 185         | 61,66        | 8,33             |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 165         | 55           | 25               |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 125         | 41,66        | 8,33             |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 145         | 48,33        | 33,33            |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 105         | 35           | 25               |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 125         | 41,66        | 108,33           |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 130         | 43,33        | 58,33            |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 155         | 51,66        | 8,33             |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 145         | 48,33        | 33,33            |
| <b>1ºdia</b>         | 20              | 1030        | 51,5         | 92,36            |
| <b>2ºdia</b>         | 20              | 1025        | 51,25        | 94,41            |
| <b>3ºdia</b>         | 20              | 1050        | 52,5         | 111,84           |

Tabela 6. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de madeira envernizada, para o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b>    | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 3541,25   | 19        | 186,3816  | 3,321219226 | 0,000801       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 17,5      | 2         | 8,75      | 0,155920281 | 0,856172       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 2132,5    | 38        | 56,11842  |             |                |                  |
| <b>Total</b>             | 5691,25   | 59        |           |             |                |                  |

Tabela 7. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de madeira envernizada segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 125         | 41,66667     | 158,3333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 110         | 36,66667     | 408,3333         |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 85          | 28,33333     | 158,3333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 100         | 33,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 130         | 43,33333     | 108,3333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 97          | 32,33333     | 6,333333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 95          | 31,66667     | 208,3333         |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 75          | 25           | 475              |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 92          | 30,66667     | 1,333333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 115         | 38,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 105         | 35           | 25               |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 77          | 25,66667     | 86,33333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 95          | 31,66667     | 208,3333         |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 60          | 20           | 175              |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 104         | 34,66667     | 16,33333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 85          | 28,33333     | 158,3333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 45          | 15           | 0                |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 35          | 11,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 80          | 26,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 55          | 18,33333     | 33,33333         |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 624         | 31,2         | 147,3263         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 576         | 28,8         | 147,5368         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 565         | 28,25        | 155,9868         |

Tabela 8. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de madeira envernizada, para o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 4043,917  | 19        | 212,8377  | 1,78846  | 0,062741       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 98,43333  | 2         | 49,21667  | 0,413564 | 0,66423        | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 4522,233  | 38        | 119,0061  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 8664,583  | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 9. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de PA segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 145         | 48,33333     | 133,3333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 105         | 35           | 0                |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 150         | 50           | 0                |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 140         | 46,66667     | 208,3333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 155         | 51,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 135         | 45           | 0                |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 96          | 32           | 0                |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 126         | 42           | 108              |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 135         | 45           | 0                |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 139         | 46,33333     | 5,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 135         | 45           | 0                |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 120         | 40           | 0                |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 175         | 58,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 120         | 40           | 75               |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 105         | 35           | 0                |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 135         | 45           | 0                |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 960         | 48           | 68,31579         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 871         | 43,55        | 94,36579         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 960         | 48           | 68,31579         |

Tabela 10. Valor de  $F$ , de  $F_{critico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de PA, segundo o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 3509,65   | 19        | 184,7184  | 7,982827 | 3,58E-08       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 264,0333  | 2         | 132,0167  | 5,705258 | 0,006813       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 879,3     | 38        | 23,13947  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 4652,983  | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 11. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de PA segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 40          | 13,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 36          | 12           | 49               |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 122         | 40,66667     | 1,333333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 40          | 13,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 21          | 7            | 0                |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 55          | 18,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 31          | 10,33333     | 46,33333         |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 35          | 11,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 63          | 21           | 7                |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 50          | 16,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 52          | 17,33333     | 1,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 25          | 8,333333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 66          | 22           | 0                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 11          | 3,666667     | 30,33333         |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 35          | 11,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 32          | 10,66667     | 26,33333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 40          | 13,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 75          | 25           | 0                |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 43          | 14,33333     | 0,333333         |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 52          | 17,33333     | 21,33333         |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 275         | 13,75        | 78,19737         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 307         | 15,35        | 78,55526         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 342         | 17,1         | 55,67368         |

Tabela 12. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de PA, segundo o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 3548,4    | 19        | 186,7579  | 14,55157 | 5,12E-12       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 112,3     | 2         | 56,15     | 4,375026 | 0,0195         | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 487,7     | 38        | 12,83421  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 4148,4    | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 13. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de PP segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 170         | 56,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 170         | 56,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 171         | 57           | 9                |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 155         | 51,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 167         | 55,66667     | 16,333333        |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 174         | 58           | 3                |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 175         | 58,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 170         | 56,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 175         | 58,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 175         | 58,33333     | 58,333333        |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 157         | 52,33333     | 6,333333         |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 150         | 50           | 0                |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 139         | 46,33333     | 2,333333         |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 1140        | 57           | 21,78947         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 1113        | 55,65        | 17,39737         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 1125        | 56,25        | 16,93421         |

