

# **AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DO ETICS**

**FERNANDO PEDRO FERNANDES PEREIRA**

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

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

FEVEREIRO DE 2009



## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009**

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 - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.



Aos meus Pais

*O mistério não é um muro onde a inteligência esbarra,  
mas um oceano onde ela mergulha.*

*Gustav Thibon*



## **AGRADECIMENTOS**

Após finalizar este trabalho, gostaria de manifestar o meu sincero agradecimento a todos que, de diferentes formas, contribuíram para a sua realização. Contudo, não posso deixar de salientar os intervenientes mais activos:

Quero realçar em primeiro lugar o Professor Nuno Ramos pelo seu apoio, pela sua amizade, disponibilidade e saber, pelo seu incansável apoio e pela enorme motivação transmitida quando mais precisava, pois sem ele este trabalho não teria sido possível;

Destaco também a Eng.<sup>a</sup> Eva Barreiro pela sua disponibilidade e atenção, pela partilha de conhecimento e de equipamento e pelo material fornecido;

Agradeço ao Eng.<sup>o</sup> Nuno Machado pela paciência e disponibilidade na realização de alguns ensaios assim como a partilha de informação;

À Eng.<sup>a</sup> Marisa pela partilha de conhecimento;

Ao LFC, pelo espaço e equipamento disponibilizado;

À ARALAB, Lda, nas pessoas do Eng.<sup>o</sup> José Rosmaninho e do Sr. Zacarias Ferreira cujo apoio possibilitou a rápida resolução de contratempos relacionados com a câmara climática;

Aos meus pais pela constante atenção e preocupação, pela força que me deram durante todo o trabalho e pela leitura atenta do texto;

À Ana, pelo apoio, incentivo e carinho dado, pela ajuda essencial na tradução do resumo e por toda a disponibilidade demonstrada numa altura em que poucas pessoas estavam dispostas a fazê-lo;

Por último, aos meus amigos pela preocupação demonstrada e pela disponibilidade incondicional oferecida.



## RESUMO

As crescentes preocupações com a racionalização dos custos, com a mudança de estratégia construtiva (privilegiando-se a reabilitação em detrimento das demolições), as crescentes exigências ao nível da relação preço/durabilidade e a diminuição dos gastos energéticos motivada quer por preocupações gerais da população como por imposição dos governos, impulsionam a utilização de novas soluções construtivas para as envolventes exteriores dos edifícios das novas quais se destaca o ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems with rendering – Sistema de Reboco Delgado Armado sobre Isolamento Térmico Exterior).

O ETICS apresenta-se como uma tecnologia com grandes vantagens ao nível da higrotérmica devido à colocação estratégica do isolamento térmico do lado exterior do suporte estrutural da parede. É uma solução construtiva que implica um investimento inicial baixo e uma manutenção/reparação fácil de executar enquanto a durabilidade do suporte aumenta devido à diminuição da sua exposição a grandes variações térmicas.

Para se conhecer melhor esta nova tecnologia, desenvolveu-se um estudo inicial teórico sobre a documentação normativa seguida por ela. Através de todos os documentos analisados destacou-se a ETAG 004 como sendo o único meio legal elaborado pela União Europeia para servir de guia para a aprovação laboratorial de todos os produtos que queiram entrar no mercado Europeu catalogados como uma solução construtiva ETICS.

Pretendeu-se também com este trabalho estudar experimentalmente, através de um conjunto de ensaios na câmara climática disponível no Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP), a durabilidade de um provete, com a tecnologia ETICS instalada, por intermédio da elaboração de um envelhecimento acelerado e dos seguintes ensaios de arrancamento e de choque de um corpo rígido.

Com o objectivo de avaliar o desempenho térmico do mesmo provete elaboraram-se alguns ensaios na câmara climática, apresentando-se neste trabalho a metodologia seguida para a determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica. Os estudos do comportamento térmico também abrangeram o estudo do provete para o estado de equilíbrio e para o regime dinâmico quando sujeito a determinadas temperaturas.

Palavras-Chave: ETICS, ETAG 004, Desempenho térmico, Durabilidade, Envelhecimento acelerado, Determinação experimental.



## **ABSTRACT**

The growing preoccupation with the costs, with the change of strategies (which is more important the rehabilitation than the demolition), the importance of the relation price/durability and less energetic costs due to people's or government's concern allow us to use new construction solutions to the outside of buildings like ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems with rendering).

ETICS is a new technology with advantages in hygrothermal because it has a strategic position of the insulation product in the outside of the wall structure. It's a new construction solution which means a low level of investment at the beginning and an easy maintenance while the substrate's durability increases due to the less thermal variations exposure.

