

# **AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS APLICADA AO ESTUDO DA HUMIDADE**

**DANIELA FERNANDA FONTENETE REBELO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

---

Coorientador: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões

JUNHO DE 2017

## MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus queridos Pais

*“A persistência é o caminho do êxito”*

*Charles Chaplin*





## **AGRADECIMENTOS**

Às minhas orientadoras, Professora Eva Barreira e Professora Lurdes Simões, um sincero obrigada pelo interesse e dedicação que depositaram neste trabalho, a constante disponibilidade e ajuda prestadas e a generosidade traduzida em conselhos e palavras de confiança.

Aos meus pais, por todo o carinho e constante investimento na minha educação, por serem exemplos de altruísmo e perseverança na sua vida pessoal e profissional.

Ao Eduardo, por todas as partilhas ao longo do meu percurso académico, por acompanhar sempre tão presente as minhas conquistas e as minhas derrotas pessoais e académicas. A boa disposição, que lhe é tão característica, os conselhos sempre tão acertados, e o positivismo com que encara a vida inspiram-me a fazer mais e melhor.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelas palavras de incentivo nas horas de maior desânimo.

A todos, um profundo obrigada.



## RESUMO

A humidade é uma das principais causas de patologias nos edifícios e caso não seja detetada e controlada pode comprometer o desempenho dos mesmos em termos de durabilidade, resistência mecânica, impermeabilidade e aparência. Deste modo, é importante a contribuição da termografia de infravermelhos para auxiliar na compreensão dos fenómenos de humificação e assim prevenir e solucionar alguns dos problemas gerados pela presença de humidade. Recorrendo a equipamentos próprios de termografia, que determinam a temperatura superficial dos objetos através de detetores que captam a radiação infravermelha e a convertem em sinais elétricos, obtém-se como produto final imagens térmicas, denominadas termogramas. Estas imagens refletem os padrões térmicos do objeto, que se distinguem por várias cores ou tons, e podem ser avaliadas segundo uma abordagem qualitativa e/ou quantitativa.

A relevância deste trabalho prende-se com a avaliação quantitativa dos resultados da termografia para o estudo de fenómenos de humificação, utilizando para o efeito termogramas efetuados a provetes de betão leve, na fase de embebição pela base. Com o intuito de avaliar os gradientes térmicos e a evolução das imagens térmicas ao longo do período de medição e a par da definição das áreas particularmente afetadas pela humidade, utilizaram-se algumas metodologias com âmbitos de aplicação díspares entre si, todavia, convergentes nos objetivos.

Para tratar quantitativamente os termogramas efetuou-se um tratamento estatístico descritivo, que através de medidas estatísticas básicas, histogramas e *boxplots* permitiu avaliar as distribuições de temperatura bem como as áreas mais críticas ao longo de 24 horas de medição. A definição de dois índices térmicos traduzidos por taxas de variação possibilitou a distinção da taxa de arrefecimento devido à humificação, e devido à adaptação à temperatura ambiente. A técnica de subtração de imagens evidenciou as variações ocorridas entre períodos de medição, e por fim, a análise de componentes principais (ACP) viabilizou a identificação de padrões associados às variações térmicas das imagens, através de uma redução dimensional do conjunto de temperaturas. É importante sublinhar que as etapas cruciais da subtração de imagens e da análise de componentes principais foram suportadas por alguns *softwares*, particularmente, o *InfReC Analyzer*, o *Surfer*® e o *SPSS Statistics*.

Os resultados obtidos permitiram validar as potencialidades das ferramentas utilizadas, para tratar quantitativamente os fenómenos de humificação que ocorrem nos elementos construtivos. Verificou-se que a subtração de imagens em relação a um termograma de referência é uma boa técnica para realçar os resultados, no entanto, a subtração ao termograma precedente não permitiu retirar conclusões satisfatórias. A análise estatística permitiu identificar padrões de variabilidade de temperaturas em secções diferentes do provete e a definição de dois índices térmicos permitiu realçar a taxa de arrefecimento devido à humidade face à adaptação à temperatura ambiente. A análise de componentes principais (ACP) revelou ser uma ferramenta com potencial para evidenciar as tendências térmicas de um conjunto de imagens, através da definição da zona crítica de humificação e dos diferentes níveis da frente húmida. De um modo geral concluiu-se que, quando se pretende definir a altura crítica de água ou níveis de humificação utiliza-se a ACP, por outro lado, quando se pretende estudar a forma como se processam as variações térmicas ao longo do tempo recorre-se a outros tipos de tratamento quantitativo, enunciados anteriormente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Termografia de Infravermelhos, Análise Quantitativa, Humidade, Subtração de Imagens Térmicas, Análise de Componentes Principais (ACP)



## **ABSTRACT**

Humidity is one of the major cause of pathologies in buildings and if not detected and controlled can compromise their performance in terms of durability, mechanical strength, impermeability and appearance. In this way, the contribution of infrared thermography is important to help in understanding humidification phenomena and thus to prevent and solve some of the problems caused by the presence of moisture. Using thermography equipment that determines the surface temperature of objects, through detectors that capture infrared radiation and convert it into electrical signals, thermal images, called thermograms, are obtained as final product. These images reflect the thermal patterns of the object, which are distinguished by various colors or tones, and can be evaluated according to a qualitative and / or quantitative approach.

The relevance of this work is related to the quantitative evaluation of the results of the thermography for the study of humidification phenomena using thermograms made with light concrete specimens in the soaking phase by the base. In order to evaluate the thermal gradients and the evolution of the thermal imaging throughout the measurement period, and together with the definition of the areas particularly affected by humidity, were used in some methodologies with different scopes each other, however, converging in goals.

In order to quantitatively study the thermograms a descriptive statistical treatment was carried out, which through basic statistical parameters, histograms and boxplots allowed to evaluate the temperature distributions as well as the most critical areas during 24 hours of measurement. The definition of two thermal index translated by variation rates allows the distinction of cooling rate due to humidification, and due to adaptation to ambient temperature. The technique of image subtraction enhanced the detachment of variations between measurement periods, and finally, the principal component analysis (PCA) enabled the identification of patterns associated with the thermal variations of the images, through a dimensional reduction of the set of temperatures. It is important to note that the crucial steps of image subtraction and PCA have been supported by some software, particularly InfReC Analyzer, Surfer® and SPSS Statistics.

The obtained results allowed to confirm the capability of the tools used to quantitatively treat the humidification phenomena occurring in the constructive elements and which can corrupt their proper performance. It has measured that the thermal images subtraction with respect to a reference thermogram is an effective technique to enhance the results, however, the subtraction with respect to a previous thermogram didn't allow to yield satisfactory conclusions. The statistical analysis allowed to identify patterns of temperature variability in different sections of the sample. The definition of two thermal index allowed to distinguish the cooling rate due to moisture, and due to the adaption of the ambient temperature. The principal component analysis (PCA) has proved to be a tool with potential to evidence the thermal trends of a set of images. by defining the critical moisture zone and the different levels of the wet front. In general, it was concluded that, when the critical height of water or moisture levels is to be defined, the PCA is used. On the other hand, when it's intended to study how thermal variations are processed over time, other types of quantitative treatment are used, as stated above.

**KEYWORDS:** Infrared Thermography, Quantitative Analysis, Moisture, Thermal Images Subtraction, Principal Component Analysis (PCA)



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO .....	1
1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO .....	2
<b>2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS APLICADA AO ESTUDO DA HUMIDADE</b> .....	<b>5</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA.....	6
2.2.1. DEFINIÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS .....	6
2.2.2. PARÂMETROS QUE AFETAM A TERMOGRAFIA .....	6
2.2.3. ANÁLISE DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS .....	7
2.2.4. TERMOGRAFIA ATIVA E PASSIVA .....	8
2.2.5. DIFERENTES DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA .....	9
2.3. TERMOGRAFIA APLICADA AOS EDIFÍCIOS.....	10
2.3.1. ASPETOS GERAIS .....	10
2.3.2. BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES DA TERMOGRAFIA APLICADA À CONSTRUÇÃO .....	11
2.3.3. NORMAS INTERNACIONAIS APLICADAS À TERMOGRAFIA.....	12
2.4. ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS .....	13
2.4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	14
2.4.2. ANÁLISE COM BASE EM ÍNDICES .....	14
2.4.3. ANÁLISE COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS .....	16
2.4.4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS NA TERMOGRAFIA .....	17

<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA .....	23
3.2. PRÉ-SELEÇÃO DE TERMOGRAMAS .....	23
3.3. TRATAMENTO COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS .....	29
3.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DESCRITIVO.....	31
3.5. TRATAMENTO COM BASE EM ÍNDICES .....	31
3.6. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) .....	32
<b>4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
4.1. NOTA INTRODUTÓRIA .....	35
4.2. COMPARAÇÃO DE IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS PELO <i>INFREC ANALYZER</i> E PELO <i>SURFER®</i> .....	35
4.3. TRATAMENTO COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS .....	36
4.3.1. SUBTRAÇÃO AO TERMOGRAMA PRECEDENTE .....	36
4.3.2. SUBTRAÇÃO AO TERMOGRAMA DE REFERÊNCIA .....	38
4.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DESCRITIVO.....	40
4.5. TRATAMENTO COM BASE EM ÍNDICES .....	47
4.6. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) .....	50
4.6.1. SUBTRAÇÃO DA IMAGEM T004 .....	50
4.6.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL MÉDIO .....	51
4.6.3. ANÁLISE DOS <i>SCORES</i> .....	53
4.7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	54
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	58
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

## ANEXO I – TERMOGRAMAS EM ESTUDO



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma imagem de sobreposição na inspeção interior de uma cobertura [13] .....	8
Figura 2 - Termograma representativo de um telhado com humidade [23] .....	10
Figura 3 - Imagem representativa de um conjunto de fissuras, por combinação de estatísticas de ordem superior – 3D, coeficiente de assimetria, com uma representação gráfica [28] .....	14
Figura 4 - Teor crítico de humidade avaliado pela termografia quantitativa [4] .....	15
Figura 5 - a) Representação das três linhas para a roldana da persiana; b) Representação das três caixas para o caixilho da janela [25] .....	16
Figura 6 - a) Distribuição da temperatura; b) termograma de referência; c) Obtenção da diferença de temperaturas [13] .....	17
Figura 7 - Processamento de dados através da ACP. A matriz 3D é convertida numa matriz 2D sendo esta posteriormente convertida num produto de três matrizes. A matriz V contém um conjunto de componentes principais que representam as “tendências de temperatura” [42] .....	18
Figura 8 - a) Termograma representativo de uma zona húmida numa parede pré-fabricada; b) Mapa de humidade representativo do ponto de humidade crítico obtido pela terceira componente principal da ACP [4] .....	19
Figura 9 - Sequência de N imagens, cada imagem com $n_x$ e $n_y$ elementos [38] .....	20
Figura 10 - a) Imagem do sistema elétrico obtida em condições reais de ensaio; b) Imagem média utilizada na análise [38] .....	21
Figura 11 - CPs espaciais obtidas por subtração da imagem média [38] .....	21
Figura 12 - a) Termograma obtido pelo <i>InfReC Analyzer</i> ao fim de 15h55; b) Termograma obtido pelo <i>InfReC Analyzer</i> ao fim de 16h45 .....	24
Figura 13 - Termograma ilustrativo da caixa a envolver o provete .....	24
Figura 14 - Termograma ilustrativo das nove caixas definidas no provete .....	26
Figura 15 - Termogramas seleccionados para a análise quantitativa nos diferentes instantes de tempo. Imagens térmicas obtidas a partir do <i>InfReC Analyzer</i> .....	29
Figura 16 - Termogramas analisados para seleção do termograma de referência. Imagens obtidas pelo <i>InfReC Analyzer</i> .....	30
Figura 17 – Imagens térmicas T004, T052 e T192 obtidas a partir do <i>InfReC Analyzer</i> .....	36
Figura 18 – Mapas de cores T004, T052 e T192 obtidos a partir do <i>Surfer®</i> .....	36
Figura 19 - Mapas de Cores, obtidos pelo <i>Surfer®</i> , representativos da subtração entre dois termogramas; a) T002-T001; b) T003-T002; c) T004-T003; d) T030-T024; e) T098-T086; f) T192-T176 .....	37
Figura 20 - Imagens térmicas, obtidas pelo <i>InfReC Analyzer</i> , representativas da subtração entre dois termogramas; a) T002-T001; b) T003-T002; c) T004-T003; d) T030-T024; e) T098-T086; f) T192-T176 .....	37

Figura 21 - Mapas de Cores, obtidos pelo <i>Surfer®</i> , representativos da subtração ao termograma de referência; a) T006-T004; b) T030-T004; c) T098-T004; d) T192-T004 .....	39
Figura 22- Imagens térmicas, obtidas pelo <i>InfReC Analyzer</i> , representativas da subtração ao termograma de referência; a) T006-T004; b) T030-T004; c) T098-T004; d) T192-T004 .....	39
Figura 23 – Representação das <i>boxplot</i> das caixas G, H, I para os termogramas T004, T052 e T192 .....	44
Figura 24 – Representação das <i>boxplot</i> das caixas B, E e H para os termogramas T004, T052 e T192 .....	45
Figura 25 - Variação da temperatura superficial, nas nove caixas, ao longo do período de humidificação .....	46
Figura 26 - Variação da temperatura superficial, no provete, ao longo do período de humidificação ..	46
Figura 27 - Variação do $IT_1$ ao longo do período de humidificação .....	47
Figura 28 - Comparação da evolução do $IT_1$ ao longo das primeiras 3 horas com a imagem do termograma T037, correspondente às 3h de medição .....	48
Figura 29 - Comparação da evolução do $IT_1$ das 3h até às 18h com a imagem do termograma T104, correspondente às 9h de medição .....	48
Figura 30 - Comparação da evolução do $IT_1$ das 18h até às 21h com a imagem do termograma T158, correspondente às 18h de medição .....	49
Figura 31 - Variação do $IT_2$ ao longo do período de humidificação .....	49
Figura 32 - Percentagem de variabilidade dos dados explicada por cada componente principal; a) Análise particular; b) Análise geral.....	50
Figura 33 - a) 1ª Componente principal espacial obtida por subtração da imagem T004; b) 2ª Componente principal espacial obtida por subtração da imagem T004 .....	51
Figura 34 - Percentagem de variabilidade dos dados para cada componente principal; a) Análise particular; b) Análise geral.....	52
Figura 35 - 1ª Componente principal espacial obtida por subtração do perfil temporal médio; b) 2ª Componente principal espacial obtida por subtração do perfil temporal médio .....	52
Figura 36 - Dispersão dos <i>scores</i> das duas CPs obtidas por subtração da imagem T004, para a totalidade dos termogramas .....	53
Figura 37 - Dispersão dos <i>scores</i> das duas CPs obtidas por subtração do perfil temporal médio, para a totalidade dos termogramas .....	54
Figura 38 - Esquema ilustrativo dos três pontos centrais considerados por Ferreira [46] .....	54
Figura 39 - Variação da temperatura superficial, nos três pontos centrais, ao longo do período de humidificação .....	55

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 - Benefícios e limitações da termografia de infravermelhos.....	12
Tabela 2 - Código e hora inerentes aos termogramas selecionados.....	27
Tabela 3 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T004 .....	41
Tabela 4 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T052 .....	42
Tabela 5 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T192 .....	43



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$ACP$	–	Análise de Componentes Principais
$CPs$	–	Componentes Principais
$GS$	–	Grau de Saturação
$HR$	%	Humidade Relativa
$IT_1$	–	Índice Térmico 1
$IT_2$	–	Índice Térmico 2
$ITE$	–	Índice Térmico de Evaporação
$ITS$	–	Índice Térmico de Saturação
$M_d$	[g]	Teor de massa de água num corpo seco
$M_s$	[g]	Teor de massa de água num corpo saturado
$M_w$	[g]	Teor de massa de água num corpo poroso
$n$	–	Tamanho da amostra
$PG_j$	–	Grau de pressão a uma dada diferença de pressão j
$\Delta P_{fin}$	Pa	Diferença de pressão final
$\Delta P_j$	Pa	Diferença de pressão j
$s_i$	–	Desvio padrão da temperatura do termograma i
$s_j$	–	Desvio padrão da temperatura do termograma j
$SPSS$	–	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
$t$	–	Teste <i>t-student</i>
$T_0$	[°C]	Temperatura superficial média do termograma mais seco
$T_d$	[°C]	Temperatura superficial da parede seca
$T_f$	[°C]	Temperatura superficial média do termograma mais molhado
$T_i$	[°C]	Temperatura superficial média do termograma a testar
$T_s$	[°C]	Temperatura superficial de um material poroso em condições de saturação
$T_w$	[°C]	Temperatura superficial da parede húmida
$TG_j$	–	Grau de temperatura a uma dada diferença de pressão j
$Tsup\_caixa$	[°C]	Temperatura superficial das caixas
$x_i$	[°C]	Temperatura média do termograma i
$x_j$	[°C]	Temperatura média do termograma j



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A eficiência energética é um dos temas dominantes da atualidade, como tal, a redução dos consumos de energia e a certificação energética de todos os edifícios ou frações, começam a tornar-se realidades cada vez mais próximas. É essencial a realização de estudos que avaliem o desempenho higratérmico dos materiais de construção e da envolvente dos edifícios, sobretudo nos dias de hoje, em que se assiste à utilização de novos materiais e novas técnicas, com características menos bem conhecidas. Esses estudos revelam-se cruciais para uma melhoria das soluções e regulamentos, permitindo garantir a durabilidade dos edifícios, bem como, o conforto e a segurança dos utilizadores.

Um dos parâmetros chave que desencadeia grande parte das patologias presentes nos edifícios é a temperatura. Por esta razão, a realização de medições, capazes de fornecer importantes informações sobre as principais causas de deterioração dos materiais e estruturas, é indispensável. A temperatura superficial dos objetos pode ser avaliada recorrendo à termografia de infravermelhos, que constitui uma ferramenta muito potente de diagnóstico.

A termografia de infravermelhos é uma técnica não-destrutiva, já que não implica a destruição dos elementos construtivos, e não requer contacto físico, portanto, não tem implicações diretas nas rotinas do utilizador. Recorrendo a equipamentos próprios de termografia, detetam-se as radiações infravermelhas, que se convertem em sinais elétricos e os transformam em imagens térmicas ou termogramas, que representam as distribuições da temperatura superficial. Estas constituem uma excelente ferramenta para avaliações rápidas sem necessidade de acesso. Esta técnica de diagnóstico pode ser explorada com sucesso em diversos domínios, tais como, engenharia, arquitetura, medicina, meteorologia, meio ambiente, entre outros. Os procedimentos de ensaio e as respetivas análises diferem consoante as características e requisitos próprios de cada um dos campos de aplicação.

Limitando o domínio de aplicação apenas à engenharia civil, o recurso à termografia propicia a identificação de anomalias e de áreas degradadas, permite avaliar o desempenho ou a eficiência energética dos edifícios, possibilita também a avaliação do estado de conservação de edifícios históricos, e, apesar de não ser tão comum, também é utilizada para avaliar a humidade dos elementos construtivos. A humidade é uma das principais causas de patologias nos edifícios e, caso não seja detetada e controlada, pode comprometer o desempenho de um edifício em termos de durabilidade, resistência mecânica, impermeabilidade e aparência. Nesse sentido, é importante a contribuição da termografia para auxiliar na compreensão dos fenómenos de humificação e, assim, prevenir e solucionar alguns dos problemas gerados pela presença de humidade. A aplicação da termografia à avaliação da humificação de materiais de construção ainda não é suficientemente abrangente, visto que ainda não foi alvo de estudos exaustivos.

As imagens térmicas, obtidas como resultado da aplicação da termografia, são geralmente alvo de duas análises que seguem abordagens diferentes, designadamente, qualitativa e quantitativa. Geralmente recorre-se a uma análise do tipo qualitativo quando o foco do trabalho é a observação de perfis térmicos. Por outro lado, quando se pretende definir e quantificar o nível de gravidade de uma anomalia recorre-se à termografia quantitativa. Dado que a sua aplicabilidade e eficácia não foram até à data largamente estudadas, no âmbito de fenómenos de humedificação, revela-se fundamental a adoção de técnicas de tratamento e de análise de dados que auxiliem na identificação de padrões térmicos, bem como, na deteção, localização e quantificação de anomalias térmicas.

Neste contexto surgem como potenciais ferramentas de tratamento quantitativo a subtração de imagens, a adoção de índices térmicos, análises estatísticas e a análise de componentes principais.

## **1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo da presente dissertação é avaliar quantitativamente a presença de humidade em materiais de construção, recorrendo para o efeito, a termogramas efetuados a provetes de betão leve na fase de embebição pela base. Pretende-se determinar a aplicabilidade e eficácia da termografia quantitativa, através da implementação de várias metodologias, designadamente, a subtração de imagens, definição de índices térmicos, tratamentos estatísticos e análise de componentes principais, por forma a destacar as variações ocorridas entre períodos de medição e definir as áreas particularmente afetadas pela humidade.

A complexidade associada à interpretação dos resultados é por vezes elevada, uma vez que os parâmetros que afetam as medições podem ser totalmente desconhecidos, e em particular a aplicação de análises quantitativas no âmbito do estudo da humidade são de um domínio que até à data não foi amplamente estudado.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO**

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, cujo conteúdo se descreve sucintamente de seguida.

O primeiro capítulo refere o âmbito do trabalho, os objetivos propostos, e por fim a organização e estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, referem-se os conceitos fundamentais associados à termografia, bem como o seu amplo leque de aplicações. Trata de forma sintética a termografia aplicada aos edifícios, por conseguinte os seus benefícios e limitações, e, referenciam-se as normas internacionais respeitantes a esta técnica de diagnóstico. Posteriormente, são enumerados os vários tipos de análise quantitativa, que se podem aplicar, para avaliar os resultados dos ensaios termográficos, acompanhados de alguns exemplos práticos de aplicação na área da construção.

O terceiro capítulo define os vários critérios adotados para seleção dos termogramas de interesse, seguindo-se a descrição das metodologias aplicadas, para realização das análises quantitativas às imagens térmicas selecionadas.

O quarto capítulo, de carácter prático, incide na apresentação dos resultados inerentes a cada uma das análises realizadas, designadamente, tratamento com base na subtração de imagens, tratamento estatístico descritivo, tratamento com base em índices e, por último, a análise de componentes principais. Inclui-se também neste capítulo uma breve comparação das imagens térmicas obtidas pelo *InfReC*



*Analyzer* e pelo *Surfer®*, e as principais diferenças no modo de funcionamento dos referidos programas.

O quinto capítulo apresenta as conclusões desta dissertação, e, expõe algumas sugestões de eventuais desenvolvimentos futuros que estimulem o enriquecimento e aperfeiçoamento do tema em análise.

Apresenta-se ainda o seguinte anexo:

- Anexo I – Termogramas em estudo;



## 2

# AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS APLICADA AO ESTUDO DA HUMIDADE

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O excesso de humidade contribui significativamente para a degradação de um edifício. Grande parte dos edifícios são afetados por patologias que têm como causa a humidade. A existência destas patologias nos edifícios pode comprometer o desempenho dos mesmos, no que diz respeito à resistência mecânica, impermeabilidade e aparência, devido à degradação causada nos materiais e componentes que os integram. A ação conjunta da deterioração com o crescimento biológico (fungos, algas) pode ter consequências graves na saúde dos utilizadores, daí a necessidade de detetar e solucionar os problemas relacionados com a humidade [1,2]. Se a identificação desta anomalia antecipar o aparecimento de defeitos visíveis, podem ser adotadas medidas de manutenção, que atuem no sentido de manter a integridade das fachadas, preservar as condições de conforto dos utilizadores e evitar consumos excessivos de energia para fins de aquecimento [3].

Muitos métodos têm sido propostos com o intuito de detetar e avaliar as patologias associadas à humidade, todavia, a solução está longe de ser encontrada. A dificuldade associada a esta medição prende-se com o facto da medição ser realizada apenas contabilizando parâmetros quantitativos, tais como, a massa, a condutividade elétrica, absorção de ondas eletromagnéticas em bandas específicas e a velocidade de propagação de ondas elétricas [4]. Tradicionalmente, o teor de humidade é avaliado recorrendo a testes destrutivos que consistem na recolha de uma amostra e posterior tratamento em laboratório. Contudo, a avaliação do teor de humidade pode ser realizada recorrendo a técnicas não destrutivas, através de detetores de humidade. Apesar dos testes destrutivos apresentarem uma precisão superior, a vantagem que os ensaios não destrutivos oferecem, comparativamente aos outros, é a facilidade de execução e a obtenção de resultados em tempo real [1].

A termografia de infravermelhos é uma ferramenta versátil de diagnóstico que tem dado provas do seu potencial e eficácia, e cuja evolução tem sido notória ao longo dos últimos anos. Pode ser aplicada para detetar humidade, pois através do termograma obtido é possível determinar padrões térmicos irregulares que, a existir, sugerem a presença da patologia. Embora não seja tão comum, visto que poucos estudos foram realizados até à data sobre esta temática, a avaliação da humidade pode ser avaliada recorrendo à termografia de infravermelhos [1,5].

## 2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA

### 2.2.1. DEFINIÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

Os objetos são caracterizados por uma variedade de parâmetros físicos, tais como, o tamanho, a forma e o peso. Porém, a propriedade física que é medida com mais frequência é a temperatura. Variações não expectáveis deste parâmetro podem indiciar defeitos de projeto, mão-de-obra deficiente ou danos em componentes [6]. A grande maioria das patologias estão diretamente relacionadas com a temperatura, por conseguinte, a medição desta revela-se crucial para compreender as causas que estão na base das anomalias [7].

A termografia de infravermelhos é um ensaio não destrutivo, que transforma a energia térmica emitida por objetos na faixa infravermelha do espectro eletromagnético, numa imagem visível, de modo a determinar a temperatura superficial dos objetos [8]. A câmara de infravermelhos recebe os diferentes níveis de radiação infravermelha emitidos a partir da superfície do objeto, concebendo um mapa com a sua distribuição e criando assim uma imagem térmica designada por termograma [9].

O processo de obtenção das imagens térmicas tem vindo a ser simplificado ao longo dos anos, devido à eficiência e enorme resolução das câmaras infravermelhas. A qualidade dos termogramas obtidos depende da variação das temperaturas superficiais, sendo que quanto maior é o contraste, melhor é a qualidade das imagens térmicas. Regra geral, as cores frias significam baixas temperaturas e as cores quentes significam altas temperaturas [10,11].

A aplicação de diversas técnicas de processamento, nomeadamente, pré-processamento e processamento propriamente dito, são de extrema importância visto que as imagens obtidas para além de conterem muita informação, apresentam uma série de erros que advêm da sua captação. Assim sendo, é aconselhável tratar as imagens térmicas, principalmente quando o principal propósito é a realização de uma análise quantitativa [12]. O primeiro processamento da imagem térmica realiza-se no interior da câmara, onde se efetua o cálculo da temperatura superficial do objeto a partir dos sinais do detetor, utilizando para o efeito os parâmetros de calibração do aparelho e os parâmetros fixados pelo utilizador (temperatura ambiente, emissividade, humidade e distância de medição) [13].

A superfície de cada material é definida em termos de emissividade, que é uma propriedade que traduz a relação entre a energia emitida por um material à temperatura  $T$ , e a energia emitida pelo corpo negro à mesma temperatura. Um corpo negro pode ser definido como um objeto que absorve toda a radiação que nele incide, para qualquer comprimento de onda [14,15].

### 2.2.2. PARÂMETROS QUE AFETAM A TERMOGRAFIA

A termografia de infravermelhos não é uma ciência exata, pois durante a concretização do ensaio é importante ter em linha de conta alguns fatores passíveis de afetarem a análise dos resultados e consequentemente originar má interpretação dos termogramas, culminando em conclusões erradas. Segundo Freitas et al. [16], existem dois tipos de parâmetros que podem afetar os resultados, designadamente, os parâmetros relacionados com as propriedades dos materiais e com as condições climáticas, e as características da câmara. De seguida, apresentam-se alguns dos fatores que mais condicionam os resultados obtidos:

- Emissividade, é uma propriedade muito dependente da superfície do material e define a sua capacidade de emitir energia;
- Cor da Superfície, pode camuflar defeitos e anomalias uma vez que cores diferentes absorvem quantidades diferentes de radiação solar;

- Reflexões das superfícies em metal ou em vidro podem distorcer a interpretação do termograma;
- Condições meteorológicas, tais como, a temperatura do ar, precipitação, velocidade do vento e radiação solar direta podem afetar o transporte de energia e consequentemente as imagens térmicas;
- A distância entre a câmara e o objeto pode atenuar a radiação térmica para distâncias superiores a 10 m;
- As características da câmara devem ser as mais indicadas de acordo com a aplicação em questão, pelo que é importante ter em consideração a resolução, a sensibilidade espectral, a precisão e os píxeis no momento de escolher o equipamento;
- Os procedimentos de calibração disponíveis na câmara são importantes para garantir uma boa precisão nas medições.

### 2.2.3. ANÁLISE DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

A termografia de infravermelhos fornece termogramas, nos quais, as regiões em que se concentram os defeitos aparecem com padrões térmicos diferentes das zonas sem defeito. Neste sentido, surge a necessidade de se realizarem análises qualitativas e/ou quantitativas, mediante o objetivo do ensaio e a natureza do objeto em análise [15].

A análise qualitativa é direta e de fácil interpretação e é utilizada quando se pretende uma abordagem mais superficial do problema. Neste tipo de análise a anomalia é identificada pelas variações na cor/brilho, sem qualquer atribuição de valores de temperatura. Muitas vezes os termogramas obtidos são interpretados por um operador qualificado “*in situ*” e são comparados com termogramas de referência, para confirmação de resultados, desde que as condições de ensaio e da envolvente sejam semelhantes. De ressaltar que os termogramas podem ser obtidos independentemente do valor real da emissividade da superfície em estudo, visto que o principal objetivo é visualizar as diferenças nas temperatura superficiais [15].

Como exemplo de um método qualitativo sobressai a fusão de imagens que é um processo que reside na obtenção de uma imagem singular através da combinação de informações relevantes de diferentes imagens. O termo fusão, no âmbito da termografia, significa combinação das imagens infravermelhas com as imagens visíveis da área em estudo. Neste sentido, ao sobrepor as imagens de infravermelhos nas imagens visíveis (Figura 1), verifica-se um aumento significativo da informação presente na imagem singular obtida por combinação das outras imagens. Um exemplo prático deste método é a representação das temperaturas por intermédio das imagens de infravermelhos que, muitas vezes, não evidencia as propriedades estruturais do elemento em análise. Ao aplicar a sobreposição de imagens, é possível aumentar substancialmente a interpretação do termograma [13].

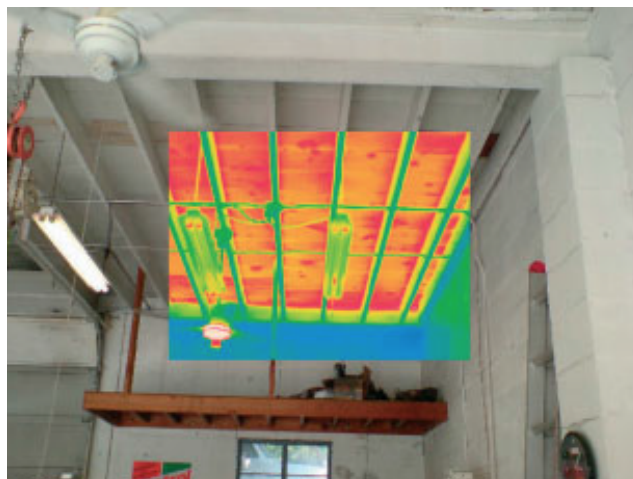


Figura 1 - Exemplo de uma imagem de sobreposição na inspeção interior de uma cobertura [13]

A análise quantitativa implica mais detalhe e maior rigor e, como tal, tende a ser mais demorada. No entanto, como técnica de medição constitui a melhor abordagem a seguir uma vez que permite medir com exatidão as temperaturas. Contrariamente ao que sucede na análise qualitativa, neste tipo de abordagem os resultados obtidos não são normalmente avaliados no próprio local. Os termogramas são gravados e todos os parâmetros necessários à futura análise são anotados para posteriormente se proceder ao processamento, tratamento e interpretação dos dados recolhidos. Dado que a principal finalidade desta análise é a obtenção de valores reais da temperatura para o objeto em estudo, uma correta calibração do equipamento a utilizar revela-se crucial para a obtenção de resultados satisfatórios [15,17]. Quanto à deteção de humidade as abordagens quantitativas não são muito abundantes, quer ao nível da melhoria de termogramas, quer na caracterização de defeitos, nomeadamente, determinação do teor de humidade e definição das áreas particularmente afetadas pela mesma [3].

#### 2.2.4. TERMOGRAFIA ATIVA E PASSIVA

Os ensaios termográficos podem ser realizados seguindo duas abordagens diferentes: a termografia ativa e a termografia passiva. Quando o objeto não é aquecido por uma fonte de calor adicional ou é aquecido apenas por influência da radiação solar, considera-se a abordagem passiva. Por outro lado, quando o objeto é estimulado por uma fonte de calor de forma controlada, o processo é habitualmente designado por termografia ativa. A resposta térmica gerada ao longo do ensaio pelo objeto em estudo é detetada através de uma câmara de infravermelhos, que regista a evolução da temperatura ao longo do tempo [9].

Na termografia ativa com estimulação externa recorre-se normalmente a sistemas óticos, nomeadamente lâmpadas de halogéneo (aquecimento periódico), ou a flashes fotográficos (aquecimento de impulso modelado). As técnicas aplicadas são a termografia de amplitude modelada (*Lock-in Thermography*) e a termografia de impulso (*Pulsed Thermography*), sendo o sinal utilizado o elemento diferenciador das referidas técnicas [12]. Quando a estimulação é interna, usualmente designada por termografia de ultra-som ou vibrotermografia, recorre-se a um sistema ultra-sónico que origina a vibração das partículas sem a necessidade de aquecer a superfície. A vibrotermografia ramifica-se em vibrotermografia de amplitude modelada (*Lock-in Vibrothermography*) ou vibrotermografia por impulso (*Burst Vibrothermography*), consoante o tipo e a amplitude do sinal ultra-sónico [12].