Tabela 14. Valor de  $F$ , de  $F_{critico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de PP, segundo o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 793,9333  | 19        | 41,78596  | 5,829886 | 2,06E-06       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 18,3      | 2         | 9,15      | 1,276588 | 0,29068        | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 272,3667  | 38        | 7,167544  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 1084,6    | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 15. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de PP segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 51          | 17           | 0                |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 44          | 14,66667     | 20,33333         |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 130         | 43,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 95          | 31,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 31          | 10,33333     | 21,33333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 80          | 26,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 50          | 16,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 65          | 21,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 71          | 23,66667     | 5,33333          |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 120         | 40           | 0                |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 57          | 19           | 3                |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 53          | 17,66667     | 6,33333          |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 84          | 28           | 0                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 61          | 20,33333     | 0,33333          |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 85          | 28,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 70          | 23,33333     | 108,3333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 60          | 20           | 0                |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 75          | 25           | 0                |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 85          | 28,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 70          | 23,33333     | 58,33333         |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 464         | 23,2         | 81,22105         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 492         | 24,6         | 84,88421         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 481         | 24,05        | 74,78684         |

Tabela 16. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de PP, segundo o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntários</b>       | 3683,517  | 19        | 193,8693  | 8,245756 | 2,3E-08        | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 19,9      | 2         | 9,95      | 0,423199 | 0,657997       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 893,4333  | 38        | 23,5114   |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 4596,85   | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 17. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de cerâmica segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 120         | 40           | 75               |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 105         | 35           | 75               |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 67          | 22,33333     | 6,333333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 68          | 22,66667     | 6,333333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 85          | 28,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 100         | 33,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 90          | 30           | 19               |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 90          | 30           | 25               |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 115         | 38,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 115         | 38,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 140         | 46,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 140         | 46,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 84          | 28           | 7                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 70          | 23,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 100         | 33,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 80          | 26,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 90          | 30           | 25               |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 117         | 39           | 13               |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 125         | 41,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 90          | 30           | 25               |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 660         | 33           | 61,47368         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 659         | 32,95        | 72,89211         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 672         | 33,6         | 71,30526         |

Tabela 18. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de cerâmica, segundo o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 3092,983  | 19        | 162,7886  | 7,592317 | 7,04E-08       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 5,233333  | 2         | 2,616667  | 0,122039 | 0,885459       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 814,7667  | 38        | 21,44123  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 3912,983  | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 19. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de cerâmica segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 40          | 13,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 36          | 12           | 12               |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 80          | 26,66667     | 208,3333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 48          | 16           | 3                |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 73          | 24,33333     | 36,33333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 80          | 26,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 48          | 16           | 28               |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 45          | 15           | 25               |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 54          | 18           | 7                |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 50          | 16,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 50          | 16,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 30          | 10           | 0                |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 42          | 14           | 3                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 45          | 15           | 25               |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 58          | 19,33333     | 81,33333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 60          | 20           | 75               |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 61          | 20,33333     | 70,33333         |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 35          | 11,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 48          | 16           | 28               |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 43          | 14,33333     | 14,33333         |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 347         | 17,35        | 55,71316         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 304         | 15,2         | 28,27368         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 375         | 18,75        | 45,98684         |

Tabela 20. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de cerâmica, segundo o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 1230,733  | 19        | 64,77544  | 1,98703  | 0,03535        | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 127,9     | 2         | 63,95     | 1,961709 | 0,154601       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 1238,767  | 38        | 32,59912  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 2597,4    | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 21. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de ABS segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 185         | 61,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 170         | 56,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 175         | 58,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 180         | 60           | 0                |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 175         | 58,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 176         | 58,66667     | 1,333333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 178         | 59,33333     | 5,333333         |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 190         | 63,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 185         | 61,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 185         | 61,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 191         | 63,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 185         | 61,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 187         | 62,33333     | 16,33333         |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 165         | 55           | 0                |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 194         | 64,66667     | 16,33333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 204         | 68           | 0                |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 195         | 65           | 0                |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 180         | 60           | 75               |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 198         | 66           | 3                |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 1230        | 61,5         | 18,47368         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 1247        | 62,35        | 21,18684         |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 1186        | 59,3         | 22,95789         |

Tabela 22. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de ABS, segundo o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 704,1833  | 19        | 37,06228  | 2,90046  | 0,002551       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 99,1      | 2         | 49,55     | 3,877737 | 0,029341       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 485,5667  | 38        | 12,77807  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 1288,85   | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 23. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de ABS segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 70          | 23,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 68          | 22,66667     | 4,333333         |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 135         | 45           | 0                |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 80          | 26,66667     | 108,3333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 39          | 13           | 108              |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 100         | 33,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 88          | 29,33333     | 121,3333         |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 90          | 30           | 0                |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 82          | 27,33333     | 21,33333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 85          | 28,33333     | 133,3333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 55          | 18,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 58          | 19,33333     | 5,333333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 66          | 22           | 0                |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 68          | 22,66667     | 4,333333         |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 125         | 41,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 110         | 36,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 64          | 21,33333     | 56,33333         |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 120         | 40           | 0                |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 120         | 40           | 0                |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 85          | 28,33333     | 8,333333         |
| <b>1ª dia</b>        | 20              | 526         | 26,3         | 108,0105         |
| <b>2ª dia</b>        | 20              | 590         | 29,5         | 105,5263         |
| <b>3ª dia</b>        | 20              | 592         | 29,6         | 70,98947         |

