



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS  
Núcleo de Revestimentos e Isolamentos

Proc. 0803/14/15139

# **ENSAIOS DE CAPILARIDADE E ANÁLISE TERMOGRÁFICA PARA VISUALIZAÇÃO DA SECAGEM DE UM MURETE DE ALVENARIA DE PEDRA**

(PROJECTO FCT N.º POCTI/ECM/46323/2002)

Lisboa • Janeiro de 2007

**I&D** EDIFÍCIOS

**RELATÓRIO 22/2007 – NRI**



**ENSAIO DE CAPILARIDADE E ANÁLISE TERMOGRÁFICA  
PARA VISUALIZAÇÃO DA SECAGEM  
DE UM MURETE DE ALVENARIA DE PEDRA**  
(Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002)

**RESUMO**

A termografia é um método de análise que permite obter uma imagem da distribuição aproximada da temperatura de um objecto, sem contacto físico com este.

No domínio dos edifícios as utilizações mais habituais da análise termográfica visam a avaliação da qualidade térmica da envolvente e a detecção de pontos de exfiltração ou de infiltração de ar através dessa envolvente.

A presença de humidade, sob a forma de vapor ou de água líquida, é a causa de diversas anomalias e degradações ocorridas nos elementos de construção.

A detecção da humidade nos elementos de construção é realizada por métodos quer destrutivos quer não-destrutivos.

Devido às diferenças de temperatura que se originam nos processos de humidificação e de secagem dos materiais, e que podem ser detectadas com o equipamento de termografia, este método pode revelar-se um interessante método não-destrutivo, embora a interacção de diversos fenómenos possa dificultar a sua utilização *in situ*.

Em anteriores estudos efectuados sobre provetes de um bloco de betão celular autoclavado e de parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado foram analisadas as heterogeneidades térmicas criadas por fenómenos evaporativos subsequentes à absorção por capilaridade de quantidades significativas de água. Face aos interessantes resultados obtidos nesses estudos, posteriormente, aplicou-se a análise termográfica à detecção da absorção de água e da respectiva secagem numa parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida à escala real.

No âmbito do presente estudo em curso de “*Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas*” (Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002), para além de estudos *in situ*, retomaram-se os ensaios realizados em laboratório com o objectivo de desenvolver uma metodologia adequada de análise termográfica para a avaliação da presença e distribuição de humidade em paredes antigas, de alvenaria irregular de pedra.

O presente estudo enquadra-se no âmbito dos métodos passivos, com a particularidade de as heterogeneidades térmicas observadas na superfície do objecto em causa serem sobretudo devidas a fenómenos evaporativos que ocorrem, quer no seu interior quer na sua superfície.

Com essa finalidade construiu-se uma maqueta à escala reduzida de uma parede de alvenaria irregular de pedra assente com argamassa de cal, a qual foi submetida a um ensaio de absorção de água por capilaridade.

Durante o ensaio de capilaridade, e subsequente período de secagem até retorno à massa inicial, a maqueta foi objecto de observações visuais e termográficas (durante a fase de secagem). Complementarmente a estas observações, e de modo a apoiar a interpretação dos resultados das análises realizadas, procedeu-se a uma caracterização prévia dos elementos constituintes – argamassa de cal e areia e pedra calcária – da maqueta, e à pesagem regular da maqueta.

**CAPILLARITY TEST AND THERMOGRAPHIC ANALYSIS  
FOR THE VISUALISATION OF DRYING  
OF A STONE MASONRY TEST SPECIMEN**

**ESSAI DE CAPILLARITÉ ET ANALYSE THERMOGRAPHIQUE  
POUR LA VISUALISATION DU SÉCHAGE  
D'UN ÉCHANTILLON D'UN MUR EN PIERRE**

**ENSAIO DE CAPILARIDADE E ANÁLISE TERMOGRÁFICA  
PARA VISUALIZAÇÃO DA SECAGEM  
DE UM MURETE DE ALVENARIA DE PEDRA**  
(Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002)

**ÍNDICE DO TEXTO**

	<b>Pág.</b>
1 – INTRODUÇÃO .....	1
2 – ESTUDO REALIZADO .....	7
2.1 – Maqueta de ensaio .....	7
2.1.1 – Descrição geral.....	7
2.1.2 – Características dos elementos constituintes .....	8
2.2 – Desenvolvimento do estudo.....	10
2.3 – Medições e observações efectuadas.....	12
3 – CONCLUSÕES .....	20
BIBLIOGRAFIA .....	23

**ENSAIO DE CAPILARIDADE E ANÁLISE TERMOGRÁFICA  
PARA VISUALIZAÇÃO DA SECAGEM  
DE UM MURETE DE ALVENARIA DE PEDRA**  
(Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002)

**ÍNDICE DE QUADROS**

	<b>Pág.</b>
<b>Quadro 1</b> – Principais características da pedra calcária e da argamassa de cal.....	8
<b>Quadro 2</b> – Valores da altura de ascensão capilar e da massa de água absorvida determinados durante o ensaio de capilaridade da maqueta.....	15

**ÍNDICE DE FIGURAS**

FIGURAS DO TEXTO

	<b>Pág.</b>
<b>Fig. 1</b> – Aspecto de um provete de betão celular autoclavado durante a fase de imersão parcial.....	4
<b>Fig. 2</b> – Aspecto de um provete de alvenaria de tijolo cerâmico durante a fase de imersão parcial.....	4
<b>Fig. 3</b> – Aspecto de uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida.....	5
<b>Fig. 4</b> – Maqueta de alvenaria de pedra irregular .....	7
<b>Fig. 5</b> – Ensaio de absorção de água por capilaridade de provetes da pedra calcária .....	9
<b>Fig. 6</b> – Absorção capilar e secagem dos provetes de pedra e de argamassa .....	9
<b>Fig. 7</b> – Aspecto da maqueta de alvenaria durante a fase de imersão parcial .....	11
<b>Fig. 8</b> – Equipamento de termografia .....	12
<b>Fig. 9</b> – Gráfico da variação de massa da maqueta durante as fases de absorção capilar e de secagem.....	13
<b>Fig. 10</b> – Evolução da temperatura e da humidade ambientes da nave de ensaios durante o ensaio da maqueta .....	14
<b>Fig. 11</b> – Ensaio de capilaridade da maqueta. Tempo vs. Ascensão capilar .....	16
<b>Fig. 12</b> – Ensaio de capilaridade da maqueta. Ascensão capilar vs. Água absorvida.....	17
<b>Fig. 13</b> – Aspecto da relação entre as observações visuais e termográficas .....	18
<b>Fig. 14</b> – Aspecto das heterogeneidades (físicas e térmicas) na zona inferior molhada.....	19

## FIGURAS DO ANEXO I

	Pág.
<b>Fig. I.1</b> – Fotografia e termograma da maqueta no início do período de secagem (t = <b>648 h</b> ) .....	I.3
<b>Fig. I.2</b> – Termograma da maqueta após <b>672 h</b> de ensaio.....	I.3
<b>Fig. I.3</b> – Termograma da maqueta após <b>696 h</b> de ensaio.....	I.4
<b>Fig. I.4</b> – Fotografia e termograma da maqueta após <b>744 h</b> de ensaio.....	I.4
<b>Fig. I.5</b> – Termograma da maqueta após <b>816 h</b> de ensaio.....	I.5
<b>Fig. I.6</b> – Fotografia e termograma da maqueta após <b>888 h</b> de ensaio.....	I.5
<b>Fig. I.7</b> – Fotografia e termograma da maqueta após <b>1008 h</b> de ensaio.....	I.6
<b>Fig. I.8</b> – Termograma da maqueta após <b>1032 h</b> de ensaio.....	I.6
<b>Fig. I.9</b> – Termograma da maqueta após <b>1056 h</b> de ensaio.....	I.7
<b>Fig. I.10</b> – Termograma da maqueta após <b>1080 h</b> de ensaio.....	I.7
<b>Fig. I.11</b> – Termograma da maqueta após <b>1152 h</b> de ensaio.....	I.8
<b>Fig. I.12</b> – Termograma da maqueta após <b>1225 h</b> de ensaio.....	I.8
<b>Fig. I.13</b> – Termograma da maqueta após <b>1240 h</b> de ensaio.....	I.9



**ENSAIO DE CAPILARIDADE E ANÁLISE TERMOGRÁFICA  
PARA VISUALIZAÇÃO DA SECAGEM  
DE UM MURETE DE ALVENARIA DE PEDRA**  
(Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002)

## **1 – INTRODUÇÃO**

No âmbito do presente estudo em curso de “*Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas*” (Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002) [1] retomaram-se os ensaios realizados em laboratório com o objectivo de desenvolver uma metodologia adequada de análise termográfica para a avaliação da presença e distribuição de humidade em paredes antigas, de alvenaria irregular de pedra.

A termografia é um método de análise que permite obter uma imagem da distribuição aproximada da temperatura de um objecto, sem contacto físico com este.

Na realidade o equipamento de termografia não mede directamente a temperatura, pois está concebido para medir a radiação térmica, na gama dos infravermelhos, emitida e reflectida pela superfície dos objectos. No caso do equipamento utilizado no presente estudo a medição é feita na gama do infravermelho intermédio (3 a 5,4  $\mu$ m).

A temperaturas acima de 0 K todos os corpos emitem radiação, cujas intensidade e distribuição espectral dependem de vários factores, nomeadamente das respectivas temperatura absoluta e emitância,  $\epsilon$ , da superfície.

As superfícies correntes são igualmente caracterizadas por não absorverem ou transmitirem toda a radiação infravermelha que incide sobre elas. A fracção reflectida depende da reflectância,  $\rho$ , da superfície, a qual pode variar entre 5%, caso dos materiais correntes, e 95%, caso de algumas superfícies metálicas ou metalizadas polidas.

A quantidade de energia reflectida dependerá portanto da reflectância da superfície e da energia incidente sobre ela. No caso dos materiais opacos correntes ( $\rho > 0,85$ ,  $\epsilon < 0,15$ ) cuja temperatura seja idêntica às temperaturas ambiente e das superfícies próximas e envolventes, a importância da energia reflectida é pouco significativa em termos da energia total (soma das componentes emitida e reflectida) detectada por uma câmara termográfica.

A partir da medição da energia total e do conhecimento da emitância da superfície em observação, e recorrendo à curva de calibração da própria câmara é possível criar uma

imagem (vídeo, fotográfica ou impressa) da distribuição das temperaturas do objecto. Esta imagem, que se denomina **termograma**, representa quer as diferenças relativas entre as temperaturas registadas em diferentes pontos da superfície do objecto quer, recorrendo a uma calibração adequada, as temperaturas reais desses pontos.

No domínio dos edifícios as utilizações mais habituais da análise termográfica visam a avaliação da qualidade térmica da envolvente e a detecção de pontos de exfiltração ou de infiltração de ar através dessa envolvente [1, 2, 3, 4].

Para se proceder à realização deste tipo de intervenções adoptam-se procedimentos passivos ou activos. Os métodos passivos tiram partido da diferença de temperatura existente entre os ambientes interior e exterior, a qual dá origem a um fluxo térmico através da envolvente. A intensidade deste fluxo é proporcional à diferença de temperatura entre ambientes (a qual, para efeitos de realização de análises termográficas, normalmente se recomenda que seja superior a 10 C) e à resistência térmica dessa envolvente. Em algumas circunstâncias particulares pode-se ainda tirar partido da radiação solar incidente numa superfície exposta.

Nos métodos activos, recorre-se ao aquecimento do elemento em análise por acção de um fluxo térmico imposto artificialmente, quer recorrendo a lâmpadas ou outros dispositivos emissores de forte radiação térmica quer ao aquecimento convectivo, em geral mais heterogéneo, da superfície a analisar. As interações registadas, o aquecimento não-uniforme da superfície e as características do elemento irradiado são factores que obrigam à adopção de precauções e de procedimentos particulares na utilização dos métodos activos.