A termografia passiva, pelas características de execução que lhe estão associadas, é uma técnica que permite uma monitorização rápida com resultados obtidos em tempo real. Estudos realizados comprovam que esta abordagem passiva constitui uma ferramenta eficaz para o diagnóstico de problemas relacionados com a humidade [18]. Quando se pretende identificar e avaliar patologias em fachadas por intermédio da termografia passiva, uma das dificuldades que surge é a definição do momento mais adequado para a concretização do ensaio [19]. Segundo Barreira e Freitas [7], a termografia não pode ser usada para estudar objetos em equilíbrio térmico ou higroscópico.

#### 2.2.5. DIFERENTES DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA

A termografia representa uma técnica com grande potencial para ser explorada, e aplicada na pesquisa e desenvolvimento de um leque diversificado de áreas, tais como, ensaios não destrutivos, monitorização, manutenção preditiva, redução de custos de energia dos edifícios, entre outras. Devido ao enorme progresso feito nas últimas décadas em tecnologias de microsistemas de deteção de infravermelhos, na área da eletrónica, ciências de computação [13], construção naval, plantas radioativas e edifícios [14], é uma tecnologia que tem sido alvo de uma grande evolução na ciência e na indústria.

No que concerne à ciência e à indústria, a termografia pode ser aplicada à medicina, à medicina veterinária, à astronomia, à manutenção de sistemas mecânicos e de sistemas elétricos, controlo de processos de fabrico no setor industrial, para fins militares, combate a incêndios, arqueologia, monitorização ambiental, meteorologia, oceanografia, entre outros [15].

Esta ferramenta pode ser utilizada ao longo das diversas fases do processo construtivo para:

- detetar delaminações ou destacamentos (azulejos, gesso, telhas de cerâmica) [14,16,19-21];
- detetar e localizar áreas que contêm humidade (Figura 2) [1,3,11,14,16,22];
- detetar pontes térmicas [23];
- detetar fugas de ar através da envolvente dos edifícios (realizado através do ensaio de pressurização com porta ventiladora) [24];
- detetar e caracterizar heterogeneidades em estruturas de betão e alvenaria [11,25] ;
- inspecionar sistemas AVAC [16];
- inspecionar detalhes construtivos [11,16];
- inspecionar artefactos históricos [26];
- avaliar o conforto de revestimentos interiores [7];
- avaliar o processo de secagem de paredes [1];
- avaliar o estado de conservação de pinturas, de edifícios históricos que constituem heranças artísticas [27];
- avaliar estruturas em mosaico [18,28];
- monitorizar processos de produção de madeira laminada, por forma a minimizar os problemas de adesão [29].

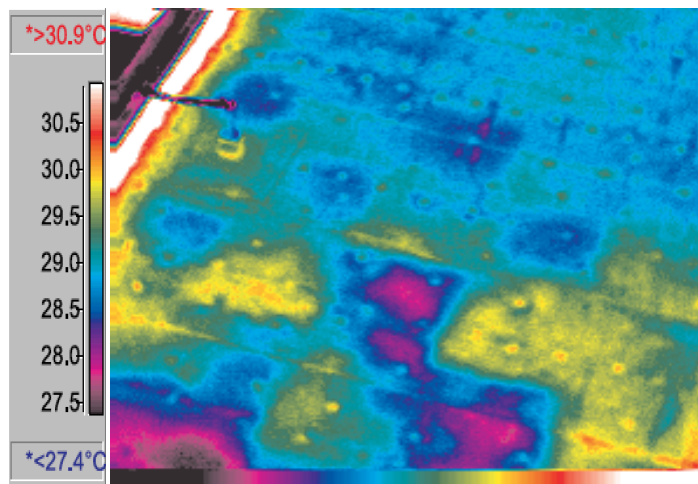


Figura 2 - Termograma representativo de um telhado com humidade [23]

De acordo com Hart [17], a termografia pode ser aplicada na deteção de defeitos no isolamento, deteção de fugas de ar, perdas de calor através das janelas, deteção de humidade, deteção de “detalhes ocultos” (tubos subterrâneos, condutas, ductos, etc.). Segundo o autor esta ferramenta pode ainda ser utilizada para examinar sistemas de aquecimento, permitir uma manutenção preventiva e detetar defeitos elétricos.

A informação recolhida pela termografia assume um papel preponderante, na medida em que parte dessa informação pode ser utilizada como forma de auxiliar outros estudos, para identificar potenciais problemas. Permite quantificar potenciais poupanças de energia e assim otimizar a eficiência energética dos edifícios, realçar a importância da manutenção preventiva e preditiva e estabelecer prioridades por forma a minimizar o risco de falha e por conseguinte tornar os edifícios mais aptos com resultados satisfatórios de desempenho e eficácia [30]. O sucesso associado à aplicação desta ferramenta depende de uma correta interpretação dos resultados obtidos, sendo essencial, o grau de experiência do utilizador, um conhecimento profundo da física e tecnologia das construções bem como dos mecanismos de transmissão de calor, ar e humidade, das teorias que abrangem a radiação de infravermelhos e os parâmetros que poderão afetar a execução dos ensaios.

## 2.3. TERMOGRAFIA APLICADA AOS EDIFÍCIOS

### 2.3.1. ASPETOS GERAIS

Segundo Vollmer e Möllmann [13] a termografia de infravermelhos é considerada uma excelente técnica para monitorizar e diagnosticar as condições de edifícios, através da medição das temperaturas superficiais da envolvente interior e/ou exterior. A variabilidade de temperaturas nos edifícios deve-se a três mecanismos básicos: fluxo de calor, ar e transferência de humidade através da envolvente dos edifícios. De acordo com aqueles autores estes fatores são determinantes na durabilidade e eficiência energética, mas também na sensação de conforto, saúde e segurança dos utilizadores.



A eficiência das câmaras de infravermelhos e a versatilidade dos softwares que lhes está associada têm simplificado ao longo dos anos o processamento de aquisição de imagens térmicas. Estes desenvolvimentos no tratamento de imagens aliados a recentes avanços na área da termografia concederam-lhe um papel relevante em ensaios não destrutivos.

Segundo Holst [6] a história da termografia começou há cerca de 200 anos. Em 1800 William Herschel descobriu os raios infravermelhos. Mais tarde, em 1843, o seu filho John Herschel produziu as primeiras imagens utilizando o sistema infravermelho através da técnica evaporográfica, ou seja, a evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono, obtendo assim o primeiro termograma. Em 1929, 89 anos depois, Czemy proporcionou uma melhoria na criação das imagens térmicas.

Em 1946 surge o scanner de infravermelhos para uso militar que tornou possível a produção de um termograma numa hora. Alguns anos depois, em 1954, reduziu-se a produção de um termograma para 45 minutos uma vez que o sistema tinha capacidade de produzir imagens a duas dimensões. Entre 1960 e 1970 houve um avanço significativo no desenvolvimento de scanners de infravermelhos, e no lançamento de sistemas integrados de formação de imagens térmicas instantâneas, o que permitiu a geração da imagem térmica em 5 minutos, com determinação da temperatura. Nos anos consecutivos ocorreram igualmente grandes avanços na tecnologia de infravermelhos, sendo que na opinião do autor a melhor evolução terá ocorrido nos anos 90 com a introdução das matrizes de plano focal [6].

### 2.3.2. BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES DA TERMOGRAFIA APLICADA À CONSTRUÇÃO

As principais vantagens da termografia de infravermelhos residem nas características do ensaio, nomeadamente na possibilidade de realizar medições de temperaturas a distâncias consideráveis sem qualquer contacto físico com a superfície em análise. Isto sem comprometer a integridade estrutural da superfície e sem causar qualquer tipo de interferência na vida do utilizador, o que facilita a execução deste ensaio em locais onde o acesso é difícil ou em ambientes com alguma perigosidade [15]. Outra vantagem desta tecnologia é a identificação de anomalias, que poderiam passar despercebidas e ao serem detetadas atempadamente impede-se a sua evolução para danos generalizados e dispendiosos. Por conseguinte, acresce a possibilidade de estimar custos de eventuais reparações e manutenções visto que, a termografia assinala com precisão a extensão de um problema [30].

De facto a termografia é uma ferramenta com enorme potencial, no entanto, a sua aplicação em edifícios apresenta algumas restrições respeitantes à dificuldade de interpretação dos resultados obtidos e dos parâmetros que podem influenciar as medições [7]. Segundo Meola [31] a termografia apresenta algumas limitações quando os defeitos exibem uma resistência térmica baixa e se localizam em profundidade, todavia, estudos realizados comprovam a eficácia desta técnica em conjunto com outras técnicas [20]. De acordo com Maldague [32] os principais benefícios e limitações associados ao uso da termografia são os indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Benefícios e limitações da termografia de infravermelhos [32]

Benefícios	Limitações
Inspeção Rápida	Custo do Equipamento
Ensaio Não destrutivo	O efeito das perdas térmicas (conve- tivas, radiativas) induzem contrastes que afetam a fiabilidade da interpre- tação
Ensaio Seguro, ausência de radia- ção perigosa para o utilizador	Interferência com fontes de calor desconhecidas
Termogramas relativamente fáceis de interpretar	Capacidade de detetar apenas defei- tos que resultam de uma alteração mensurável das propriedades térmi- cas
Desenvolvido somente numa das faces do objeto	Problemas relacionados com a emissividade

### 2.3.3. NORMAS INTERNACIONAIS APLICADAS À TERMOGRAFIA

O crescente desenvolvimento na área da termografia implica um aumento, quase proporcional, do número de exigências respeitantes à sua aplicação e é deste facto que advém a necessidade de existir legislação que regule os procedimentos termográficos.

A regulamentação sobre a aplicação da termografia ao diagnóstico e prevenção de patologias em edifícios encontra-se listada de seguida [33-35]:

Normas Americanas – *American Society for Testing and Materials (ASTM)*:

- ASTM C 1060-11a (2015) – *Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*;
- ASTM C 1153-10 (2015) – *Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging*;
- ASTM D 4788 -03 (2013) – *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*;
- ASTM C1046-95 (2013) – *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*.

Normas Internacionais – *International Organization for Standardization (ISO)*:

- ISO 18251-1 (2017) – *Non-destructive testing - Infrared thermography - Part 1: Characteristics of system and equipment*;
- ISO 10880 (2017) – *Non-destructive testing - Infrared thermographic testing - General principles*;
- ISO 6781-3 (2015) – *Performance of buildings - Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods - Part 3: Qualifications of equipment operators, data analysis and report writers*;
- ISO 6781(1983) – *Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared methods*.

Normas Europeias (EN):

- EN 13187 (1999) - *Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method*;
- EN 1767 (1999) - *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test Methods. Infrared analysis*.

#### **2.4. ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS**

Os termogramas representam apenas a distribuição das temperaturas superficiais, isto é, a radiação emitida e refletida pela superfície dos objetos, demonstrando apenas os efeitos térmicos causados na superfície pelos elementos construtivos. Neste sentido, surge a necessidade de analisar e interpretar os resultados obtidos através da termografia. Porém, a este processo está associado um grau elevado de complexidade decorrente da presença de variáveis, por vezes, difíceis de quantificar.

Segundo Vollmer e Möllmann [13] alguns dos parâmetros que podem ter uma forte influência na análise quantitativa e na interpretação das imagens infravermelhas são:

- Dependência angular e do comprimento de onda da emissividade;
- Propriedades óticas entre a câmara e o objeto;
- Utilização de filtros;
- Reflexões térmicas;
- Velocidade do vento;
- Radiação solar incidente;
- Efeito de sombra de objetos próximos;
- Humidade;
- Propriedades térmicas dos objetos.

Dado que o foco deste trabalho é a avaliação quantitativa dos resultados da termografia aplicada ao estudo da humidade, é importante perceber de que forma esta patologia é avaliada e se a termografia quantitativa pode ser aplicada com eficácia na sua medição.

### 2.4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

As estatísticas de ordem superior calculam os momentos centralizados de ordem superior, em particular, o terceiro momento ou o coeficiente de assimetria, que representa a falta de simetria de uma distribuição. Enquanto o quarto momento ou coeficiente de achatamento caracteriza a tendência relativa de uma distribuição em relação à forma de uma distribuição normal dos perfis de temperatura, aglomerando as informações importantes da sequência original numa única imagem [2,27]. A medição das componentes referidas é importante quando se pretende caracterizar a localização e a variabilidade de um conjunto de dados. Para o efeito, é corrente a construção de histogramas para representação destas variáveis.

Sfarra et al. [27] utilizaram várias técnicas, entre as quais, estatísticas de ordem superior, com o intuito de compreender o estado de conservação da pintura histórica *Madonna con Bambino*. Para o efeito utilizaram-se as referidas estatísticas de ordem superior, designadamente, o momento estatístico *skewness*, coeficiente de assimetria, juntamente com uma representação gráfica. Na Figura 3 é possível observar um conjunto de fissuras detetadas através da ação conjunta das técnicas mencionadas anteriormente.

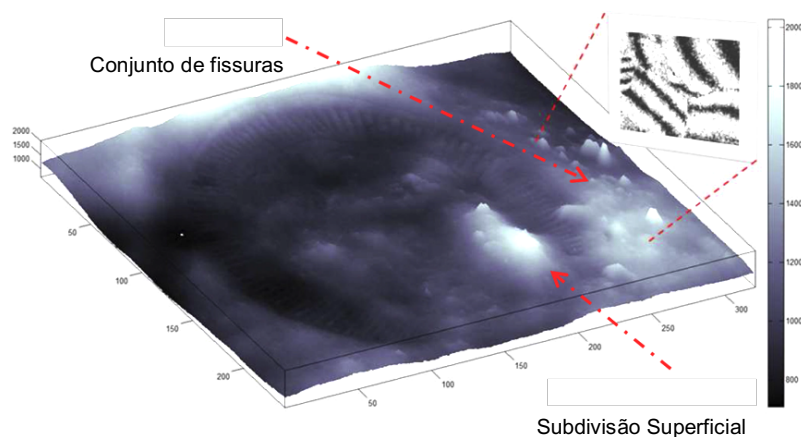


Figura 3 - Imagem representativa de um conjunto de fissuras, por combinação de estatísticas de ordem superior – 3D, coeficiente de assimetria, com uma representação gráfica [28]

### 2.4.2. ANÁLISE COM BASE EM ÍNDICES

No que concerne à medição de humidade por intermédio da termografia quantitativa, Grinzato [36] propôs um novo parâmetro, designado por Índice Térmico de Evaporação (ITE) (Figura 4), que expressa a diferença entre as temperaturas da superfície seca e húmida a dividir pela temperatura da superfície seca. Este índice apresenta algumas vantagens, uma vez que apenas está relacionado com o processo de evaporação e com a variação de massa, no entanto, não é um parâmetro adequado para representar a distribuição do teor de água dentro da amostra [4].

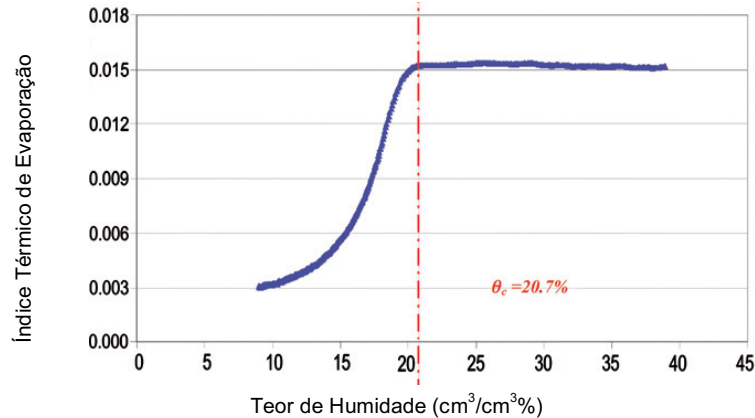


Figura 4 - Teor crítico de humidade avaliado pela termografia quantitativa [4]

Em casos mais complexos onde a saturação do material nunca é atingida e a humidade relativa diminui significativamente a taxa de evaporação, em Grinzato et al. [4] propôs-se uma abordagem mais complexa. Calculou-se o grau de saturação (GS) através da norma EN ISO 9346:2000 e que pode ser definido pelo seguinte rácio [4]:

$$GS = \frac{(Mw - Md)}{(Ms - Md)} \quad (2.1)$$

Em que o numerador representa o teor de massa de água num corpo poroso e o denominador representa o teor máximo de água no corpo saturado.

A realização de medições termográficas permitiu introduzir um novo índice, designado por índice térmico de saturação (ITS), que corresponde à relação entre a diferença da temperatura superficial da parede húmida e da parede seca ( $T_w - T_d$ ) pela diferença de temperatura do mesmo material poroso em condições de saturação e em condições de secagem ( $T_s - T_d$ ):

$$ITS = \frac{(T_w - T_d)}{(T_s - T_d)} \quad (2.2)$$

O índice térmico de saturação (ITS) permite estimar o quão longe está qualquer ponto da superfície do nível de saturação da humidade. A par dessa estimativa este índice fornece também um mapa preciso de temperaturas, com a ressalva de que se deve assumir um valor constante de emissividade. As principais dificuldades aquando das medições de temperatura estão relacionadas com as propriedades óticas da superfície (emissividade) e com a influência de fatores ambientais [4].

No trabalho realizado por Barreira et al. [24] foi implementada uma abordagem quantitativa por forma a avaliar o efeito de pontos de fuga nos edifícios. A avaliação de fugas de ar através da envolvente dos edifícios é geralmente realizada através do ensaio da porta ventiladora descrito na norma EN 13829:2006. Para a concretização da análise quantitativa definiram-se três linhas e três caixas, com diferentes dimensões, para dois casos de estudo diferentes (Figura 5).

Numa primeira avaliação utilizou-se como indicador a temperatura superficial da caixa ( $T_{sup\_caixa\_i}$ ) e da linha ( $T_{sup\_linha\_i}$ ). Seguidamente, seleccionaram-se dois dias representativos de cada cenário e analisou-se a variação da temperatura ao longo do ensaio. Verificou-se que nos dias seleccionados as diferenças entre as três caixas eram significativas, no entanto, uma vez que a temperatura superficial inicial era diferente, não foi possível obter conclusões definitivas. Por essa razão foram definidos os seguintes índices:

$$(TG)_j = \frac{[(T_{sup\_caixa\_i})_j - (T_{sup\_caixa\_i})_{ini}]}{[(T_{sup\_caixa\_i})_{fin} - (T_{sup\_caixa\_i})_{ini}]} \quad (2.3)$$

Em que  $(TG)_j$ , que é o grau de temperatura a uma dada diferença de pressão  $j$ , é definido como o rácio da diferença entre a temperatura da caixa a uma dada pressão e a temperatura da caixa inicial e a diferença entre a temperatura superficial final e a temperatura superficial inicial das caixas.

Da mesma forma se pode definir o grau de pressão a uma dada diferença de pressão  $j$ ,  $(PG)_j$ , que corresponde ao rácio entre a diferença de pressão  $j$ ,  $(\Delta P)_j$ , e a diferença de pressão final,  $(\Delta P)_{fin}$ :

$$(PG)_j = \frac{(\Delta P)_j}{(\Delta P)_{fin}} \quad (2.4)$$

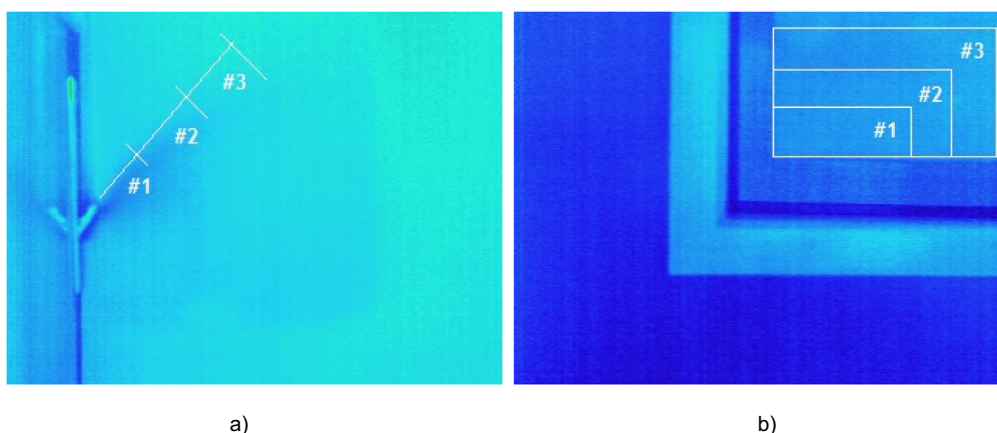


Figura 5 - a) Representação das três linhas para a roldana da persiana; b) Representação das três caixas para o caixilho da janela [25]

#### 2.4.3. ANÁLISE COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS

A subtração de imagens é uma das técnicas frequentemente utilizadas quando se pretende tratar quantitativamente os termogramas efetuados. Este método de processamento de imagens permite a identificação de pequenas alterações de temperatura, eliminação da influência de fatores externos, nomeadamente, reflexões ambientais, e se aplicado consecutivamente possibilita a visualização de derivadas de tempo causadas por fenómenos transitórios [13].

Segundo Edis et al. [3] a subtração simples de imagens é uma técnica de realce que consiste na utilização de um termograma de referência representativo de um determinado momento, para melhorar a avaliação dos restantes termogramas. Esta melhoria reside na identificação de diferenças de temperatura, *pixel a pixel*, entre as imagens térmicas em questão.

A subtração de imagens pode ser realizada de duas formas: subtraindo ao termograma de referência cada um dos termogramas de uma sequência (Figura 6) ou consecutivamente, isto é, subtrair cada imagem à imagem precedente [13].

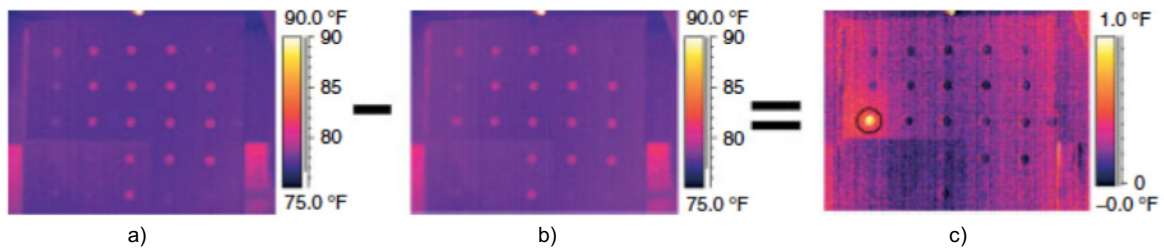


Figura 6 - a) Distribuição da temperatura; b) termograma de referência; c) Obtenção da diferença de temperaturas [13]

#### 2.4.4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS NA TERMOGRAFIA

O rápido desenvolvimento de sistemas de imagem térmica tornou possível uma utilização avançada ao nível do processamento de imagens. Há uns anos atrás, os algoritmos de processamento de imagens, sobretudo das imagens que possuíam maior número de pixels, eram bastantes morosos. Hoje em dia, em poucos segundos, é possível realizar uma inspeção e interpretação completa dos resultados de um determinado objeto [12,13]. Os algoritmos de processamento de imagem são usados para melhorar a qualidade das imagens, excluir ruídos e colocar os dados da respetiva imagem num formato compatível [6].

A Análise de Componentes Principais (ACP), é uma técnica de estatística multivariada de redução de dimensionalidade que permite que os dados mantenham a sua estrutura original. Esta ferramenta transforma um conjunto arbitrário de dados num novo conjunto de componentes não correlacionadas entre si, efetuando apenas uma rotação ortogonal de variáveis e transformando os dados que se encontram num espaço dimensional maior, para dados numa dimensão inferior. É, portanto, uma ferramenta que apresenta utilidade para analisar as relações existentes entre um conjunto de variáveis correlacionadas. Os objetivos desta análise são a extração de informação útil a partir dos dados, a exploração da estrutura dos dados, da relação entre os objetos, a correlação global dos recursos e a identificação de padrões de variabilidade. Uma das características que distingue a ACP de outros métodos é a possibilidade de transformar dados lineares, mas também não lineares e multilineares, que são tipos de dados mais frequentes no dia a dia [37,38].

Segundo Cameron et al. [39] a análise de componentes principais (ACP) é um método que consiste na redução de um conjunto de dados, de variáveis relacionadas entre si, e é definido pela seguinte equação:

$$A = USV^T \quad (2.5)$$

Em que  $A$  é uma matriz de ordem  $n \times m$ ,  $S$  é uma matriz diagonal de ordem  $n \times n$  representativa dos valores singulares da matriz  $A$ ,  $U$  é uma matriz de ordem  $m \times n$  e  $V^T$  é a transposta de uma matriz  $n \times n$  [40], tal como ilustra a Figura 7. Na realidade, o que sucede é a rotação dos eixos do espaço de dados ao longo das linhas onde se verifica a maior variação. A primeira componente principal corresponde ao eixo de variação máxima, representa o conjunto de características que evolui regularmente ao longo do tempo, e o outro eixo que é ortogonal ao anterior e que representa a maior variação seguinte designa-se por segunda componente principal, e assim sucessivamente. Para efeitos de redução da dimensão, as componentes que integram o novo espaço de dados são as primeiras componentes principais [41].

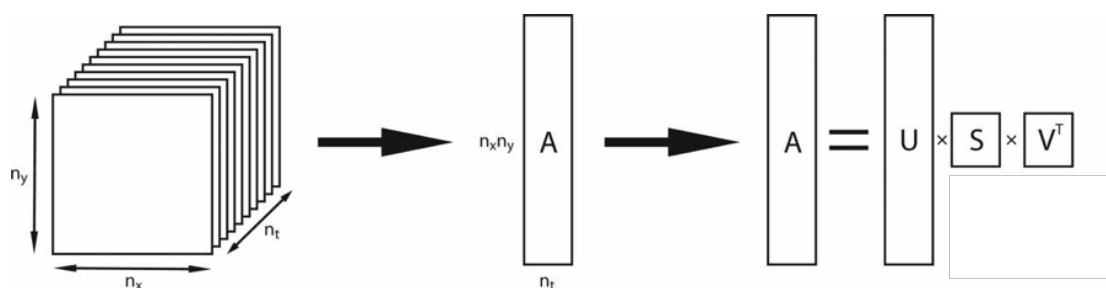


Figura 7 - Processamento de dados através da ACP. A matriz 3D é convertida numa matriz 2D sendo esta posteriormente convertida num produto de três matrizes. A matriz  $V$  contém um conjunto de componentes principais que representam as “tendências de temperatura” [42]

Segundo Mingoti [43] após a obtenção das componentes principais e respetivos valores numéricos também designados por *scores*, é possível analisá-los por intermédio de técnicas estatísticas, como, a análise de variância e análise de regressão. Os *scores* são as novas coordenadas dos pontos, num novo sistema de eixos, definido pelas componentes principais (CPs).

De acordo com Daultrey [44] a análise de componentes principais ponderada, em que cada variável apresenta a mesma ponderação no processamento da ACP, pode ser utilizada quando há uma grande variedade de escalas de medição das variáveis ou quando são notáveis grandes discrepâncias na gama das mesmas.

A aplicação desta técnica tem vindo a crescer em diversas áreas, tais como, no processamento de imagens, em ensaios não destrutivos, no reconhecimento de padrões, entre outras. Tem-se verificado, na mesma proporção, um incremento de trabalhos publicados utilizando este tipo de análise [38].

Com o intuito de avaliar o potencial de uma abordagem quantitativa, utilizando para o efeito a radiação solar para induzir variações de temperatura na superfície, e de métodos quantitativos para análise dos dados resultantes da termografia na deteção de variações de humidade, em revestimentos cerâmicos vidrados, Edis et al. [3] analisaram uma fachada de um edifício, localizado em Lisboa, com problemas de humidade ascendente. A inspeção foi realizada, durante o dia, em intervalos de meia hora e os dados recolhidos da termografia foram examinados recorrendo, entre outros métodos, à análise de componentes principais. Da análise realizada resultaram as seguintes conclusões [3]:



- A análise de componentes principais, tanto a comum como a ponderada, revela-se eficaz na deteção de variações de humidade acima de 36%, visto que das quatro zonas de interesse com problemas de humidade, foi possível identificar a localização do aumento de humidade em três delas;
- A análise quantitativa, através da análise de componentes principais comum, permite suprimir falsos resultados originados pelas reflexões e pela sombra, indicações essas que não poderiam ser eliminadas aquando da inspeção. Contrariamente à ACP comum, a aplicação da ACP ponderada não resulta tão bem, dado que os efeitos da reflexão não são totalmente eliminados.

Segundo Grinzato et al. [4] o objetivo deste algoritmo aplicado ao estudo da humidade é aumentar os pontos onde a temperatura superficial decresce devido à evaporação, mas principalmente definir onde a velocidade de arrefecimento apresenta maior variação. Na Figura 8 é possível observar a melhoria na definição do limite da área húmida, o que vem corroborar ainda mais a ideia de que este algoritmo é eficaz e proporciona um efeito seletivo, uma vez que separa o aumento de evaporação de outras fontes de variação de temperatura [4].

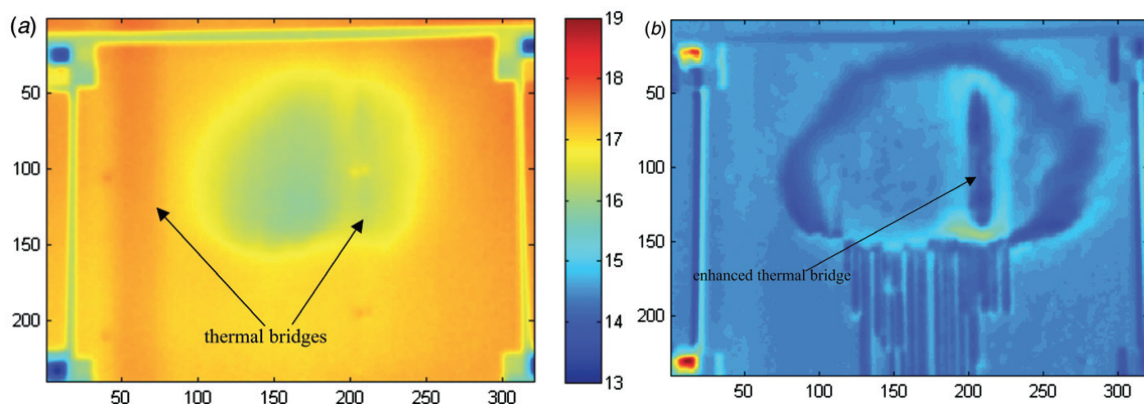


Figura 8 - a) Termograma representativo de uma zona húmida numa parede pré-fabricada; b) Mapa de humidade representativo do ponto de humidade crítica obtido pela terceira componente principal da ACP [4]

No estudo realizado por Gavrilov et al. [42], em que o objetivo era estudar a aplicabilidade da termografia na avaliação de pinturas, os termogramas foram processados utilizando o *Matlab®*, para o qual foi desenvolvido um algoritmo que possibilitou a análise de componentes principais (ACP) e permitiu a manipulação de certas CPs. Após a recolha dos termogramas, o *software* foi ajustado para negligenciar a primeira componente. Com o intuito de aumentar a visibilidade das características da superfície negligenciou-se, nos casos necessários, a segunda componente principal.

De acordo com Santos [38] a aplicação desta técnica, no âmbito da termografia, permite avaliar os gradientes térmicos e as regiões mais críticas de um termograma ao longo do período de medição. Na Figura 9 representa-se esquematicamente uma série de imagens térmicas, que constituem o conjunto de dados, definidas como uma matriz tridimensional. As imagens térmicas obtidas ao longo do ensaio são representadas por  $N$ , e os  $n_x$  e  $n_y$  são respetivamente o *pixel* na posição horizontal e o *pixel* na posição vertical.

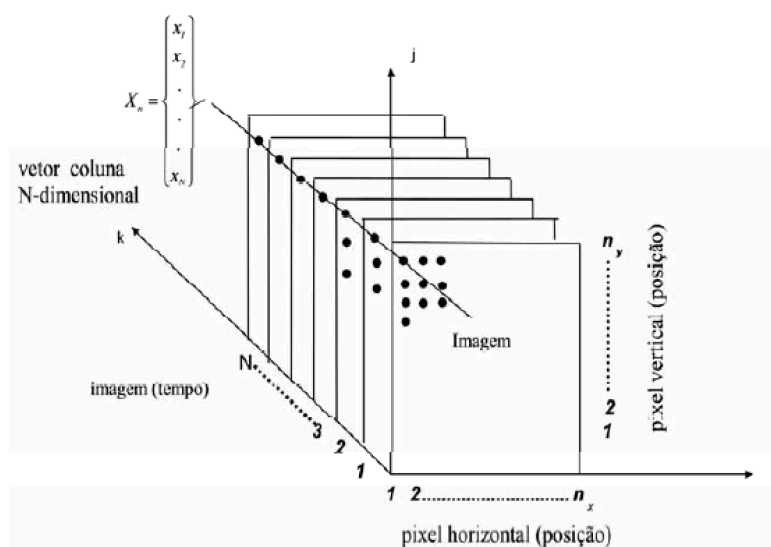


Figura 9 - Sequência de N imagens, cada imagem com  $n_x$  e  $n_y$  elementos [38]

O cálculo das componentes principais (CPs) é antecedido pela criação de uma matriz bidimensional de ordem  $n \times N$ , em que  $n$  representa o número total de *pixels* de cada imagem e  $N$  representa o número de termogramas. A referida matriz  $[X]$ , também denominada espaço de imagens, integra um conjunto de vetores, sendo estes vetores representativos de cada uma das imagens térmicas. Estas imagens de ordem  $n_x$  por  $n_y$  são escritas sob a forma de vetores, onde cada *pixel* é uma coordenada desse vetor [38].

