

# **A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA AVALIAÇÃO DOS FENÓMENOS DE HUMIDIFICAÇÃO E SECAGEM**

**JOÃO PEDRO BORGES FERREIRA**

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: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de  
Almeida

JUNHO DE 2016

## MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

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 - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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.

Ao meu irmão Diogo

*O homem é do tamanho do seu sonho.*

*Fernando Pessoa*



## **AGRADECIMENTOS**

A realização de uma Tese de Mestrado compreende enriquecimento formativo e pessoal, com o intuito de acrescentar conhecimento em prol do avanço tecnológico. É uma tarefa individual, que depende de um conjunto de ajudas essenciais para o sucesso, seja ao nível material, seja ao nível espiritual.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Eva Barreira, por todo o seu apoio empenhado ao trabalho desenvolvido. A proposta de tema, a disponibilização de meios laboratoriais necessários ao seu estudo, o aconselhamento durante as várias fases do trabalho e a discussão do desenvolvimento do estudo são alguns dos aspetos que gostaria de destacar desta orientação. O empenho da Professora Doutora Eva Barreira permitiu o desenvolvimento do sentido crítico e de critério, numa envolvente de alto rendimento a um trabalho que, de outra forma, poderia não ter obtido os resultados atingidos.

Gostaria, também de agradecer ao meu coorientador, Professor Doutor Ricardo Almeida os ensinamentos e conhecimentos transmitidos, que foram essenciais para a concretização desta dissertação. E a disponibilidade muito relevante para a troca de ideias sobre assuntos muitas vezes áridos e onde faltam interlocutores.

Agradeço o apoio do LFC-FEUP – Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na disponibilização de materiais e equipamentos para realização dos ensaios laboratoriais, e a disponibilidade dos investigadores do laboratório. Agradeço também o valioso apoio na realização de provetes prestado pelo Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Viseu.

A minha família é, como sempre foi e sempre será, o meu apoio infindável. Obrigado a todos pelos seus ensinamentos, atenção e paciência que tiveram ao longo do meu percurso. Agradeço, em especial aos meus pais, João e Ludovina, pelos esforços realizados na aposta na melhor formação pessoal e profissional que tive. Ao meu irmão Diogo, pela preocupação atenta com desenvolvimento dos meus projetos. À Filipa Curinha, pela paciência e compreensão que evidenciou, ouvindo os meus lamentos nos momentos menos felizes deste percurso e, pela preocupação e amor que me enaltece.

Por último, a todos os meus amigos que me acompanharam durante o meu percurso, agradeço o apoio, a trocas de ideias críticas, os conselhos e os princípios transmitidos.



## RESUMO

A presença de humidade em elementos construtivos é um aspeto crucial do desempenho dos edifícios. Afeta significativamente a perceção da qualidade do ar, a durabilidade dos materiais de construção e o consumo de energia dos edifícios.

O desenvolvimento de estudos de avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem é indispensável para caracterizar o desempenho dos elementos construtivos e da envolvente dos edifícios. Estes conduzem ao aperfeiçoamento das soluções e à definição de regras qualitativas e quantitativas para a conceção e execução dos elementos construtivos, permitindo garantir a sua durabilidade e, fundamentalmente, assegurar o conforto dos utilizadores.

A presença de humidade nos elementos construtivos está associada a variações de temperatura e variações de massa, pelo que as suas medições poderão constituir um importante auxílio para a compreensão dos fenómenos capilares e gravíticos que ocorrem nos elementos.

A temperatura superficial dos objetos pode ser determinada com recurso à termografia de infravermelhos. A câmara de infravermelhos capta a radiação infravermelha, transformando-a em sinais elétricos proporcionais que definem uma imagem térmica ou termograma com a distribuição das temperaturas superficiais do corpo, em função de uma escala de cores de temperaturas.

No presente trabalho pretendeu-se aprofundar o estudo dos fenómenos inerentes à humedificação e secagem de elementos de betão leve.

O trabalho experimental desenvolvido foi composto por duas tarefas. A primeira pretendeu caracterizar a capacidade de absorção de água dos elementos de betão leve, para diferentes tipos de humedificação. Foi também caracterizada a secagem dos elementos de betão leve, para diferentes formas de secagem.

A análise qualitativa e quantitativa desta Dissertação foi suportada pelo programa *InfReC Analyzer*, que permite o processamento de imagens térmicas e uma modelação detalhada das variações superficiais de temperatura.

Foi também efetuada uma análise gravimétrica e uma análise com recurso ao humidímetro, para a avaliação da influência de alguns parâmetros que podem afetar os resultados obtidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Infravermelhos, Termografia, Comportamento Higrotérmico, Humidade, Secagem.



## ABSTRACT

The presence of moisture in the constructive elements is a crucial aspect of the performance of buildings. This significantly affects the perception of the air quality, the durability of construction materials and even the energy consumption of the buildings.

The development of evaluation studies of humidification and drying phenomena is indispensable to characterize the performance of the constructive elements and the surroundings of the buildings. Those studies lead to improvement certain solutions and enable to define of qualitative and quantitative roles related to the conception and implementation of constructive elements, allowing ensure their durability and, fundamentally, ensure users comfort.

The presence of moisture on the constructive elements is associated to temperature and mass variations, whereby their measurements could constitute an important contribution to the comprehension of the capillarity and gravitational processes that occur in elements.

The surface temperature of the objects can be determined through infrared thermography. The thermographic camera captures the infrared radiation and turns it in proportional electric signals which define one thermic image or thermogram with the distribution of surface temperatures of the body according to a particular color scale of temperatures.

The present study aimed to deepen the humidification and drying phenomena's of lightweight concrete elements.

The experimental work developed was composed for two tasks. The first intended to characterize the water absorption capability of lightweight concrete elements, according to different types of humidification. On the other hand, the drying of that material was also evaluated for different drying manners

The qualitative and quantitative analysis of this thesis was supported by the *InfReC Analyzer* software, Moreover, qualitative and quantitative analysis of this study were supported by the *IfrRec Analyzer* program, which allows the thermal images processing coupled with a detailed modeling of surface temperature variations.

It was also performed a gravimetric analysis and an evaluation with recourse to humidimetre in order to detect the assessment of the influence of certain parameters which could affect the results obtained.

**KEYWORDS:** Infrared thermography, Hygrothermal Behavior, Humidity, Drying.



## ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice Geral .....	vii
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas.....	vii
Simbologia e Abreviaturas.....	viii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO .....	3
<b>2. A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA DETEÇÃO DE HUMIDADE .....</b>	<b>5</b>
2.1. IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE PRESENÇA DE HUMIDADE .....	5
2.2. TERMOGRAFIA.....	6
2.2.1. Definição de termografia de infravermelhos .....	6
2.2.2. Termografia ativa e termografia passiva .....	8
2.3. APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA ANÁLISE DA HUMIDADE .....	10
2.4. TRABALHOS REALIZADOS POR DIVERSOS AUTORES .....	11
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA .....	17
3.2. EQUIPAMENTOS.....	18
3.3. MATERIAIS .....	23
3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	24
3.4.1. Procedimentos preliminares .....	24
3.4.2. Planos de ensaios .....	26

<b>4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. NOTA INTRODUTÓRIA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. ANÁLISE QUALITATIVA DOS TERMOGRAMAS .....</b>	<b>33</b>
4.2.1. Variante I – Tipo de humidificação.....	33
4.2.2. Variante II – Tipo de secagem.....	38
4.2.3. Variante III – Ponto de secagem inicial .....	40
<b>4.3. AVALIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DOS PROVETES .....</b>	<b>43</b>
4.3.1. Variante I – Tipo de humidificação.....	43
4.3.2. Variante II – Tipo de secagem.....	45
4.3.3. Variante III – Ponto de secagem inicial .....	49
4.3.4. Apreciação dos resultados .....	51
<b>4.4. RESULTADOS DO HUMÍDÍMETRO.....</b>	<b>52</b>
4.4.1. Variante I – Tipo de humidificação.....	52
4.4.2. Variante II – Tipo de secagem.....	53
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DOS PROVETES.....</b>	<b>57</b>
5.1.1. Variante I – Tipo de humidificação.....	58
5.1.2. Variante II – Tipo de secagem.....	62
5.1.3. Variante III – ponto de secagem inicial.....	64
<b>5.2. AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA MASSA E A TEMPERATURA SUPERFICIAL .....</b>	<b>68</b>
5.2.1. Variante I – Tipo de humidificação.....	68
5.2.2. Variante II – tipo de secagem.....	70
5.2.3. Variante III – Ponto de secagem inicial .....	72
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>75</b>
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>76</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>77</b>

**Anexo I – Planos de Ensaios**

**Anexo II– Termogramas Efetuados**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1.- Espectro Eletromagnético [5] .....	7
Fig. 2.2.- Radiação incidente ( $E_i$ ), absorvida ( $E_\alpha$ ), refletida ( $E_\rho$ ) e transmitida ( $E_\tau$ ) [8].....	7
Fig. 2.3.- Técnicas de termografia ativa e passiva [13] .....	8
Fig. 2.4.- Posicionamento da fonte de calor na termografia ativa: (a) inspeção por reflexão; (b) inspeção por transmissão [14] .....	9
Fig. 2.5.- Técnica de termografia passiva [14] .....	9
Fig. 2.6.- Aquecimento da parede e gráfico de evolução da temperatura [21] .....	11
Fig. 2.7.- Termogramas de um provete de betão celular após 168 horas de absorção (emissividade de 0,85) [22] .....	12
Fig. 2.8.- Imagem detalhada onde é possível ver as diferenças detetadas por imagens infravermelhas (a) e (c), e por imagens visíveis (b) e (d) [25] .....	12
Fig. 2.9.- (a) Ratio de Evaporação ( $RE$ ) em função da humidade presente num tijolo de espessura de 28mm; A linha vermelha vertical indica o ponto crítico de humidade. (b) Avaliação qualitativa por infravermelhos da quantidade crítica de humidade. [26] .....	13
Fig. 2.10.- Variação visível do nível de humidade acima da linha de água ( $h_{\text{visible}}$ ), o nível de água mais elevado acima da linha de água medido através do detetor de humidade ( $h_{\text{detector}}$ ) e a diferença de temperatura entre as áreas secas e húmidas ( $T_{\text{dry}} - T_{\text{wet}}$ ). [28] .....	14
Fig. 2.11.- Imagens termográficas de três estágios do processo de evaporação. De seis amostras, as duas primeiras (à esquerda) correspondem (a); A duas ao centro à curva (b); e as últimas duas (à direita) à curva (c). Nesta escala de cores, o preto indica baixas temperaturas (acima dos 18,7 °C), e a cor branco indica altas temperaturas (a temperatura ambiente é de 24,3 °C) [30]. .....	15
Fig. 2.12.- Gráficos explicitam a percentagem de peso seco em função da humidade, e ilustra como a perda de peso das amostras se desenvolve ao longo do tempo [30]. .....	15
Fig. 3.1.- Câmara de Infravermelhos Thermo Tracer TH9100 MR [31] .....	20
Fig. 3.2.- a) Câmara climática Fitoclima 1000 EDTU; (b) Câmara visitável .....	20
Fig. 3.3.- Humidímetro CEBTP Type MX-HU .....	21
Fig. 3.4.- Estufa WTC Binder .....	22
Fig. 3.5.- Provetes de betão leve a ensaiar .....	23
Fig. 3.6.- Disposição dos equipamentos e dos provetes no interior da câmara climática .....	24
Fig. 3.7.- Provete de betão leve no interior de uma caixa estanque preenchida com sílica gel .....	28
Fig. 3.8.- Termogramas de ensaio preliminar. (a) termograma às 00:00h; (b) termograma às 01:00h; (c) termograma às 02:00h; (d) termograma às 06:00h .....	28
Fig. 3.9.- Provete com silicone e água .....	29
Fig. 4.1.- Termogramas obtidos durante a humedificação no ensaio I.1. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:10h; (c) termograma às 00:40h; (d) termograma às 1:05h; (e) termograma às 1:45h; (f) termograma às 24h .....	34

Fig. 4.2.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.1. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 03:30h; (c) termograma às 09:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72h .....	35
Fig. 4.3.- Termogramas obtidos durante a humidificação no ensaio I.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 1:35h; (c) termograma às 02:00h; (d) termograma às 3:05h; (e) termograma às 15:30h; (f) termograma às 24h .....	36
Fig. 4.4.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 03:30h; (c) termograma às 10:00h; (d) termograma às 24h; (e) termograma às 48h; (f) termograma às 72h .....	36
Fig. 4.5.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 05:30h; (c) termograma às 12:00h; (d) termograma às 24h; (e) termograma às 48h; (f) termograma às 72h .....	37
Fig. 4.6.- Termogramas obtidos durante o ciclo de secagem do ensaio II.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h .....	38
Fig. 4.7.- Termogramas obtidos durante o ciclo de secagem do ensaio II.3A. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:10h; (c) termograma às 2:00h; (d) termograma às 3h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h .....	39
Fig. 4.8.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio II.3B. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:20h; (c) termograma às 00:40h; (d) termograma às 1:40h; (e) termograma às 4:10h; (f) termograma às 8h .....	39
Fig. 4.9.- Termogramas obtidos durante o ciclo de humidificação do ensaio III.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h.....	40
Fig. 4.10.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio III.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 6:00h; (c) termograma às 19:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72:00h.....	41
Fig. 4.11.- Termogramas obtidos durante a humidificação no ensaio III.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h. ....	41
Fig. 4.12.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio III.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 6:00h; (c) termograma às 19:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72:00h.....	42
Fig. 4.13.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante I .....	44
Fig. 4.14.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante II.....	47
Fig. 4.15.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante II.....	48
Fig. 4.16.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante III.....	50
Fig. 4.17.- Termogramas obtidos durante a secagem e resultados da medição com o humidímetro no ensaio I.3. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 24h; (e) e (f) correspondem às 72h.....	52

Fig. 4.18.- – Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.2. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 1:30h; (e) e (f) correspondem às 8h.....	53
Fig. 4.19.- Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.3A. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 2:00h; (e) e (f) correspondem às 8h.....	54
Fig. 4.20.- Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.3B. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 2:00h; (e) e (f) correspondem às 8h.....	55
Fig. 5.1.- Esquema ilustrativo dos pontos de temperatura medidos .....	57
Fig. 5.2.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.1 para o ciclo de humidificação .....	58
Fig. 5.3.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humidificação do ensaio I.1 .....	59
Fig. 5.4.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.1 para o ciclo de secagem .....	59
Fig. 5.5.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.2 para o ciclo de humidificação .....	60
Fig. 5.6.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humidificação do ensaio I.2 .....	61
Fig. 5.7.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.2 para o ciclo de secagem .....	61
Fig. 5.8.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.3 para o ciclo de secagem .....	62
Fig. 5.9.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.2 para o ciclo de secagem .....	63
Fig. 5.10.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.3A para o ciclo de secagem .....	63
Fig. 5.11.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.3B para o ciclo de secagem .....	64
Fig. 5.12.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.2 para o ciclo de humidificação .....	64
Fig. 5.13.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humidificação do ensaio III.2.....	65
Fig. 5.14.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.2 para o ciclo de secagem .....	66
Fig. 5.15.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.3 para o ciclo de humidificação .....	66
Fig. 5.16.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.3 para o ciclo de secagem .....	67

Fig. 5.17.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.1 .....	68
Fig. 5.18.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.2 .....	68
Fig. 5.19.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.3 .....	69
Fig. 5.20.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.2 .....	70
Fig. 5.21.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.3A .....	70
Fig. 5.22.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.3B .....	71
Fig. 5.23.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial dos ensaios da variante II para o ponto mais desfavorável .....	72
Fig. 5.24.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial III.2 .....	72
Fig. 5.25.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial III.3 .....	73

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Características da câmara termográfica Thermo Tracer TH9100 MR [31,32] .....	18
Tabela 3.2- Especificações Técnicas do Humidímetro CEBTP Type MX-HU [34].....	22
Tabela 3.3- Características dos provetes de betão leve .....	23
Tabela 3.4- Ensaio Realizados .....	26
Tabela 3.5- Valores da velocidade do fluxo do ar.....	30
Tabela 4.1- Variação da massa ao longo do ensaio I.1 .....	43
Tabela 4.2- Variação da massa ao longo do ensaio I.2 .....	43
Tabela 4.3- Variação da massa ao longo do ensaio I.3 .....	44
Tabela 4.4- Variação da massa ao longo do ensaio II.2 .....	45
Tabela 4.5- Variação da massa ao longo do ensaio II.3A .....	46
Tabela 4.6- Variação da massa ao longo do ensaio II.3B .....	46
Tabela 4.7- Variação da massa ao longo do ensaio III.2 .....	49
Tabela 4.8- Variação da massa ao longo do ensaio III.3 .....	49

## **SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS**

Fig. – Figura

Ref. – Referência

$\pi$  – Permeabilidade ao vapor

$\mu$  – Fator de resistência à difusão de vapor do provete de betão leve

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

$w$  – Teor de humidade [%]

$m_i$  – Massa inicial da amostra no instante  $i$  [kg]

$m_s$  – Massa da amostra seca [kg]

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A humidade em elementos construtivos é um parâmetro fundamental para a avaliação do seu desempenho, contribuindo diretamente para a definição de exigências de conforto higrotérmico e higroscópico. A relação entre os fenómenos de humedificação e os fenómenos de secagem permite identificar exigências de durabilidade e conforto das construções, relativamente às quais, o desempenho dos edifícios será afetado por um mau controlo desse parâmetro. A presença de humidade agrava o consumo de energia dos edifícios, pelo que o seu controlo é uma estratégia a privilegiar.

A grande maioria das patologias dos materiais e componentes de construção estão associadas às solicitações da humidade e da temperatura, pelo que a sua medição poderá constituir um importante auxílio para a compreensão dos fenómenos subjacentes.

A variação dos fenómenos de humedificação e dos fenómenos de secagem é influenciada por um grande número de fatores. A humidade relativa ambiente, a temperatura ambiente e a ventilação são alguns desses fatores.

A temperatura superficial dos objetos pode ser determinada com recurso a equipamentos de termografia de infravermelhos. A câmara de infravermelhos capta a radiação infravermelha, transformando-a em sinais elétricos proporcionais que definem uma imagem térmica ou termograma com a distribuição das temperaturas superficiais do corpo, em função de uma escala de cores de temperaturas.

O recurso à termografia apresenta como principais vantagens permitir a deteção de objetos não visíveis a olho nu, em tempo real e sem contacto físico, ser uma técnica não destrutiva e de larga escala. Constitui por isso, uma importante ferramenta de diagnóstico em inúmeros domínios.

A utilização da termografia nos ensaios permite a realização de uma análise qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa apenas se pretende identificar as diferenças visuais de temperatura nas superfícies em estudo. Em contrapartida, a análise quantitativa visa uma análise mais profunda e rigorosa na determinação da temperatura superficial dos materiais e componentes.

A realização de ensaios termográficos, entre vários parâmetros, permite detetar a presença de humidade nos materiais, devido às heterogeneidades térmicas criadas nos processos de humedificação e secagem.

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

Os processos de humedificação e secagem são fenómenos extremamente importantes para a área da construção. O seu estudo torna-se relevante para uma melhor compreensão dos fenómenos que lhes são inerentes, com vista a mitigar e a solucionar as patologias e anomalias geradas pela presença de humidade.

A termografia de infravermelhos apresenta uma grande potencialidade como técnica de análise destes fenómenos. Contudo, devido à complexidade dos elementos construtivos e dos mecanismos de medição, a recolha e análise dos termogramas tem de ser efetuada de forma rigorosa.

Neste sentido, com vista uma obtenção cuidada dos resultados, uma das medidas de controlo dos ensaios consiste na realização dos mesmos no interior de uma câmara climática com condições ambiente controladas, temperatura e humidade relativa.

Recorrendo à análise termográfica, pretende-se estudar o processo de humedificação e de secagem de elementos de betão leve, com a variação de alguns fatores como o tipo de humedificação, o tipo de secagem e o ponto de secagem inicial. Este estudo permite assim o estudo alargado de várias possibilidades em que ocorrem os fenómenos de humedificação e secagem. As variações realizadas permitem ainda uma aproximação maior às condições reais de desenvolvimento destes fenómenos na construção, e um estudo mais profundo dos mesmos.

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

Este trabalho está subdividido em seis partes:

- No capítulo 1, realiza-se uma introdução ao trabalho realizado, apresentando a Tese e a sua estrutura.
- No capítulo 2, retrata-se a importância da análise da presença de humidade e descrevem-se os princípios de funcionamento da termografia de infravermelhos, nomeadamente os conceitos gerais da emissão de radiação térmica da matéria e os vários fatores que interferem com o processo de medição. São ainda indicadas as vantagens e desvantagens da termografia quando aplicada aos edifícios.
- No capítulo 3, referem-se os diversos equipamentos utilizados e suas características e, descrevem-se os provetes ensaiados. São também apresentadas as variantes de ensaio estudadas assim como os seus planos de ensaios.
- No capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos e realiza-se uma interpretação qualitativa dos termogramas obtidos dos ensaios realizados. É também realizada uma avaliação do teor de humidade dos provetes de betão leve para os diversos ensaios, estudando a variação de massa e recorrendo às leituras obtidas através da medição com humidímetro.
- No capítulo 5, inclui-se uma análise quantitativa dos termogramas obtidos, avaliando a temperatura superficial dos provetes, comparando os resultados obtidos em função da variante de ensaio em que se encontram inseridos. Apresenta-se também uma correlação das medições realizadas com a temperatura obtida dos termogramas.
- No capítulo 6, encontram-se algumas conclusões finais obtidas da realização do presente trabalho, assim como, a sugestão de realização de estudos futuros relacionados com a temática abordada.

São ainda apresentados dois anexos:

- Planos de ensaios;
- Termogramas efetuados.



## 2

# A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA DETEÇÃO DE HUMIDADE

### 2.1. IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE PRESENÇA DE HUMIDADE

A área da construção, na engenharia civil, engloba um conjunto de processos que visam a qualidade do produto final, o edifício. Associados aos processos construtivos e ao desempenho expectável dos elementos construtivos, estão diversos fatores que podem influenciar o comportamento do edifício a nível térmico, mecânico e de durabilidade, entre eles, a presença de humidade.

A presença de humidade pode incrementar a degradação dos materiais e componentes do edifício, comprometendo o seu comportamento e durabilidade. Constituinte a presença de humidade uma das principais causas de patologias em edifícios, torna-se relevante o controlo e análise da presença da mesma, visando a prevenção da degradação da qualidade [1].

Sendo a presença de humidade, responsável pela maior parte das degradações de elementos construtivos, por origem de deficiente execução ou aplicação, ou devido ao desgaste de materiais, o comportamento e desenvolvimento da humidade deve ser analisado com vista a mitigar as repercussões que a mesma possa ter.

Na construção, os mecanismos de transferência de humidade em meios sólidos porosos são essencialmente três: a transferência de humidade, além de ocorrer em meios sólidos porosos, também ocorre entre o ar e um sólido [2].

No mecanismo de transferência de humidade entre os elementos e o ar que os envolve, está associada a uma resistência resultante da influência de uma lâmina de ar estagnado adjacente à superfície, que o vapor tem de atravessar por difusão. No entanto, para além desta camada, a transferência de calor ocorre principalmente por convecção [3].

A humidade na construção, resultante do processo construtivo ou de condições climatéricas como a chuva, como referido, propiciam a criação de condições para a ocorrência de patologias.

A evaporação de parte da água presente nos elementos, ocorre num intervalo de tempo relativamente curto, mas uma parte significativa demora bastante tempo para ser extraída dos materiais. No caso de materiais porosos, o processo de secagem divide-se em três fases distintas:

- Evaporação da água superficial dos materiais de forma acelerada;
- Evaporação da água superficial através dos poros de maiores dimensões dos materiais. Este fenómeno é mais demorado, atendendo que grande percentagem da quantidade de água se encontra no interior dos materiais, tendo a água que percorrer os poros, na forma líquida ou gasosa, até atingir a superfície;
- Evaporação da água presente nos poros de dimensões reduzidas, sendo este fenómeno demorado, compreendido num espaço temporal indefinido.

A presença desta humidade nos elementos construtivos, contribui para a aceleração da degradação de anomalias, apresentando-se nos elementos construtivos sobre a forma de: destacamentos, empolamentos, expansões, condensações, manchas, e outras formas [4].

## **2.2. TERMOGRAFIA**

### **2.2.1. DEFINIÇÃO DE TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS**

A termografia de infravermelhos é um processo de análise ótica, com base nos estudos de radiação do espectro de luz, desenvolvidos por William Herchel, em 1800. É um método que permite detetar heterogeneidades existente em elementos construtivos, em função da distribuição de energia térmica emitida pela sua superfície [5].

A câmara de infravermelhos transforma a radiação térmica emitida pelos corpos numa imagem visível, com uma escala de cores em função da gama de temperaturas, permitindo assim identificar, de forma mais perceptível, zonas com variações de temperaturas. A principal vantagem da termografia de infravermelhos é a medição sem contacto, sendo um ensaio não destrutivo muito versátil. No entanto, apesar de este ser um equipamento com uma complexidade média de manuseamento, está associado a um conjunto de parâmetros que influenciam significativamente a medição. Dependendo também da capacidade do termógrafo para a interpretação dos dados [6].

É de ressaltar, que o recurso à termografia de infravermelhos, para além da sua aplicabilidade versátil, evidencia a vantagem de sobre testes invasivos não ser necessário a destruição de nenhuma zona de material durante o ensaio. A mais importante vantagem da termografia por infravermelhos é que é uma técnica de análise de áreas que comparativamente a outros ensaios destrutivos e não destrutivos, que são técnicas de ensaios em pontos localizados ou em linhas. Estas vantagens levam a que permita uma redução do tempo de ensaio, da quantidade de trabalho, do equipamento necessário e inerentemente dos custos associados [7].

Contudo a termografia por infravermelho apresenta como limitação a determinação da profundidade e a espessura da anomalia detetada. No entanto, quando tal análise seja relevante, pode-se usar a ação combinada da termografia para a análise da área e localização das anomalias, e recorrer a ensaios localizados e específicos nas zonas onde se determinaram as anomalias.

A teoria da termografia assenta no princípio de que todos os objetos com temperatura superior ao zero absoluto, emitem radiação em função da sua temperatura absoluta e das características da sua superfície. Parte dessa radiação emitida está compreendida entre os  $0,8\mu\text{m}$  e os  $1000\mu\text{m}$ , ou seja, com um comprimento de onda compreendido entre  $1\text{mm}$  e  $700\text{nm}$ , sendo respeitante ao espectro infravermelho, onde a radiação apresenta comprimentos de onda maiores e, energia mais baixa do que o espectro visível, como ilustrado na Figura 2.1.

Todos os corpos emitem ou absorvem permanentemente radiações eletromagnéticas, resultantes de agitações internas da matéria. A emissão térmica dos sólidos está relacionada com a noção de corpo negro, definido com um objeto que absorve toda a radiação que sobre ele incide, para qualquer comprimento de onda.

	RAIOS CÓSMICOS		RAIOS $\gamma$			RAIOS X		ULTRA-VIOLETAS	VISÍVEL	INFRAVERMELHOS		ONDAS DE RÁDIO							
$\lambda$	$10^{-4}\text{nm}$	$10^{-3}\text{nm}$	$10^{-2}\text{nm}$	$10^{-1}\text{nm}$	$1\text{nm}$	$10\text{nm}$	$0,1\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$10\mu\text{m}$	$100\mu\text{m}$	$0,1\text{cm}$	$1\text{cm}$	$10\text{cm}$	$1\text{m}$	$10\text{m}$	$100\text{m}$	$1\text{km}$	$10\text{km}$	$100\text{km}$
$\nu$ (Hertz)	$3,10^{21}$	$3,10^{20}$	$3,10^{19}$	$3,10^{18}$	$3,10^{17}$	$3,10^{16}$	$3,10^{15}$	$3,10^{14}$	$3,10^{13}$	$3,10^{12}$	$3,10^{11}$	$3,10^{10}$	$3,10^9$	$3,10^8$	$3,10^7$	$3,10^6$	$3,10^5$	$3,10^4$	$3,10^3$

Fig. 2.1.- Espectro Eletromagnético [5]

No entanto, na prática os corpos não são negros, pois apenas uma percentagem da radiação incidente é absorvida, sendo a restante refletida e transmitida. A absorção, reflexão e transmissão são dependentes do comprimento de onda, podendo para um determinado comprimento de onda a sua soma ser igual à unidade [11]. Como exemplificado na figura 2.

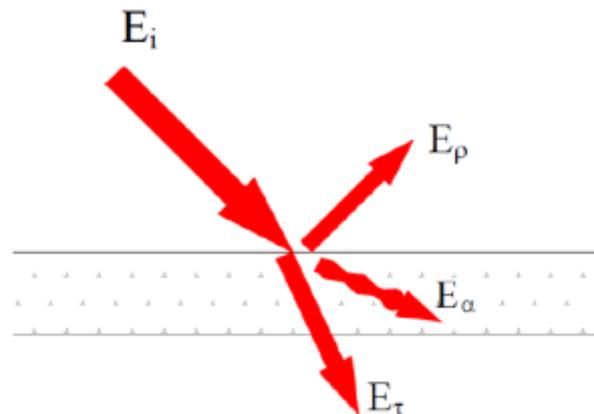


Fig. 2.2.- Radiação incidente ( $E_i$ ), absorvida ( $E_a$ ), refletida ( $E_p$ ) e transmitida ( $E_t$ ) [8]

No entanto, nos corpos não-negros, para uma dada região espectral admite-se que o comportamento desses corpos se equipara a um corpo negro, aplicando-se as leis dos corpos negros.

A medição com termografia está relacionada com as características dos materiais podendo essencialmente dividir-se em: térmicas e espectrais. As propriedades térmicas estão associadas às características do elemento em questão, ou seja, à condutividade, calor específico, efusividade e difusividade. Enquanto que as propriedades espectrais abrangem a emissividade, absorção, transmissão, reflexão, rugosidade, entre outras características [9,10].

O uso de fontes naturais, como forma de criar condições fronteira, com o intuito de provocar variações de temperatura superficial, baseiam-se na radiação solar, temperatura e vento.

Todos os corpos emitem ou absorvem permanentemente radiações eletromagnéticas, resultantes de agitações internas da matéria. A emissão térmica dos sólidos está relacionada com a noção de corpo negro, definido com um objeto que absorve toda a radiação que sobre ele incide, para qualquer comprimento de onda. Sendo na termografia a medição da radiação diretamente proporcional à banda de infravermelhos, exclusivamente no que respeita a corpos negros.

Uma análise com recurso à termografia por infravermelhos, como referido anteriormente, mede apenas a temperatura superficial do material, que depende da constituição interna dos materiais, das condições da superfície e do ambiente em que está inserido. Os efeitos da constituição interna dos materiais são baseados no princípio da migração fluxo de calor, que se dá sempre das áreas mais quentes para as mais frias. A movimentação do fluxo de calor apresenta sobretudo como variável a velocidade a que ocorre, devido às propriedades isolantes dos materiais que atravessa. Os materiais presentes na construção atual, apresentam vários graus de isolamento ou de condutividade térmica, sendo necessário avaliar o elemento em estudo no seu global de forma a conjugar de forma otimizada os diferentes materiais.

A termografia de infravermelhos tem inúmeras aplicações em diversas áreas. Na área da construção, esta técnica é utilizada para diversos propósitos como: avaliação do comportamento térmico e da eficiência energética dos edifícios, para diagnóstico do histórico dos edifícios e para a análise da transferência de calor através da dinâmica de fluídos [7].

### 2.2.2. TERMOGRAFIA ATIVA E TERMOGRAFIA PASSIVA

O estudo da termografia pode ser realizado por duas vertentes, pela vertente da termografia ativa e pela vertente da termografia passiva. Estas duas possibilidades de análise termográfica permitem fazer uma analogia ao comportamento térmico dos materiais em duas situações distintas (Figura 2.3). Os ensaios termográficos para determinação da temperatura superficial, podem ser realizados com ou sem a presença de um estímulo térmico, isto é, termografia ativa e passiva respetivamente [12].

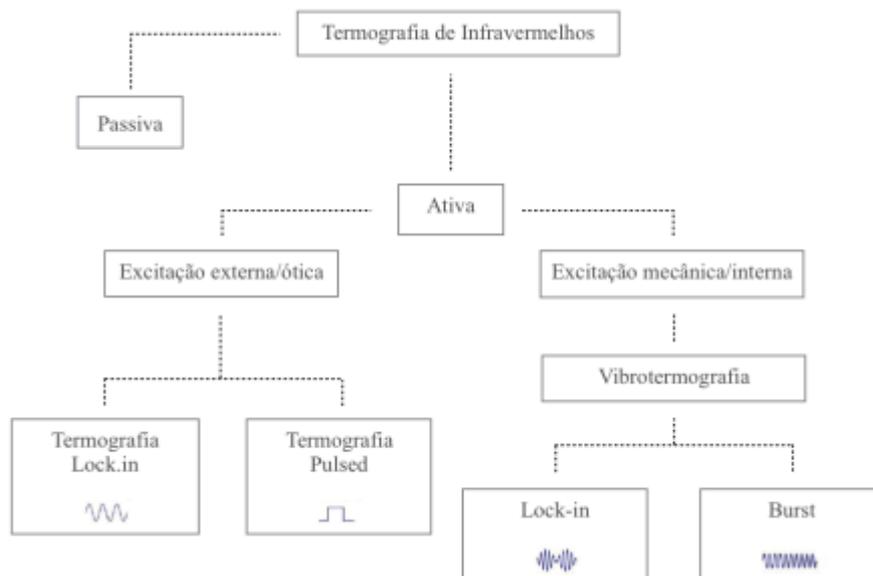


Fig. 2.3.- Técnicas de termografia ativa e passiva [13]

Na termografia ativa, para se produzir um contraste térmico em zonas que se encontram em equilíbrio térmico, recorre-se a um estímulo externo (Figura 2.4). O contraste térmico ocorre com o recurso a fontes de energia simples ou sofisticadas. Na termografia ativa, é ainda possível realizar duas análises. A análise correspondente à inspeção por reflexão, quando a fonte de calor está localizada do mesmo lado que a câmara de infravermelhos, ou quando a fonte de calor está localizada no lado oposto ao equipamento, estabelecendo-se assim um fluxo térmico por transmissão.

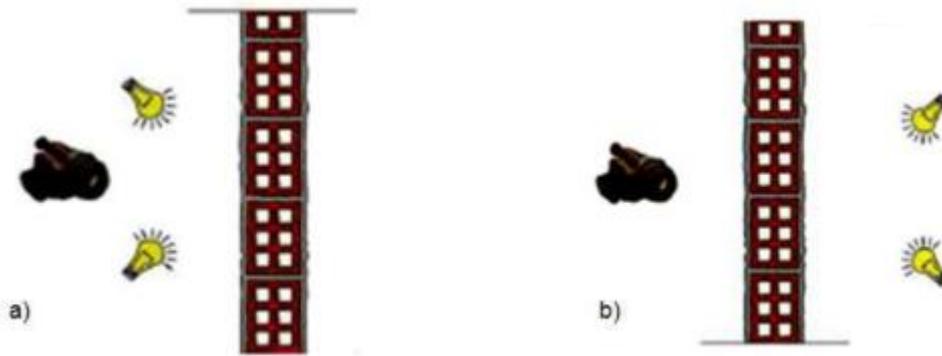


Fig. 2.4.- Posicionamento da fonte de calor na termografia ativa: (a) inspeção por reflexão; (b) inspeção por transmissão [14]

A energia aplicada sobre uma superfície de um material, pode ser realizada através de uma fonte quente ou de uma fonte fria. Em ambos os casos o objetivo prende-se com a necessidade de criar um diferencial térmico no corpo em análise. Usualmente, o estímulo com recurso a fonte fria é utilizado quando o corpo apresenta uma temperatura igual ou superior à temperatura ambiente.

A termografia passiva, ocorre sem a interferência externa de qualquer fonte artificial de aquecimento ou arrefecimento (Figura 2.5). Na termografia passiva deve existir uma diferença de temperatura entre o objeto a analisar e o meio no qual está inserido esse objeto, de forma a criar contraste térmico, apresentando normalmente o objeto a uma temperatura superior à temperatura ambiente. Neste caso, a radiação solar é considerada uma fonte natural, levando também a que esta vertente de termografia apresente como vantagem a simplicidade de equipamentos, visto que só é necessário, para esta análise, a câmara de infravermelhos [14,15].

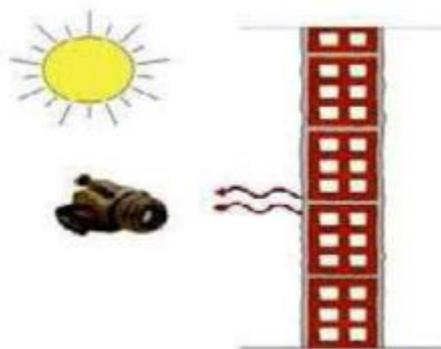


Fig. 2.5.- Técnica de termografia passiva [14]

A termografia passiva apresenta um carácter mais qualitativo, uma vez que apresenta indicativos de anomalias, enquanto que o processo de estimulação térmica tende a ter um carácter quantitativo, pela possibilidade de medir, controlar e analisar os parâmetros em estudo (fonte, tempo, intensidade e distância), no entanto é possível realizar, também, uma análise quantitativa através da termografia passiva.

### **2.3. APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA ANÁLISE DA HUMIDADE**

Os edifícios no decorrer da sua vida útil apresentam várias patologias, que condicionam a sua utilização, o conforto dos ocupantes e pode pôr em causa as condições de segurança. Com o intuito de avaliar o comportamento dos edifícios, o uso da termografia de infravermelhos na construção apresenta relevante importância para a deteção e análise de presença de humidade nos elementos. Através da termografia não é visível a presença de humidade, mas a presença da mesma pode ser detetada através de variações de calor acumulado provocados pela existência de água no seu interior [16,17].

A humidade resultante das condensações superficiais também tem um efeito considerável na temperatura do elemento em estudo, provocando alteração da transmissão de calor e provocando o arrefecimento por evaporação. Este fenómeno apresenta-se de forma acentuada em zonas onde existam efeitos de construção. Com o recurso a imagens térmicas é possível determinar as áreas dos edifícios que estão mais suscetíveis de perder calor. Apresentando de uma forma geral, para diferenças de temperatura superiores a 0,5°C, potenciais problemas, devendo essas áreas em estudo ser controladas [18].

Esta análise, é permitida pela compreensão dos fenómenos físicos que estão envolvidos. A evaporação de água pela superfície, dá origem a uma reação endotérmica, que leva a que ocorra uma diminuição da temperatura superficial. O fluxo de calor através de materiais húmidos é maior do que em materiais secos, o que cria heterogeneidades térmicas, levando a que a temperatura no material húmido seja maior, estando desta forma, inerente a redução da resistência térmica. Por outro lado, a temperatura superficial numa superfície húmida, comparativamente a uma superfície seca, responde lentamente às mudanças de temperatura do ar. Permitindo concluir que quando uma superfície está fria, as áreas húmidas vão arrefecer mais devagar, e ainda que a densidade, o calor específico, e a condutividade térmica alterem-se na presença de humidade.

A avaliação da variação da temperatura superficial devido à ascensão capilar, e a definição do limite superior do nível de água visível na face do provete, é possível através da termografia. Na fase de secagem, continua a ser possível visualizar nas imagens térmicas a presença de humidade, no entanto, gradualmente, com a diminuição da água líquida retida no provete, a variação da temperatura superficial deixa de ser significativa, dificultando a identificação da presença de humidade através da análise termográfica [19,20].

A humidade ou alterações no teor de humidade, podem ser detetados através da termografia de infravermelhos, sempre que na superfície do objeto em estudo ocorram alterações de temperatura devido ao arrefecimento evaporativo, redução da resistência térmica e aumento da capacidade de calor do material húmido.

A aplicação da termografia ao estudo da transferência de humidade no domínio higroscópico, não pode ser realizada. Visto que as trocas de calor à superfície ocorrem muito lentamente, podem não ser visualizadas pelo equipamento.

## 2.4. TRABALHOS REALIZADOS POR DIVERSOS AUTORES

A termografia de infravermelhos é recorrentemente utilizada na área da engenharia civil. Encontra-se geralmente relacionada a estudos no âmbito da avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios. Servindo também para a deteção de anomalias visíveis ou embrionárias relacionadas com a presença de humidade, inexistência de isolamento e fugas ou infiltrações de ar.

Segundo *E. Grizato et al. [21]*, o estudo referido visou encontrar uma metodologia de deteção e avaliação de anomalias na envolvente de edifícios. O método desenvolvido, relacionado com o destacamento de um reboco, consistia em aquecer a zona em análise acompanhando o aquecimento com o registo termográfico, através de imagens, para posteriormente pontos previamente definidos serem objeto de análise quantitativa, Figura 2.6. O processamento dos dados através de modelos simplificados, com base na evolução temporal da temperatura, permitiu obter um mapa dos defeitos da parede, em regime transitório. São apresentados resultados experimentais para a deteção de fugas de ar e mapeamento de humidade. A envolvente do edifício é examinada principalmente em regime térmico transitório. Para a deteção das fugas de ar, no estudo realizado, recorreu-se à metodologia baseada na subtração de imagens termográficas para se distinguir o efeito das pontes térmicas, do arrefecimento devido às fugas de ar.

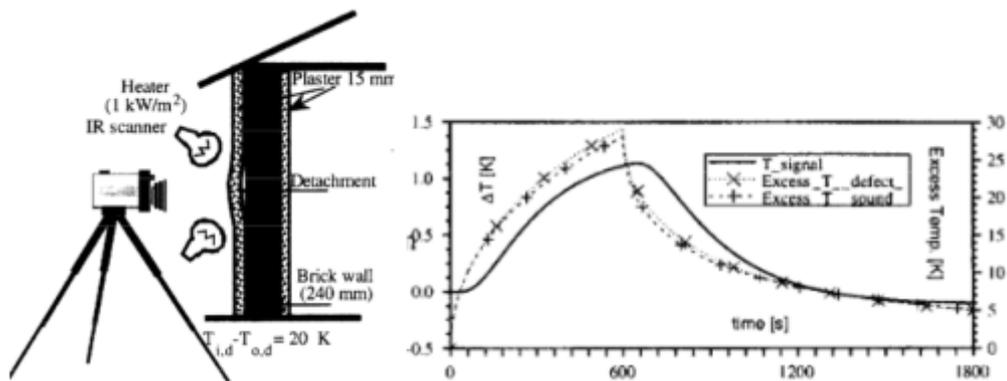


Fig. 2.6.- Aquecimento da parede e gráfico de evolução da temperatura [21]

Segundo *Barreira E., Freitas V. [22]*, o estudo do processo de humedificação e secagem de betão celular autoclavado, visa o reconhecimento das áreas secas e das áreas húmidas. Este reconhecimento é perceptível pela diferença de temperaturas nos termogramas efetuados no ensaio, devido à evaporação da água presente nos provetes (Figura 2.7). Este estudo permitiu também concluir que a termografia de infravermelhos só deteta a humidade superficial, e que a termografia não pode ser usada para estudar objetos em equilíbrio térmico ou higroscópico, tendo de existir diferenças de temperatura significativas entre o corpo e o ambiente em que o mesmo está inserido.

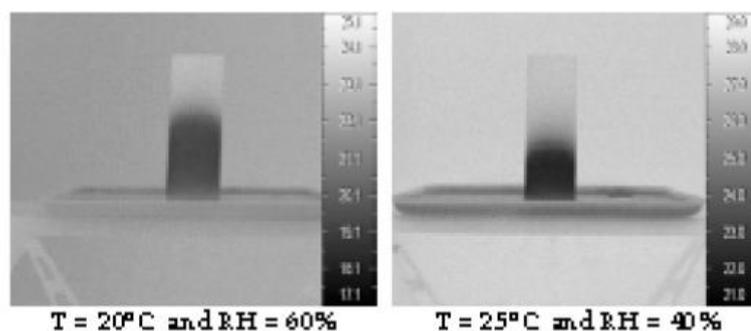


Fig. 2.7.- Termogramas de um provete de betão celular após 168 horas de absorção (emissividade de 0,85) [22]

Segundo o *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* [23,24], que desenvolveu um estudo cujo objetivo visava a visualização da absorção capilar e do processo de secagem, em provetes de betão celular autoclavado e em paredes de tijolo cerâmico vazado. A análise da aplicação da termografia de infravermelhos na deteção de deslocamentos localizados no revestimento de uma parede de alvenaria levou a que fosse concluído que esta técnica permite localizar facilmente os deslocamentos nos processos de aquecimento e de arrefecimento e que a análise *in situ* deverá ser realizada com forte insolação e, amplitude térmica elevada. A deteção da ascensão capilar e da distribuição da água nos provetes, permitiu que fosse possível concluir que a diminuição do teor de água líquida diminui a capacidade de identificação da humidade [23,24].

Segundo *José L. Lerma, Miriam Cabrelles, Cristina Portalés* [25], a análise térmica multi-temporal visa a deteção da presença de água, através de uma análise simples fundamentada nos termogramas (Figura 2.8), e outra análise mais sofisticada com base na análise de componentes principais (PCA). Este ensaio, permitiu concluir que as massas húmidas são mais frias que as massas secas, de manhã. Durante o dia as massas húmidas aumentam a temperatura gradualmente, mas de forma mais lenta do que as massas secas. Sendo nas áreas secas mais acentuadas as variações de temperatura. O resultado de uma das análises realizadas permite ainda afirmar que as massas húmidas encontram-se mais quentes, ou igualmente quentes, em relação às massas secas, analisadas no período noturno.

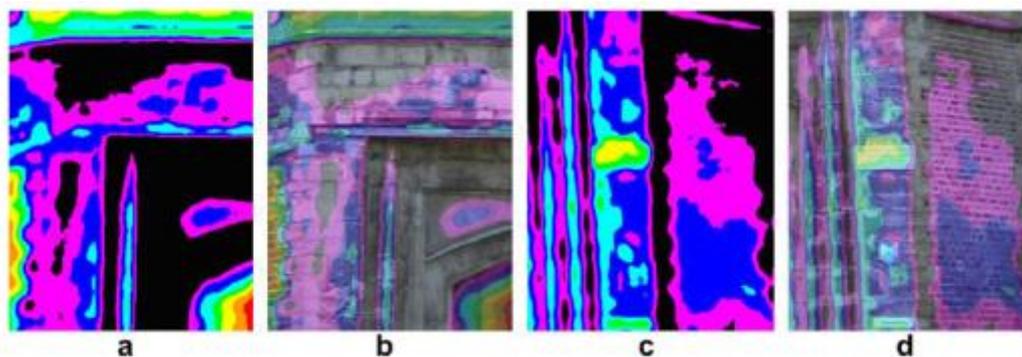


Fig. 2.8.- Imagem detalhada onde é possível ver as diferenças detetadas por imagens infravermelhas (a) e (c), e por imagens visíveis (b) e (d) [25]

Segundo *E. Grinzato, G. Cadelano, P. Bison* [26], a presença de humidade nos materiais muitas vezes não é perceptível visivelmente. Tal facto pode encontrar-se associado a vários fenómenos, como: - a evaporação da água, associada ao calor latente; - o aumento da capacidade de calor dos materiais húmidos; - o aumento do coeficiente de absorção ótica em função da humidade. Considerando estes fatores como condicionantes na experiência realizada, concluiu-se que o fluxo de calor é afetado significativamente pelo vapor de condensação-evaporação, assim como se pode verificar o contrário (Figura 2.9). Este estudo demonstrou a possibilidade de seguir e quantificar a evaporação da superfície de uma parede, através da termografia. Foi ainda proposto, que através *The Saturation thermal Index* (STI), fosse estimada a proximidade que os pontos da superfície da parede húmida estão do nível de saturação.

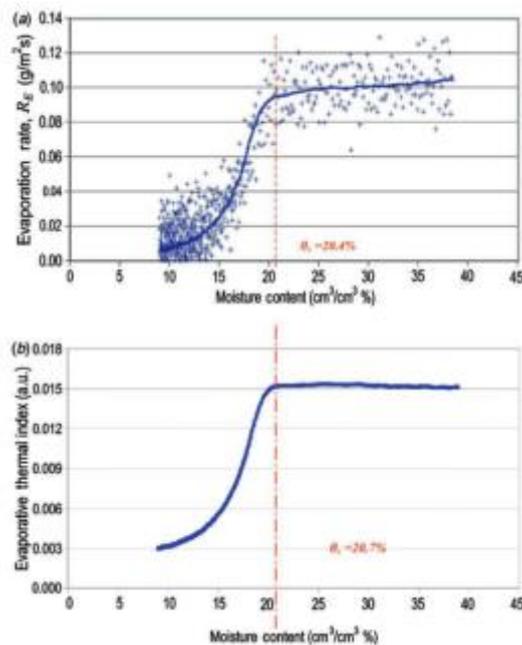


Fig. 2.9.- (a) Ratio de Evaporação ( $R_E$ ) em função da humidade presente num tijolo de espessura de 28mm; A linha vermelha vertical indica o ponto crítico de humidade. (b) Avaliação qualitativa por infravermelhos da quantidade crítica de humidade. [26]

Segundo *Gregory M. Fike* [27], que analisa a secagem da superfície de um elemento. No desenvolvimento do processo de evaporação, o elemento vai começando a apresentar áreas secas, apresentando um aumento de temperatura nessas áreas. Esta mudança de temperatura, pode ser quantificada através da termografia de infravermelhos, contudo, esta tecnologia por si só, não é suficientemente precisa para detetar o ponto de mudança entre o arrefecimento e o aquecimento da massa. De forma, a permitir uma perceção clara do momento em que ocorre a transição entre o arrefecimento e o aquecimento, e a deteção da transferência de calor associada à irregularidade da superfície, recorreu-se ao método do coeficiente de variação (COV) para a análise termográfica. Contudo, durante o período de secagem do corpo, a emissividade do mesmo varia consideravelmente, consistindo numa dificuldade para a análise dos termogramas e monitorização do processo de secagem. Em resumo, o recurso ao COV para a análise termográfica de infravermelhos permite uma análise mais precisa do que a medição da temperatura média durante a secagem, permitindo ainda indicar o ponto exato em que se inicia o arrefecimento do elemento. Devido a este método a técnica em questão é útil na conceção e acompanhamento de processos, onde a retração é importante [27].

Segundo *E. Barreira, R.M.S.F Almeida, J.M.P.Q Delgado* [28], o problema da presença de humidade é uma das principais causas de patologias em edifícios. O estudo realizado, resultado de ensaios em laboratório e *in situ*, revela que é possível através da termografia de infravermelhos detetar humidade por ascensão capilar. Esta metodologia, permite também identificar a zona correspondente à transição da área seca para a área húmida (Figura 2.10). A perceção deste limite não é imediata, não sendo possível visualizar diretamente na câmara de infravermelhos, desta forma é necessário conjugar os termogramas com o detetor de humidade, onde através de uma matriz de pontos de medição, é possível identificar o limite superior da ascensão capilar.