Como se verá adiante (vd. 2), o presente estudo enquadra-se no âmbito dos métodos passivos, com a particularidade de as heterogeneidades térmicas observadas na superfície do objecto em causa serem sobretudo devidas a fenómenos evaporativos que ocorrem, quer no seu interior quer na sua superfície.

A presença de humidade, sob a forma de vapor ou de água líquida, é a causa de diversas anomalias e degradações ocorridas nos elementos de construção.

A sua presença pode aumentar significativamente a condutibilidade térmica dos materiais com a consequente redução da resistência térmica dos elementos em que se integram. Esta redução é com frequência a causa de heterogeneidades significativas registadas nas temperaturas superficiais e de agravamentos das trocas térmicas entre os ambientes interior e exterior.

A presença e os fenómenos de capilaridade e de evaporação da humidade são também responsáveis por variações dimensionais e degradações nos elementos construtivos. Estas últimas resultam, nomeadamente, do transporte e posterior deposição de sais dissolvidos na água ou do favorecimento de desenvolvimentos biológicos nocivos. Em

situações climáticas mais desfavoráveis os fenómenos de congelação-degelo devidos à presença de água líquida são, frequentemente, a causa da degradação acelerada dos elementos da envolvente dos edifícios ou dos seus revestimentos exteriores.

A detecção da humidade nos elementos de construção é realizada por métodos, quer destrutivos quer não-destrutivos.

A análise termográfica pode revelar-se um interessante método não-destrutivo neste domínio. Todavia a interacção de diversos fenómenos poderá dificultar a sua utilização, quer em laboratório quer *in situ* [5, 6, 7].

A detecção da presença de água num elemento construtivo terá como base duas das suas consequências: por um lado as alterações das respectivas características térmicas dos seus materiais constituintes – condutibilidade, efusibilidade, difusibilidade e capacidade térmica – afectam o desempenho térmico do elemento construtivo, em condições de transmissão de calor quer estacionárias (condutibilidade térmica) quer variáveis; por outro lado a mudança de estado correspondente à evaporação da água é um fenómeno endotérmico, acompanhada por uma absorção de calor pela humidade (calor latente de vaporização de cerca de 2500 J/g) que provoca um arrefecimento localizado na superfície do elemento.

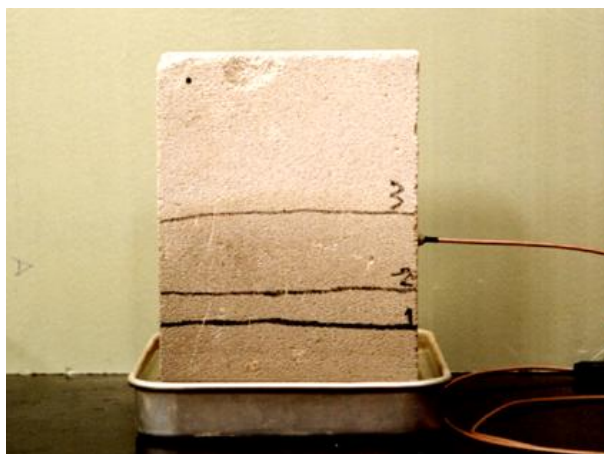
Em qualquer dos casos criam-se diferenças da temperatura superficial, suficientemente sensíveis para poderem ser detectadas com o equipamento de termografia.

A análise termográfica tem sido aplicada em diversos estudos *in situ* no âmbito da identificação e do estudo das causas de anomalias verificadas em edifícios [8, 9].

As dificuldades encontradas em muitos casos em identificar, sem ambiguidades, a presença de água levou a complementar as observações em obra com estudos laboratoriais [5, 10, 11] realizados em condições tão controladas quanto possível.

No âmbito de anteriores estudos laboratoriais realizados no LNEC começaram por se estudar as heterogeneidades térmicas criadas por fenómenos evaporativos subsequentes à absorção por capilaridade de quantidades significativas de água num provete homogéneo (Fig. 1) de um material poroso (betão celular autoclavado) [10], o qual foi sujeito, num ambiente relativamente estável em termos de temperatura e de humidade relativa, a um período inicial de imersão parcial e, seguidamente, retirado do contacto com a água e deixado a secar. Durante qualquer dos períodos uma das faces do provete foi sujeita a observações visuais e termográficas.

Nesse estudo a identificação da presença de água no estado líquido no interior do provete revelou-se possível e interessante do ponto de vista da aplicação prática da análise termográfica. No domínio higroscópico, em que a evaporação se processa muito lentamente, os resultados então obtidos não se revelaram muito promissores.

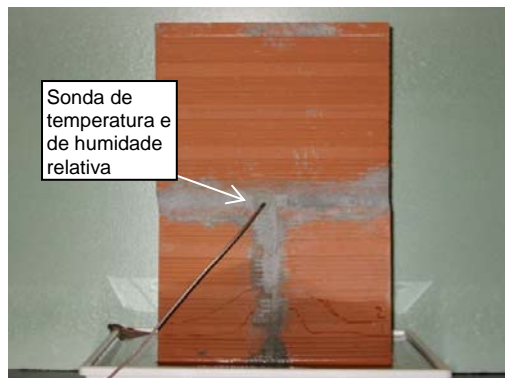


**Fig. 1** – Aspecto de um provete de betão celular autoclavado durante a fase de imersão parcial [10]

Em seguida [11], a metodologia utilizada no trabalho anterior foi aplicada à análise termográfica de um provete heterogéneo mais complexo (Fig. 2). O provete era constituído por elementos (tijolos cerâmicos furados) ligados por argamassa de assentamento (argamassa de cimento) e com uma das faces principais revestida com um reboco de cal e areia do rio.



a) Face rebocada



b) Face não-rebocada

**Fig. 2** – Aspecto de um provete de alvenaria de tijolo cerâmico durante a fase de imersão parcial [11]

As heterogeneidades térmicas e hígricas deste provete (devidas à sua constituição heterogénea) foram responsáveis por uma evolução diferenciada em relação ao caso estudado anteriormente, em termos, quer de capilaridade (fase de absorção de água), quer de evaporação (fase de secagem). À semelhança do caso anterior, se a identificação da presença de água no estado líquido no interior do provete se revelou possível e interessante, no domínio higroscópico em que a evaporação se processa mais lentamente os resultados obtidos não se consideraram muito promissores.

Em ambos os estudos referidos [10, 11], devido a dificuldades de ordem prática, apenas se realizaram algumas pesagens pontuais dos dois provetes ensaiados, as quais permitiam determinar os respectivos teores de água.

Posteriormente, e na sequência lógica dos estudos anteriores, aplicou-se a análise termográfica à detecção da absorção de água e da respectiva secagem numa parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida à escala real [5].

Para a realização desse estudo utilizou-se uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida (Fig. 3) com dimensões faciais nominais de 3600 mm x 2200 mm e espessura total de 340 mm.

Uma das faces da parede foi sujeita, numa câmara higrotérmica, a uma aspersão contínua (simulando a acção da chuva) durante um período de 6 dias, tendo-se verificado, logo após um dia de molhagem, a ocorrência de repasses de água na face oposta.

Esse estudo foi, ainda, desenvolvido em condições laboratoriais relativamente estáveis<sup>(1)</sup> e incluiu a utilização de métodos passivos (variações de temperatura devidas à humedificação e à secagem) e activos (aquecimento artificial da face da parede sujeita a molhagem).



**Fig. 3** – Aspecto de uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida [5]

Como nos dois estudos anteriores [10, 11] foram claramente identificadas pela análise termográfica, quer a absorção de água visível na superfície do provete, quer a presença e distribuição de água líquida no seu interior após o final da respectiva molhagem (mesmo quando a água líquida deixou de ser visível na superfície do provete). Também como nos estudos anteriores, verificou-se que com a diminuição progressiva da água líquida retida na parede atenuam-se de forma sensível as heterogeneidades térmicas da respectiva

---

<sup>1</sup> - Temperatura: 19 ± 3 C; humidade relativa: 55 ± 15%.

superfície, limitando de modo drástico a possibilidade da identificação da presença de humidade com a análise termográfica.

Esse estudo revelou também, aquando da aplicação de um método activo de aquecimento da superfície da parede, que a existência de descolamentos pontuais do respectivo revestimento deu origem a heterogeneidades térmicas que poderiam ser interpretadas, incorrectamente, como evidência da presença de água.

As observações visuais e termográficas realizadas no âmbito dos três estudos referidos foram complementadas pela medição das temperaturas e humidades relativas no interior de furos de pequeno diâmetro (6 mm), e com a profundidade de 55 mm, criados numa das faces dos provetes ensaiados. Para a realização dessas medições utilizaram-se sondas miniatura equipadas com resistência de platina (temperatura) e sensor capacitivo (humidade relativa). Com a utilização destas sondas pretendeu-se obter uma informação sobre o estado de humedecimento dos provetes após o período em que as observações visuais (ou termográficas) não permitiam identificar a presença de quantidades significativas de água (líquida) nos provetes. Constatou-se que a humidade relativa indicada por essas sondas se mantinha em valores elevados (> 80% HR), durante um longo período após a molhagem (e mesmo após o final da análise termográfica).

No âmbito do presente estudo de investigação co-financiado pela FCT o programa de ensaios laboratoriais incide sobre maquetas (muretes), à escala reduzida, de paredes de alvenaria irregular de pedra assente com argamassa de cal, e sobre uma parede do mesmo tipo, construída à escala real.

O presente relatório apresenta o estudo efectuado em laboratório sobre uma das maquetas à escala reduzida, a qual foi submetida a um ensaio de absorção de água por capilaridade.

Durante o ensaio de capilaridade, e subsequente período de secagem até retorno à massa inicial, a maqueta foi objecto de observações visuais e termográficas (durante a fase de secagem). Complementarmente a estas observações, e de modo a apoiar a interpretação dos resultados das análises realizadas, procedeu-se a uma caracterização prévia dos elementos constituintes – argamassa de cal e areia e pedra calcária – da maqueta, e à pesagem regular da maqueta.

## 2 – ESTUDO REALIZADO

### 2.1 – Maqueta de ensaio

#### 2.1.1 – Descrição geral

Para a realização deste estudo procedeu-se à construção de uma maqueta (Fig. 4) de pequenas dimensões – 1,00 m x 1,00 m (dimensões faciais) e espessura de 0,40 m – de uma parede de alvenaria irregular de pedra calcária (semi-rijo de Leiria) e argamassa de cal aérea e areia siliciosa (traço 1:3). As faces da maqueta não foram revestidas de modo a permitir a análise do desempenho diferenciado dos seus elementos constituintes (pedra e argamassa de assentamento) <sup>(2)</sup>.



**Fig. 4** – Maqueta de alvenaria de pedra irregular

Após a respectiva construção e antes do início dos ensaios de capilaridade a maqueta foi mantida durante um período de 90 dias na nave de ensaios do Pavilhão de Componentes (Núcleo de Revestimentos e Isolamentos/Departamento de Edifícios) admitindo-se que ao longo deste período a maqueta atingiu o “equilíbrio” higrotérmico com o ambiente da nave. Nesta condição de “equilíbrio” a massa da maqueta era de cerca de 813 kg.

---

<sup>2</sup> - Numa fase posterior será estudado o conjunto *parede + revestimento* sob a acção da humidade ascensional, procurando avaliar a influência dos vários componentes no desempenho global.

### 2.1.2 – Características dos elementos constituintes

Os elementos constituintes da maqueta ensaiada – argamassa de cal e pedra calcária – apresentam diferenças em termos de estrutura porosa interna, de velocidades e percentagens de absorção de água, e de velocidades de secagem.

Pelo interesse particular de que se reveste o comportamento à água dos elementos constituintes da maqueta de alvenaria para o estudo do comportamento desta, procedeu-se à respectiva caracterização experimental, sintetizando-se no Quadro 1 os resultados obtidos.