In order to know better this new technology, it has been developed an initial theoretical study about a normative documentation. Of every document studied, it has stand out ETAG 004 because it's the only legal method elaborated by the European Union which can be used as a manual to the laboratory approval of every product that wants to enter into the European market catalogued as an ETICS construction solution. This work was accomplished through an experience in a climatic camera in the Physics of Construction's laboratory in the Engineering Faculty of the Oporto's University. The main subject was the study of a sample's durability with ETICS technology and an accelerated ageing followed by bond strength testes and a collision of a hard corp.

With the purpose of evaluating the thermal sample's performance it has been developed some tests with the climatic camera, introducing the method concerning the thermal transmission's coefficient of the experimental determination. The thermal development studies have also influenced the steady-state and the dynamic state of the sample when it is under certain temperatures.

Key words: ETICS, ETAG 004, Thermal behaviour, Durability, Experimental determination.



## RESUMEN

Las crecientes preocupaciones con la racionalización de los costes, con el cambio de estrategia (en la cual es más importante la rehabilitación y no la demolición) y la importancia de la relación precio/durabilidad así como la disminución de los gastos energéticos debido a la preocupación de la población o del gobierno, nos permite utilizar nuevas soluciones constructivas para el exterior de los edificios como el ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems with rendering - Sistema de aislamiento térmico por el exterior con revoco).

El ETICS es una nueva tecnología con muchas ventajas respecto al nivel de la higrótérmica porque tiene una posición estratégica en el aislamiento térmico del lado exterior en el soporte de la estructura de la pared. Es una solución constructiva, la que implica al principio un nivel bajo de investimento y una manutención/repación fácil de ejecutarse pues la durabilidad del soporte aumenta debido a la disminución de su exposición a grandes variaciones térmicas.

Para que se conozca mejor esta nueva tecnología, se ha desenvuelto un estudio teórico acerca de una documentación normativa seguida por ella. A través de todos los documentos analizados se ha destacado la ETAG 004 como siendo el único medio legal elaborado por la Unión Europea para que sirviera de manual para la aprobación del laboratorio de todos los productos los cuales quisieran entrar en el mercado europeo catalogados como una solución constructiva ETICS. Se logró también con este trabajo y a través de una experiencia en el laboratorio de Física de Construcciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Porto ensayos en una cámara climática, estudiar la durabilidad de un maqueta, con la tecnología ETICS instalado, con la elaboración de un acelerado envejecimiento seguida de ensayos de arrancamiento y colisión de un cuerpo rígido.

Con el propósito de evaluar el desempeño térmico del ETICS se han elaborado algunos ensayos en la cámara climática, presentándose en este trabajo la metodología seguida por la determinación experimental del coeficiente de transmisión térmica. Los estudios del comportamiento térmico también han afectado el estudio del estado de equilibrio y el estado dinámico de la maqueta cuando está sometido a determinadas temperaturas.

Palabras clave: ETICS, ETAG 004, Desempenho térmico, Durabilidad, Determinación experimental.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>RESUMEN</b> .....	vii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. ENQUADRAMENTO</b> .....	1
<b>1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS</b> .....	3
<b>1.3. ESTRUTURA</b> .....	4
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	5
<b>2.1. ENQUADRAMENTO DO ETICS NOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DAS FACHADAS EM PORTUGAL</b> .....	5
2.1.1. EVOLUÇÃO DAS FACHADAS OPACAS EM PORTUGAL.....	5
2.1.2. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR.....	6
2.1.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ETICS.....	7
2.1.4. VANTAGENS DO ETICS.....	7
<b>2.2. APROVAÇÃO TÉCNICA DO ETICS</b> .....	8
2.2.1. ENQUADRAMENTO DA APROVAÇÃO TÉCNICA.....	8
2.2.2. ETAG 004.....	10
2.2.3. CONSTITUINTES DO SISTEMA.....	17
<b>2.3. PATOLOGIAS FREQUENTES NO ETICS</b> .....	18
2.3.1. INCIDÊNCIA DAS PATOLOGIAS.....	18
2.3.2. RELEVÂNCIA DOS ENSAIOS DE HOMOLOGAÇÃO PARA A PREVENÇÃO DE PATOLOGIAS.....	19
<b>3. INFRA-ESTRUTURA EXPERIMENTAL</b> .....	21
<b>3.1. INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>3.2. CÂMARA CLIMÁTICA FITOCLIMA 1000 EDTU, CÂMARA VISITÁVEL E PORTA PROVETES</b> ....	21
<b>3.3. PROVETE</b> .....	27
<b>3.4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO</b> .....	28
<b>3.5. APARELHOS PARA ENSAIOS MECÂNICOS</b> .....	33
3.5.1. Ensaio de arrancamento.....	33
3.5.2. Ensaio de choque de um corpo rígido.....	34
<b>4. DESEMPENHO TÉRMICO</b> .....	37