A obtenção das CPs térmicas pressupõe ainda a definição das linhas e das colunas da matriz de dados  $[X]$ , conforme a análise se realize no modo espacial ou no modo temporal. No primeiro caso o conjunto de dados  $[X]$  é composto por  $n$  linhas (número total de *pixels* de uma imagem) e por  $N$  colunas (número de termogramas obtidos no ensaio), em que cada coluna representa um perfil térmico. No modo temporal, a matriz de dados  $[X]$  é a matriz transposta da matriz definida no modo espacial, ou seja, a matriz  $[X]$  é constituída por  $N$  linhas e  $n$  colunas, representando cada coluna um perfil temporal. De uma forma sucinta, a análise das CPs no modo espacial possibilita a identificação da área do termograma que se encontra submetida a variações térmicas. Por outro lado, a análise no modo temporal permite a visualização do perfil térmico dos dados, que pode ser utilizado para estabelecer uma ponte entre o fenómeno físico e a evolução das componentes [38].

Definida a matriz de dados calcula-se o vetor médio que pode ser designado por imagem média, no caso de ser calculado a partir da média aritmética de cada coluna da matriz  $[X]$ , ou perfil temporal médio caso resulte da média aritmética dos valores de cada linha da referida matriz. De ressaltar que se recorre a valores médios pelo facto de haver uma grande redundância no conjunto de dados. A imagem média, definida por um vetor de ordem  $n \times 1$ , possibilita a deteção da evolução da temperatura sob um ponto de vista local, isto é, capta a variabilidade dos dados de um termograma para o outro. Contrariamente à imagem média, no perfil médio temporal, definido por um vetor de ordem  $1 \times N$ , as CPs detetam a variabilidade dentro dos próprios termogramas [38].

Em Santos [38] aplicou-se a análise de CPs num sistema elétrico, com o intuito de identificar as variações térmicas e as tendências de comportamento do sistema. A Figura 10 a) mostra a imagem térmica da componente elétrica obtida em condições reais de ensaio e a Figura 10 b) apresenta o termograma representativo da imagem média, obtida para o modo espacial.

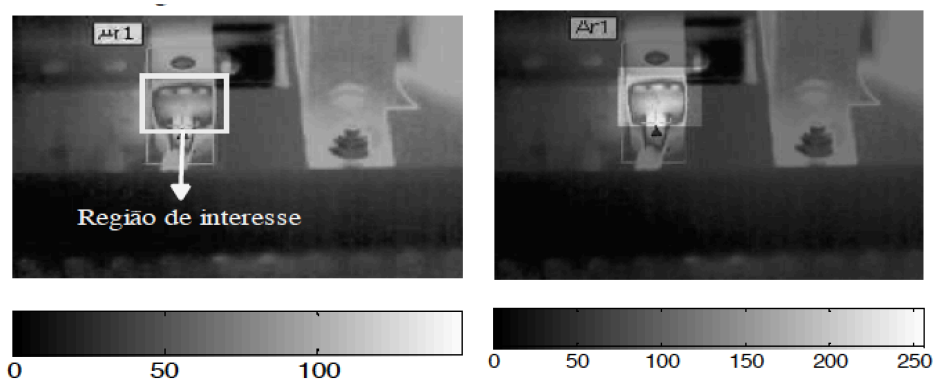


Figura 10 - a) Imagem do sistema elétrico obtida em condições reais de ensaio; b) Imagem média utilizada na análise [38]

Cada componente principal é representada por um vetor da mesma ordem, sendo possível através de um *software* adequado a representação das componentes principais sob a forma de um mapa de cores. Deste modo é possível identificar as áreas que apresentam maiores variações térmicas [38]. Na sequência do trabalho elaborado por Santos [38], apresentam-se na Figura 11 as CPs espaciais obtidas por subtração da imagem média.

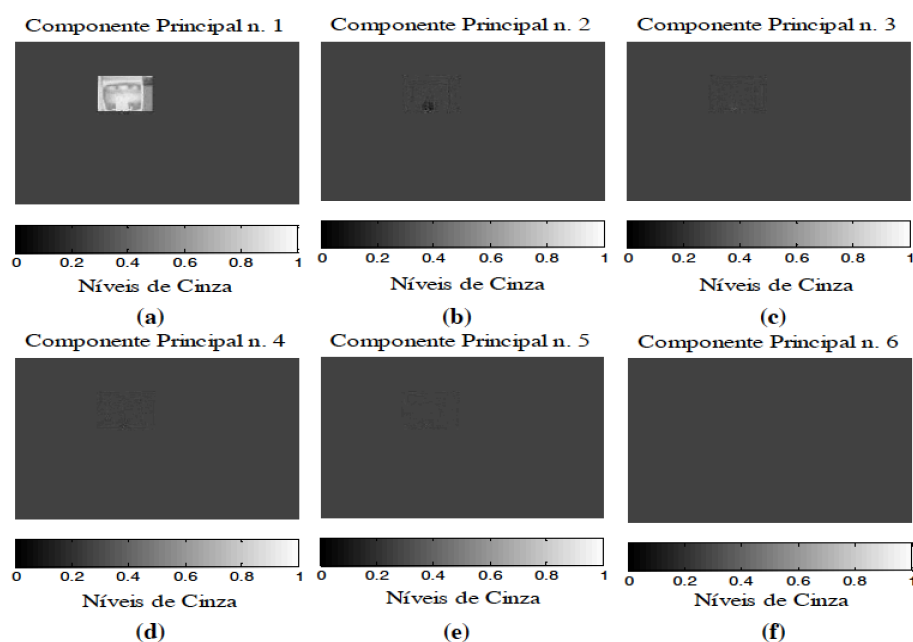


Figura 11 - CPs espaciais obtidas por subtração da imagem média [38]

Santos [38] concluiu, por observação das alterações no valor do brilho dos termogramas, que a maior variabilidade espacial dos dados ocorre na primeira componente principal, detendo a segunda componente principal a segunda maior parcela de variação. As restantes componentes, cujas regiões exibem um fundo preto, indicam que não há qualquer variância de um termograma para o outro.

Complementarmente aos resultados decorrentes da análise anteriormente descrita, foi possível obter um segundo parecer por meio da realização de gráficos de *scores* e *loadings*. Os gráficos mencionados proporcionam uma análise da estrutura de dados definida por agrupamentos dos valores, cujos eixos são CPs nos quais os dados são projetados. Os *scores* correspondem às projeções das amostras na direção das CPs, enquanto os *loadings* são os ângulos entre cada componente principal e cada variável. Estes gráficos podem ser analisados, quer no modo espacial quer no temporal [38,45].

Uma vez que as CPs são ortogonais, é viável estudar as relações entre amostras e variáveis através dos gráficos de *scores* e de *loadings*. A análise destes dois parâmetros permite ainda perceber a influência de cada variável em cada amostra. É importante salientar que quando se pretende observar a estrutura de dados num domínio espacial efetua-se uma análise dos *scores*, enquanto que num domínio temporal a análise recai sobre os *loadings* [38,45].

As vantagens inerentes a este método são vastas, designadamente, a simplificação da visualização de todas as informações contidas nos dados originais, a deteção de variações e de tendências de um conjunto de imagens térmicas, a retenção de grande parte da informação útil a par da redução de ruído e de outros efeitos indesejáveis, o tempo e memória necessários para o processamento de dados são inferiores. É, portanto, uma técnica que permite a compreensão e visualização de estruturas formadas por dados complexos, e auxilia na identificação de novas variáveis relevantes. A Análise de Componentes Principais é uma técnica de estatística multivariada, amplamente utilizada e aceite, que já demonstrou as suas potencialidades em diversas áreas de conhecimento, nomeadamente, engenharia, economia, biologia e química [38,41].

## 3

## METODOLOGIA

**3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA**

O presente capítulo propõe expor a avaliação quantitativa da presença de humidade em elementos construtivos recorrendo à termografia de infravermelhos, mais especificamente, a termografia passiva. Para esse fim foram analisados os termogramas efetuados a provetes de betão leve na fase de embebição pela base por Ferreira [46], que realizou uma abordagem qualitativa, através da observação de padrões térmicos, e quantitativa, utilizando três pontos centrais do provete. Relativamente às condições do ensaio, o provete foi seco em estufa durante 4 dias a 70°C, o arrefecimento realizou-se numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas e a posterior humedificação ocorreu durante um período de 24 horas (T=20°C; HR=60%). A emissividade adotada foi de 0,91. Os termogramas foram obtidos com uma periodicidade de 5 minutos, nas primeiras 8 horas de humedificação, e nas restantes 16 horas com uma periodicidade de 10 minutos.

Para o tratamento quantitativo das imagens térmicas utilizaram-se alguns *softwares*, designadamente, o *InfReC Analyzer*, o *Surfer®* e o *SPSS Statistics*. O *InfReC Analyzer* é um programa que possibilita a reprodução de imagens térmicas e, através da especificação de pontos e caixas, viabiliza uma análise precisa da temperatura em toda e qualquer posição. Recorreu-se a este *software* para a visualização e análise das imagens térmicas, bem como, para a subtração de imagens.

A par deste, utilizou-se o *software Surfer®*, que é um programa que através de algoritmos de interpolação de dados *xyz* permite a obtenção de mapas. Utilizou-se este *software* para representar, através de mapas de contorno, os valores da temperatura na área em estudo, e observar as diferenças de temperatura através da associação de cores. O programa reúne uma série de outras valências, tais como, a atribuição de cores aos valores da escala dos respetivos mapas em função dos valores máximos e mínimos de temperatura e a obtenção de estatísticas básicas dos dados, que no presente trabalho não foram exploradas, assim como, um espetro alargado de opções de personalização de mapas, e outros.

**3.2. PRÉ-SELEÇÃO DE TERMOGRAMAS**

Os ensaios realizados ao provete de betão leve na fase de humedificação pela base resultaram em 193 termogramas. Visto que as imagens térmicas foram obtidas com intervalos de tempo muito curtos entre cada uma delas, a informação passível de se extrair de cada termograma é, em alguns casos, muito semelhante, tal como ilustra a Figura 12. Os termogramas apresentados foram obtidos com uma diferença de aproximadamente 60 minutos e, tal como se pode observar, não há diferenças significativas entre as duas imagens térmicas.

Esta similaridade entre termogramas conduziu à adoção de critérios matemáticos e qualitativos, por forma a limitar a análise apenas ao conjunto de termogramas mais relevante.

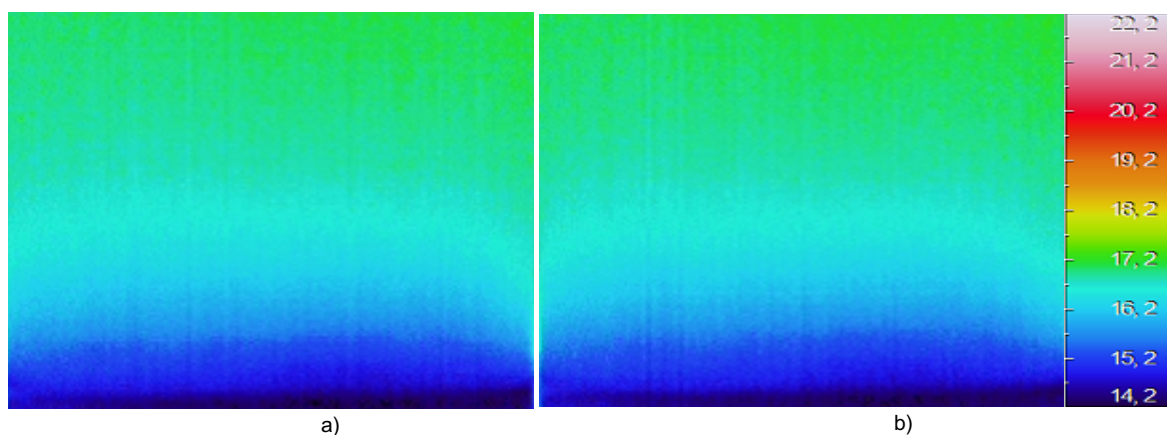


Figura 12 - a) Termograma obtido pelo *InfReC Analyzer* ao fim de 15h55; b) Termograma obtido pelo *InfReC Analyzer* ao fim de 16h45

A seleção das imagens térmicas resultou da ação conjunta de duas ferramentas, designadamente, o *InfReC Analyzer* e o *Microsoft Excel*®. Numa primeira fase recorreu-se ao *InfReC Analyzer* para criar uma única caixa envolvendo o provete (Figura 13), para os 193 termogramas. Tal como se observa nesta figura a área de interesse corresponde à região delimitada pela caixa, uma vez que as restantes temperaturas, exteriores ao provete, resultam da envolvente e, como tal, não são relevantes para o estudo em questão.

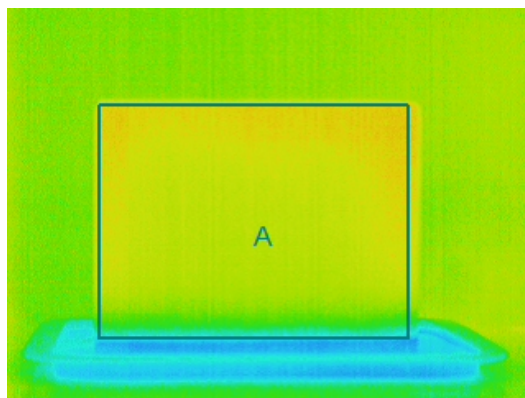


Figura 13 - Termograma ilustrativo da caixa a envolver o provete

De seguida, procedeu-se à exportação da matriz de temperaturas, de cada um dos termogramas, diretamente do *InfReC Analyzer* para o *Microsoft Excel*®. Os valores das matrizes de temperaturas de cada termograma foram dispostos por colunas sob a forma de vetores, representando cada coluna os diferentes termogramas. À matriz de valores resultante aplicou-se o teste *t-student*, que consiste em comparar as temperaturas entre dois termogramas de forma emparelhada. Assim a temperatura média de um determinado termograma é comparada com a temperatura média do termograma precedente, por forma a verificar se são estatisticamente diferentes ou não.

Ao ser aplicado o teste  $t$  para um nível de significância de 5%, constatou-se que quase todas as temperaturas dos termogramas eram diferentes entre si. Uma vez que era incomportável analisar a totalidade das imagens térmicas, utilizou-se como critério o valor de  $t$  do referido teste, cuja expressão se apresenta na equação 3.1.

$$t = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\frac{\sqrt{s_i^2 + s_j^2}}{\sqrt{n}}} \quad (3.1)$$

Em que:

$x_i$  – Temperatura média do termograma  $i$ ;

$x_j$  – Temperatura média do termograma  $j$ ;

$s_i$  – Desvio padrão da temperatura do termograma  $i$ ;

$s_j$  – Desvio padrão da temperatura do termograma  $j$ ;

$n$  – Tamanho da amostra;

Após este tratamento inicial, e tendo como objetivo a redução do número de termogramas para cerca de 20, a metodologia adotada teve por base as seguintes fases sequenciais:

- 1ª eliminação: A análise incidiu sobre a matriz de temperaturas, exportada diretamente do *InfrReC Analyzer*, obtida a partir da caixa envolvente do provete, para os 193 termogramas. Esta primeira seleção teve como objetivo o estabelecimento de prioridades através da eliminação de algumas imagens térmicas por aplicação dos testes estatísticos já enunciados. De notar que se definiu como critério de exclusão um dos termogramas do par com valores de  $t$  superiores a 20. Esta eliminação possibilitou a obtenção de 58 termogramas diferentes entre si, o que constituiu uma redução significativa face ao número inicial, contudo, não foi um resultado considerado satisfatório;
- 2ª eliminação: Visto que a primeira eliminação não atingiu o objetivo inicialmente estabelecido, adotou-se uma abordagem mais incisiva. A análise recaiu somente nos termogramas resultantes da primeira eliminação, no entanto, substituiu-se a caixa a envolver todo o provete por nove caixas, mais pequenas e de igual dimensão posicionadas de igual forma na base, no nível intermédio e no topo do provete, tal como representado na Figura 14. De notar que, o critério de eliminação foi o mesmo valor de  $t$  fixado na primeira eliminação, superior a 20 para todas as caixas, entre termogramas. Concluída a segunda fase de eliminação obtiveram-se 48 termogramas para as caixas localizadas no meio e no topo do provete e cerca de 5 para as caixas localizadas na base, entenda-se, a região mais crítica.

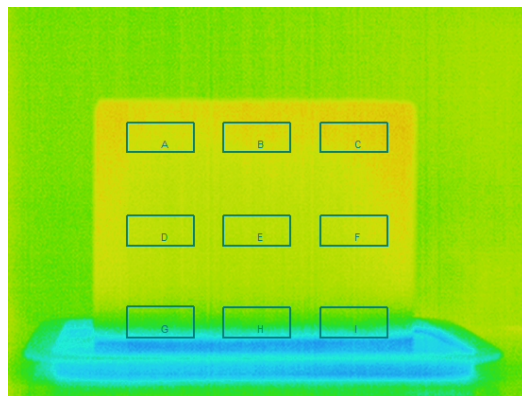


Figura 14 - Termograma ilustrativo das nove caixas definidas no provete

Avaliando os resultados decorrentes da segunda eliminação é evidente a grande discrepância entre o número de termogramas obtidos para as caixas, G, H e I e para as restantes. Uma vez que a fase de embebição pela base é o objeto de estudo do presente trabalho, as caixas que se encontram na base são as que suscitam maior interesse e as que requerem uma análise mais aprofundada. Neste sentido, e tendo como foco obter cerca de 20 termogramas para a análise quantitativa da embebição, aplicou-se o teste  $t$  às 58 imagens térmicas resultantes da primeira seleção, mas tendo apenas como foco as caixas respeitantes à base do provete. De modo a obter um número mais próximo do objetivo, definiu-se como critério valores de  $t$  superiores a 10 ao invés de 20 para as caixas inferiores, mantendo-se para as caixas superiores o mesmo critério aplicado anteriormente. Ao reduzir o valor de  $t$  obteve-se um número consideravelmente maior de termogramas, comparativamente ao obtido anteriormente. Tendo somente em consideração as caixas G, H e I, a aplicação do teste estatístico com o critério fixado permitiu a obtenção de 28 termogramas, que constitui um número bastante satisfatório, ainda que relativamente longe do pretendido;

- 3ª eliminação: Como a aplicação de testes estatísticos já não seria suficiente para conduzir à meta estabelecida, optou-se por outro tipo de abordagem mais qualitativa. Após uma cuidada observação de cada um dos 28 termogramas obtidos no fim da 2ª eliminação, e tendo em linha de conta o instante de tempo em que cada um foi obtido, definiram-se intervalos de tempo com o intuito de reduzir o número de imagens térmicas.

Na impossibilidade de definir intervalos de tempo de igual amplitude, observaram-se atentamente cada uma das imagens térmicas. Foi possível concluir que os primeiros termogramas são distintos uns dos outros, pois verifica-se uma considerável evolução da frente húmida durante a primeira meia hora, ou seja, é perceptível a variação de temperatura de um provete que se encontra totalmente seco e as alterações que sucederam após embebição do mesmo pela base. Analisando os termogramas seguintes até ao último, que se encontra no estado máximo de humificação, foi possível concluir que as alterações significativas ocorrem em intervalos de tempo bastante espaçados.

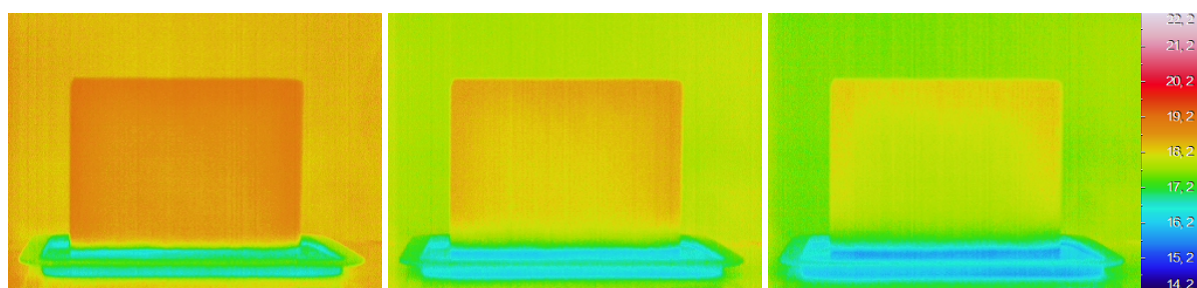
É de ressaltar que alguns dos termogramas selecionados para os intervalos de tempo definidos não coincidem com os termogramas selecionados por aplicação do teste  $t$ -student, e, por essa razão, associaram-se as imagens térmicas aos respetivos intervalos de tempo fixados.



Recorrendo ao teste *t-student*, para valores de *t* inferiores a 10, verificou-se se os termogramas, inerentes ao intervalo de tempo definido eram semelhantes ou diferentes face aos termogramas inicialmente seleccionados. Dessa análise, e atendendo ao facto de as imagens térmicas terem sido obtidas num período de 24 horas, resultaram os 23 termogramas presentes na Tabela 2, caracterizados pelo respetivo código e instante de tempo (representados na Figura 15).

Tabela 2 - Código e hora inerentes aos termogramas seleccionados

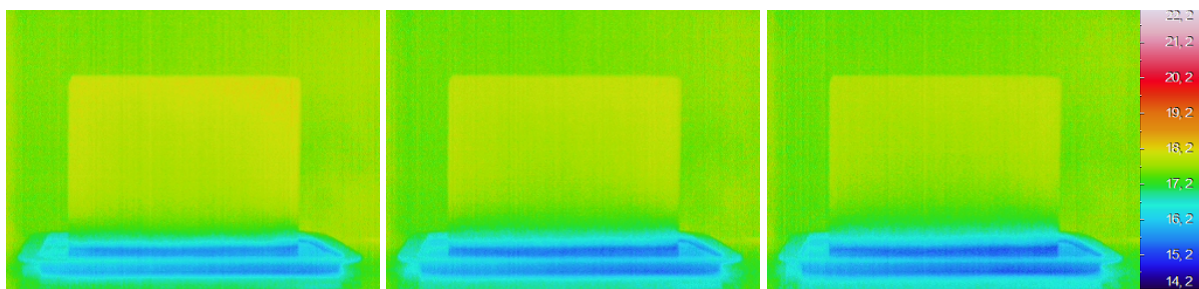
<b>Código</b>	<b>Hora</b>	<b>Código</b>	<b>Hora</b>
T001	00h00	T052	04h00
T002	00h05	T062	05h00
T003	00h10	T074	06h00
T004	00h15	T086	07h00
T005	00h20	T098	08h00
T006	00h25	T104	09h00
T007	00h30	T122	12h00
T013	00h60	T140	15h00
T019	01h30	T158	18h00
T024	02h00	T176	21h00
T030	02h30	T192	24h00
T037	03h00		



T001

T002

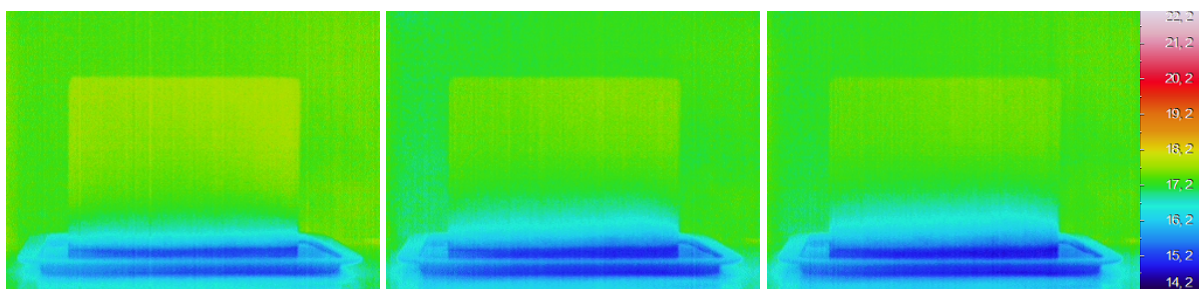
T003



T004

T005

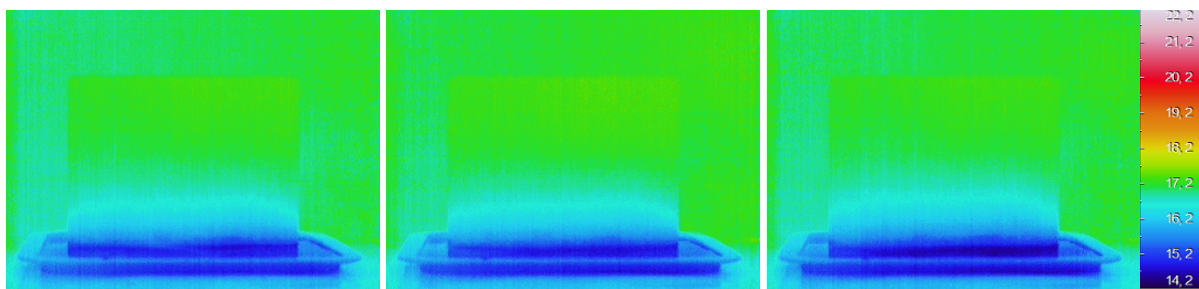
T006



T007

T013

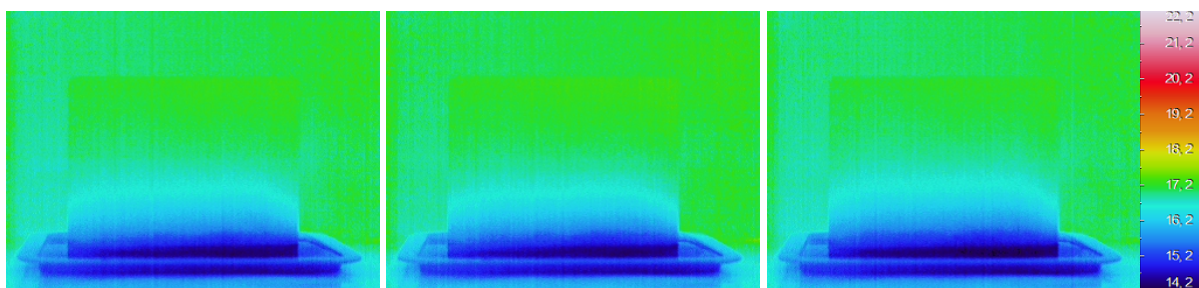
T019



T024

T030

T037



T052

T062

T074

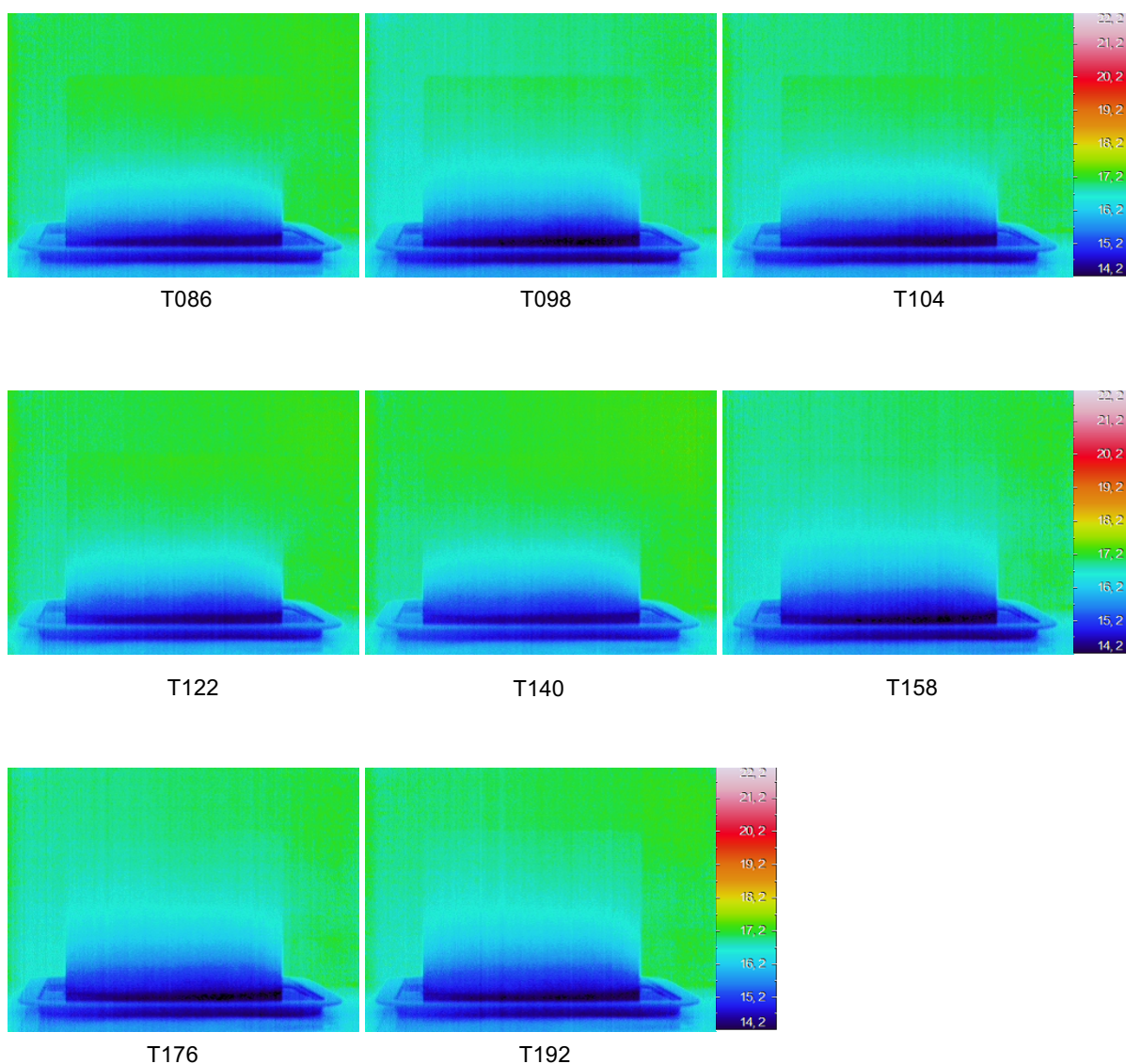


Figura 15 - Termogramas selecionados para a análise quantitativa nos diferentes instantes de tempo. Imagens térmicas obtidas a partir do *InfReC Analyzer*

### 3.3. TRATAMENTO COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS

Para destacar as variações ocorridas entre períodos de medição recorreu-se ao método da subtração de imagens. Tal como enunciado no capítulo 2 da presente dissertação, este método pode aplicar-se a um determinado termograma de referência ou subtraindo um determinado termograma ao precedente.

O primeiro passo para a concretização da subtração utilizando um termograma de referência reside na escolha do mesmo. Neste sentido, analisou-se cuidadosamente cada um dos termogramas obtidos na primeira meia hora, partindo do termograma mais seco, entenda-se o termograma T001. Considerando a Figura 16 é possível concluir que, do ponto de vista qualitativo, os termogramas T001, T002 e T003 apresentam uma temperatura bastante díspar entre si, uma vez que no início do ensaio a temperatura da superfície era superior à temperatura ambiente, isto é, a discrepância que se observa não advém da presença de humidade, mas sim do desajuste de temperatura entre o provete e a ambiência. Por esta razão, rejeitaram-se de imediato os três primeiros termogramas.



Comparando as restantes imagens térmicas verifica-se que há uma considerável redução de temperatura do termograma T003 para o T004 face à diferença entre os outros. Analisando os termogramas T004, T005 e T006 não é evidente uma acentuada variação de temperatura nem na parte superior nem na parte inferior do provete e, como tal, elegeu-se o T004 como termograma de referência.

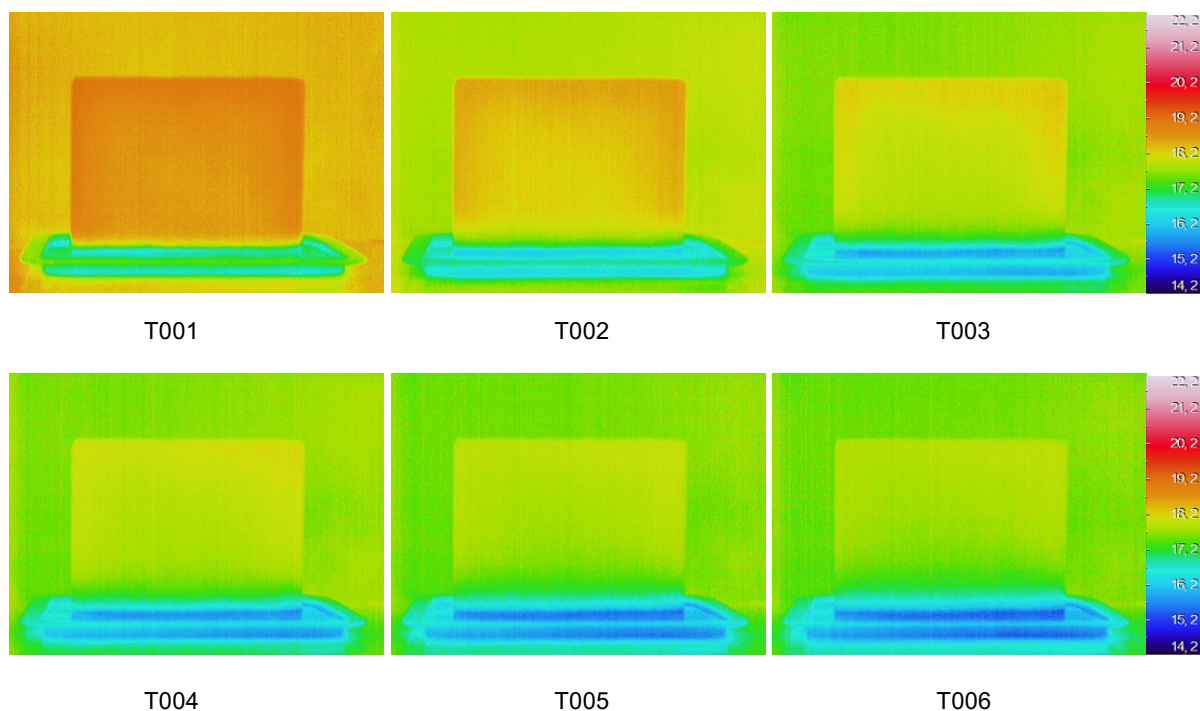


Figura 16 - Termogramas analisados para seleção do termograma de referência. Imagens obtidas pelo *InfReC Analyzer*

Para efetuar a subtração de imagens de cada um dos 23 termogramas recorreu-se ao programa *InfReC Analyzer*. Este *software* contém um comando que permite definir o termograma de referência e selecionar os restantes, realizando de forma rápida e eficaz a subtração. Como resultado único obteve-se um termograma representativo das variações entre as imagens térmicas em questão. Finalizada a subtração, definiu-se a caixa a envolver o provete do termograma obtido e exportou-se o conjunto de dados da área definida diretamente para o *Microsoft Excel*®. Para avaliar o procedimento de subtração realizado pelo *InfReC Analyzer*, efetuou-se a subtração recorrendo ao *Microsoft Excel*®, exportando a matriz de temperaturas de dois termogramas, o de referência e outro ao longo do processo de humificação. Os resultados obtidos foram totalmente coincidentes com os obtidos por intermédio do *InfReC Analyzer*.