**Quadro 1** – Principais características da pedra calcária e da argamassa de cal

Ensaio	Pedra	Argamassa
Massa volúmica real ( $kg/m^3$ )	2680	2480
Massa volúmica aparente ( $kg/m^3$ )	2460	1720
Porosidade acessível à água (%)	8,2	30,8
Teor máximo de água de absorção ( $W_{max}$ ) (% $m/m$ )	3,4	18,0
Teor máximo de água às 48 horas ( $W_{48h}$ ) (% $m/m$ )	3,2	15,5
Coeficiente de capilaridade ( $kg/m^2 \cdot h^{1/2}$ ) entre 0 e 30 min	0,70	28d – 53,5
		90d – 50,3
Permeabilidade ao vapor de água ( $ng/m \cdot s \cdot Pa$ )	<i>n.d.</i>	30,95
Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 0,01 m de argamassa ( $S_D$ ) (m)	<i>n.d.</i>	0,06

**Obs:** 1 - *n.d.* – valor não determinado

2 - Os valores de teor máximo de água de absorção e teor máximo de água às 48 h foram determinados em imersão total.

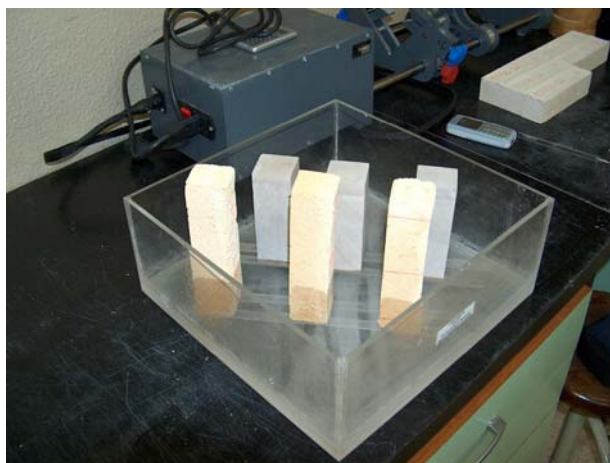
Os ensaios de capilaridade (Fig. 5) foram realizados segundo a EN 1015-18 sobre provetes de argamassa (40 mm 40 mm 160 mm) e de pedra de (40 mm 40 mm 120 mm), à temperatura de 23°C e humidade relativa ambiente de 50%. Os ensaios de capilaridade dos provetes de argamassa foram efectuados após 28 e 90 dias da data do respectivo fabrico.

Os ensaios de porosidade acessível à água, das massas volúmicas e do teor máximo de água de absorção foram efectuados segundo os Procedimentos de Ensaio do LNEC/LERO, que por sua vez seguem as Recomendações Provisórias da RILEM 25 PEM. Os respectivos procedimentos de ensaios baseiam-se no método da saturação total em água sob vácuo e da pesagem hidrostática.

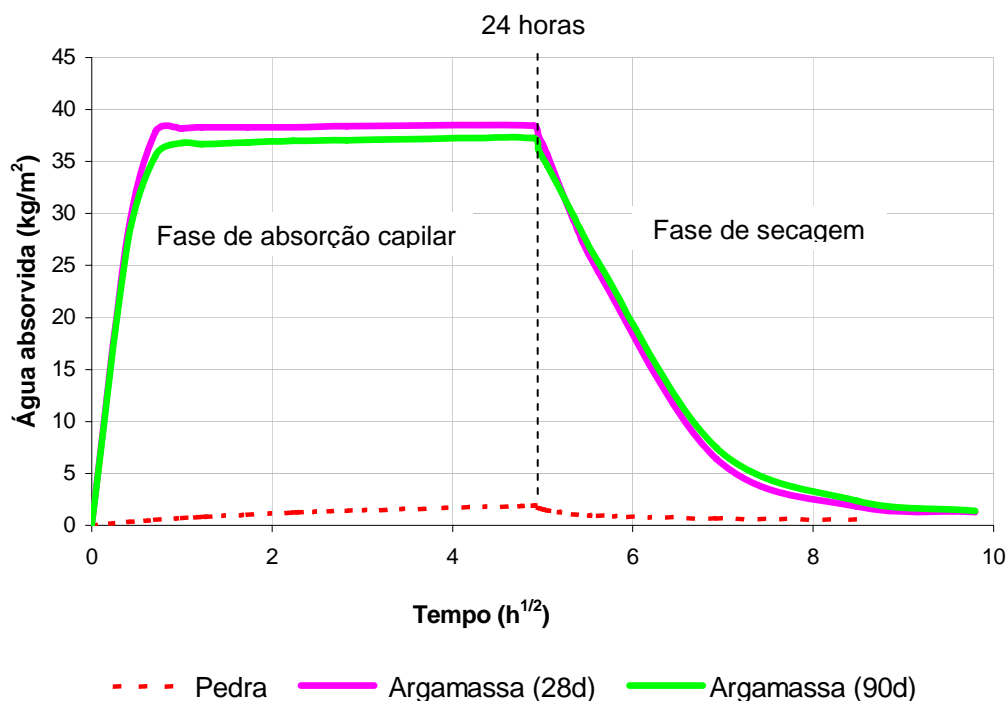


Os provetes foram mantidos em contacto com a água durante um período de 24 horas, após o qual se processou a respectiva secagem natural.

Na Fig. 6 apresenta-se o gráfico da evolução da absorção de água por capilaridade e da secagem referentes aos ensaios dos provetes dos dois elementos constituintes (pedra calcária e argamassa de cal aérea). Nesse gráfico, como é habitual nos ensaios de capilaridade efectuados sobre elementos para alvenarias, os resultados obtidos expressam-se em termos da quantidade de água absorvida por unidade de superfície ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) em função da raiz quadrada do tempo ( $\text{h}^{1/2}$ ).



**Fig. 5** – Ensaio de absorção de água por capilaridade de provetes da pedra calcária e da argamassa de cal



**Fig. 6** – Absorção capilar e secagem dos provetes de pedra e de argamassa

Como se pode constatar pela análise deste gráfico a absorção de água por capilaridade da argamassa é muito superior à que caracteriza a pedra calcária, como já faziam prever os correspondentes valores da porosidade (Quadro 1 e Fig. 6).

O gráfico revela ainda que o processo de absorção de água é muito rápido na argamassa – tendo-se atingido o valor máximo de absorção de água (cerca de 38 kg/m<sup>2</sup>) em menos de uma hora –, e que a correspondente secagem até retorno à massa inicial, embora mais lenta, se processa também facilmente.

Em comparação com a argamassa ambos os processos se registam mais lentamente nos provetes de pedra calcária.

Esta marcada diferença de comportamentos dos dois materiais constituintes da maqueta experimental influenciaram, como é natural, o desempenho da própria maqueta, como se referirá a seguir.

De referir que os coeficientes de capilaridade indicados no Quadro 2 correspondem aos declives do segmento definido pelas pesagens efectuadas até aos 30 min nos respectivos ensaios (Fig. 6).

## 2.2 – Desenvolvimento do estudo

O estudo realizado consistiu nas seguintes acções:

- construção de uma maqueta (1,00 m x 1,00 m x 0,40 m) de uma parede de alvenaria irregular de pedra calcária assente com argamassa de cal (vd. 2.1); a maqueta foi executada sobre um suporte adequado que permitiu realizar a correspondente pesagem regular;
- conservação da maqueta durante um período de 90 dias, após a respectiva data de execução, numa nave de ensaios;
- realização, na nave de ensaios (19.2 C / 65-15% HR), de um processo de imersão parcial em água da maqueta (Fig. 7); durante a imersão foi mantida uma altura de 50 mm de água junto da base da maqueta;
- pesagem regular da maqueta com um célula de carga com capacidade de 20 kN e resolução de 1 N;
- observação visual e anotação da ascensão capilar nas faces aparentes da maqueta;
- após ser atingida a massa constante<sup>(3)</sup>, a maqueta deixou de ser mantida em contacto com a água (a partir de 648 h de ensaio) e procedeu-se ao

---

<sup>3</sup> - Como é possível concluir da análise dos valores apresentados no Quadro 2 as variações de massa que se registaram a partir do sexto dia de ensaio (144 h) são bastante pequenas, tendo-se mantido a imersão até às 648 h de ensaio para confirmação da estabilização da massa da maqueta.

acompanhamento da respectiva secagem natural no ambiente da nave de ensaios (20,5 2,5 C / 55 20% HR);

- durante o período de secagem continuaram a realizar-se pesagens regulares e observações visuais da superfície da maqueta e procedeu-se à análise termográfica de uma das suas faces principais.



**Fig. 7** – Aspecto da maqueta de alvenaria durante a fase de imersão parcial

Os termogramas apresentados neste trabalho (vd. Anexo I) foram obtidos, em primeiro lugar, pela utilização de um sistema de aquisição e de registo de imagens térmicas (Fig. 8) e, seguidamente, pelo seu tratamento com programas de conversão e de análise adequados (*PicEd* e *ConAvio*).



**Fig. 8** – Equipamento de termografia [10]

### **2.3 – Medições e observações efectuadas**

Na Fig. 9 representa-se graficamente a evolução dos valores da variação da massa da maqueta ao longo do tempo<sup>(4)</sup> e, em paralelo, na Fig. 10, apresenta-se o registo da evolução da temperatura e da humidade relativa do ambiente da nave de ensaios. Estes parâmetros foram lidos e registados durante todo o período de cerca de 52 dias em que decorreram o ensaio de capilaridade (fases de imersão parcial e de secagem) e as observações termográficas.

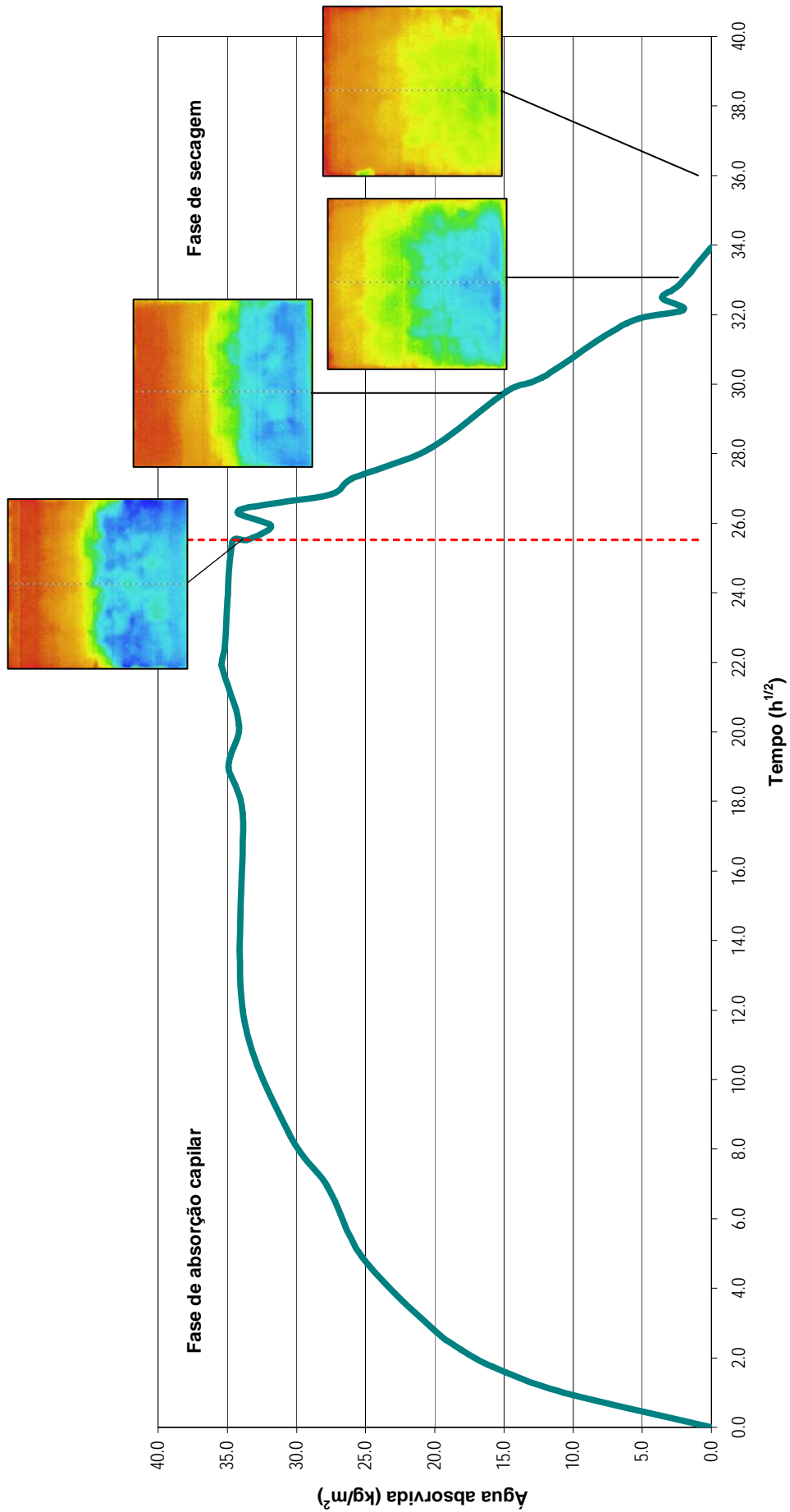
No Quadro 2 indicam-se os resultados das determinações pontuais efectuadas durante o ensaio, quer das alturas máximas de ascensão capilar quer da massa de água absorvida pela maqueta. Os valores da massa de água absorvida são expressos em valor absoluto (*kg*) e em massa de água absorvida por unidade de área (*kg/m<sup>2</sup>*) da base da maqueta.