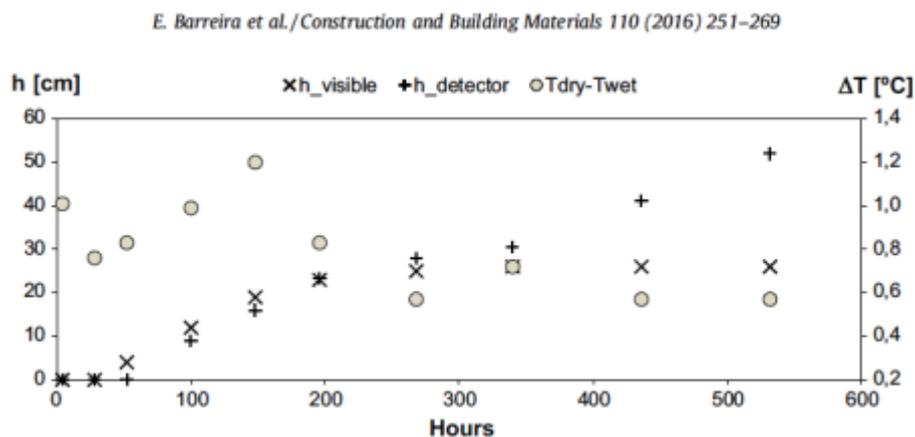


Fig. 2.10.- Variação visível do nível de humidade acima da linha de água ( $h_{\text{visible}}$ ), o nível de água mais elevado acima da linha de água medido através do detetor de humidade ( $h_{\text{detector}}$ ) e a diferença de temperatura entre as áreas secas e húmidas ( $T_{\text{dry}} - T_{\text{wet}}$ ). [28]

Segundo *Ecem Edis, Inês Flores-Colen, Jorge de Brito* [29], a abordagem quase-quantitativa baseada na dependência temporal da inspeção infravermelha e na análise termográfica por métodos quantitativos foi testada neste ensaio, com recurso a ganhos caloríficos induzidos para variação da temperatura superficial, onde *a priori* se tinha conhecimento da presença de humidade. Os métodos numéricos utilizados para a análise quantitativa foram: a subtração *Simple image subtraction (SIS)*, *nonnegative matrix factorization (NMF)* e *principal component analysis (PCA)*. No decorrer do ensaio o método *PCA* apresentou um bom potencial para deteção de mudanças de presença de humidade e para eliminar falsos indicadores resultantes do sombreamento e da reflexão. Por outro lado, os resultados obtidos pelos métodos *SIS* e *NMF*, apresentaram limitações em identificar áreas com uma grande presença de humidade. O estudo permitiu obter algumas conclusões. O uso combinado dos ganhos solares e do *PCA* representa um grande potencial para a deteção da variação da humidade. O excessivo ganho solar do substrato por um período de tempo prolongado pode dificultar a identificação da superfície húmida, devido ao aumento da temperatura do objeto que pode dar origem a uma variação da humidade. O recurso ao *PCA* permite eliminar falsos indicadores causados pela reflexão e sombreamento, aumentando assim a fiabilidade do estudo [29].

Segundo C. Lerma, Á. Mas, E. Gil, J. Vercher, M.J. Peñalver [30], é relevante o estudo da presença de humidade *in situ*, com validação dos ensaios em laboratório. Esta observação permite afirmar que quando a densidade aparente é maior, registam-se aumentos de temperatura. Pode-se testar diversas áreas com a resposta térmica com o objetivo de compreender quais são as áreas que mais têm sofrido deterioração. As áreas com menor densidade aparente, ou seja, maior porosidade, são evidenciadas em imagens termográficas como as áreas que apresentam temperaturas mais baixas (Figura 2.11). Esta técnica permite identificar as áreas em que estão a degradar-se rapidamente.

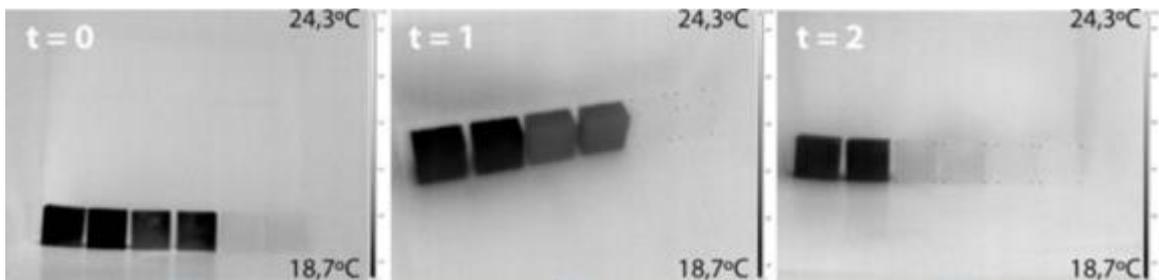


Fig. 2.11.- Imagens termográficas de três estágios do processo de evaporação. De seis amostras, as duas primeiras (à esquerda) correspondem (a); A duas ao centro à curva (b); e as últimas duas (à direita) à curva (c).

Nesta escala de cores, o preto indica baixas temperaturas (acima dos 18,7 °C), e a cor branco indica altas temperaturas (a temperatura ambiente é de 24,3 °C) [30].

É visível, nos gráficos apresentados na Figura 2.12, que com as duas amostras que se apresentam à direita se mantêm à temperatura e humidade ambiente. Com o desenvolvimento do ensaio laboratorial é perceptível como as amostras perdem água e a sua temperatura se aproxima da temperatura ambiente.

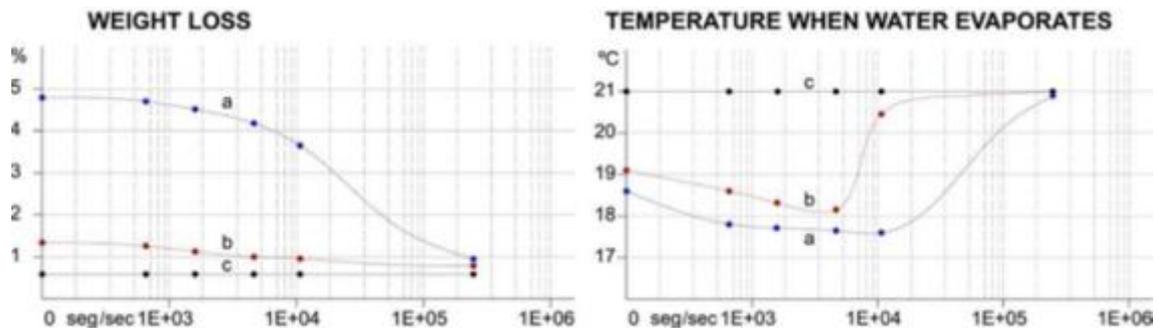


Fig. 2.12.- Gráficos explicitam a percentagem de peso seco em função da humidade, e ilustra como a perda de peso das amostras se desenvolve ao longo do tempo [30].

O gráfico apresenta três curvas, cada uma representa a média das duas amostras com diferentes níveis de humidade. Pela análise dos gráficos é possível verificar como as amostras tendem a entrar em equilíbrio higroscópico com ambiente onde está inserida. A curva (a) refere-se a duas amostras que foram imersas por um período de 72h, o suficiente para absorver mais água do que as outras amostras. A amostra (b) só foi imersa por um período de 5 minutos, e a amostra (c) são as amostras de referência para temperatura e humidade ambiente, 24,3 °C e 52,9%, respetivamente.



# 3

## METODOLOGIA

### 3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A presente dissertação visa testar e avaliar a potencialidade da utilização da termografia de infravermelhos para a quantificação da presença de humidade. Neste capítulo apresentam-se os equipamentos utilizados, os procedimentos de ensaios e o cronograma das tarefas, bem como os procedimentos de análise utilizados na interpretação quantitativa dos resultados.

A metodologia adotada para a realização da presente tese, assenta nos objetivos propostos e nas necessidades para a concretização dos mesmos.

Todos os ensaios foram realizados tendo por base a termografia de infravermelhos, no interior de uma câmara climática de forma a garantir as condições ambiente controladas. Recorreu-se sobre tudo à termografia passiva, uma vez que os termogramas foram efetuados sem qualquer aquecimento à superfície em estudo na maioria dos cenários, embora também se tenha utilizado a termografia ativa, com a variação de um estímulo térmico recorrendo a uma lâmpada de infravermelhos.

Nos ensaios realizados, utilizaram-se provetes de betão leve de dimensões  $0,28 \times 0,21 \times 0,075 \text{ m}^3$ . Para a avaliação da presença de humidade foram definidas três abordagens ou variantes: Variante I, para avaliar o efeito de diferentes tipos de humedificação, Variante II, para avaliar o efeito do tipo de secagem, e Variante III, para avaliar o efeito da humidade inicial.

A realização destas três variantes, subdivididas em três diferentes ensaios cada uma, permite abranger um espectro alargado de possibilidades passíveis de ocorrer na construção, e permite, também, a realização de um estudo pormenorizado do comportamento da humidade em betão leve.

O recurso à termografia de infravermelhos, como técnica não invasiva e não destrutiva, permite analisar as variações de temperatura provocadas pela presença de humidade em relação ao estado inicial do provete. Complementadas pela análise da variação de massa dos provetes, através das pesagens realizadas, é mensurável a quantidade de água absorvida, servindo de fator ponderador na análise quantitativa dos ensaios.

### 3.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos de medição utilizados nesta campanha experimental, cedidos pelo Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC-FEUP), foram os seguintes:

- Câmara Termográfica Thermo Tracer TH9100 Series MR da NEC;
- Câmara Climática Fitoclíma 1000 EDTU;
- Humidímetro CEBTP MX-HU;
- Balança Precisa 5000D – 12000G;
- Ventoinha;
- Estufa WTC Binder;
- Lâmpada Solmagic 2000 Eco+;
- Anemómetro Airflow TA5.

Para além dos equipamentos utilizados para medição, utilizaram-se também:

- Cartolina Preta;
- Tabuleiros Metálicos;
- Caixa plástica estanque;
- Pano absorvente;
- Fita adesiva transparente;
- Fita adesiva Extra-Power Preta 5Mx50MM;
- Silicone Multiusos Transparente;
- Tripé;
- Estante de plástico preta.

A câmara de infravermelhos utilizada foi a Thermo Tracer TH9100 MR da NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd (Figura 3.1), cujas principais características são indicadas na Tabela 3.1 [31].

Tabela 3.1.- Características da câmara termográfica Thermo Tracer TH9100 MR [31,32]

Temperatura	
Faixa de medição	-20 a 100°C
Resolução	0,06°C (a 30°C, 60 Hz)
Precisão	±2°C ou ±2% da leitura
Desempenho na criação e apresentação de imagens	
Faixa espectral	8 a 14µm
Resolução espacial I.F.O.V	1,2mrad
Alcance da focagem	30cm ao infinito
Período de tempo	60 frames/segundo

Imagem térmica	320 x 240 pixels
Resolução A/D	14 bits
Funções de medição	Executar / Congelar
Intervalo de medição	Gravação em memória integrada em tempo real: 1/60 a 3600 intervalo de segundos
Correção de emissividade	Previsto (0,10 a 1,00). Tabela de emissividade prevista
Correção com temperatura envolvente	Previsto (Incluindo intervalo NUC)
Compensação de fundo	Previsto
Correção ambiente	Previsto
Funções automáticas	Totalmente automático (nível, sensibilidade, foco)
<b>Desempenho na criação e apresentação de imagens</b>	
	Variável nível/sensibilidade
	Indicador de temperatura multi-ponto (até 10 pontos)
Funções de processamento de imagem	Correção de emissividade multi-ponto (até 10 pontos)
	Diferença de temperatura entre 2 pontos ( $\Delta t$ )
	Indicador de temperatura Máx./Min. (valor de pico)
<b>Especificações Gerais</b>	
Temperatura de funcionamento e armazenamento	-15 a 50°C, 90% HR ou menos (não condensado)
<b>Câmara visual</b>	
Pixéis	0,41 Mega pixéis
Pixéis efetivos da imagem	752 (H) x 480 (V) pixéis
Campo de visão	30,1° (H) x 22.7° (V)
Sensibilidade	1 lux



Fig. 3.1.- Câmara de Infravermelhos Thermo Tracer TH9100 MR [31]

A Fitoclima 1000 EDTU é uma câmara climática que permite realizar o controlo das condições ambientais, temperatura e humidade, no interior da mesma. É constituída no geral, por duas ventoinhas, três resistências, um compressor, sensores e um painel digital que permite controlar os comandos da câmara climática. A gama de temperaturas que a Fitoclima 1000 EDTU consegue atingir, está compreendida entre  $-50^{\circ}\text{C}$  até  $180^{\circ}\text{C}$ , com uma precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a gama de humidade relativa situa-se entre 10% e 98%, com uma variação de  $\pm 2\%$  [33].

Durante a realização dos ensaios, a câmara climática encontrava-se adaptada de forma a ser-lhe conferido maior espaço para a realização dos mesmos. A adaptação consistiu na anexação de uma outra câmara, visitável, que possui uma porta com 2,0m de altura por 0,8m de largura, dois tapa muros, e ainda uma abertura que permite a ligação à câmara climática. A esta última é fixada um porta provetes, onde se encontra construída uma parede de alvenaria de 1,9m x 1,9m, rebocada de ambos os lados (Figura 3.2).



Fig. 3.2.- a) Câmara climática Fitoclima 1000 EDTU; (b) Câmara visitável

A câmara climática, Fitoclima 1000 EDTU, é dessa constituída por materiais de alta resistência térmica, com o intuito de minimizar as transferências de calor e por elementos que garantem a vedação da câmara, e da câmara climática é assegurado pelos convetores com o auxílio de duas ventoinhas, garantindo que o aquecimento se realiza num curto período de tempo e de forma homogénea. O arrefecimento do interior da câmara climática, é realizado com recurso à ventilação mecânica proporcionada por um compressor consequentemente asseguram a estagnidade ao ar da mesma. O controlo da temperatura no interior da câmara climática é realizado por intermédio de dois convetores equipados com três resistências de aquecimento, uma resistência de 2000W e outras duas resistências de 3000W cada uma, perfazendo uma potência total de 8000W. O aquecimento do interior. O controlo da humidade relativa no interior da câmara, é assegurado por um banho termostático, com uma resistência de 1500W, para o incremento de humidade, enquanto que para a desumidificação é utilizada a evaporação mecânica.

O controlo de comandos da Fitoclima 1000 EDTU, é efetuado por intermédio do sistema informático “ClimaPlus V”, diretamente no painel tátil inserido na porta da câmara. O sistema “ClimaPlus V”, permite a introdução de um comando com uma única temperatura e humidade relativa, levando a que o programa mantenha a temperatura e a humidade no interior da câmara constantes até à alteração desse mesmo comando.

O humidímetro de contacto, CEBTP MX-HU (Figura 3.3), fabricado pelo Centre d’Expertise du Batiment et des Travaux Publics, em França, tem como princípio de funcionamento um método elétrico da variação das propriedades dielétricas do material em análise, permitindo realizar medições a uma profundidade compreendida entre os 3 e 5cm. O humidímetro é composto por dois anéis concêntricos protegidos por um revestimento em borracha que incrementa a aderência deste à superfície a analisar [34], encontrando-se as suas características na Tabela 3.2.



Fig. 3.3- Humidímetro CEBTP Type MX-HU

Tabela 3.2 - Especificações Técnicas do Humidímetro CEBTP Type MX-HU [34]

Especificações Técnicas do Humidímetro CEBTP Type MX-HU	
Dimensões	Comprimento: 118mm
	Largura: 93mm
	Altura: 62mm
Peso	0,5Kg
Fonte de Energia	Uma pilha de 3,5V

Os resultados extraídos do humidímetro de contacto são valores relativos do teor de humidade dos materiais. As leituras mais baixas estão relacionadas com maiores teores de humidade, enquanto valores próximos do 20 indicam que o elemento se encontra seco. É possível obter uma medição absoluta e real do teor de humidade, mas é necessário previamente a realização da calibração do equipamento em função do material.

A estufa WTC Binder (Figura 3.4), foi necessária para a preparação dos ensaios. O funcionamento da estufa assenta no princípio da convecção mecânica, ou seja, recorre a resistências e a um conjunto de ventoinhas, com uma capacidade máxima de aquecimento de 300°C. É constituída por um sistema de pré-aquecimento do ar no interior da estufa, de dupla camada de ar, que leva a um melhor fluxo de ar e a uma uniformidade no interior da estufa. Desta forma é possível garantir que todas as amostras que se encontram no interior da estufa se encontram à mesma temperatura, e que a recuperação da temperatura, após abertura da porta da estufa, se faz de uma forma mais rápida [34].



Fig. 3.4.- Estufa WTC Binder

### 3.3. MATERIAIS

Os ensaios realizados para o estudo em questão foram realizados tendo por base provetes de betão leve de dimensões 0,28m x 0,21 x 0,075m (Figura 3.5). Os provetes de betão leve têm como características: uma massa volúmica de 1350,802 Kg/m<sup>3</sup>, uma absorção de 13,97027% e, uma capilaridade, segundo a ISO15148, de 1,58 (g/mm<sup>2</sup>), como representado na Tabela 3.3. Estas características foram medidas anteriormente em laboratório.

O provete apresenta como propriedades térmicas e higroscópicas, o coeficiente de permeabilidade ao vapor ( $\pi$ ) e o fator de resistência à difusão de vapor do provete de betão leve ( $\mu$ ), de 25 Kg/(m.s.Pa) e de 7,4, respetivamente [35;36], e uma condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) de 0,70 w/(m.°C) [6]. Com base nas normas técnicas e em regulamentos científicos, os valores das propriedades térmicas e higroscópicas foram retirados desses mesmos documentos.

Com recurso a um emissómetro, realizou-se a medição da emissividade do provete, apresentando o mesmo uma emissividade de 0,91.

Tabela 3.3.- Características dos provetes de betão leve

Ref. do provete	Absorção (%)		Capilaridade (g/mm <sup>2</sup> )	
L1	13,9	13,9	1,58	1,58
L2	13,8		1,35	
L3	14,2		1,60	



Fig. 3.5 - Provetes de betão leve a ensaiar

### 3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

#### 3.4.1. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Com vista à preparação dos ensaios, foi necessário calibrar os equipamentos, e definir cuidadosamente a posição de todos os elementos no interior da câmara climática, de forma a assegurar a maior homogeneidade possível entre ensaios.

Em função das especificações dos equipamentos e dos ensaios pretendidos, foi definida a posição da câmara de infravermelhos e dos provetes no interior da câmara climática, como se encontra representada na Figura 3.6.

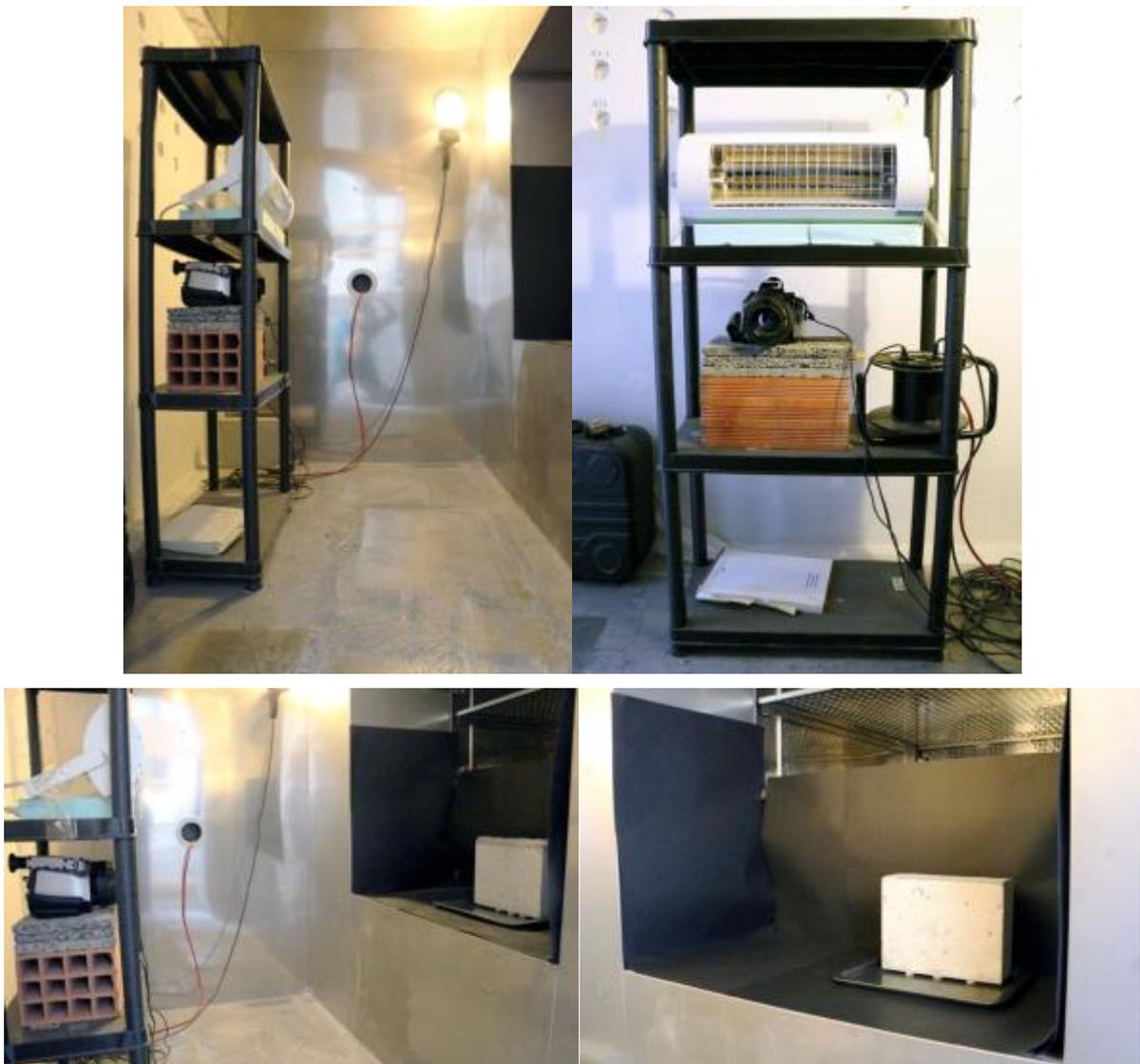


Fig. 3.6 - Disposição dos equipamentos e dos provetes no interior da câmara climática

Para toda a campanha de ensaios adotou-se uma temperatura e humidade relativas constantes no interior da câmara climática, 20°C e 60% respetivamente. A calibração da câmara climática para uma temperatura e humidade relativa constantes foi realizada de forma automática pelo *software* “Clima Plus V”. Para assegurar que aquando do início dos ensaios a temperatura e humidade no interior da câmara climática eram as desejadas, ligou-se a câmara com uma antecedência de 6 horas, período para o qual as variações são significativamente reduzidas. Durante toda a campanha experimental a câmara foi mantida em funcionamento sem interrupções.

Procedeu-se à calibração da câmara termográfica, de acordo com as indicações do fabricante, uma vez que o objetivo dos ensaios era a obtenção de valores reais da temperatura da superfície, por uma análise quantitativa. Os procedimentos de calibração realizados foram os seguintes:

- Calibração da Reflexão: consiste na compensação da radiação infravermelha proveniente do ambiente onde se realiza o ensaio, com recurso a um procedimento semiautomático. Esta calibração foi realizada sempre que se iniciou a câmara, 10 minutos após a câmara ter sido ligada, colocando a tampa de proteção da lente, à temperatura ambiente, no equipamento e considerando a emissividade do fundo igual a 1,0. Posteriormente pressionou-se o comando REF CAL.
- Compensação do Ambiente: visa compensar as diversas condições de temperatura e humidade relativa existentes no ambiente, e a distância da câmara ao provete. Para efetuar esta calibração introduziu-se o valor da temperatura e humidade relativa do ar no interior da câmara climática (20°C e 60%) e a distância a que a câmara se encontrava do elemento em estudo (1,10m). O procedimento para esta calibração foi realizado apenas no início da campanha experimental, uma vez que as condições se mantiveram idênticas durante todo o período, conservando-se na memória da câmara o valor da correção.
- Compensação da Temperatura Refletida: consiste em compensar a reflexão pela superfície em estudo, da radiação emitida pelas superfícies vizinhas. Para esta calibração recorreu-se a uma folha de alumínio, com aproximadamente 25 x 30 cm, que foi amarrotada, alisada e fixada na superfície da amostra a ensaiar. A uma distância de 50 cm do objeto, posicionou-se a câmara térmica, perpendicular à folha de alumínio. Fez-se um termograma, abrangendo toda a área, usando emissividade de um corpo negro, 1,0. Posteriormente, recorrendo ao programa de tratamento de imagem, selecionou-se a área abrangida pela folha de alumínio, sendo o valor médio dessa área a temperatura refletida da amostra ( $T=17,6^{\circ}\text{C}$ ). Tal como na compensação do ambiente, também neste caso só se realizou o procedimento no início da campanha experimental, tendo sido o valor da correção introduzido na memória da câmara.

As medições efetuadas com o humidímetro de contacto nos provetes de betão leve sujeitos a imersão total correspondem a valores relativos uma vez que não foi efetuada qualquer calibração prévia para a determinação de valores absolutos face ao material em estudo. Contudo, para garantir valores relativos coerentes, ajustou-se antes de cada medição a leitura do equipamento para o ar ao valor 180, de acordo com informações do fabricante

Foram também realizados alguns ensaios preliminares, para validação e ajuste das soluções de ensaio a adotar, conforme explicitado no Anexo I “Planos de Ensaios”.

### 3.4.2. PLANOS DE ENSAIOS

Os ensaios realizados no âmbito deste estudo dividiram-se em três variantes, que ocorreram sempre a temperatura e HR constantes (T=20°C e HR=60%):

- Variante I – Tipo de humificação. Partindo do provete totalmente seco, foi avaliado o efeito de diferentes condições de humificação: a humificação parcial do provete pela base, a humificação parcial do provete pelo topo, e a imersão total do provete.
- Variante II – Tipo de secagem. Após a imersão total dos provetes, foi avaliado o efeito do tipo de secagem: Secagem natural, no interior da câmara climática com condições climáticas controladas (T=20°C e HR=60%); Secagem condicionada pelo aumento da temperatura superficial, com recurso a uma lâmpada de infravermelhos; Secagem condicionada pelo aumento da convecção, com recurso a uma ventoinha (fluxo de ar perpendicular à face do provete e fluxo de ar paralelo à face do provete).
- Variante III – Quantidade de água embebida. Para a embebição parcial do provete pela base, foi avaliado o efeito da humidade inicial: provete totalmente seco, provete parcialmente seco e provete em equilíbrio higroscópico.

A Tabela 3.4 apresenta um resumo dos ensaios realizados, indicando a respetiva referência, uma descrição resumida, as condições de ensaio e as datas em que foram realizados.

Tabela 3.4 - Ensaio Realizados

REF.	Variante	Descrição	Condições de ensaio	Data de realização
I.1	Tipo de Humificação	Parcial pela base	Secagem do provete em estufa durante 4 dias a 70°C. Arrefecimento do provete numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas. Humificação durante 24 horas (T=20°C; HR=60%) com uma lâmina de água com 5 mm acima da base do provete. Secagem durante 72 horas (T=20°C;HR=60%).	18.Abril.2016 a 23.Abril.2016
I.2		Parcial pelo topo	Secagem do provete em estufa durante 4 dias a 70°C. Arrefecimento do provete numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas. Humificação durante 24 horas (T=20°C; HR=60%) com uma lâmina de água com 5 mm acima do topo do provete. Secagem durante 72 horas (T=20°C;HR=60%).	23.Maio.2016 a 28.Maio.2016
I.3		Imersão total	Humificação durante 4 dias com o provete imerso na sua totalidade. Secagem durante 72 horas (T=20°C;HR=60%).	9.Maio.2016 a 13.Maio.2016

REF.	Variante	Descrição	Condições de ensaio	Data de realização
II.1	Tipo de Secagem	Condições ambiente controladas	Igual a I.3	
II.2		Aumento da temperatura superficial	Humidificação durante 4 dias com o provete imerso na sua totalidade. Secagem durante 8 horas com recurso à lâmpada de infravermelhos, no interior da câmara climática.	16.Maio.2016
II.3A		Aumento da convecção (Fluxo de ar paralelo à face do provete)	Humidificação durante 4 dias com o provete imerso na sua totalidade. Secagem durante 8 horas com aumento da convecção com recurso à ventoinha posicionada paralelamente à face do provete, no interior da câmara climática (T=20°C;HR=60%).	17.Maio.2016
II.3B		Aumento da convecção (Fluxo de ar perpendicular à face do provete)	Humidificação durante 4 dias com o provete imerso na sua totalidade. Secagem durante 8 horas com aumento da convecção com recurso à ventoinha posicionada perpendicularmente à face do provete, no interior da câmara climática (T=20°C;HR=60%).	18.Maio.2016
III.1	Condições iniciais	Totalmente seco (Teor de Humidade: 0,37%)	Igual a I.1	
III.2		Parcialmente seco (Teor de Humidade: 0,83%)	Secagem do provete em estufa durante 4 dias a 40°C. Arrefecimento do provete numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas. Humidificação durante 24 horas (T=20°C; HR=60%) com uma lâmina de água com 5 mm acima da base do provete. Secagem durante 72 horas (T=20°C;HR=60%).	11.Abril.2016 a 17.Abril.2016
III.3		Equilíbrio higroscópico (Teor de Humidade: 1,23%)	Humidificação durante 24 horas (T=20°C; HR=60%) com uma lâmina de água com 5 mm acima da base do provete. Secagem durante 72 horas (T=20°C;HR=60%).	25.Abril.2016 a 29.Abril.2016

Após a secagem dos provetes na estufa, antes do início do ensaio propriamente dito, considerou-se necessário garantir um período de arrefecimento de 24 horas em sílica gel, para reduzir a temperatura do provete de 70°C (temperatura da estufa) para 20°C (temperatura da câmara climática) sem aumentar o teor de humidade do provete (Figura 3.7), caso contrário o efeito do arrefecimento do provete prevalecia sobre a ação da humidade, como se verificou num ensaio preliminar efetuado (Figura 3.8).

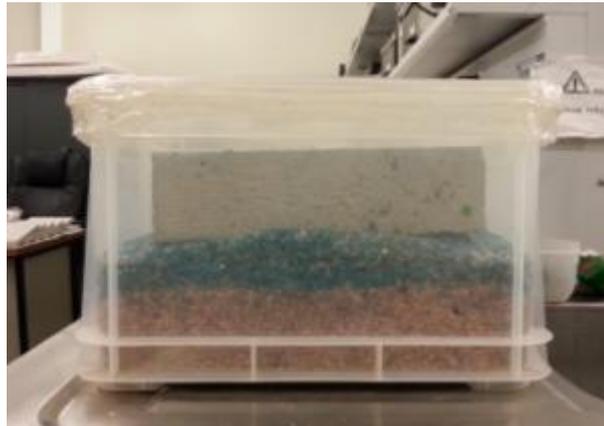


Fig. 3.7.- Provete de betão leve no interior de uma caixa estanque preenchida com sílica gel

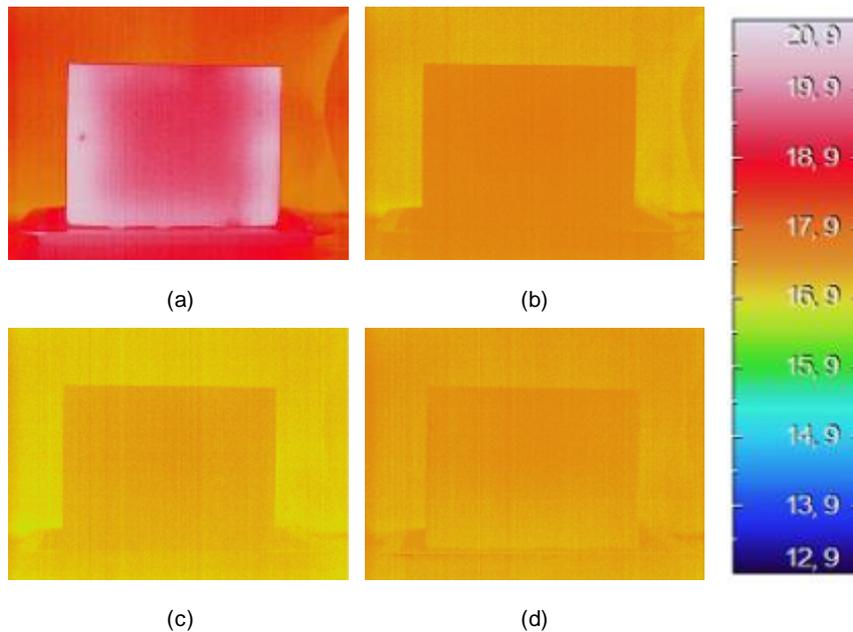


Fig. 3.8.- Termogramas de ensaio preliminar. (a) termograma às 00:00h; (b) termograma às 01:00h; (c) termograma às 02:00h; (d) termograma às 06:00h

Em todos os ensaios das três variantes foram efetuados termogramas com uma periodicidade preestabelecida e pré-programada na câmara, para que a presença do operador não influenciasse as medições. As imagens térmicas foram captadas com a luz da câmara climática apagada. Foram também efetuadas pesagens da massa do provete antes do início da embebição, após o período de embebição, durante o período de secagem e no final da secagem. No caso dos provetes totalmente imersos em água, foram também efetuadas medições com o humidímetro, durante o período de secagem, com uma periodicidade idêntica à da pesagem.

Na montagem do ensaio I.2, em que a humidificação foi efetuada pelo topo, utilizou-se um silicone transparente (Vedante Silicone UHU Universal transparente), para garantir a retenção da lâmina de 5mm de água sobre a face superior do provete e evitar escorrências para as faces verticais (Figura 3.9). Às pesagens efetuadas durante este ensaio foi sempre retirada a massa do silicone aplicado, previamente determinada.



Fig. 3.9.- Provete com silicone e água

Na Variante I, nos ensaios I.1 e I.2, no decorrer da humidificação, foram realizados termogramas com uma periodicidade de 5 minutos, durante as primeiras 8 horas de humidificação, e uma periodicidade de 10 minutos, nas restantes 16 horas. Durante a secagem realizaram-se com intervalos de 30 minutos durante as primeiras 6 horas, e intervalos de 60 minutos, durante as 66 horas restantes. No ciclo de secagem foram também efetuadas pesagens com uma periodicidade de 30 minutos nas primeiras 6 horas e, posteriormente, foram efetuadas pesagens às 24 horas, 27 horas, 30 horas, 48 horas, 51 horas, 54 horas e 72 horas. No ensaio I.3 só foi avaliada a secagem, tendo sido captadas imagens térmicas e efetuadas pesagens com uma periodicidade semelhante à dos ensaios I.1 e I.2. Como referido anteriormente, nestes ensaios além de das pesagens para avaliar a variação da massa durante a secagem, foram também efetuadas medições com o humidímetro com uma periodicidade semelhante à das pesagens.

Na Variante II nos ensaios II.2, II.3A e II.3B a secagem dos provetes foi condicionada pela ação de uma lâmpada de infravermelhos de 2500 W de potência (II.2) e de uma ventoinha (II.3A e II.3B). Os ensaios decorreram por um período de 8 horas, com a lâmpada e a ventoinha acionadas em contínuo. Foram recolhidos termogramas com uma periodicidade de 20 minutos, durante as 8 horas de secagem, e efetuadas pesagens e medições com o humidímetro com intervalos de 60 minutos. Os valores da velocidade do ar durante os ensaios II.3A e II.3B estão indicados na tabela 3.5.

As velocidades da movimentação das massas de ar, no interior da câmara climática, foram medidas com recurso a um anemómetro, próximo da face anterior do provete, num ponto médio em relação à sua altura (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. - Valores da velocidade do fluxo do ar

<b>Velocidade do Fluxo do ar (m/s)</b>		
<b>Perpendicular à face</b>	Amostra	6
	Média	2,243
	Desvio Padrão	0,319
<b>Paralelo à face</b>	Amostra	6
	Média	1,928
	Desvio Padrão	0,057

Na Variante III alterou-se a quantidade de água inicial no provete e o procedimento de ensaio foi muito semelhante ao do ensaio I.1. Nas 24 horas de humedificação foram captados termogramas de 5 em 5 minutos nas primeiras 8 horas e, de 10 em 10 minutos nas restantes 16 horas. Nas 72 horas da fase de secagem os termogramas foram obtidos de 30 em 30 minutos durante as primeiras 8 horas, e com um intervalo de 60 minutos durante as restantes horas. Foram também efetuadas pesagens com uma periodicidade de 30 minutos nas primeiras 6 horas e, posteriormente foram efetuadas pesagens às 24, 27, 30, 48, 51, 54 e 72 horas. No Anexo I apresentam-se as fichas de ensaio relativas às três variantes.

Com intuito de completar a análise pretendida, cruzando informação relevante, para a interpretação e leitura dos ensaios, em todos os ensaios foram realizadas pesagens no início e fim de cada ciclo, no decorrer do período de secagem. No ensaio de imersão total e nos ensaios da variante II, foram realizadas medições complementares com recurso ao humidímetro de contacto, conforme pode ser consultado nos planos de ensaio no Anexo I. As medições do teor de humedidade, foram realizadas em simultâneo com as pesagens.

As medições realizadas com recurso ao humidímetro CEBTP Type MX-HU, tiveram por base uma matriz de seis pontos, como representado na figura 3.10. A matriz adotada teve como limitação as dimensões dos provetes de betão leve e as dimensões do equipamento, não sendo desta forma possível a medição de mais pontos.

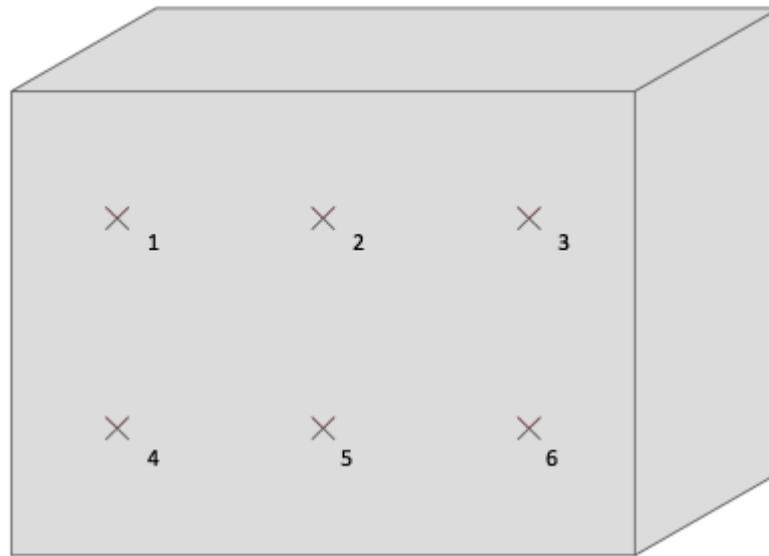


Fig. 3.10.- Matriz de pontos de medição do humidímetro de contacto

O método gravimétrico é um método preciso, referido em inúmeras normas [37;38], como método de referência. A utilização deste método nos ensaios propostos permite estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos por termografia e a da evolução real da massa nos ciclos de secagem.

A determinação do teor de humidade através do método gravimétrico baseia-se na relação entre a massa de água existente na amostra (diferença entre a massa da amostra no instante  $i$  e a massa da amostra seca) e a massa da amostra seca [37]:

$$w = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

- $w$  – Teor de humidade (%)
- $m_i$  – Massa inicial da amostra no instante  $i$  (kg)
- $m_s$  – Massa da amostra seca (kg)



# 4

## APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados. Na análise qualitativa dos termogramas captados será avaliada, a distribuição das temperaturas superficiais através da observação dos padrões térmicos resultantes das reações endométricas desencadeadas pela secagem da humidade nos provetes de betão leve. Neste capítulo apenas serão apresentadas algumas imagens obtidas, sendo as restantes apresentadas no Anexo II.

Neste capítulo são também apresentados os resultados da variação do teor de humidade dos provetes, obtidos quer pelo método gravimétrico quer com o humidímetro. Os resultados do método gravimétrico correspondem apenas à fase de secagem dos provetes para todas as variantes, enquanto os resultados do humidímetro correspondem apenas aos ensaios I.3 da variante I e da variante II. Volta a frisar-se que os valores fornecidos pelo humidímetro são valores relativos, uma vez que não foi efetuada uma calibração para o material em estudo.

### 4.2. ANÁLISE QUALITATIVA DOS TERMOGRAMAS

#### 4.2.1. VARIANTE I – TIPO DE HUMIDIFICAÇÃO

Nesta subsecção apresentam-se os resultados das medições efetuadas para os ensaios da Variante I, que avalia o efeito do tipo de humedificação. Como descrito no Capítulo 3 os ensaios foram iniciados após os provetes terem permanecido durante um período de 4 dias em estufa, a 70°C, partindo por isso de um teor de humidade relativamente baixo.

A Figura 4.1 mostra a evolução da temperatura superficial do provete no ensaio I.1 durante a fase de humedificação pela base. Verifica-se através da análise dos padrões de temperatura, que a temperatura superficial no início da humedificação é mais elevada não só porque o provete estava totalmente seco mas também porque não se encontrava em equilíbrio térmico com a ambiência da câmara climática (Figura 4.1a). No decorrer do ciclo de humedificação é possível observar que a absorção da água por

capilaridade ocorre sobretudo nas primeiras horas de contacto com a lâmina de água, como é possível verificar nas Figuras 4.1b, c e d.

É possível observar no final da fase de humedificação que o padrão térmico correspondente às temperaturas mais baixas junta à lâmina de água se manteve mais ou menos constante a partir das 2 horas de humedificação, o que poderá significar que a partir dessa altura se atingiu o equilíbrio entre a quantidade de água absorvida por capilaridade e a quantidade de água libertada pela secagem.

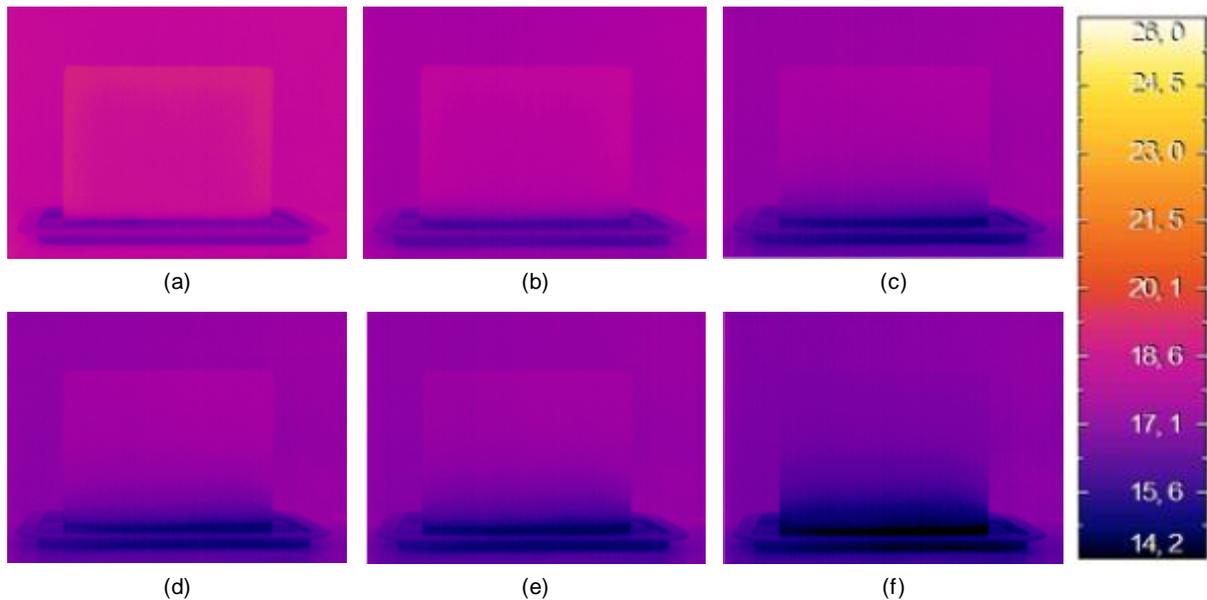


Fig. 4.1. - Termogramas obtidos durante a humedificação no ensaio I.1. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:10h; (c) termograma às 00:40h; (d) termograma às 1:05h; (e) termograma às 1:45h; (f) termograma às 24h

Após o ciclo de humedificação, iniciou-se o ciclo de secagem por um período de 72 horas, no interior da câmara climática em condições de temperatura e humidade relativa controladas. No início da secagem é possível observar que os cantos inferiores do provete, que estiveram em contacto direto com a água, apresentam a menor temperatura superficial de toda a área em análise (Figura 4.2a). Tal poderá significar que a secagem nos cantos está a ser mais intensa do que na restante superfície. É também visível que após as 3 primeiras horas o provete passa a apresentar um padrão uniforme na zona com maior teor de humidade, o que poderá corresponder a uma secagem mais uniforme do que a que ocorreu no início do ciclo de secagem (Figura 4.2b).

Com o decorrer da secagem verifica-se que a temperatura superficial na zona de maior teor de humidade vai aumentando e tendendo para a temperatura que se verifica no topo do provete, na zona seca (Figura 4.2c, d e e). No final do período de secagem, após as 72 horas, o provete ainda não se encontrava totalmente seco, uma vez que se nota uma ligeira diferença entre a temperatura do topo e a da base do provete, mas estava aparentemente muito próximo do equilíbrio higroscópico (Figura 4.2f).

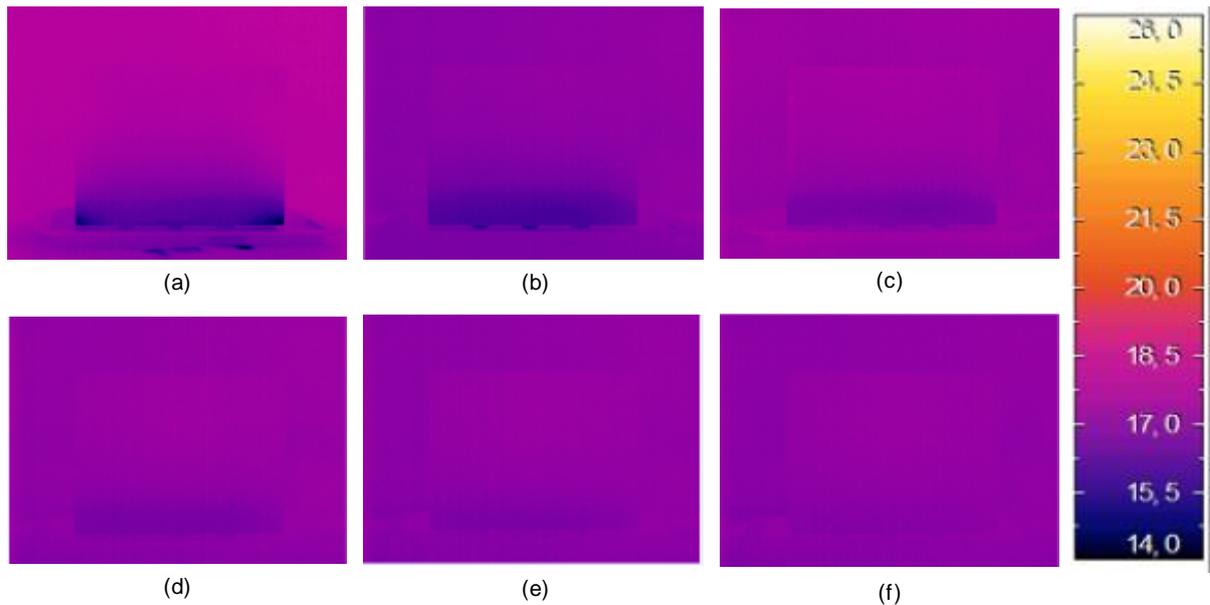


Fig. 4.2. - Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.1. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 03:30h; (c) termograma às 09:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72h

A Figura 4.3 mostra os termogramas captados no ensaio I.2, durante a humedificação pelo topo. Tal como no ensaio anterior, no início do ciclo de humedificação, o provete encontrava-se mais quente do que a ambiência, apesar de ter sido arrefecido em sílica gel durante 24 horas (Figura 4.3a).

No decorrer do ciclo de humedificação pelo topo, é possível identificar a parte húmida na zona superior do provete, devido à diminuição da temperatura superficial resultante da evaporação da água absorvida. Os termogramas (b) e (c) da Figura 4.3 mostram que a embebição se realiza de uma forma mais lenta e gradual do que a verificada no ensaio I.1, uma vez que nas primeiras 2 horas a mancha térmica correspondente à zona húmida é menor do que a verificada no ensaio I.1 num período de tempo semelhante. Este facto pode resultar do procedimento de humedificação, que no ensaio I.2 ocorreu fundamentalmente pelo interior do provete e não junto à superfície.

Após 24 horas, é possível verificar que o provete apresenta uma área húmida 3 cm em relação ao topo superior, (Figura 4.3f), ligeiramente inferior à apresentada no ensaio I.1, e um ligeiro aumento da zona húmida em relação ao termograma da Figura 4.3e. Este resultado evidencia que, como as forças capilares são preponderantes face à força da gravidade, a água absorvida no ensaio I.2 fica retida num determinado nível, não atingindo zonas mais profundas no provete.