A par dos programas referenciados utilizou-se também o *Surfer*® com o intuito de criar mapas de cores representativos da subtração. Para o efeito importaram-se as folhas de cálculo relativas a cada uma das subtrações com as coordenadas  $x$  e  $y$  e as respetivas temperaturas. Através deste conjunto de dados criaram-se mapas de contorno, que permitiram a distinção de padrões e tendências através da associação de um espetro de cores aos valores da escala dos respetivos mapas, em função das temperaturas máxima e mínima da totalidade das imagens térmicas. O tratamento descrito aplicou-se tanto à subtração utilizando um termograma de referência como utilizando o termograma precedente.

### 3.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DESCRITIVO

A grande quantidade de informação acoplada a cada imagem térmica e a necessidade de avaliar como se processam as variações de temperatura ao longo do tempo foram os fatores potenciadores da realização desta análise. O tratamento estatístico descritivo assentou num conjunto de tabelas, caracterizadoras de cada uma das imagens térmicas e cuja análise incidiu sobre o provete total e separadamente sobre as nove caixas. As medidas estatísticas descritivas avaliadas nesta análise foram a média, a mediana, o desvio padrão, o máximo e mínimo das temperaturas verificadas em cada um dos termogramas e o coeficiente de assimetria com o intuito de perceber a forma como se distribuem os valores.

Complementarmente a esta análise descritiva efetuaram-se algumas representações gráficas, tais como, histogramas e *boxplots*, com o propósito de representar e avaliar a distribuição da temperatura, bem como, comparar visualmente a variabilidade da temperatura entre termogramas ao nível da base, do meio e do topo de cada um dos provetes. Para a concretização deste tratamento, recorreu-se à folha de cálculo do *Microsoft Excel®* e ao *InfReC Analyzer*, através do qual se exportaram as matrizes de temperatura respeitantes ao provete e às nove caixas, diretamente para a folha de cálculo.

### 3.5. TRATAMENTO COM BASE EM ÍNDICES

Para uma melhor compreensão das heterogeneidades térmicas verificadas ao longo do processo de humidificação, propuseram-se dois índices térmicos. Numa fase inicial propôs-se um índice térmico que representa uma taxa de variação da temperatura superficial. O referido índice expressa a diferença de temperaturas superficiais médias entre o termograma mais seco e cada um dos restantes termogramas ao longo do tempo a dividir pela diferença das temperaturas superficiais médias do termograma mais seco e do termograma mais molhado. Pode ser definido pelo seguinte rácio:

$$IT_1 = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_f} \quad (3.2)$$

Em que:

$T_0$  - Temperatura superficial média do termograma mais seco, ao qual correspondem as temperaturas mais elevadas, que para o estudo em questão corresponde ao T004;

$T_i$  - Temperatura superficial média do termograma a testar;

$T_f$  - Temperatura superficial média do termograma mais molhado, ao qual correspondem as temperaturas mais baixas, que para o estudo em questão corresponde ao T176;

Ao avaliar os resultados decorrentes do  $IT_1$  presentes no capítulo 4, verificou-se que era difícil distinguir o efeito da água principalmente no início e, como tal, sugeriu-se um segundo índice para suprimir o ajuste da temperatura do provete face à temperatura ambiente. O índice térmico, relativo à caixa E, caixa central do nível intermédio do provete, pode ser expresso da seguinte forma:

$$IT_2 = \frac{(T_i - T_0)_E - (T_i - T_0)_B}{(T_f - T_0)_E} \quad (3.3)$$

Para a caixa localizada na base do provete, caixa H, o índice é definido da seguinte forma:

$$IT_2 = \frac{(T_i - T_0)_H - (T_i - T_0)_B}{(T_f - T_0)_H} \quad (3.4)$$

Em que o numerador traduz o efeito do arrefecimento pela água, retirando o efeito do arrefecimento por ajuste à temperatura ambiente, e o denominador traduz o arrefecimento global da caixa.

É importante notar que a aplicação deste índice se cingiu somente às caixas B, E e H, localizadas respetivamente no topo, no meio e na base do provete, numa posição intermédia. A escolha destas caixas teve por base a sua localização e, por conseguinte, uma melhor análise do comportamento das mesmas ao longo do período de embebição.

Contrariamente ao que seria de prever, uma vez que o nível de água vai crescendo ao longo do tempo, verificou-se que o valor mínimo registado para as diferentes temperaturas correspondeu ao termograma T176 e não ao T192. Esta discrepância pode ser explicada pela influência das condições ambientais e do próprio aparelho na medição. Apesar da diferença ser pouco relevante, utilizou-se para efeitos de cálculo dos índices térmicos  $IT_1$  e  $IT_2$  o termograma T176, obtido ao fim de 21 horas, correspondente ao parâmetro  $T_f$ .

### 3.6. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

O elevado número de termogramas obtidos e a grande quantidade de informação acoplada a cada um deles foram os fatores que motivaram a realização desta análise. De acordo com o mencionado no capítulo anterior, a análise de componentes principais tem como principal finalidade a análise de um conjunto de dados, visando a sua redução e supressão de sobreposições de forma a obter formas representativas de determinado conjunto de dados em que se verifica uma grande correlação entre variáveis.

Tal como referenciado anteriormente, a análise de CPs pode ser efetuada no modo espacial e/ou no modo temporal. Por falta de tempo, realizou-se a análise somente no modo espacial, com vista a detetar e localizar a região do termograma com maiores alterações térmicas.

Foram objeto de análise não só os 193 termogramas iniciais, mas também os 23 termogramas resultantes da pré-seleção realizada antes da aplicação de qualquer uma das outras metodologias para a análise quantitativa. Excluem-se deste estudo os três primeiros termogramas (T001, T002, T003) porque apresentavam uma grande diferença entre as temperaturas superficiais na zona não molhada e a ambiência, e o T004, termograma de referência, que foi utilizado em substituição do vetor médio na obtenção das CPs. De facto, tendo em consideração a aplicação da ACP, o vetor médio, também designado por imagem média, é composto pela média aritmética dos valores de cada coluna da matriz  $[X]$ . No entanto, neste trabalho, utilizaram-se os valores relativos ao termograma T004, utilizado para efeitos de subtração de imagens, já que no âmbito e objetivos deste estudo, é mais adequado utilizar esse termograma de referência do que valores médios. Assim, as colunas da matriz  $[X]$  serão as variáveis de estudo, às quais será aplicada a metodologia de análise de componentes principais. Para tal, inicialmente é calculada a matriz de covariâncias entre as variáveis em estudo, matriz  $[C]$ .

Pelo coeficiente de correlação linear,  $r$ , expresso pelo quociente entre a covariância entre duas variáveis  $x$  e  $y$  e o produto do desvio padrão de  $x$  pelo desvio padrão de  $y$ , é possível constatar a forte correlação entre as variáveis aleatórias em estudo (diferença de termogramas).

Quanto mais o valor absoluto do coeficiente de correlação linear se aproximar de 1 mais forte é a correlação linear entre variáveis.

Definiu-se como critério para o número de CPs extraído, as componentes com correspondentes valores próprios da matriz  $C$  superiores à unidade.

De ressaltar que a área do termograma analisada foi unicamente a área delimitada pela caixa que envolve o provete. Precisamente a mesma área analisada nos outros tipos de tratamento.

Os passos realizados para obtenção das CPs espaciais por subtração da imagem T004 foram:

- Definição da matriz de dados  $[X]$  de ordem  $nxN$ , em que  $n$  representa o número total de *pixels* de uma imagem, e  $N$  é o número de termogramas. Numa primeira fase  $N$  igual a 189 (T005 até T193), numa segunda fase  $N$  igual a 19 (T005, T006, T007, T013, T019, T024, T030, T037, T052, T062, T074, T086, T098, T104, T122, T140, T158, T176, T192);
- Definição do vetor representativo das temperaturas do T004 para o total de *pixels* do provete;
- Subtração da imagem T004 (vetor de  $nx1$  elementos) à matriz de dados;
- Obtenção das CPs através do *software SPSS Statistics*.

O procedimento utilizado para obter as componentes principais espaciais por subtração do perfil temporal médio foi essencialmente o mesmo, com a diferença que o vetor médio foi obtido a partir da média aritmética dos valores de cada linha (vetor de ordem  $1xN$  elementos), isto é, de cada termograma, de forma a que todas as imagens térmicas variassem em torno dessa média.





# 4

## APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

### 4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

No presente capítulo apresentam-se os resultados das diferentes análises quantitativas efetuadas aos termogramas. Os principais objetivos da realização desta análise são verificar se é possível efetuar uma avaliação quantitativa aos resultados da termografia aplicada ao estudo da humidade, definindo as áreas afetadas pela humidade, avaliando a evolução da frente húmida de cada provete ao longo do tempo e indicando quais os pontos que apresentam maior variação de temperatura. Complementarmente a estas análises, explorou-se algumas das potencialidades do *InfReC Analyzer* e do *Surfer®* com o intuito de perceber se as imagens térmicas, fornecidas pelos dois programas, são idênticas ou não.

### 4.2. COMPARAÇÃO DE IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS PELO *INFREC ANALYZER* E PELO *SURFER®*

O *software Surfer®* permite a criação de mapas de cores representativos das temperaturas do provete nas diferentes fases da embebição ou das temperaturas resultantes da subtração de imagens, a partir das matrizes de temperatura. Para avaliar o funcionamento do *InfReC Analyzer* considerou-se importante comparar as imagens térmicas obtidas através de cada um dos referidos programas. Neste sentido, e tendo em consideração que o *Surfer®* permite a atribuição de cores aos valores da escala do mapa, reduziu-se a escala de 256 cores do *InfReC Analyzer* às 8 cores básicas para ser possível definir no *Surfer®* uma escala de cores semelhante. Como não foi possível definir o padrão RGB das cores diretamente a partir do *InfReC Analyzer* compararam-se as 8 cores do *InfReC Analyzer* com as cores do *Microsoft Word* para definir a mesma escala de cores para o *Surfer®*. Deste modo, foi possível a obtenção de imagens térmicas comparáveis entre si. Na Figura 17 e na Figura 18 apresentam-se respetivamente as imagens obtidas por intermédio do *InfReC Analyzer* e pelo *Surfer®* em diferentes períodos de medição.

Compararam-se os termogramas T004, T052 e T192 que correspondem respetivamente ao provete praticamente seco, o provete já com alguma humidificação e, por último, o provete molhado, aquele que revela maior grau de humidade. De ressaltar que esta análise só incidiu nos 3 termogramas indicados, uma vez que o pretendido não é um estudo exaustivo de cada uma das imagens térmicas obtidas, mas sim compreender de que forma estas variam em diferentes intervalos de tempo.

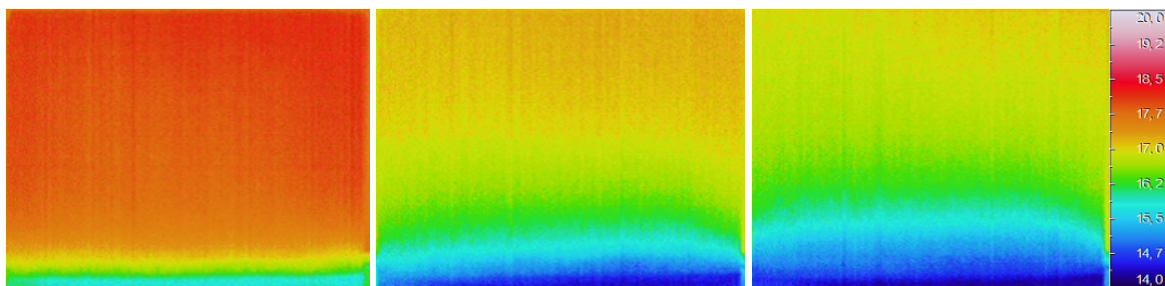


Figura 17 – Imagens térmicas T004, T052 e T192 obtidas a partir do *InfReC Analyzer*

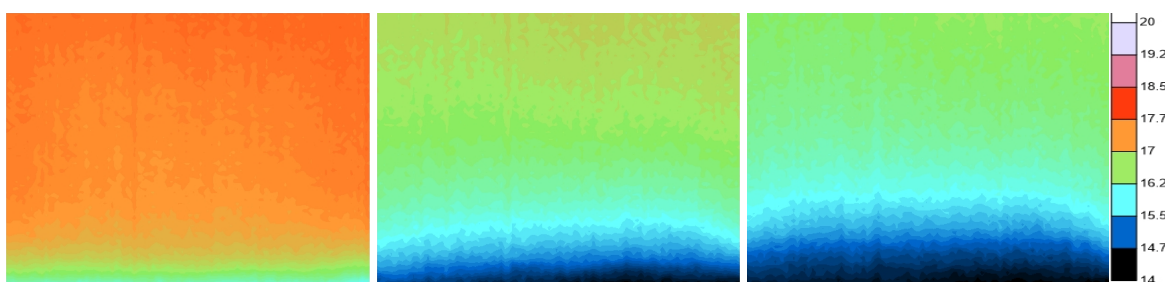


Figura 18 – Mapas de cores T004, T052 e T192 obtidos a partir do *Surfer®*

Ao observar as figuras foi possível estabelecer um paralelismo entre as imagens térmicas obtidas pelos dois programas em questão. De facto, a imagem que o *Surfer®* devolve é análoga à obtida pelo *InfReC*. Relativamente à evolução da temperatura dos provetes é perceptível um crescimento da mancha fria ao longo das 24 horas, sendo o nível de água representado no T192, o nível máximo de humidificação atingido. Observando particularmente o avanço do nível de água do T004 para o T052, é evidente uma grande diferença nas temperaturas na parte superior do provete, que é justificada pela ausência de equilíbrio térmico com a temperatura ambiente do provete seco. Nas restantes horas verificou-se uma diminuição gradual da temperatura.

No que concerne às escalas utilizadas é importante frisar que se reduziu a escala, no *InfReC Analyzer*, de 256 cores para 8 cores somente para obter uma escala semelhante no *Surfer®*, dado que a escala efetivamente adotada, no primeiro programa, foi a de 256 cores. A aplicação de escalas diferentes prendeu-se com o facto de o *Surfer®* fazer interpolações e, portanto, gradação das 8 cores definidas para a escala, o que não acontece com o *InfReC Analyzer*. Pelas razões enunciadas, no *Surfer®* utilizou-se uma escala com as 8 cores básicas, e no *InfReC Analyzer* uma escala com 256 cores.

### 4.3. TRATAMENTO COM BASE NA SUBTRAÇÃO DE IMAGENS

#### 4.3.1. SUBTRAÇÃO AO TERMOGRAMA PRECEDENTE

Tal como enunciado no capítulo anterior, este método consistiu na subtração de um determinado termograma ao termograma precedente e foi executado para as 23 imagens térmicas consideradas relevantes. Apesar dos mapas de cores, obtidos através do *Surfer®*, proporcionarem uma melhor compreensão dos padrões térmicos e originarem imagens mais nítidas, representam-se na Figura 19 e na Figura 20, as imagens térmicas fornecidas pelos diferentes programas, a título comparativo, até porque já se demonstrou anteriormente que as imagens obtidas pelos dois *softwares* são semelhantes.

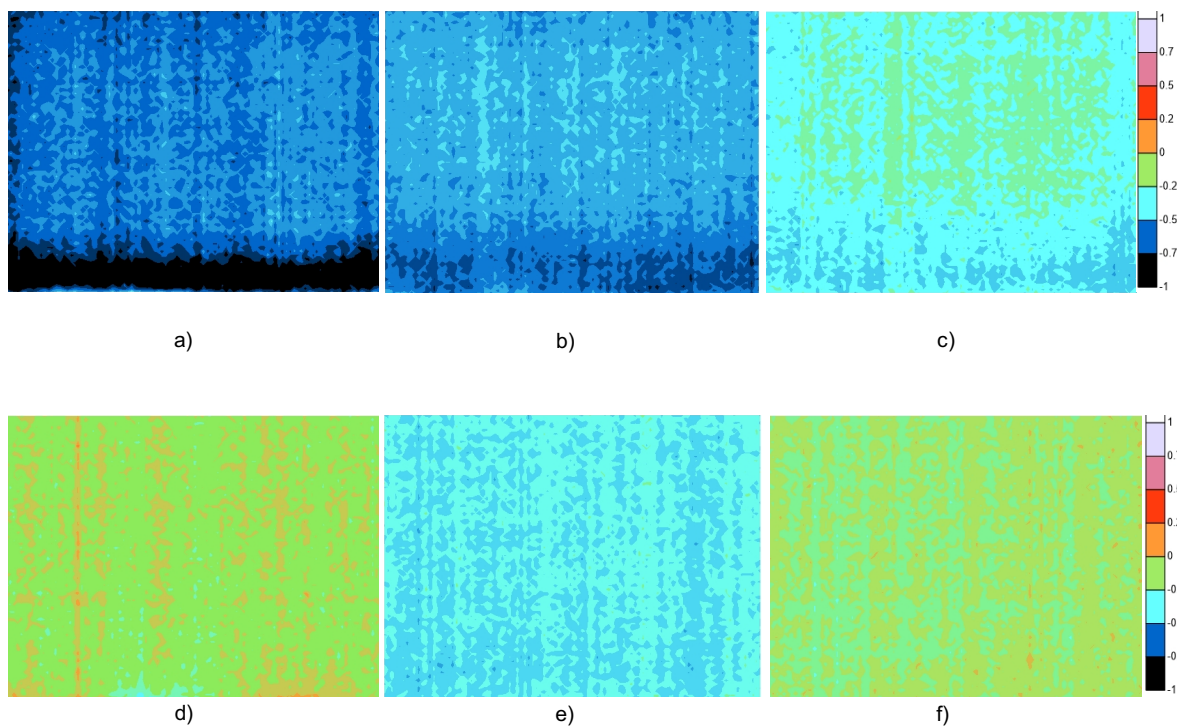


Figura 19 - Mapas de Cores, obtidos pelo *Surfer®*, representativos da subtração entre dois termogramas; a) T002-T001; b) T003-T002; c) T004-T003; d) T030-T024; e) T098-T086; f) T192-T176

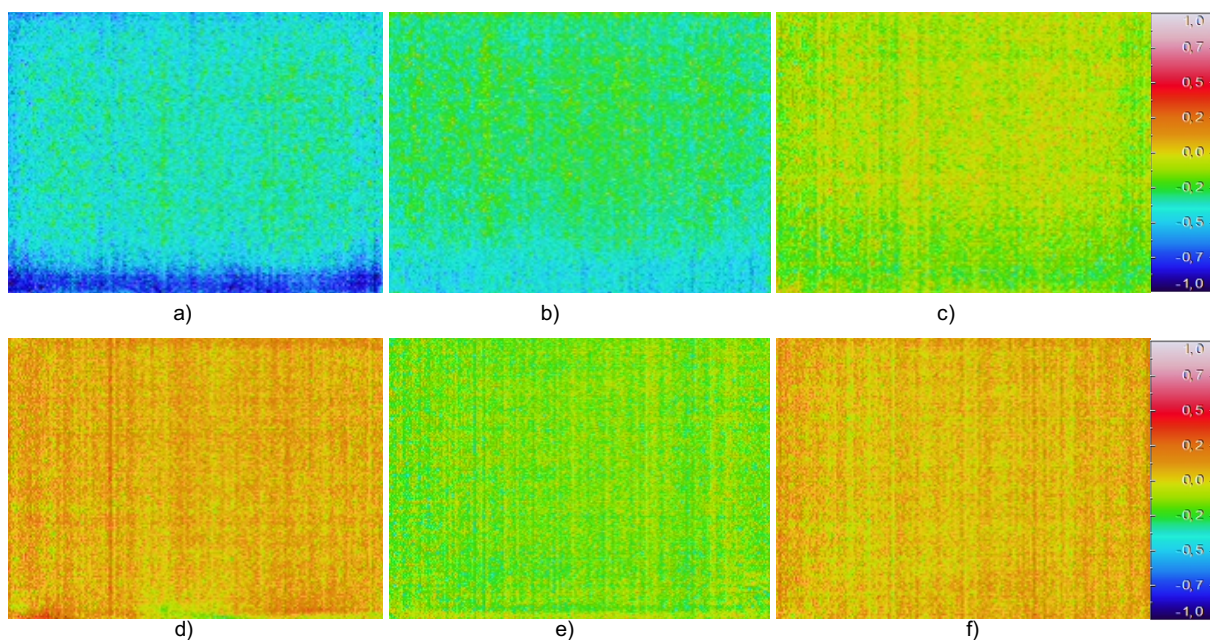


Figura 20 - Imagens térmicas, obtidas pelo *InfReC Analyzer*, representativas da subtração entre dois termogramas; a) T002-T001; b) T003-T002; c) T004-T003; d) T030-T024; e) T098-T086; f) T192-T176

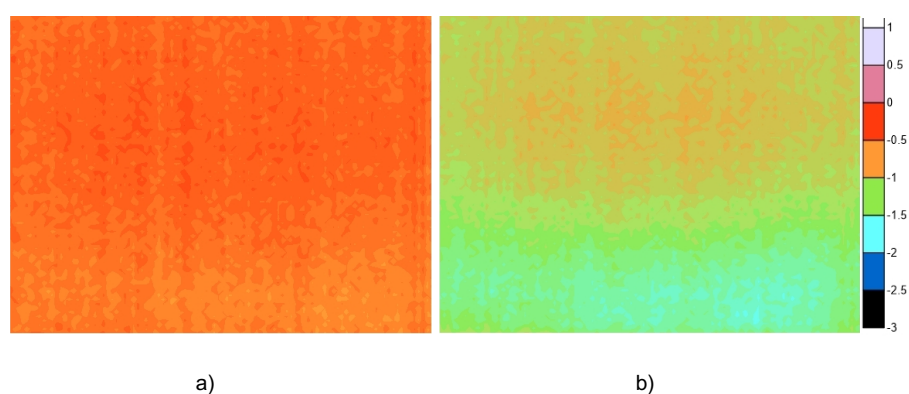
Ao observar o conjunto de imagens térmicas, verificou-se que nos três primeiros termogramas a diferença face aos restantes é bastante perceptível, todavia, não são alvo de estudo devido ao desajuste de temperaturas entre o provete e a ambiência.

Relativamente aos restantes mapas é nítida a diferença de cores entre si, na Figura 19d) a maioria das temperaturas oscilam entre  $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $0,2^{\circ}\text{C}$ , na Figura 19e) a temperatura decresce como seria previsível porque a frente húmida está a aumentar, prevalecendo temperaturas entre  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-0,2^{\circ}\text{C}$ . No entanto, contrariamente ao que seria expectável, ocorre um ligeiro aumento de temperatura na última imagem térmica.

Após uma cuidada interpretação dos mapas de cores resultantes da aplicação deste método, foi possível notar que este tipo de tratamento não é muito eficaz para avaliar quantitativamente os resultados associados à termografia de infravermelhos. Estes resultados refletem sobretudo a importância das condições ambientais durante a medição. A diferença das temperaturas é tão reduzida que poderá resultar do ruído existente. O ruído é um fator que influencia consideravelmente as medições, e que depende fundamentalmente do funcionamento da câmara e das reflexões da envolvente, contudo, aquando da realização do ensaio, as reflexões seriam as mesmas dado que a câmara climática se encontrava fechada e não houve alteração da envolvente nem dos operadores. A ventilação da própria câmara climática poderá, contudo, constituir um fator suscetível de provocar perturbações nas medições.

#### 4.3.2. SUBTRAÇÃO AO TERMOGRAMA DE REFERÊNCIA

O procedimento associado a este método é semelhante ao aplicado anteriormente, excetuando o termograma ao qual se subtraem todos os outros, que é denominado por termograma de referência. Pelas razões explicitadas no capítulo anterior o termograma padrão é o T004. Na Figura 21 e na Figura 22 apresentam-se as imagens térmicas, resultantes das diversas subtrações, das quais se excluíram as subtrações aplicadas aos primeiros termogramas pelos motivos supracitados.





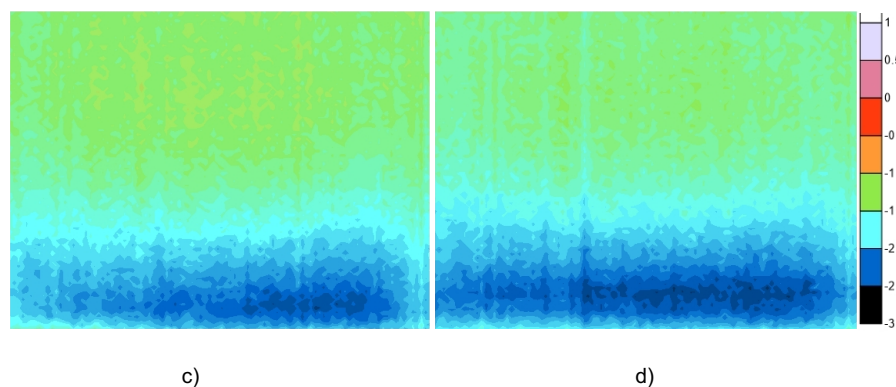


Figura 21 - Mapas de Cores, obtidos pelo *Surfer®*, representativos da subtração ao termograma de referência; a) T006-T004; b) T030-T004; c) T098-T004; d) T192-T004

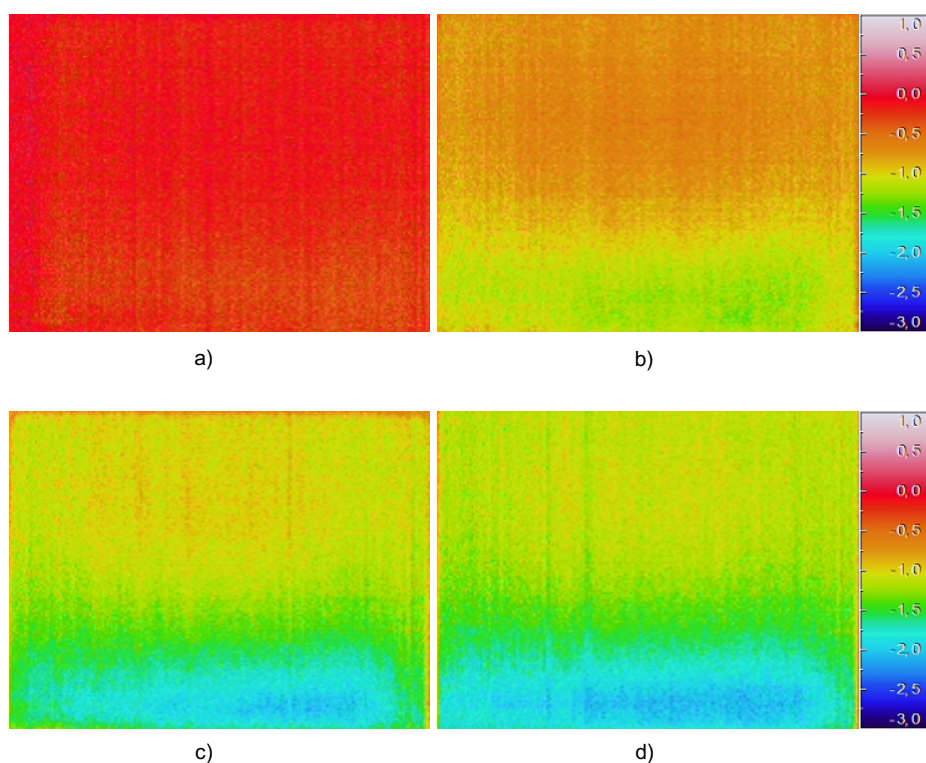


Figura 22- Imagens térmicas, obtidas pelo *InfReC Analyzer*, representativas da subtração ao termograma de referência; a) T006-T004; b) T030-T004; c) T098-T004; d) T192-T004

Os mapas de cores demonstraram a evolução do teor de água no provete ao longo do período de medição e permitiram a identificação das zonas particularmente afetadas pela humidade. Ao fim da primeira meia hora, Figura 21a), o provete apresenta sinais pouco evidentes de humedificação. Ao fim de 2 horas (Figura 22b) já é visível o efeito da água na variação da temperatura superficial. Na Figura 22 c), obtida ao fim de 8 horas, já se nota uma considerável evolução do nível de água e após 16 horas, atinge-se o maior grau de humedificação. Assim, foi possível constatar que ao fim de 8 horas não há alterações significativas no nível de água, uma vez que comparando as manchas de água obtidas com uma diferença de 16 horas, estas são muito semelhantes.

Conclui-se desta forma, que a subtração utilizando um termograma de referência é substancialmente mais eficaz comparativamente ao outro tipo de subtração.

#### **4.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DESCRITIVO**

Tendo como objetivo a análise das variações de temperatura a que os provetes estão sujeitos, o padrão que seguem e os pontos onde se verifica a ocorrência de maiores e menores alterações, realizou-se um tratamento estatístico geral, abrangendo o provete na sua totalidade, e um tratamento mais particular que incidiu nas nove caixas definidas no provete. Nas Tabela 3, 4 e 5 apresentam-se os resultados obtidos da análise estatística efetuada aos termogramas T004, T052 e T192.

Tabela 3 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T004

	Provete	Caixa A	Caixa B	Caixa C	Caixa D
<b>Média</b>	17,765	17,988	18,033	18,094	17,851
<b>Mediana</b>	17,877	17,988	18,031	18,095	17,852
<b>Desvio Padrão</b>	0,379	0,056	0,053	0,051	0,061
<b>Coefficiente de assimetria</b>	-2,026	-0,200	0,008	-0,142	-0,041
<b>Máximo</b>	18,279	18,168	18,193	18,228	18,022
<b>Mínimo</b>	15,775	17,792	17,894	17,903	17,664
<b>Histograma</b>					
<b>BoxPlot</b>					
	Caixa E	Caixa F	Caixa G	Caixa H	Caixa I
<b>Média</b>	17,820	17,922	16,948	16,972	16,925
<b>Mediana</b>	17,817	17,920	17,010	17,036	16,989
<b>Desvio Padrão</b>	0,049	0,061	0,339	0,348	0,371
<b>Coefficiente de Assimetria</b>	-0,180	-0,123	-0,491	-0,482	-0,541
<b>Máximo</b>	17,954	18,091	17,544	17,527	17,510
<b>Mínimo</b>	17,612	17,723	16,160	16,151	15,946
<b>Histograma</b>					
<b>BoxPlot</b>					

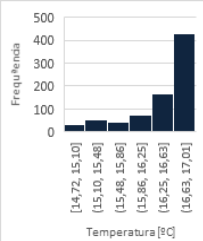
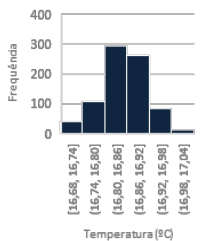
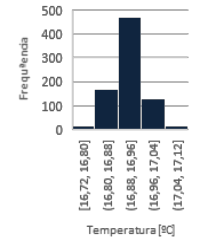
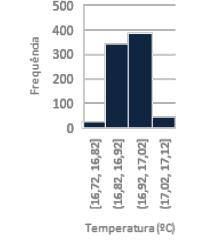
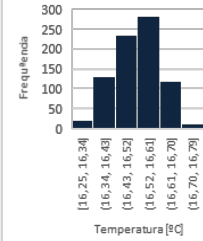
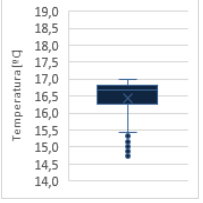
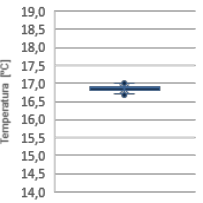
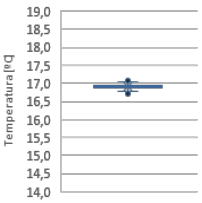
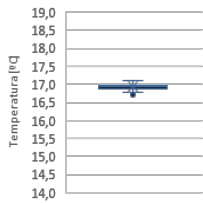
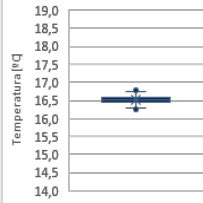
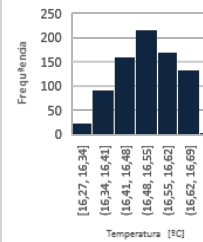
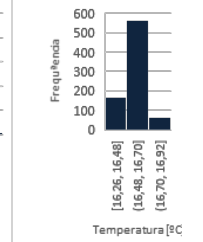
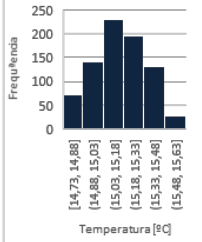
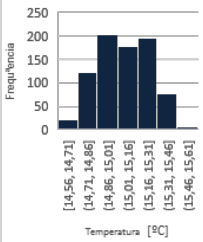
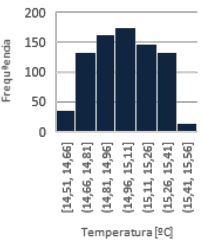
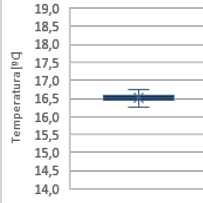
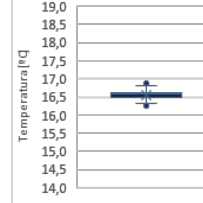
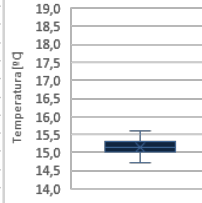
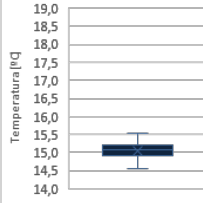
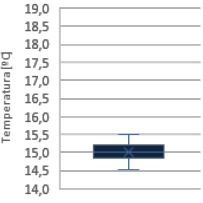
Tabela 4 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T052

	Provete	Caixa A	Caixa B	Caixa C	Caixa D
Média	16,648	17,115	17,176	17,180	16,811
Mediana	16,886	17,117	17,177	17,177	16,818
Desvio Padrão	0,600	0,056	0,055	0,056	0,078
Coefficiente de assimetria	-1,311	0,102	-0,076	0,015	0,012
Máximo	17,390	17,296	17,330	17,347	17,006
Mínimo	14,425	16,946	16,997	17,014	16,578
Histograma					

	Caixa E	Caixa F	Caixa G	Caixa H	Caixa I
Média	16,807	16,833	15,562	15,361	15,280
Mediana	16,818	16,843	15,587	15,391	15,288
Desvio Padrão	0,083	0,090	0,282	0,326	0,351
Coefficiente de assimetria	-0,177	-0,213	-0,181	-0,223	-0,195
Máximo	17,006	17,023	16,100	15,963	15,929
Mínimo	16,544	16,578	14,852	14,570	14,425
Histograma					



Tabela 5 - Tratamento estatístico efetuado ao termograma T192

	Provete	Caixa A	Caixa B	Caixa C	Caixa D
<b>Média</b>	16,354	16,856	16,919	16,934	16,524
<b>Mediana</b>	16,613	16,860	16,920	16,929	16,527
<b>Desvio Padrão</b>	0,629	0,061	0,058	0,058	0,088
<b>Coefficiente de assimetria</b>	-1,068	-0,159	0,065	-0,029	-0,193
<b>Máximo</b>	17,185	17,031	17,100	17,108	16,792
<b>Mínimo</b>	14,511	16,681	16,724	16,724	16,254
<b>Histograma</b>					
<b>BoxPlot</b>					
	Caixa E	Caixa F	Caixa G	Caixa H	Caixa I
<b>Média</b>	16,518	16,566	15,154	15,060	15,022
<b>Mediana</b>	16,519	16,578	15,160	15,066	15,015
<b>Desvio Padrão</b>	0,091	0,095	0,186	0,193	0,220
<b>Coefficiente de assimetria</b>	-0,184	-0,104	-0,012	-0,071	-0,054
<b>Máximo</b>	16,732	16,877	15,596	15,536	15,510
<b>Mínimo</b>	16,271	16,262	14,733	14,562	14,511
<b>Histograma</b>					
<b>BoxPlot</b>					

Da observação dos resultados do tratamento estatístico, concluiu-se e confirmou-se que a temperatura vai decrescendo ao longo do tempo. Comparando a evolução desta característica desde o provete seco até ao provete molhado, não há registo de variações muito acentuadas.