No Anexo I apresentam-se os diversos termogramas obtidos durante a fase de secagem da maqueta.

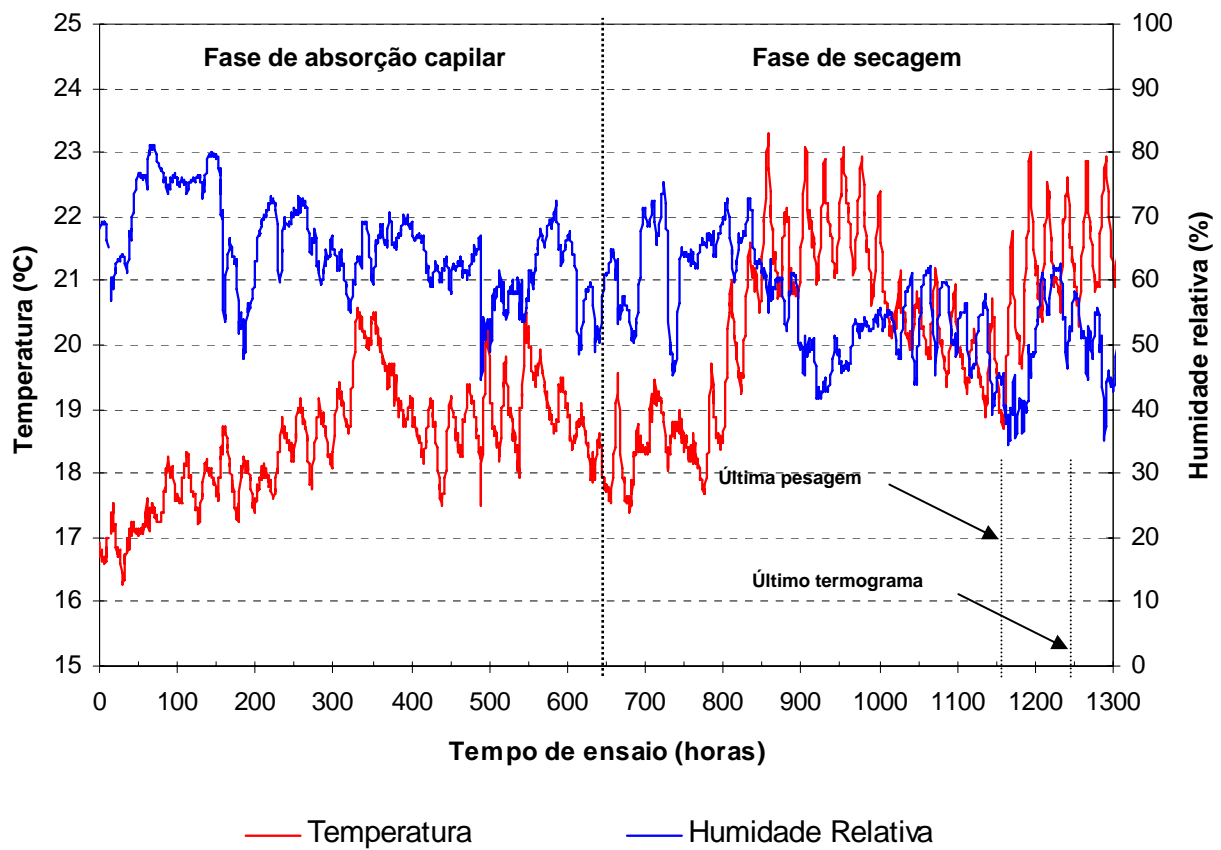
Na Fig. 9 inseriram-se alguns desses termogramas ilustrando a correspondência entre a massa de água retida na maqueta e as possibilidades da observação termográfica.

---

<sup>4</sup> - Da modo idêntico ao gráfico dos ensaios de capilaridade dos elementos constituintes (Fig. 6), no gráfico correspondente ao ensaio da maqueta, em abcissas representa-se a raiz quadrada do tempo ( $h^{1/2}$ ) e em ordenadas a massa de água absorvida por unidade superfície ( $kg/m^2$ ).



**Fig. 9** – Gráfico da variação de massa da maquete durante as fases de absorção capilar e de secagem



**Fig. 10** – Evolução da temperatura e da humidade ambientes da nave de ensaios durante o ensaio da maqueta

**Quadro 2** – Valores da altura de ascensão capilar e da massa de água absorvida determinados durante o ensaio de capilaridade da maqueta

Fase de ensaio	Tempo de ensaio		Altura de ascensão capilar (*) (mm)	Água absorvida acumulada		Termograma (vd. Anexo I)
	(h)	(h <sup>1/2</sup> )		(kg)	(kg/m <sup>2</sup> )	
Imersão parcial (absorção capilar)	1	1,0	210	4,3	10,7	
	3	1,7	280	6,3	15,8	
	5	2,2	300	7,2	18,1	
	8	2,8	320	8,1	20,1	
	24	4,9	385	10,1	25,2	
	48	6,9	410	11,1	27,8	
	72	8,5	430	12,2	30,6	
	144	12,0	500	13,6	33,9	
	312	17,7	500	13,6	33,9	
	360	19,0	500	14,0	34,9	
	408	20,2	500	13,7	34,1	
	480	21,9	500	14,2	35,4	
	504	22,4	500	14,1	35,2	
Secagem	648	25,5	<i>n.d.</i>	13,9	34,7	Fig. I.1
	651	25,5	<i>n.d.</i>	13,5	33,6	-
	672	25,9	<i>n.d.</i>	12,7	31,9	Fig. I.2
	696	26,4	<i>n.d.</i>	13,7	34,1	Fig. I.3
	720	26,8	<i>n.d.</i>	11,0	27,5	-
	744	27,3	<i>n.d.</i>	10,4	26,0	Fig. I.4
	792	28,1	<i>n.d.</i>	8,2	20,4	-
	888	29,8	<i>n.d.</i>	5,9	14,8	Fig. I.6
	912	30,2	<i>n.d.</i>	4,9	12,2	-
	1008	31,7	<i>n.d.</i>	2,4	6,1	Fig. I.7
	1032	32,1	<i>n.d.</i>	0,8	2,0	Fig. I.8
	1056	32,5	<i>n.d.</i>	1,4	3,6	Fig. I.9
	1080	32,9	<i>n.d.</i>	0,9	2,3	Fig. I.10
1152	33,9	<i>n.d.</i>	0,0	0,0	Fig. I.11	

*n.d.* – não determinado

\* – altura máxima de ascensão capilar medida a partir da base do provete (imersa 50 mm)

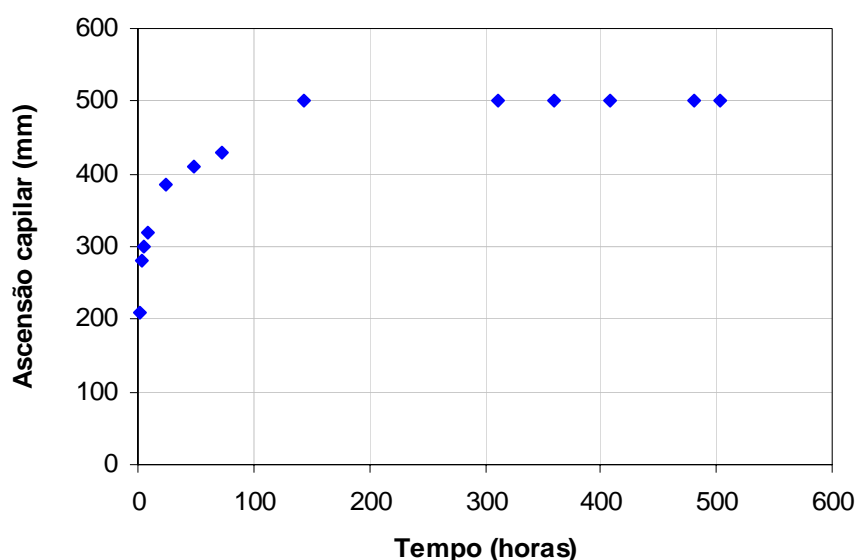
Analisa-se seguidamente os resultados das medições, pesagens e observações efectuadas no âmbito do presente estudo.

#### a) fase de imersão parcial

A pesagem e a observação visual da maqueta (Fig. 9 e Quadro 2) revelaram que a absorção capilar se processou rapidamente, desde as primeiras horas de contacto da base com a água. Após uma hora e cinco horas de contacto com o líquido os acréscimos de massa correspondiam, respectivamente, a cerca de 30% e 50% do valor total registado.

Como era previsível, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de absorção capilar efectuados sobre os elementos constituintes, em particular da argamassa (vd. 2.1.2), uma observação mais atenta da superfície molhada da maqueta de alvenaria revelou que a ascensão capilar era mais evidente na argamassa de cal, cujo humedecimento era bem visível e sensível ao tacto.

Após a fase inicial do ensaio a ascensão capilar tornou-se um pouco mais lenta (Fig. 11), tendo a altura máxima (500 mm) sido atingida ao fim de cerca de seis dias de contacto com a água. Neste período de 144 h também a quantidade total de água absorvida pela maqueta se aproximava do máximo atingido durante o ensaio.