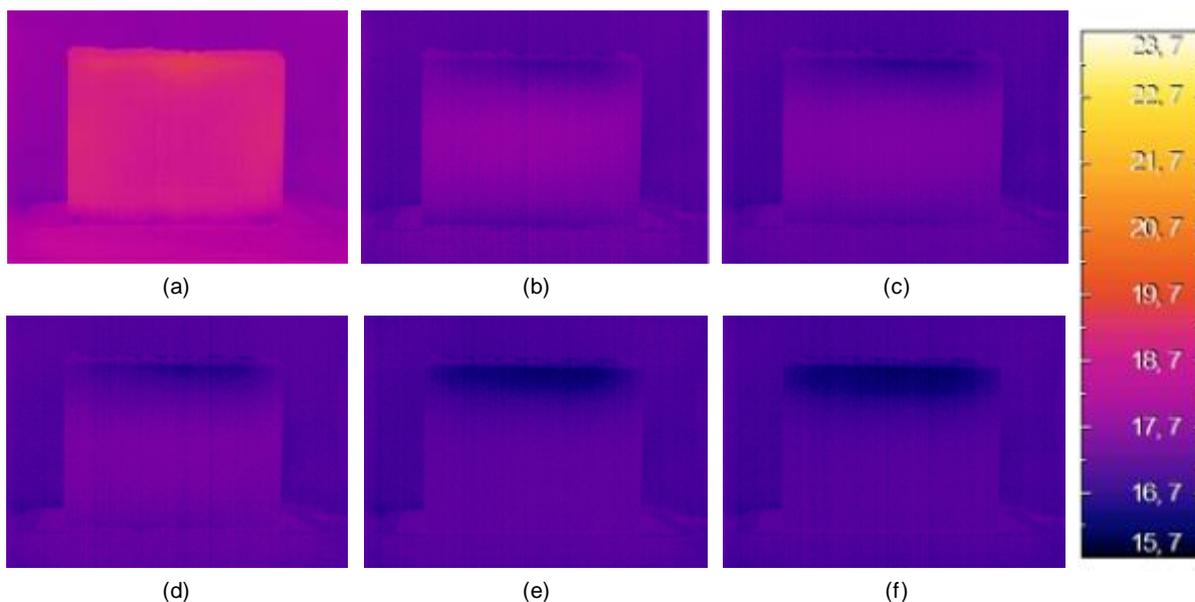


Fig. 4.3. - Termogramas obtidos durante a humedificação no ensaio I.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 1:35h; (c) termograma às 02:00h; (d) termograma às 3:05h; (e) termograma às 15:30h; (f) termograma às 24h

Analisando o ciclo de secagem do ensaio I.2 (Figura 4.4), é possível verificar que o provete no decurso das 72 horas tende a aumentar a sua temperatura superficial até deixar de ser possível identificar heterogeneidades térmicas na superfície. A secagem parece ser mais rápida do que no ensaio I.1, uma vez que ao fim de 48 horas praticamente já não é detetada nenhuma heterogeneidade térmica. Este facto era espectável uma vez que a quantidade de água absorvida também foi menor.

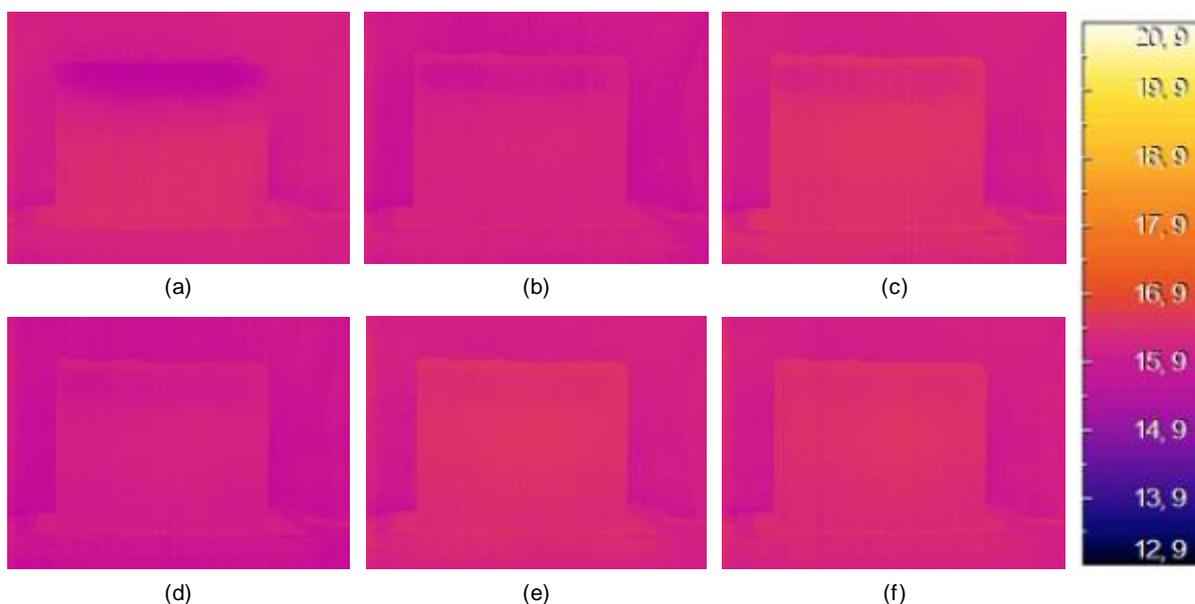


Fig. 4.4. - Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 03:30h; (c) termograma às 10:00h; (d) termograma às 24h; (e) termograma às 48h; (f) termograma às 72h

A Figura 4.5 mostra a evolução da temperatura superficial do provete no ensaio I.3, durante um período de 72 horas de secagem após imersão total em água. Analisando os termogramas obtidos, é possível observar o aumento progressivo da temperatura superficial do provete correspondente a uma diminuição da intensidade da evaporação com o decorrer da secagem. Verifica-se também que a secagem é mais intensa no canto superior direito do provete, o que pode estar relacionado com o fluxo de ar no interior da câmara climática.

Após o período de 72 horas de secagem, é possível verificar que o provete não se encontra totalmente seco sendo ainda visível na zona central inferior do provete uma área que apresenta uma temperatura superficial mais baixa (Figura 4.5f).

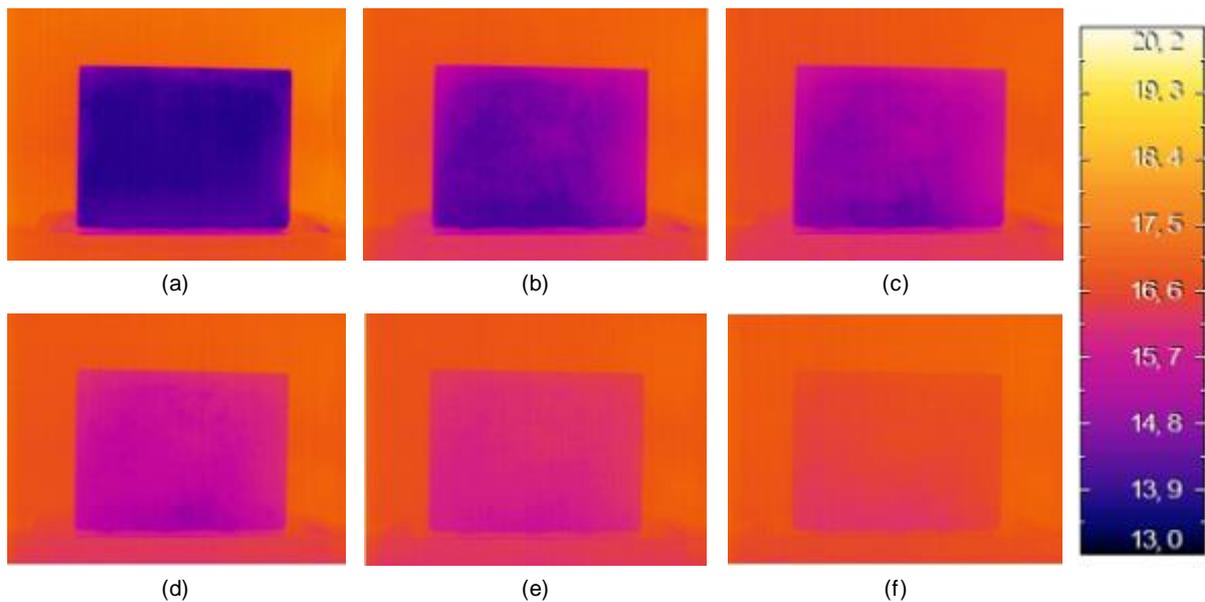


Fig. 4.5. - Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio I.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 05:30h; (c) termograma às 12:00h; (d) termograma às 24h; (e) termograma às 48h; (f) termograma às 72h

Analisando comparativamente os ensaios I.1 e I.2, para o ciclo de humificação, verificou-se que, de uma forma geral, absorção de água pelos provetes se dá de forma mais significativa nas primeiras 8 horas de humificação, uma vez que é neste período que a zona correspondente às temperaturas mais baixas aumenta. Para a fase de secagem dos ensaios da variante I, verifica-se que é essencialmente durante as primeiras 12 horas que ocorre a evaporação da água presente nos provetes.

Analogamente, os três ensaios da variante I, apresentam condições de secagem diferentes entre si. No ensaio I.3 é onde é mais perceptível a diminuição do teor de água ao longo da secagem, enquanto que no provete I.2 devido à água estar essencialmente presente no núcleo do provete, este é o que apresentam uma secagem com menores variações.

De uma forma geral, verifica-se que após as 72 horas do ciclo de secagem, os provetes encontram-se praticamente sem heterogeneidades térmicas e com um aumento da sua temperatura superficial face ao início da secagem.

#### 4.2.2. VARIANTE II – TIPO DE SECAGEM

Nesta subsecção apresentam-se os resultados das medições efetuadas para os ensaios da Variante II, que avalia o efeito do tipo de secagem. Como descrito no Capítulo 3 os ensaios foram iniciados após os provetes terem sido totalmente imersos em água por um período de 4 dias.

Os resultados do ensaio II.1 estão descritos no subcapítulo 4.2.1, uma vez que correspondem ao ensaio I.3. Os resultados obtidos no ensaio II.2 (Figura 4.6) mostram um aumento significativo da temperatura do provete ao longo do tempo devido à ação da lâmpada de infravermelhos. Apesar do efeito que prevalece nestas imagens não ser o da variação da temperatura superficial devido à evaporação, poderá afirmar-se, pela observação dos termogramas das Figuras 4.6b e 4.6c que a heterogeneidade térmica no topo do provete, correspondente a temperaturas superficiais mais baixas, poderá resultar da evaporação da água absorvida ou do aquecimento diferencial devido à posição da lâmpada de infravermelhos. A secagem do provete poderá assumir-se como tendo sido muito rápida, uma vez que a partir das 3 horas de ensaio já não se detetam heterogeneidades.

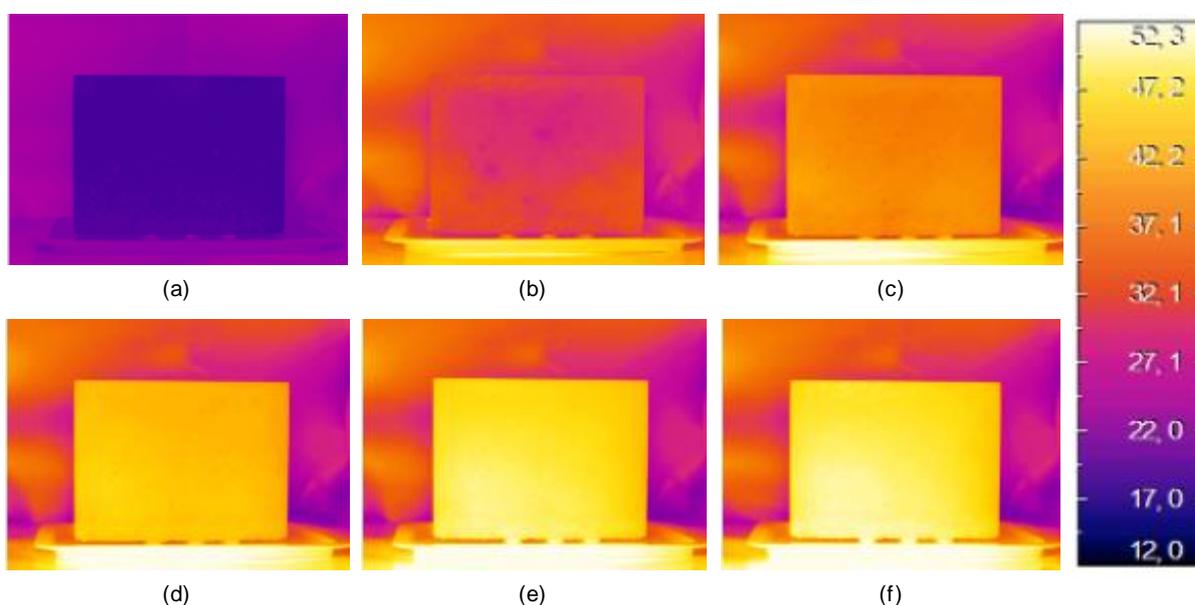


Fig. 4.6. - Termogramas obtidos durante o ciclo de secagem do ensaio II.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h

No ensaio II.3A, o aumento da convecção foi conseguido através de um fluxo de ar perpendicular à face do provete. A Figura 4.7 mostra que há um aumento da temperatura superficial do provete após uma descida inicial (Figuras 4.7a e 4.7b), resultante da atuação da ventoinha. No entanto, esse aumento não é tão significativo como o verificado no ensaio II.1, em que a secagem ocorre em condições ambiente controladas, talvez devido à circulação de ar provocada pela ventoinha.

É possível também observar que o aumento da convecção fez sobressair nas imagens térmicas zonas de evaporação mais intensa, e portanto, mais frias, que vão desaparecendo à medida que ocorre a secagem. No final da secagem, praticamente não se distinguem heterogeneidades térmicas. No entanto, é possível observar uma zona mais fria na parte inferior do provete, resultante da percolação da água no interior do material ou da posição da ventoinha face ao provete.

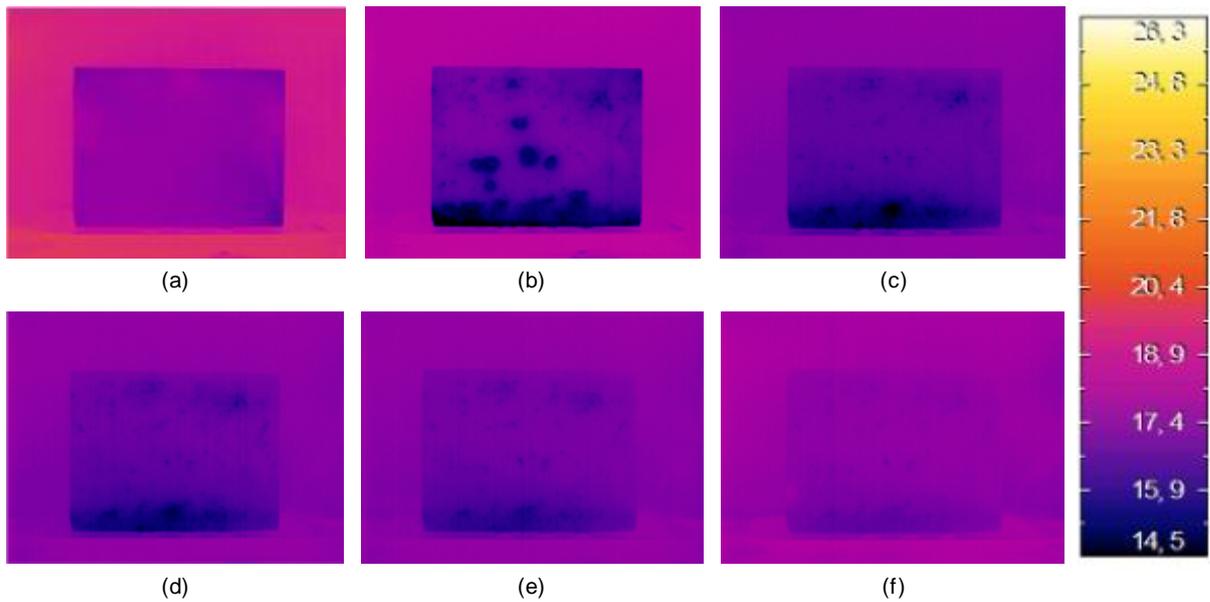


Fig. 4.7. - Termogramas obtidos durante o ciclo de secagem do ensaio II.3A. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:10h; (c) termograma às 2:00h; (d) termograma às 3h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h

Na Figura 4.8 mostram-se os resultados do ensaio II.3B, em que o aumento da convecção resultou de um fluxo de ar paralelo à face do provete. É possível verificar que os resultados são muito semelhantes aos obtidos no ensaio II.3A.

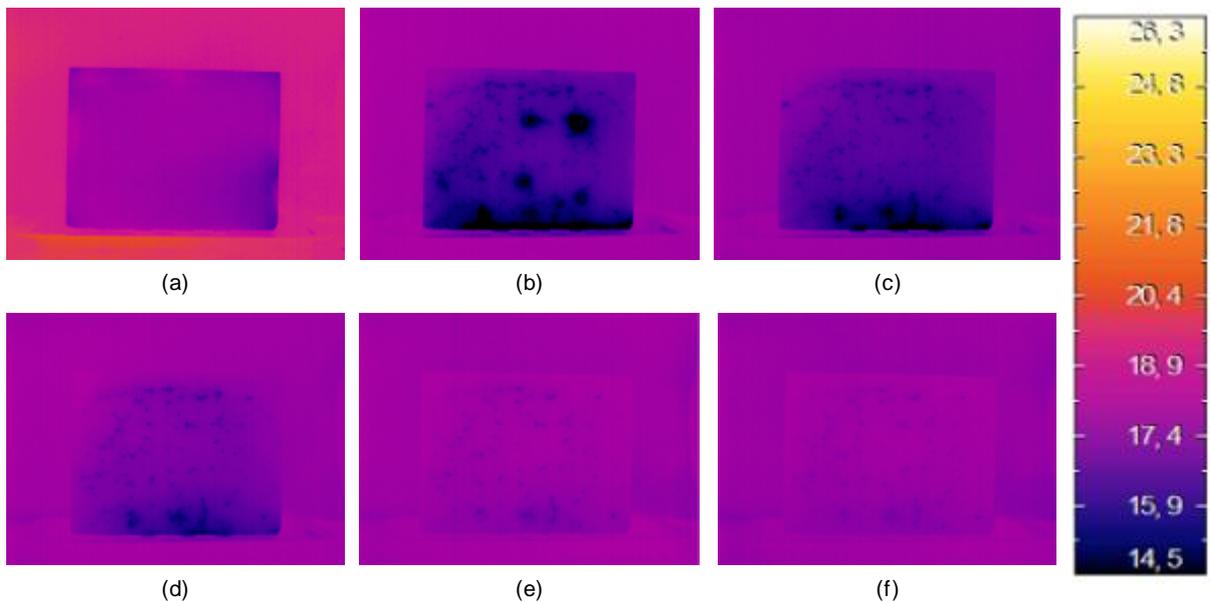


Fig. 4.8. - Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio II.3B. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:20h; (c) termograma às 00:40h; (d) termograma às 1:40h; (e) termograma às 4:10h; (f) termograma às 8h

Comparando os resultados dos ensaios da variante II verifica-se que não houve grande vantagem na introdução da termografia ativa para a análise do fenómeno da secagem, uma vez que o que prevalece nas imagens térmicas é o aquecimento devido à lâmpada de infravermelhos. O aumento da convecção devido ao aumento do fluxo de ar junto à superfície fez sobressair irregularidades térmicas na superfície em estudo, o que poderão corresponder a zonas com evaporação mais intensa e portanto com menor temperatura superficial. Também não se verificaram grandes diferenças entre a posição do fluxo de ar relativamente à face do provete.

Concluídas as 8 horas do ciclo de secagem dos provetes nos ensaios II.2 e II.3, verificou-se que o processo de secagem dos provetes ainda não estaria concluído, uma vez que ainda se identificavam algumas heterogeneidades térmicas. Este facto, pode ser confirmado através dos resultados obtidos no ensaio II.1 (I.3), em que a secagem se prolongou até às 72 horas.

#### 4.2.3.VARIANTE III – PONTO DE SECAGEM INICIAL

Nesta subsecção apresentam-se os resultados das medições efetuadas para os ensaios da Variante III, que avalia o efeito da humidade inicial na quantidade de água embebida pela base do provete. Os resultados do ensaio III.1, em que o provete totalmente seco, com um teor de humidade 1,22%, foi colocado em contacto com uma lâmina de água, são os indicados no subcapítulo 4.2.1 para o ensaio I.1. Os resultados do ensaio III.2 em que o provete estava parcialmente seco, com um teor de humidade de 0,83%, são apresentados na Figura 4.9, para a fase de embebição e na Figura 4.10 para a fase de secagem. Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se as imagens térmicas na fase de embebição e secagem, respetivamente, para o ensaio III.3, em que o provete estava em equilíbrio higroscópico.

Verifica-se que não há grandes diferenças entre os resultados dos 3 ensaios, embora o nível de água atinja valores mais elevados na fase de embebição quando o teor de humidade inicial é menor.

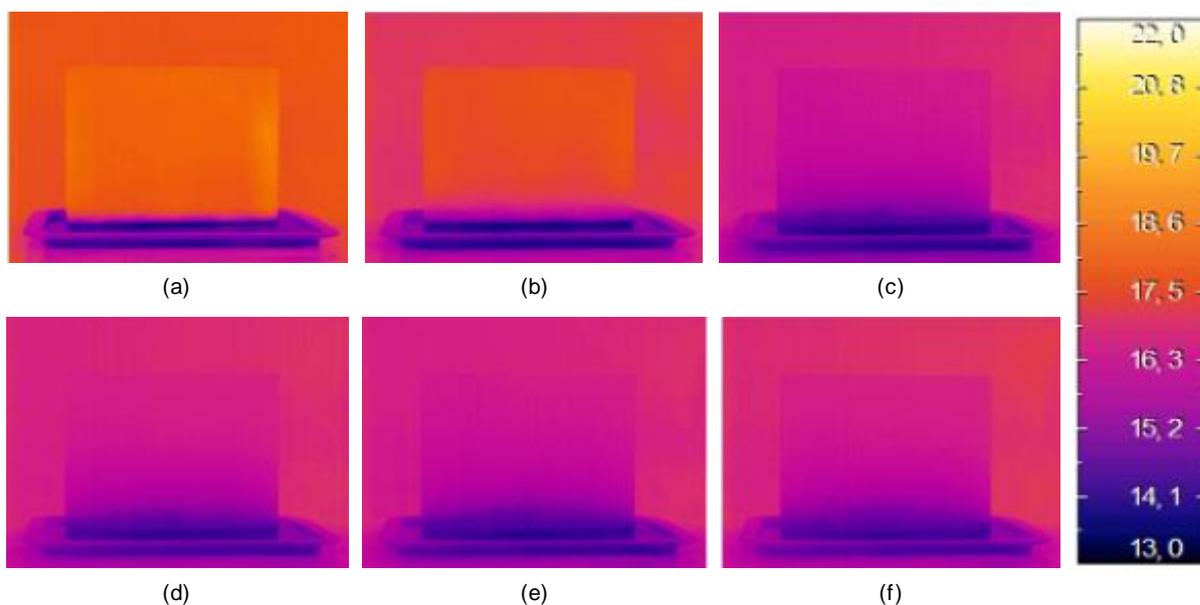


Fig. 4.9. - Termogramas obtidos durante o ciclo de humedificação do ensaio III.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h

No ciclo de secagem, é visível que o provete tende a aumentar a sua temperatura superficial gradualmente, à medida que ocorre a evaporação da água presente no provete. Através da análise das imagens térmicas, é visível que o provete seca de forma significativa, por evaporação, sensivelmente, nas primeiras 3 horas do processo de secagem.

Contudo, é também possível verificar que a secagem do provete ocorre do lado direito para o lado esquerdo do provete, do ponto de vista dos termogramas, como é visível nos termogramas (b), (c) e (d) da Figura 4.10. Este fenómeno também foi observado no ensaio I.3.

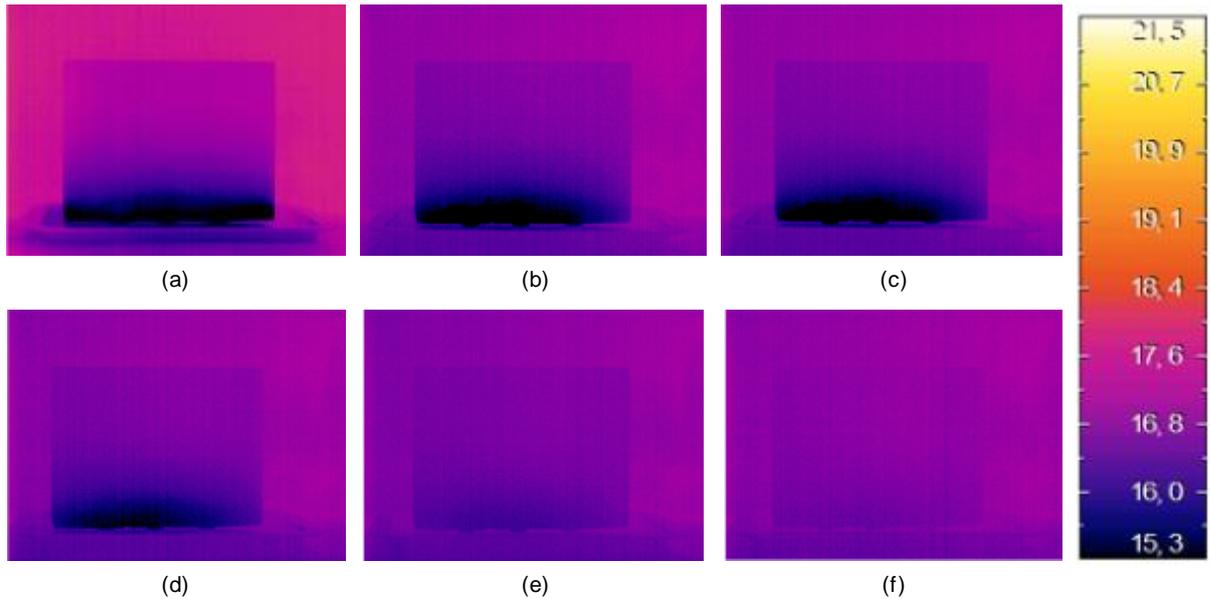


Fig. 4.10.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio III.2. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 6:00h; (c) termograma às 19:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72:00h

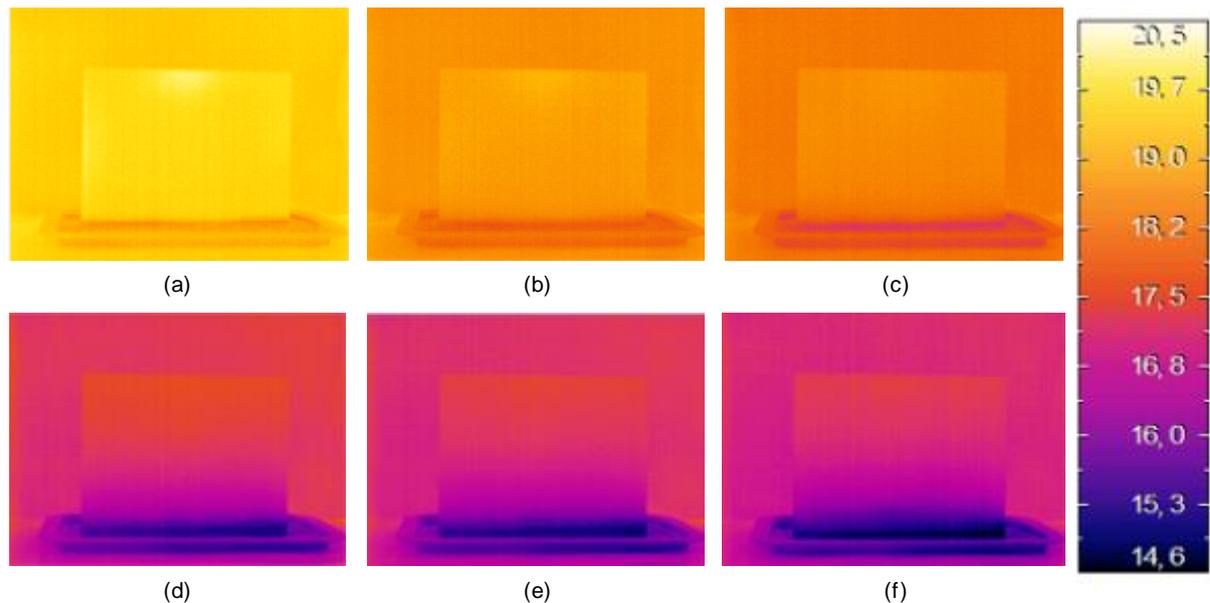


Fig. 4.11.- Termogramas obtidos durante a humificação no ensaio III.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 00:30h; (c) termograma às 1:30h; (d) termograma às 2:45h; (e) termograma às 5:30h; (f) termograma às 8h.

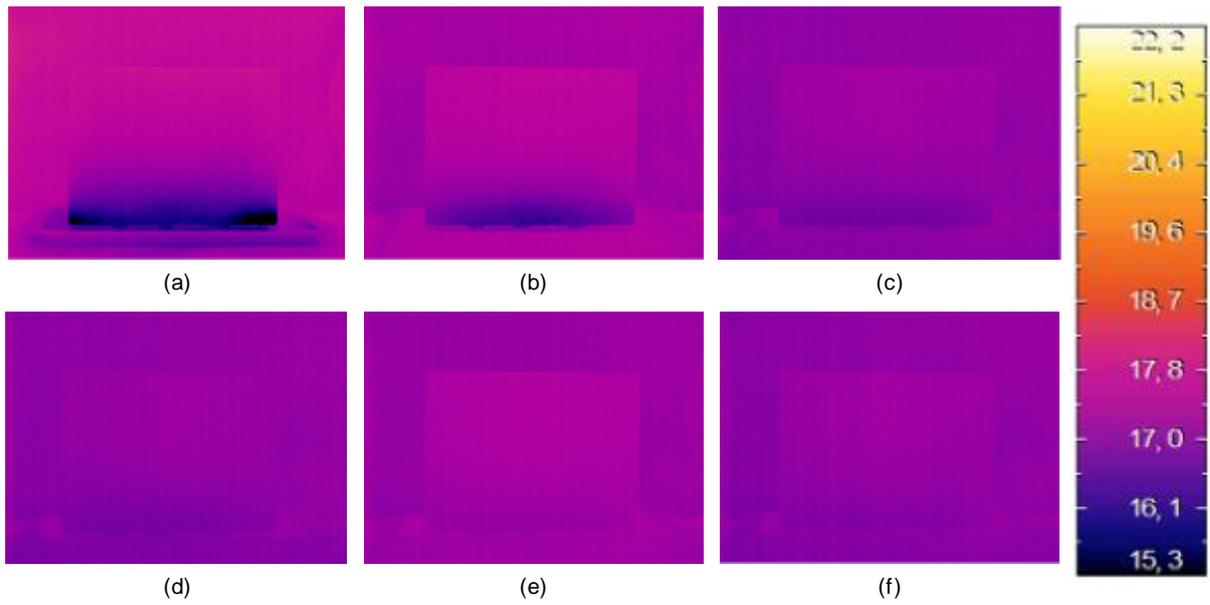


Fig. 4.12.- Termogramas obtidos durante a secagem no ensaio III.3. (a) termograma às 00h; (b) termograma às 6:00h; (c) termograma às 19:00h; (d) termograma às 24:00h; (e) termograma às 48:00h; (f) termograma às 72:00h

### 4.3. AVALIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DOS PROVETES

#### 4.3.1. VARIANTE I – TIPO DE HUMIDIFICAÇÃO

As tabelas 4.1 a 4.3 e a Figura 4.13 apresentam os resultados das pesagens efetuadas durante a Variante I, em que se avaliou o comportamento dos provetes de betão leve para diferentes tipos de humidificação.

Tabela 4.1. - Variação da massa ao longo do ensaio I.1

Variante I - Ensaio I.1				
Fase do Ensaio	Tempo de ensaio (h)	Massa (g)	$\Delta$ Massa (g)	$\Delta$ Massa (%)
Após secagem em estufa	-	6341	-	-
Após embebição	24h00	6419	78	1,22
	01h00	6419	78	1,23
	02h00	6418	77	1,21
	03h00	6417	76	1,20
	04h00	6416	75	1,18
	05h00	6416	75	1,18
Secagem	06h00	6415	74	1,17
	24h00	6409	68	1,07
	27h00	6408	67	1,06
	30h00	6407	66	1,04
	48h00	6404	63	0,99
	51h00	6404	63	0,99
	54h00	6403	62	0,98
72h00	6401	60	0,95	

Tabela 4.2. - Variação da massa ao longo do ensaio I.2

Variante I - Ensaio I.2				
Fase do Ensaio	Tempo de ensaio (h)	Massa (g)	$\Delta$ Massa (g)	$\Delta$ Massa (%)
Após secagem em estufa	-	6497	-	-
Após embebição	24h00	6555	58	0,89
	01h00	6555	58	0,89
	02h00	6554	57	0,88
	03h00	6553	56	0,86
	04h00	6553	56	0,86
	05h00	6552	55	0,85
Secagem	06h00	6552	55	0,85
	24h00	6549	52	0,80
	27h00	6549	52	0,80
	30h00	6549	52	0,80
	48h00	6545	48	0,74
	51h00	6545	48	0,74
	54h00	6544	47	0,72
72h00	6542	45	0,69	

Tabela 4.3. - Variação da massa ao longo do ensaio I.3

Variante I - Ensaio I.3				
Fase do Ensaio	Tempo de ensaio (h)	Massa (g)	$\Delta$ Massa (g)	$\Delta$ Massa (%)
Após secagem em estufa	-	6352	-	-
Após embebição	72h00	6913	561	8,83
	01h00	6905	553	8,71
	02h00	6893	541	8,52
	03h00	6886	534	8,41
	04h00	6881	529	8,33
	05h00	6876	524	8,25
Secagem	06h00	6870	518	8,15
	24h00	6801	449	7,07
	27h00	6796	444	6,99
	30h00	6790	438	6,90
	48h00	6759	407	6,41
	51h00	6756	404	6,36
	54h00	6751	399	6,28
	72h00	6730	378	5,95

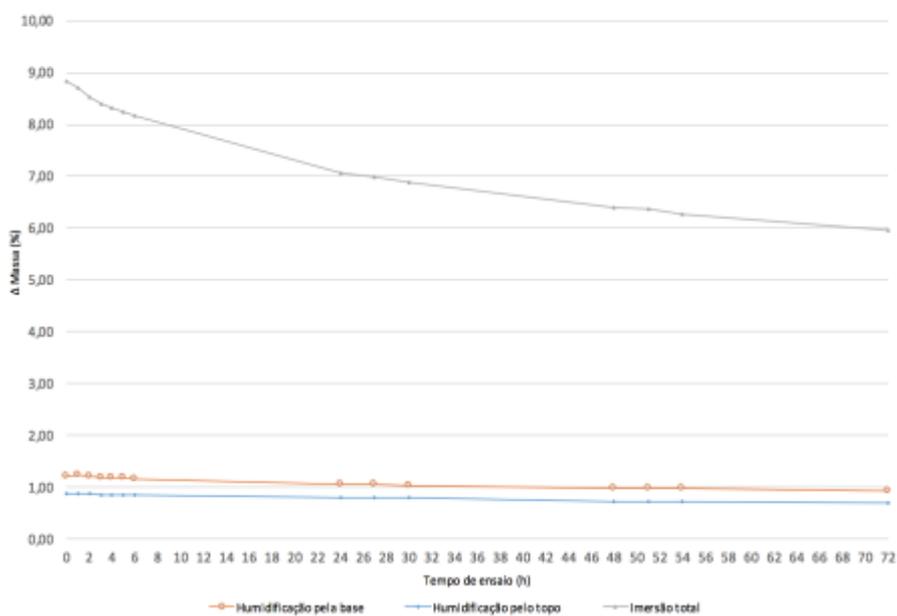


Fig. 4.1.1 - Variação da massa (%) para os ensaios da Variante I

No decorrer do ciclo de humedificação do ensaio I.1, o provete apresenta um aumento de massa de 78g em relação ao estado seco, correspondendo a 1,22%. Durante o ciclo de secagem, o provete apresenta uma variação de massa crescente, em função do tempo de ensaio. No final das 72 horas de secagem, o provete de betão leve apresenta uma diminuição da massa da ordem das 18g.

No ensaio I.2 o aumento de massa devido à humedificação foi de 58g, correspondendo a 0,89%. A variação de massa durante as 72 horas de secagem foi de 13g.

No ensaio I.3 o aumento de massa devido à humedificação foi de 561g, correspondendo a 8,83%. A variação de massa durante as 72 horas de secagem foi de 183g.

Relativamente ao ciclo de secagem, verifica-se que o ensaio I.3 apresenta maiores variações de massa, do que a humedificação pela base e do que a humedificação pelo topo. Tal como era esperado, a maior variação de massa durante a secagem corresponde ao provete totalmente imerso, visto que é o provete que apresenta maior teor em água e que desta forma durante a secagem tem tendência a apresentar maiores variações de massa. O ensaio de humedificação pelo topo, comparativamente ao ensaio de humedificação pela base, apresenta menores variações de massa, pois devido ao facto de no ensaio I.2 se ter aplicado um cordão de silicone, este mesmo que permitiu conter a lâmina de água no topo do provete, também impediu que a mesma abrangesse as faces do provete.

Desta forma, a água no ensaio I.2 foi absorvida essencialmente pelo núcleo central do provete, migrando posteriormente para as faces do mesmo pelos poros do provete. A ocorrência deste fenómeno levou a que a água presente à face do provete fosse menor, reduzindo a evaporação. Associado à baixa evaporação no ensaio I.2 está a descida da água no interior do provete, devido às forças da gravidade, que neste caso são superiores às forças capilares.

#### 4.3.2. VARIANTE II – TIPO DE SECAGEM

As tabelas 4.3 a 4.6 e as Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados das pesagens correspondentes à Variante II, em que se avaliou o comportamento dos provetes de betão leve para diferentes tipos de secagem.

Tabela 4.4. - Variação da massa ao longo do ensaio II.2

Variante II - Ensaio II.2				
Fase do Ensaio	Tempo de ensaio (h)	Massa (g)	Δ Massa (g)	Δ Massa (%)
<b>Equilíbrio Higroscópico</b>	-	6435	-	-
<b>Após embebição</b>	72h00	6758	323	5,02
	00h30	6750	315	4,90
	01h00	6745	310	4,82
	01h30	6738	303	4,71
	02h00	6731	296	4,60
	02h30	6729	294	4,57
	03h00	6724	289	4,49
	03h30	6721	286	4,44
<b>Secagem</b>	04h00	6717	282	4,38
	04h30	6713	278	4,32
	05h00	6710	275	4,27
	05h30	6707	272	4,23
	06h00	6704	269	4,18
	06h30	6701	266	4,13
	07h00	6697	262	4,07
	07h30	6695	260	4,04
	08h00	6693	258	4,01

Tabela 4.5. - Variação da massa ao longo do ensaio II.3A

<b>Variante II - Ensaio II.3A</b>					
<b>Fase do Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (h)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (%)</b>	
<b>Equilíbrio Higroscópico</b>	-	6435	-	-	
<b>Após embebição</b>	72h00	6843	408	6,34	
	00h30	6831	396	6,15	
	01h00	6827	392	6,09	
	01h30	6824	389	6,05	
	02h00	6820	385	5,98	
	02h30	6817	382	5,94	
	03h00	6814	379	5,89	
	03h30	6812	377	5,86	
	<b>Secagem</b>	04h00	6810	375	5,83
		04h30	6806	371	5,77
		05h00	6804	369	5,73
		05h30	6801	366	5,69
		06h00	6799	364	5,66
		06h30	6796	361	5,61
		07h00	6793	358	5,56
		07h30	6790	355	5,52
	08h00	6787	352	5,47	

Tabela 4.6. - Variação da massa ao longo do ensaio II.3B

<b>Variante II - Ensaio II.3B</b>					
<b>Fase do Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (h)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (%)</b>	
<b>Equilíbrio Higroscópico</b>	-	6435	-	-	
<b>Após embebição</b>	72h00	6863	428	6,65	
	00h30	6853	418	6,50	
	01h00	6847	412	6,40	
	01h30	6845	410	6,37	
	02h00	6842	407	6,32	
	02h30	6840	405	6,29	
	03h00	6838	403	6,26	
	03h30	6836	401	6,23	
	<b>Secagem</b>	04h00	6835	400	6,22
		04h30	6834	399	6,20
		05h00	6832	397	6,17
		05h30	6831	396	6,15
		06h00	6829	394	6,12
		06h30	6828	393	6,11
		07h00	6827	392	6,09
		07h30	6826	391	6,08
	08h00	6825	390	6,06	

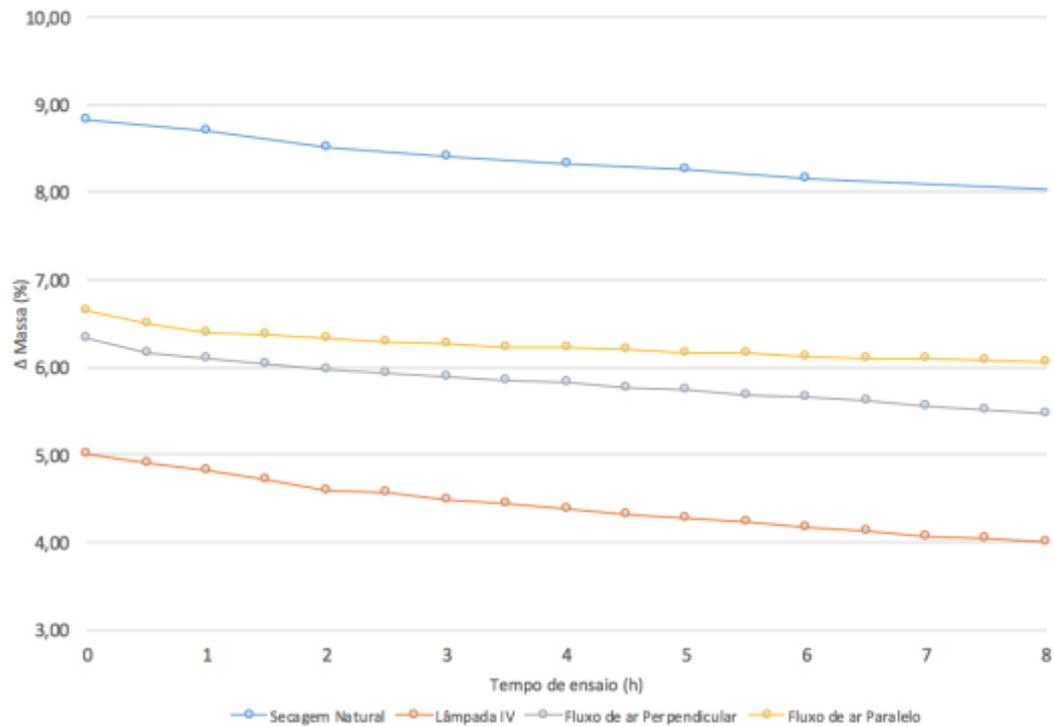


Fig. 4.14.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante II

No decorrer do ciclo de humedificação do ensaio II.2, o provete apresenta um aumento de massa de 323g em relação ao equilíbrio higroscópico, correspondendo a 5,02%. Durante o ciclo de secagem, o provete apresenta uma variação de massa decrescente, em função do tempo de ensaio. No final das 8 horas de secagem, o provete de betão leve apresenta uma diminuição da massa da ordem das 65g.

Nos ensaios II.3A e II.3B, a variação entre eles é a direção do fluxo de ar, sendo perpendicular e paralelo, respetivamente. O aumento de massa, no ensaio II.3A, devido à imersão foi de 408g, correspondendo a 6,34%. A variação de massa durante as 8 horas de secagem foi de 56g. Enquanto que, no ensaio II.3B, o aumento de massa devido à imersão foi de 428g, correspondendo a 6,65%. A variação de massa durante as 8 horas de secagem foi de 38g.

Contrariamente ao que seria esperado, nesta variante a massa inicial dos provetes não foi a mesma para todos os ensaios. Tal facto leva a que seja necessária uma análise mais cuidada dos dados. Na Figura 4.15 encontra-se representada a variação de massa dos provetes com a massa inicial corrigida.

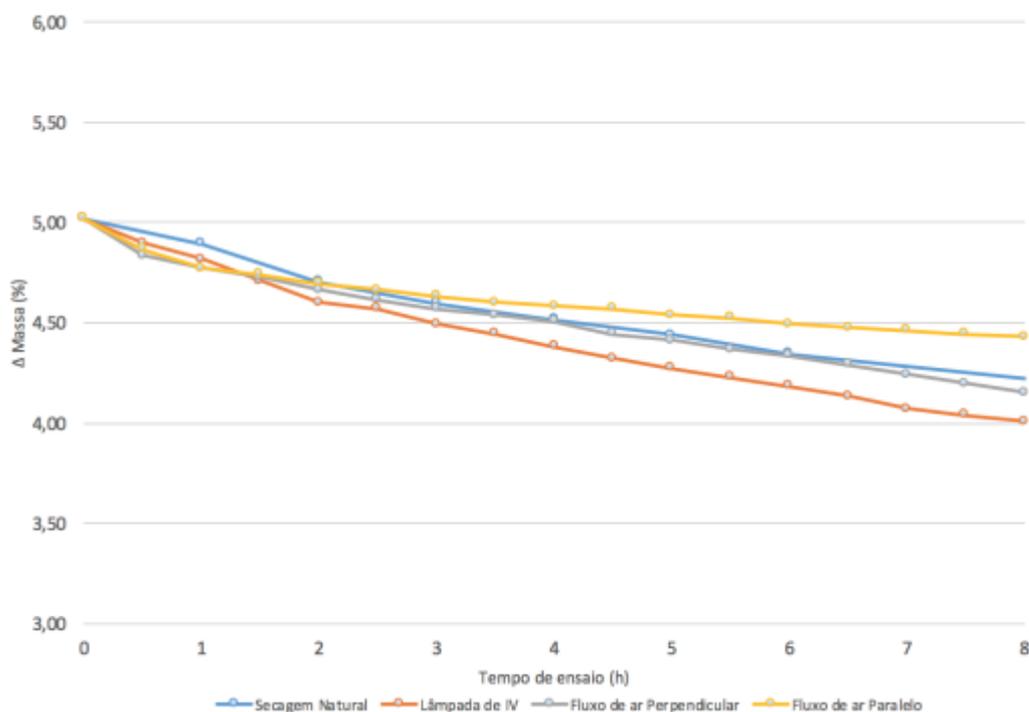


Fig. 4.15.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante II com correção da massa inicial

Na Figura 4.15, é possível comparar de forma mais precisa a variação percentual de massa dos provetes. Verifica-se, que a quantidade de água evaporada é maior quando ocorre aumento da convecção com direção do fluxo de ar paralelo à face do provete. Enquanto que a variação de massa na secagem, a secagem natural é idêntica à secagem por aumento da convecção com fluxo de ar perpendicular à face do provete, sendo praticamente idêntica, embora neste último caso a variação de massa seja inferior. Contudo, a diferença existente entre o ensaio II.3A e o ensaio II.3B, poderá dever-se às movimentações de ar presentes na câmara climática, provenientes da ventoinha e do funcionamento da própria câmara climática.

No ensaio II.2, com aumento da temperatura superficial com recurso a uma lâmpada de infravermelhos, na Figura 4.15, a variação de massa é a mais baixa da variante II. No entanto, esta variação de massa está em grande parte associada ao aquecimento do provete devido à presença de uma fonte de calor externa, que leva a que para além do aumento da temperatura do provete, o processo de secagem seja mais rápido.

4.3.3. VARIANTE III – PONTO DE SECAGEM INICIAL

As tabelas 4.1, 4.7, 4.8 e a Figura 4.16 apresentam os resultados das pesagens correspondentes à Variante III, em que se avaliou o comportamento dos provetes de betão leve partindo de pontos de secagem iniciais distintos.

Tabela 4.7.- Variação da massa ao longo do ensaio III.2

<b>Variante III - Ensaio III.2</b>				
<b>Fase do Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (h)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (%)</b>
<b>Após secagem em estufa</b>	-	6483	-	-
<b>Após embebição</b>	24h00	6537	54	0,83
<b>Secagem</b>	01h00	6536	53	0,82
	02h00	6534	51	0,79
	03h00	6533	50	0,77
	04h00	6532	49	0,76
	05h00	6531	48	0,74
	06h00	6530	47	0,72
	24h00	6521	38	0,59
	27h00	6520	37	0,57
	30h00	6519	36	0,56
	48h00	6516	33	0,51
	51h00	6516	33	0,51
	54h00	6515	32	0,49
	72h00	6513	30	0,46

Tabela 4.8.- Variação da massa ao longo do ensaio III.3

<b>Variante III - Ensaio III.3</b>				
<b>Fase do Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (h)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (g)</b>	<b>Δ Massa (%)</b>
<b>Equilíbrio Higroscópico</b>	-	6443	-	-
<b>Após embebição</b>	24h00	6467	24	0,37
<b>Secagem</b>	01h00	6467	24	0,37
	02h00	6465	22	0,34
	03h00	6464	21	0,33
	04h00	6463	20	0,31
	05h00	6462	19	0,29
	06h00	6461	18	0,28
	24h00	6455	12	0,19
	27h00	6454	11	0,17
	30h00	6453	10	0,16
	48h00	6450	7	0,11
	51h00	6450	7	0,11
	54h00	6449	6	0,09
	72h00	6447	4	0,06

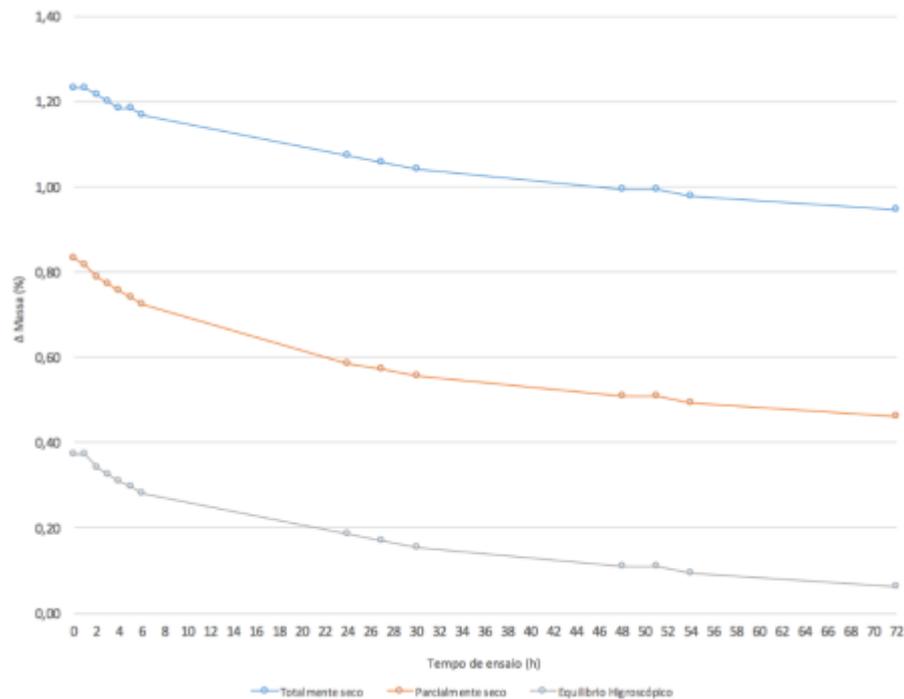


Fig. 4.16.- Variação da massa (%) para os ensaios da Variante III

No decorrer do ciclo de humedificação do ensaio III.1, o provete apresenta um aumento de massa de 78g em relação ao estado seco, correspondendo a 1,22%. Durante o ciclo de secagem, o provete apresenta uma variação de massa crescente, em função do tempo de ensaio. No final das 72 horas de secagem, o provete de betão leve apresenta uma diminuição da massa da ordem das 18g.

No ensaio III.2 o aumento de massa devido à humedificação foi de 54g, correspondendo a 0,83%. A variação de massa durante as 72 horas de secagem foi de 24g.