4.1. INTRODUÇÃO .....	37
4.2. AVALIAÇÃO NUMÉRICA .....	37
4.3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA .....	39
4.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PROVETE NO ESTADO DE EQUILÍBRIO E EM REGIME DINÂMICO.....	47
4.5. ANÁLISE DAS POTENCIALIDADES DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO .....	55
4.6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	58
<b>5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO .....</b>	<b>65</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	65
5.2. CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO ADOPTADO .....	65
5.3. ENSAIO DE ARRANCAMENTO .....	70
5.4. ENSAIO DE CHOQUE DE UM CORPO RÍGIDO .....	79
5.5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	82
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
6.2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS .....	85
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Evolução Histórica das paredes de fachada [10].....	6
Fig. 2 – Distribuição do uso dos diferentes tipos de isolamento pelo exterior em França no ano de 1994 [10].....	7
Fig. 3 – Testes a executar mediante a colocação das fixações mecânicas.....	15
Fig. 4 – Diversos Componentes de uma parede ETICS e suporte [17].....	18
Fig. 5 – Distribuição da ocorrência de diversas patologias no ETICS [10].....	19
Fig. 6 – Câmara climática Fitoclima 1000 EDTU .....	22
Fig. 7 – Ligação da câmara climática à câmara visitável.....	22
Fig. 8 – Quadro principal do ecrã táctil do sistema ClimaPlus V .....	23
Fig. 9 – Pormenor da ligação da câmara visitável à Fitoclima1000 EDTU.....	24
Fig. 10 – Porta da câmara visitável e acessório móvel porta provetes.....	25
Fig. 11 – Provete e os dois passa-muros do lado interior da câmara visitável.....	25
Fig. 12 – Passa-muros vistos do lado exterior .....	26
Fig. 13 – Dispositivo móvel do de colocação provete .....	26
Fig. 14 – Provete ETICS evidenciando os dois revestimentos finais aplicados .....	28
Fig. 15 – Medidores e registadores de humidade relativa e temperatura do ar .....	29
Fig. 16 – Esquema da distribuição dos termopares no lado exterior do provete.....	29
Fig. 17 – Esquema da distribuição dos termopares no perfil do provete.....	30
Fig. 18 – Esquema da distribuição dos termopares no lado interior do provete.....	30
Fig. 19 – Termopar do tipo T.....	31
Fig. 20 – Fluxímetro .....	31
Fig. 21 – Esquema da distribuição dos fluxímetros relativamente às heterogeneidades do suporte...	32
Fig. 22 – Registadores de dados .....	33
Fig. 23 – Motor-reductor e dinamómetro .....	33
Fig. 24 – Pastilhas metálicas circulares com 5 cm de diâmetro e cola à base de resinas epoxi .....	34
Fig. 25 – Aparelho Martinet Baronnie .....	35
Fig. 26 – Registos obtidos através dos termopares colocado no interior da câmara climática a 26°C	40
Fig. 27 – Registos obtidos através dos termopares colocado no interior da câmara climática a 35°C	41
Fig. 28 – Registos obtidos através dos termopares colocado no exterior da câmara climática a 26°C	42
Fig. 29 – Registos obtidos através dos termopares colocado no exterior da câmara climática a 35°C	42
Fig. 30 – Evolução de U quando a temperatura da câmara climática é igual a 26°C .....	46
Fig. 31 – Evolução de U quando a temperatura da câmara climática é igual a 35°C .....	46