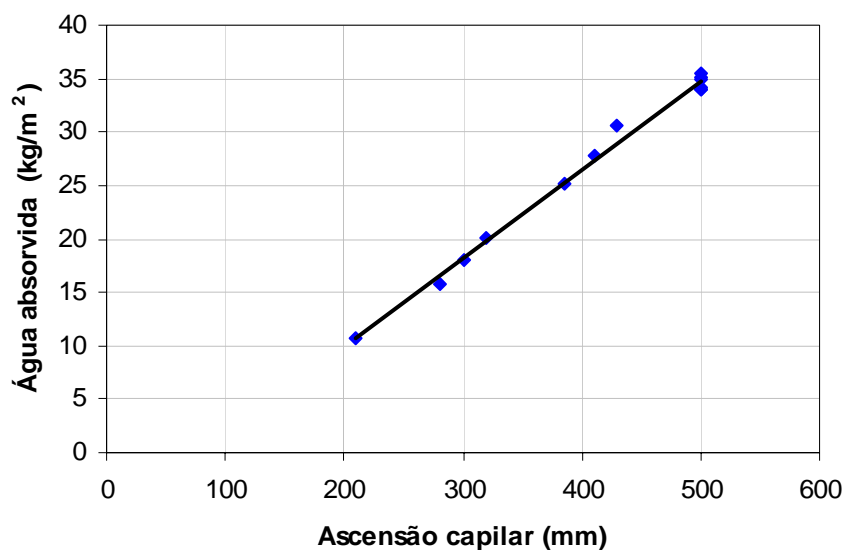


**Fig. 11** – Ensaio de capilaridade da maqueta. Tempo vs. Ascensão capilar

De referir que no final da fase de absorção capilar a maqueta tinha absorvido uma massa de água de cerca de 14 kg, a qual representa um valor unitário de cerca de  $35 \text{ kg/m}^2$ , valor ligeiramente inferior ao obtido ( $\sim 38 \text{ kg/m}^2$ ) nos ensaios de capilaridade dos provetes da argamassa de cal utilizada na execução da parede (Fig. 6).

A análise dos valores observados da altura de ascensão capilar visível nas faces da maqueta permite verificar que se estabelece uma relação praticamente linear entre a altura registada e a quantidade de água absorvida (Fig. 12).





**Fig. 12** – Ensaio de capilaridade da maqueta. Ascensão capilar vs. Água absorvida

Com base nos registos efectuados (Fig. 9) determinou-se o coeficiente de capilaridade da maqueta à 1 hora, tendo-se obtido o valor de  $10,70 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , o qual se situa entre os valores obtidos para os provetes de argamassa e de pedra aos 30 minutos (Quadro 1).

Durante esta fase de absorção capilar não se realizaram observações termográficas uma vez que, como os estudos anteriores revelam [5, 10, 11], aquelas observações traduzem apenas as observações visuais.

### ***b) fase de secagem***

Após terem deixado de se registar acréscimos de massa da maqueta, indiciando um estado de equilíbrio entre a absorção de água e a perda por evaporação, a maqueta foi retirada do contacto com o líquido e deu-se início à fase de secagem (a partir de  $t = 648 \text{ h}$ ).

Durante esta fase continuaram a efectuar-se pesagens regulares e observações visuais da superfície da maqueta, e deu-se início ao programa de observações termográficas. A sequência de termogramas obtidos durante esta fase é apresentada no Anexo I.

O termograma da Fig. I.1 (vd. Anexo I) representa o estado térmico da superfície da maqueta no início da fase de secagem ( $t = 648 \text{ h}$ ). Nesse termograma, como nos termogramas obtidos durante mais cerca de 430 h (vd. Anexo I, Figs I.1 a I.10), a presença

e a evolução da distribuição de água na maqueta são perfeitamente identificados, mesmo após não serem visíveis manifestações de humidade na respectiva superfície.

A área molhada na superfície da maqueta desapareceu progressivamente, até já não ser, praticamente, visível após um período de 360 horas desde o início da secagem (vd. Anexo I, Fig.I.7), apesar de as pesagens efectuadas no final daquele período revelarem, ainda, a existência de alguma água retida na alvenaria (cerca de 6 kg/m<sup>2</sup>) (Quadro 2 e Fig. 9).

A perda de massa da maqueta apresenta um andamento praticamente linear (da ordem de 30 a 35 g/h) ao longo de todo o período de secagem (Fig. 9).

No período inicial da secagem a evaporação de água superficial é mais acentuada, dando origem às maiores heterogeneidades da temperatura superficial. De referir que a diferença de temperatura entre as zonas molhada e seca da superfície da maqueta atingem valores próximos de 1,5 C.

Este valor é inferior ao obtido em outros estudos laboratoriais realizados no LNEC, embora com diferentes materiais e condições ambientes [5, 10, 11]. Todavia, apesar das limitadas diferenças de temperaturas superficiais registadas, como acima se referiu, os termogramas obtidos no presente estudo permitem identificar claramente a zona molhada da maqueta e a respectiva secagem.

Além deste facto, os termogramas incluídos no Anexo I apresentam padrões idênticos aos obtidos em anteriores estudos de avaliação da presença de humidade (água líquida) em elementos de construção porosos, como se ilustra na Fig. 13.

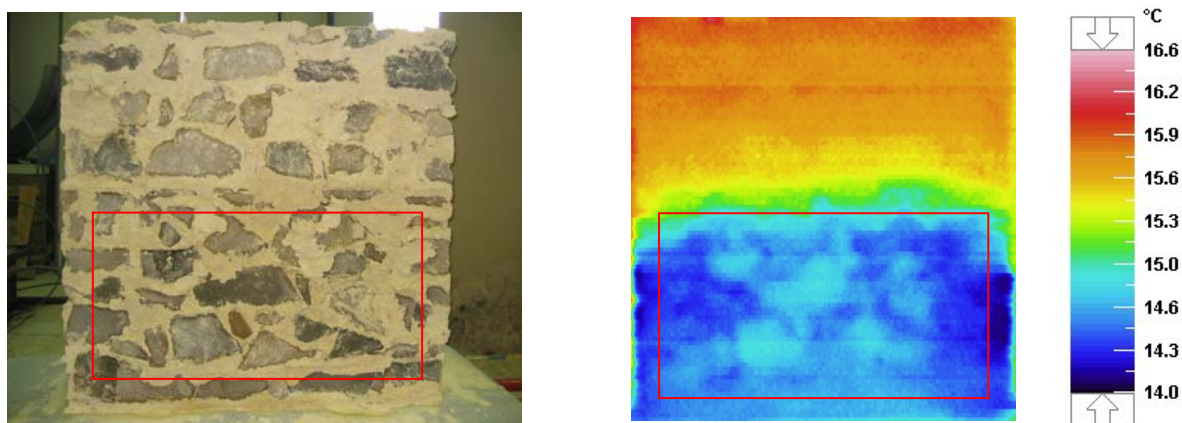
As diversas isotérmicas representadas (e o perfil de temperaturas que acompanha cada termograma) indicam a existência de uma zona de transição com temperaturas superficiais superiores às da zona molhada (zona de ascensão capilar visível), mas inferiores às observadas na parte superior (“seca”) do provete (vd. Anexo I, Figs I.1 a I.6).



**Fig. 13** – Aspecto da relação entre as observações visuais e termográficas

Esta transição, sobretudo observável nos termogramas correspondentes à fase inicial da secagem (100 a 200 horas após o início da secagem), poderá traduzir, quer a presença de água líquida (ou a ocorrência de fenómenos de difusão e de evaporação no interior do provete), quer as trocas térmicas devidas às diferenças de temperatura entre as zonas seca e molhada.

Os termogramas revelam, ainda, a ocorrência de ligeiras heterogeneidades na temperatura da zona fria inferior da maqueta (superfície molhada), as quais revelam a existência de diferentes teores de humidade provocados, quer pela influência dos bordos laterais da maqueta na respectiva secagem, quer pelas diferenças de características e de humedificação dos elementos constituintes (argamassa das juntas e pedras). Estas heterogeneidades estão ilustradas na Fig. 14.



**Fig. 14** – Aspecto das heterogeneidades (físicas e térmicas) na zona inferior molhada

À medida que o processo de secagem natural progride atenua-se a diferença de temperatura superficial detectada termograficamente (vd. Anexo I, Figs I.7 a I.10). A mancha térmica relativa à zona mais fria retrai-se para o centro da maqueta e as isotérmicas de transição entre a zona “molhada” e a zona superior seca expandem-se. A heterogeneidade de temperaturas na face do provete desce para valores da ordem de 1,0 C. O novo aspecto da mancha fria traduz a mais rápida secagem junto aos bordos da maqueta, e a substituição de movimentos capilares por fenómenos de difusão e de evaporação de vapor de água. De referir que as pesagens efectuadas em simultâneo com os últimos termogramas desta fase (Quadro 2) revelam que a quantidade de água ainda retida é diminuta.

Com a tendência marcada para a uniformização da temperatura das faces do provete tornou-se cada vez mais difícil detectar a eventual presença de humidade no seu interior (vd. Anexo I, Figs I.11 a I.13). De notar que aquando da obtenção destes últimos

termogramas a sensibilidade da pesagem da maqueta já não permitia identificar a presença de água retida (Quadro 2).

### **3 – CONCLUSÕES**

Realizou-se um ensaio de absorção de água por capilaridade de uma maqueta de parede de alvenaria irregular de pedra aglomerada com argamassa de cal, submetida, numa fase inicial, à imersão parcial em água e, em seguida, a um processo de secagem natural num ambiente interior (nave de ensaios) e fez-se o estudo laboratorial de análise das heterogeneidades térmicas criadas na maqueta ao longo do ensaio.

O ensaio de absorção e secagem permitiu confirmar alguns aspectos do comportamento à água de paredes deste tipo. Com efeito, verifica-se que a absorção de água destas paredes, de alvenaria muito porosa, é bastante rápido; a secagem processa-se também durante um período relativamente curto, mas é mais lenta que a absorção e prolonga-se para além do período em que é visível o humedecimento da parede. Observa-se que a taxa de absorção capilar da parede durante a primeira hora apresenta um valor intermédio entre o valor que caracteriza a pedra e o que caracteriza a argamassa. Constatou-se ainda que a ascensão capilar visível é directamente proporcional à massa de água absorvida.

Estas conclusões sobre o comportamento da parede de alvenaria irregular de pedra com argamassa de cal aérea têm uma validade limitada pela idade da parede (90 dias), que poderá não ter permitido a carbonatação completa da argamassa, mas consideram-se, ainda assim, indicativas do comportamento em condições reais e permitirão uma melhor interpretação das observações realizadas em construções reais.

Para a realização do estudo de análise das heterogeneidades térmicas criadas na maqueta ao longo do ensaio utilizou-se uma câmara termográfica sensível à radiação infravermelha na gama de 3 a 5,4 m. Este método não-destrutivo de visualização da distribuição das temperaturas superficiais de um objecto permitiu identificar claramente as heterogeneidades térmicas criadas pela absorção capilar de água registada na maqueta submetida a ensaio.

Em resultado das observações termográficas realizadas concluiu-se que – à semelhança de estudos anteriores [5, 10, 11] – foi claramente identificada pela análise termográfica a presença e a distribuição de água no elemento em estudo.

No âmbito do presente estudo esta identificação decorreu apenas do arrefecimento da superfície do elemento causado pela evaporação da água absorvida.

Como seria de esperar, o arrefecimento superficial evaporativo possibilitou facilmente identificar termograficamente a presença da água enquanto era visível a humedificação da superfície do elemento em estudo.

Após ocorrer a secagem da superfície do provete até deixar de ser visível a presença de água e se ter registado uma redução significativa da quantidade de água absorvida, os termogramas obtidos continuaram a permitir identificar a presença e a distribuição da água na maqueta de alvenaria.

Todavia, com a diminuição progressiva da água líquida retida no provete atenuam-se de forma sensível as heterogeneidades térmicas da respectiva superfície, limitando de modo sensível a possibilidade e o detalhe da identificação da presença de humidade com a análise termográfica.

Comparando os resultados deste estudo com outros obtidos em estudos anteriores com o mesmo objectivo mas realizados sobre provetes com diferentes características dimensionais e físicas, salienta-se o facto de a diferença máxima de temperatura registada entre as zonas molhada e "seca" das faces da maqueta ensaiada ter sido próxima de 1,5 °C (início da fase de secagem), semelhante aos valores obtidos num ensaio anterior sobre uma parede de alvenaria de blocos e betão de argila expandida [11], mas inferior aos valores mais "favoráveis" de cerca 4 °C num provete de betão celular autoclavado [5] e de 2,5 °C num provete de tijolo cerâmico com juntas de argamassa de cimento [10].

As semelhanças e diferenças indicadas poderão ser devidas, quer às quantidades água absorvidas pelos provetes já ensaiados, quer à influência das condições ambientes (temperatura, velocidade do ar e humidade relativa) existentes durante os vários ensaios já realizados.