Verifica-se, observando-se os resultados obtidos para a caixa que engloba todo o provete, que em termos médios as temperaturas são similares, correspondendo a maior das temperaturas a aproximadamente 18°C e a menor a cerca de 14°C. Visto que no termograma T004 quase não se identifica vestígios de humedificação, a menor temperatura diz respeito ao provete mais molhado que naturalmente regista uma temperatura inferior. Em termos de variação e atendendo aos valores do desvio padrão, estes refletem que a maior variação ocorre no termograma T192, as dimensões da *boxplot* corroboram tal facto. Analisando cada uma das caixas respeitantes aos termogramas em questão, é notório que as maiores amplitudes se registam no provete mais húmido, variando estas de forma proporcional aos valores do desvio padrão, e, evoluindo na mesma proporção que o nível de humedificação. Em termos de distribuição, é possível constatar através dos valores do coeficiente de assimetria que a distribuição das temperaturas vai alterando com regularidade variável no tempo.

Considerando agora as caixas individuais e tendo em conta somente a representação das *boxplot*, é possível afirmar que as maiores variações de temperatura surgem nas caixas G, H, I que se localizam na base do provete, e que as oscilações de temperatura vão diminuindo à medida que o provete vai humedificando, tal como se pode observar na Figura 23. A razão destas oscilações prende-se com o efeito da água na temperatura superficial.

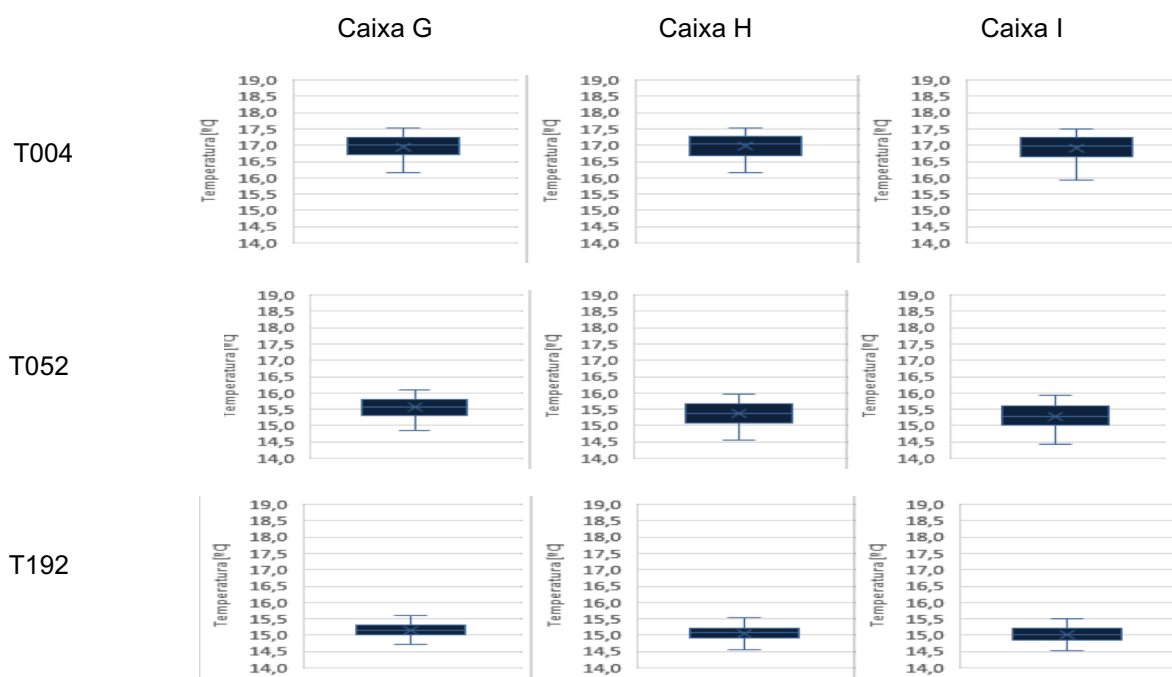


Figura 23 – Representação das *boxplot* das caixas G, H, I para os termogramas T004, T052 e T192

Relativamente às caixas B, E e H, localizadas numa posição intermédia do provete (Figura 24), foi possível concluir que as maiores variações se registam na caixa H devido ao efeito da água. Atendendo à amplitude das *boxplot* para a referida caixa, é visível que as maiores variações ocorrem nas primeiras horas, apresentando uma tendência para estabilizar na fase final de humidificação. Nas caixas B e E não se verificam grandes oscilações de temperatura pelo facto da mancha húmida não atingir com significado a secção intermédia do provete.

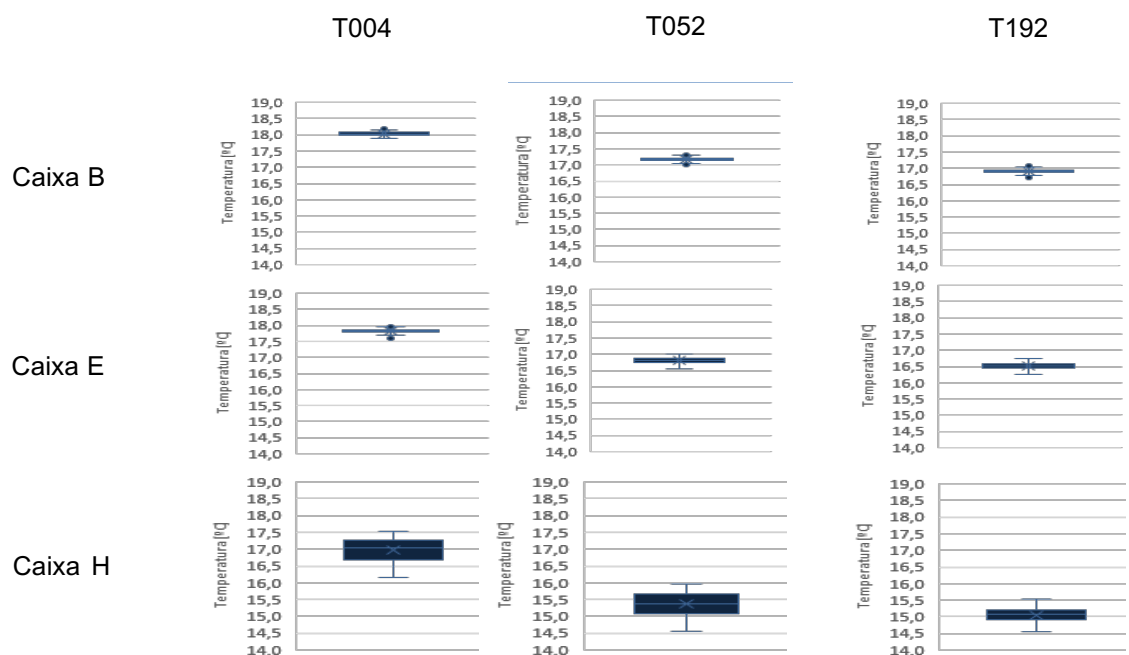


Figura 24 – Representação das *boxplot* das caixas B, E e H para os termogramas T004, T052 e T192

No que concerne às restantes caixas foi possível verificar que as caixas que se encontram ao mesmo nível apresentam valores de temperatura da mesma ordem de grandeza, verificando-se um ligeiro aumento nos extremos, uma vez que a capacidade de secagem nessas zonas é superior e, portanto, a quantidade de água disponível para a evaporação é menor. Tendo em consideração a altura, foi possível constatar que as caixas apresentam diferenças de temperatura de aproximadamente 1°C.

Na Figura 25 é possível visualizar a variação da temperatura média das nove caixas ao longo do tempo, considerando os 23 termogramas seleccionados. Observando a Figura 25, é possível verificar que as caixas posicionadas ao mesmo nível apresentam comportamentos semelhantes. É possível também verificar que as temperaturas mais baixas ocorrem ao nível da base e que, a diferença de temperaturas entre a zona intermédia e a base do provete ronda sensivelmente os 2°C. Relativamente às temperaturas presentes no meio e no topo da amostra, a diferença não é tão óbvia e é de cerca de 0,5°C.

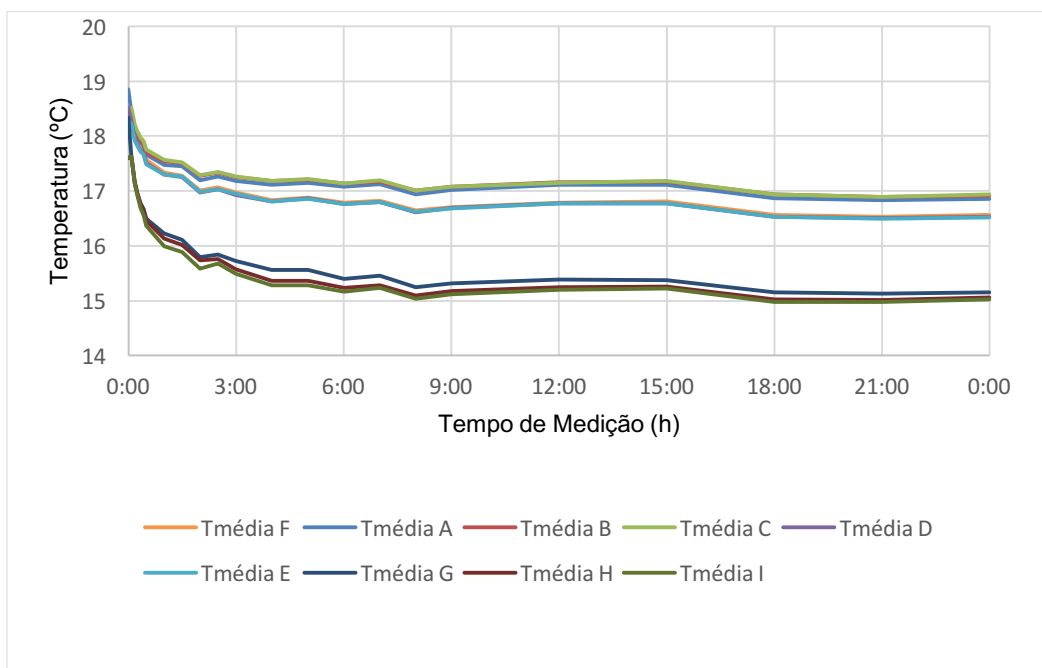


Figura 25 - Variação da temperatura superficial, nas nove caixas, ao longo do período de humedificação

Com o intuito de compreender como varia a temperatura superficial do provete na sua totalidade, realizou-se o gráfico da Figura 26. Este gráfico permite verificar que existe uma diminuição gradual da temperatura ao longo do período de humedificação, registando o provete uma temperatura média que atinge o seu valor máximo de sensivelmente 19°C, no início da medição, e um mínimo de cerca de 16°C no final da humedificação.

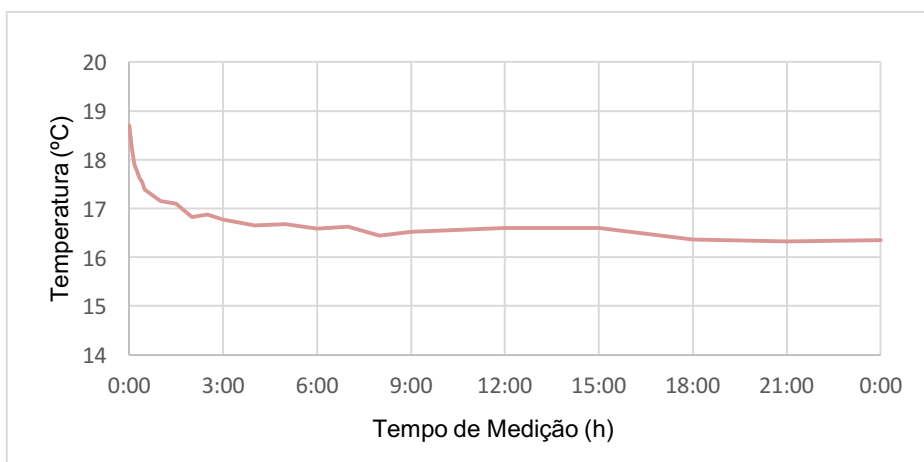


Figura 26 - Variação da temperatura superficial, no provete, ao longo do período de humedificação

Em síntese, após a realização deste tratamento foi possível comprovar que a análise estatística permite obter resultados semelhantes aos obtidos por observação visual dos termogramas.

#### 4.5. TRATAMENTO COM BASE EM ÍNDICES

O cálculo do primeiro índice térmico,  $IT_1$ , resultou no gráfico representado na Figura 27.

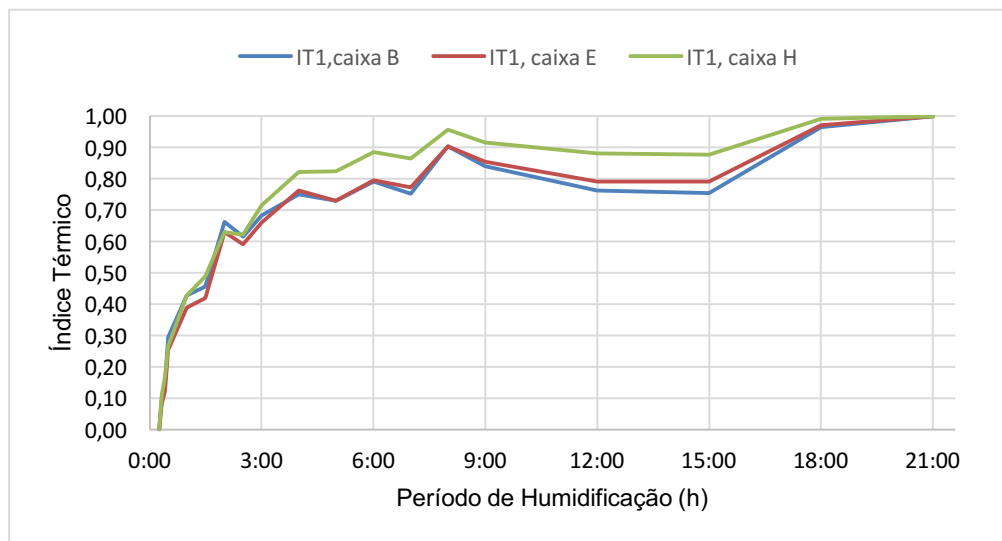


Figura 27 - Variação do  $IT_1$  ao longo do período de humedificação

Da análise do gráfico da Figura 27 é possível concluir, de um modo geral, que a evolução das temperaturas médias das 3 caixas é semelhante ao longo do período de humedificação. Nas primeiras 3 horas as caixas apresentam um comportamento equivalente em termos de variação de temperatura, o que realça o ajuste da temperatura do provete à temperatura ambiente. A partir das 3 horas de embebição as 3 caixas passam a ter um comportamento ligeiramente diferente, uma vez que na caixa H, na base do provete, a diferença entre a temperatura inicial e a temperatura ao longo do tempo é mais acentuada do que nas restantes devido ao efeito da humidade. As diferenças entre as caixas B e E não são tão evidentes, embora, de uma maneira geral, a caixa E apresente valores ligeiramente superiores, devido à presença de humidade. A partir das 18 horas, as linhas de variação de cada uma das caixas ficam praticamente paralelas, o que indicia que não há diferenças de temperatura significativas nos pontos em análise.

Para analisar mais pormenorizadamente as variações de temperatura que ocorrem ao longo do período de medição, de que forma se distribui a humidade e para comprovar a veracidade das conclusões obtidas a partir dos gráficos, apresentam-se nas figuras 28, 29 e 30 os gráficos representativos de intervalos de tempo mais reduzidos, bem como, as imagens termográficas relativas a esses períodos de tempo. É possível identificar e perceber qual o comportamento de cada um dos provetes e qual o efeito da água em cada um dos termogramas.

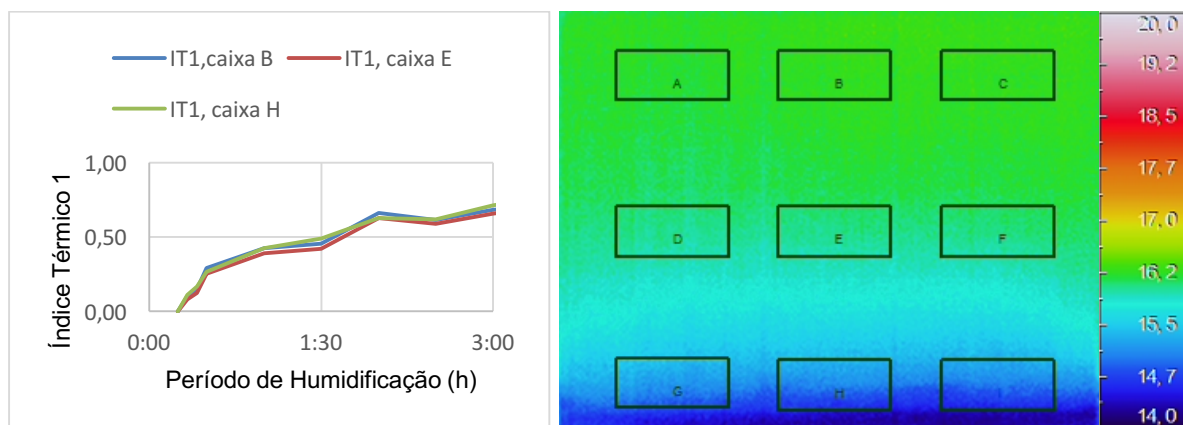


Figura 28 - Comparação da evolução do IT<sub>1</sub> ao longo das primeiras 3 horas com a imagem do termograma T037, correspondente às 3h de medição

Ao observar o gráfico da Figura 28 é possível verificar que nas primeiras 3 horas o arrefecimento resulta do arrefecimento da amostra, e a homogeneidade de comportamento, em termos de variação de temperatura das caixas comprova esse facto. É evidente uma considerável variação de temperatura que advém da adaptação à temperatura ambiente.

Considerando o gráfico da Figura 28 e o termograma obtido ao fim de 3 horas, torna-se claro que a taxa de arrefecimento devido à adaptação da temperatura ambiente, caixa B, é equivalente à taxa de arrefecimento resultante da humidade na caixa H. Depreende-se ainda que a mancha húmida ainda não atingiu a parte intermédia do provete. Da observação do gráfico e da imagem térmica (Figura 28) conclui-se que não é possível distinguir o arrefecimento, devido ao ajuste à temperatura ambiente, dado que o efeito da humidade é idêntico ao do arrefecimento.

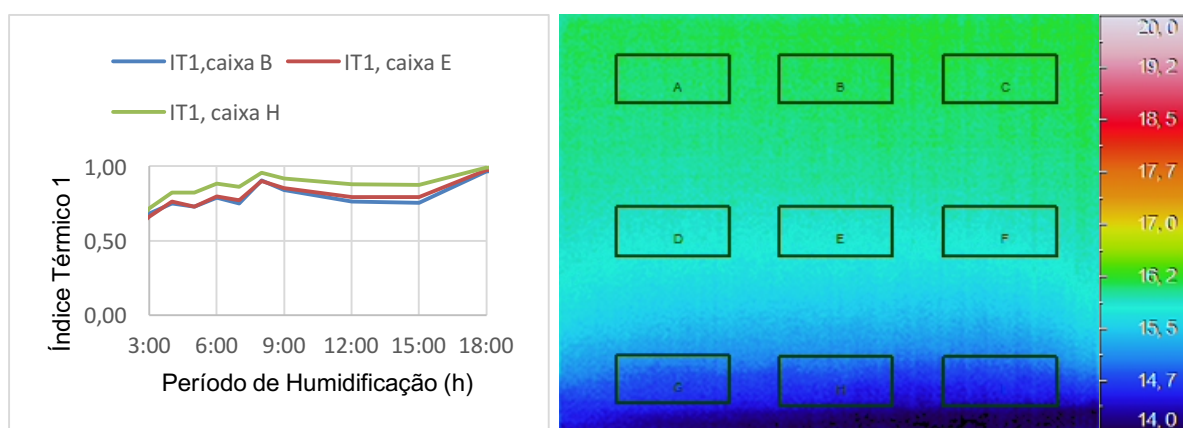


Figura 29 - Comparação da evolução do IT<sub>1</sub> das 3h até às 18h com a imagem do termograma T104, correspondente às 9h de medição

Ao observar o gráfico da Figura 29, relativo à evolução da temperatura desde as 3 horas até às 18 horas, constatou-se um aumento, seguido de uma diminuição acentuada da temperatura, ao nível das três caixas, embora essa diminuição seja mais acentuada na caixa H, tal como demonstra a imagem térmica da Figura 29. Após observar o termograma, obtido ao fim de 9 horas, é notória uma evolução da frente

húmida, que já atingiu a caixa E. Portanto é possível concluir que a diminuição de temperatura do provete acompanha a evolução do nível de água.

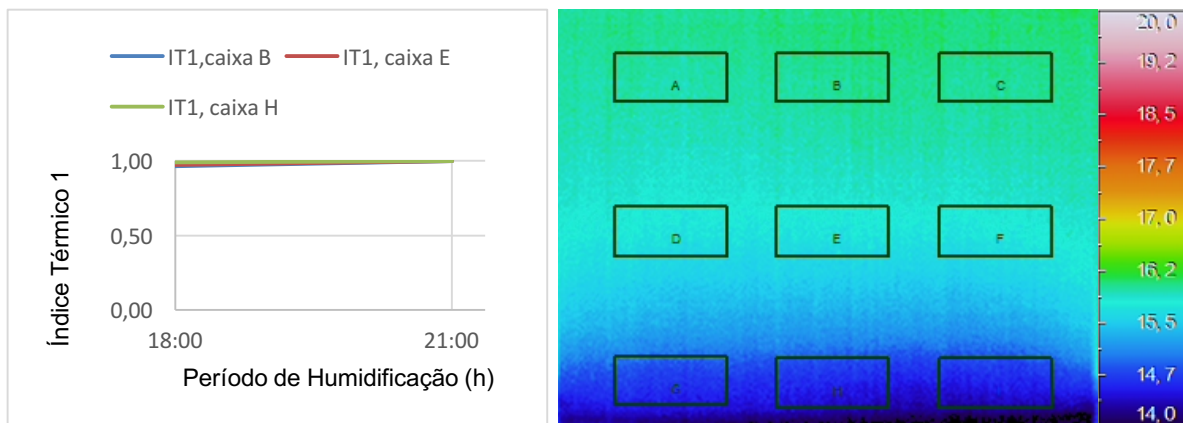


Figura 30 - Comparação da evolução do  $IT_1$  das 18h até às 21h com a imagem do termograma T158, correspondente às 18h de medição

Observando com maior detalhe as últimas 3 horas da fase de humidificação, constatou-se que a variação de temperatura é mais acentuada, tal como comprova o termograma obtido ao fim de 18 horas. A partir deste é visível que o limite superior da mancha fria já ultrapassou a caixa E (Figura 30). É possível ainda afirmar que já não há variação de temperatura nem na zona seca, nem na zona húmida, porque ambas as caixas atingiram o nível máximo da taxa de variação e as respetivas linhas de variação são praticamente paralelas.

Tal como enunciado no capítulo 3, de acordo com a dificuldade presente na diferenciação do arrefecimento devido à adaptação da temperatura ambiente ou devido à humidificação, sugeriu-se um segundo índice térmico,  $IT_2$ , cujo gráfico se encontra ilustrado na Figura 31.

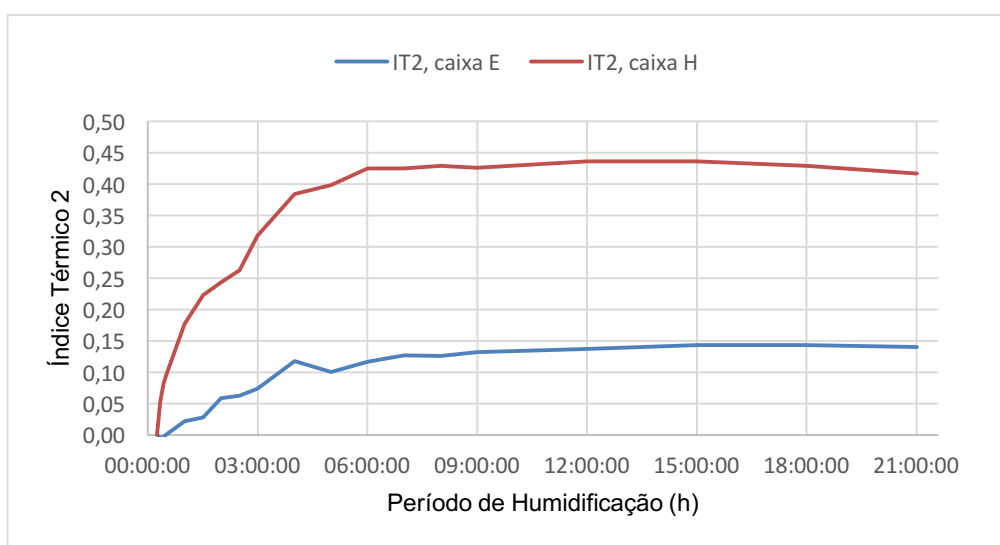


Figura 31 - Variação do  $IT_2$  ao longo do período de humidificação

Ao observar a Figura 31 verificou-se que até às 6 horas, aproximadamente, existe um aumento gradual da taxa de arrefecimento, motivado pela humedificação. No restante período em análise a taxa de arrefecimento praticamente estabilizou. Quanto ao valor do índice térmico, este é maior para a caixa H, visto que é a na base do provete que se verifica uma maior mancha húmida ao longo do tempo, daí o arrefecimento mais acentuado. Por outro lado, a caixa E apresenta um índice consideravelmente inferior ao da caixa H, pelo facto de aquela se encontrar no meio do provete, logo, o seu arrefecimento devido à humedificação não se sobrepõe ao arrefecimento devido à adaptação à temperatura ambiente.

Em termos de resultados, o  $IT_2$  apresenta uma maior eficácia na interpretação dos resultados do que o  $IT_1$ , visto que permite suavizar o efeito da variação da temperatura associado ao arrefecimento da amostra para adaptação à temperatura ambiente.

#### 4.6. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

##### 4.6.1. SUBTRAÇÃO DA IMAGEM T004

A metodologia descrita no subcapítulo 3.6 foi aplicada à totalidade dos termogramas (análise geral) e aos termogramas resultantes da pré-seleção (análise particular). Em ambas as situações obtiveram-se duas componentes principais (CPs), de acordo com o critério anteriormente referido. Na Figura 32 estão representadas, em percentagem, a variabilidade explicada por cada CP, tanto para a análise particular (termogramas resultantes da pré-seleção) como para a análise geral (totalidade dos termogramas).

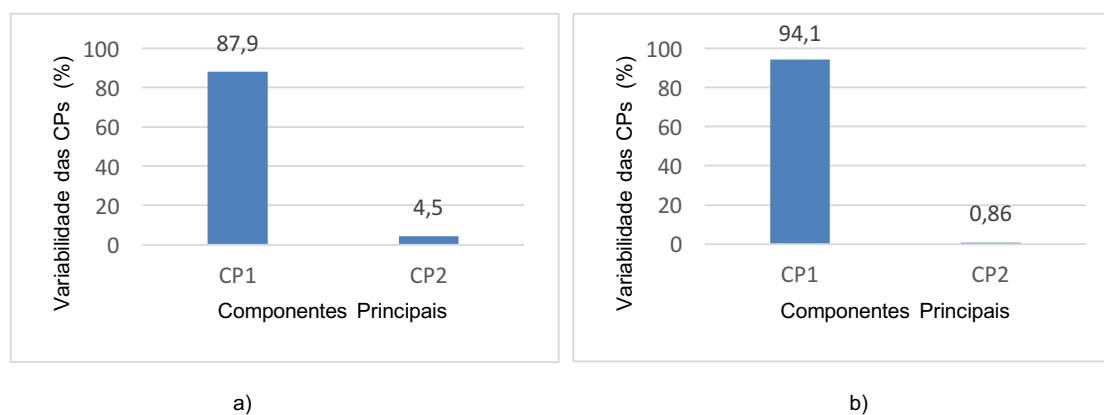


Figura 32 - Percentagem de variabilidade dos dados explicada por cada componente principal; a) Análise particular; b) Análise geral

Desta análise é possível concluir que as duas componentes principais seleccionadas são suficientes para explicar quase toda a variabilidade das temperaturas, em ambas as situações. Na análise particular a primeira CP é responsável por 87,9% e a segunda por 4,5% da variância total, o que perfaz um total de 92,4% da variância dos dados iniciais. Na análise geral, a primeira CP representa 94,1% da variância total e a segunda 0,86%, explicando o total de 95% da variância das temperaturas em análise. A restante variabilidade fica distribuída pelas restantes CPs, no entanto, podem ser desprezáveis visto que a parcela de variabilidade não explicada é reduzida.



Assim, na aplicação da análise de componentes principais não se justifica a pré-seleção inicial, visto que com todos os termogramas iniciais se obteve a explicação da variância com maior expressão. Para proporcionar uma melhor e mais eficaz interpretação das CPs identificadas, reproduziu-se cada uma das componentes principais na forma de imagem, através do *software Surfer®*. Na Figura 33 ilustram-se os mapas de cores representativos das duas componentes principais obtidas para a totalidade dos termogramas.

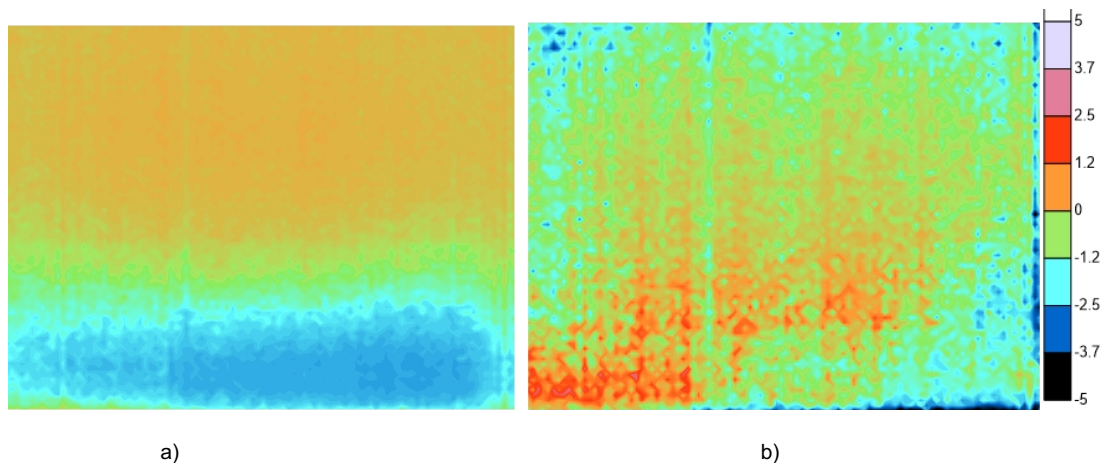


Figura 33 - a) 1ª Componente principal espacial obtida por subtração da imagem T004; b) 2ª Componente principal espacial obtida por subtração da imagem T004

Ao observar as duas imagens térmicas constatou-se que a 1ª CP permitiu definir a altura crítica do nível de água, sensivelmente a meio do provete. Ao nível da base, que corresponde à zona mais fria do termograma, destaca-se uma mancha azul representativa do nível de humidificação. Desde a base até ao topo do provete é visível que a temperatura vai aumentando porque as diferenças face ao termograma T004 diminuem. Na zona superior do provete a temperatura é claramente superior à do termograma de referência uma vez que nesta zona há um ajuste das temperaturas do provete e à temperatura ambiente.