No ensaio III.3 o aumento de massa devido à humedificação foi de 24g, correspondendo a 0,37%. A variação de massa durante as 72 horas de secagem foi de 20g, o que permite afirmar que o provete se encontra seco, ou muito próximo dessa condição.

Tal como seria e expectável, os provetes após serem submetidos a embebição pela base, apresentam para o ciclo de secagem variações de massa significativamente distintas entre si, ao longo das 72 horas. Os ensaios III.2 e III.3, apresentam maiores variações de massa ao longo do ciclo de secagem, do que no ensaio III.1. Este resultado é justificado com o facto de o teor de água presente no provete não ser suficiente razoável para permitir que o provete varie a sua massa devido à evaporação de água.

É possível verificar que o ponto de partida influencia a quantidade de água absorvida pelo provete de betão leve, visto que o teor de água é um fator importante para a caracterização dos provetes, tendo sido visível esse mesmo efeito na variação de massa após a imersão. Desta forma a variação de massa ao longo do ciclo de secagem desenvolve-se de forma proporcional ao ciclo de humedificação.

Apesar da quantidade de água absorvida ser maior quando o provete está mais seco, a variação da massa devido à secagem foi semelhante.

#### 4.3.4. APRECIÇÃO DOS RESULTADOS

O método gravimétrico constitui uma técnica de ensaio não destrutiva, que possibilita a identificação da variação da massa devido a fenômenos de humidificação ou de secagem. É possível verificar a presença de água devido à ascensão capilar ou absorção do provete, conforme comprovado nos quadros e figuras anteriormente analisados.

Na fase de secagem, continua a ser possível verificar a presença de água no provete. No entanto, com a diminuição da água retida no provete, a variação de massa deixa de ser significativa, em comparação com a massa dos provetes em equilíbrio higroscópico.

Sendo o critério para se considerar um provete de betão leve, totalmente seco, regulamentado na ISO 15148, onde se encontra referido que um corpo está seco quando a variação da massa é igual ou inferior a aproximadamente 0,1%. Verifica-se assim, que de uma forma geral, os provetes de betão leve após o ciclo de secagem não se encontram totalmente secos, como é possível verificar através do valor percentual da variação da massa.

#### 4.4. RESULTADOS DO HUMIDÍMETRO

Nesta subsecção apresentam-se os resultados das medições efetuadas com recurso ao humidímetro CEBTP Type MX-HU comparando-as com os termogramas capturados.

##### 4.4.1. VARIANTE I – TIPO DE HUMIDIFICAÇÃO

Na figura 4.17 é possível verificar que nos gráficos resultantes da medição do humidímetro ao longo das 72 horas de secagem se verifica uma diminuição significativa do teor de humidade. Na figura 4.17 (b) constata-se que os valores mais elevados das medições com o humidímetro se encontram no canto inferior esquerdo do provete. No entanto comparando o termograma (a) com o gráfico (b) da figura 4.17, verifica-se que o termograma não corresponde na sua totalidade ao gráfico do humidímetro.

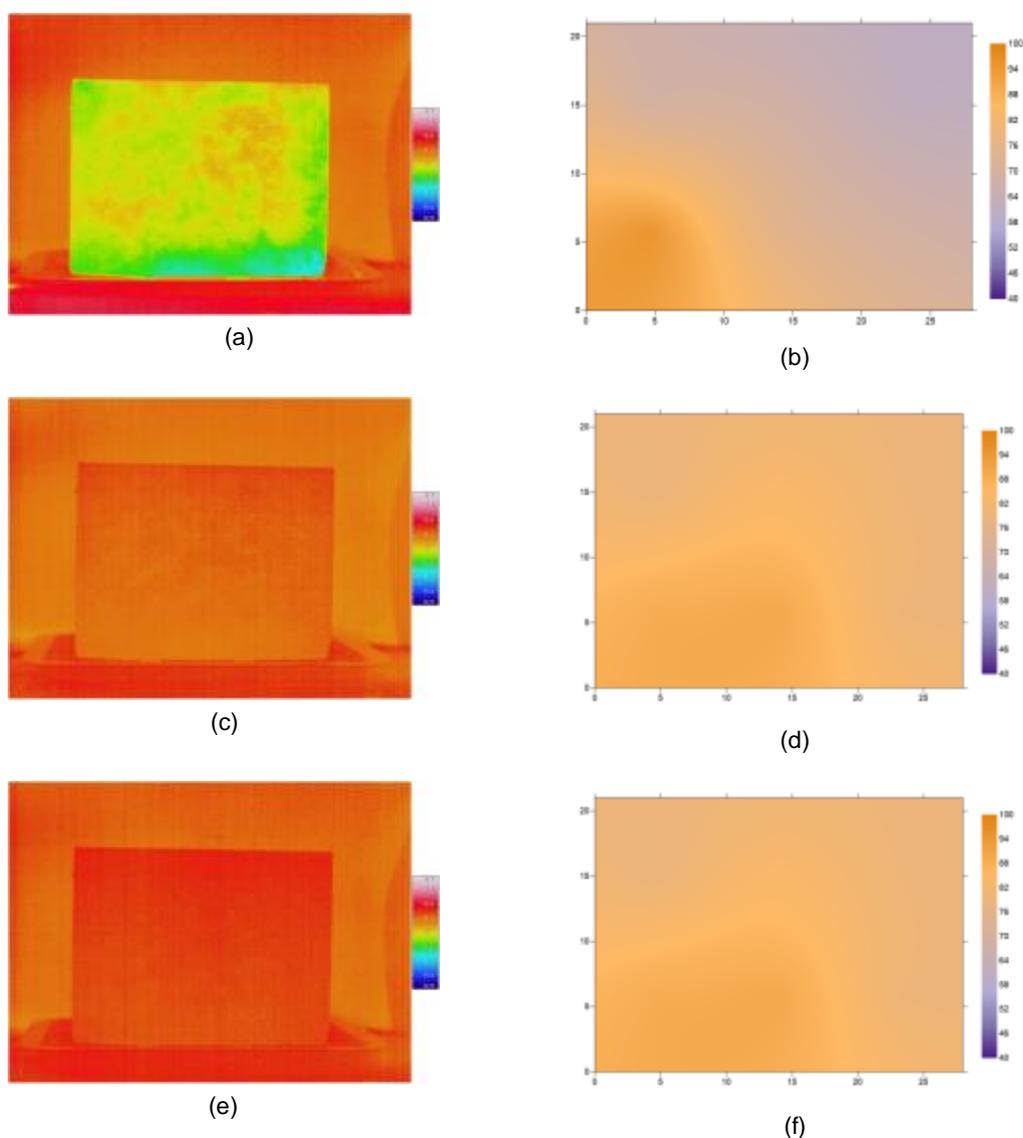


Fig. 4.17.– Termogramas obtidos durante a secagem e resultados da medição com o humidímetro no ensaio I.3. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 24h; (e) e (f) correspondem às 72h.

Na escala proposta para os resultados do humidímetro o valor 100 corresponde ao estado mais seco e o valor 40 ao estado mais húmido.

#### 4.4.2. VARIANTE II – TIPO DE SECAGEM

Por análise da figura 4.18 é visível que ao longo das 8 horas há uma ligeira secagem do provete. De uma forma global verifica-se uma boa correlação entre os termogramas e os gráficos do humidímetro. Contudo verifica-se que há um aumento de cerca de 49g nos cantos superiores do provete, que não seria expectável.

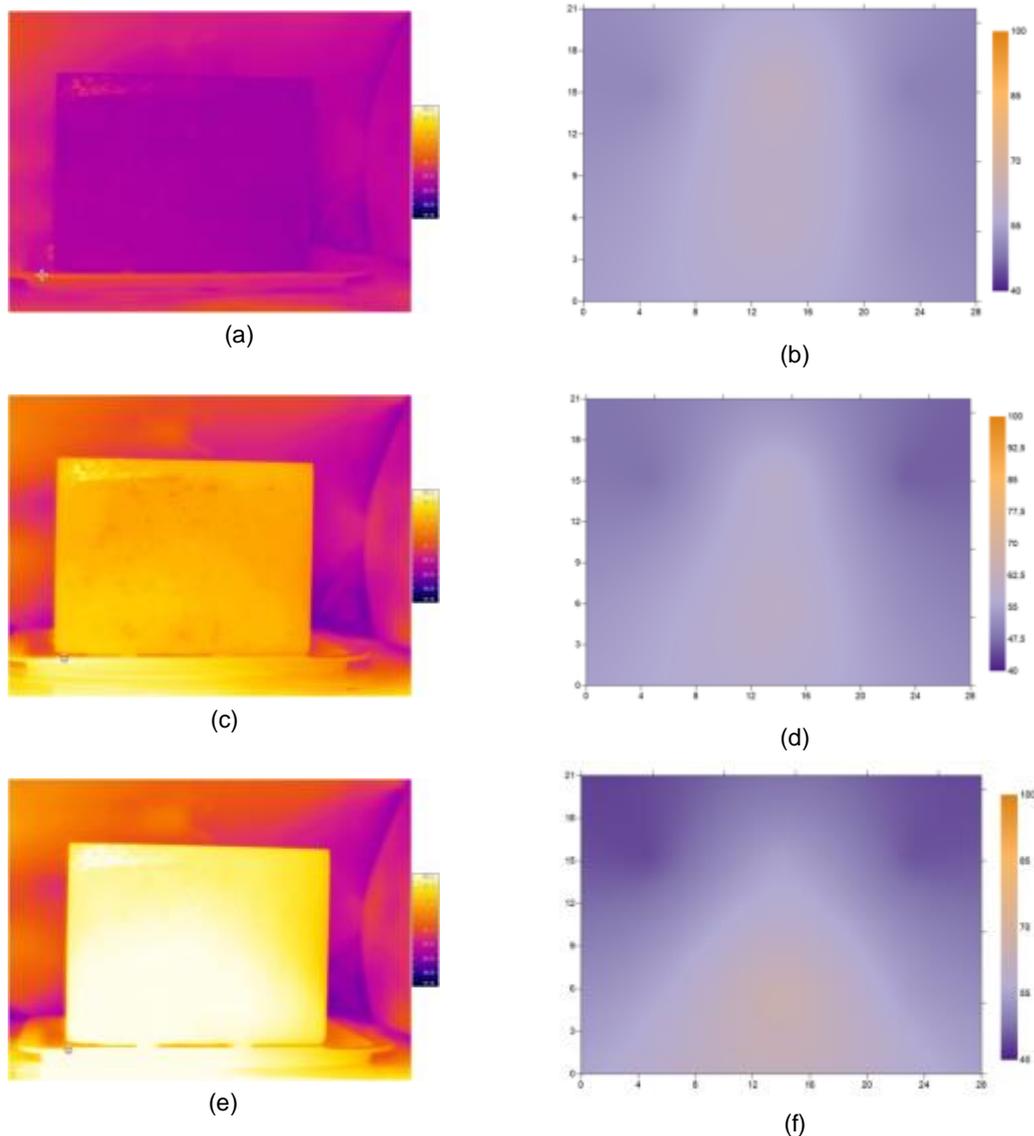


Fig. 4.18 – Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.2. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 1:30h; (e) e (f) correspondem às 8h.

Este ensaio foi realizado com recurso a uma lâmpada de IV cuja a radiação incide principalmente na parte central do provete, originando um aumento da temperatura superficial nessa zona que é visível nos termogramas, também nos resultados do humidímetro se verifica que a zona central do provete é aquela que vai secando mais rapidamente ao longo do tempo.

Na figura 4.19, comparando os termogramas com os gráficos referentes aos dados do humidímetro é possível verificar que não é visível nenhuma correspondência. Verifica-se através dos termogramas que ao longo das 8 horas, a secagem do provete ocorre do topo para a base do mesmo, não correspondendo às leituras realizadas com o humidímetro, onde se encontra representado que o teor de humidade é inferior na base do provete comparativamente com o seu topo. Tal facto encontra-se relacionado com o ponto de medição com o humidímetro se encontrar acima da área húmida da base do provete.

É também visível que decorridas as 8 horas do ciclo de secagem (Figura 4.19 (e) e (f)), se verifica pelos dois métodos de análise que existe correspondências no canto superior esquerdo, zona que apresenta teor de humidade maior, ou seja, mais húmida.

Comparativamente aos ensaios anteriores, os resultados não são tão evidentes, apresentando este ensaio uma mancha mais seca na zona central do provete.

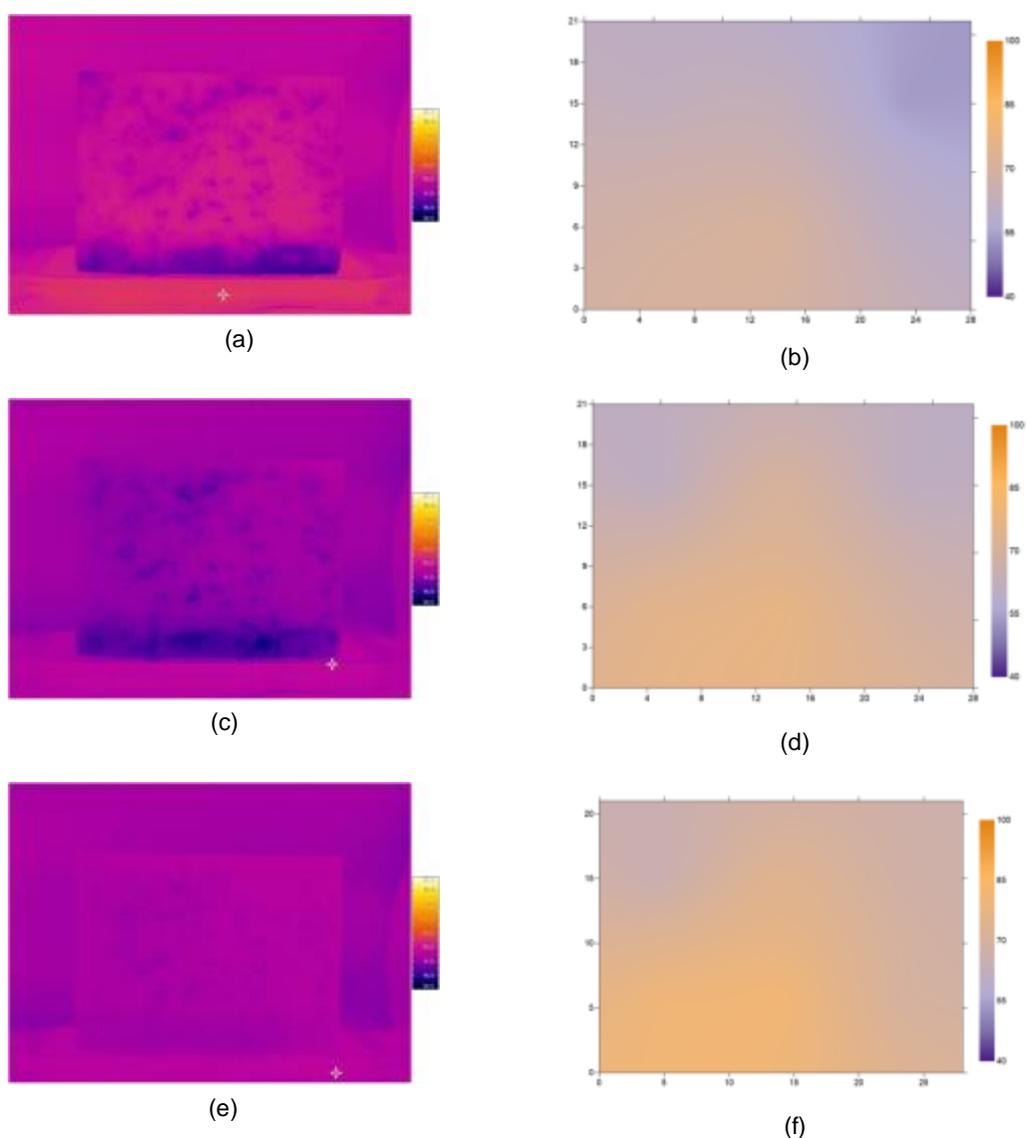


Fig. 4.19 – Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.3A. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 2:00h; (e) e (f) correspondem às 8h.

Analisando a figura 4.20, onde foi estudada secagem com o aumento da convecção com fluxo de ar paralelo à superfície do provete, verificou-se que comparando a figura 4.20 (a) e a figura 4.20 (b), se verifica que o gráfico correspondente à medição do humidímetro é correspondente das zonas húmidas presentes no termograma. Contudo após 8 horas de secagem, por análise do termograma (c) verificou-se que a zona mais húmida corresponde à base do provete, o que não se verifica no gráfico (f), sendo por isso difícil analisar. Nos resultados dos ensaios realizados, pode estar associado um erro de medição levando a que estejam a ser analisadas as heterogeneidades do provete devido às irregularidades da sua superfície. A análise do teor de humidade com recurso ao humidímetro de contacto, permite concluir que existem incongruências entre as medições do humidímetro e os termogramas correspondentes. Estas diferenças podem ser visíveis devido a um erro do equipamento ou à profundidade de medição que o humidímetro permite realizar, contrariando a análise termográfica que permite apenas avaliar as condições na superfície frontal do provete.

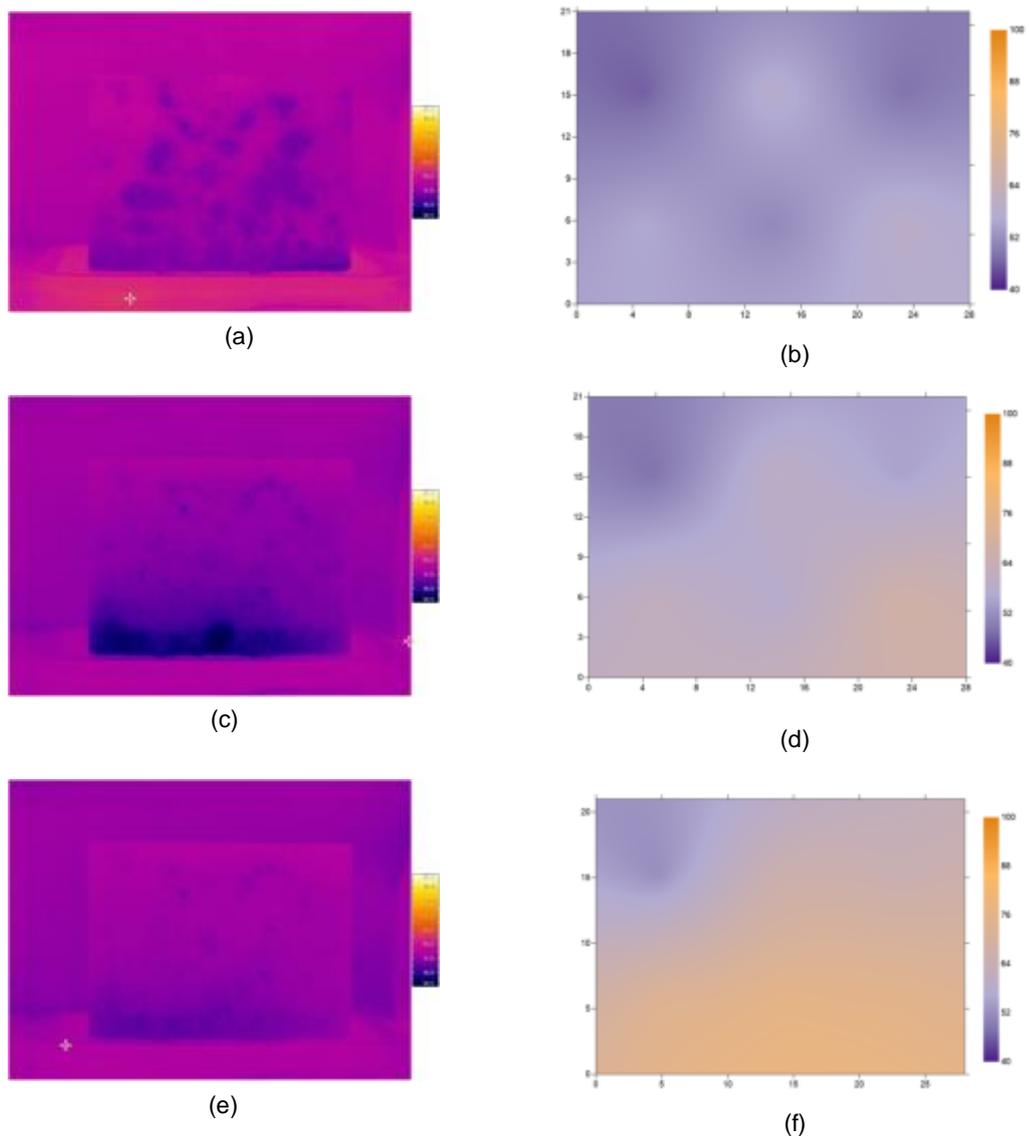


Fig. 4.20 – Termogramas obtidos durante a secagem e gráficos resultantes da medição do humidímetro no ensaio II.3B. (a) e (b) correspondem às 00h; (c) e (d) correspondem às 2:00h; (e) e (f) correspondem às 8h.



# 5

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DOS PROVETES

Na análise quantitativa são determinadas as temperaturas superficiais através da imagem térmica e de alguns parâmetros analíticos. Este tipo de abordagem requer mais detalhe na análise dos ensaios e dos resultados obtidos. No entanto, como técnica de medição é mais exaustiva e eficaz que a análise qualitativa, tornando-se também mais demorada.

O presente subcapítulo apresenta uma análise exaustiva da variação da temperatura ao longo do tempo, para os ensaios realizados.

A avaliação da temperatura para os diferentes ensaios das três variantes anteriormente referidas, assenta na análise de três pontos centrais do provete (Figura 1). A análise da temperatura nestes três pontos deve-se ao facto de por análise dos termogramas se ter verificado que as variações de temperatura, e consequentemente a variação da presença de água, é mais acentuada na zona central do provete.



Fig. 5.1.- Esquema ilustrativo dos pontos de temperatura medidos

### 5.1.1. VARIANTE I – TIPO DE HUMIFICAÇÃO

No ensaio de humificação pela base (I.1) da variante I, verificou-se que a variação da temperatura no decorrer do ensaio foi diminuindo. Nas primeiras 4 horas verificou-se uma diminuição acentuada, e nas restantes horas a temperatura superficial diminui muito pouco, apresentando tendência a estabilizar (Figura 5.2).

É visível por análise da Figura 5.2, que o ponto 3 apresenta temperaturas inferiores ao longo de todo o ensaio. Tal facto deve-se ao ponto 3 ser o ponto inferior do provete, fazendo com que a sua proximidade com a água leve a um maior arrefecimento da área inferior do provete. De forma geral, é possível ainda verificar que nos pontos 1 e 2, da Figura 5.2, a diminuição da temperatura é gradual com o decorrer do ensaio, sendo a temperatura no ponto 1 (parte seca do provete) superior à do ponto 2 (mais próximo da zona húmida). O decréscimo inicial está relacionado com o gradiente de temperatura relativamente à câmara climática, no entanto, o facto de o decréscimo ser mais acentuado no ponto 3 indicia a ação da água absorvida.

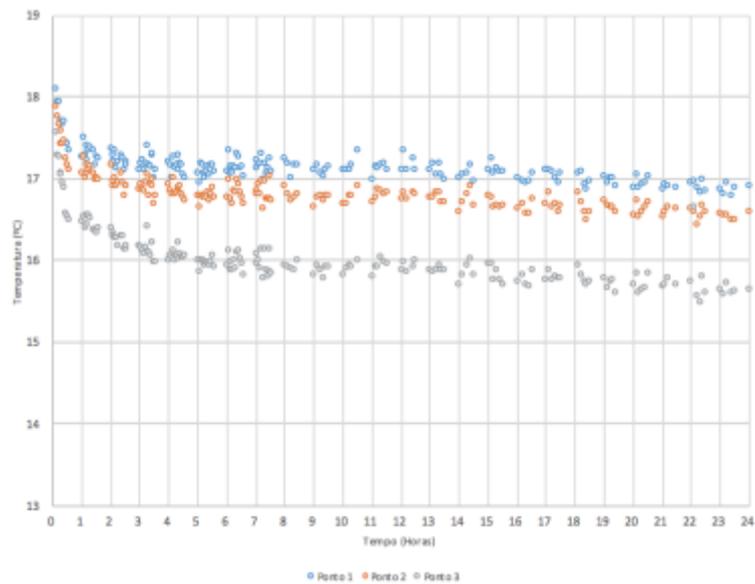


Fig. 5.2.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.1 para o ciclo de humificação

Verificando-se que a variação de temperatura é notória nas primeiras quatro horas de humificação, considerou-se pertinente fazer uma análise mais profunda desse período (Figura 5.3).

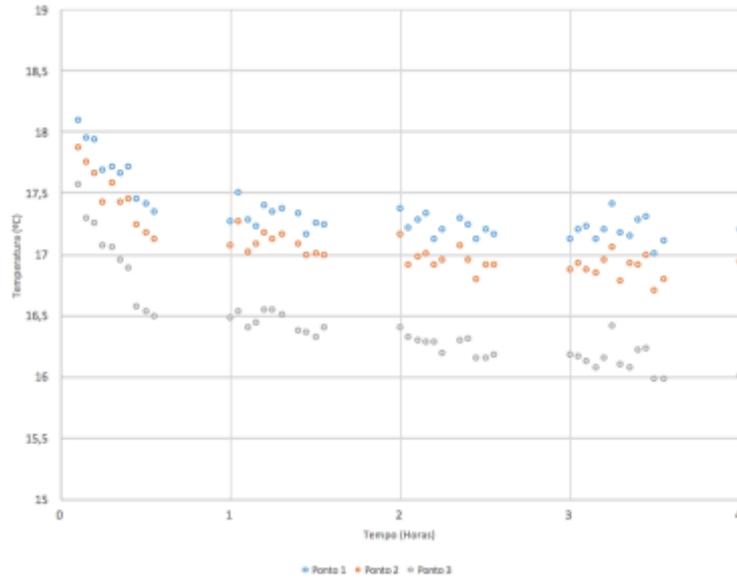


Fig. 5.3.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humedificação do ensaio I.1

Na figura 5.3, é possível verificar através de uma linha de tendência linear, que a temperatura superficial variou significativamente nas primeiras quatro horas, principalmente para o ponto mais próximo da água.

No decurso do ciclo de secagem foi possível verificar através da Figura 5.4, que tal como é expectável houve um aumento da temperatura superficial do provete, sobretudo no ponto 3. Este incremento de temperatura deve-se aos fenómenos evaporativos, que conseqüentemente também levam a uma redução da superfície húmida.

Nas primeiras doze horas de secagem, ocorre um incremento significativo da temperatura superficial devido à secagem do provete.

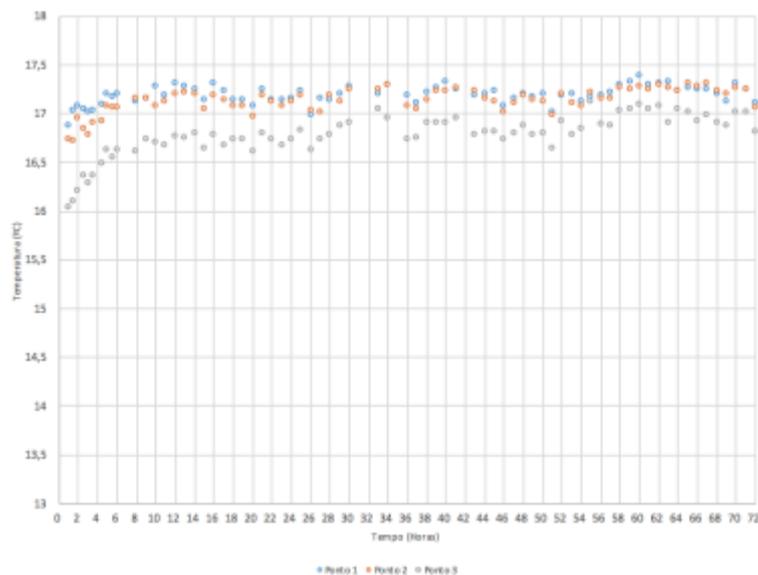


Fig. 5.4.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.1 para o ciclo de secagem

No ensaio I.2 da variante I, com humedificação parcial pelo topo, verifica-se por análise da Figura 5.5, que nas primeiras quatro horas de humedificação, ocorre uma diminuição abrupta da temperatura superficial, e nas restantes vinte horas a temperatura superficial tem tendência a estabilizar. Mais uma vez, esta variação inicial da temperatura superficial resulta das trocas de calor para se atingir o equilíbrio térmico entre o provete e o ar da câmara climática.

Atendendo que o ensaio em análise foi realizado com humedificação parcial pelo topo superior do provete de betão leve, é visível que sendo o ponto 1 o ponto mais próximo da lâmina de água, apresenta temperaturas superficiais mais baixas ao longo de todo o ciclo de humedificação. Verificando-se também que a temperatura no ponto 2 se aproxima muito da temperatura no ponto 3.

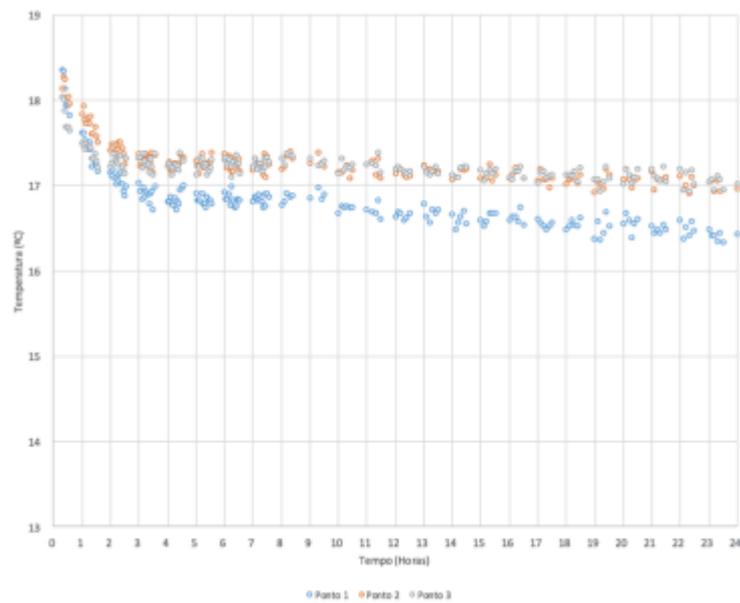


Fig. 5.5.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.2 para o ciclo de humedificação

Através da interpretação da Figura 5.5, é possível afirmar que o período temporal mais significativo são as primeiras quatro horas, desta forma é possível analisar ao pormenor as variações de temperatura superficial nesse período na Figura 5.6.

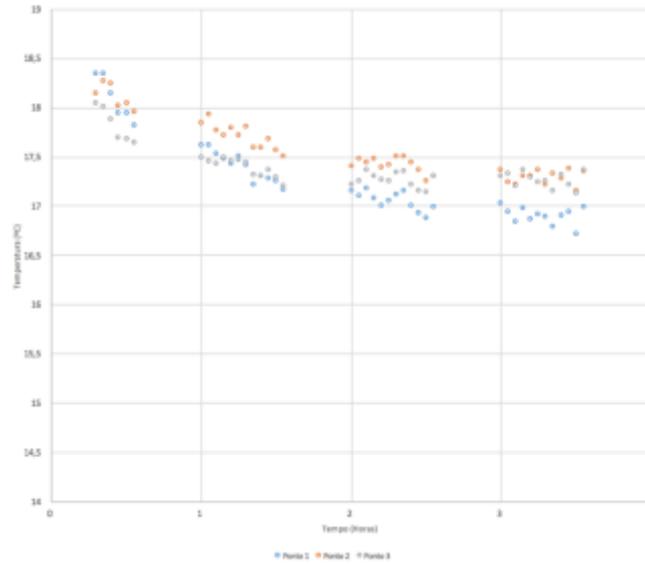


Fig. 5.6.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humedificação do ensaio I.2

Através da análise da figura 5.6, é possível verificar que houve uma variação da temperatura superficial da ordem dos 2°C, de forma geral. O ponto 1, ponto superior, é o que apresenta maior variação da temperatura superficial, enquanto que os pontos 2 e 3 apresentam uma variação similar, tal como é possível validar pelas equações lineares desses mesmos pontos. Contudo é notória uma tendência para os pontos estabilizarem após 3 horas. A inclinação da linha de tendência da variação da temperatura no ponto 1 (mais próximo da lâmina de água) é superior à das outras duas linhas, pelo que é possível afirmar que na diminuição da temperatura superficial há um contributo da ação da água absorvida.

Durante o ciclo de secagem (Figura 5.7), é possível verificar que a secagem no topo do provete, ponto 1, ocorreu de forma mais acelerada, comparativamente aos pontos 2 e 3. Verifica-se também que a variação de temperatura nos pontos 2 e 3 durante este ciclo é semelhante, o que seria expectável. Não obstante verifica-se em todos os pontos uma subida de temperatura, sensivelmente a meio do ciclo de secagem, estando possivelmente associada às oscilações de temperatura induzidas pela abertura da câmara climática para a realização de medições.

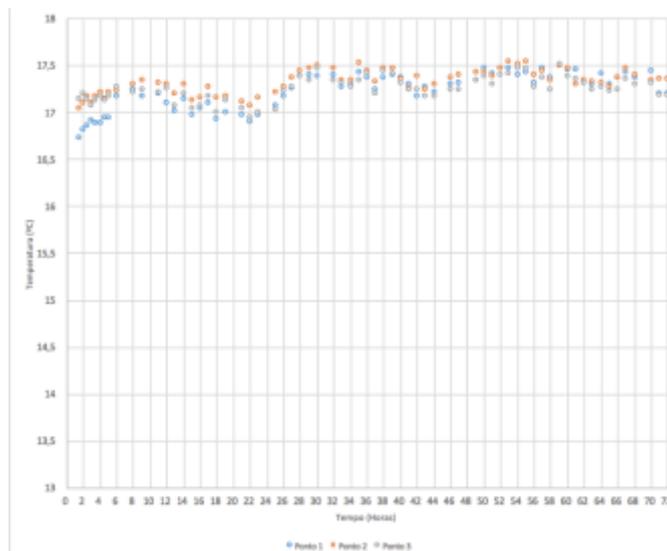


Fig. 5.7.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.2 para o ciclo de secagem

No ensaio I.3 da variante I, onde se imergiu o provete na sua totalidade, é possível verificar através da Figura 5.8, que no decurso do ciclo de secagem nota-se um aumento da temperatura de forma gradual, e com um desenvolvimento similar em todos os pontos.

É notório um incremento da temperatura nas primeiras 14 horas de secagem, onde devido à evaporação da água no provete, a temperatura superficial do mesmo aumenta cerca de 3°C. Verifica-se por análise do Figura 5.8 que a temperatura superficial do ponto 3, é sempre inferior à dos pontos 1 e 2. No entanto a temperatura superficial dos pontos 1 e 2 é muito similar nas primeiras 10 horas do ciclo de secagem, sendo de pouca importância a variação da temperatura durante a secagem nestes dois pontos.

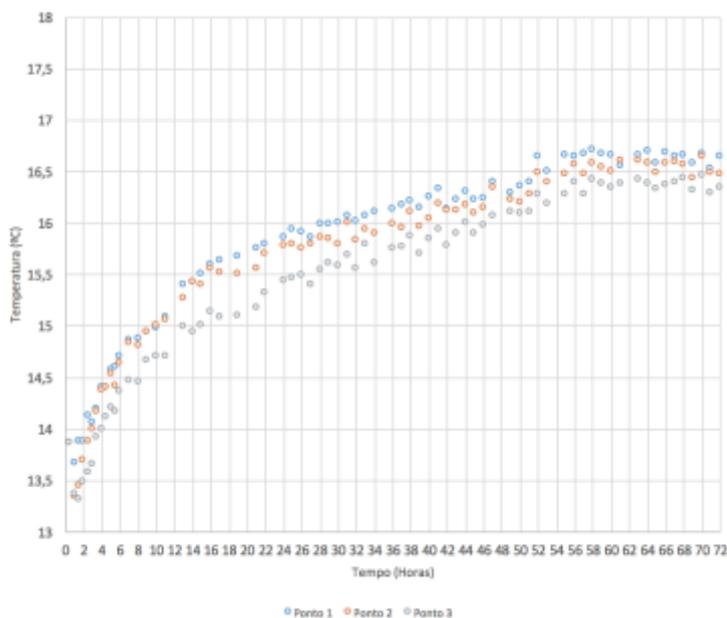


Fig. 5.8.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio I.3 para o ciclo de secagem

Contudo, por interpretação da Figura 5.8, é ainda possível afirmar que a temperatura superficial no final do ciclo de secagem tem tendência a estabilizar.

#### 5.1.2.VARIANTE II – TIPO DE SECAGEM

A Figura 5.9 mostra a variação da temperatura superficial para o ensaio II.2. É possível verificar que há um aumento abrupto da temperatura superficial no provete, da ordem dos 20°C. Estes dados permitem afirmar que nas primeiras quatro horas, é difícil avaliar a secagem, pois o fenómeno captado pelo equipamento é o aquecimento do provete. Após as primeiras 4 horas de ensaios, a temperatura começa a estabilizar.

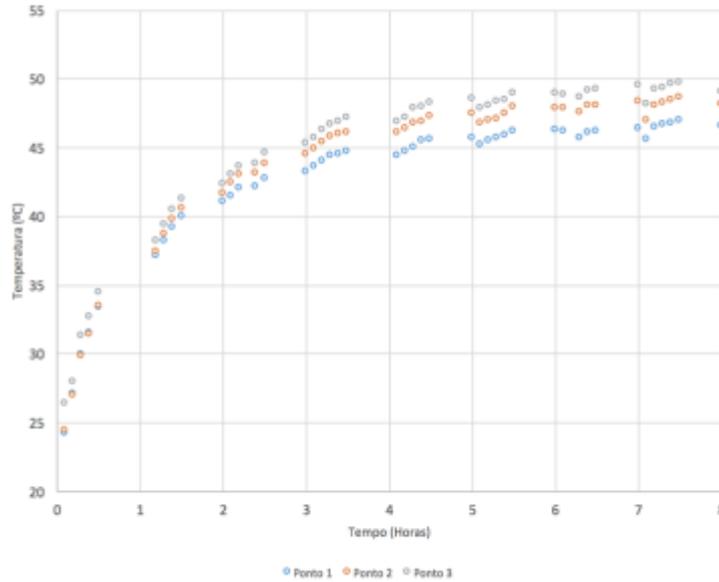


Fig. 5.9.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.2 para o ciclo de secagem

Nas figuras 5.10 e 5.11, é possível interpretar a variação da temperatura ao longo do tempo para os ensaios com aumento da convecção com fluxo de ar paralelo e perpendicular à face do provete, respetivamente. Por análise das figuras 5.10 e 5.11. Verifica-se que há um aumento da temperatura superficial do provete de cerca de 1,5°C nos dois ensaios, no entanto, quando o fluxo é perpendicular à face do provete esse aumento ocorre num menor período de tempo.

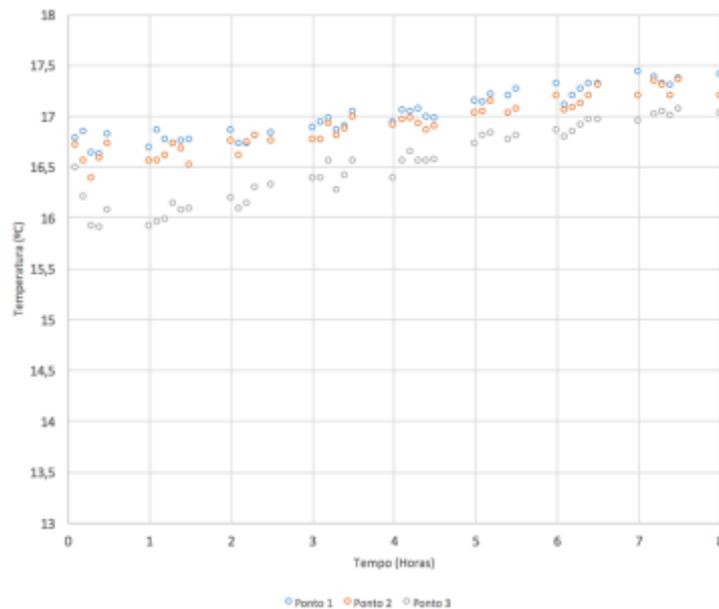


Fig. 5.10.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.3A para o ciclo de secagem

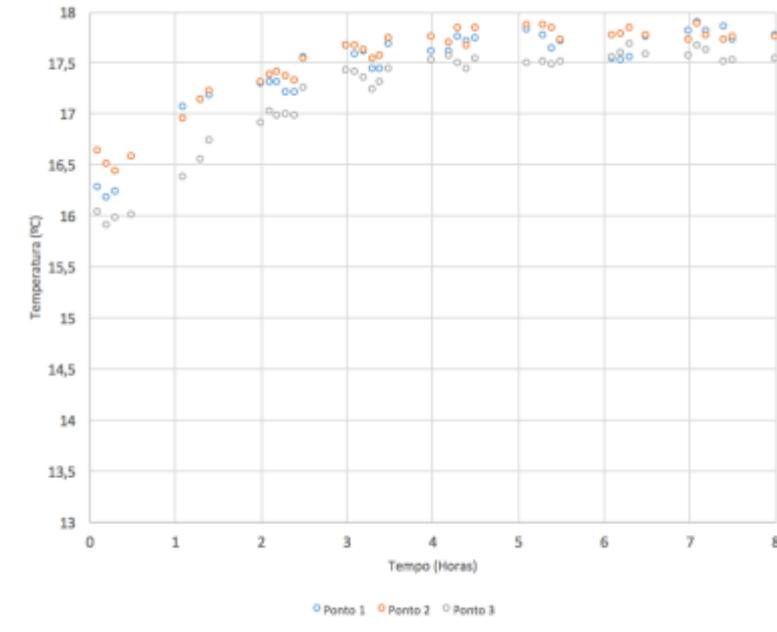


Fig. 5.11.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio II.3B para o ciclo de secagem

### 5.1.3.VARIANTE III – PONTO DE SECAGEM INICIAL

No ensaio III.2 da variante III, por análise da Figura 5.12, é possível constatar que a variação da temperatura ao longo do ciclo de humedificação, não é significativa. Tal facto poderá dever-se ao provete ter iniciado o ciclo de humedificação parcialmente seco, levando a que o provete se encontrasse mais próximo do seu ponto de saturação. O ponto 3 (Figura 5.12) representa os valores de temperatura superficial mais baixa, visto que a humedificação do provete se dá pela base.

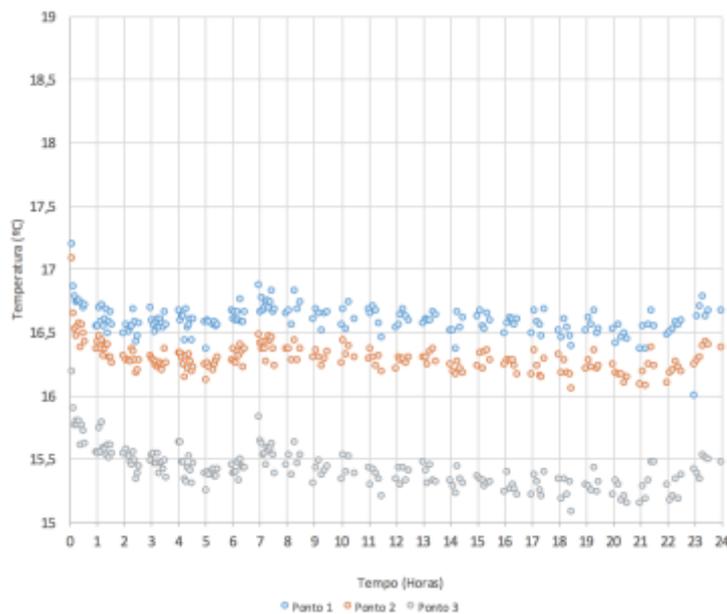


Fig. 5.12.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.2 para o ciclo de humedificação

Tendo-se verificado que as variações de temperatura superficial são mais significativas nas primeiras quatro horas, na Figura 5.13 é possível analisar essas variações com mais detalhe.

Analisando a Figura 5.13 é notório que a linha de tendência do ponto 3, apresenta um declive mais acentuado, indicando que a diminuição da temperatura foi mais rápida nas primeiras seis horas de contacto com a água. Os pontos 1 e 2 apresentam uma diminuição pouco significativa e muito semelhante da temperatura.

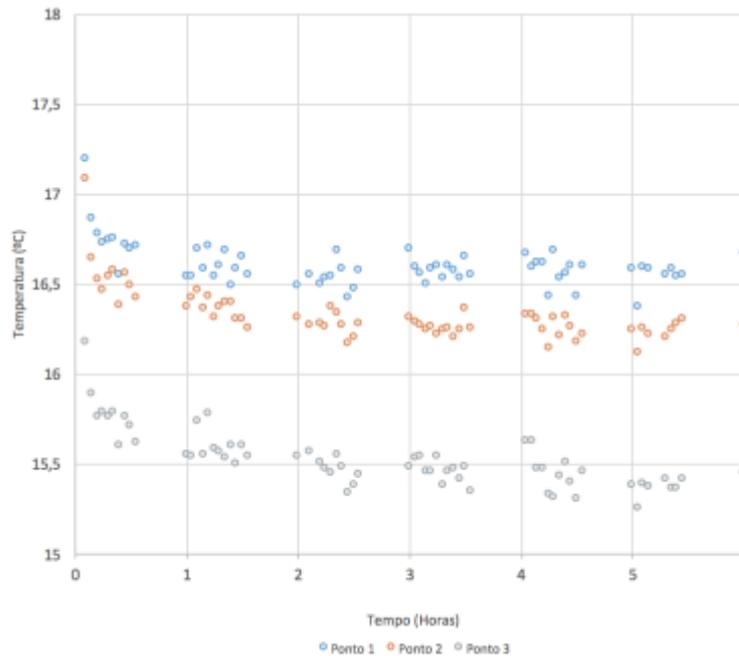


Fig. 5.13.- Variação da temperatura superficial no intervalo de 4 horas de humificação do ensaio III.2

Durante o ciclo de secagem (Figura 5.13), o ponto 3 apresenta uma subida da temperatura superficial mais acentuada, quando comparado com os pontos 1 e 2. Este facto, está relacionado com a humificação ter sido realizada pela base, levando a que o ponto 3 apresentasse um teor de água mais elevado. Enquanto que os pontos 1 e 2, apresentam uma variação da temperatura superficial idêntica, com valores muito próximos.

Contudo, a temperatura superficial final, após as 72 horas de secagem, é muito próxima nos três pontos. Permitindo afirmar que o provete se encontra muito próximo de estar em equilíbrio com ambiente em que se encontrava inserido.

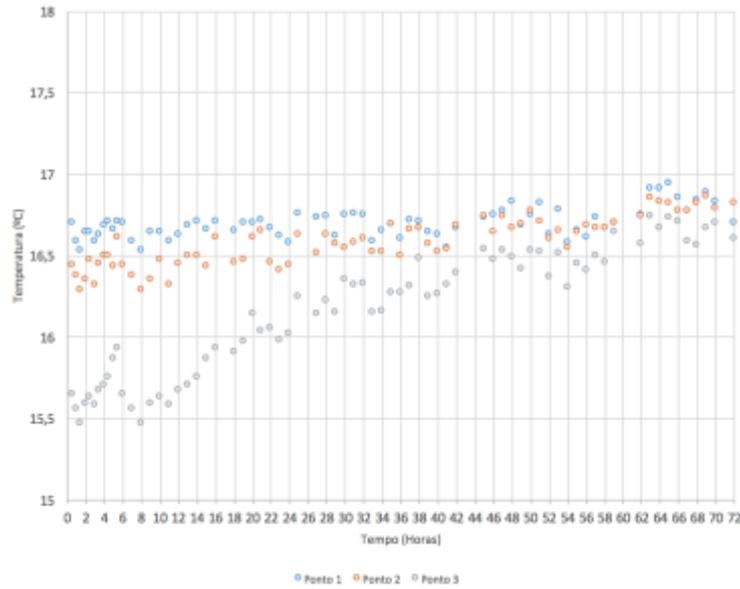


Fig. 5.14.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.2 para o ciclo de secagem

No ensaio III.3, em que se partiu do provete em equilíbrio higroscópico, verificou-se que a variação da temperatura superficial é reduzida. O ponto 3, devido à sua proximidade com a lâmina de água, apresenta temperaturas superficiais inferiores à dos pontos 1 e 2 e valores, após as 24 horas de embebição, ligeiramente inferiores aos iniciais. Não é facilmente justificável o aumento de temperatura que ocorre principalmente nos pontos 1 e 2 até às primeiras 6 horas de ensaio, embora possa resultar por variações na temperatura no interior da câmara climática.

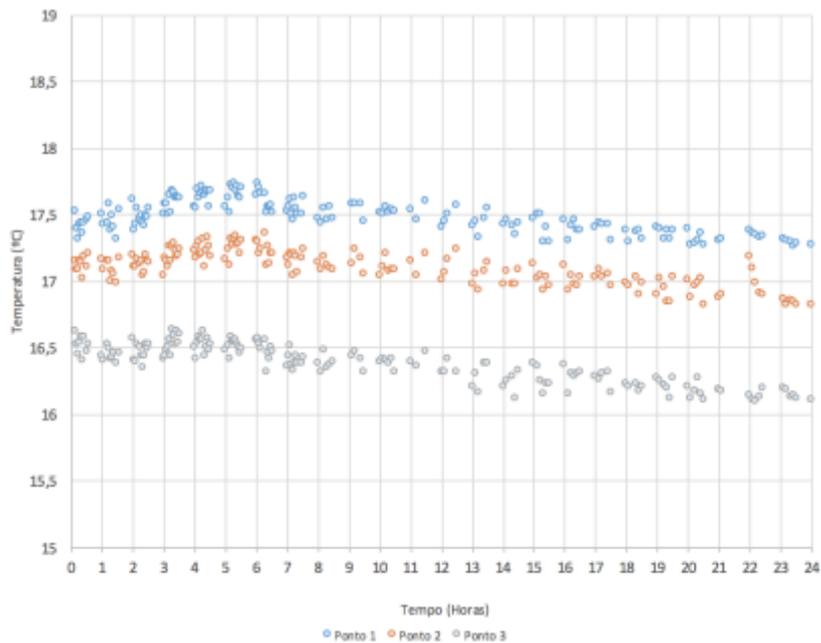


Fig. 5.15.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.3 para o ciclo de humedificação

Durante o ciclo de secagem verificou-se que, apesar das oscilações dos valores, a temperatura superficial do provete aumenta. Contudo, os três pontos apresentam após as 72 horas de secagem, uma temperatura idêntica.

Estas oscilações de temperatura ao longo do ciclo de secagem, podem estar associadas à abertura da câmara climática para a realização de medições e às variações de temperatura e humidade relativa que estão associadas à margem de erro da câmara climática.