Os resultados positivos obtidos no presente trabalho levam a que dê continuação ao estudo da aplicação da análise termográfica neste domínio, quer em laboratório quer *in situ*. Além de outros ensaios já previstos, será interessante explorar a utilização controlada de métodos activos de aquecimento uniforme da superfície das maquetas ou da parede à escala real, construídas no âmbito do presente estudo.

A análise e ampliação destes resultados obtidos em maquetas de parede em laboratório deverá permitir uma interpretação mais fundamentada e segura de ensaios a realizar em obra com este método.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Janeiro de 2007.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de  
Revestimentos e Isolamentos



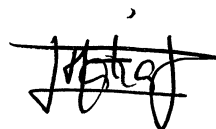
Jorge Grandão Lopes

O Director do Departamento  
de Edifícios



José A. Vasconcelos Paiva

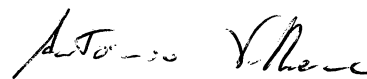
AUTORIA



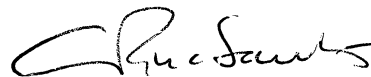
Luís Manuel Matias  
Físico Tecnológico, Assistente  
de Investigação

Ana Cristian Magalhães  
Ana Cristian Magalhães

Eng<sup>a</sup> Civil, Bolseira de Investigação



António Vilhena  
Eng<sup>o</sup> Civil, Assistente de Investigação



C. A. Pina dos Santos  
Eng<sup>o</sup> Civil, Investigador Principal

Maria do Rosário Veiga  
Maria do Rosário Veiga

Eng.<sup>a</sup> Civil, Investigadora Principal

## BIBLIOGRAFIA

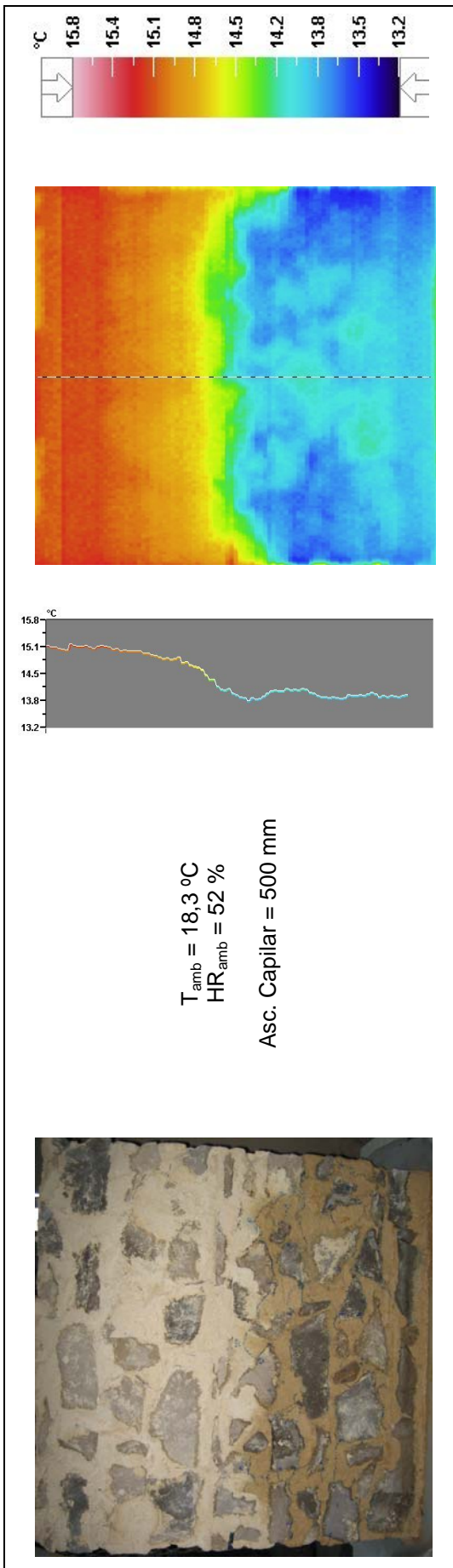
- 1 SANTOS, C.; VEIGA, M.; VILHENA, A.; MAGALHÃES, A.; MATIAS, L. — *Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas*. Comunicação apresentada ao Congresso CONSTRUÇÃO 2004. Porto: FEUP, Dezembro de 2004; Proc. 0803/14/15139.
- 2 PETERSON, B.; AXÉN, B. — *Thermography. Testing of thermal insulation and airtightness of buildings*. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1980.
- 3 HART, J. M. — *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. Garston: Building Research Establishment, 1991.
- 4 MALDAGUE, X. — *Infrared Methodology and Technology. Nondestructive testing, Monographs and Tracks, Volume 7*. Pennsylvania (USA): Gordon and Breach Science Publishers, 1994.
- 5 SANTOS, C.; MATIAS, L. — *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção de água e da secagem de uma parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida*. Relatório nº 37/2003-NRI. Lisboa: LNEC, Fevereiro 2003.
- 6 ROSINA, E.; ROSI, L. — *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*. Thermosense XX. Orlando (USA): April 1998.
- 7 GRINZATO, E.; ROSINA, E. — *Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Building, Non Destructive Testing Handbook, 3<sup>o</sup> Edition, vol.3*. (OH) USA: Infrared and Thermal Testing ASNT Columbus, April 2001.
- 8 MATIAS, L. — *Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos na Amieira do Tejo e em Viana do Alentejo (Projecto nº POCTI/ECM/46323/2002)*. Relatório nº 270/2004-NRI. Lisboa: LNEC, Setembro 2004.
- 9 MATIAS, L. — *Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos em Viana do Alentejo (Projecto nº POCTI/ECM/46323/2002) – 2<sup>a</sup> campanha experimental*. Relatório nº 74/2006-NRI. Lisboa: LNEC, Janeiro 2006.
- 10 SANTOS, C. — *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de betão celular autoclavado*. Relatório nº 05/2002-NCCT. Lisboa: LNEC, Janeiro 2002.

- 11 SANTOS, C.; MATIAS, L. — *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado*. Relatório nº 144/2002-NCCT. Lisboa: LNEC, Abril 2002.
- 12 BARREIRA E.; FREITAS, V. — *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials 21 (2007) 218-224.
- 13 SANTOS, C.; MAGALHÃES, A.; MATIAS, L.; ROSÁRIO VEIGA, M. — *Aplicação laboratorial de técnicas termográficas e de ultra-sons na detecção de descolamentos localizados dos revestimentos numa parede de alvenaria de blocos de betão de argila expandida*. Relatório nº 88/2003-NRI. Lisboa: LNEC, Abril 2003.
- 14 PINA, C.; MATIAS, L. — *Application of thermography for moisture detection. A laboratory research study*. In Proceedings of XXX IAHS World Housing Congress. Coimbra: Setembro de 2002.
- 15 PINA, C.; MATIAS, L.; MAGALHÃES, A.; VEIGA, R. — *Application of thermography and ultra-sounds for wall anomalies diagnosis a laboratory research study*. In Proceedings of International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 (NDT-CE). Berlim: 16 a 19 de Setembro de 2003.