No que diz respeito à 2ª CP não é possível fazer uma correta leitura do respetivo termograma, visto que não permite a identificação de zonas mais ou menos frias, o que é explicado pela fraca representatividade desta componente relativamente à variabilidade dos dados.

#### 4.6.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL MÉDIO

A subtração do perfil temporal médio ao espaço de imagens resultou, tal como no caso anterior, em duas componentes principais. Nos gráficos da Figura 34 é possível visualizar as percentagens de variância de cada uma das CPs para as duas análises efetuadas, particular e geral.

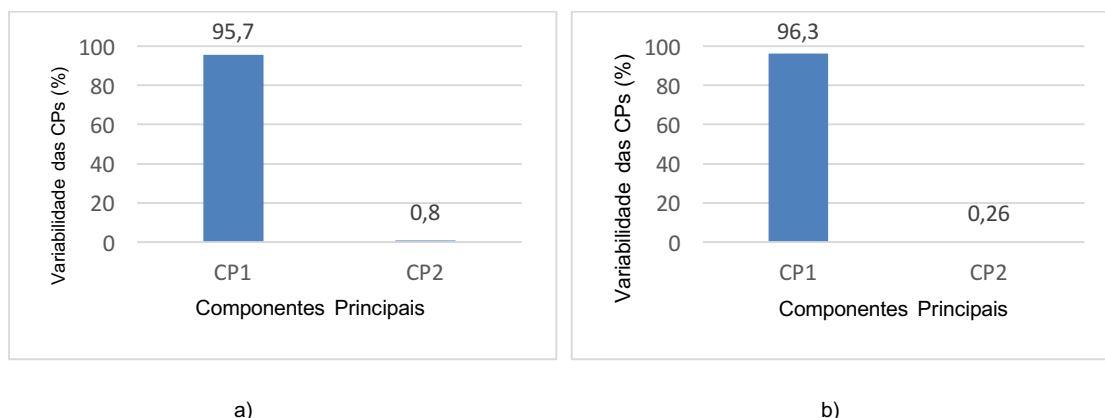


Figura 34 - Percentagem de variabilidade dos dados para cada componente principal; a) Análise particular; b) Análise geral

À semelhança do que sucede no caso anterior, é possível concluir que duas componentes principais são suficientes para explicar quase toda a variabilidade das temperaturas, na análise particular e na análise geral. Na análise particular a primeira CP é responsável por 95,7% e a segunda por 0,8% da variância total, o que perfaz um total de 96,5% da variância dos dados iniciais. Na análise geral a primeira CP detém 96,3% da variância total e a segunda 0,26%, traduzindo-se numa variância total de 96,6% das temperaturas em análise. Pelas razões expostas anteriormente não se consideraram as restantes CPs.

Tal como referido no ponto 3.6, estabeleceu-se como critério para a extração do número de CPs, valores próprios da matriz de covariância C superiores à unidade, todavia, verificou-se que em algumas situações uma CP seria suficiente já que somente a segunda componente principal, obtida para a imagem T004 na análise geral, apresenta valores próprios superiores à unidade. Apesar desse facto, consideraram-se duas CPs para efeitos de comparação entre variáveis.

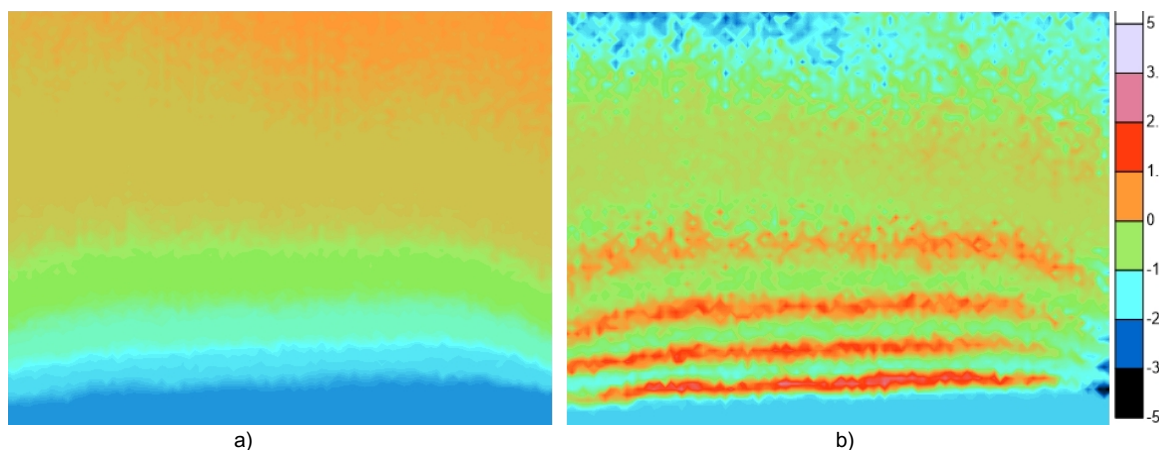


Figura 35 - 1ª Componente principal espacial obtida por subtração do perfil temporal médio; b) 2ª Componente principal espacial obtida por subtração do perfil temporal médio

Ao observar a Figura 35a) é possível concluir que a primeira CP permitiu a definição de cinco níveis de humedificação, isto é, realça cinco áreas com diferentes graus de humidade. O que se pode constatar por visualização da primeira CP é que a maior variação do número de *pixels* ocorre na base do proveite, sendo as alterações menos acentuadas na parte superior do mesmo.

Relativamente à segunda CP (Figura 35b)) e à semelhança da análise anterior, não é possível retirar conclusões da observação da imagem, uma vez que não é significativa em termos de variabilidade.

#### 4.6.3. ANÁLISE DOS SCORES

A par dos mapas de cores representativos das CPs é possível efetuar uma avaliação complementar que incide na análise de representações gráficas dos *scores*. O estudo de *scores* tem como finalidade destacar e analisar a área afetada, representada pela região de maior agrupamento de valores. Na Figura 36 e na Figura 37 representam-se, respetivamente, os gráficos dos *scores* das duas primeiras CPs obtidas por subtração da imagem T004 e por subtração do perfil temporal médio, resultantes da análise geral.

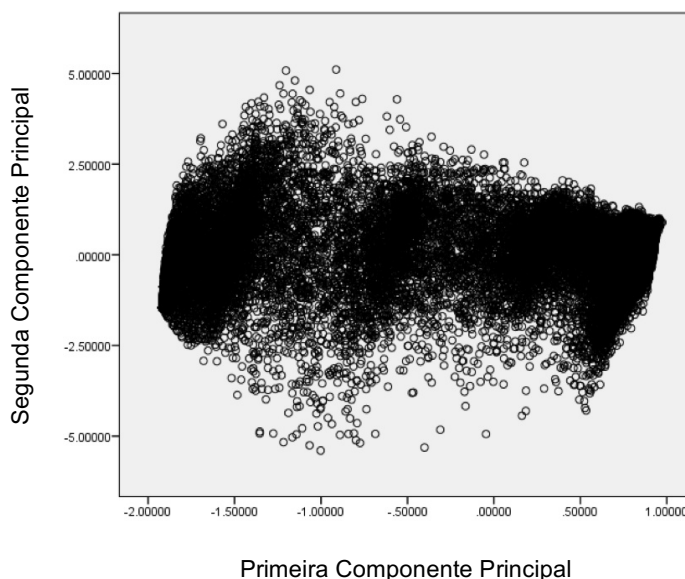


Figura 36 - Dispersão dos *scores* das duas CPs obtidas por subtração da imagem T004, para a totalidade dos termogramas

À primeira vista é possível concluir, por visualização da Figura 36, que não é possível identificar nenhum agrupamento de valores que se destaque, uma vez que os dados se encontram muito concentrados. Analisando os *scores* constatou-se que a primeira componente principal, representada no gráfico pelo eixo horizontal, evidencia uma mancha de temperaturas mais densa de valores negativos, e a razão que está na origem dessa situação é o decréscimo de temperaturas, a par do aumento do nível de humidificação. O gráfico indica ainda que a segunda componente principal, representada pelo eixo vertical, revela um agrupamento maior centrado em 0, ou seja, a sua variação é reduzida. Foi possível constatar também que as diferenças de temperaturas se distribuem equitativamente à volta de zero, devido à reduzida parcela de variabilidade explicada pela segunda CP.

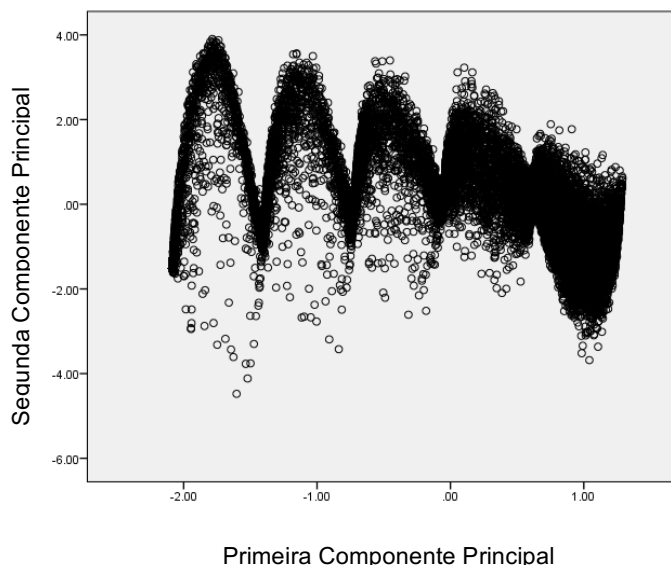


Figura 37 - Dispersão dos scores das duas CPs obtidas por subtração do perfil temporal médio, para a totalidade dos termogramas

Por análise do gráfico da Figura 37 constata-se que os cinco agrupamentos de valores correspondem aos cinco níveis de humedificação presentes no mapa representativo da primeira CP espacial, obtida por subtração do perfil temporal médio.

De salientar que nas CPs as regiões críticas correspondem a zonas onde se verifica uma elevada variabilidade, o que se traduz nas representações gráficas por regiões de grande dispersão. Por outro lado, as regiões de menor variação estão associadas a grupos de valores de maior concentração entre si.

#### 4.7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

No presente subcapítulo comparam-se os gráficos representativos da evolução da temperatura superficial do provete durante a fase de humedificação pela base, utilizando para o efeito as nove caixas consideradas neste trabalho (Figura 25) e os três pontos centrais, utilizados na análise quantitativa de Ferreira [46]. A disposição dos referidos pontos é a representada na Figura 38. Na Figura 39 encontra-se representada a evolução das temperaturas obtidas por Ferreira [46] para os três pontos da Figura 38 e considerando apenas os 23 termogramas mais relevantes.

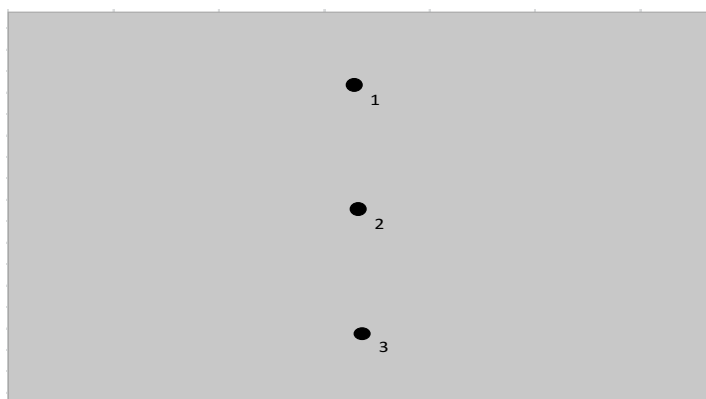


Figura 38 - Esquema ilustrativo dos três pontos centrais considerados por Ferreira [46]

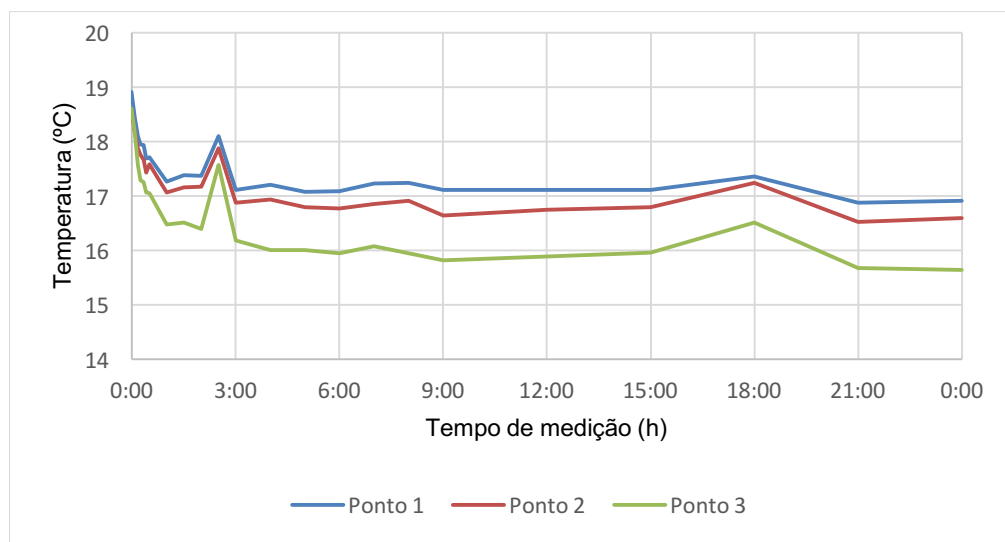


Figura 39 - Variação da temperatura superficial, nos três pontos centrais, ao longo do período de humidificação

À semelhança do que sucede nas caixas localizadas na secção inferior do provete (Figura 25), também no ponto 3 (Figura 39) as temperaturas observadas são mais baixas do que nos restantes. Em ambas as análises (por pontos e por caixas) a temperatura inicial é da ordem dos 18,5 °C, decrescendo a um ritmo gradual e estabilizando a partir das 18 horas, até atingir uma temperatura de cerca de 15°C. Este facto pode ser explicado da seguinte maneira: a humidificação pela base torna a evaporação mais intensa nessa zona diminuindo as temperaturas na parte inferior do provete porque a evaporação é uma reação endotérmica, isto é, consome energia.

No que diz respeito às caixas e aos pontos 1 e 2 posicionados respetivamente no topo e no meio do provete, é evidente por observação dos gráficos que as temperaturas relativas ao topo da amostra são superiores às intermédias. Esta situação resulta do facto do limite superior do nível de água atingir e ultrapassar o ponto intermédio da amostra, mas não chegar ao topo do provete. O arrefecimento na zona intermédia é, por isso, superior à do topo do provete, que apenas resulta do arrefecimento para adaptação à temperatura ambiente.

Na Figura 39 são visíveis alguns picos próximos das 3 horas e das 18 horas, o que não se verifica na análise realizada quando se utilizam as nove caixas (Figura 25). A razão que está na origem desta diferença deve-se à falta de precisão associada à análise de apenas um ponto por localização. Uma análise das temperaturas médias de caixas, de igual dimensão e dispostas de igual forma, permite obter resultados mais fiáveis e rigorosos comparativamente a uma análise que incide apenas em pontos, uma vez que permite eliminar ou atenuar o efeito de algum fenómeno específico de um ponto.



# 5

## CONCLUSÕES

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos levados a cabo ao longo deste trabalho permitiram retirar as seguintes conclusões:

- Para analisar quantitativamente uma série de imagens térmicas obtidas durante um ensaio é fundamental uma pré-seleção, antes de se proceder a qualquer tipo de tratamento. Devido à forte correlação existente entre termogramas, não é viável analisá-los na sua totalidade. Uma criteriosa seleção de imagens térmicas possibilita uma análise mais rápida, objetiva e eficiente;
- Verificou-se que a subtração de imagens em relação a um termograma de referência é uma boa técnica para realçar os resultados, quando se pretende estudar quantitativamente fenómenos de humedificação ao longo de um determinado período de medição. Por aplicação desta técnica, suportada pelos softwares *InfReC Analyzer* e *Surfer*®, e utilizando um termograma de referência, foi possível analisar a evolução do nível de água no provete e compreender as variações ocorridas durante as 24 horas de embebição. No que diz respeito à subtração utilizando o termograma precedente, as imagens térmicas obtidas não foram perceptíveis e como tal, esta técnica não se revela eficaz no tipo de tratamento em questão;
- A análise estatística permite identificar padrões de variabilidade de temperaturas em secções diferentes do provete, possibilitando uma melhor compreensão sobre como se processam as oscilações de temperatura. Além disso, este tipo de tratamento permite, por intermédio de histogramas e *boxplots*, uma rápida e eficaz comparação entre imagens térmicas;
- A definição de dois índices térmicos permitiu distinguir a taxa de arrefecimento devido à humidade e devido à adaptação da temperatura ambiente;
- A análise de componentes principais (ACP) revelou ser uma ferramenta com potencial para evidenciar as tendências térmicas de um conjunto de imagens, através da simplificação da visualização de todas as informações contidas na totalidade dos termogramas. Concluiu-se que este tipo de análise exhibe uma maior expressão de variabilidade quando se analisam os dados “brutos”, sem existir a necessidade de realizar uma seleção prévia;
- Quando se pretende definir a altura crítica de água, ou o nível de humedificação de um provete, o tratamento mais adequado é a análise de componentes principais (ACP). Por outro lado, quando se pretende estudar a forma como se processam as variações e quais as tendências térmicas ao longo do tempo, recorre-se a tratamentos com base em índices e com base na subtração de imagens, bem como, a análises estatísticas;

- De um modo geral, é possível concluir que as técnicas de tratamento aplicadas constituem importantes ferramentas no domínio da termografia quantitativa, tendo como alvo de estudo fenómenos de humedificação. O sucesso vinculado ao emprego destas técnicas poderá abrir novos horizontes no campo de aplicação da termografia.

## 5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De seguida enunciam-se algumas sugestões para trabalhos futuros, que possam contribuir para o aprofundamento do conhecimento no que diz respeito à aplicação da termografia de infravermelhos ao estudo de fenómenos relacionados com a humidade:

- Maior controlo e melhoria das condições em que se realizam os ensaios, uma vez que os fatores externos têm influência direta e significativa nas medições e, conseqüentemente, na interpretação de resultados;
- Aplicar a ACP e interpretar a análise no modo temporal. Este tipo de abordagem permite observar as variações térmicas ocorridas em cada termograma, encontrando-se cada imagem térmica relacionada com um determinado tempo de observação. Esta análise traduz-se sob a forma de um gráfico *Tempo x CP*. Para obter as CPs temporais a disposição da matriz de dados  $[X]$  seria diferente da análise espacial, resultaria uma matriz de ordem  $N \times n$ , precisamente a matriz transposta da matriz espacial;
- Compreender, sob um ponto de vista físico, o que traduz a análise de componentes principais;
- Avaliar quantitativamente os termogramas, recorrendo às técnicas abordadas no presente trabalho, mas aplicadas à fase de secagem;
- Validar as técnicas de tratamento quantitativo exploradas ao longo deste estudo, para as mais diversas situações reais ligadas à prática corrente da Engenharia Civil, e nas restantes áreas de conhecimento.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Barreira and R. M. Almeida, (2015). Drying Evaluation Using Infrared Thermography. *Energy Procedia*. vol. 78, pp. 170-175.
- [2] A. Bendada, C. Ibarra-Castanedo, D. Ambrosini, D. Paoletti, E. Cheilakou, M. Kouï, N. Avdelidis, P. Theodorakeas S. Sfarra and X. Maldague, (2015). How to retrieve information inherent to old restorations made on frescoes of particular artistic value using infrared vision? *International Journal of Thermophysics*. vol. 36, pp. 3051-3070.
- [3] E. Edis, I. Flores-Colen and J. de Brito, (2015). Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. *Building and Environment*. vol. 94, pp. 97-108.
- [4] E. Grinzato, G. Cadelano & P. Bison, (2010). Moisture map by IR thermography. *Journal of Modern Optics*. vol. 57, pp. 1770-1778.
- [5] J. S. Luckino, J. R. Kominsky and T. F. Martin, (2007). Passive infrared thermography—a qualitative method for detecting moisture anomalies in building envelopes. *Tedford Pond*. pp. 1-11.
- [6] G. C. Holst, *Common sense approach to thermal imaging*: SPIE Optical Engineering Press Washington, DC, USA:, 2000.
- [7] E. Barreira and V. P. de Freitas, (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*. vol. 21, pp. 218-224.
- [8] C. Meola and G. M. Carlomagno, (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement science and technology*. vol. 15, p. R27.
- [9] B. Vollheim, I. J. Aldave, I. L. de Santiago, L. Krausz, L. V. González, M. Georges and P. V. Bosom, (2013). Review of thermal imaging systems in composite defect detection. *Infrared Physics & Technology*. vol. 61, pp. 167-175.
- [10] J. Afonso, (2010). Termografia—teoria, procedimentos e vantagens. *ITEAG, Instalações Técnicas Especiais Ltda*.
- [11] D. P. Rao, (2008). Infrared thermography and its applications in civil engineering. *The Indian Concrete Journal*. vol. 82, pp. 41-50.
- [12] L. de Sousa, Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [13] M. Vollmer and K. P. Möllmann, *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*: John Wiley & Sons, 2010.
- [14] T. Y. Lo and K. Choi, (2004). Building defects diagnosis by infrared thermography. *Structural Survey*. vol. 22, pp. 259-263.
- [15] E. Barreira, Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios, Dissertação de Mestrado, Porto, FEUP, 2004.

- [16] S. S. de Freitas, V. P. de Freitas and E. Barreira, (2014). Detection of façade plaster detachments using infrared thermography—A nondestructive technique. *Construction and Building Materials*. vol. 70, pp. 80-87.
- [17] J. Hart, *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*: Building Research Establishment, 1991.
- [18] P. Theodorakeas, E. Cheilakou, E. Ftikou and M. Kouï, (2015). *Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures* vol. 655: IOP Publishing, 2015.
- [19] E. Bauer, E. Pavón, E. Barreira and E. K. de Castro, (2016). Analysis of building facade defects using infrared thermography: laboratory studies. *Journal of Building Engineering*. vol. 6, pp. 93-104.
- [20] G. Carlomagno, R. Maio and C. Meola & N. Roberti, (2005). Infrared thermography and geophysical techniques in cultural heritage conservation. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. vol. 2, pp. 5-24.
- [21] M. Chew, (1998). Assessing building façades using infra-red thermography. *Structural Survey*. vol. 16, pp. 81-86.
- [22] H. Kaplan, *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment* vol. 75: SPIE press, 2007.
- [23] F. Asdrubali, G. Baldinelli and F. Bianchi, (2012). A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*. vol. 97, pp. 365-373.
- [24] E. Barreira, R. M. Almeida and M. Moreira, (2017). An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings. *Energy and Buildings*. vol. 140, pp. 224-235.
- [25] C. Maierhofer, R. Arndt, M. Rollig, C. Rieck, A. Walther, H. Scheel and B. Hillemeier, (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*. vol. 28, pp. 393-401.
- [26] F. Mercuri, U. Zammit, N. Orazi, S. Paoloni, M. Marinelli and F. Scudieri, (2011). Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. vol. 104, p. 475.
- [27] S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, M. Tortora, L. Arrizza, G. Cerichelli, I. Nardi and X. Maldague, (2016). Diagnostics of wall paintings: a smart and reliable approach. *Journal of Cultural Heritage*. vol. 18, pp. 229-241.
- [28] P. Theodorakeas, N. P. Avdelidis, E. Cheilakou and M. Kouï, (2014). Quantitative analysis of plastered mosaics by means of active infrared thermography. *Construction and Building Materials*. vol. 73, pp. 417-425.
- [29] H. Berglind and A. Dillenz, (2003). Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison. *NDT & E International*. vol. 36, pp. 395-399.
- [30] C. Balaras and A. Argiriou, (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and buildings*. vol. 34, pp. 171-183.

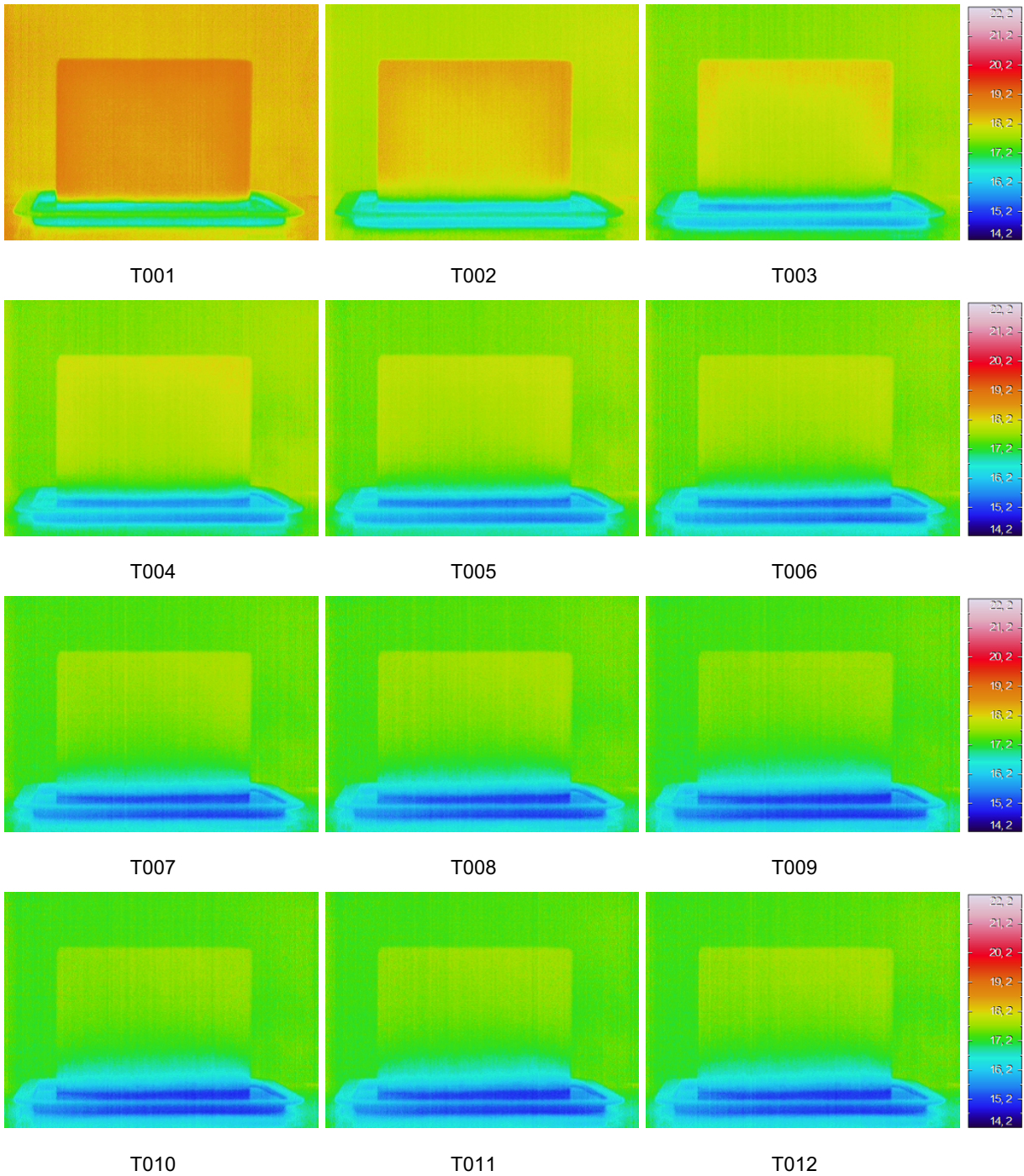
- [31] C. Meola, (2007). Infrared thermography of masonry structures. *Infrared physics & technology*. vol. 49, pp. 228-233.
- [32] X. P. Maldague, (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*. vol. 60, pp. 1060-1073.
- [33] ISO. *International Organization for Standardization* Available: <https://www.iso.org/home.html>. (Março de 2017)
- [34] ASTM International. *American Society for Testing and Materials* Available: [https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=thermography&resStart=0&resLength=10&tolevel=products-and-services&sublevel=standards-and-publications&sectors=building\\_and\\_construction&](https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=thermography&resStart=0&resLength=10&tolevel=products-and-services&sublevel=standards-and-publications&sectors=building_and_construction&). (Março de 2017)
- [35] IRInfo. *The Definitive Internet Resource for Infrared Thermography* Available: <http://www.irinfo.org/infrared-standards-application-standards/>. (Março de 2017)
- [36] E. Grinzato, (2006). Monitoring of thermal-hygro-metrical conditions of large surfaces by IR thermography. *Patent registered as PD2006A000191, June the 15th*.
- [37] R. Vinjamuri, W. Wang, M. Sun and Z. Mao, (2012). *Application of Linear and Nonlinear Dimensionality Reduction Methods*: INTECH Open Access Publisher.
- [38] G. dos Santos, Análise e extração de características de imagens termográficas utilizando componentes principais, Dissertação de Mestrado, Ilha Solteira, UNESP, 2010.
- [39] R. W. Cameron, J. E. Taylor and M. R. Emmet, (2014). What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*. vol. 73, pp. 198-207.
- [40] N. Rajic, (2002). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*. vol. 58, pp. 521-528.
- [41] *Principal Component Analysis* Rijeka, Croatia InTech 2012.
- [42] D. Gavrilov, E. Maeva, O. Grube, I. Vodyanoy & R. Maev, (2013). Experimental comparative study of the applicability of infrared techniques for non-destructive evaluation of paintings. *Journal of the American Institute for Conservation*. vol. 52, pp. 48-60.
- [43] S. A. Mingoti, *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*: Editora UFMG, 2005.
- [44] S. Daultrey, (1976). Principal components analysis. Concepts and techniques in modern geography series No. 8. *Geo Abstracts Ltd. Norwich: University of East Anglia*.
- [45] S. Vasconcelos, (2007). Análise de componentes principais (PCA). *Rio de*.
- [46] J. Ferreira, A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem, Dissertação de Mestrado, Porto, FEUP, 2016.