Fig. 32 – Ciclo adoptado para o estudo do comportamento dinâmico do ETICS .....	48
Fig. 33 – Perfil de temperaturas em equilíbrio do provete a 35°C e a 5°C .....	49
Fig. 34 – Perfil de temperaturas em equilíbrio do provete a 10°C e a 26°C .....	49
Fig. 35 – Estudo da transição do patamar de 35°C para 5°C .....	50
Fig. 36 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 35°C para 5°C.....	51
Fig. 37 – Estudo da transição do patamar de 5°C para 10°C .....	51
Fig. 38 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 5°C para 10°C.....	52
Fig. 39 – Estudo da transição do patamar de 10°C para 26°C .....	52
Fig. 40 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 10°C para 26°C.....	53
Fig. 41 – Diferença entre a temperatura interior e a $t_{si}$ média registada nos termopares interiores.....	53
Fig. 42 – Diferença entre a $t_{se}$ média registada nos termopares exteriores e a temperatura média exterior .....	54
Fig. 43 – Evolução da temperatura exterior quando a temperatura programada interior era de 35°C e 5°C .....	54
Fig. 44 - Evolução da temperatura exterior quando a temperatura programada interior era de 10°C e 26°C.....	55
Fig. 45 – Esquema representativo da potência e perdas do equipamento utilizado .....	56
Fig. 46 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 35°C para 5°C ..	59
Fig. 47 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 5°C para 10°C ...	60
Fig. 48 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 10°C para 26°C .	61
Fig. 49 – Evolução da temperatura e humidade relativa.....	67
Fig. 50 – Ciclo de envelhecimento adoptado e ciclo real.....	68
Fig. 51 – Colocação da cola epoxi na pastilha metálica circular.....	70
Fig. 52 – Mistura dos dois tipos de cola .....	71
Fig. 53 – Pastilhas fixadas ao provete.....	71
Fig. 54 – Execução de cortes no provete após a secagem da cola.....	72
Fig. 55 – Esquema de princípio da fixação da pastilha metálica ao suporte .....	72
Fig. 56 – Acoplagem do motor-reductor e dinamómetro.....	73
Fig. 57 – Posicionamento das amostras utilizadas nos ensaios de arrancamento .....	74
Fig. 58 – Pormenor da armadura de fibra de vidro deficientemente cortada.....	75
Fig. 59 – Amostras referentes aos ensaios A1 e A2 .....	76
Fig. 60 – Amostras referentes aos ensaios B1 e B2 .....	77
Fig. 61 – Amostras referentes aos ensaios C1 e C2.....	77
Fig. 62 – Amostras referentes aos ensaios D1 e D2.....	77

Fig. 63 – Amostras referentes aos ensaios E1 .....	77
Fig. 64 – Amostras referentes aos ensaios F1 e F2 .....	78
Fig. 65 – Amostras referentes aos ensaios G3 e G4 .....	78
Fig. 66 – Amostras referentes aos ensaios H3 e H4 .....	78
Fig. 67 – Colocação da esfera à altura normalizada.....	80
Fig. 68 – Impacto do corpo rígido no provete após o pêndulo ser largado .....	80
Fig. 69 – Ensaio na parede com revestimento cimentício .....	81
Fig. 70 – Ensaio na parede com RPE .....	82
Fig. 71 – Espessura do reboco delgado armado do revestimento cimentício .....	82
Fig. 72 – Espessura do reboco delgado armado do RPE.....	83
Fig. 73 – Evolução da força de ligação entre a camada base e o isolamento térmico.....	84



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Requisito Essencial 1 .....	10
Tabela 2– Requisito Essencial 2 .....	10
Tabela 3 – Requisito Essencial 3 .....	11
Tabela 4.1 – Requisito Essencial 4 .....	12
Tabela 4.2 – Requisito Essencial 4 .....	13
Tabela 4.3 – Requisito Essencial 4 .....	14
Tabela 5 – Requisito Essencial 5 .....	16
Tabela 6 – Requisito Essencial 6 .....	16
Tabela 7 – Aspectos de durabilidade e aptidão à utilização durante a vida útil do sistema .....	17
Tabela 8 – Desvios das medições obtidas através dos termopares colocados na superfície interior do provete.....	41
Tabela 9 – Desvios das medições obtidas através dos termopares colocados na superfície exterior do provete.....	43
Tabela 10 – Sequência do registo de dados .....	44
Tabela 11 – Valores médios da densidade de fluxo para cada fluxímetro utilizado.....	45
Tabela 12 – Valores médios do coeficiente de transmissão termica para cada fluxímetro utilizado ....	45
Tabela 13 – Valores obtidos através de todos os termopares sujeitos à mesma temperatura .....	47
Tabela 14 – Correção obtida para cada um dos termopares.....	47
Tabela 15 – Valores obtidos para a Resistência Superficial interior e exterior .....	61
Tabela 16 – Valores utilizados para uma referência qualificativa dos diversos U.....	62
Tabela 17 – Comparação do U obtido experimentalmente com os valores regulamentares ou de referência.....	63
Tabela 18 – Ciclo descrito em [25] .....	67
Tabela 19 – Níveis de envelhecimento do ciclo adoptado .....	69
Tabela 20 – Ciclo calor/frio referido em [16] .....	69
Tabela 21 – Ensaios de arrancamento elaborados .....	74
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de arrancamento.....	76
Tabela 23 – Tensão média de ruptura média por revestimento final.....	79
Tabela 24 – Critérios para a categorização do ETICS .....	80
Tabela 25 – Resultados obtidos dos ensaios de choque de um corpo rígido .....	81
Tabela 26 – Evolução da área das amostras do provete arrancadas .....	83
Tabela 27 – Categorização dos revestimentos finais aplicados no provete em estudo .....	84