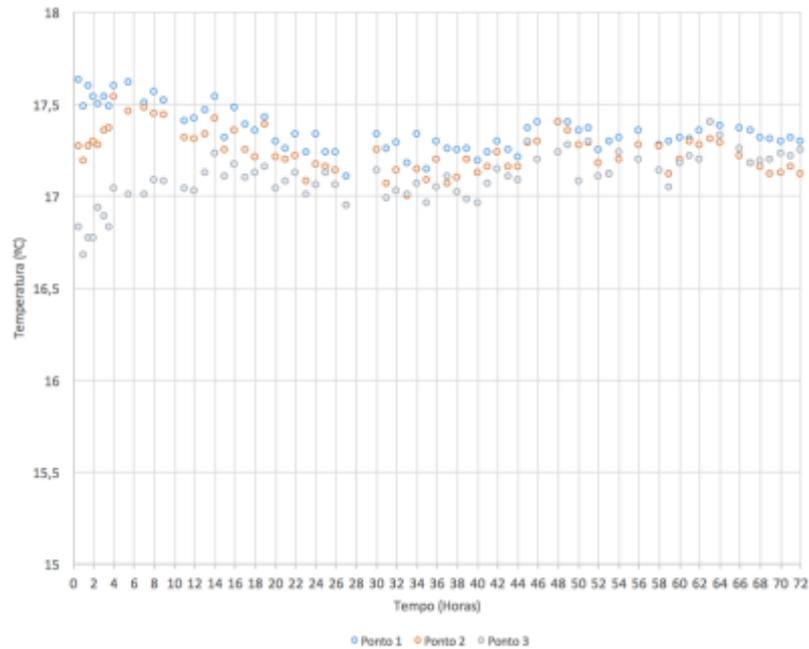


Fig. 5.16.- Variação da temperatura superficial no decorrer do tempo de ensaio III.3 para o ciclo de secagem

## 5.2. AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA MASSA E A TEMPERATURA SUPERFICIAL

### 5.2.1. VARIANTE I – TIPO DE HUMIDIFICAÇÃO

Os resultados obtidos para os ensaios da variante I, onde se estudou a influência do tipo de humidificação para o processo de secagem, encontram-se representados nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19.

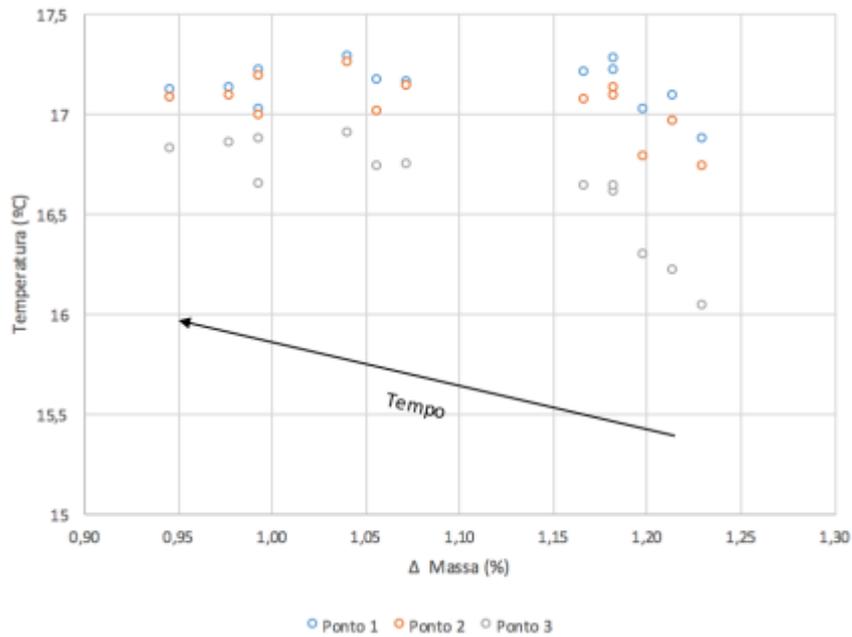


Fig. 5.17.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.1

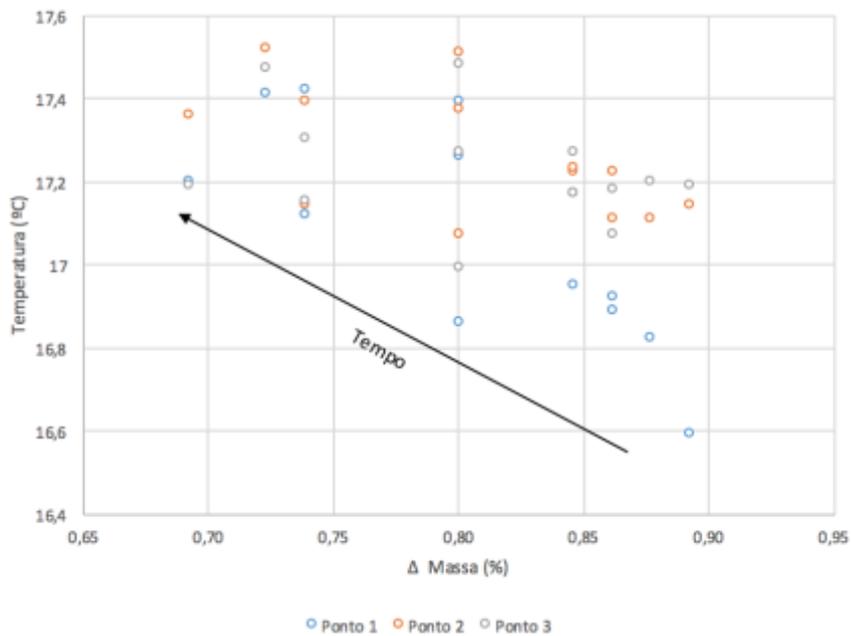


Fig. 5.18.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.2

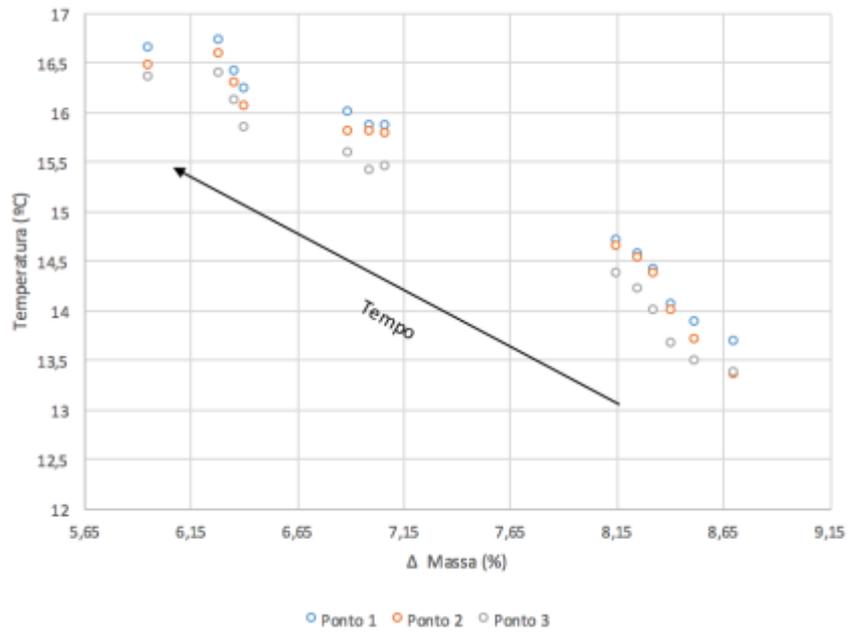


Fig. 5.19.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial I.3

Correlacionado a variação da massa durante a secagem com a temperatura superficial é possível verificar que nos três ensaios existe alguma correlação, sendo mais evidente no ensaio I.3, onde o provete foi imerso, tal como seria de esperar

As correlações da variante I, permitem afirmar que quanto maior é a temperatura menor é a variação da massa nos provetes. Isto é, após as 72 horas do ciclo de secagem, obtiveram-se valores de variação de massa inferiores para temperaturas superiores.

### 5.2.2.VARIANTE II – TIPO DE SECAGEM

Os resultados obtidos para os ensaios da variante II, onde se estudou a influência do tipo de secagem, encontram-se representados nas Figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22.

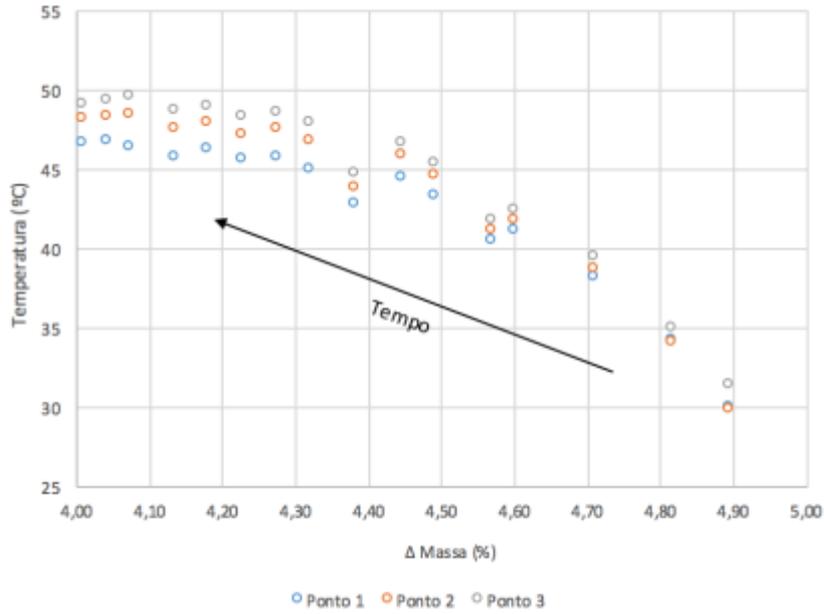


Fig. 5.20.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.2

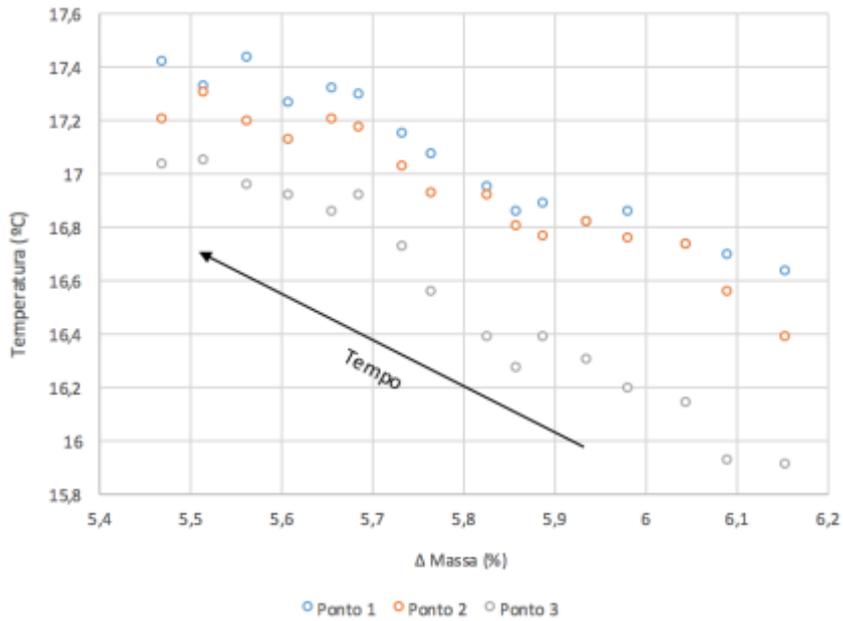


Fig. 5.21.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.3A

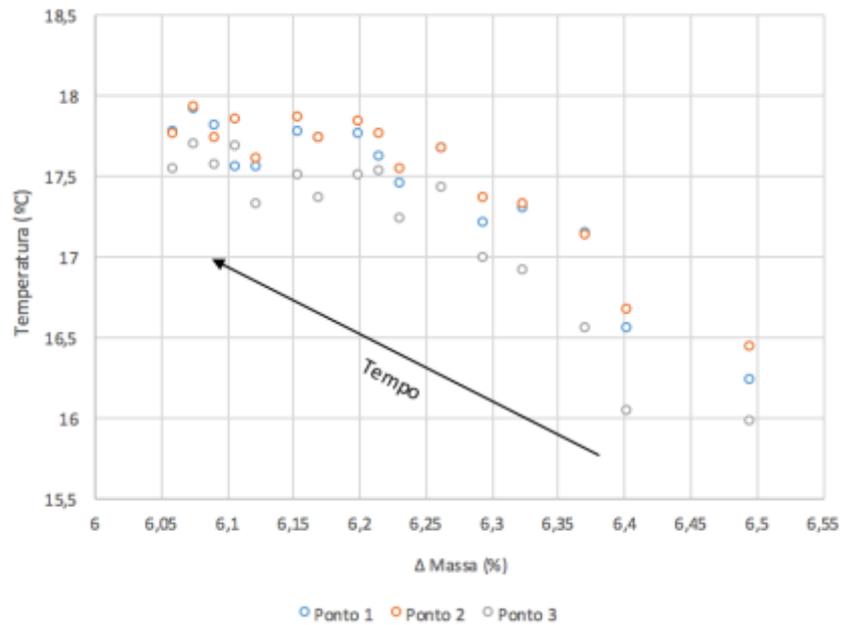


Fig. 5.22.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial II.3B

Analisando as Figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 de uma forma geral, é possível verificar que existe uma correlação entre a temperatura superficial e a variação da massa é muito variável, para os diferentes ensaios da variante II. Na figura 5.20 verifica-se que há uma correlação linear mais forte no início do ensaio, no momento em que as temperaturas superficiais são mais baixas.

É perceptível através das Figuras 5.21 e 5.22, que o devido à orientação da ventoinha durante a fase de secagem a correlação entre os valores é semelhante nos dois casos.

De forma a fazer uma análise global dos ensaios realizados para a variante II, na Figura 5.23, encontra-se representada a correlação da temperatura com a variação de massa, para a situação mais desfavorável (Ponto 3). Por análise da Figura 5.23, é visível uma diferença significativa do ensaio II.2 em relação aos restantes ensaios da variante II, devido à utilização de uma lâmpada de IV, que permitiu aquecer e acelerar a secagem do provete. Avaliando ainda a correlação da Figura 5.23, tal como seria expectável a secagem natural no interior da câmara climática (II.1) apresenta uma variação de massa mais significativa quando comparado com os ensaios III.3A e III.3B, uma vez que o período de secagem foi mais prolongado.

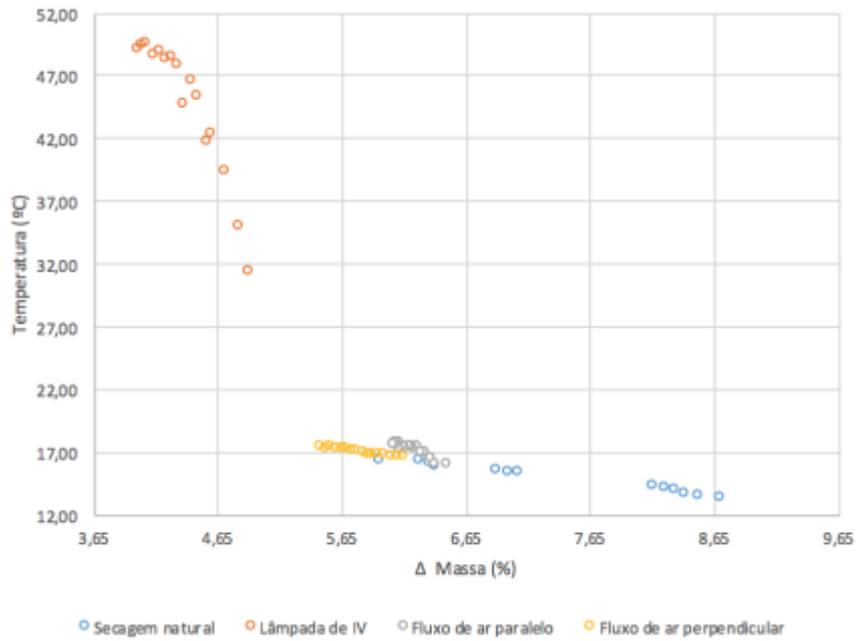


Fig. 5.23.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial dos ensaios da variante II para o ponto mais desfavorável

### 5.2.3. VARIANTE III – PONTO DE SECAGEM INICIAL

Os resultados obtidos para os ensaios da variante III, onde se estudou a influência das condições iniciais do provete, no processo de secagem, encontram-se representados nas Figuras 5.17, 5.24 e 5.25.

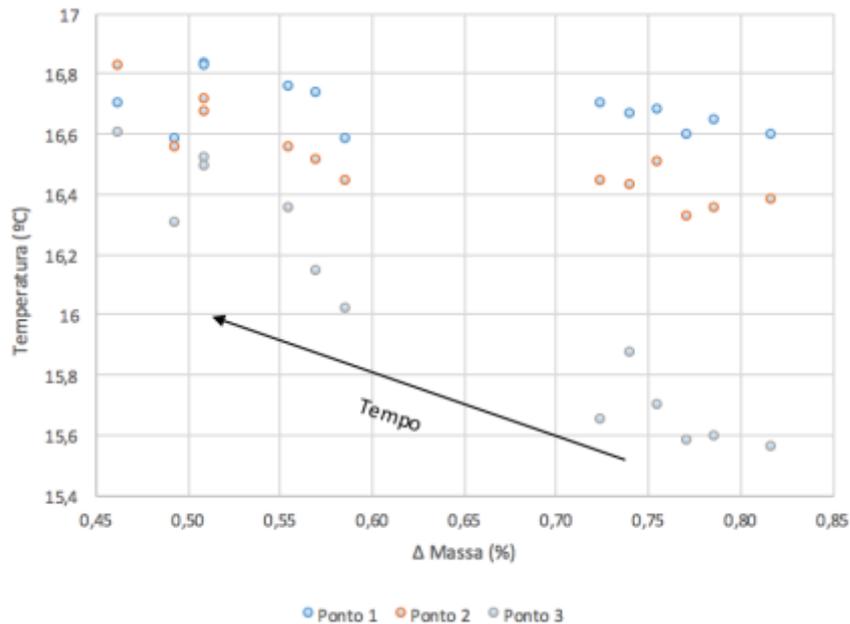


Fig. 5.24.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial III.2

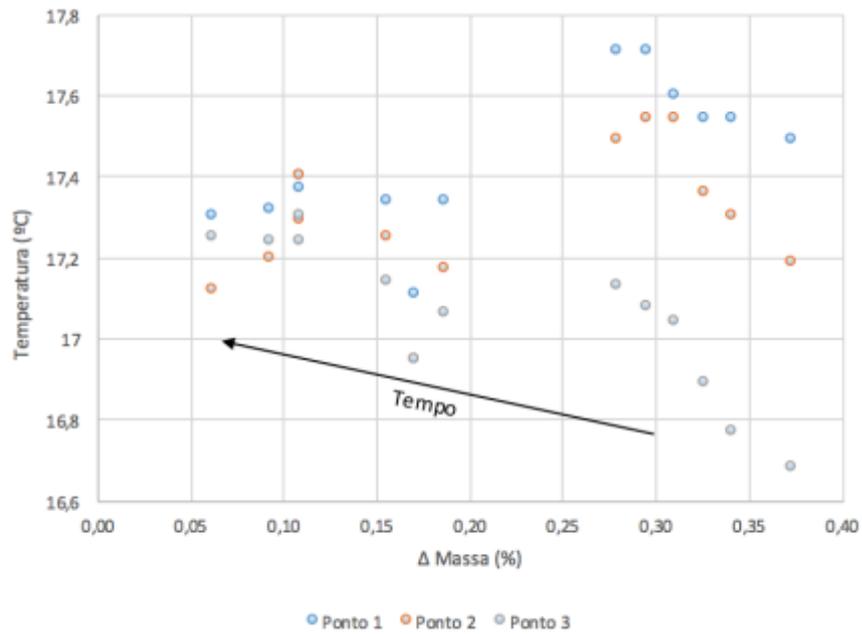


Fig. 5.25.- Correlação da variação da massa com a temperatura superficial III.3

Analisando de uma forma geral, os ensaios da variante III, é possível observar que não há grande correlação entre a variação de massa e a temperatura superficial nesta variante, talvez devido ao facto de apenas uma parte do provete estar molhada.



# 6

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido nesta Dissertação confirmou as hipóteses definidas inicialmente.

Os objetivos parciais, estabelecidos inicialmente foram atingidos, podendo extrair-se desse percurso algumas das principais conclusões desta Dissertação:

- A termografia de infravermelhos constitui uma técnica de ensaio, que possibilita a identificação da variação da temperatura superficial devido à presença de água líquida. É possível determinar o nível de ascensão capilar, durante a fase de embebição e a diminuição da água à superfície, durante a fase de secagem. No entanto durante a fase de secagem, torna-se difícil a identificação visual da variação da temperatura superficial devido à atenuação dos fenómenos evaporativos da água;
- O recurso à termografia permite definir os tempos de secagem aproximados dos provetes de betão leve. Quando a variação superficial torna-se pouco significativa, e o padrão de cores no termograma tende a tornar-se homogéneo, é possível afirmar que superficialmente o provete está seco;
- A termografia ativa, na fase de secagem de elementos de betão leve aumenta a evaporação à superfície do provete. Levando gradualmente a um aquecimento da superfície, tornando-se difícil a distinção entre a fase de secagem e o aquecimento através da termografia;
- Os fluxos de ar influenciam a secagem dos provetes, tornando-a heterogénea. Também a direção do fluxo de ar é relevante na fase de secagem;

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Com o presente trabalho pretendeu-se contribuir para um melhor conhecimento da utilização da termografia como técnica de avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem em elementos construtivos.

Os resultados obtidos nesta Tese permitem estabelecer diferentes vias para a continuidade do trabalho desenvolvido:

- Estudo laboratorial dos fenómenos de humedificação e secagem em elementos de betão normal, procurando comparar as características com elementos de betão leve;
- Estudo da aplicação da termografia ativa num provete seco de betão leve, de forma a compreender melhor o aquecimento do elemento, e a variação da secagem;
- Validação dos resultados obtidos utilizando a técnica de subtração de termogramas, de forma a compreender de forma mais aprofundada a variação de temperatura durante a fase de humedificação e de secagem;
- Desenvolvimento de uma metodologia de análise de risco associado à humidade em edifícios;
- Validação do estudo realizado a partir de medições em edifícios reais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barreira, E. *Degradação Biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [2] *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, 13 de Dezembro de 1996, San António, Texas.
- [3] Freitas, V. *Transferência de humidade em paredes de edificios – Análise do fenómeno de interface*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.
- [4] Abuku, M.; Blocken, B.; Roels, S. *Moisture response of building facades to wind-driven rain: field measurements compared with numerical simulations*, Journal of Wind and Industrial Aerodynamics, 2007, Leuven, Belgium.
- [5] Barreira, E.; Freitas, S.; Freitas, V.; Delgado, J. Infrared thermography application in buildings diagnosis: a proposal for test procedures. In *Industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials*, p. 91-117, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [6] Afonso, J. *Termografia: Teoria, Procedimentos e Vantagens*. Abril 2014. <http://www.iteag.net/termografia.pdf>.
- [7] Rodrigues, E. *Conforto Térmico das Construções - Processos de Transmissão de Calor*. Junho de 2013. [http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao\\_de\\_Calor\\_em\\_Edificacoes.pdf](http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf). 2016/03/12
- [8] FLIR Systems. *FLIR Thermal Imaging for Science/RnD*. Abril de 2014. [http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820486/T820486\\_EN.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820486/T820486_EN.pdf).
- [9] Barreira, E. *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [10] Gaussorgues, G. *Infrared Thermography*. Chapman and Hall, 1993.
- [11] Avdelidis, N.; Moropoulou, A. *Emissivity Considerations in Building Thermography*. *Energy and Buildings*, vol. 35, 2003, p. 663-667, Elsevier.
- [12] Ibarra-Castanedo, C.; González, D.; Klein, M.; Pilla, M.; Vallerand, S.; Maldague, X. *Infrared image processing and data analysis*. *Infrared Physics & Technology*, vol. 46, 2004, p. 75-83, Elsevier.
- [13] López, F.; Maldague, X.; Ibarra-Castanedo, C. *Opto-Electronics Review*, Dezembro de 2014, 22(4).
- [14] Sousa, L. *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2010.
- [15] Cortizo, E. *Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em Edificações: Ênfase em Edificações do Património Histórico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [16] Mendonça, L.; Amaral, M.; Catarino, P. *A termografia por infravermelhos como ferramenta*

para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. *Jornadas de Engenharia de Manutenção*, ISEL, 2013.

[17] Faria, L. *Aplicação da Termografia ao Diagnóstico de Edifícios*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

[18] Lehmann, B.; Wakili, K.; Frank, T.; Collado, B.; Tanner, C. *Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings*. *Applied Energy*, vol. 110, 2013, p. 29-43, Elsevier.

[19] <http://www.igrodry.com/en/il-problema-dei-ponti-termici/>. 2016/03/16.

[20] Valério, J. *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2007.

[21] Grinzato, E.; Vavilov, V.; Kauppinen, T. *Quantitative infrared thermography in buildings*. *Energy and Buildings*. Vol. 29, pp. 1-9, 1998.

[22] Barreira, E.; Freitas, V. *Evaluation of Building materials using Infrared Thermography*. *Construction and Building Materials*, 21, 218-224. Elsevier, 2007.

[23] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de betão celular autoclavado*. Relatório 05/02 – NCCt. Lisboa, LNEC, 2002.

[24] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de tijolo cerâmico furado*. Relatório 144/02 – NCCt. Lisboa, LNEC, 2002.

[25] Lerma, J.; Cabrelles, M.; Portalés, C. *Multitemporal thermal analysis to detect moisture in a building facade*. *Construction and Building Materials* 25, ScienceDirect, 2011

[26] Grinzato, E.; Cadelano, G.; Bison, P. *Moisture map by IR thermography*. *Journal of Modern Optics*, 20 de Abril de 2010, Padova, Itália.

[27] Gregory, M. *Using Infrared Thermography to Image the Drying of Polymer Surfaces*. Dissertação de Mestrado, School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, Agosto de 2004.

[28] Barreira, E.; Almeida, R.M.S.F.; Delgado, J.M.P.Q. *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*. *Construction and Building Materials* 110, Science Direct, 9 de Fevereiro de 2016.

[29] Edis, E.; Flores-Colen, I.; Jorge de Brito. *Quase-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis*. *Building and Environment*, Science Direct, 30 de Julho de 2015.

[30] Lerma, C.; Mas, Á.; Gil, E.; Vercher, J.; Peñalver, M.J. *Pathology of Building Materials in Historic Buildings. Relationship Between Laboratory Testing and Infrared Thermography*, *Mater. Construcc.* 64 (313) (2014).

- [31] NEC San-ei Instruments, Ltd., *Thermo Tracer TH9100MR/WR Operation Manual*. [http://id.nec.com/en\\_ID/products/others/infrared-thermal-imager/thermo-tracer-th9100mrwr/index.html](http://id.nec.com/en_ID/products/others/infrared-thermal-imager/thermo-tracer-th9100mrwr/index.html).
- [32] <http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/th9100mr-wr/index.html>. 2016/03/20.
- [33] <http://www.aralab.pt/Portals/0/FitoTerm%20&%20FitoClima%20reach-in%20TESTING%20chambers%20DC045EN-2013.pdf>. 2016/03/20.
- [34] CEBTP. *Humidímetro CEBTP Type MX-HU Operation Guide*.
- [35] Freitas,V.,Pinto,P., *Nota de informação técnica 002 “Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações internas”*, do Laboratório de Física de Construções, 2ª Edição, 1998.
- [36] Santos, C.; Matias,L., *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, ITE 50, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [37] NP EN 1097-5: 2011. *Ensaio das Propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 5: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada*.
- [38] NP 614: 1973. *Madeiras – Determinação do Teor em Água*.

ANEXO I

PLANOS DE ENSAIOS

# Plano de Ensaio Preliminares

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem	

## 1. Procedimento dos ensaios Preliminares

### 1.1 Ensaio dos provetes de betão leve a termografia ativa.

Este teste, tem por objetivo compreender o tempo necessário para os provetes atingirem a sua temperatura máxima, assim como as variações térmicas captadas pela câmara de infravermelhos, antes e depois da interrupção da lâmpada de infravermelhos.

O presente teste, decorre em condições climatéricas controladas, no interior da câmara climática, com uma temperatura de 20° C e uma humidade relativa de 60%.

Previamente à realização do ensaio teste, os provetes vão ser introduzidos, uma hora antes da realização do ensaio na câmara climática, de forma que os mesmo se encontrem à temperatura ambiente da câmara.

No ensaio teste de termografia ativa, o registo das imagens térmicas dos provetes, vai ser realizado em intervalos de tempo de 5 minutos, com a lâmpada de infravermelhos ligada, até os provetes atingirem a sua temperatura máxima. Após os provetes estabilizarem a sua temperatura, e a interrupção da lâmpada de infravermelhos, com uma periodicidade de 5 minutos, retiram-se imagens térmicas dos provetes até estes atingirem a temperatura ambiente, presente no interior da câmara climática (20° C).

Desta forma pretende-se esclarecer as dúvidas relativamente à viabilidade da interrupção do funcionamento da lâmpada térmica e , permite fazer um planeamento dos ensaios mais preciso em função dos tempos de funcionamento da lâmpada.

### **1.2. Ensaio de humedificação pelo topo**

De forma a analisar a melhor solução para embebição pelo topo, para a concretização dos ensaios, é importante testar a solução estudada para a ver a sua viabilidade, ou seja, este teste tem como intuito tentar perceber se a humedificação vai decorrer conforme o esperado, de forma uniforme.

Para a concretização deste teste, é necessário um provete já ensaiado, levando a que os provetes a ensaiar posteriormente não sejam danificados.

### **1.3. Secagem dos provetes**

A análise da secagem dos provetes, é um teste pertinente medida que permite avaliar o tempo de secagem dos provetes, permitindo um melhor planeamento dos ensaios, assim como permite definir uma temperatura e humidade relativa para os ciclos de secagem.

O critério de paragem inerente a este teste, assenta na ISO 15148, onde se encontra referido que um corpo está seco, quando a variação da massa é igual ou inferior a aproximadamente 0,1%.

## **2. Equipamentos e Materiais:**

- Câmara Climática: Fitoclima 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series
- Termómetro de Infravermelhos
- Lâmpada de Infravermelhos: Solamagic 2500W
- Estufa
- Silicone
- Fita adesiva armada de cor cinza
- Cartolina Preta
- Provetes de Betão leve.

**Calendarização:** Pretende-se que estes testes tenham início na semana de 28 de Março.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1. Ensaio de termografia passiva com embebição parcial pela base – Variante I

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve, com recurso à termografia passiva.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve, prevendo-se para cada um a realização de dois ciclos. Um primeiro ciclo de humedificação e um segundo ciclo de secagem, com uma duração estimada para o ciclo de humedificação de 24 horas, e com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. Estes dois ciclos decorrerão no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20º C e uma humedidade relativa de 60%.

Os provetes, anteriormente ao início do ensaio, são colocados durante aproximada 96 horas (quatro dias), no interior de uma estufa à temperatura de 70 ºC. Após a secagem dos provetes, estes iniciarão um ciclo de secagem, sendo os mesmos colocados no interior da câmara climática, dentro de uma caixa estanque preenchida com sílica gel, durante 24h.

O procedimento para o primeiro ciclo, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e dos tabuleiros;
- III. Pesagem dos provetes secos, antes de serem ensaiados;
- IV. Colocação dos provetes a ensaiar e dos suportes da base dos mesmos;

- V. Realização de um termograma com os provetes secos, devidamente posicionados, antes da colocação da água;
- VI. Marcação da altura da lâmina de água de 5mm a partir da base do provete, de acordo com a ISO 15148 de 2002, e colocação cuidadosa da respetiva quantidade de água, de forma a evitar a formação de ondulação.
- VII. Realização de um termograma imediatamente após colocar a água;
- VIII. Realização de termogramas no decorrer das 24h de humedificação, com uma periodicidade de 5 minutos no decorrer das primeiras 8 horas, e com uma periodicidade de 10 minutos durante 16 horas.

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes (primeiro ciclo), dá-se início ao segundo ciclo, denominado de ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Retira-se a água presente nos tabuleiros;
- II. Realização de um termograma, imediatamente após a água ser retirada;
- III. Pesagem dos provetes, aquando o início do ciclo de secagem;
- IV. Colocação dos provetes nos tabuleiros, sem água, nas posições anteriormente definidas;
- V. Realização de termogramas e da pesagem dos provetes, com a seguinte calendarização:
  - Nas primeiras 6 horas com uma periodicidade de 30 minutos;
  - Das 6 horas às 72 horas após o início da secagem, com uma periodicidade de 60 minutos. Com a particularidade de que a pesagem dos provetes neste intervalo de tempo será realizada às 24, 30, 48, 54 e 72 após o início do ciclo de secagem. De forma a controlar o desenvolvimento do processo de secagem no final de cada dia, às 17h será realizada uma pesagem.

## 2. Equipamentos e Materiais:

- Câmara Climática: Fitoclíma 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Fita adesiva;
- Cartolina Preta;
- Provetes de Betão leve;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Caixa estanque;
- Sílica Gel.

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem.	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1 Ensaio de termografia passiva com embebição parcial pelo topo – Variante I

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve, com recurso à termografia passiva.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve com humedificação pelo topo, prevendo-se para cada provete a realização de dois ciclos. Um primeiro ciclo de humedificação e um segundo ciclo de secagem, com uma duração estimada para o ciclo de humedificação de 24 horas, e com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. Estes dois ciclos decorrerão no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20º C e uma humidade relativa de 60%.

Os provetes, antes do início dos ensaios, são colocados durante aproximada 96 horas (quatro dias), no interior de uma estufa à temperatura de 70 ºC. Após a secagem dos provetes, estes iniciarão um ciclo de secagem, sendo os mesmos colocados no interior da câmara climática, dentro de uma caixa plástica preenchida com sílica gel, durante 24h.

O procedimento para o primeiro ciclo, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e dos tabuleiros;
- III. Pesagem dos provetes secos, antes de serem ensaiados;
- IV. Preparação dos provetes para serem ensaiados. Colocação de fita cola no bordo superior dos provetes, e aplicação de silicone;

- V. Colocação dos provetes a ensaiar e dos suportes da base dos mesmos;
- VI. Realização de um termograma com os provetes secos, devidamente posicionados, antes da colocação da água;
- VII. Marcação da altura da lâmina de água de 5mm a partir do topo do provete, de acordo com a ISO 15148 de 2002, e colocação cuidadosa da respetiva quantidade de água, de forma a evitar a formação de ondulação, e escorrências.
- VIII. Realização de um termograma imediatamente após colocar a água;
- IX. Realização de termogramas no decorrer das 24h de humedificação, com uma periodicidade de 5 minutos no decorrer das primeiras 8 horas, e com uma periodicidade de 10 minutos durante 16 horas.

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes (primeiro ciclo), dá-se início ao segundo ciclo, denominado de ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Retira-se a água presente nos tabuleiros;
- II. Realização de um termograma, imediatamente após a água ser retirada;
- III. Retira-se a fita-cola e o silicone.
- IV. Realização de um termograma.
- V. Pesagem dos provetes, aquando o início do ciclo de secagem;
- VI. Colocação dos provetes nos tabuleiros, sem água, nas posições anteriormente definidas;
- VII. Realização de termogramas e da pesagem dos provetes, com a seguinte calendarização:
  - Nas primeiras 6 horas com uma periodicidade de 30 minutos;
  - Das 6 horas às 72 horas após o início da secagem, com uma periodicidade de 60 minutos. Com a particularidade de que a pesagem dos provetes neste intervalo de tempo será realizada às 24, 30, 48, 54 e 72 após o início do ciclo de secagem. De forma a controlar o desenvolvimento do processo de secagem no final de cada dia, às 17h será realizada uma pesagem.

## **2. Equipamentos e Materiais:**

- Câmara Climática: Fitoclima 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Fita adesiva transparente;
- Cartolina Preta;
- Provetes de Betão leve.;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Fita Adesiva Extra-Power Preta 5MX50MM;
- Silicone Multiusos Transparente;
- Caixa estanque;
- Sílica Gel.

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem.	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1 Ensaio de termografia passiva com Imersão total do provete – Variante I e Variante II

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve, com recurso à termografia passiva.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve, pretendendo-se para cada um a avaliação do processo de secagem, após imersão total. Com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. A secagem decorrerá no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20° C e uma humidade relativa de 60%.

O procedimento a adotar, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e dos tabuleiros;
- III. Marcação da matriz de 6 pontos, para posterior medição da humidade (*Ver Figura 1*);
- IV. Pesagem dos provetes secos, antes de serem colocados em água;

- V. Realização de um termograma com os provetes secos, devidamente posicionados, antes da colocação da água;
- VI. Medição da humidade do provete antes de o colocar em contacto com a água;
- VII. Colocação dos provetes a ensaiar no interior de um recipiente estanque, preenchido com água de consumo público;

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes, dá-se início ao ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Retiram-se os provetes dos recipientes estanques;
- II. Pesagem do provete e medição com o detetor de humidade, após se ter retirado a água superficial;
- III. Colocação dos provetes nos tabuleiros, sem água, nas posições definidas;
- IV. Realização de termogramas, da pesagem dos provetes, e medição da humidade com a seguinte calendarização:
  - Nas primeiras 6 horas com uma periodicidade de 30 minutos;
  - Das 6 horas às 72 horas após o início da secagem, com uma periodicidade de 60 minutos. Com a particularidade de que a pesagem dos provetes e medição da humidade, neste intervalo de tempo será realizada às 24, 27, 30, 48, 51, 54 e 72 horas após o início do ciclo de secagem.

Antes de realizar a primeira pesagem após o provete ser retirado da água, secar a superfície do provete com um pano absorvente ou uma esponja natural, húmidos, mas espremidos, de modo a remover toda a água superficial.

## 2. Equipamentos e Materiais:

- Câmara Climática: Fitoclima 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Fita adesiva;
- Cartolina Preta;
- Provetes de Betão Normal e de Betão leve;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Humidimetro de contacto;
- Pano absorvente ou esponja;
- Caixa Estanque.

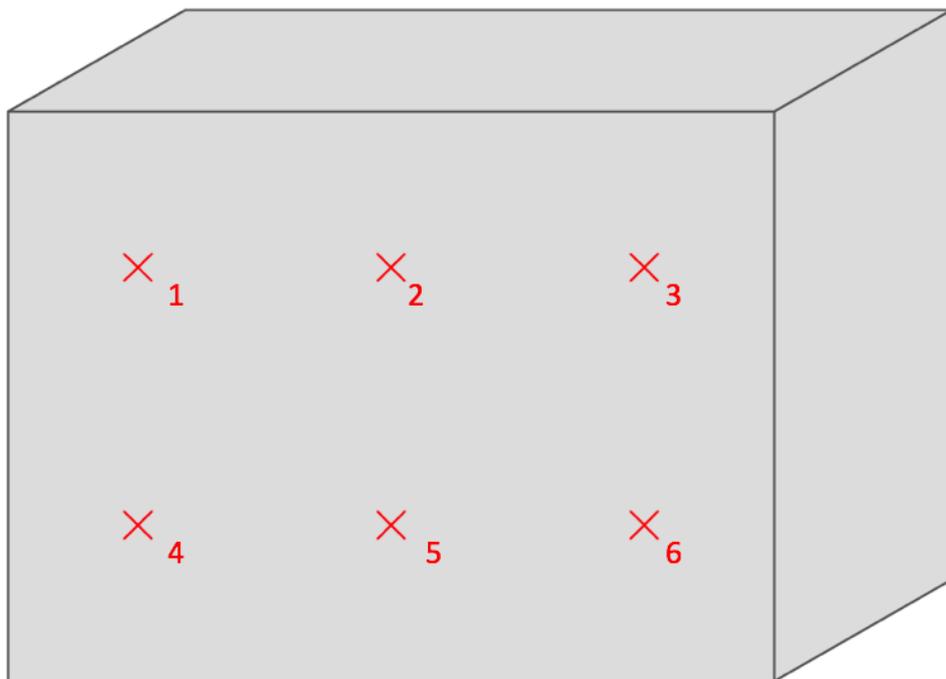


Figura 1. – Matriz exemplificativa dos pontos de medição

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem.	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1 Ensaio de termografia ativa – Variante II

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve com recurso à termografia ativa.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve, prevendo-se para cada um a realização de dois ciclos. Um primeiro ciclo de humedificação e um segundo ciclo de secagem, com uma duração estimada para o ciclo de humedificação de 96 horas, e com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. Estes dois ciclos decorrerão no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20° C e uma humedidade relativa de 60%.

O procedimento para o ciclo de humedificação, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e do tabuleiro;
- III. Pesagem do provete seco, antes de ser ensaiado;
- IV. Preparação do provete para ser ensaiado. Colocação de água na caixa estanque;

- V. Colocação do provete a ensaiar e do suporte da base do mesmo, no interior da caixa;
- VI. Medição de controlo da humidade do provete, com recurso ao humidímetro, após 94h do provete ser imerso.

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes, dá-se início ao ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Colocação e definição do posicionamento da lâmpada de infravermelhos;
- II. Retirar o provete do contacto com água;
- III. Medição da humidade presente no provete;
- IV. Pesagem do provete, aquando o início do ciclo de secagem;
- V. Colocação do provete no tabuleiro, nas posições anteriormente definidas, e realização de um termograma;
- VI. Iniciar a secagem por termografia ativa, acionando o funcionamento da lâmpada de infravermelhos;
- VII. Realização de termogramas com uma periodicidade de 10 min. durante 8 horas.
- VIII. Realização da pesagem do provete e da medição da humidade do mesmo, com a seguinte calendarização, durante 8 horas, com uma periodicidade de 60 minutos:

## 2. Equipamentos e Materiais:

- Câmara Climática: Fitoclíma 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Cartolina Preta;
- Provete de Betão leve.;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Caixa plástica estanque;
- Humidímetro de contacto;
- Pano absorvente ou esponja
- Lâmpada de infravermelhos.

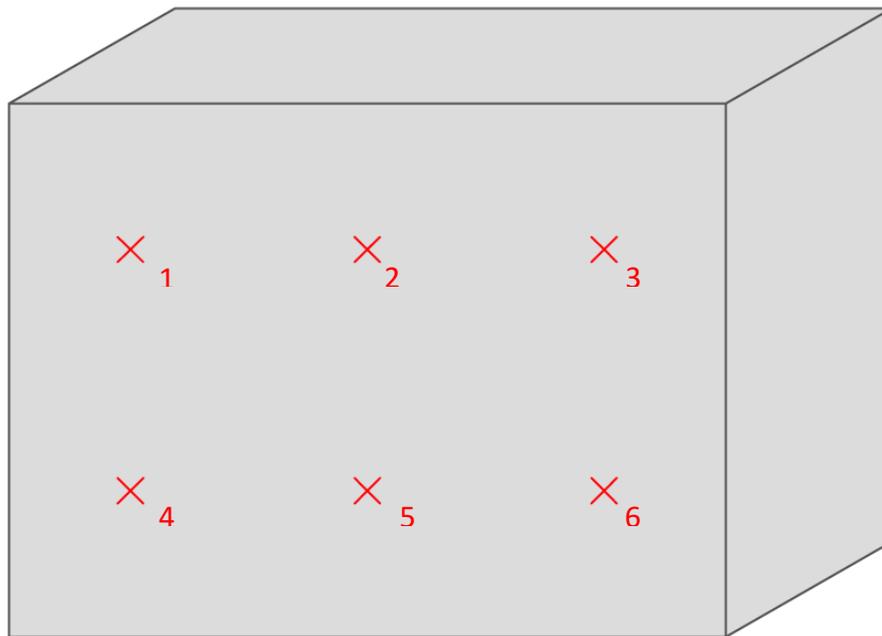


Figura 1. – Matriz exemplificativa dos pontos de medição

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem.	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1 Ensaio de termografia Passiva condicionado pelo aumento da convecção – Variante II

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve, com recurso à termografia ativa.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve, de forma independente, prevendo-se para cada um a realização de dois ciclos. Um primeiro ciclo de humedificação e um segundo ciclo de secagem, com uma duração estimada para o ciclo de humedificação de 96 horas, e com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. Estes dois ciclos decorrerão no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20º C e uma humidade relativa de 60%.

O procedimento para o ciclo de humedificação, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e do tabuleiro;
- III. Pesagem do provete seco, antes de ser ensaiado;
- IV. Preparação do provete para ser ensaiado. Colocação de água na caixa estanque;

- V. Colocação do provete a ensaiar e do suporte da base do mesmo, no interior da caixa;
- VI. Medição de controlo da humidade do provete, com recurso ao humidímetro, após 72h do provete ser imerso.

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes, dá-se inicio ao ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Colocação e definição do posicionamento da ventoinha, perpendicularmente ao provete;
- II. Retirar o provete do contacto com água;
- III. Medição da humidade presente no provete;
- IV. Pesagem do provete, aquando o inicio do ciclo de secagem;
- V. Colocação do provete no tabuleiro, nas posições anteriormente definidas, e realização de um termograma;
- VI. Iniciar a secagem, acionando o funcionamento da ventoinha;
- VII. Realização de termogramas com uma periodicidade de 10 mint. durante 8 horas.
- VIII. Realização da pesagem do provete, da medição da humidade do mesmo, e da medição da velocidade do ar, com a seguinte calendarização, durante 8 horas, com uma periodicidade de 60 minutos:

## 2. Equipamentos e Materiais:

- Câmara Climática: Fitoclima 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Cartolina Preta;
- Provetes de Betão leve.;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Caixa plástica estanque;
- Humidímetro de contacto;
- Pano absorvente ou esponja;
- Lâmpada de infravermelhos;
- Ventoinha;
- AIRFLOW TA5.

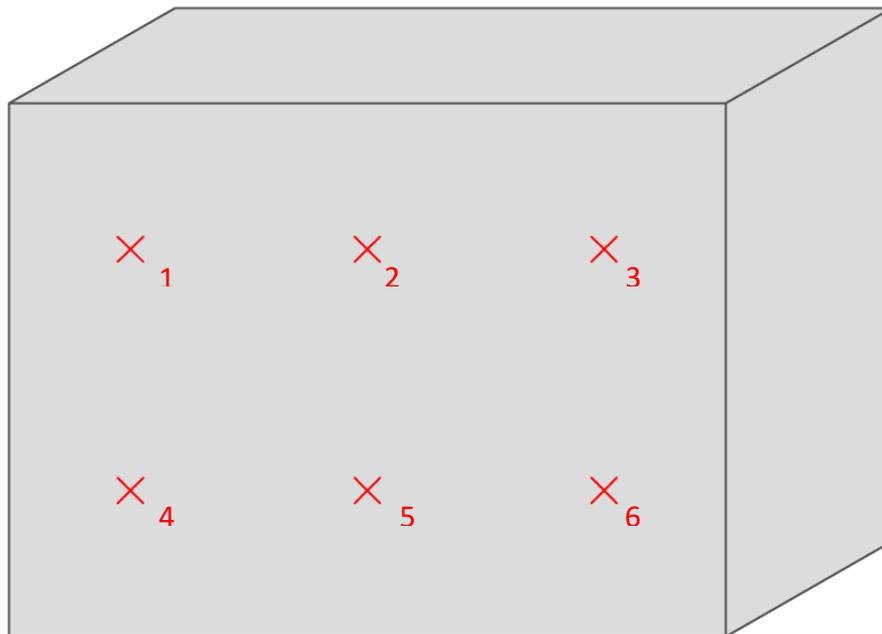


Figura 1. – Matriz exemplificativa dos pontos de medição

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

# Plano de Ensaio Laboratorial

<b>Nome:</b> João Pedro Borges Ferreira	<b>Orientador:</b> Professora Doutora Eva Barreira
	<b>Coorientador:</b> Professor Doutor Ricardo Almeida
<b>Secção:</b> Secção de Construções , Laboratório de Física das Construções	
<b>Título da Dissertação:</b> A termografia de infravermelhos na avaliação dos fenómenos de humedificação e secagem	

## 1. Procedimento de ensaio

### 1.1 Ensaio de termografia passiva com embebição parcial pela base – Variante III

O presente ensaio visa a análise quantitativa dos provetes de betão leve, com recurso à termografia passiva.

Pretende-se realizar o ensaio de provetes de betão leve, prevendo-se para cada um a realização de dois ciclos. Um primeiro ciclo de humedificação e um segundo ciclo de secagem, com uma duração estimada para o ciclo de humedificação de 24 horas, e com uma duração definida para o ciclo de secagem de 72h. Estes dois ciclos decorrerão no interior de uma câmara climática em condições ambiente controladas, a uma temperatura de 20° C e uma humedidade relativa de 60%.

Os provetes, anteriormente ao início do ensaio, são colocados durante aproximada 96 horas (quatro dias), no interior da câmara climática, à temperatura de 20° C e com uma humedidade relativa de 60%.

O procedimento para o primeiro ciclo, é o seguinte:

- I. Preparação da câmara climática, para a realização do ensaio. Cobrindo as aberturas da câmara e zona de ensaio com elementos de cor negra;
- II. Colocação e definição do posicionamento da câmara de infravermelhos e dos tabuleiros;
- III. Pesagem dos provetes secos, antes de serem ensaiados;
- IV. Colocação dos provetes a ensaiar e dos suportes da base dos mesmos;

- V. Realização de um termograma com os provetes secos, devidamente posicionados, antes da colocação da água;
- VI. Marcação da altura da lâmina de água de 5mm a partir da base do provete, de acordo com a ISO 15148 de 2002, e colocação cuidadosa da respetiva quantidade de água, de forma a evitar a formação de ondulação.
- VII. Realização de um termograma imediatamente após colocar a água;
- VIII. Realização de termogramas no decorrer das 24h de humedificação, com uma periodicidade de 5 minutos no decorrer das primeiras 8 horas, e com uma periodicidade de 10 minutos durante 16 horas.

Após o término do ciclo de humedificação dos provetes (primeiro ciclo), dá-se início ao segundo ciclo, denominado de ciclo de secagem, com a seguinte ordem de procedimentos:

- I. Retira-se a água presente nos tabuleiros;
- II. Realização de um termograma, imediatamente após a água ser retirada;
- III. Pesagem dos provetes, aquando o início do ciclo de secagem;
- IV. Colocação dos provetes nos tabuleiros, sem água, nas posições anteriormente definidas;
- V. Realização de termogramas e da pesagem dos provetes, com a seguinte calendarização:
  - Nas primeiras 6 horas com uma periodicidade de 30 minutos;
  - Das 6 horas às 72 horas após o início da secagem, com uma periodicidade de 60 minutos. Com a particularidade de que a pesagem dos provetes neste intervalo de tempo será realizada às 24, 30, 48, 54 e 72 após o início do ciclo de secagem. De forma a controlar o desenvolvimento do processo de secagem no final de cada dia, às 17h será realizada uma pesagem.