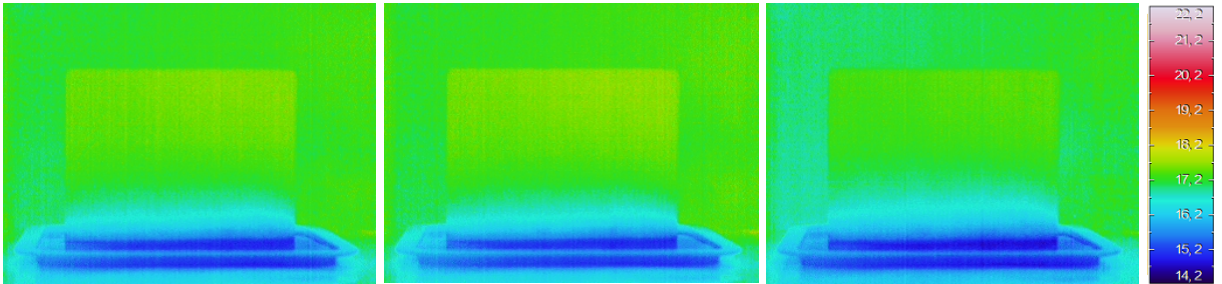
## **Anexo I**

### **TERMOGRAMAS EM ESTUDO**

Análise de termogramas efetuados a provetes de betão leve embebidos pela base – fase de humificação