Tabela 24. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de ABS, segundo o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 4271,6    | 19        | 224,8211  | 7,53103  | 7,84E-08       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 140,9333  | 2         | 70,46667  | 2,360484 | 0,108071       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 1134,4    | 38        | 29,85263  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 5546,933  | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 25. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de espuma segundo o quadro de referências desenvolvido, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 281         | 93,66667     | 50,33333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 262         | 87,33333     | 5,33333          |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 295         | 98,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 280         | 93,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 270         | 90           | 4                |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 277         | 92,33333     | 6,33333          |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 273         | 91           | 13               |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 277         | 92,33333     | 6,33333          |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 295         | 98,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 295         | 98,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 281         | 93,66667     | 30,33333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 290         | 96,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 275         | 91,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 275         | 91,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 275         | 91,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 295         | 98,33333     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 285         | 95           | 25               |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 275         | 91,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 290         | 96,66667     | 8,33333          |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 295         | 98,33333     | 8,33333          |
| <b>1º dia</b>        | 20              | 1874        | 93,7         | 24,32632         |
| <b>2º dia</b>        | 20              | 1872        | 93,6         | 23,2             |
| <b>3º dia</b>        | 20              | 1895        | 94,75        | 14,82895         |

Tabela 26. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de espuma, segundo o quadro de referências desenvolvido

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 619,65    | 19        | 32,61316  | 2,193063 | 0,019409       | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 16,23333  | 2         | 8,116667  | 0,545803 | 0,58385        | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 565,1     | 38        | 14,87105  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 1200,983  | 59        |           |          |                |                  |

Tabela 27. Valores médios e de variância obtidos para a amostra de espuma segundo o quadro de referências original, realizado com 20 voluntários

| <b>SUMÁRIO</b>       | <b>Contagem</b> | <b>Soma</b> | <b>Média</b> | <b>Variância</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| <b>Voluntário 1</b>  | 3               | 265         | 88,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 2</b>  | 3               | 270         | 90           | 0                |
| <b>Voluntário 3</b>  | 3               | 230         | 76,66667     | 208,3333         |
| <b>Voluntário 4</b>  | 3               | 215         | 71,66667     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 5</b>  | 3               | 225         | 75           | 25               |
| <b>Voluntário 6</b>  | 3               | 215         | 71,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 7</b>  | 3               | 235         | 78,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 8</b>  | 3               | 230         | 76,66667     | 158,3333         |
| <b>Voluntário 9</b>  | 3               | 265         | 88,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 10</b> | 3               | 235         | 78,33333     | 33,33333         |
| <b>Voluntário 11</b> | 3               | 233         | 77,66667     | 6,333333         |
| <b>Voluntário 12</b> | 3               | 263         | 87,66667     | 56,33333         |
| <b>Voluntário 13</b> | 3               | 265         | 88,33333     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 14</b> | 3               | 230         | 76,66667     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 15</b> | 3               | 255         | 85           | 0                |
| <b>Voluntário 16</b> | 3               | 240         | 80           | 0                |
| <b>Voluntário 17</b> | 3               | 240         | 80           | 25               |
| <b>Voluntário 18</b> | 3               | 235         | 78,33333     | 8,333333         |
| <b>Voluntário 19</b> | 3               | 230         | 76,66667     | 58,33333         |
| <b>Voluntário 20</b> | 3               | 255         | 85           | 25               |
| <b>1ºdia</b>         | 20              | 1575        | 78,75        | 73,35526         |
| <b>2ºdia</b>         | 20              | 1646        | 82,3         | 45,37895         |
| <b>3ºdia</b>         | 20              | 1610        | 80,5         | 57,63158         |

Tabela 28. Valor de  $F$ , de  $F_{crítico}$  e de  $P$  para o fator de variação “voluntário” e “dia”, para a amostra de espuma, segundo o quadro de referências original

| <b>Fonte de variação</b> | <b>SQ</b> | <b>gl</b> | <b>MQ</b> | <b>F</b> | <b>valor P</b> | <b>F crítico</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <b>Voluntário</b>        | 1901,65   | 19        | 100,0868  | 2,624232 | 0,00558        | 1,867332         |
| <b>Dia</b>               | 126,0333  | 2         | 63,01667  | 1,652269 | 0,205084       | 3,244818         |
| <b>Erro</b>              | 1449,3    | 38        | 38,13947  |          |                |                  |
| <b>Total</b>             | 3476,983  | 59        |           |          |                |                  |