## **2. Equipamentos e Materiais:**

- Câmara Climática: Fitoclíma 1000 EDTU;
- Câmara Térmica de infravermelhos: Thermo Tracer TH9100 Series;
- Fita adesiva;
- Cartolina Preta;
- Provetes de Betão leve;
- Estufa WTC Binder;
- Tabuleiros;
- Caixa estanque;
- Sílica Gel.

**Calendarização:** Prevê-se que este ensaio tenha a duração de uma semana.

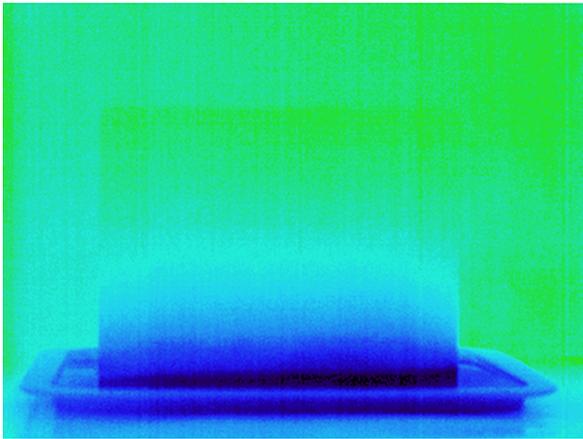
## ANEXO II

# TERMOGRAMAS EFETUADOS

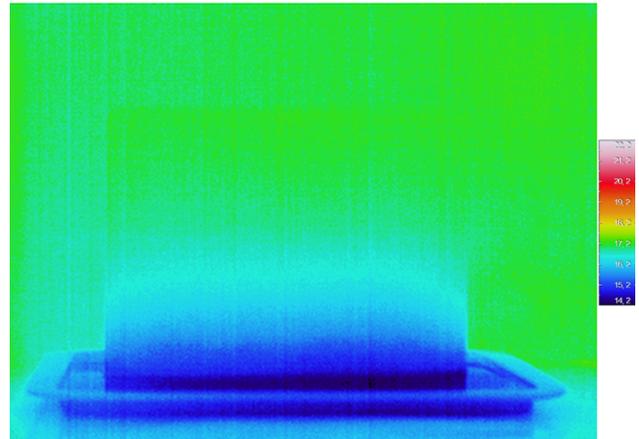
## Variante I – Tipo de Humidificação

### Ensaio I.1

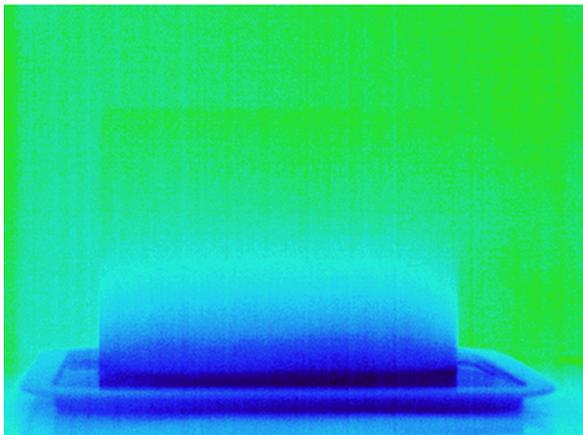
#### Ciclo de Humificação



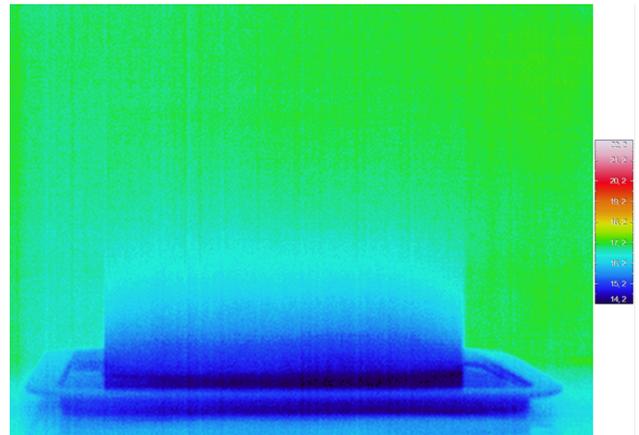
P1.H1.01 – Fase de humificação (00:30h)



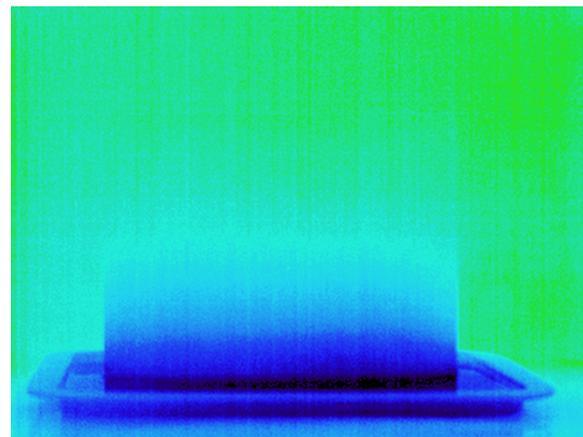
P1.H1.02 – Fase de humificação (02:00h)



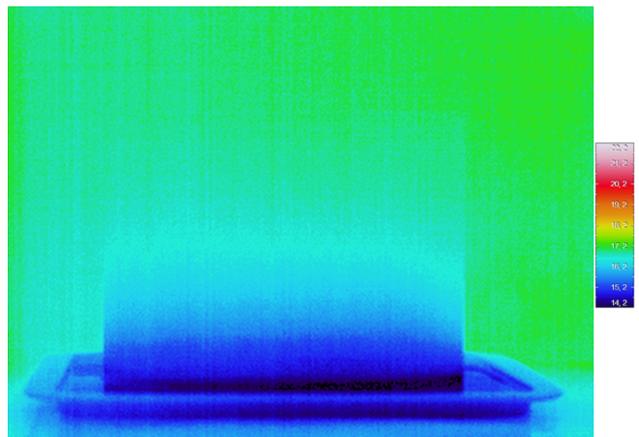
P1.H1.03 – Fase de humificação (04:00h)



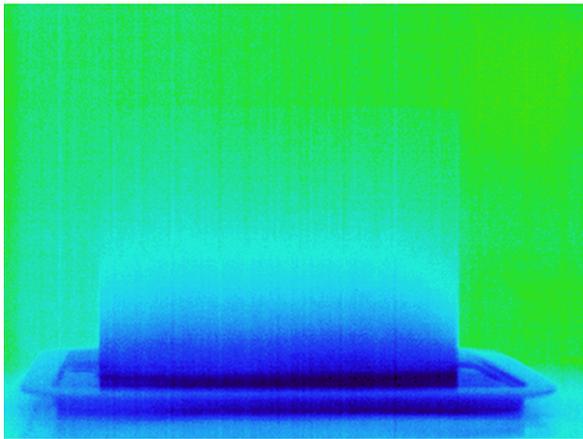
P1.H1.04 – Fase de humificação (06:00h)



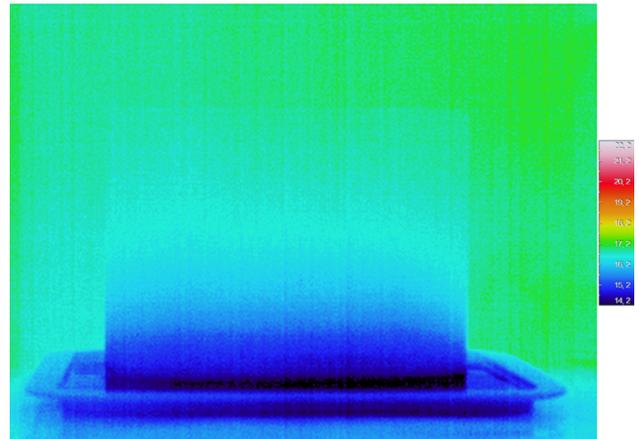
P1.H1.05 – Fase de humificação (08:00h)



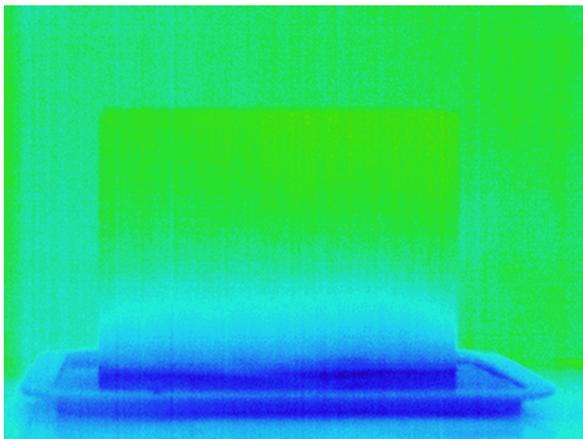
P1.H1.06 – Fase de humificação (10:00h)



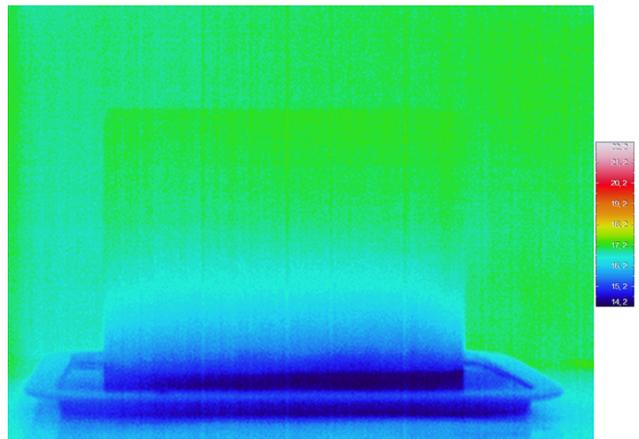
P1.H1.07 – Fase de humificação (12:00h)



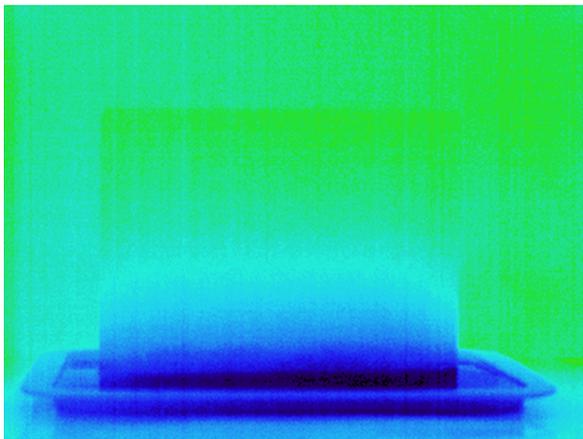
P1.H1.08 – Fase de humificação (14:00h)



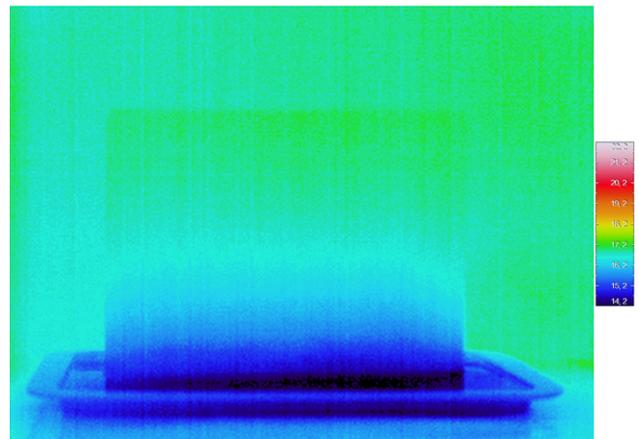
P1.H1.09 – Fase de humificação (16:00h)



P1.H1.10 – Fase de humificação (18:00h)

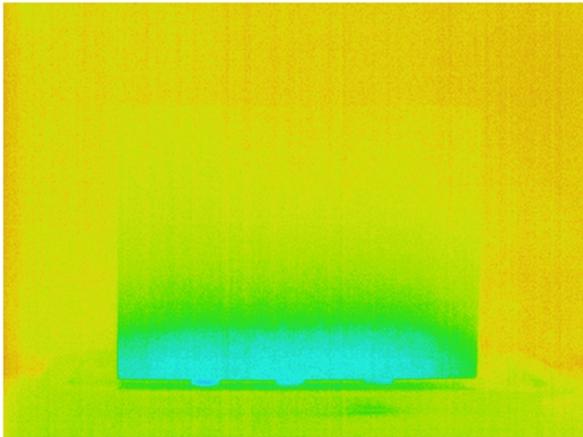


P1.H1.11 – Fase de humificação (20:00h)

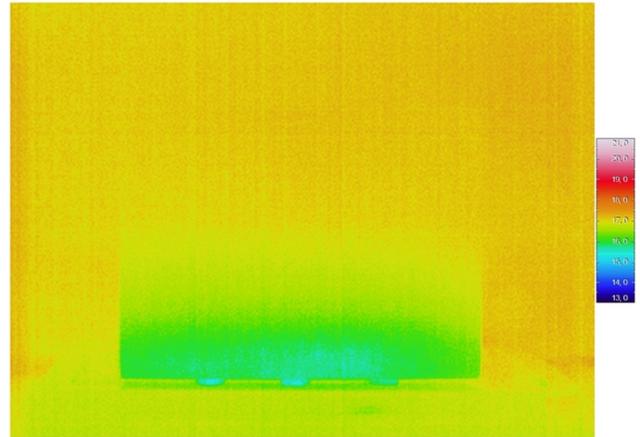


P1.H1.11 – Fase de humificação (24:00h)

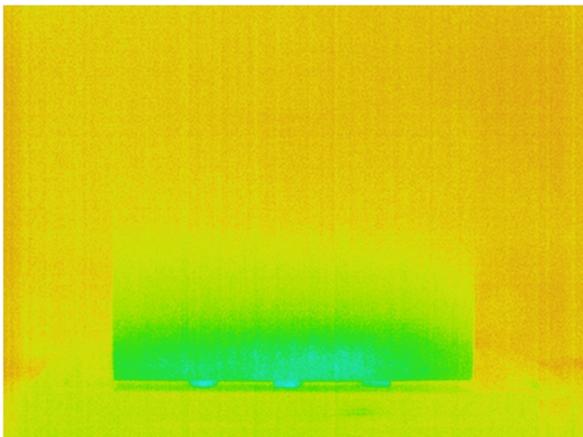
## Ciclo de Secagem



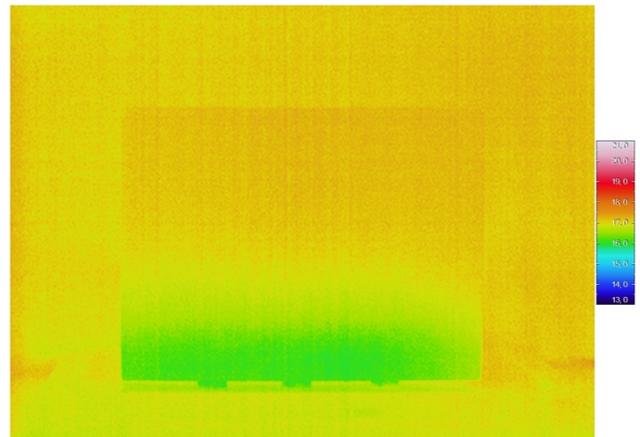
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



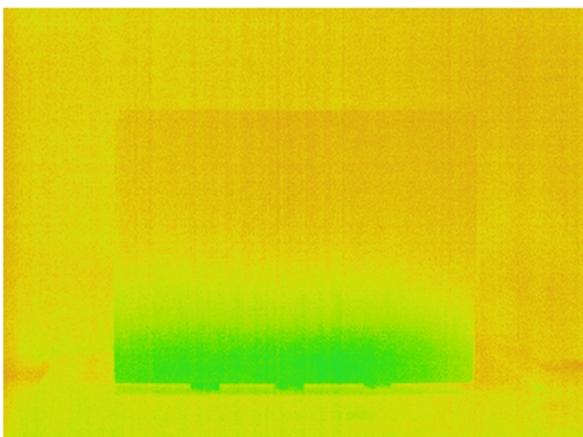
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



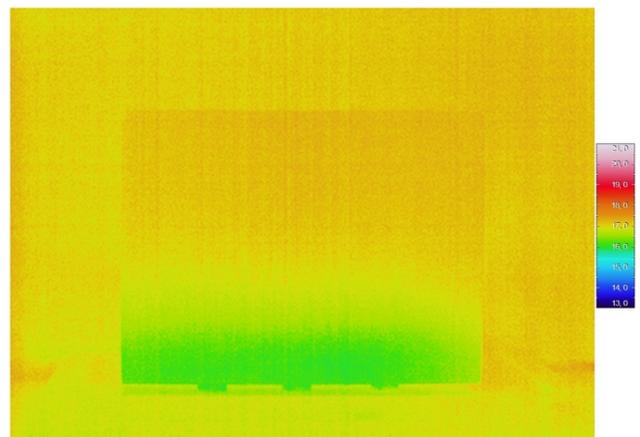
P1.S1.03 – Fase de secagem (02:00h)



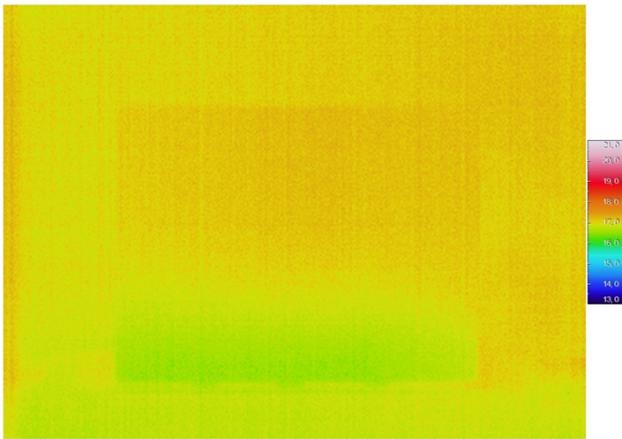
P1.S1.04 – Fase de secagem (03:00h)



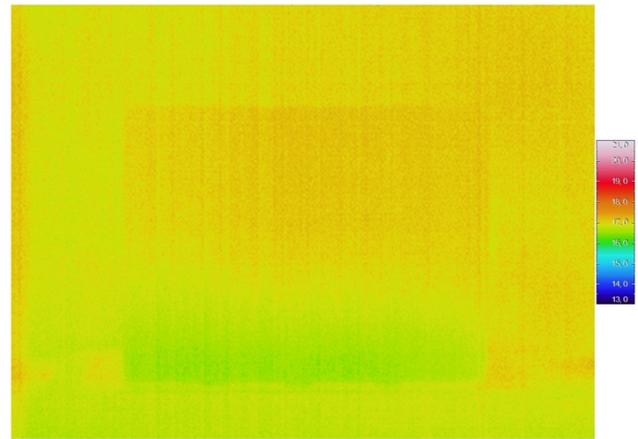
P1.S1.05 – Fase de secagem (04:00h)



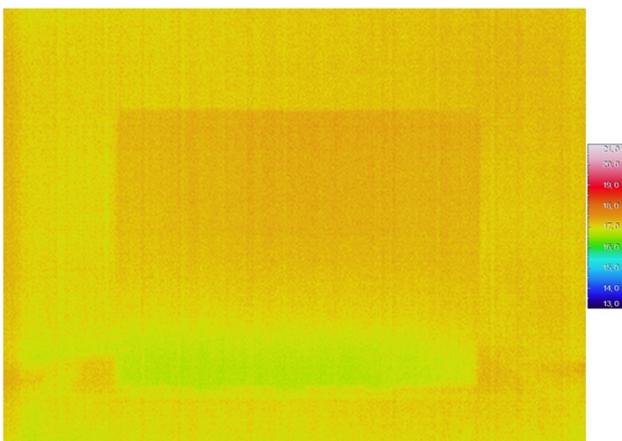
P1.S1.06 – Fase de secagem (05:00h)



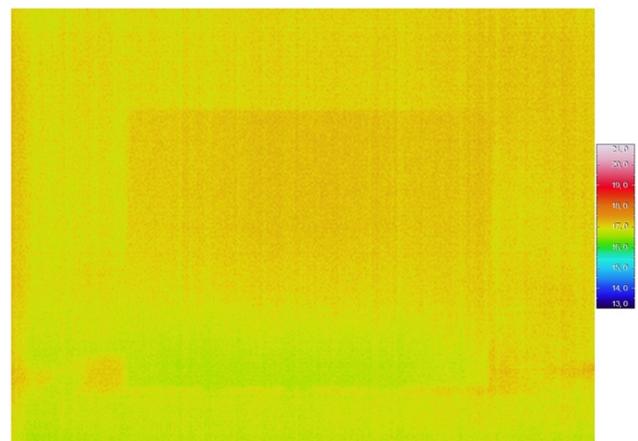
P1.S1.07 – Fase de secagem (06:00h)



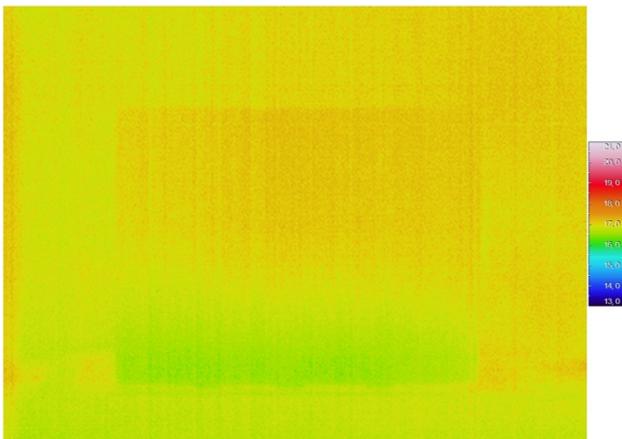
P1.S1.08 – Fase de secagem (24:00h)



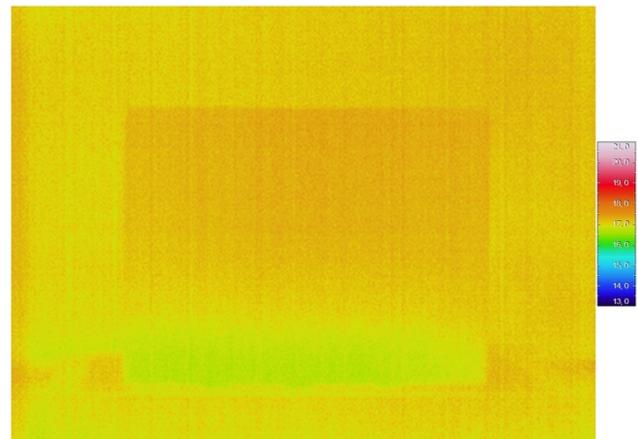
P1.S1.09 – Fase de secagem (27:00h)



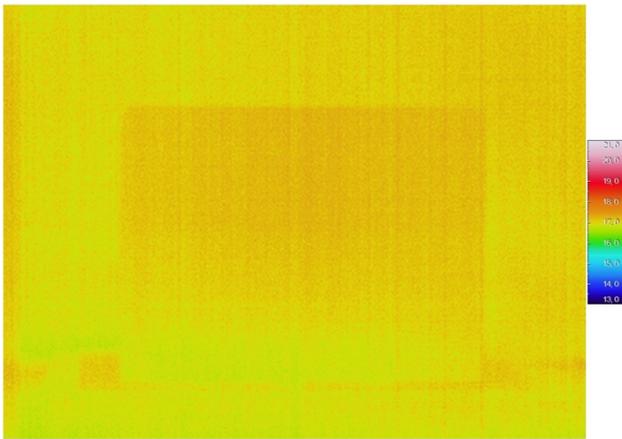
P1.S1.10 – Fase de secagem (30:00h)



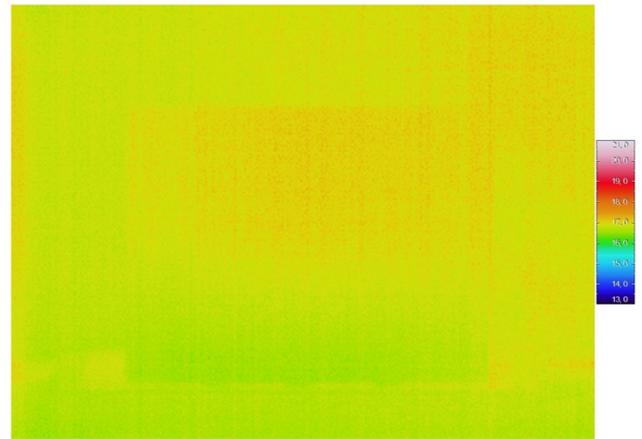
P1.S1.11 – Fase de secagem (48:00h)



P1.S1.12 – Fase de secagem (51:00h)



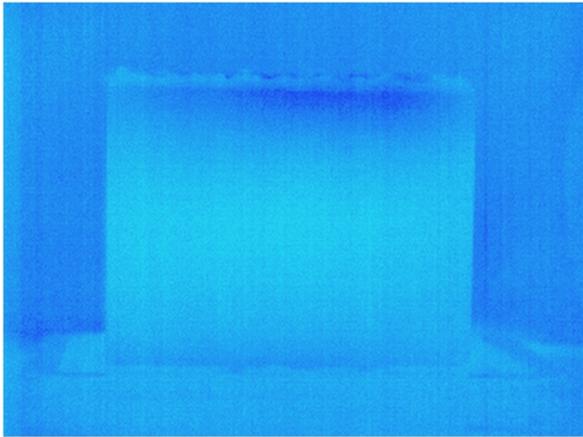
P1.S1.13 – Fase de secagem (54:00h)



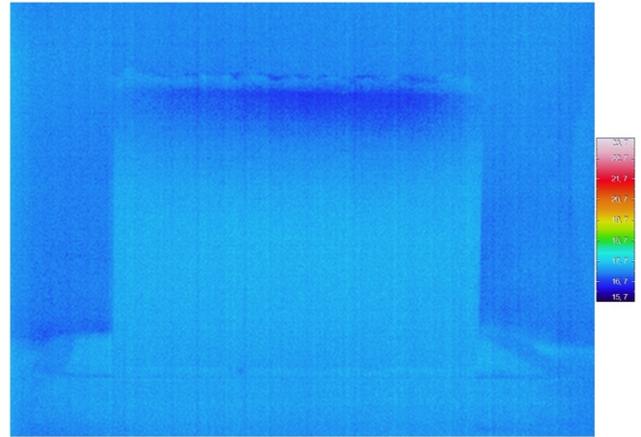
P1.S1.14 – Fase de secagem (72:00h)

## Ensaio I.2

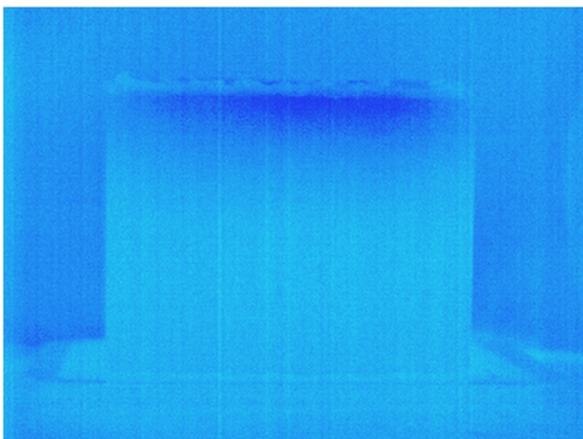
### Ciclo de Humificação



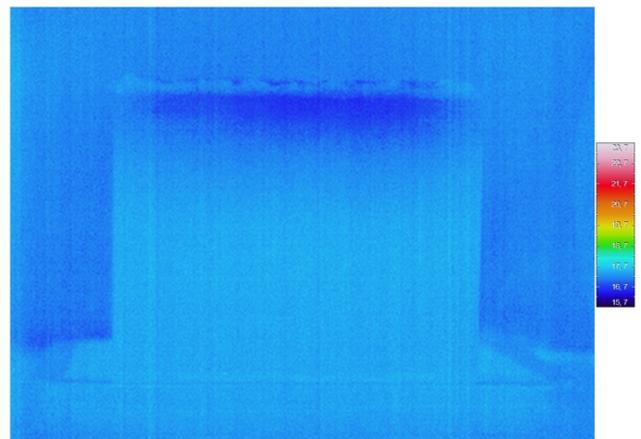
P1.H1.01 – Fase de humificação (00:30h)



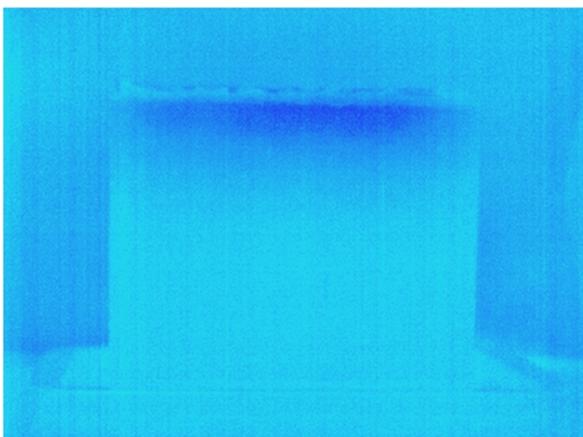
P1.H1.02 – Fase de humificação (02:00h)



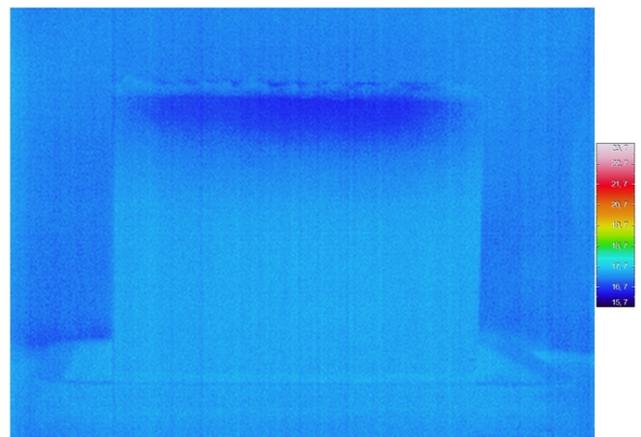
P1.H1.03 – Fase de humificação (04:00h)



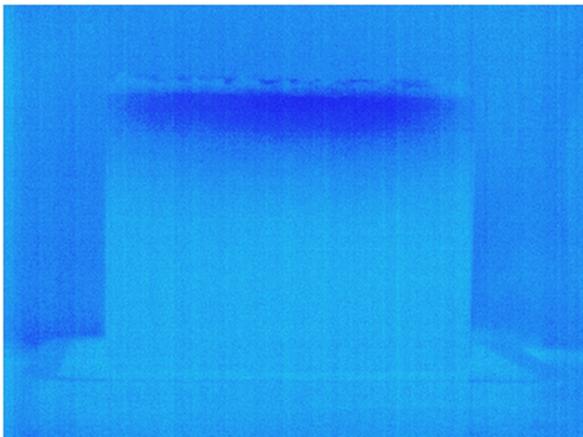
P1.H1.04 – Fase de humificação (06:00h)



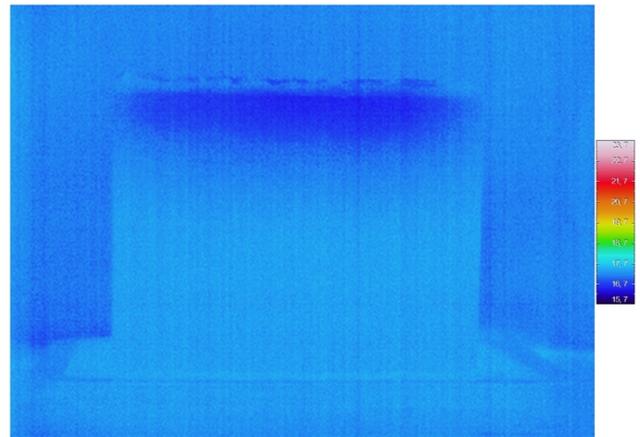
P1.H1.05 – Fase de humificação (08:00h)



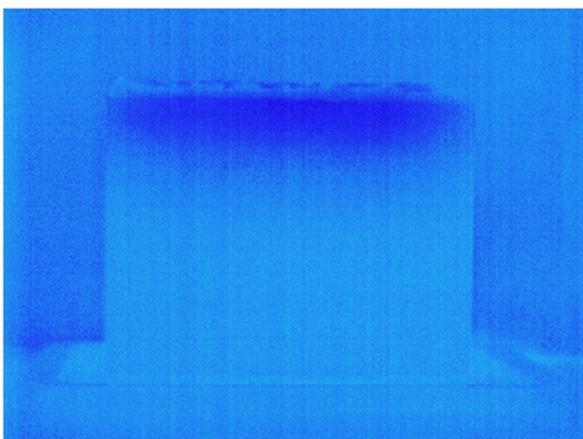
P1.H1.06 – Fase de humificação (10:00h)



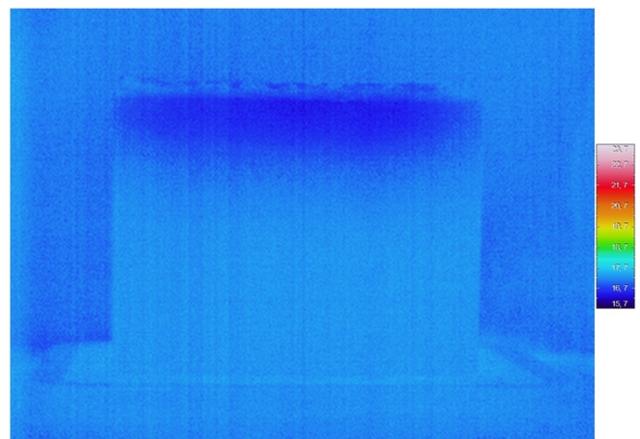
P1.H1.07 – Fase de humificação (12:00h)



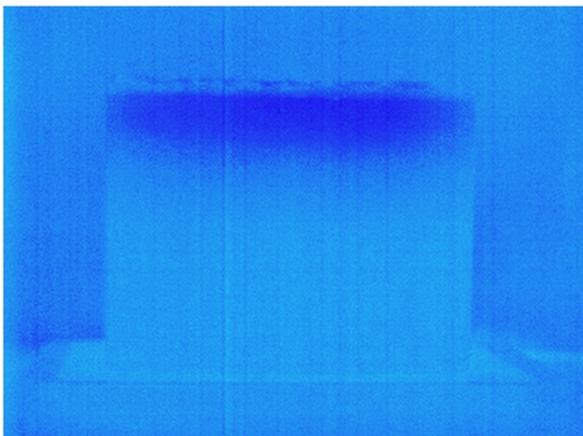
P1.H1.08 – Fase de humificação (14:00h)



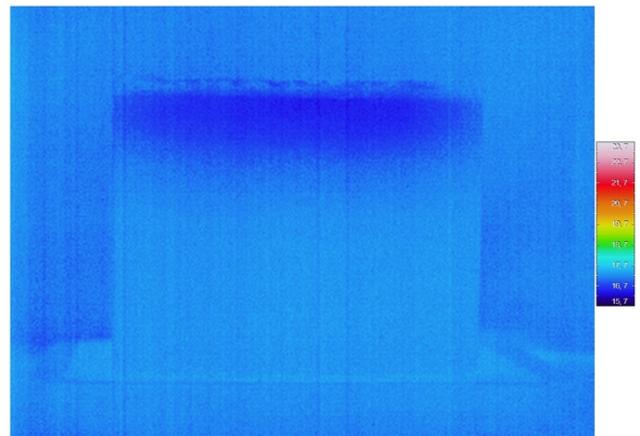
P1.H1.09 – Fase de humificação (16:00h)



P1.H1.10 – Fase de humificação (18:00h)

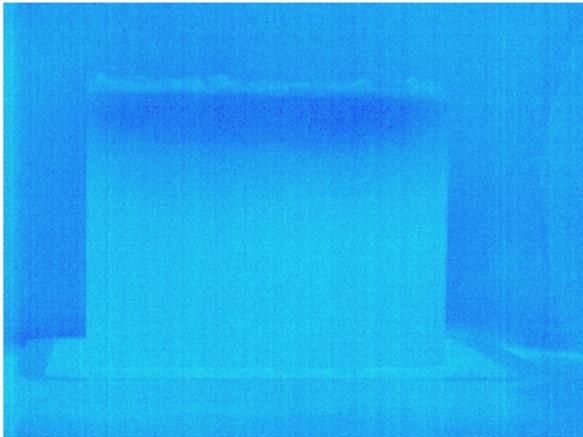


P1.H1.11 – Fase de humificação (20:00h)

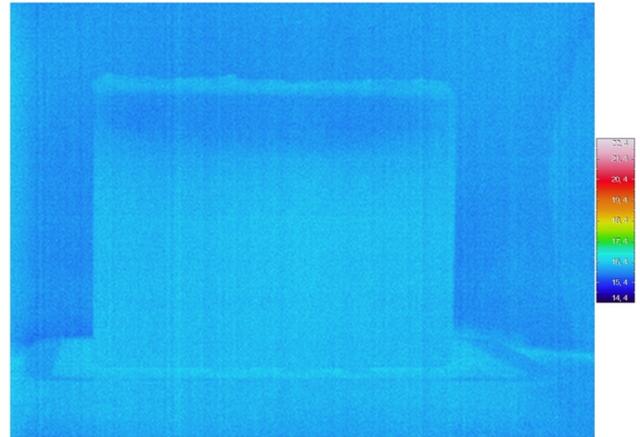


P1.H1.11 – Fase de humificação (24:00h)

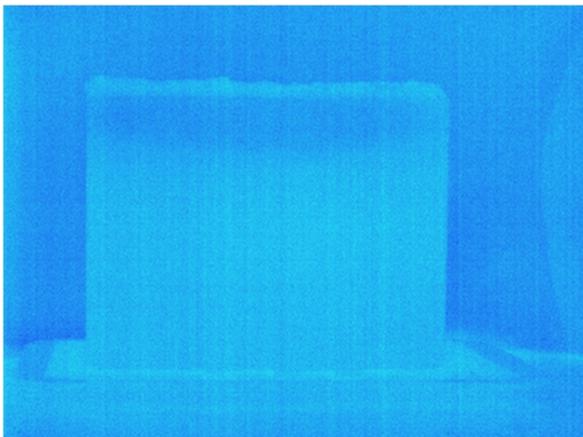
## Ciclo de Secagem



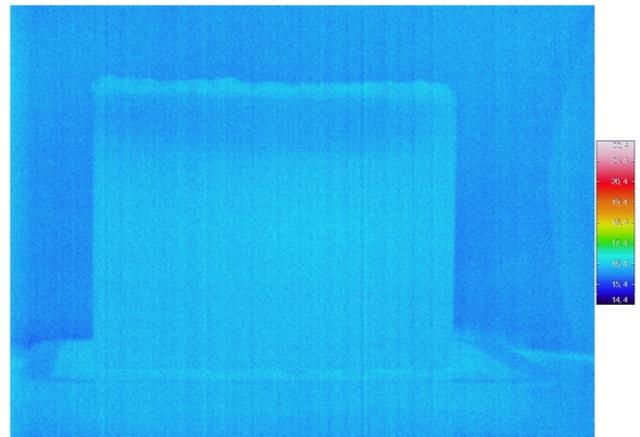
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



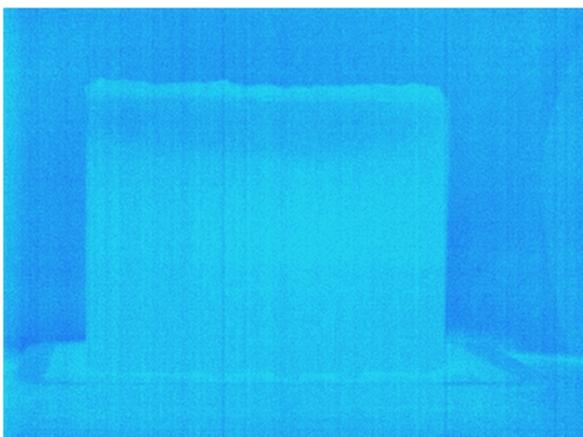
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



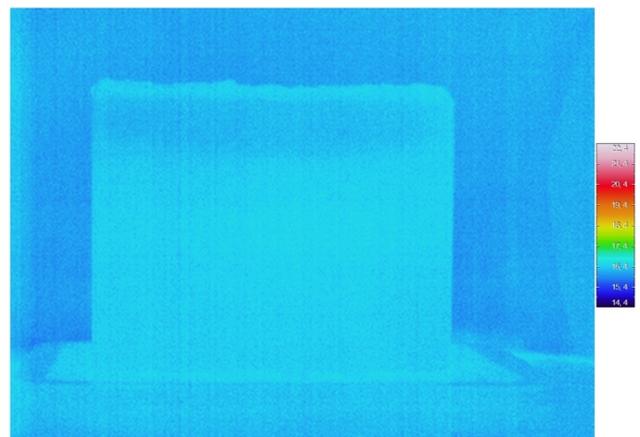
P1.S1.03 – Fase de secagem (02:00h)



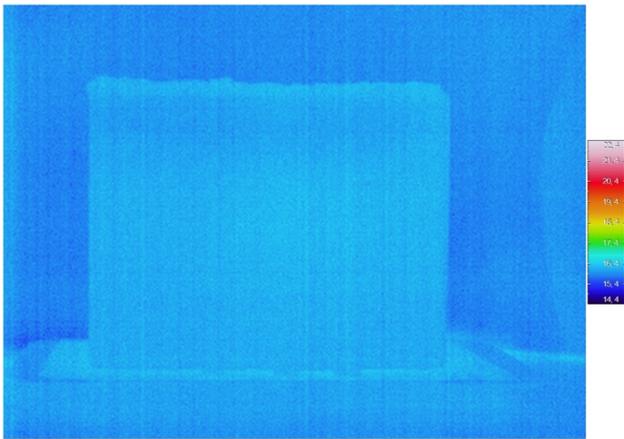
P1.S1.04 – Fase de secagem (03:00h)



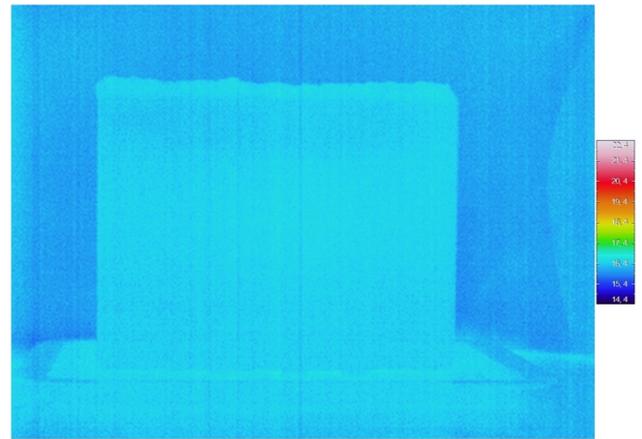
P1.S1.05 – Fase de secagem (04:00h)



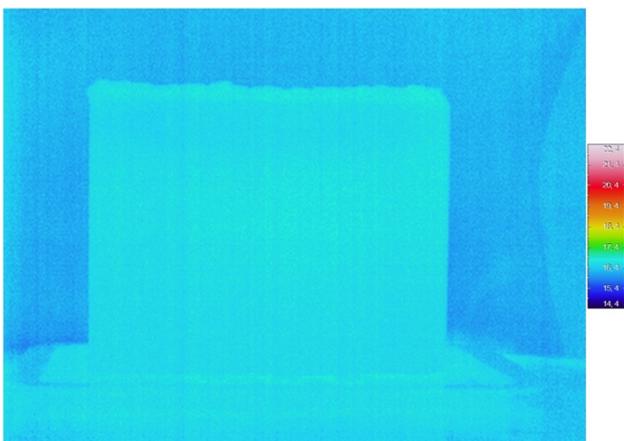
P1.S1.06 – Fase de secagem (05:00h)



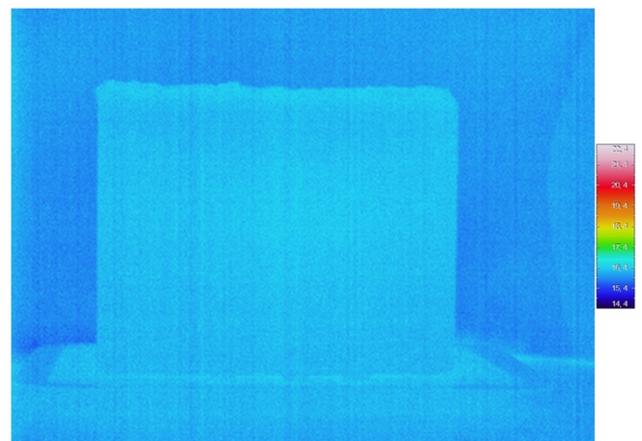
P1.S1.07 – Fase de secagem (06:00h)



P1.S1.08 – Fase de secagem (24:00h)



P1.S1.09 – Fase de secagem (27:00h)



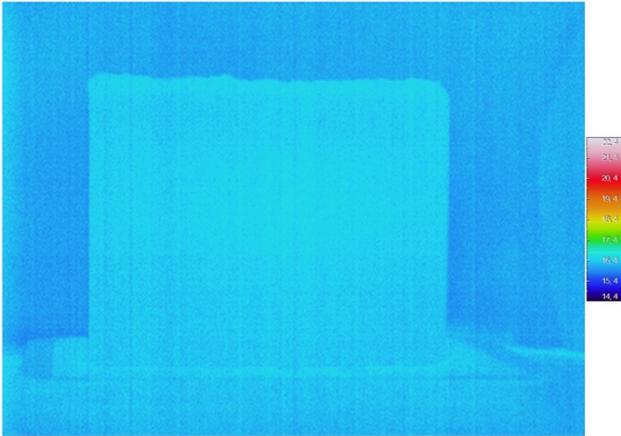
P1.S1.10 – Fase de secagem (30:00h)



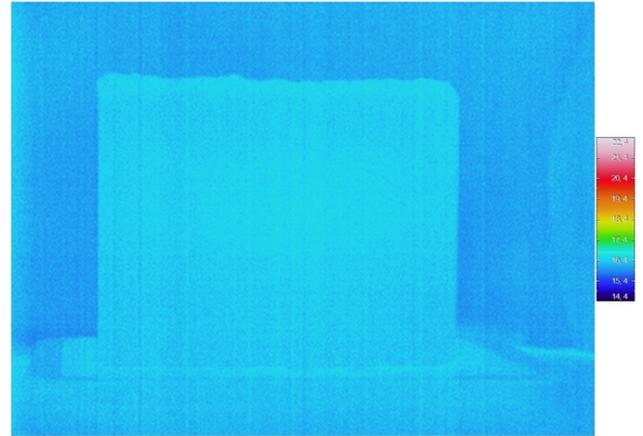
P1.S1.11 – Fase de secagem (48:00h)



P1.S1.12 – Fase de secagem (51:00h)



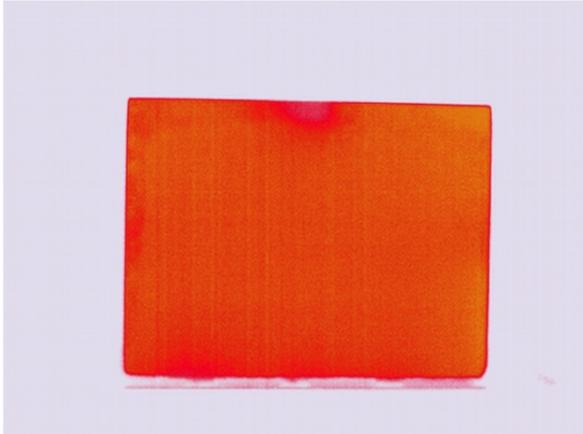
P1.S1.13 – Fase de secagem (54:00h)



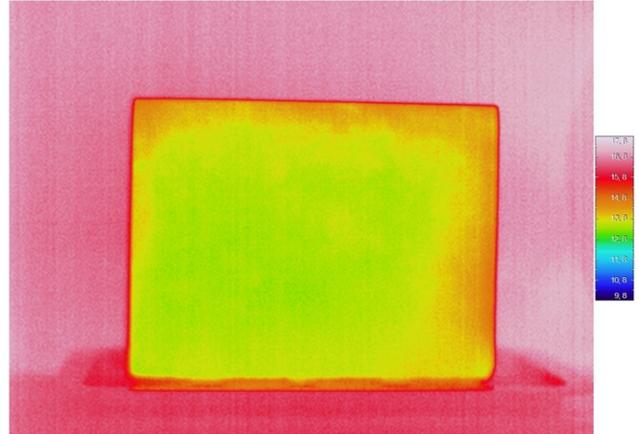
P1.S1.14 – Fase de secagem (72:00h)

## Ensaio I.3

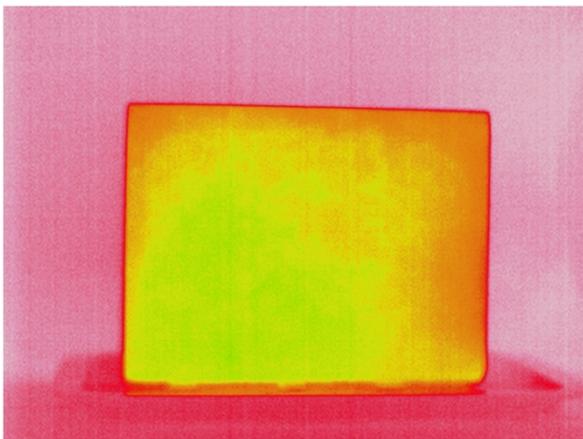
### Ciclo de Secagem



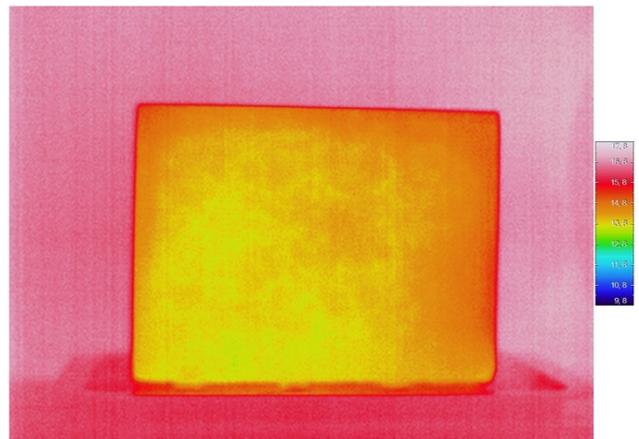
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



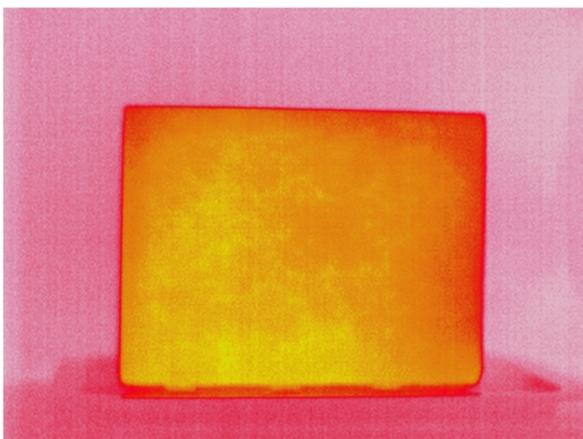
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