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área [ $m^2$ ]

U – coeficiente de transmissão térmica [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$\gamma$  – densidade/peso volúmico [ $Kg/m^3$ ]

R – resistência térmica [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

P – pressão [MPa]

t – temperatura [ $^\circ C$ ]

HR – humidade relativa [%]

F – força [N]

E – energia [Joules]

e – espessura [m]

$R_{si}$  – resistência térmica superficial interior [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_{se}$  – resistência térmica superficial exterior [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$\lambda$  – condutibilidade térmica [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

F – densidade de fluxo [ $W/m^2$ ]

$t_{si}$  – temperatura superficial interior [ $^\circ C$ ]

$t_{se}$  – temperatura superficial exterior [ $^\circ C$ ]

$\alpha_s$  – coeficiente de absorção da radiação solar

$R_i$  – radiação solar global incidente [ $W/m^2$ ]

$h_e$  – condutância térmica superficial exterior [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$S_d$  – espessura da camada de ar de difusão equivalente [m]

DPC – Directiva dos Produtos da Construção

EOTA – European Organisation of Technical Approvals

ETAG – European Technical Approvals Guidelines

UE – União Europeia

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems with rendering

EC – Eurocódigo

LFC – Laboratório de Física das Construções

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

UEAtc – União Europeia para a aprovação da tecnologia na construção

CE – Comunidade Europeia

ETA – European Technical Approvals

CEN – Comité Europeu de Normalização

CUAP – Common Understanding of Assessment Procedure

EPS – Poliestireno Extrudido Moldado

XPS – Poliestireno Extrudido Expandido

MW – Lã Mineral

RPE – Revestimento Plástico Espesso

RC – Revestimento Cimentício

ER – Requisito essencial

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Uma das menos discutidas ferramentas para melhorar a sustentabilidade da sociedade é o aumento da durabilidade dos produtos, em especial dos produtos da construção e seus componentes. Por outro lado, existe na sociedade actual uma crescente mediatização das preocupações energéticas para se atingir o equilíbrio entre a natureza e a actividade humana, embora o sector da construção não se perfilasse no topo deste tema.

O conceito de durabilidade é definido de forma distinta em diversos documentos normativos embora todos eles estejam intrinsecamente ligados. De acordo com diversas definições, entende-se que o estudo da durabilidade exige um conhecimento apropriado das propriedades dos materiais, dos componentes da construção e das características dos ambientes a que estes vão estar sujeitos de modo que, quando exposto aos agentes e mecanismos de degradação, o edifício ou os seus elementos igualem ou excedam os requisitos mínimos de desempenho para um período de tempo definido [1] e [2].

A durabilidade dos materiais de construção tem diversos campos de influência, dos quais se destacam os ambientais, económicos e sociais.

No campo ambiental, é evidente que o aumento da durabilidade implicará menor necessidade de produtos de reposição ou de manutenção. O elevado consumo de recursos materiais é um dos maiores problemas ambientais da construção. A sua extracção resulta geralmente na destruição de ecossistemas e redução dos stocks existentes, sendo estes cada vez menores. Isto vale inclusivamente para produtos renováveis, como a madeira: uma vez que a terra fértil é limitada e o crescimento das árvores se processa lentamente.

Quanto maior for a vida útil dos materiais, menores são a quantidade de resíduos degradados e menor a produção dos seus substitutos. Menores os problemas ambientais, sociais e económicos derivados da recolha, armazenamento e decomposição/reciclagem do lixo.

Por outro lado a produção e a colocação dos produtos para a reabilitação consomem energia, o que implica impactos ambientais, maior consumo de matérias-primas, e gera poluentes diversos. A actividade da construção é responsável por uma parcela significativa dos gases de efeito estufa e outros poluentes.

Do ponto de vista macroeconómico, aumentar a durabilidade incrementa a competitividade, pois quanto maior a vida útil, menor é o custo do serviço que um produto presta por unidade de tempo,

menores são os investimentos na reabilitação de partes degradadas, o que reduz os custos de manutenção.

Existem benefícios sociais no aumento da durabilidade, principalmente no que respeita à obsolescência inerente à exposição aos agentes de degradação que muitas vezes leva à substituição de um produto que já não agrada do ponto de vista arquitectónico, apesar de ainda não ter atingido a sua degradação física.

Como tal, surge a necessidade de se pensar na fase de projecto na durabilidade, seleccionando materiais resistentes ao ambiente em questão e detalhando o projecto de forma a proteger os materiais dos agentes de degradação conforme as suas especificidades. A durabilidade pode ser assim entendida como uma propriedade não só do material, mas também como resultado do projecto [1] e [3].