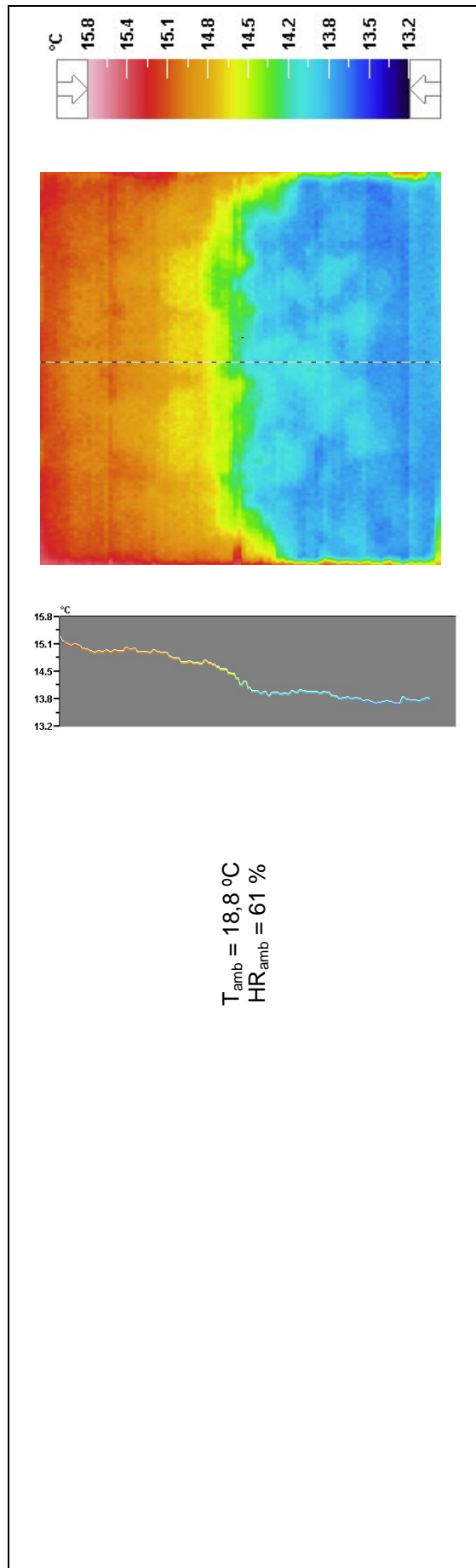


**ANEXO**  
**TERMOGRAMAS**

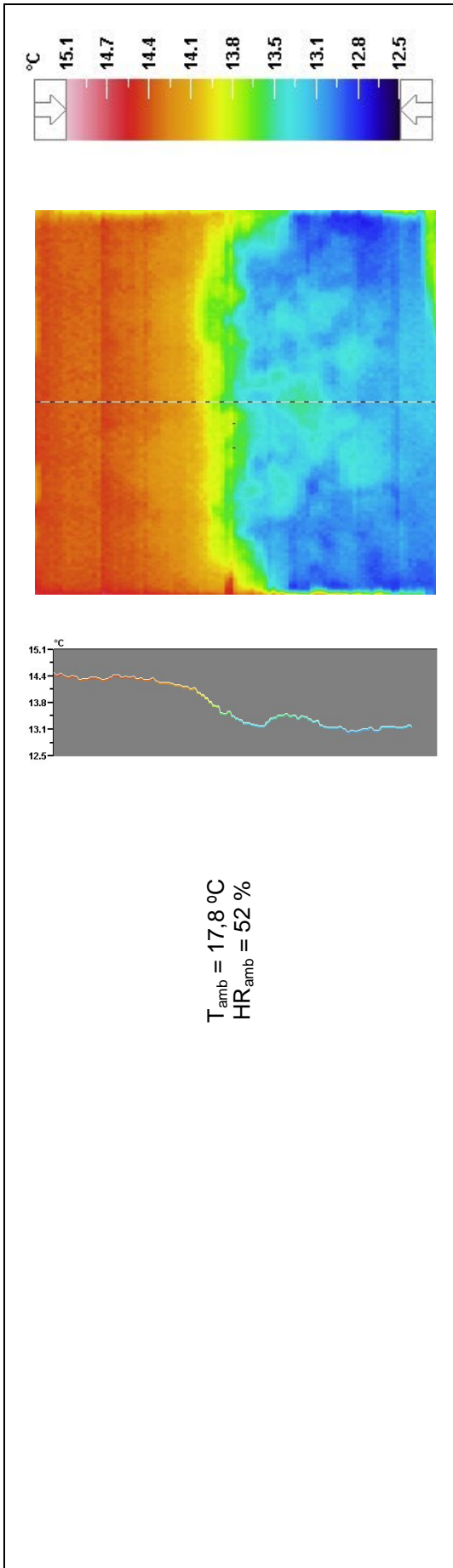




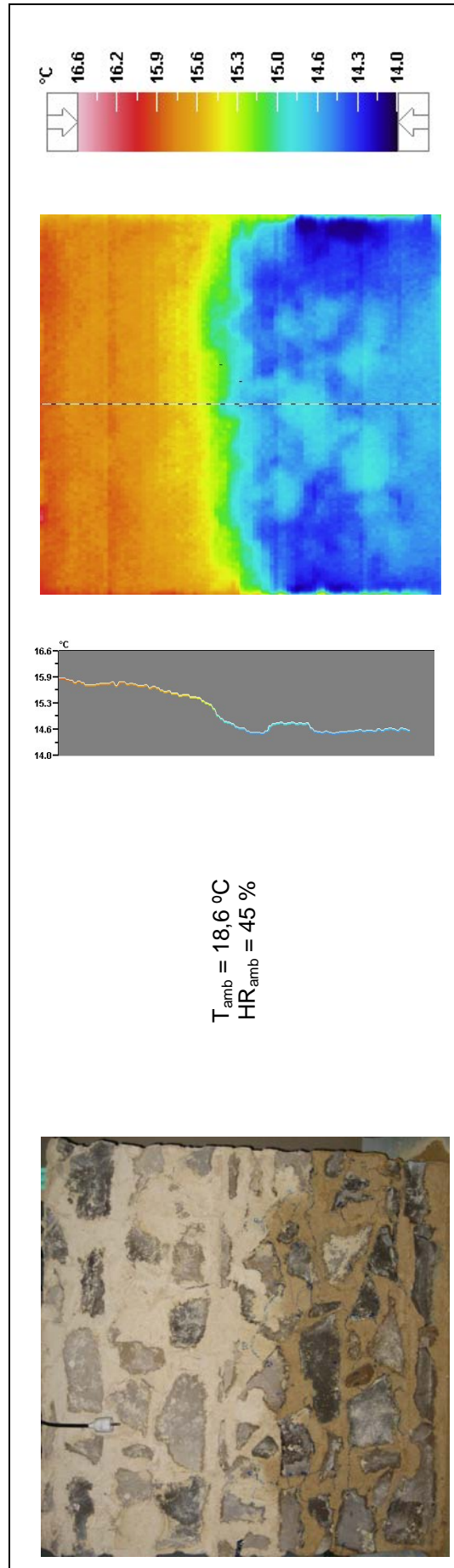
**Fig. I.1** – Fotografia e termograma da maquete no início do período de secagem (t = 648 h)



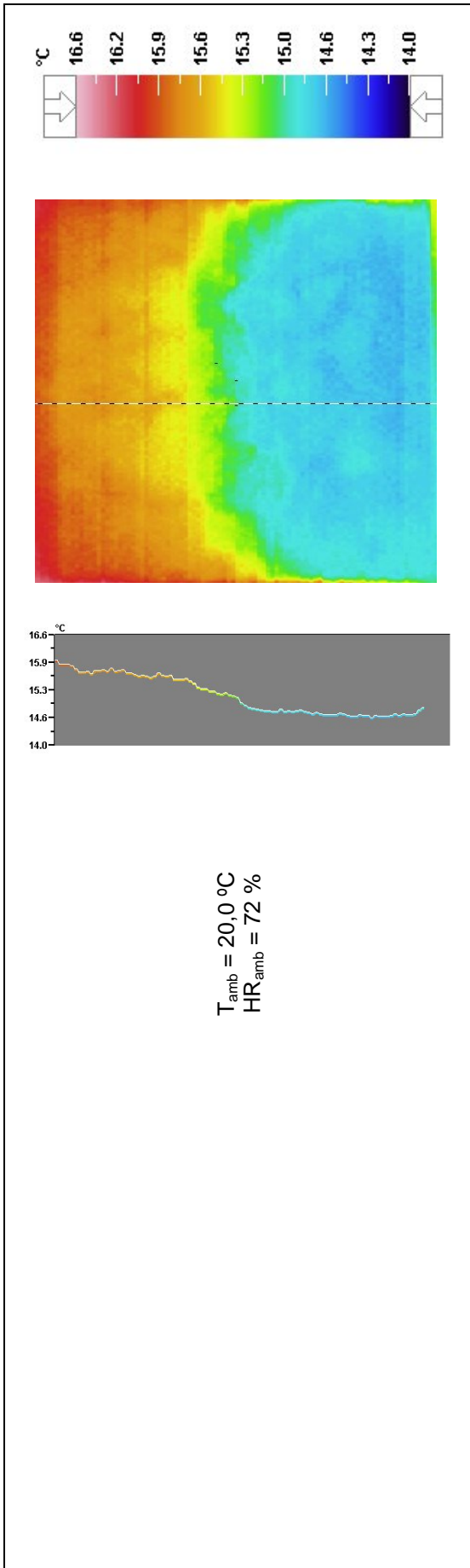
**Fig. I.2** – Termograma da maquete após 672 h de ensaio



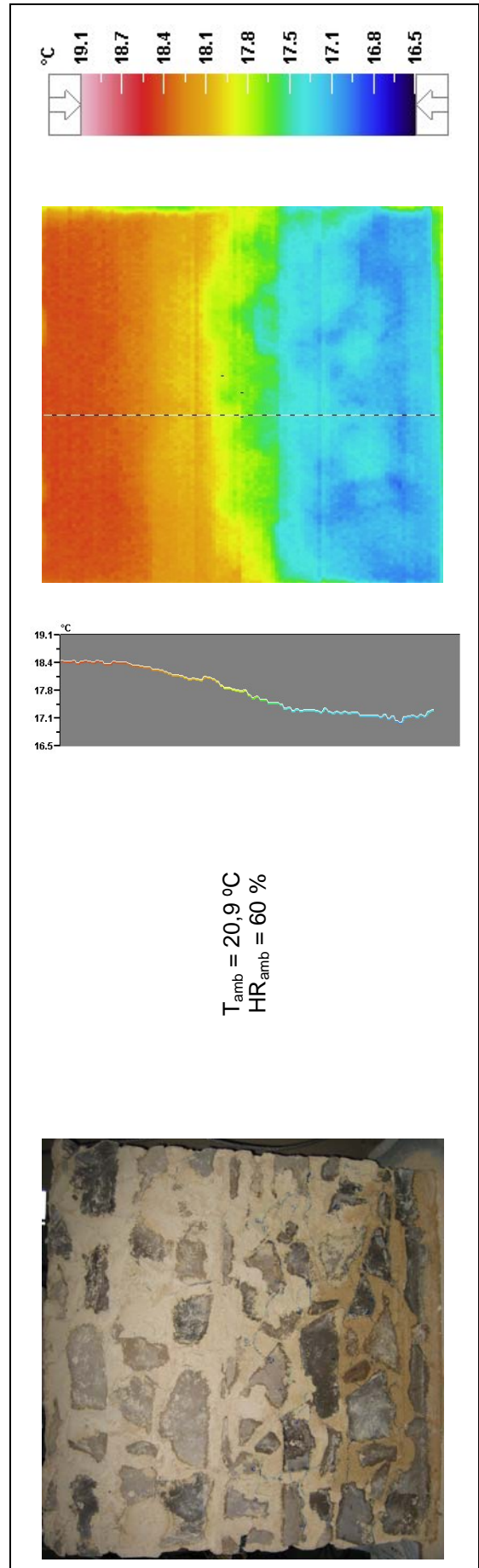
**Fig. I.3** – Termograma da maquete após 696 h de ensaio