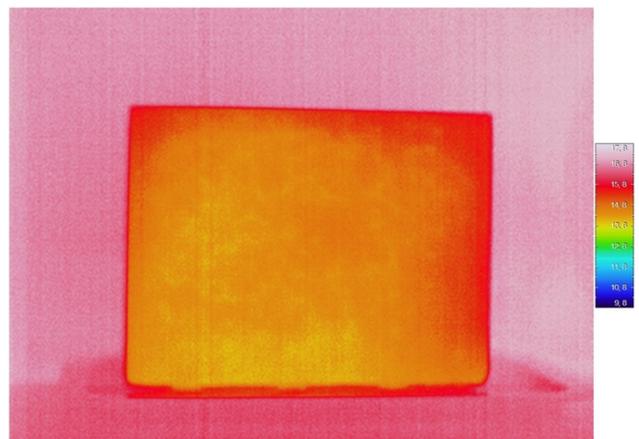
P1.S1.03 – Fase de secagem (02:00h)



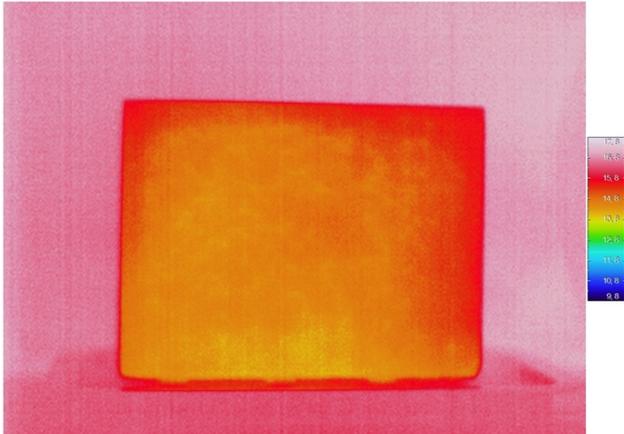
P1.S1.04 – Fase de secagem (03:00h)



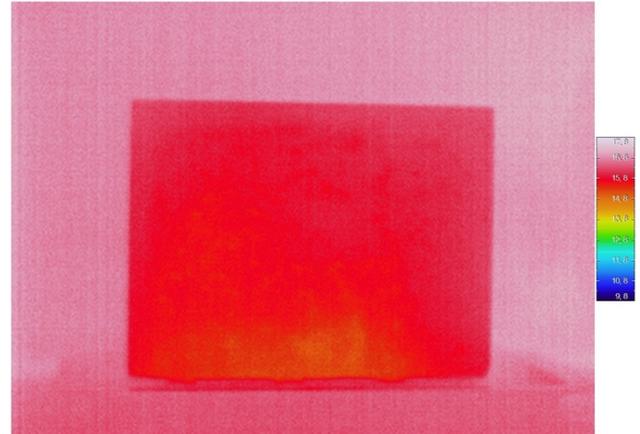
P1.S1.05 – Fase de secagem (04:00h)



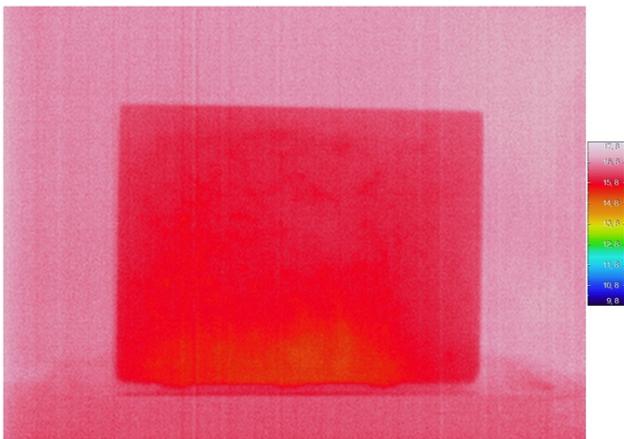
P1.S1.06 – Fase de secagem (05:00h)



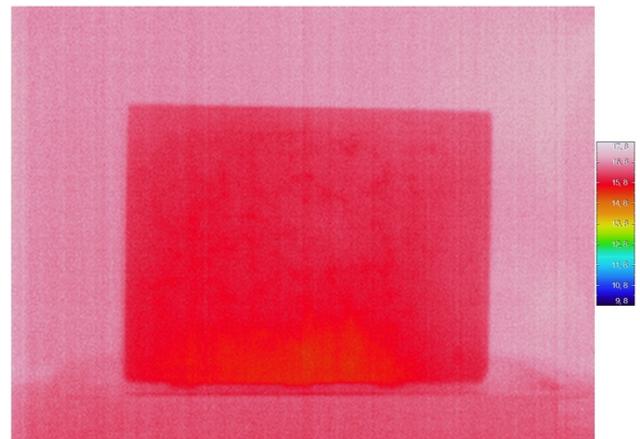
P1.S1.07 – Fase de secagem (06:00h)



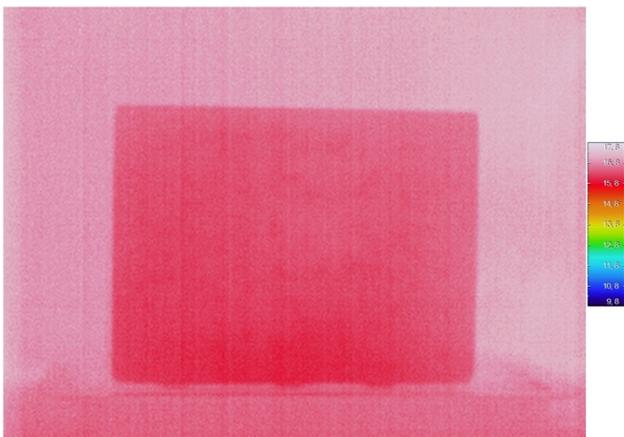
P1.S1.08 – Fase de secagem (24:00h)



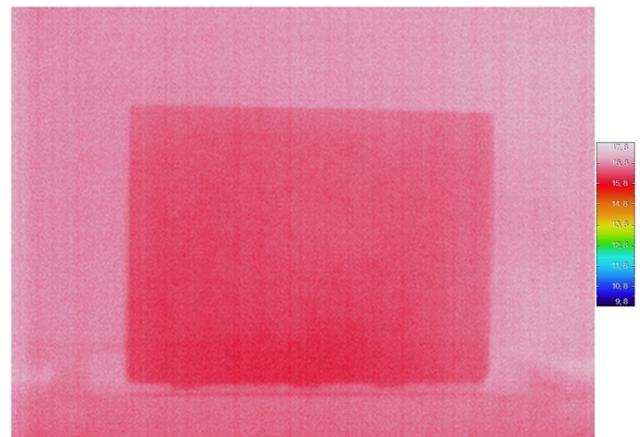
P1.S1.09 – Fase de secagem (27:00h)



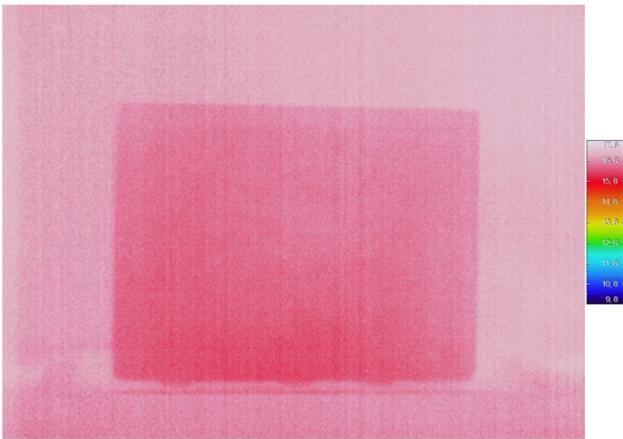
P1.S1.10 – Fase de secagem (30:00h)



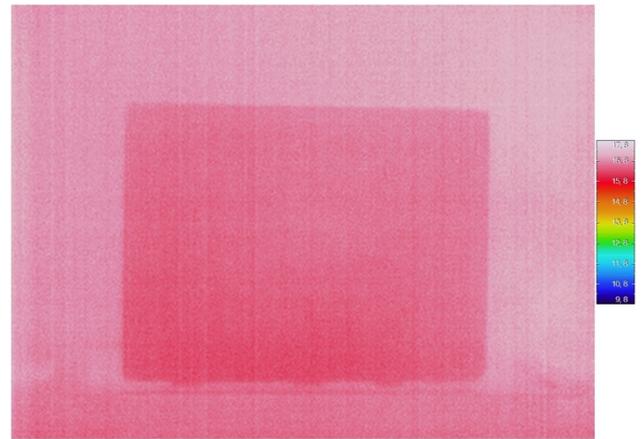
P1.S1.11 – Fase de secagem (48:00h)



P1.S1.12 – Fase de secagem (51:00h)



P1.S1.13 – Fase de secagem (54:00h)

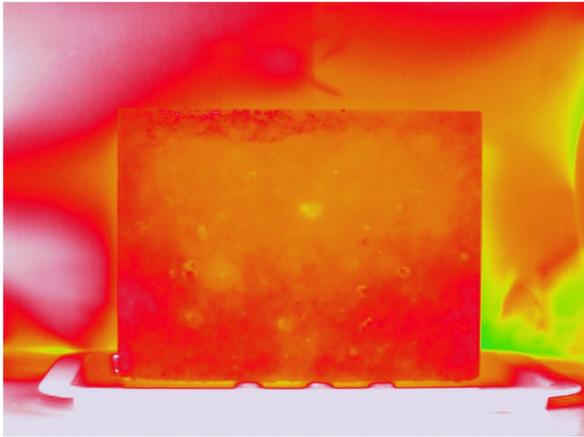


P1.S1.14 – Fase de secagem (72:00h)

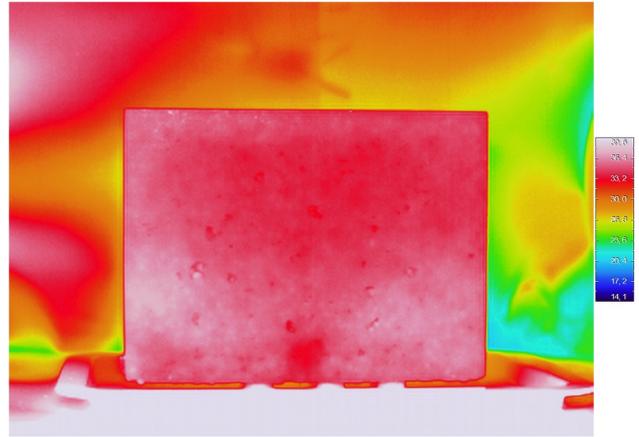
## Variante II – Tipo de Secagem

### Ensaio II.2

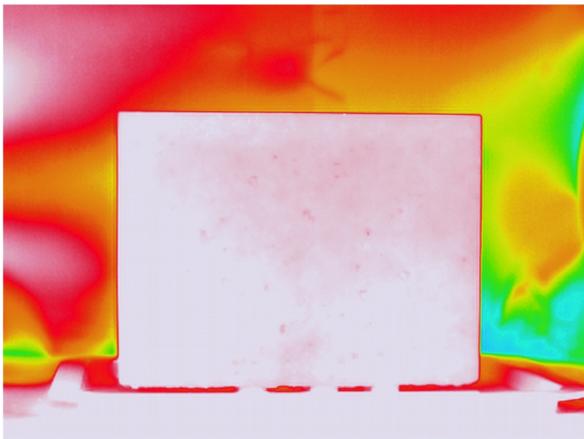
#### Ciclo de Secagem



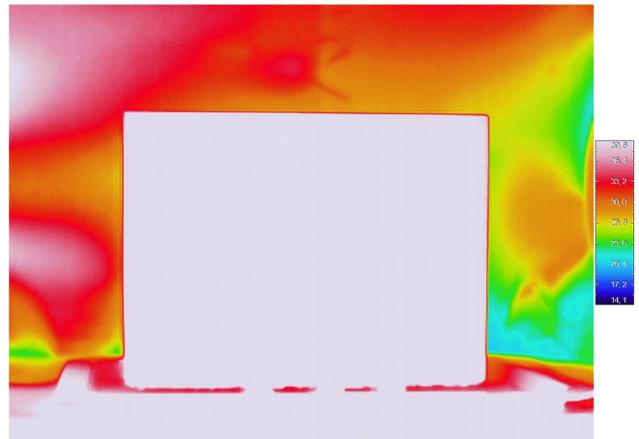
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



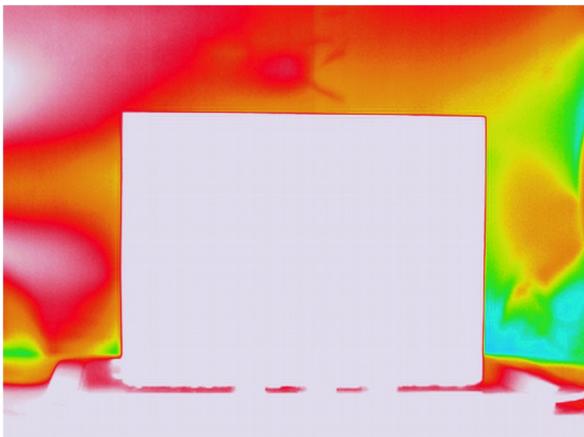
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



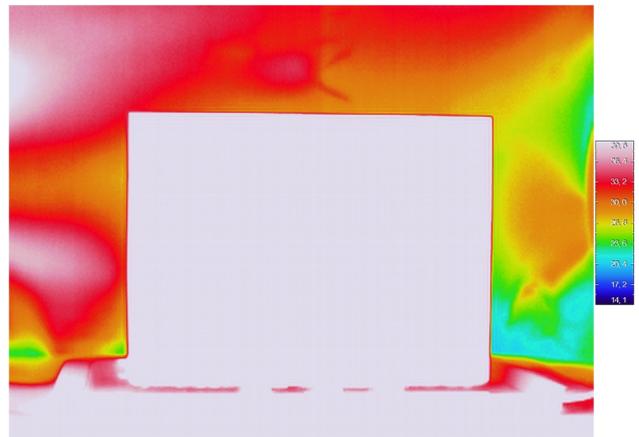
P1.S1.03 – Fase de secagem (01:30h)



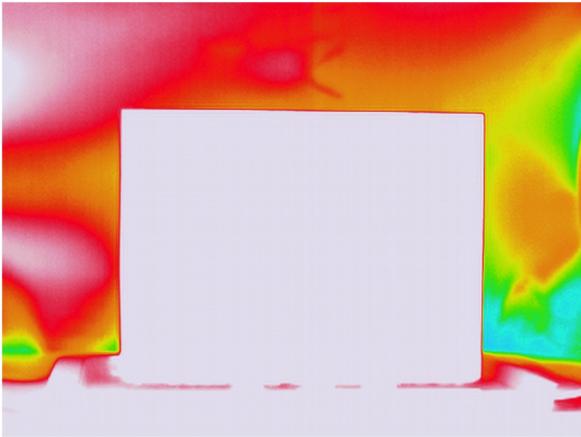
P1.S1.04 – Fase de secagem (02:00h)



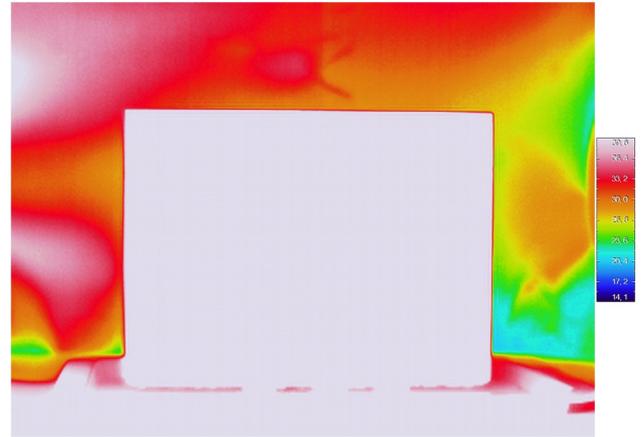
P1.S1.05 – Fase de secagem (02:30h)



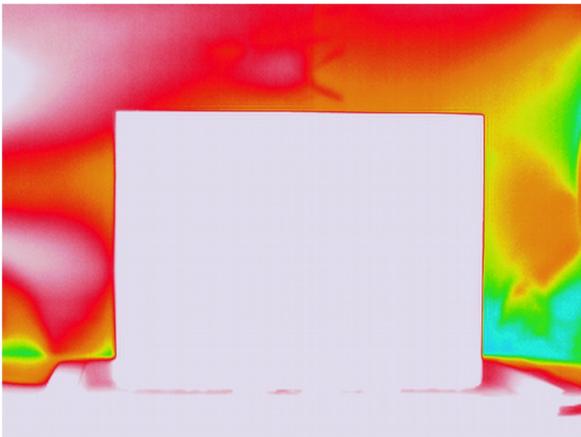
P1.S1.06 – Fase de secagem (03:00h)



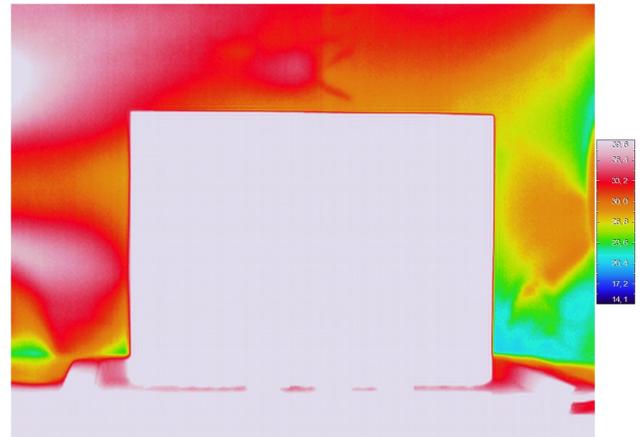
P1.S1.07 – Fase de secagem (03:30h)



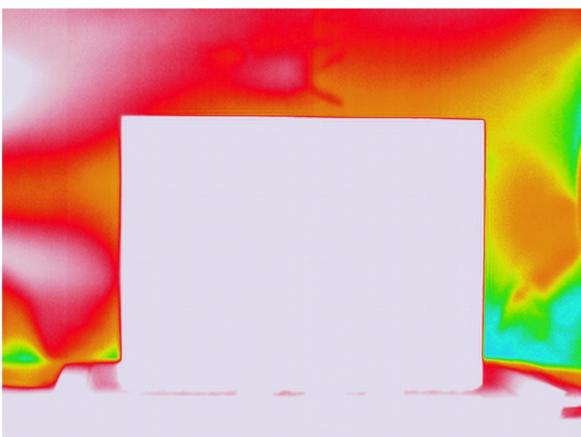
P1.S1.08 – Fase de secagem (04:00h)



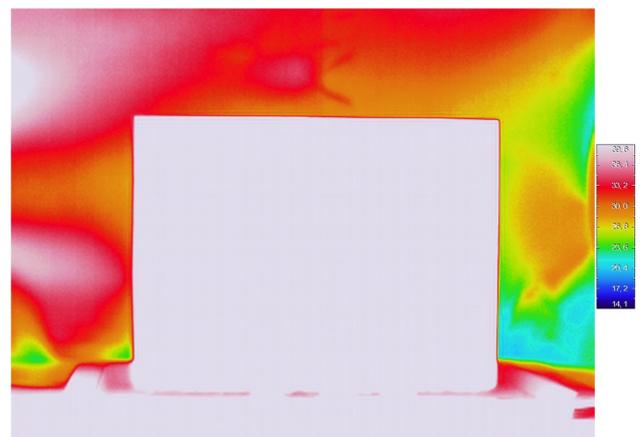
P1.S1.09 – Fase de secagem (04:30h)



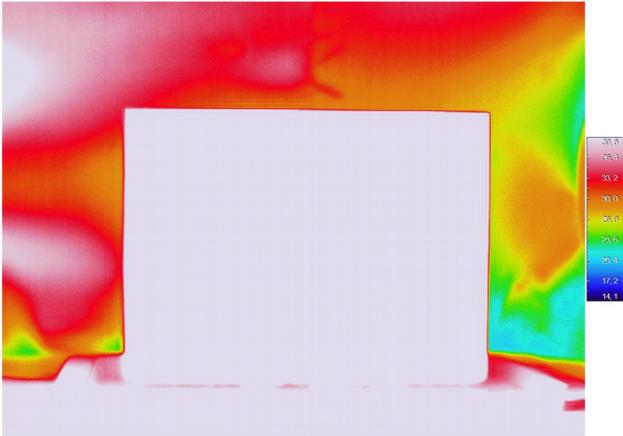
P1.S1.10 – Fase de secagem (05:00h)



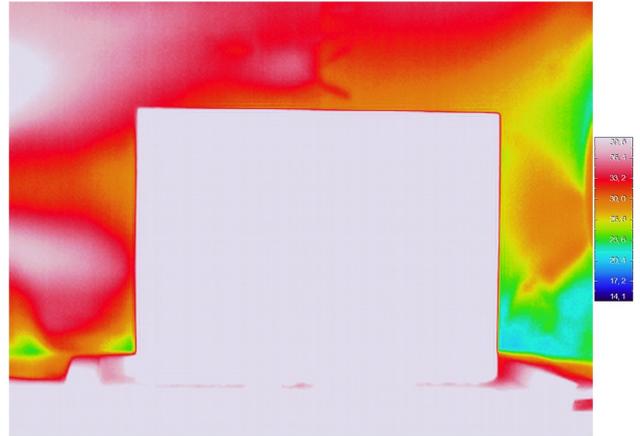
P1.S1.11 – Fase de secagem (05:30h)



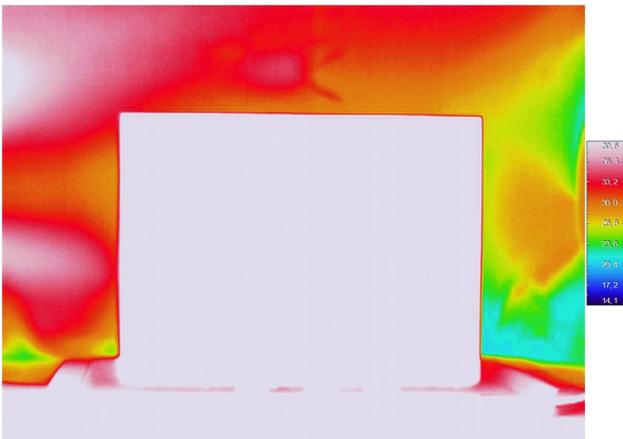
P1.S1.12 – Fase de secagem (06:00h)



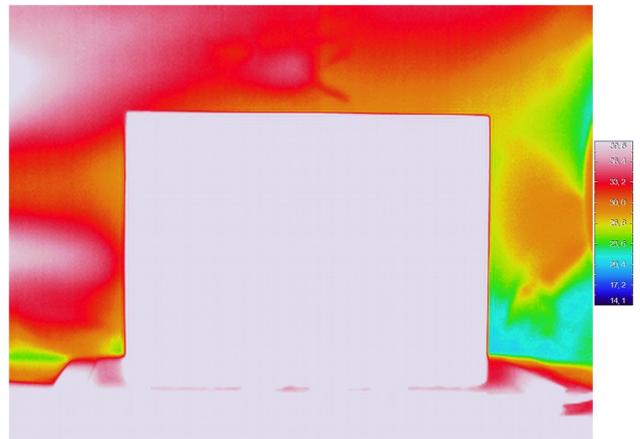
P1.S1.13 – Fase de secagem (06:30h)



P1.S1.14 – Fase de secagem (07:00h)



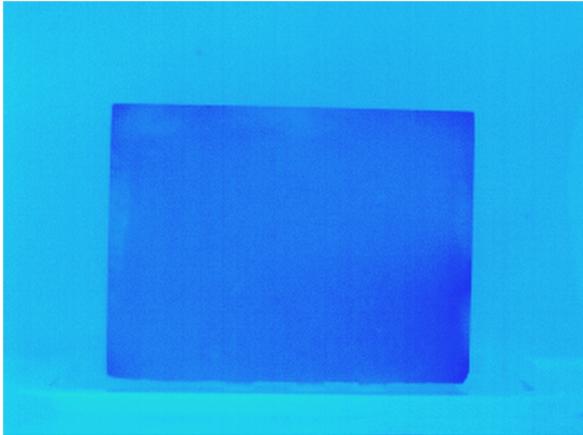
P1.S1.13 – Fase de secagem (07:30h)



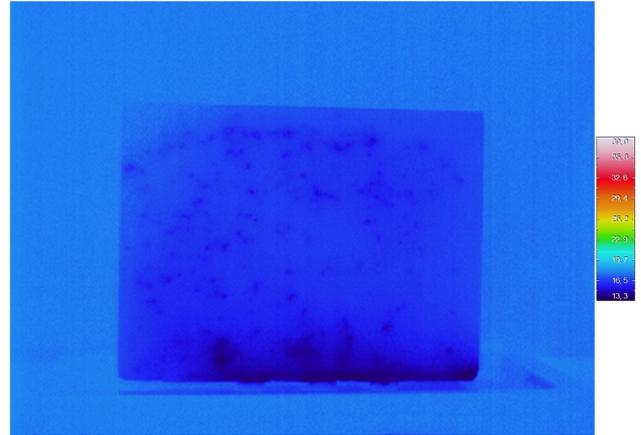
P1.S1.14 – Fase de secagem (08:00h)

## Ensaio II.3A

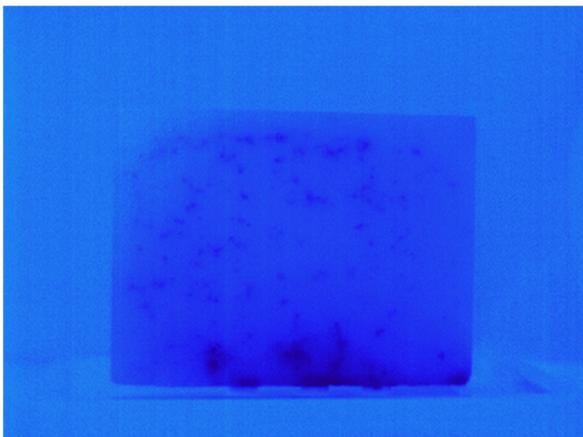
### Ciclo de Secagem



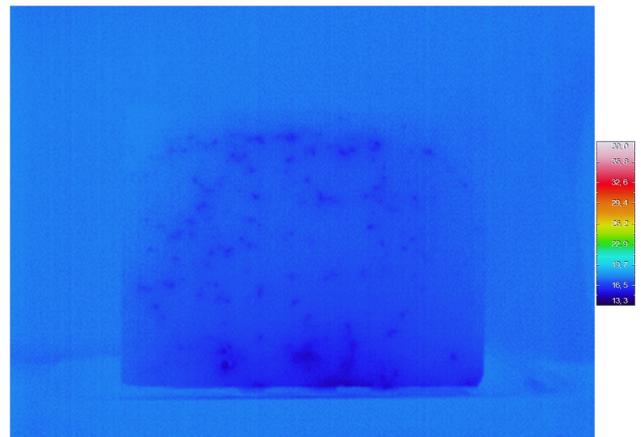
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



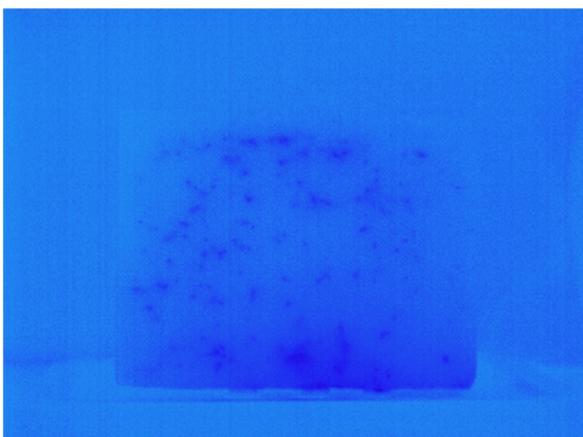
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



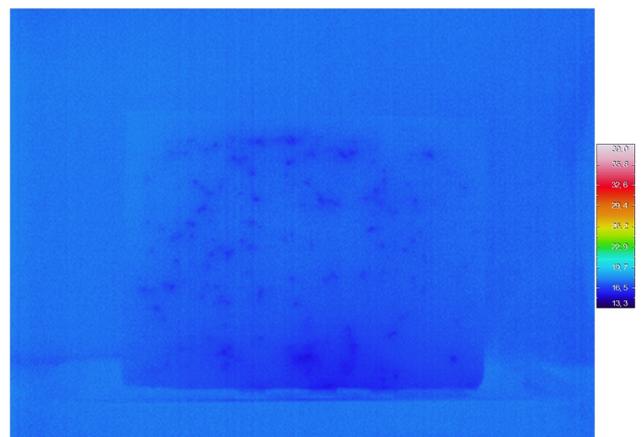
P1.S1.03 – Fase de secagem (01:30h)



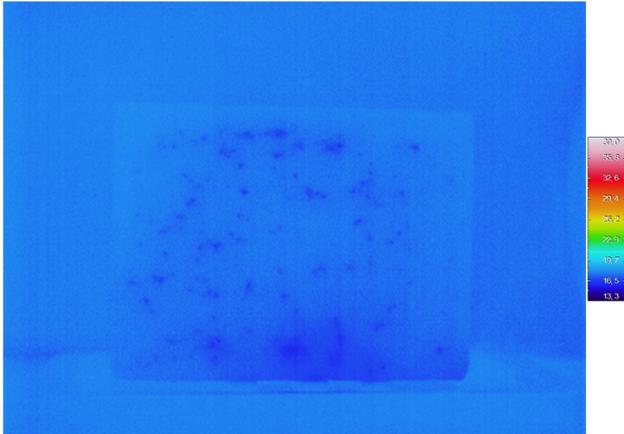
P1.S1.04 – Fase de secagem (02:00h)



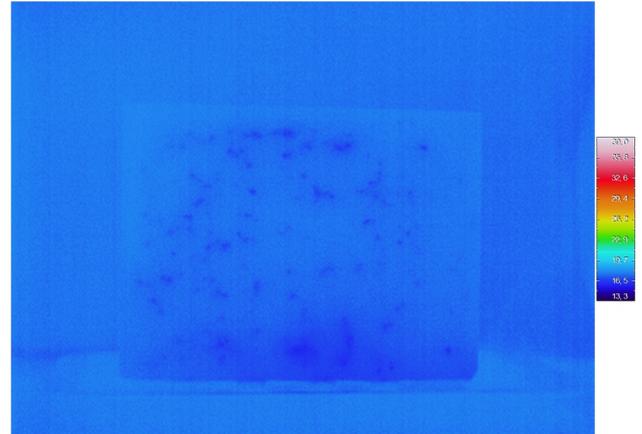
P1.S1.05 – Fase de secagem (02:30h)



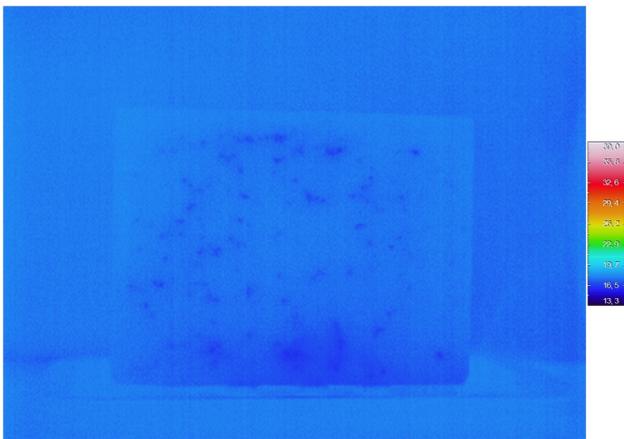
P1.S1.06 – Fase de secagem (03:00h)



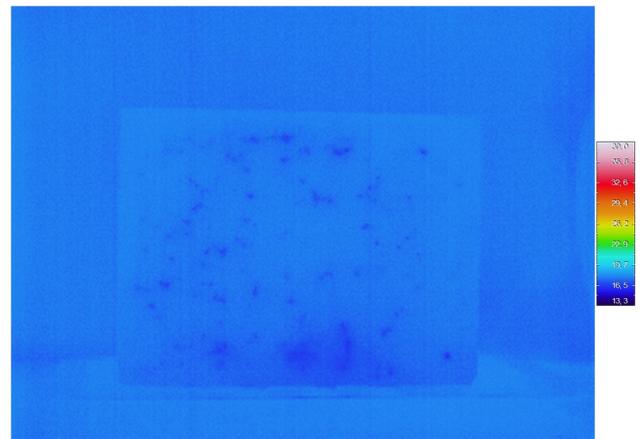
P1.S1.07 – Fase de secagem (03:30h)



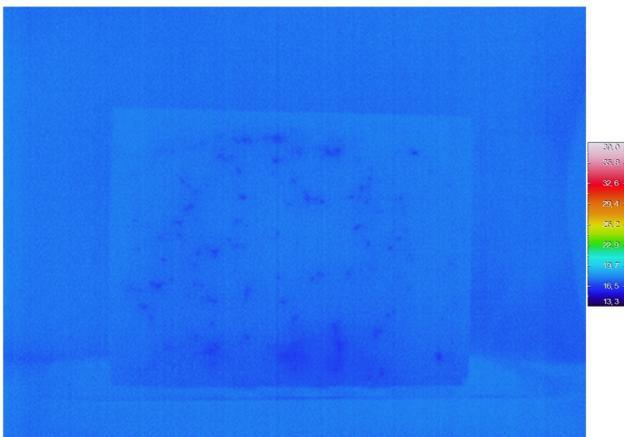
P1.S1.08 – Fase de secagem (04:00h)



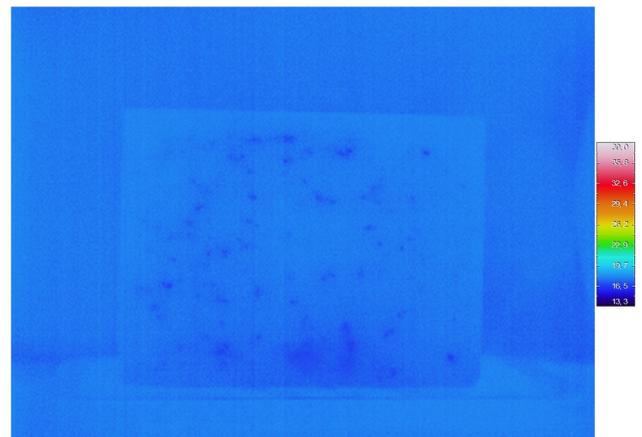
P1.S1.09 – Fase de secagem (04:30h)



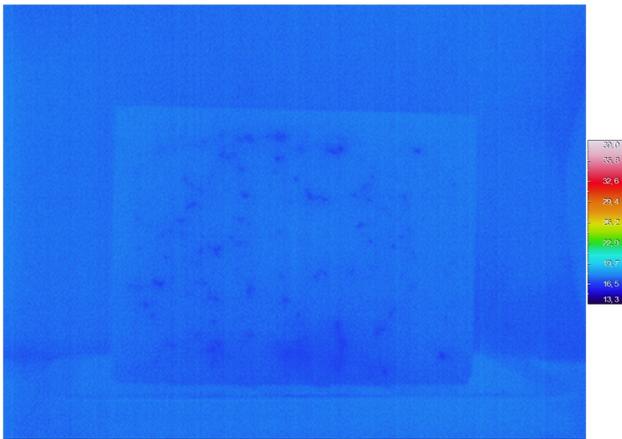
P1.S1.10 – Fase de secagem (05:00h)



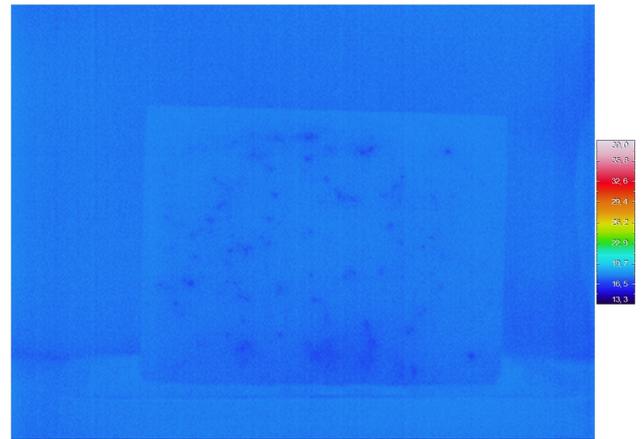
P1.S1.11 – Fase de secagem (05:30h)



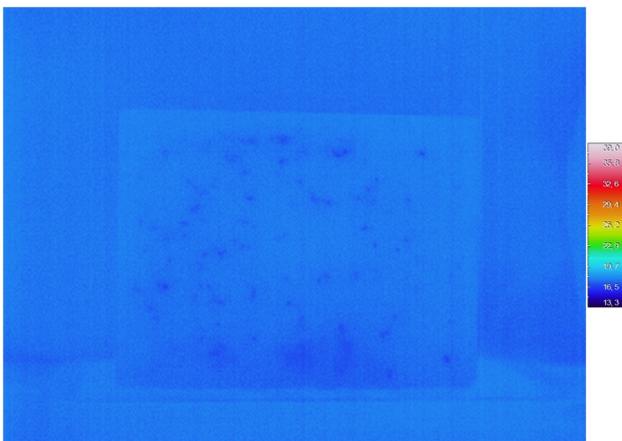
P1.S1.12 – Fase de secagem (06:00h)



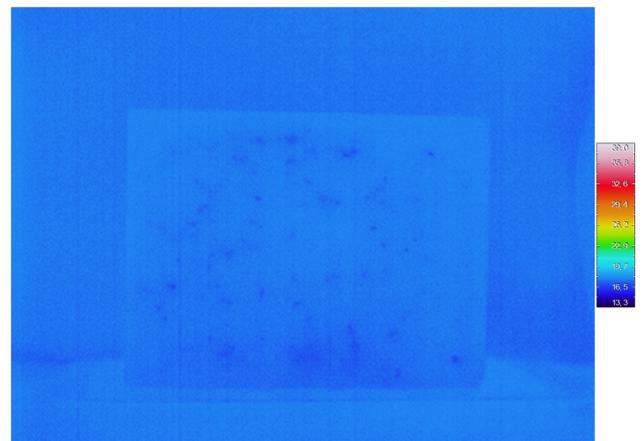
P1.S1.13 – Fase de secagem (06:30h)



P1.S1.14 – Fase de secagem (07:00h)



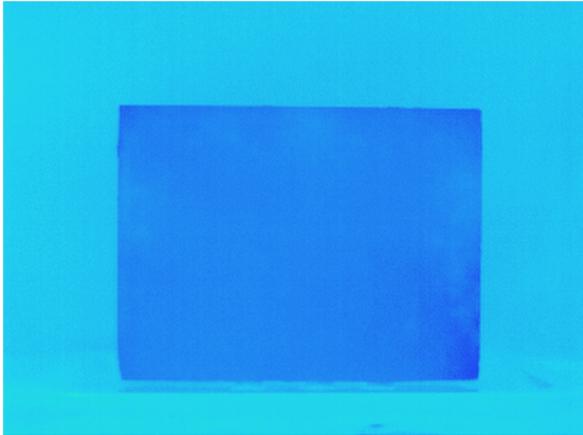
P1.S1.13 – Fase de secagem (07:30h)



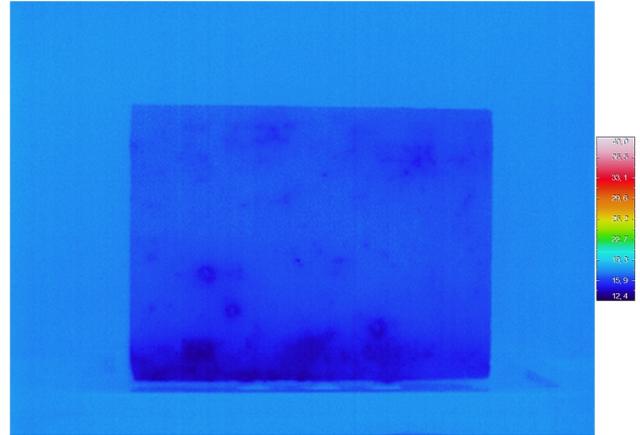
P1.S1.14 – Fase de secagem (08:00h)

## Ensaio II.3B

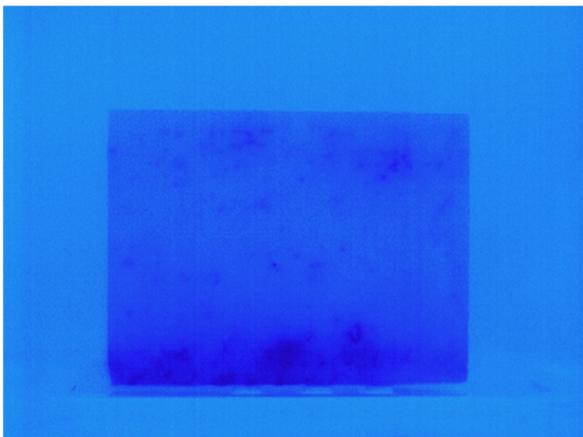
### Ciclo de Secagem



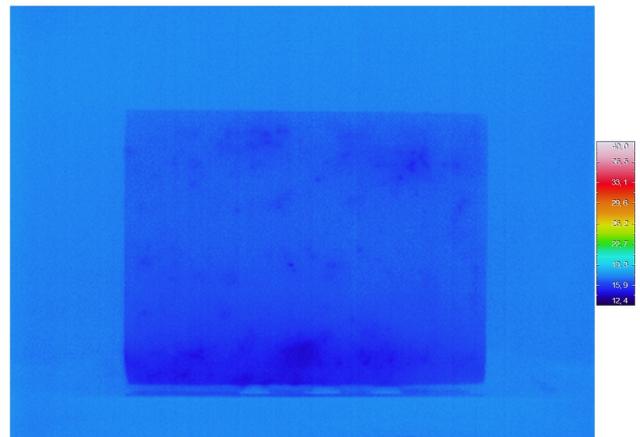
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



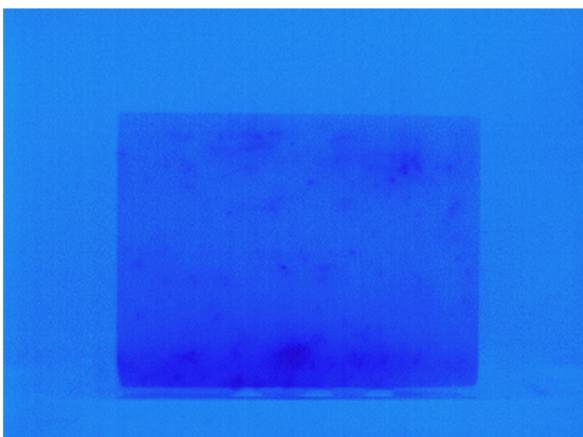
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



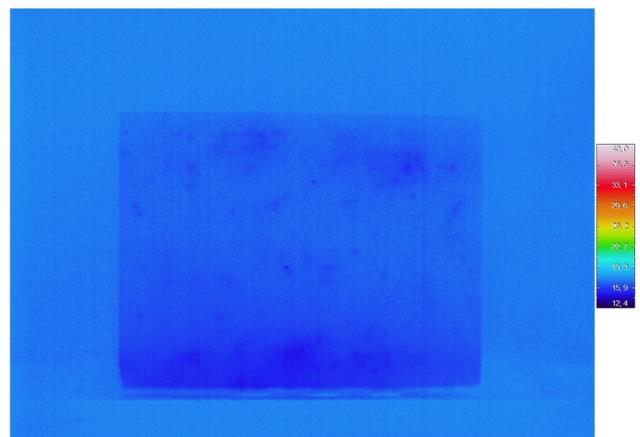
P1.S1.03 – Fase de secagem (01:30h)



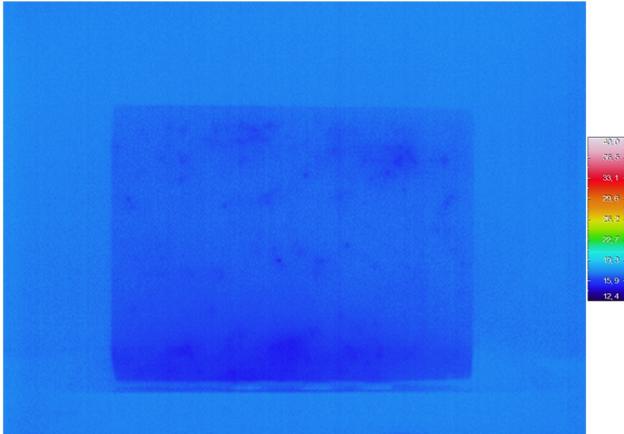
P1.S1.04 – Fase de secagem (02:00h)



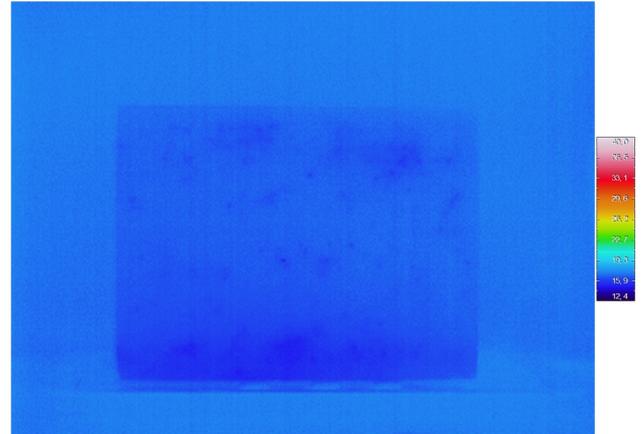
P1.S1.05 – Fase de secagem (02:30h)



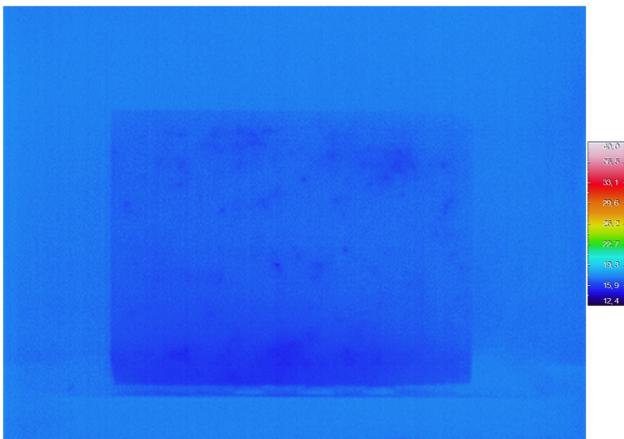
P1.S1.06 – Fase de secagem (03:00h)



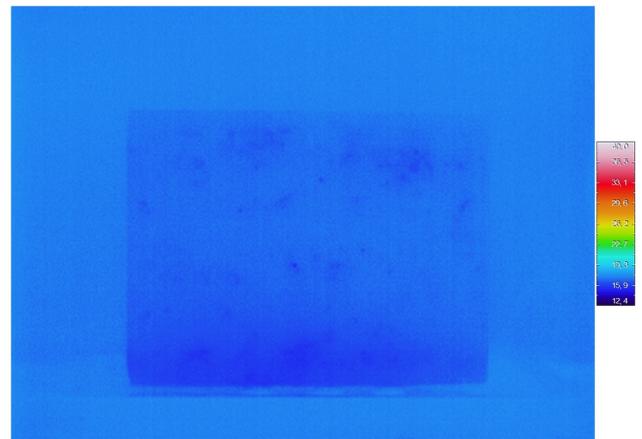
P1.S1.07 – Fase de secagem (03:30h)



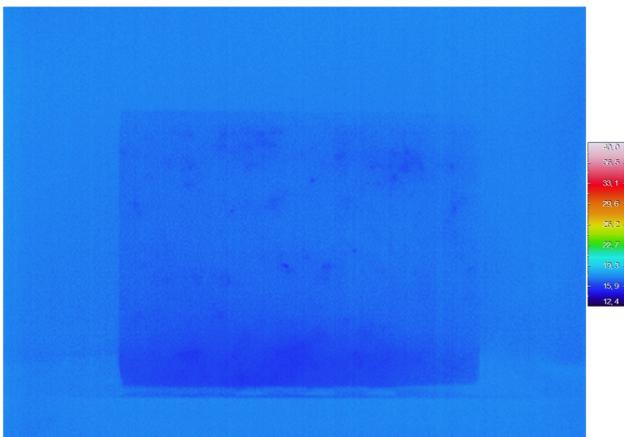
P1.S1.08 – Fase de secagem (04:00h)



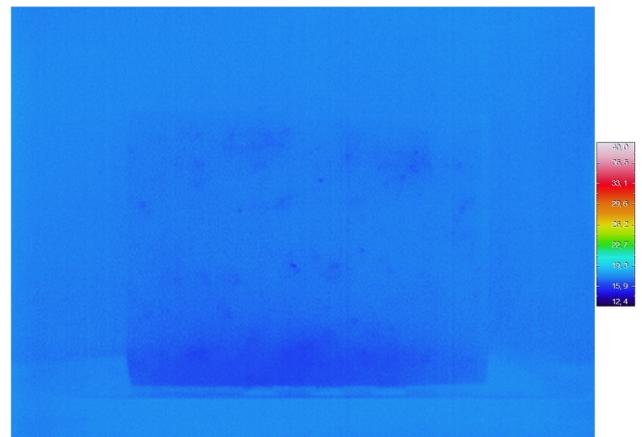
P1.S1.09 – Fase de secagem (04:30h)



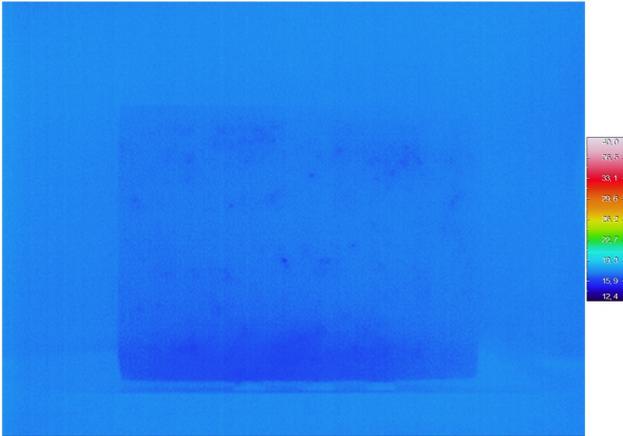
P1.S1.10 – Fase de secagem (05:00h)