No sentido de aumentar a durabilidade de todos os materiais, estão a ser desenvolvidos esforços nacionais e internacionais de normalização, como é o caso do DPC (Directiva dos Produtos da Construção) [4], que através do organismo EOTA (European Organisation of Technical Approvals) passou a incluir em todos os documentos que servem de guias para a aprovação de produtos de construção (ETAG - European Technical Approvals Guidelines), uma durabilidade mínima.

Numa perspectiva idêntica, para se atingir a sustentabilidade na construção é necessária consciência por parte dos diversos intervenientes na área, para que a solução construtiva adoptada não seja só a mais durável mas também a que possibilite o equilíbrio entre o dinheiro inicial investido e os gastos em energia efectuados durante todo o período de vida útil do edifício, essencialmente ao nível da climatização.

O acesso à energia é fundamental para a satisfação das exigências de conforto habitacional da sociedade. No entanto, a maior parte da energia usada no mundo provém de combustíveis fósseis como o carvão, o gás ou o petróleo, cujas reservas têm vindo a diminuir. Adicionalmente, a utilização intensiva destes combustíveis fósseis aumenta a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global do Planeta. O nosso estilo de vida pode estar ameaçado e o nosso futuro comprometido se não encontrarmos novas soluções. Por essa razão, multiplicam-se os esforços na promoção da utilização eficiente da energia [5] e [6].

Visando concretamente os edifícios, sabe-se que estes são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final consumida na Europa.

Parte importante do consumo total de energia nos edifícios está ligada à sua climatização, representando este sector 70% dos consumos finais de energia nos centros comerciais, 30% nos hipermercados e nos serviços hoteleiros e 25% dos edifícios habitacionais. Estas percentagens têm crescido anualmente com o aumento das exigências de conforto térmico dos utilizadores e dependem fundamentalmente da eficiência dos dispositivos de climatização, dos hábitos dos consumidores e das características construtivas dos edifícios [7] e [8].

No entanto, parte deste consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> – quase a totalidade do compromisso da UE (União Europeia) no âmbito do Protocolo de Quioto.

Para fazer face a esta situação, os Estados-Membros têm vindo a promover um conjunto de medidas com vista a promover a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios. É neste contexto que surge a Directiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios que, entre outros requisitos, impõe aos Estados membros o estabelecimento e actualização periódica de regulamentos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios novos e reabilitados, obrigando-os a exigir, nestes

casos, com poucas excepções, a implementação de todas as medidas pertinentes com viabilidade técnica e económica. Em Portugal esta directiva resultou na actualização do RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro de 1990 que ocorreu a 4 de Abril de 2006 com o Decreto-Lei n.º 80/2006 [9].

Como meio importante para a redução das trocas de calor através da envolvente dos edifícios e consequentemente a diminuição dos coeficientes de transmissão térmica da mesma, existem os isolantes térmicos que se caracterizam por apresentarem uma condutibilidade térmica inferior a  $0,065\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ . A influência do isolamento térmico, em zona corrente, é determinada pela sua espessura que é directamente proporcional à sua resistência térmica [10].

## 1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS

Na tentativa de acompanhar as preocupações actuais ao nível energético, surgiram nas sociedades vanguardistas diversas novas soluções construtivas. Destas novas tecnologias destacaram-se os isolamentos térmicos pelo exterior, ao invés da sua tradicional colocação entre os dois panos de alvenaria. Surge então o ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems with rendering) apresentando-se como uma solução construtiva, proveniente de uma tecnologia relativamente recente, para a envolvente dos edifícios. Devido a diversas vantagens que lhe vão sendo apontadas relativamente aos níveis abordados no capítulo anterior, a sua aplicação está a crescer tanto ao nível da reabilitação como das novas edificações [10]. Como tal, surge o presente trabalho com o objectivo de se estudar experimentalmente o desempenho deste sistema construtivo ao nível da durabilidade e da térmica. Para se atingir estes objectivos principais, definiu-se um conjunto de objectivos parciais que os compõem:

- Para se iniciar a presente dissertação decidiu-se elaborar um estado da arte sobre os documentos existentes para a aprovação técnica do ETICS, com especial relevo para a directiva de aprovação técnica europeia ETAG (European Technical Approvals Guidelines) 004 que serve como referência para esta solução construtiva.
- De acordo com um requisito específico da ETAG 004 pretende-se calcular o coeficiente de transmissão térmica de um provete com a solução construtiva referida aplicada;
- Sem estar contemplado na ETAG 004, decidiu-se realizar um estudo sobre o desempenho do ETICS, ao nível térmico, quando sujeito a um gradiente de temperaturas constante ou quando sujeito a variações;
- Ainda sem ligação directa com a ETAG 004 pretende-se realizar experiências laboratoriais para se determinar as resistências térmicas superficiais existentes;
- De novo no âmbito da ETAG 004, resolveu-se elaborar um programa de envelhecimento acelerado após o qual se efectuarão alguns estudos para aferir o desempenho ao nível da durabilidade do ETICS. Nestes estudos destacam-se os ensaios de arrancamento e os ensaios de choque de um corpo rígido;
- Com o intuito de se aumentar o conhecimento sobre os equipamentos disponíveis no Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) propõem-se neste trabalho uma metodologia de cálculo para as perdas térmicas da câmara climática utilizada, pelas paredes e pelas juntas que a constituem. Após a execução de todos os ensaios na câmara climática, pretende-se tirar algumas conclusões sobre as potencialidades da mesma para implementar os ensaios para aferir a aptidão ao uso do ETICS.

### 1.3. ESTRUTURA

Este trabalho pode ser dividido em dois estudos distintos:

- No primeiro é feita uma análise ao comportamento térmico de um provete, onde foi aplicado o ETICS, quando sujeito a diversas alterações de temperatura, assim como é calculado o seu coeficiente de transmissão térmica;
- No segundo estuda-se o comportamento do ETICS ao nível da durabilidade quando sujeito a um envelhecimento acelerado.

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos:

- No presente capítulo, Capítulo 1, faz-se uma breve introdução do tema, enquadrando a importância da durabilidade e da eficiência energética no contexto do sector da construção. Descrevem-se os interesses fundamentais e apresentam-se os principais objectivos a atingir com o estudo realizado;
- No Capítulo 2, de carácter essencialmente teórico, faz-se uma pequena abordagem histórica da evolução das soluções construtivas até ao aparecimento do ETICS. Descreve-se a solução construtiva central deste trabalho e apresenta-se o seu enquadramento normativo. Abordam-se as principais incidências patológicas e a relevância dos ensaios descritos na ETAG 004 para a prevenção das mesmas;
- No Capítulo 3, descrevem-se todos os meios utilizados para efectuar a campanha experimental e apresenta-se a disposição dos sistemas de monitorização no provete estudado;
- No Capítulo 4, de carácter experimental, descreve-se o primeiro estudo desenvolvido em laboratório, relativo ao desempenho térmico do ETICS, incluindo-se a descrição da metodologia que lhe serviu de base, do procedimento de ensaio e dos ensaios realizados. Apresentam-se os resultados obtidos e analisam-se exaustivamente, retirando-se algumas conclusões;
- No Capítulo 5, o segundo de carácter experimental, descreve-se o estudo experimental relativo à performance ao nível da durabilidade do ETICS, incluindo-se a descrição detalhada do procedimento de ensaio e dos ensaios realizados. Apresenta-se e analisa-se exaustivamente os resultados obtidos, retirando-se algumas conclusões;
- No Capítulo 6, sintetizam-se os resultados dos estudos realizados e apresentam-se as conclusões finais da dissertação.

## ESTADO DA ARTE

### 2.1. ENQUADRAMENTO DO ETICS NOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DAS FACHADAS EM PORTUGAL

#### 2.1.1. EVOLUÇÃO DAS FACHADAS OPACAS EM PORTUGAL

Em Portugal, até à década de 40 do século XX, o uso de um único pano nas fachadas exteriores era generalizado. Este pano era de elevada espessura e constituído por uma pedra natural, o granito, ou então tijolo maciço. Esta solução estava pensada essencialmente para desempenhar funções de suporte.

Na década posterior iniciou-se a construção de fachadas com paredes duplas, sendo o pano exterior em alvenaria de pedra e o interior em alvenaria de tijolo.

Nas décadas seguintes a implementação de novas soluções continuou, sendo que a grande alteração prendeu-se com o aparecimento das estruturas porticadas em betão armado, passando estes elementos a desempenhar funções de suporte, aligeirando-se assim em peso e em espessura as fachadas que a partir desta data passaram a ter como funções primordiais a estanquidade ao ar, impermeabilização à água, conforto higrotérmico e acústico.

Na década de 80 surgiram as primeiras paredes com um componente de reduzida condutibilidade térmica, o isolamento térmico. Nos inícios da sua aplicação, a sua localização no sistema era entre os dois panos de alvenaria, ocupando a totalidade do espaço aí existente ou apenas parte dele, ficando fixado ao lado exterior do pano interior de alvenaria e no espaço restante uma caixa-de-ar. Apesar dos significativos avanços para o conforto térmico desta solução, surgiram algumas patologias a ela associadas até então inexistentes, tais como as condensações superficiais e no interior dos elementos da envolvente. Estas patologias deveram-se à maior heterogeneidade das fachadas dos edifícios, agravado pelo facto da correcção de pontes térmicas ser ainda um problema não abrangido por esta solução.