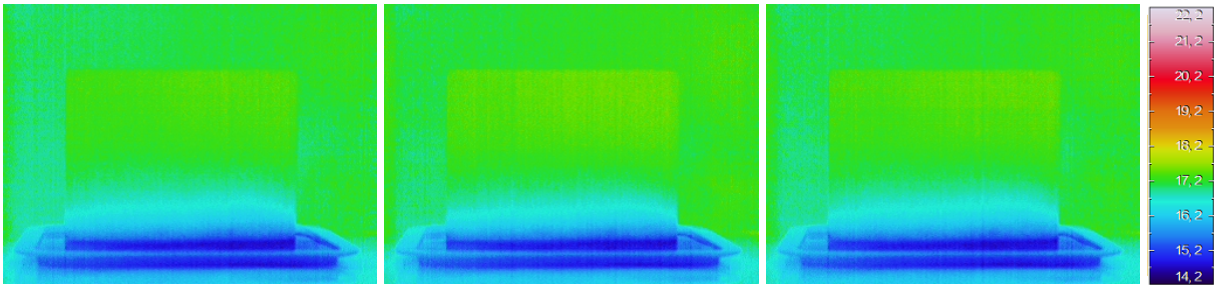




T013

T014

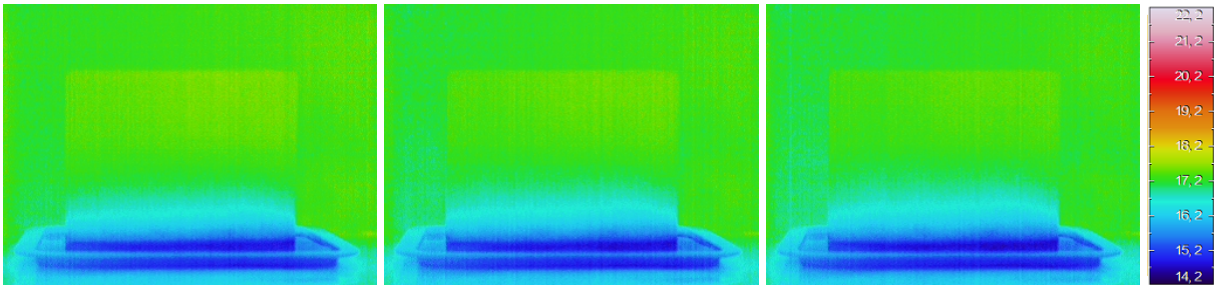
T015



T016

T017

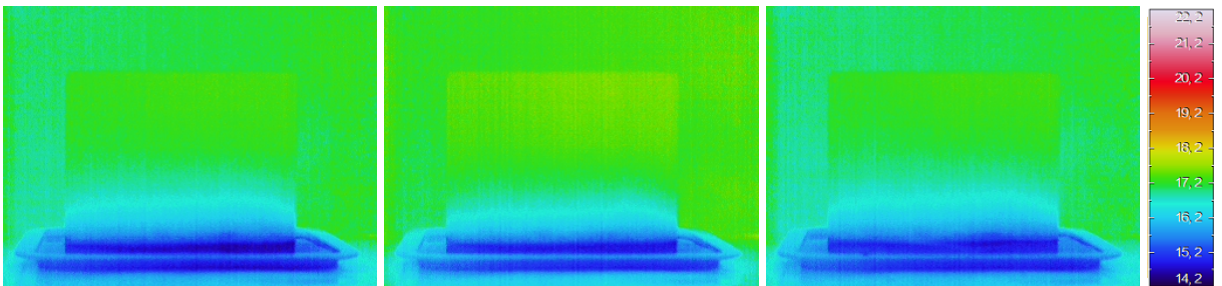
T018



T019

T020

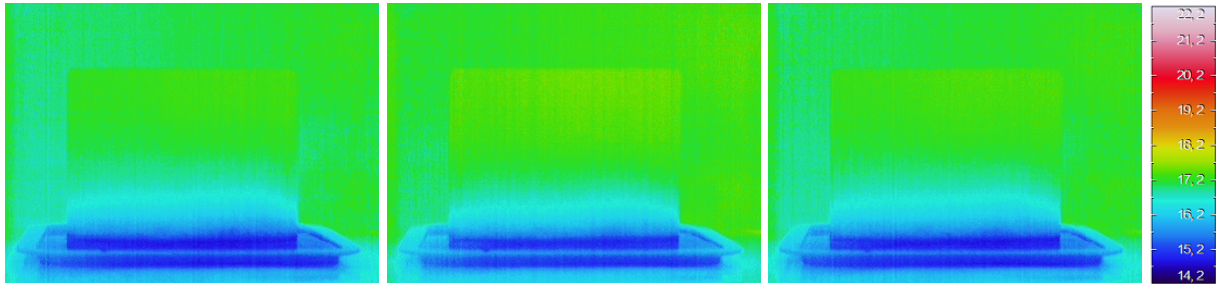
T021



T022

T023

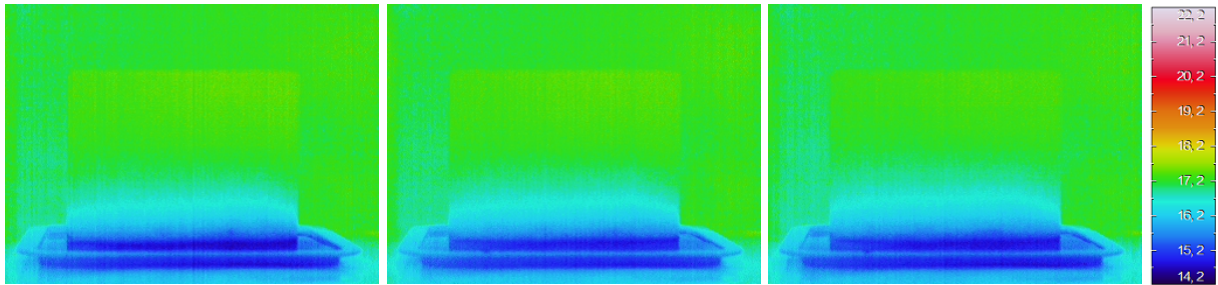
T024



T025

T026

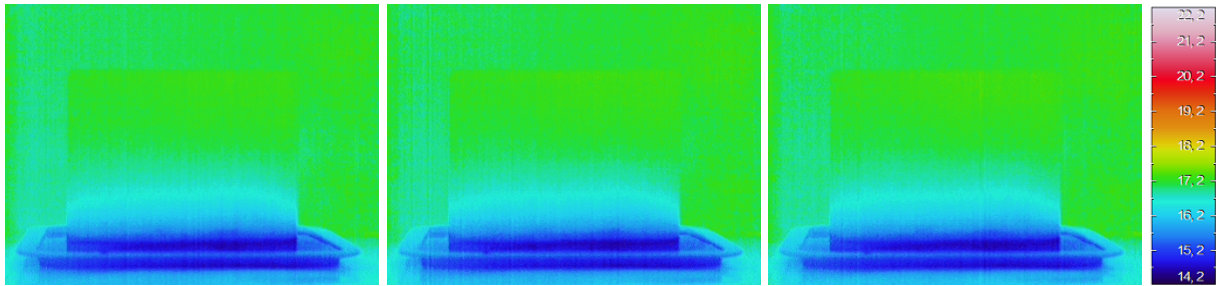
T027



T028

T029

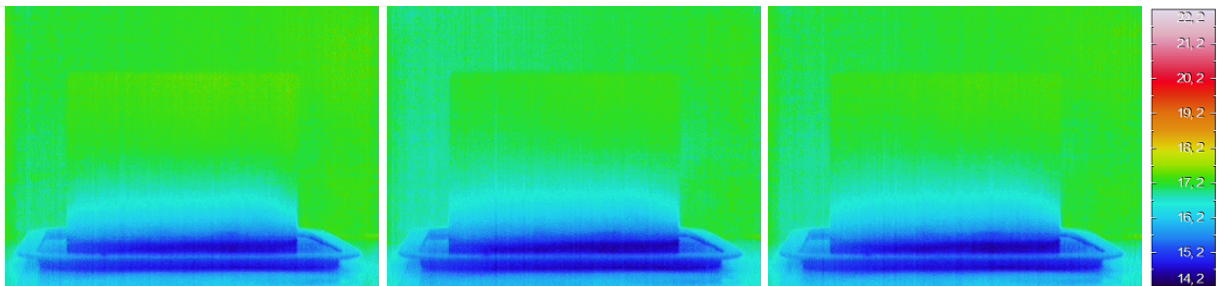
T030



T031

T032

T033

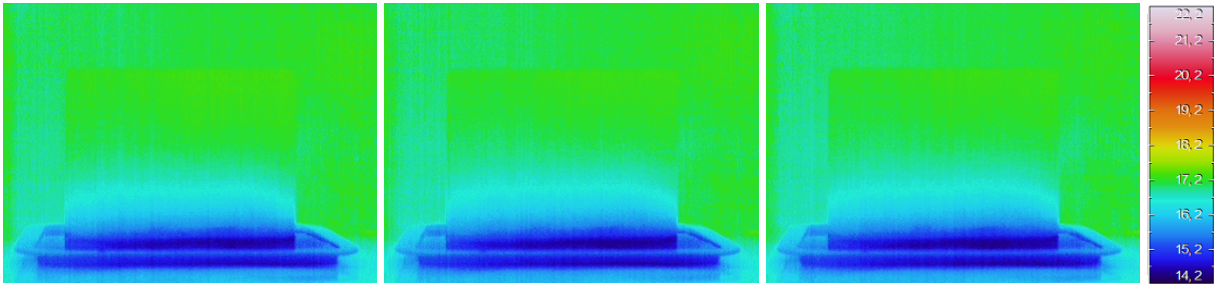


T034

T035

T036

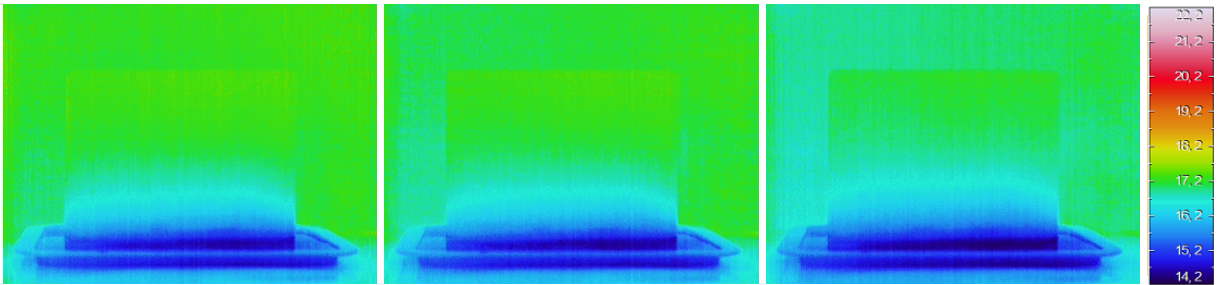




T037

T038

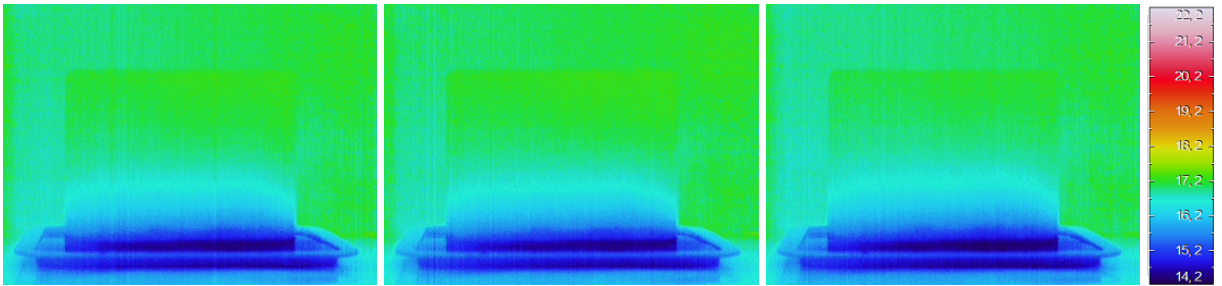
T039



T040

T041

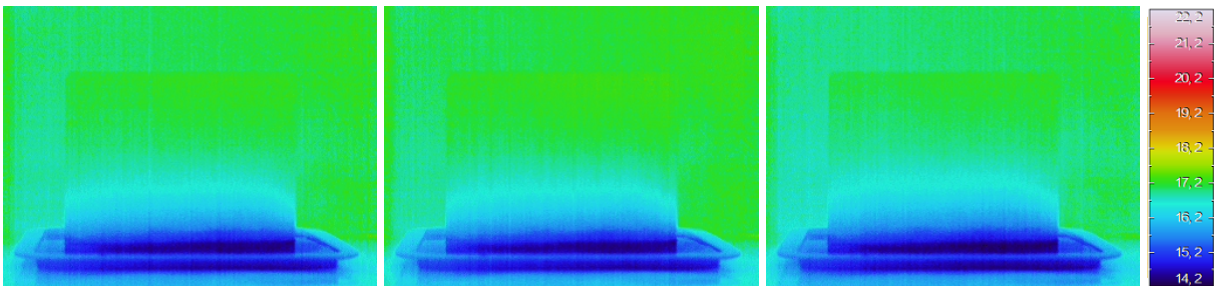
T042



T043

T044

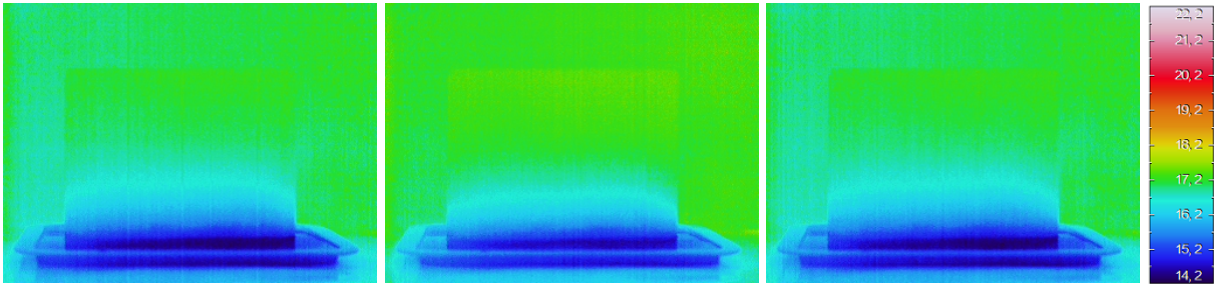
T45



T046

T047

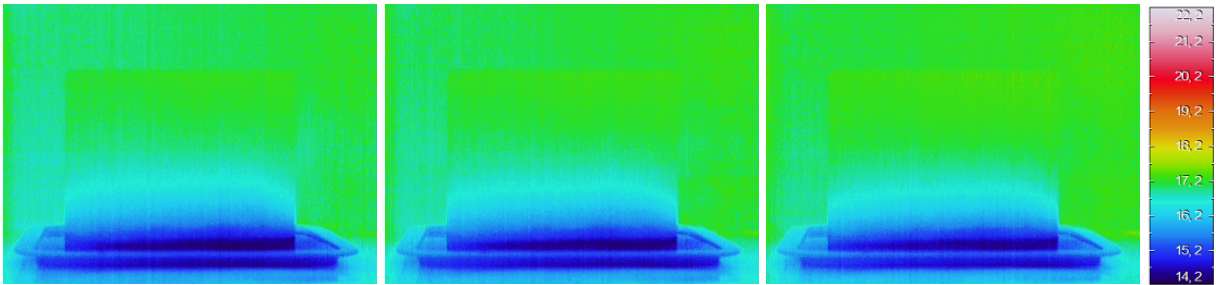
T048



T049

T050

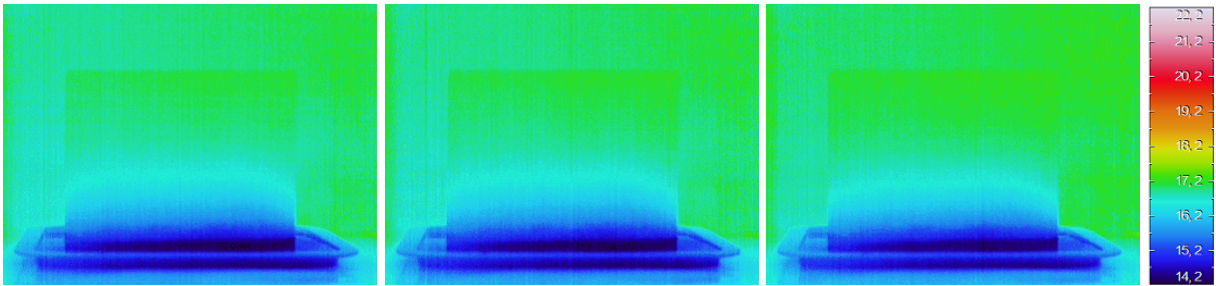
T051



T052

T053

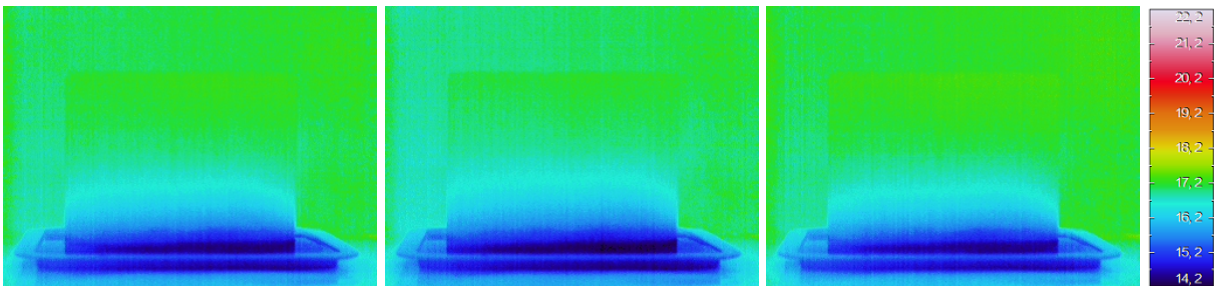
T054



T055

T056

T057

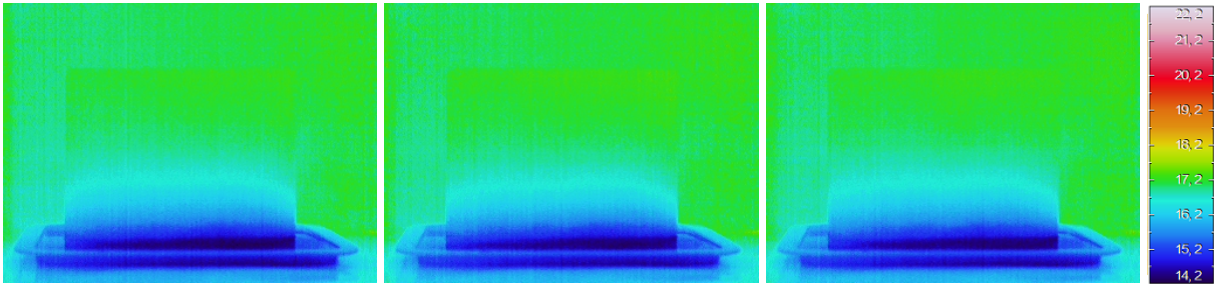


T058

T059

T060

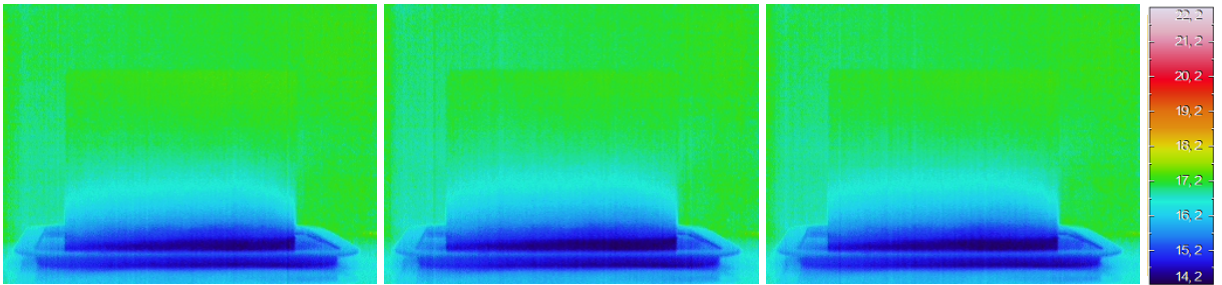




T061

T062

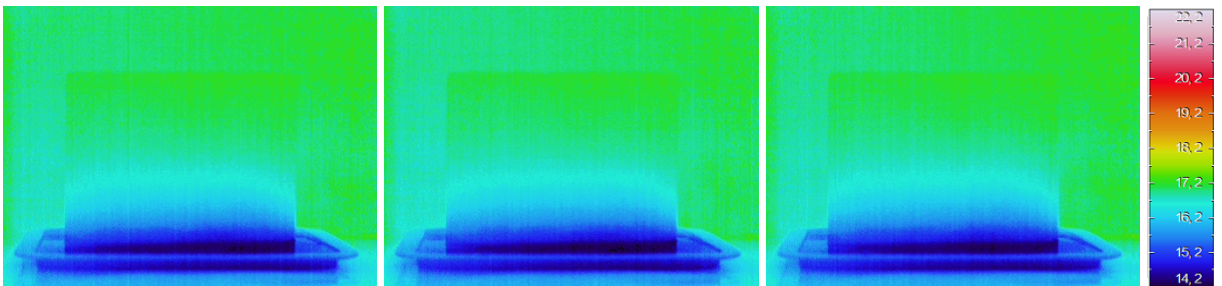
T063



T064

T065

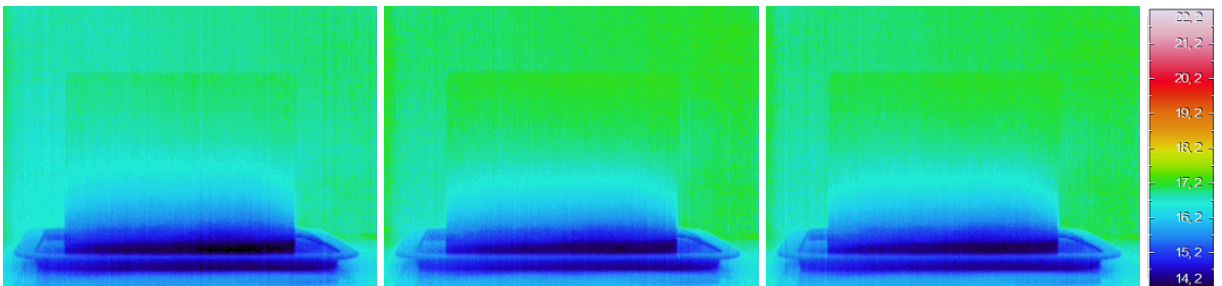
T066



T067

T068

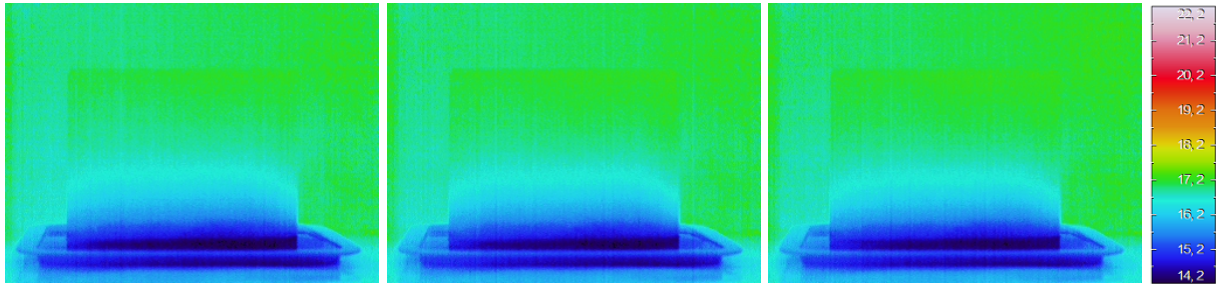
T069



T070

T071

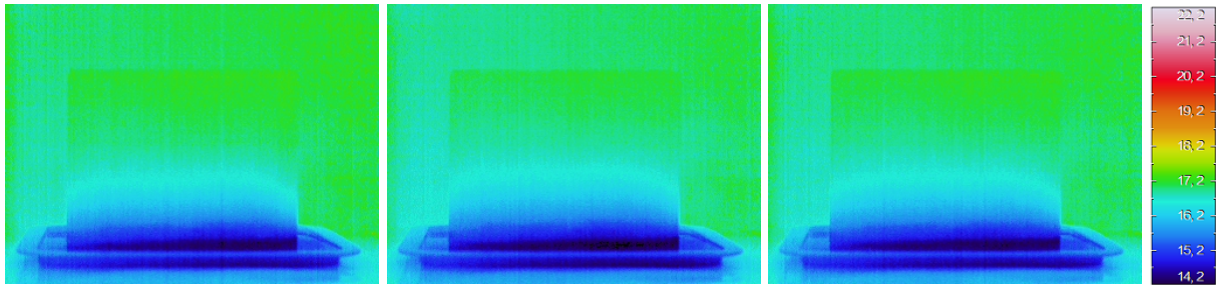
T072



T073

T074

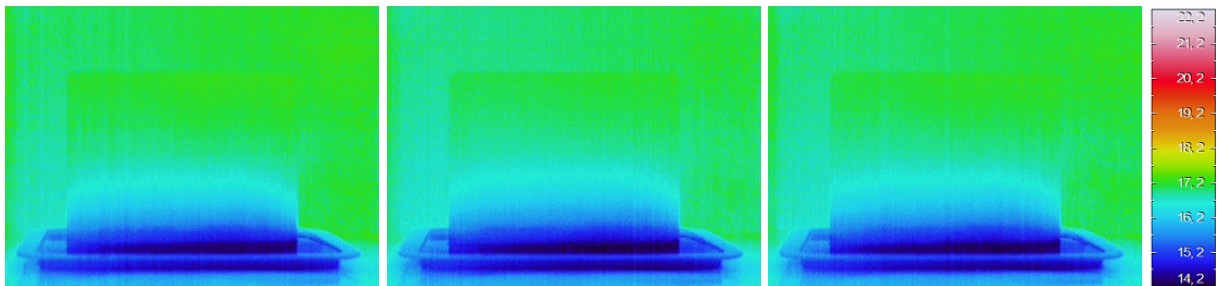
T075



T076

T077

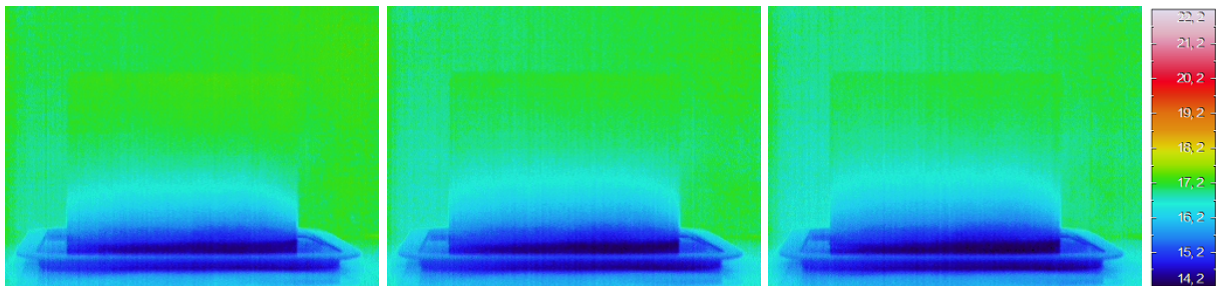
T078



T079

T080

T081

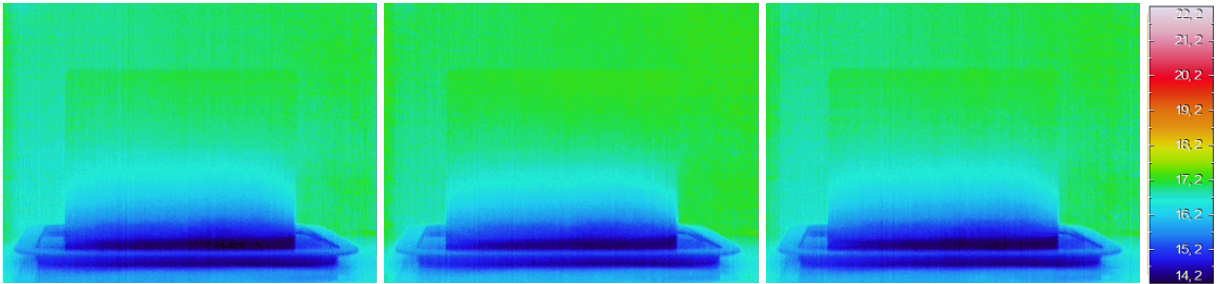


T082

T083

T084

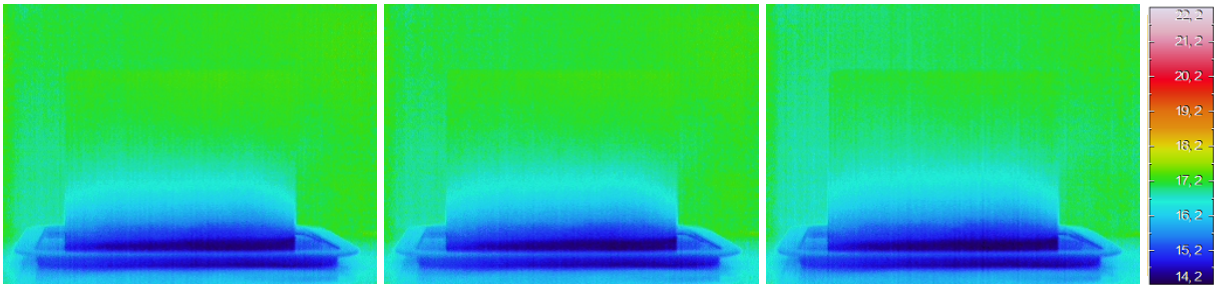




T085

T086

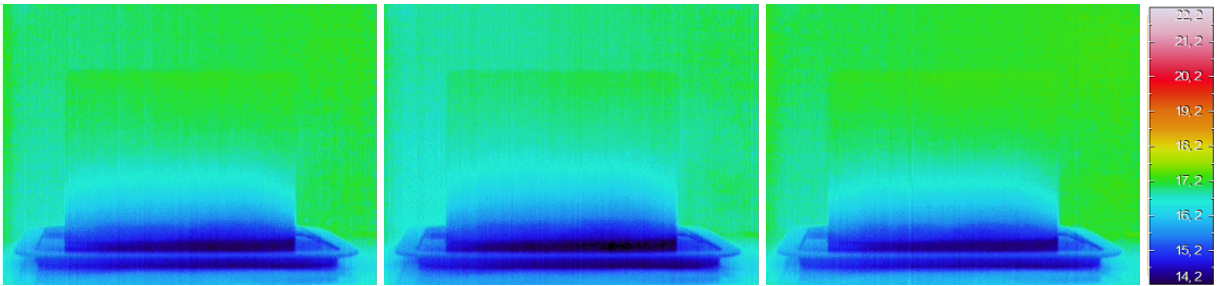
T087



T088

T089

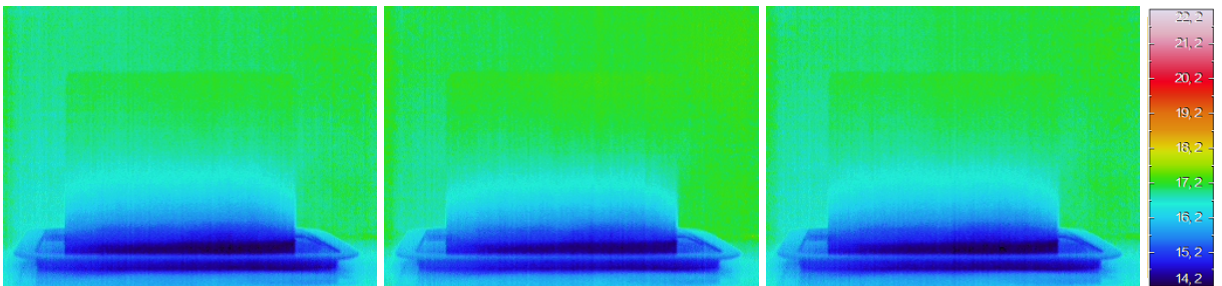
T090



T091

T092

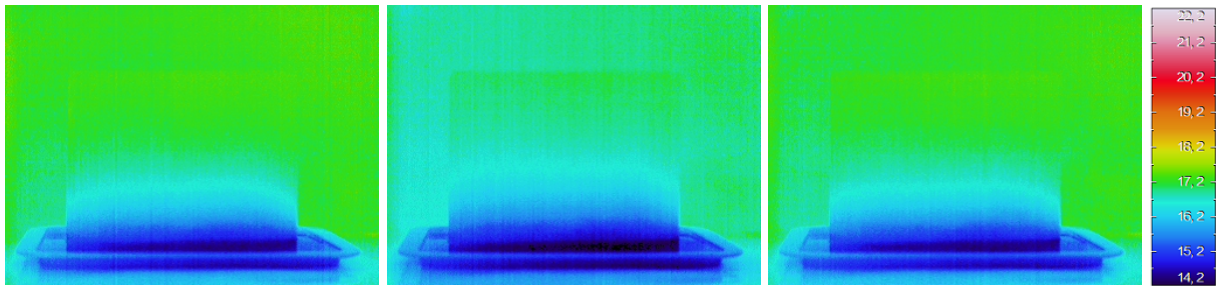
T093



T094

T095

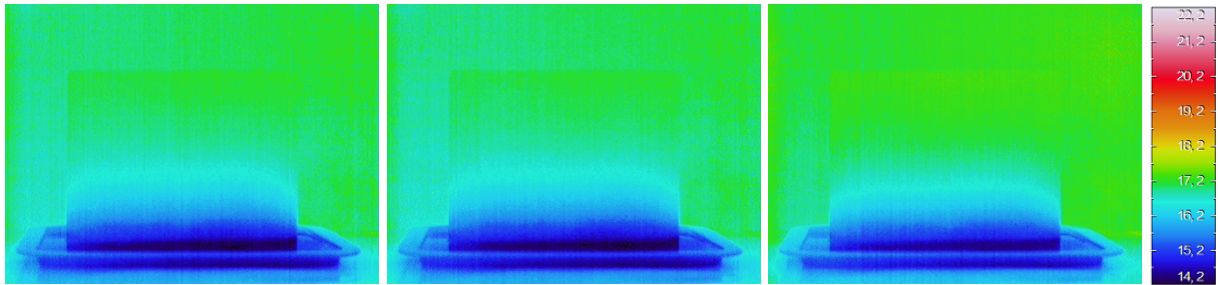
T096



T097

T098

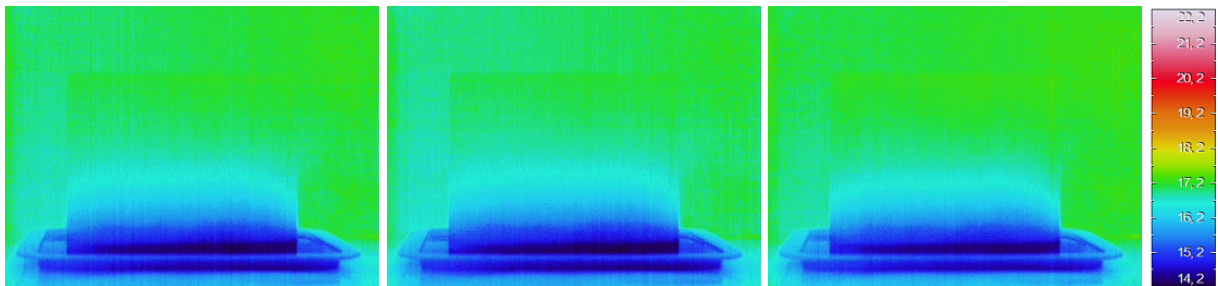
T099



T100

T101

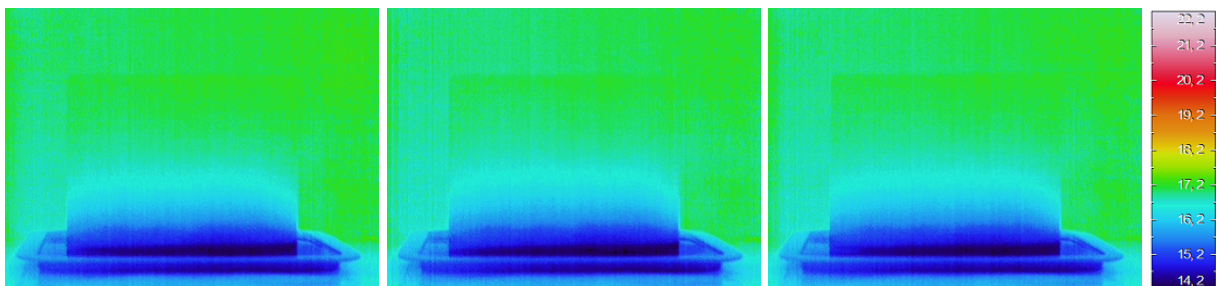
T102



T103

T104

T105

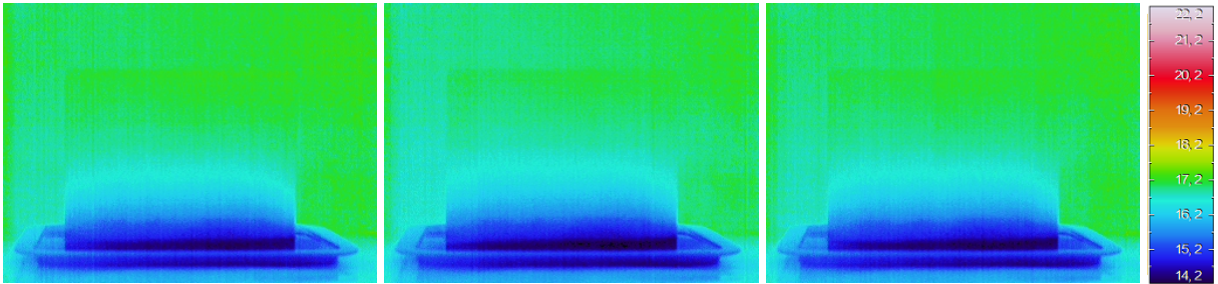


T106

T107

T108

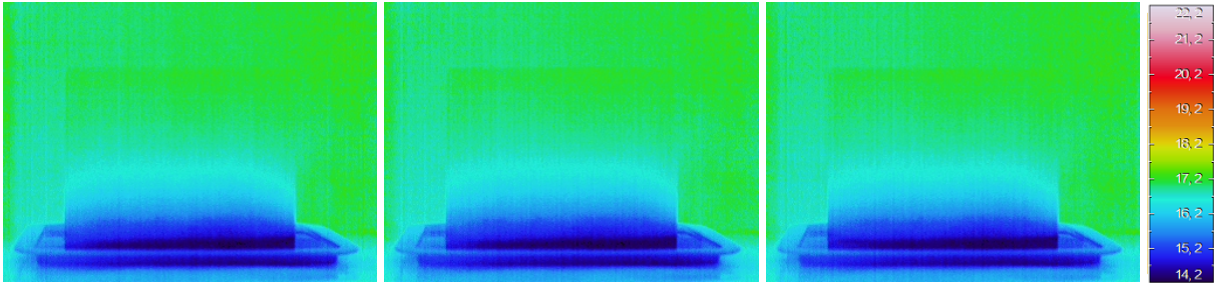




T109

T110

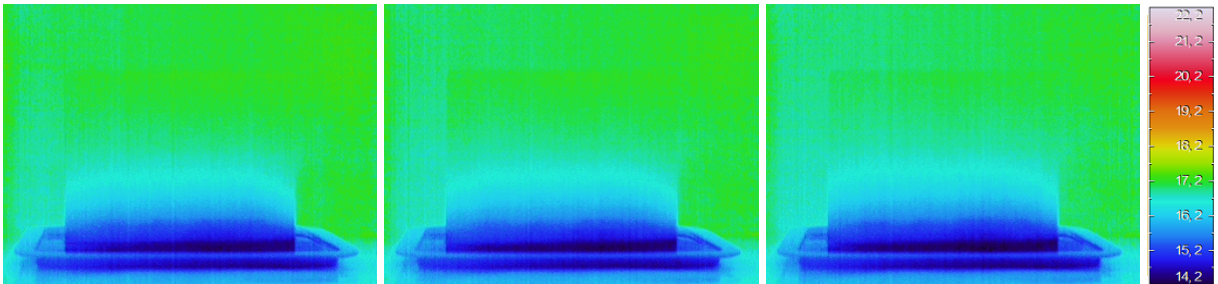
T111



T112

T113

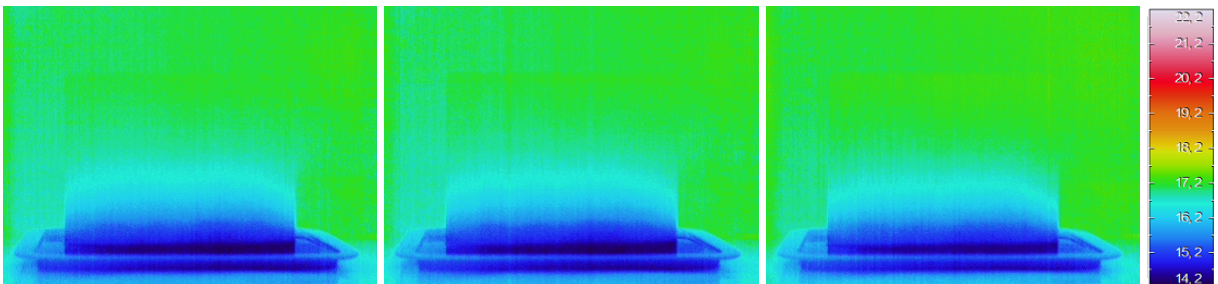
T114



T115

T116

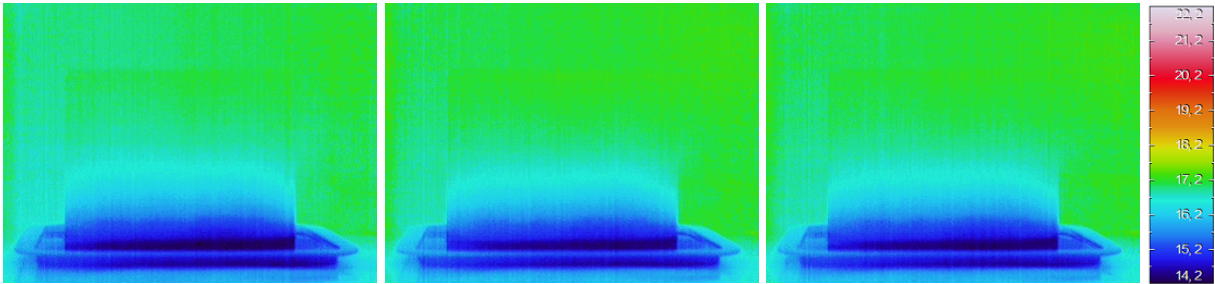
T117



T118

T119

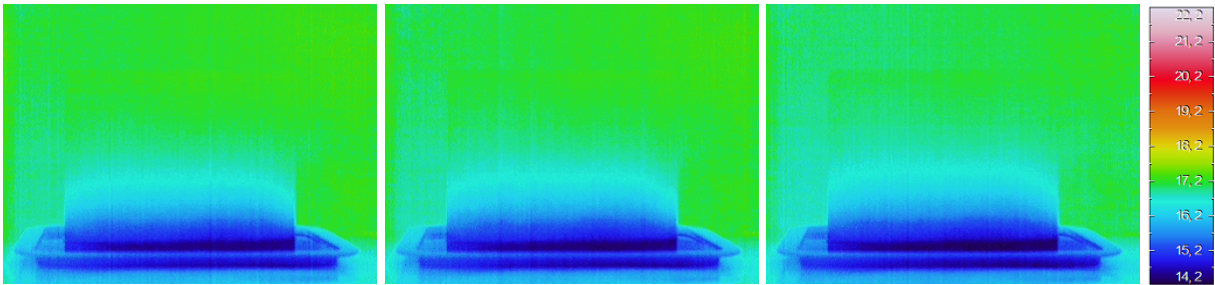
T120



T121

T122

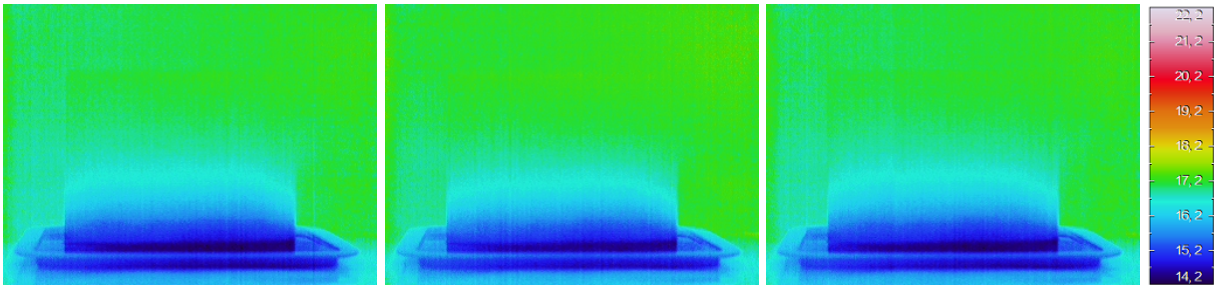
T123



T124

T125

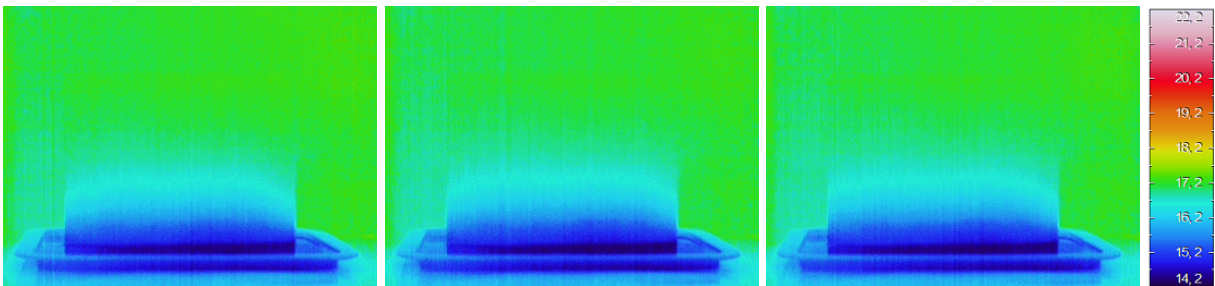
T126



T127

T128

T129

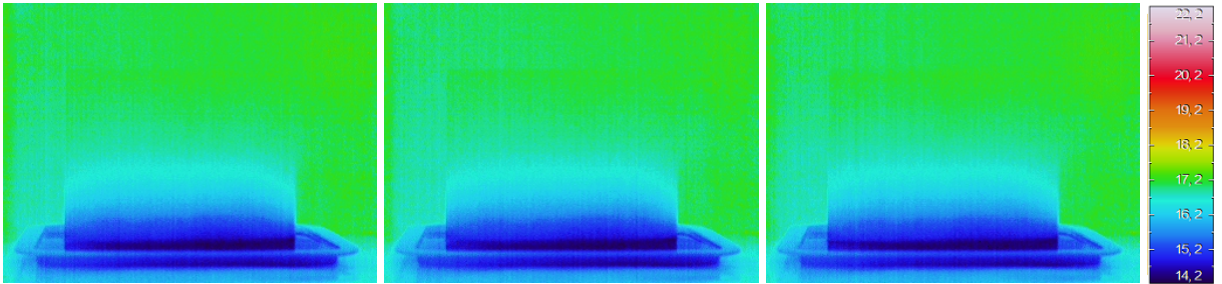


T130

T131

T132

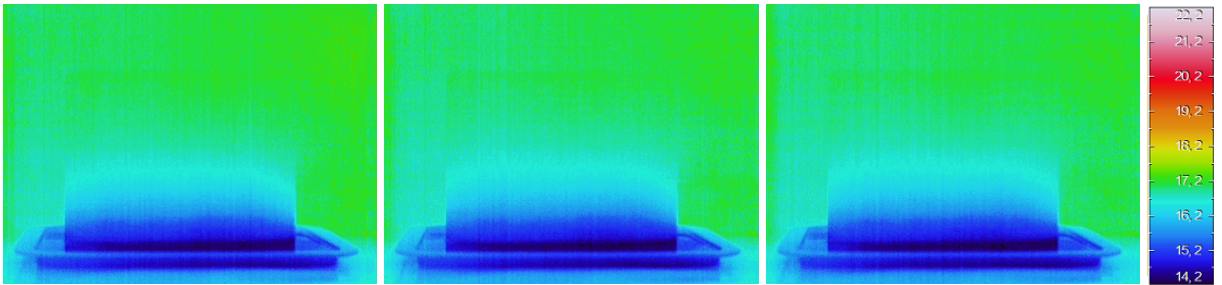




T133

T134

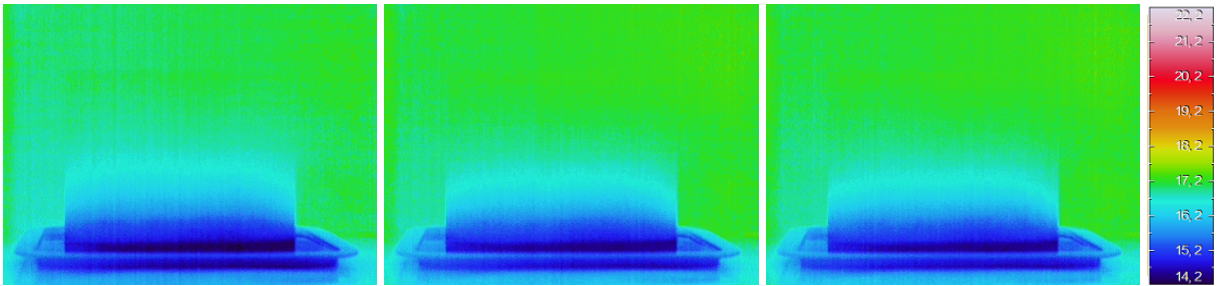
T135



T136

T137

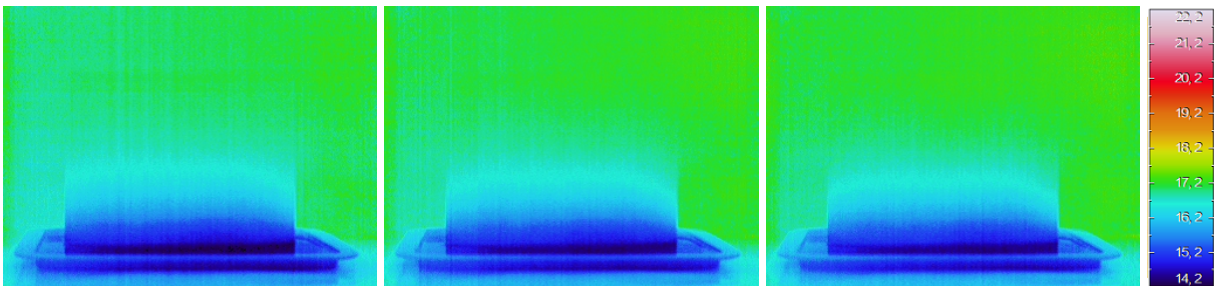
T138



T139

T140

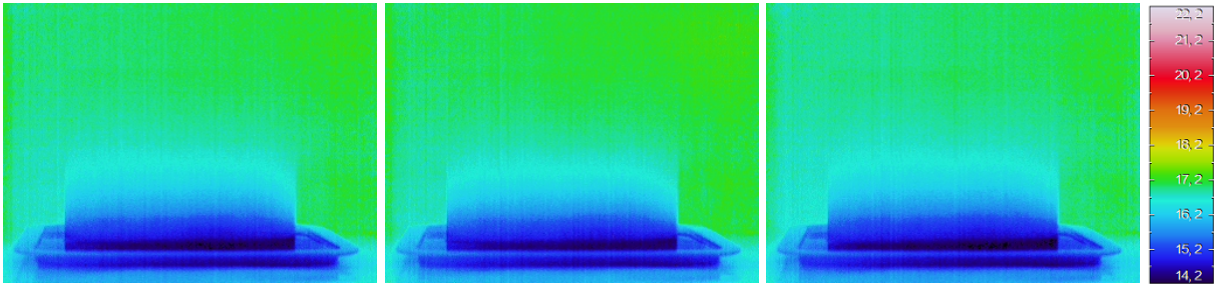
T141



T142

T143

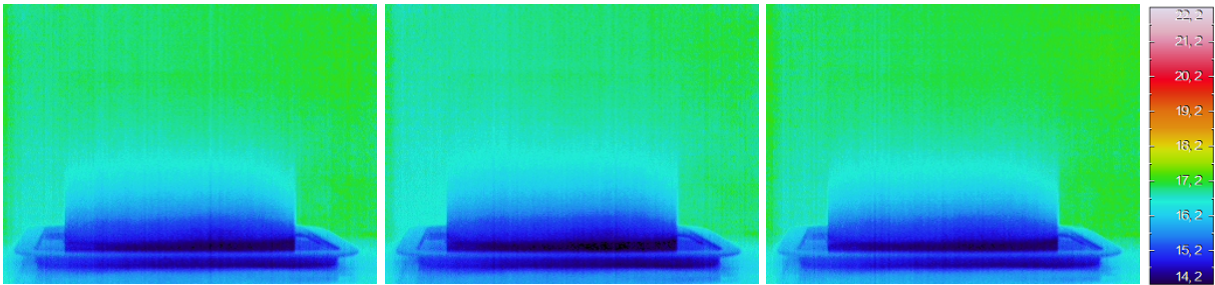
T144



T145

T146

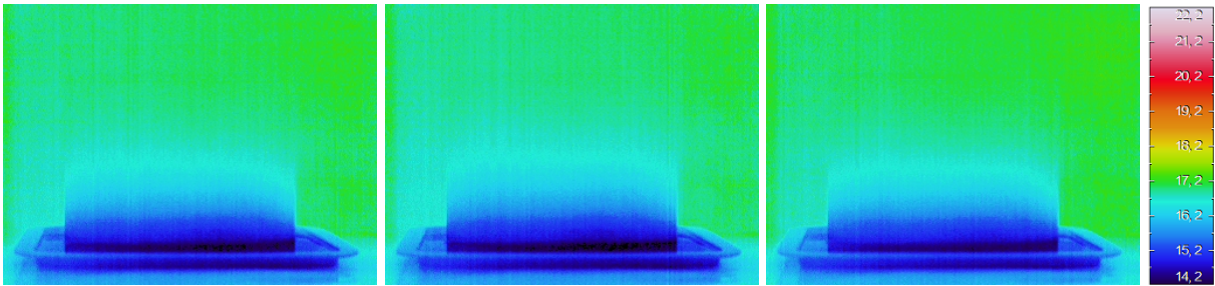
T147



T148

T149

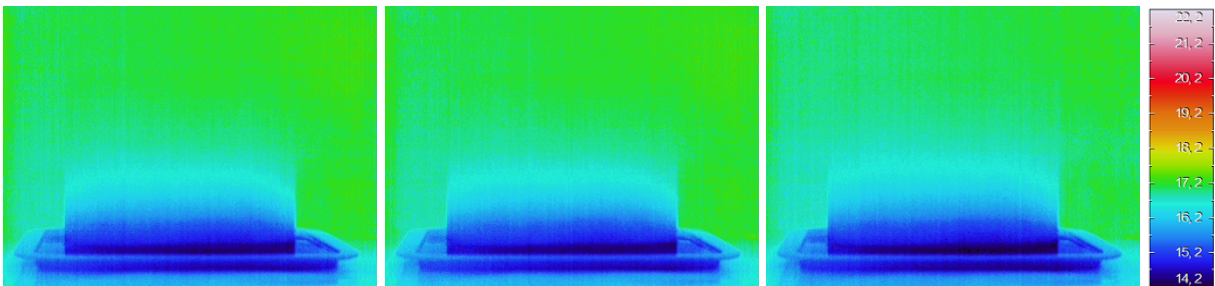
T150



T151

T152

T153

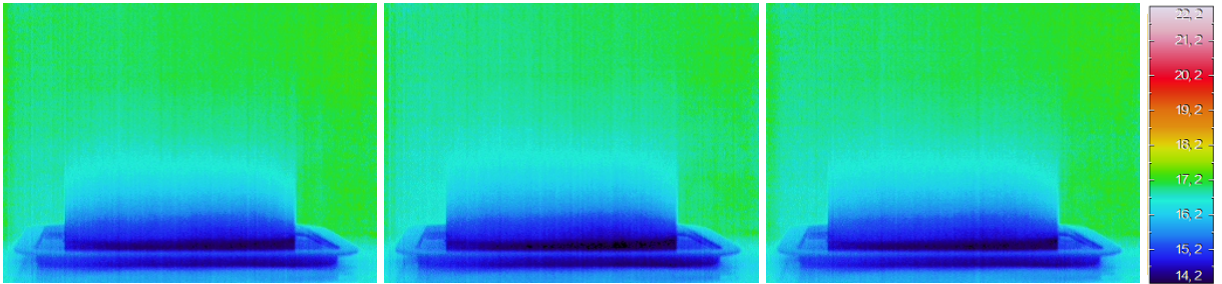


T154

T155

T156

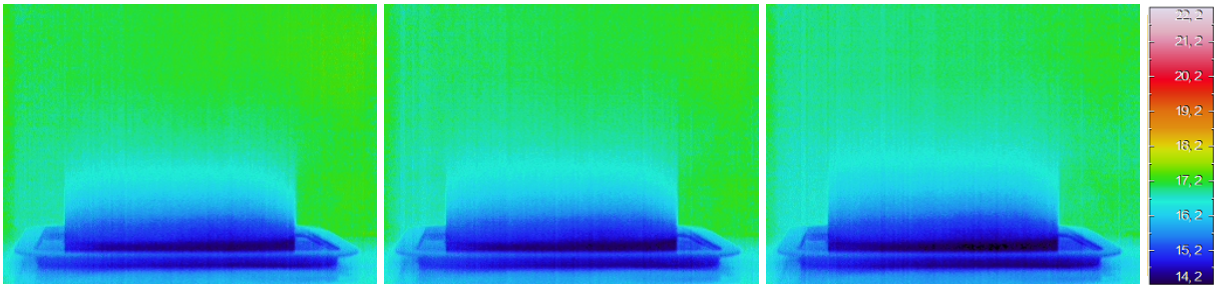




T157

T158

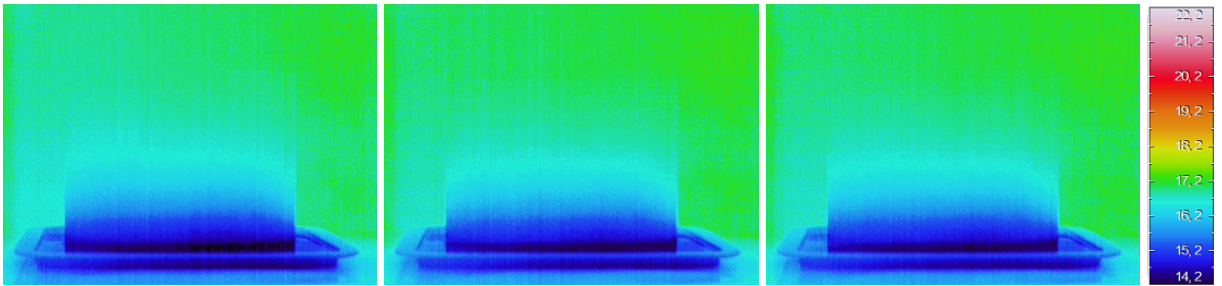
T159



T160

T161

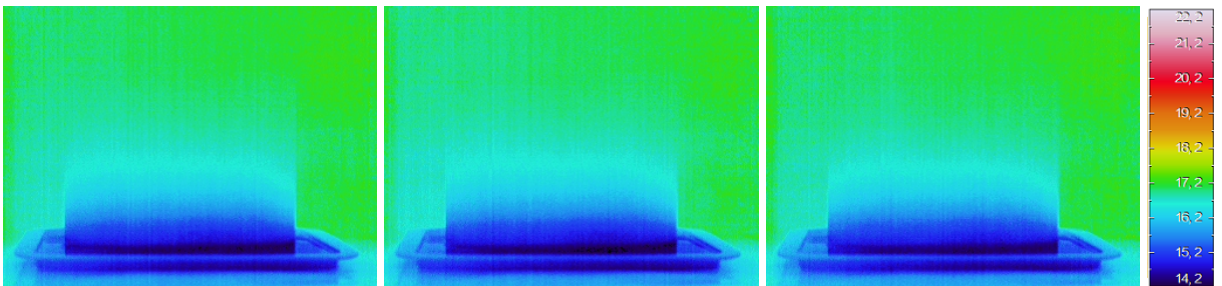
T162



T163

T164

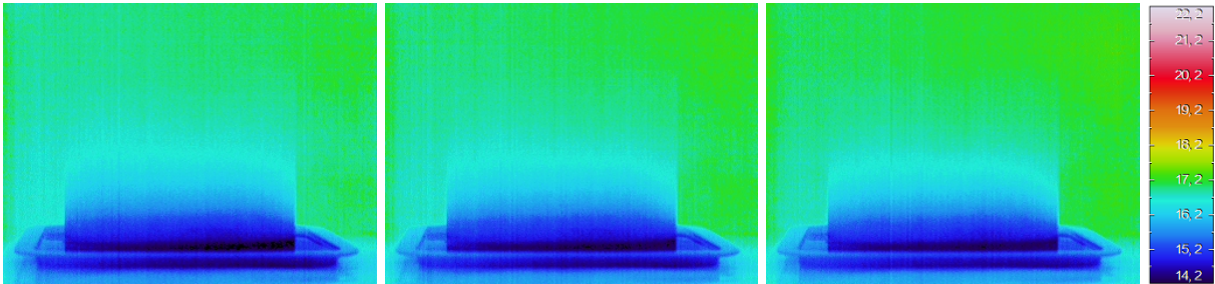
T165



T166

T167

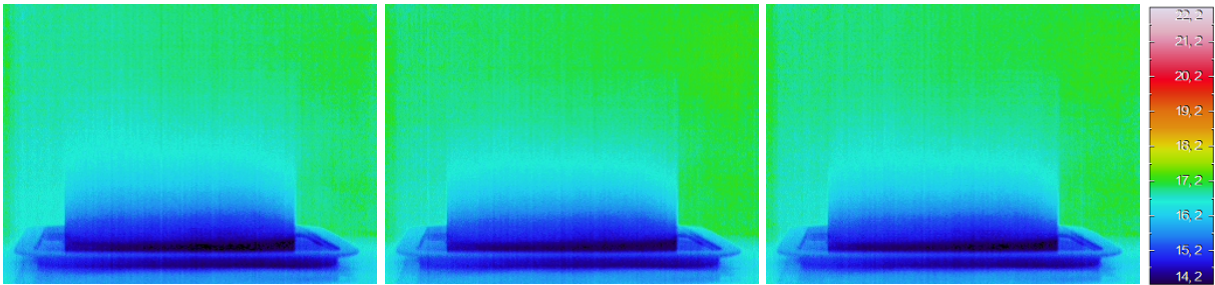
T168



T169

T170

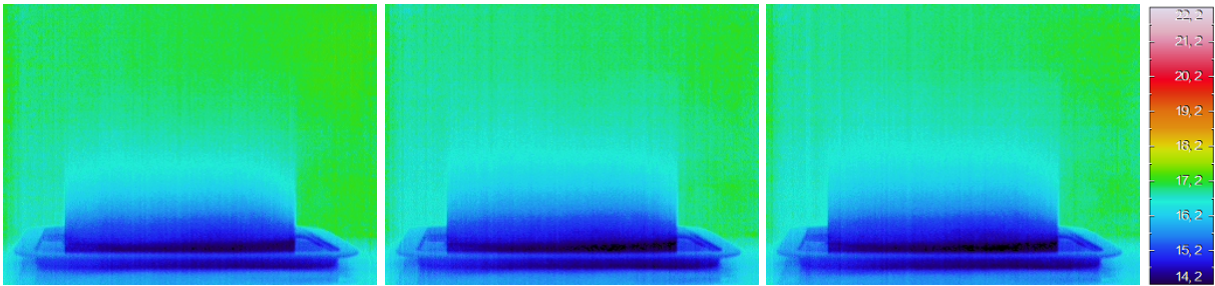
T171



T172

T173

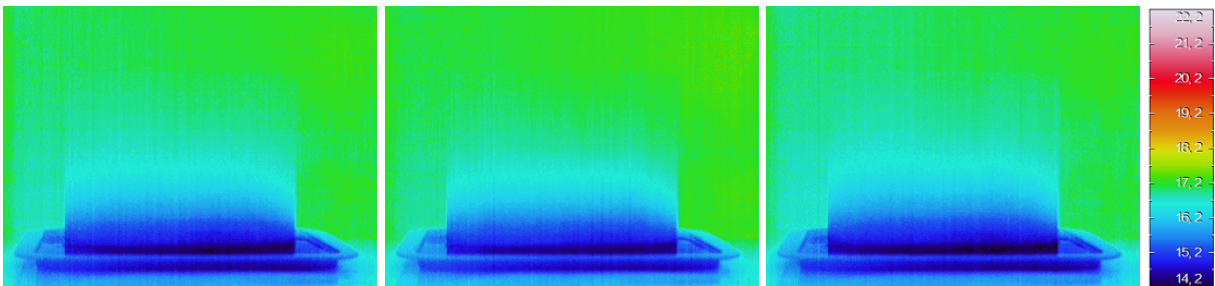
T174



T175

T176

T177

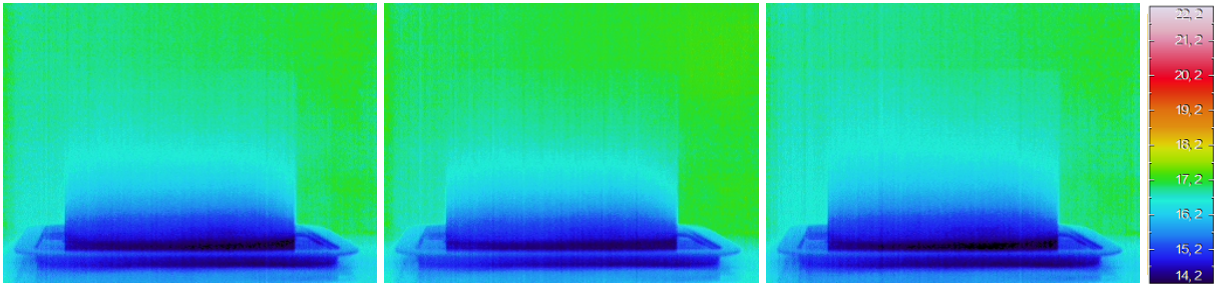


T178

T179

T180

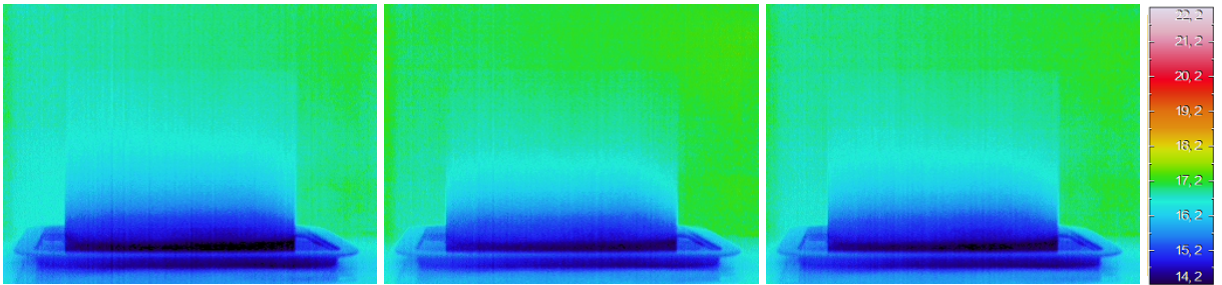




T181

T182

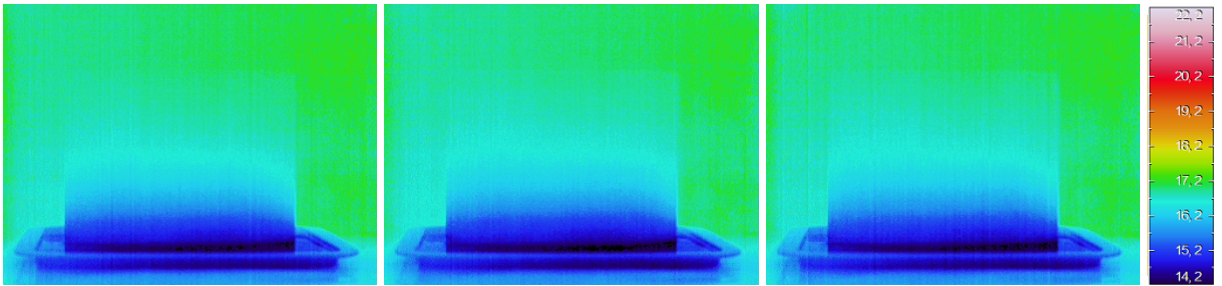
T183



T184

T185

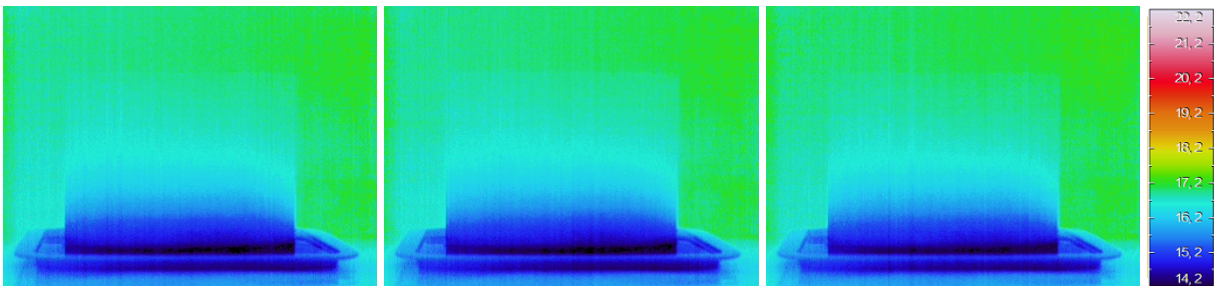
T186



T187

T188

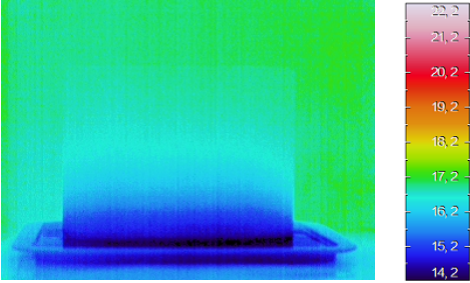
T189



T190

T191

T192



T193