**Fig. I.4** – Fotografia e termograma da maquete após 744 h de ensaio



**Fig. I.5** – Termograma da maquete após 816 h de ensaio



**Fig. I.6** – Fotografia e termograma da maquete após 888 h de ensaio

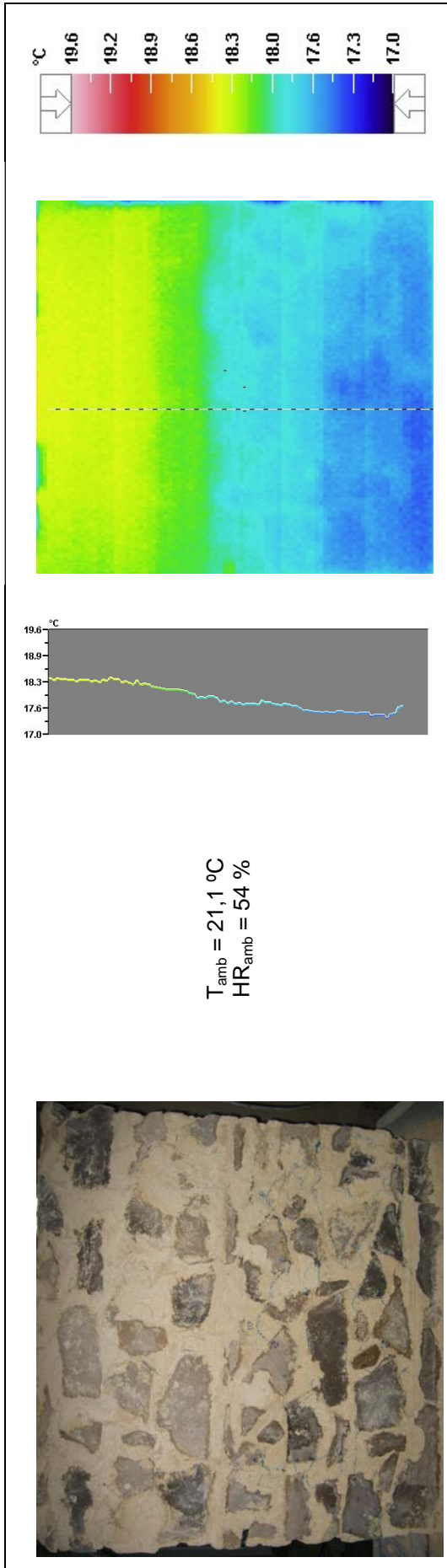


Fig. I.7 – Fotografia e termograma da maquete após 1008 h de ensaio

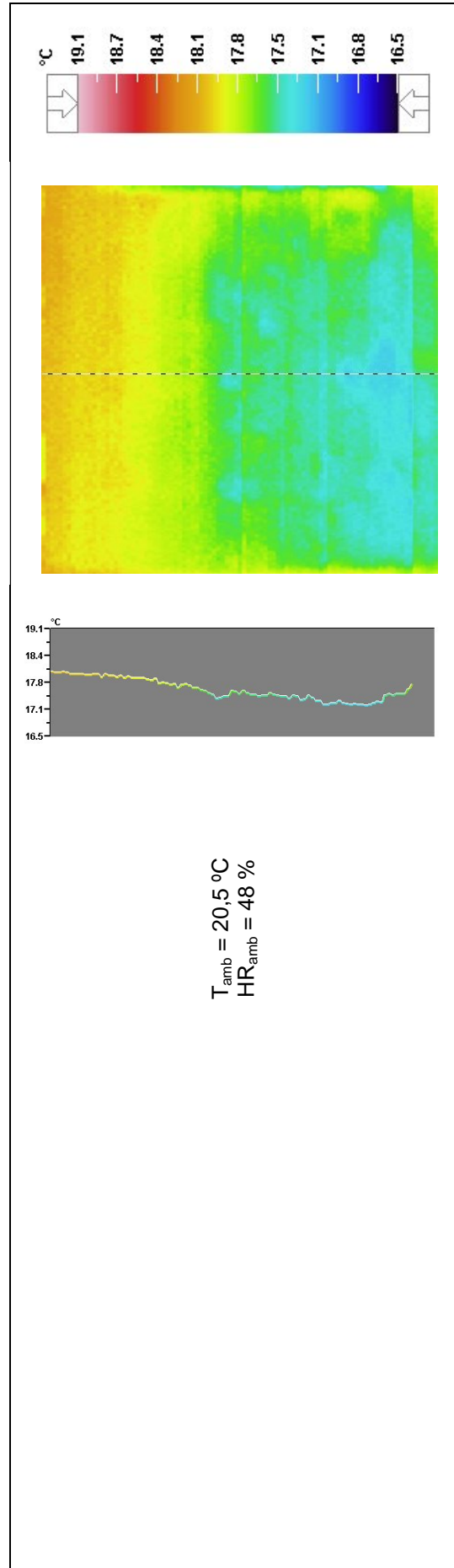
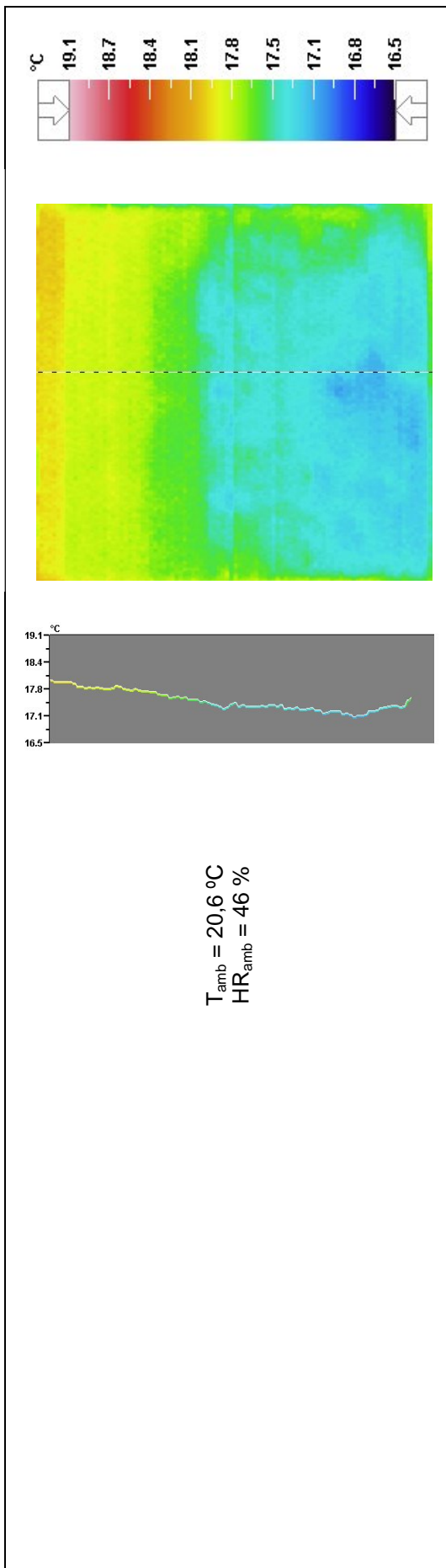
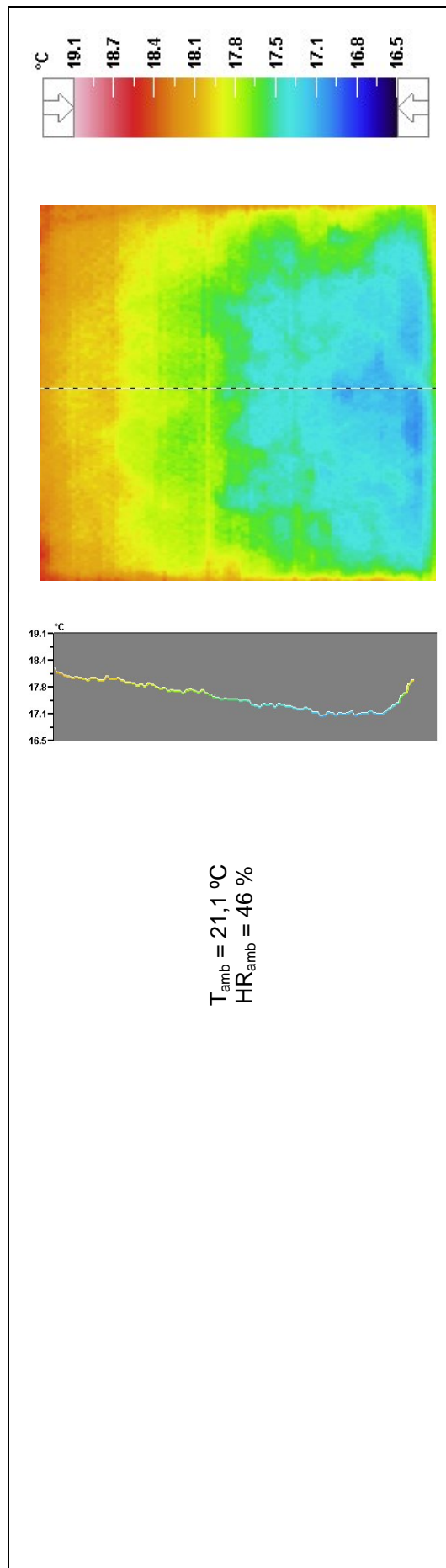


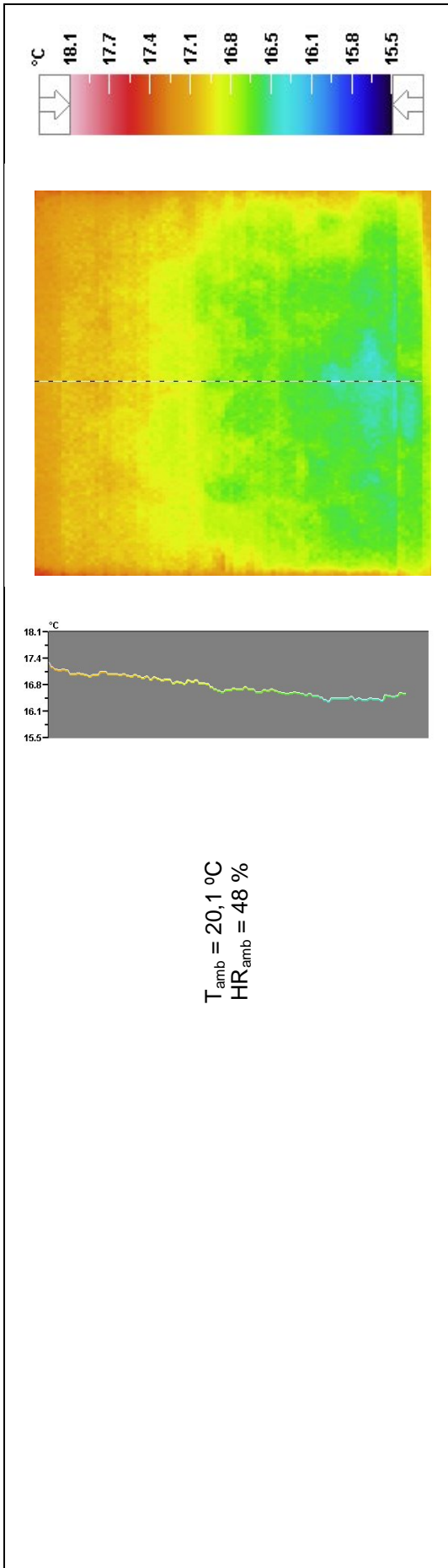
Fig. I.8 – Termograma da maquete após 1032 h de ensaio



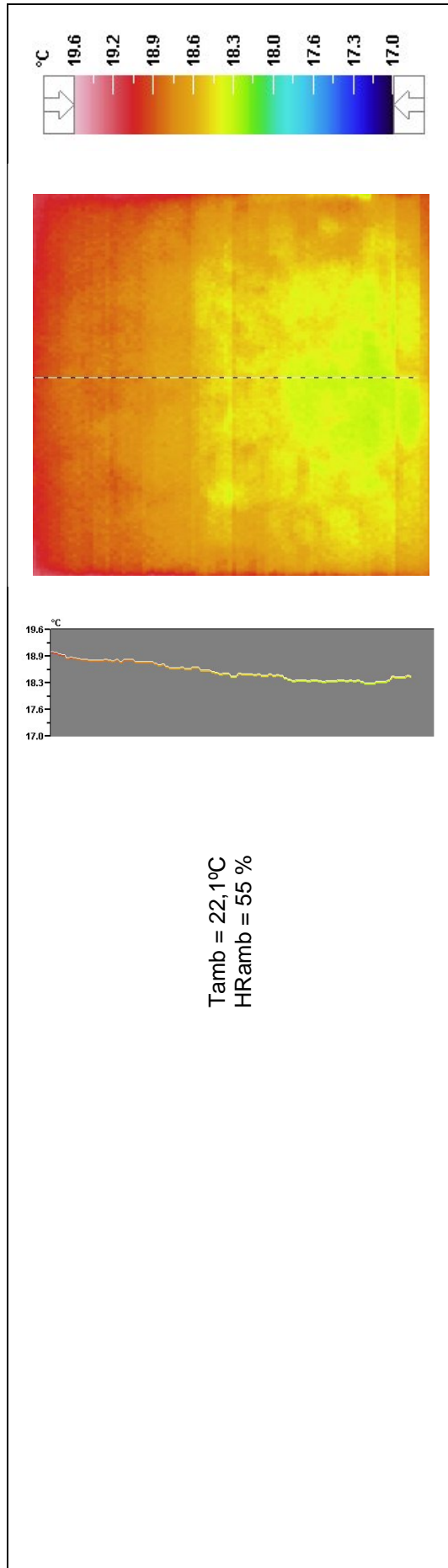
**Fig. I.9** – Termograma da maquete após **1056 h** de ensaio



**Fig. I.10** – Termograma da maquete após **1080 h** de ensaio

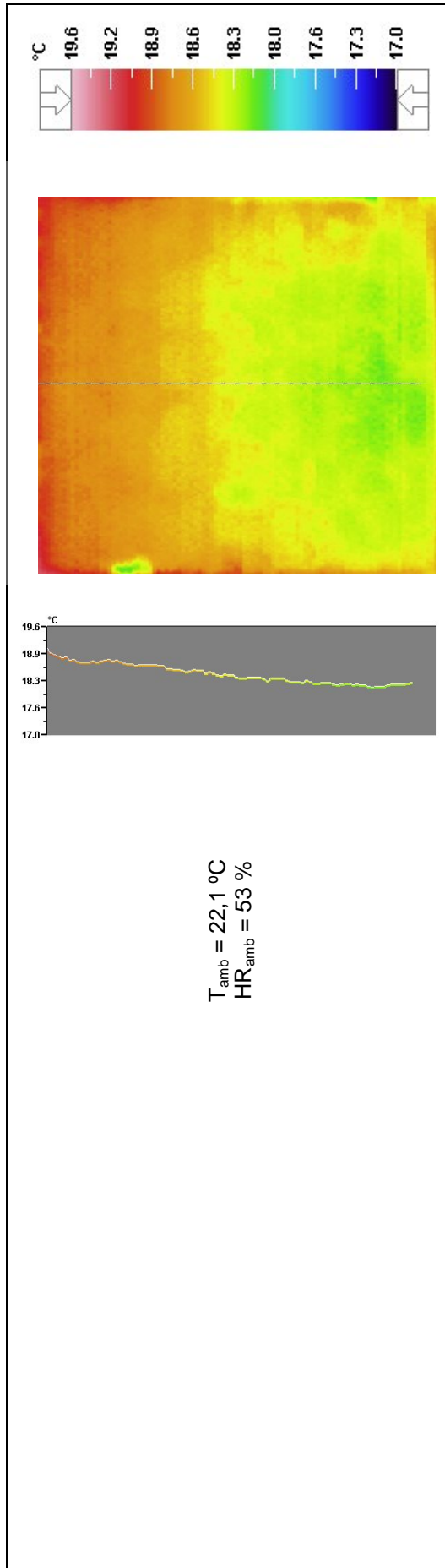


**Fig. I.11** – Termograma da maqueta após 1152 h de ensaio



**Fig. I.12** – Termograma da maqueta após 1225 h de ensaio





**Fig. I.13** – Termograma da maqueta após 1240 h de ensaio