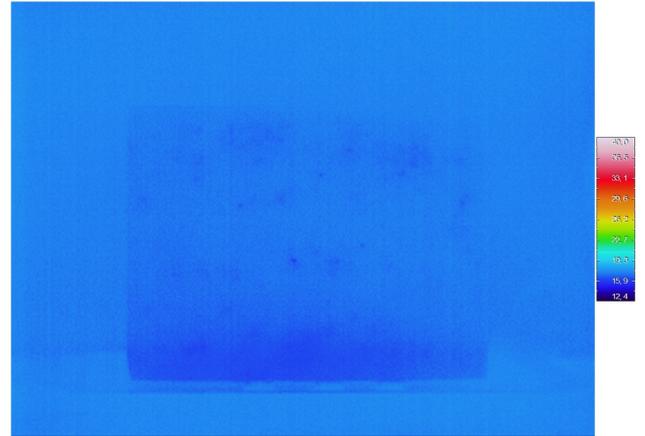
P1.S1.11 – Fase de secagem (05:30h)



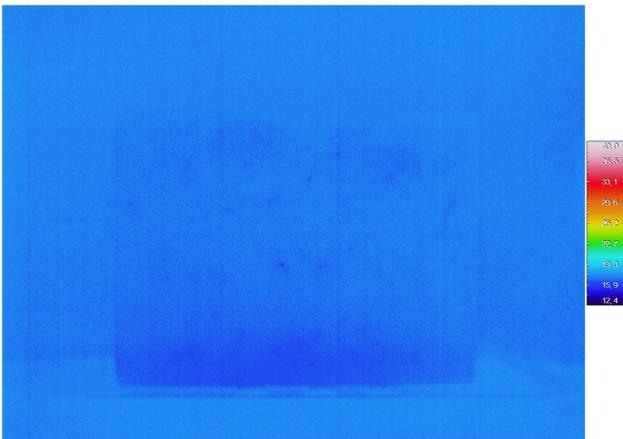
P1.S1.12 – Fase de secagem (06:00h)



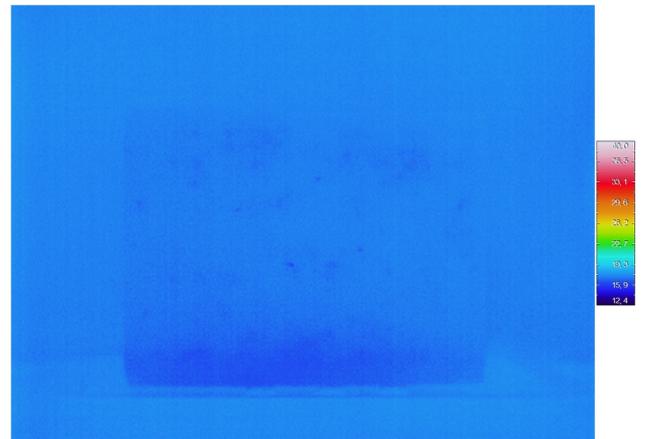
P1.S1.13 – Fase de secagem (06:30h)



P1.S1.14 – Fase de secagem (07:00h)



P1.S1.13 – Fase de secagem (07:30h)

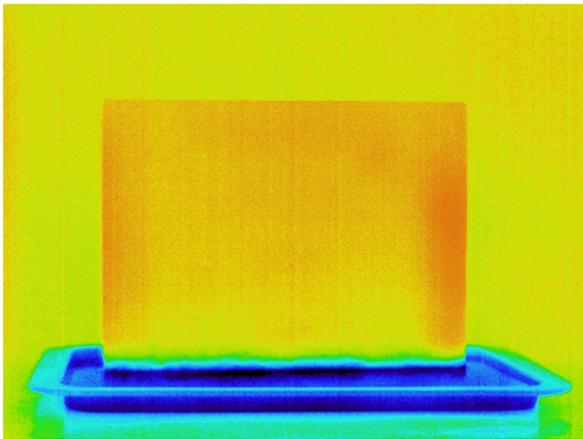


P1.S1.14 – Fase de secagem (08:00h)

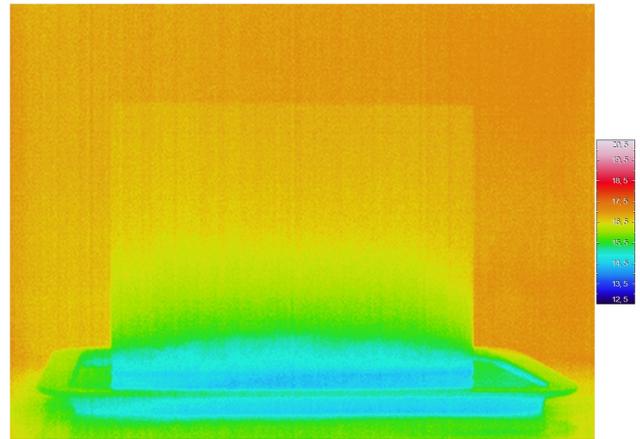
## Variante III – Ponto de secagem inicial

### Ensaio III.2

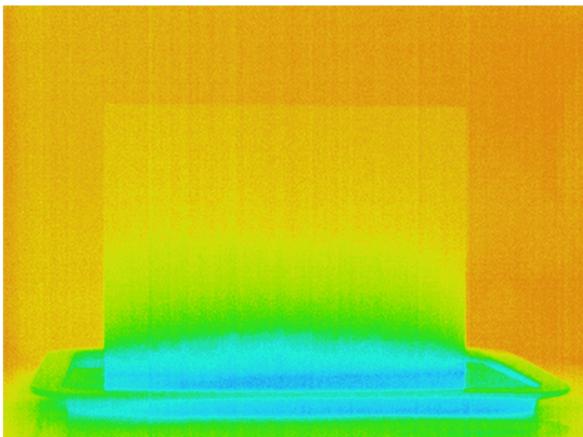
#### Ciclo de Humificação



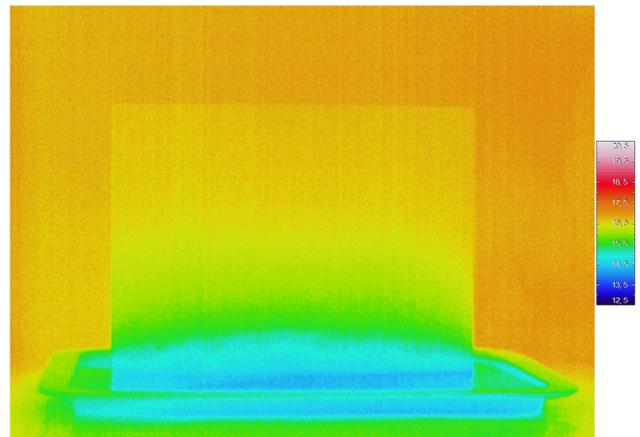
P1.H1.01 – Fase de humificação (00:30h)



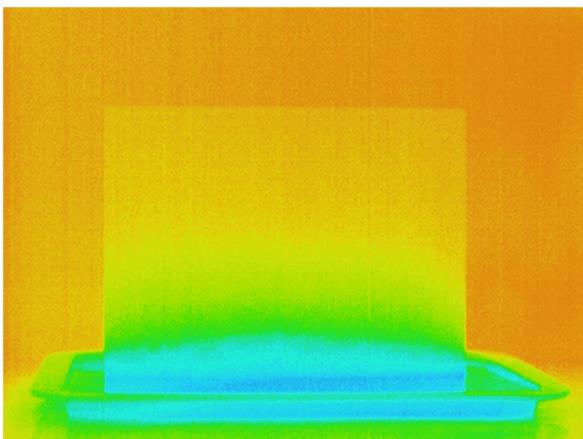
P1.H1.02 – Fase de humificação (02:00h)



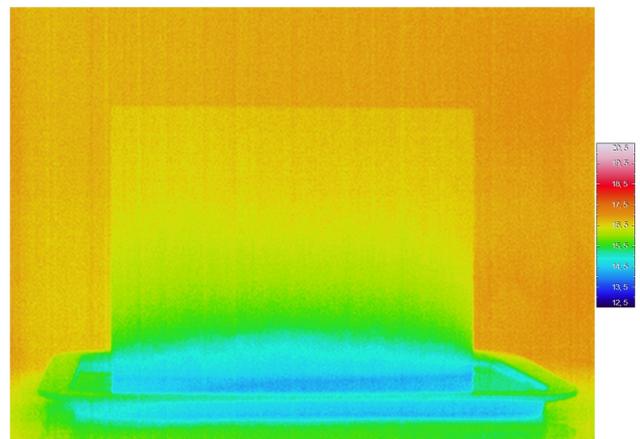
P1.H1.03 – Fase de humificação (04:00h)



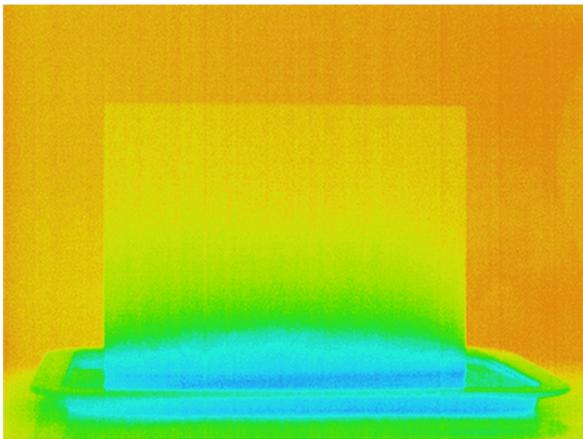
P1.H1.04 – Fase de humificação (06:00h)



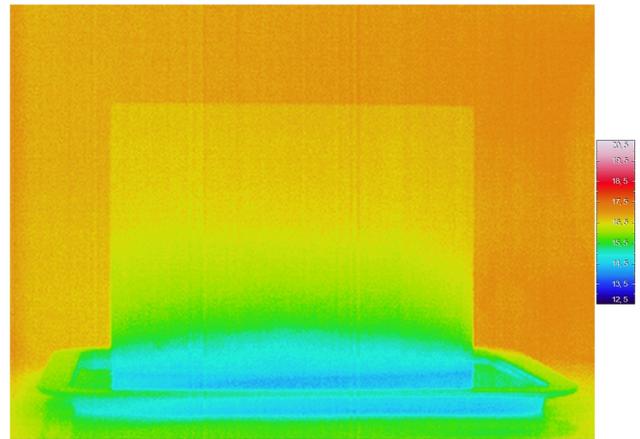
P1.H1.05 – Fase de humificação (08:00h)



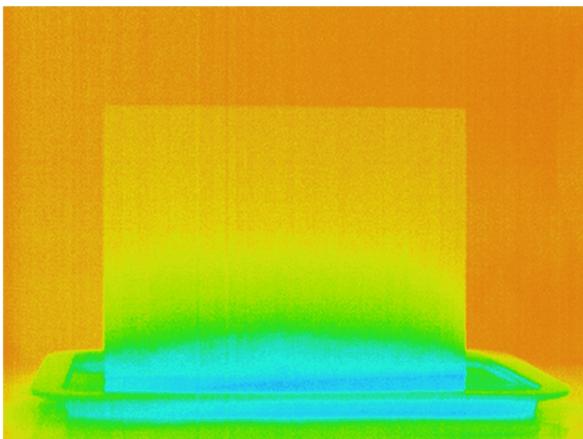
P1.H1.06 – Fase de humificação (10:00h)



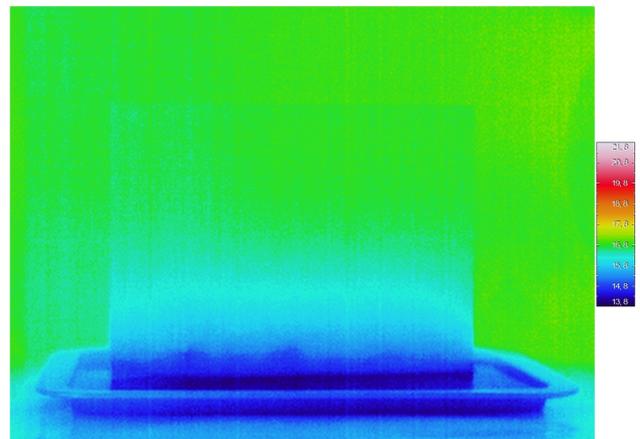
P1.H1.07 – Fase de humificação (12:00h)



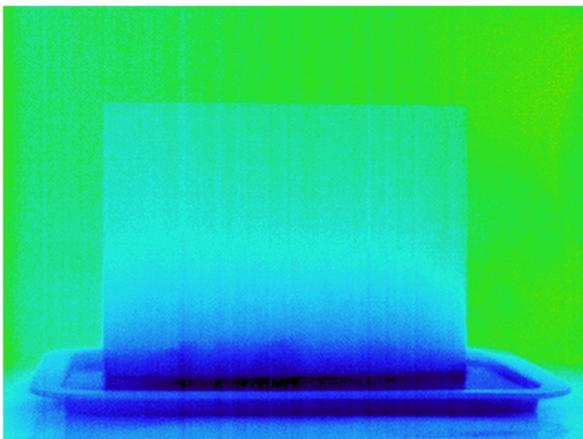
P1.H1.08 – Fase de humificação (14:00h)



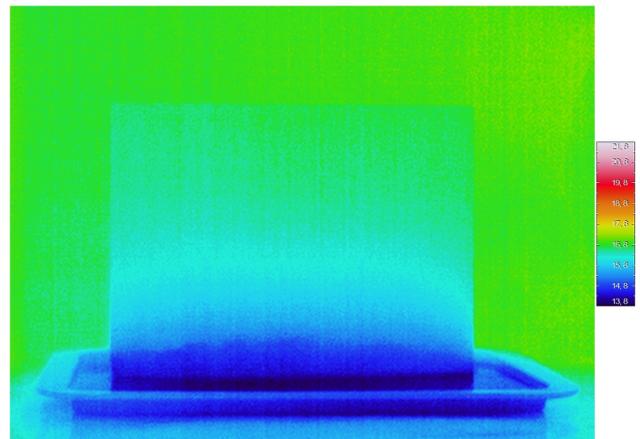
P1.H1.09 – Fase de humificação (16:00h)



P1.H1.10 – Fase de humificação (18:00h)

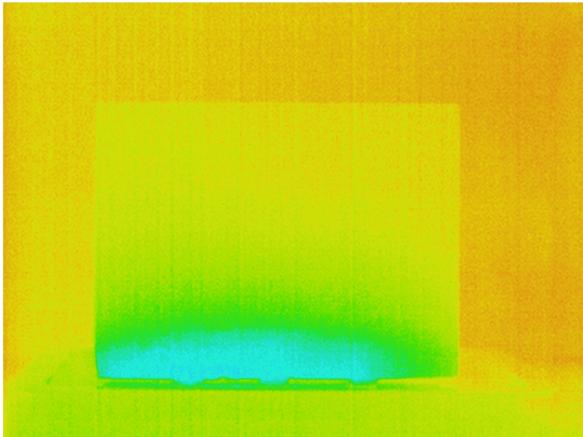


P1.H1.11 – Fase de humificação (20:00h)

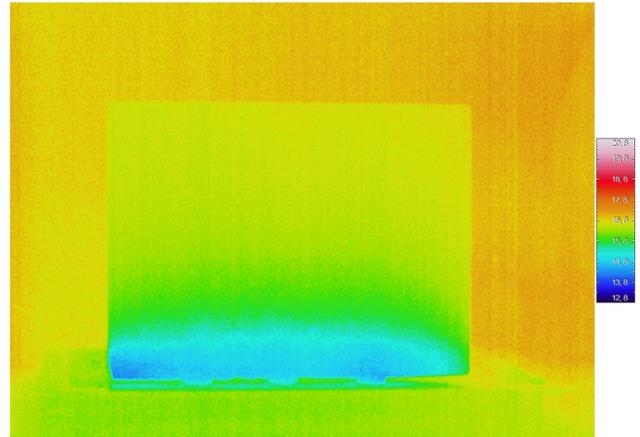


P1.H1.11 – Fase de humificação (24:00h)

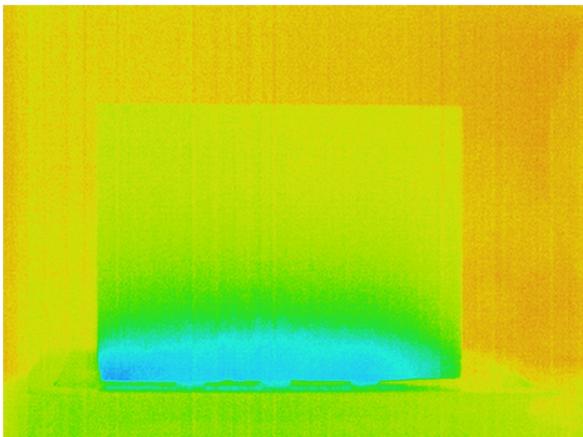
## Ciclo de Secagem



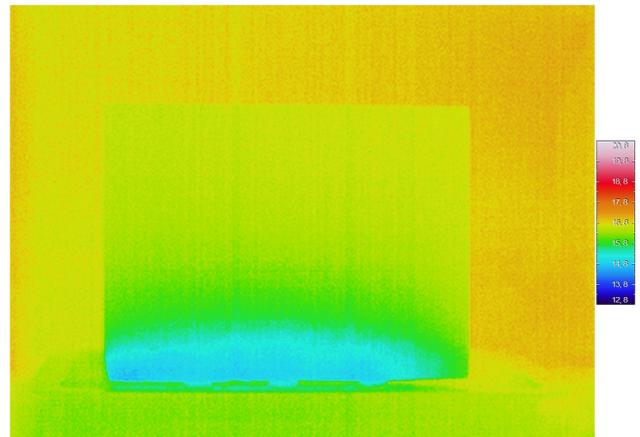
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



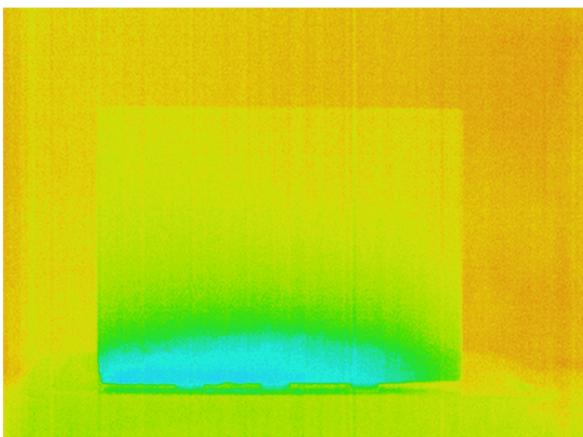
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



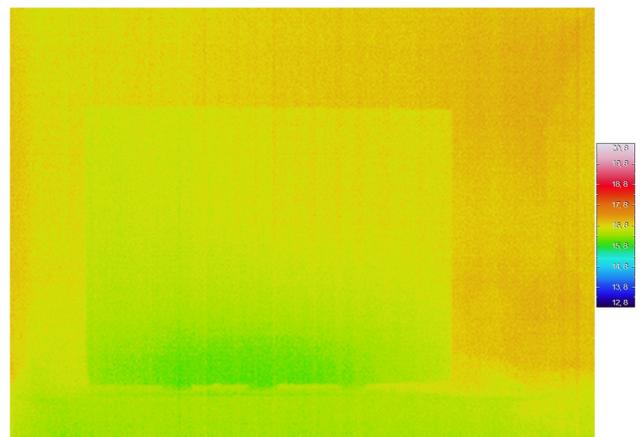
P1.S1.03 – Fase de secagem (02:00h)



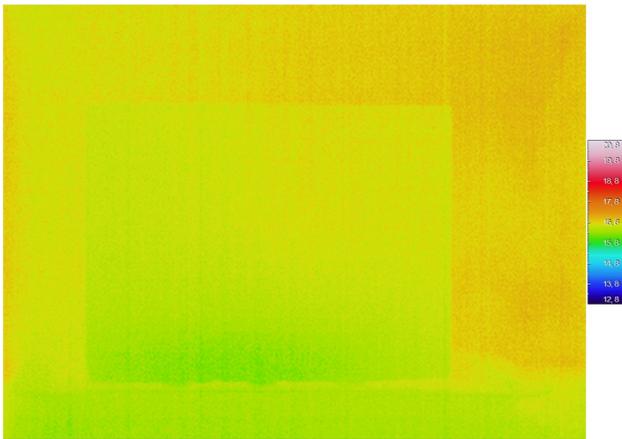
P1.S1.04 – Fase de secagem (03:00h)



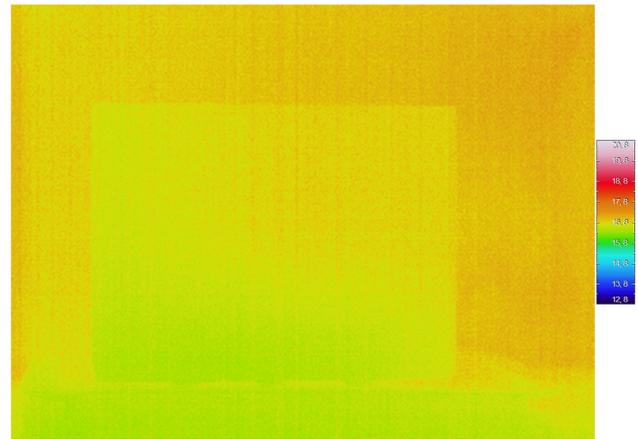
P1.S1.05 – Fase de secagem (04:00h)



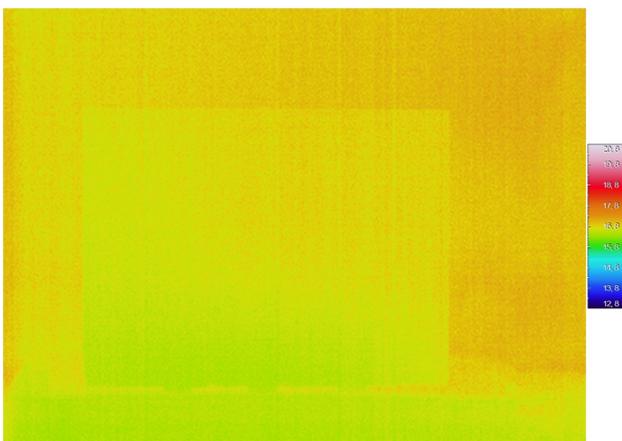
P1.S1.06 – Fase de secagem (05:00h)



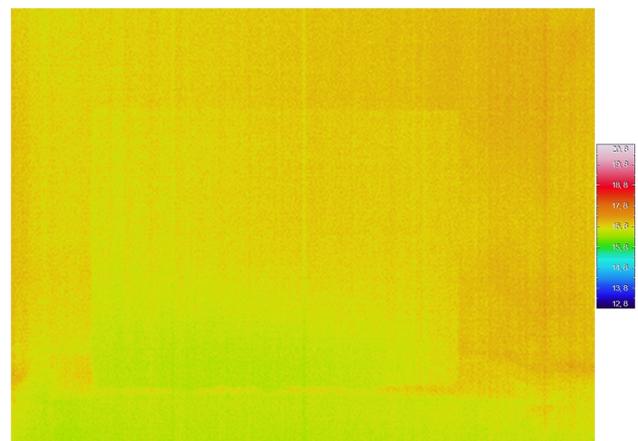
P1.S1.07 – Fase de secagem (06:00h)



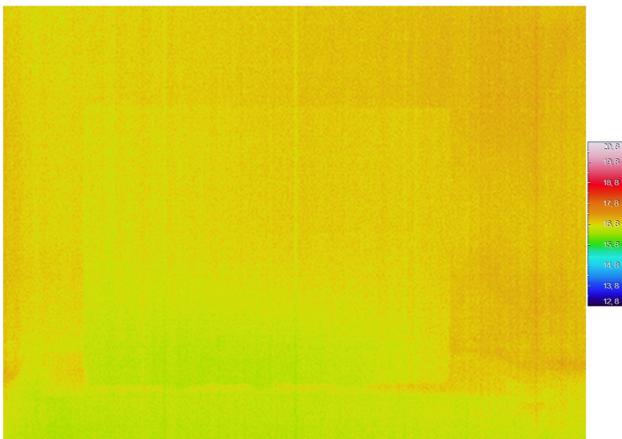
P1.S1.08 – Fase de secagem (24:00h)



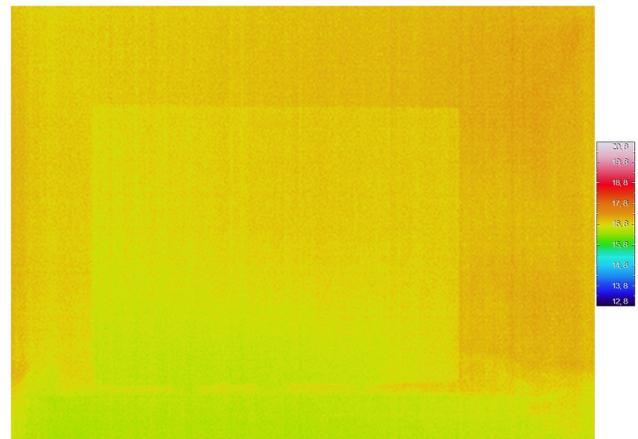
P1.S1.09 – Fase de secagem (27:00h)



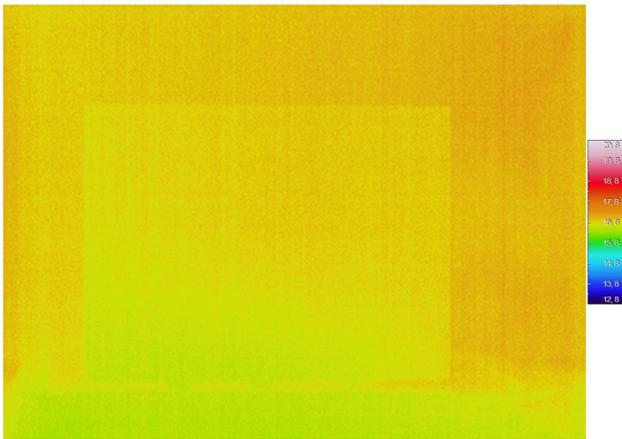
P1.S1.10 – Fase de secagem (30:00h)



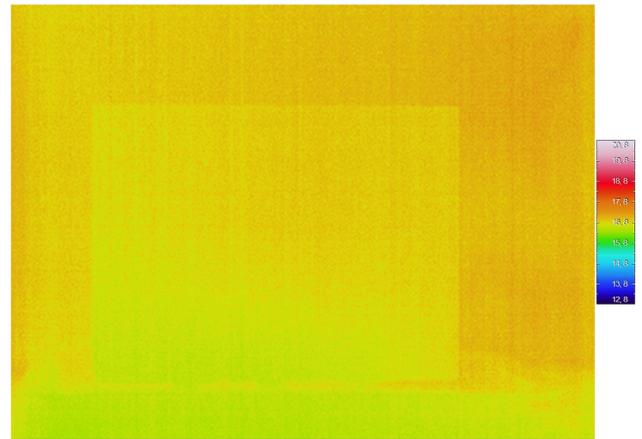
P1.S1.11 – Fase de secagem (48:00h)



P1.S1.12 – Fase de secagem (51:00h)



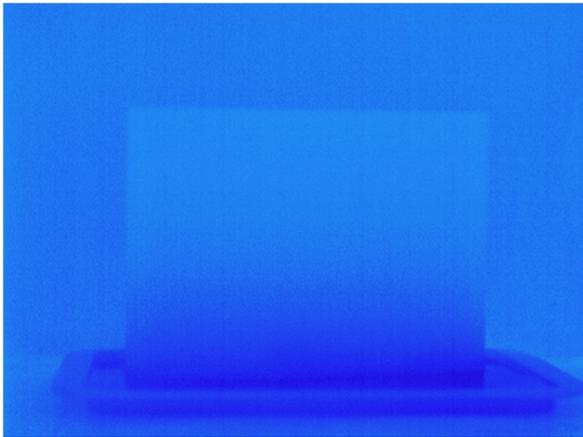
P1.S1.13 – Fase de secagem (54:00h)



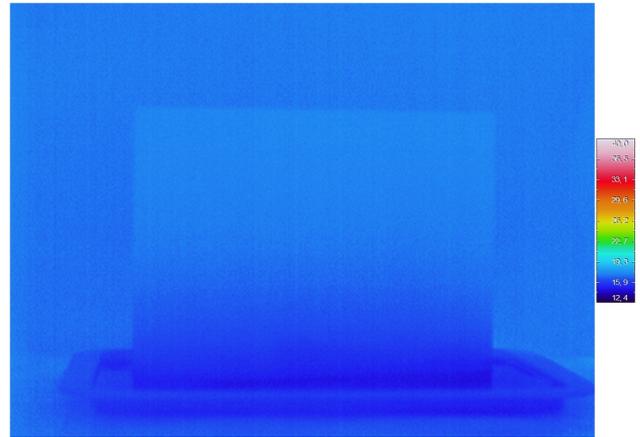
P1.S1.14 – Fase de secagem (72:00h)

## Ensaio III.3

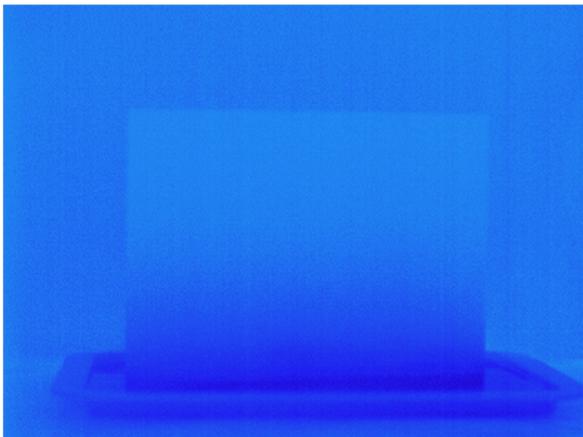
### Ciclo de Humificação



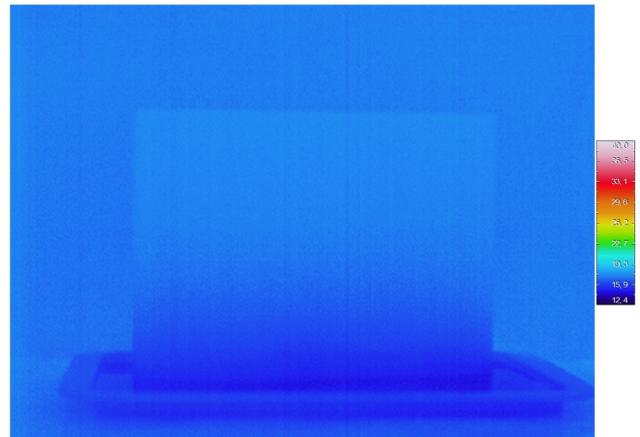
P1.H1.01 – Fase de humificação (00:30h)



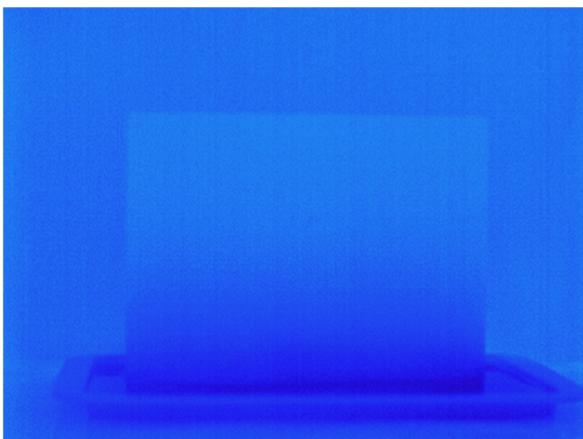
P1.H1.02 – Fase de humificação (02:00h)



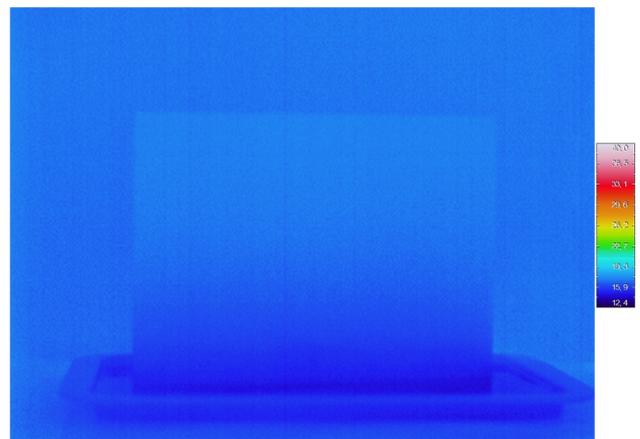
P1.H1.03 – Fase de humificação (04:00h)



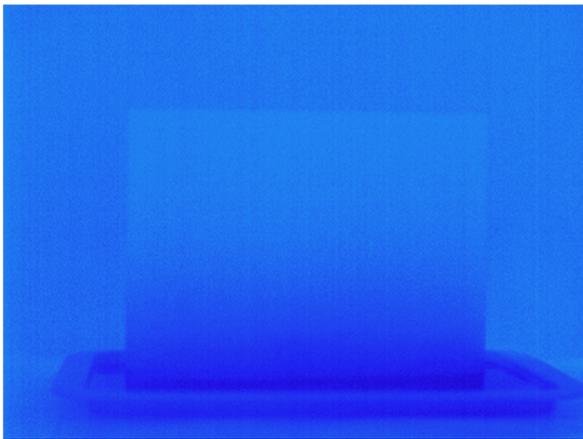
P1.H1.04 – Fase de humificação (06:00h)



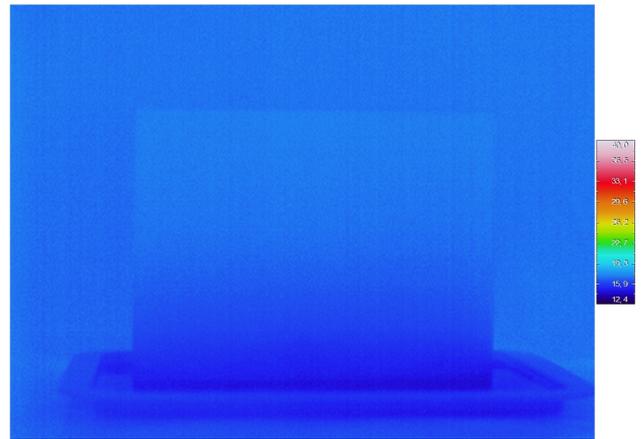
P1.H1.05 – Fase de humificação (08:00h)



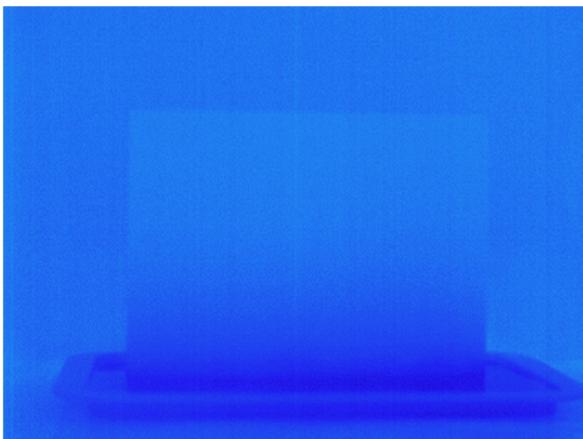
P1.H1.06 – Fase de humificação (10:00h)



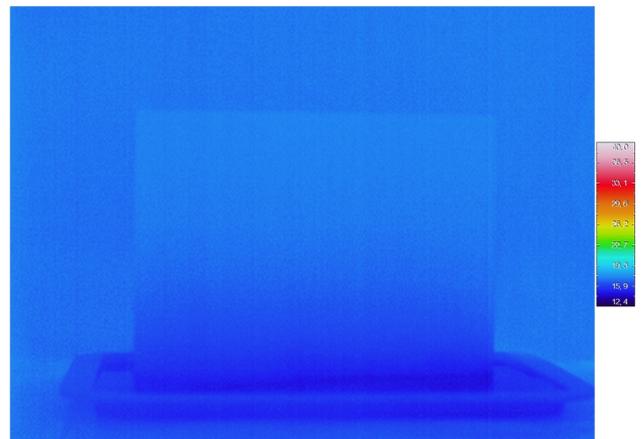
P1.H1.07 – Fase de humificação (12:00h)



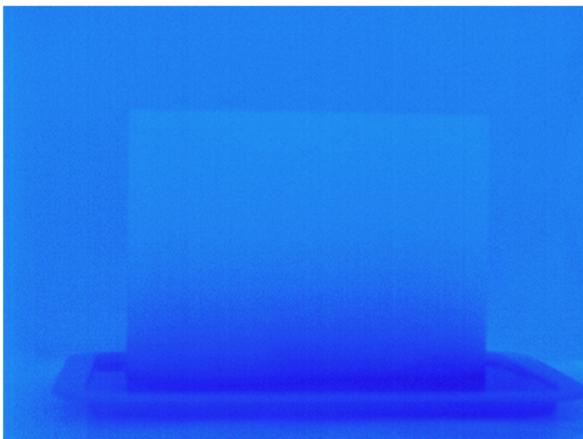
P1.H1.08 – Fase de humificação (14:00h)



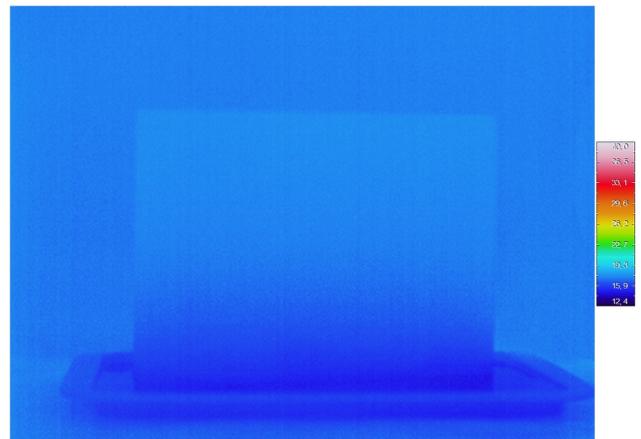
P1.H1.09 – Fase de humificação (16:00h)



P1.H1.10 – Fase de humificação (18:00h)

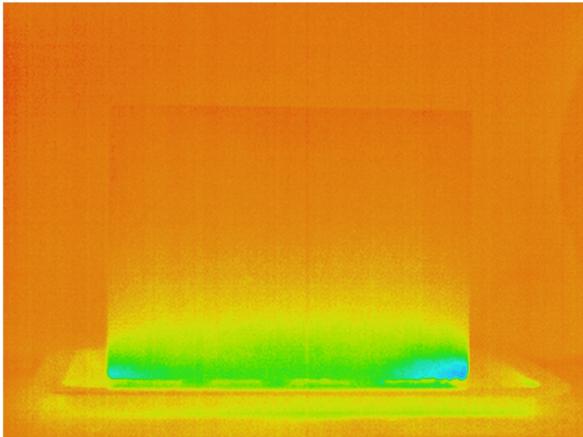


P1.H1.11 – Fase de humificação (20:00h)

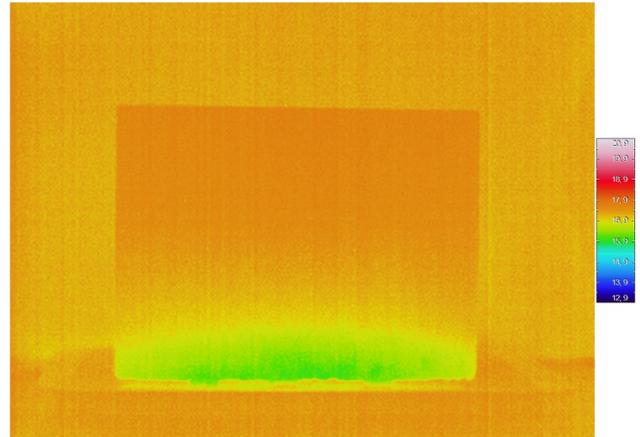


P1.H1.11 – Fase de humificação (24:00h)

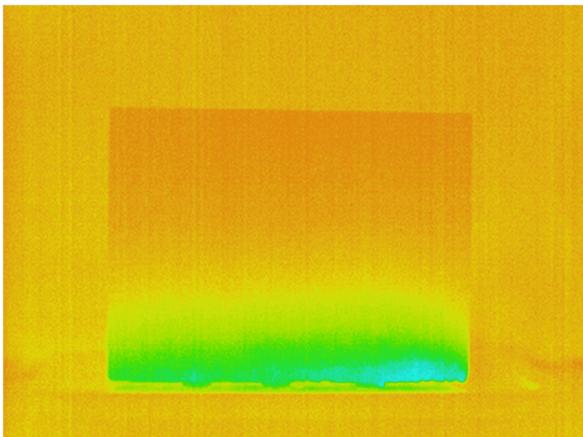
## Ciclo de Secagem



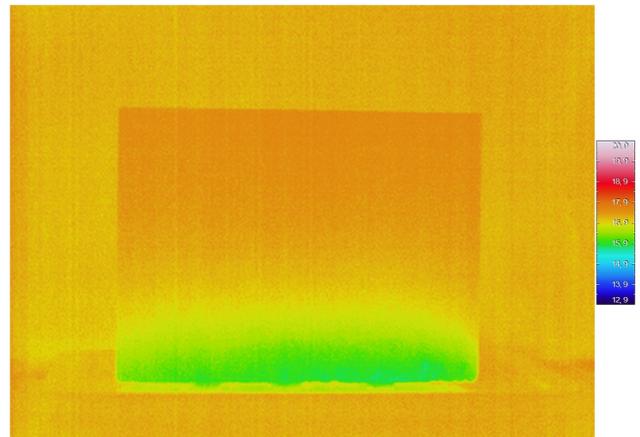
P1.S1.01 – Fase de secagem (00:30h)



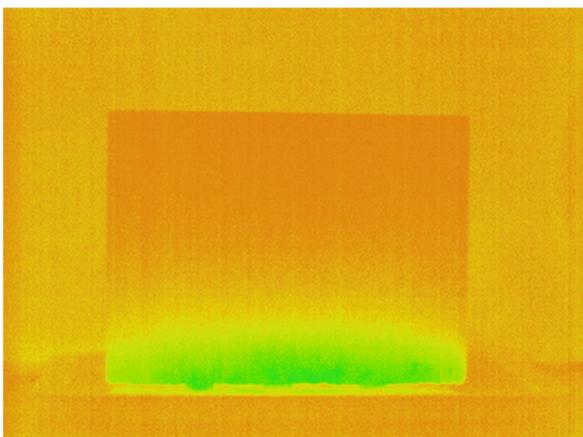
P1.S1.02 – Fase de secagem (01:00h)



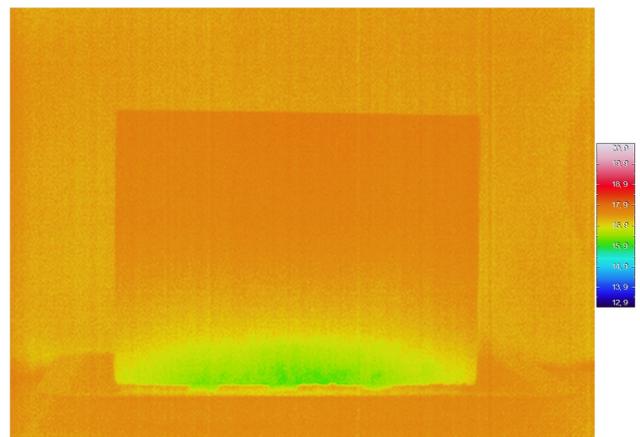
P1.S1.03 – Fase de secagem (02:00h)



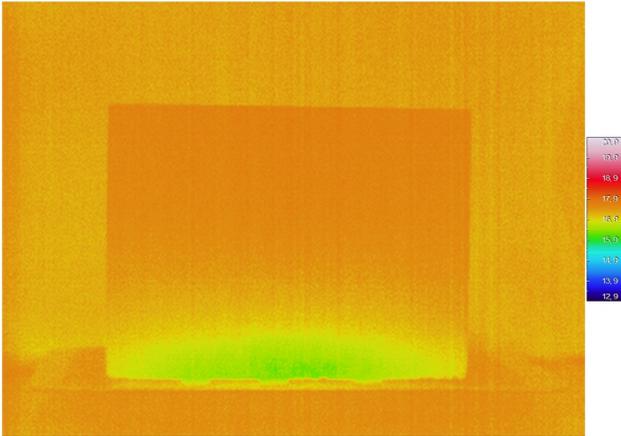
P1.S1.04 – Fase de secagem (03:00h)



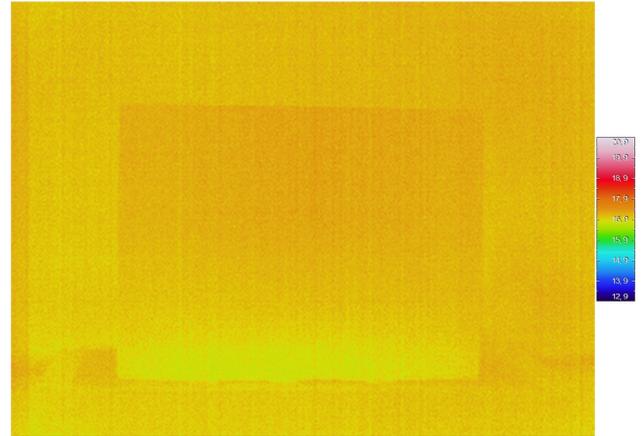
P1.S1.05 – Fase de secagem (04:00h)



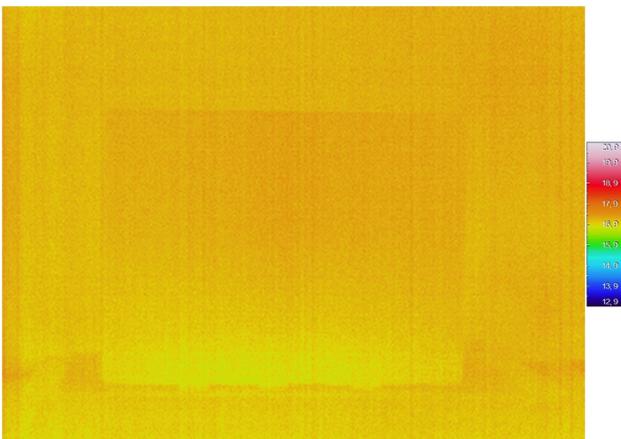
P1.S1.06 – Fase de secagem (05:00h)



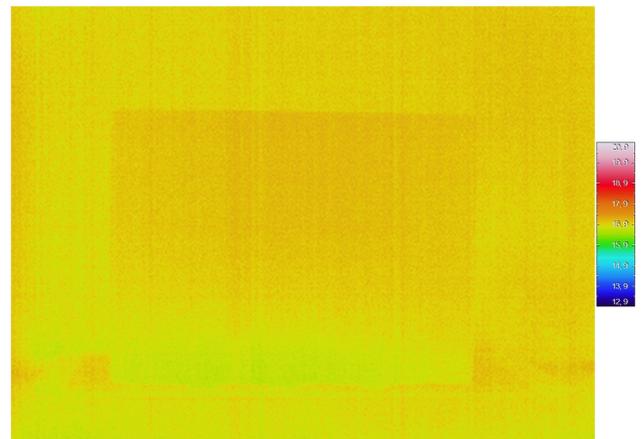
P1.S1.07 – Fase de secagem (06:00h)



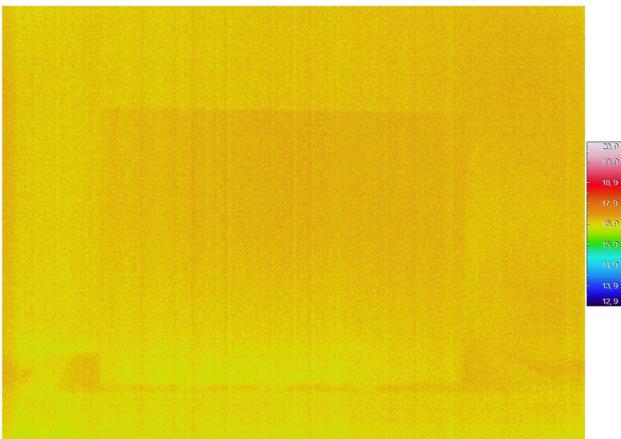
P1.S1.08 – Fase de secagem (24:00h)



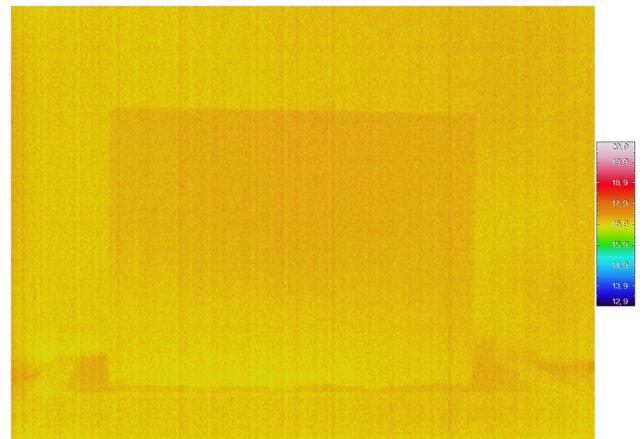
P1.S1.09 – Fase de secagem (27:00h)



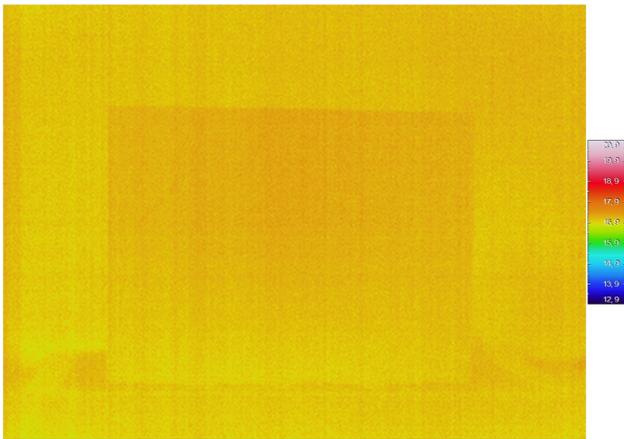
P1.S1.10 – Fase de secagem (30:00h)



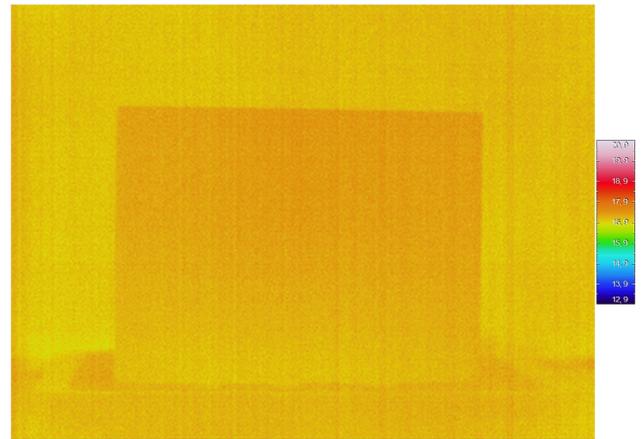
P1.S1.11 – Fase de secagem (48:00h)



P1.S1.12 – Fase de secagem (51:00h)



P1.S1.13 – Fase de secagem (54:00h)



P1.S1.14 – Fase de secagem (72:00h)