Na década de 90, em 1991, com a entrada em vigor do RCCTE (Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios) estimulou-se o aumento do conforto térmico e o tratamento das pontes térmicas, minimizando-se as patologias na construção. No sentido de melhor cumprir este regulamento, começaram-se a aplicar sistemas com isolamento térmico pelo interior e pelo exterior, sendo que o primeiro é menos usual em novas construções mas útil em reabilitações, principalmente quando a fachada exterior da obra em causa tem um elevado valor arquitectónico [9] e [10].

Esta evolução pode ser visualizada na Fig. 1.

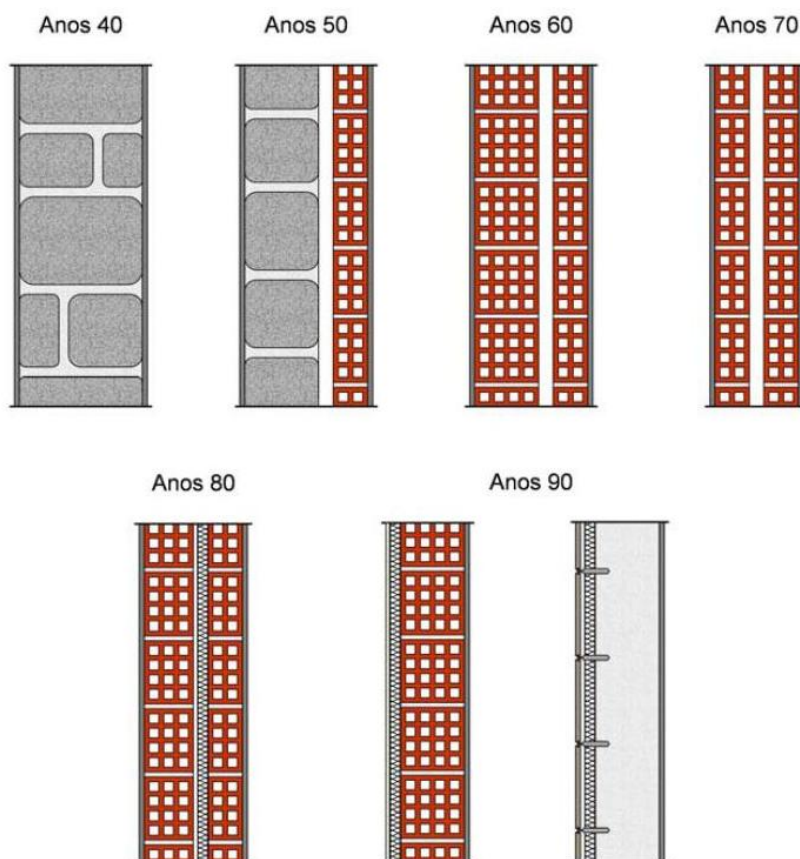


Fig. 1 – Evolução Histórica das paredes de fachada [10]

### 2.1.2. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR

A aplicação de isolamento térmico pelo exterior da fachada surge como uma óptima solução para fazer face às exigências presentes, quer por imposição do RCCTE quer pela mentalidade social ecológica em crescente, sendo ainda uma boa solução construtiva.

Existem na actualidade diversos sistemas de isolamento pelo exterior, estando a ser aplicados com frequência crescente nos países Europeus, em edifícios novos, mas sobretudo em reabilitações de edifícios cuja envolvente vertical apresente insuficiente isolamento térmico, aspecto degradado ou problemas de estanqueidade.

Este sistema é em geral constituído por um isolamento térmico estando este protegido por um reboco, sendo aplicado sobre um suporte estrutural que pode ser em alvenaria de tijolo, pedra ou betão. Existem no entanto diversos sistemas, podendo ser classificados em três grupos segundo [10]:

- Os revestimentos descontínuos fixados ao suporte através de uma estrutura intermediária, existindo um espaço de ar ventilado entre o revestimento e o isolamento;
- Os componentes prefabricados constituídos por um isolamento e um paramento fixados directamente ao suporte – “Vêture”;
- Os rebocos delgados armados directamente aplicados sobre o isolamento térmico – “ETICS” (External Thermal Insulation Composite Systems with rendering).

Destes grupos o que assumiu maior preponderância foi o ETICS como indica a Fig. 2.

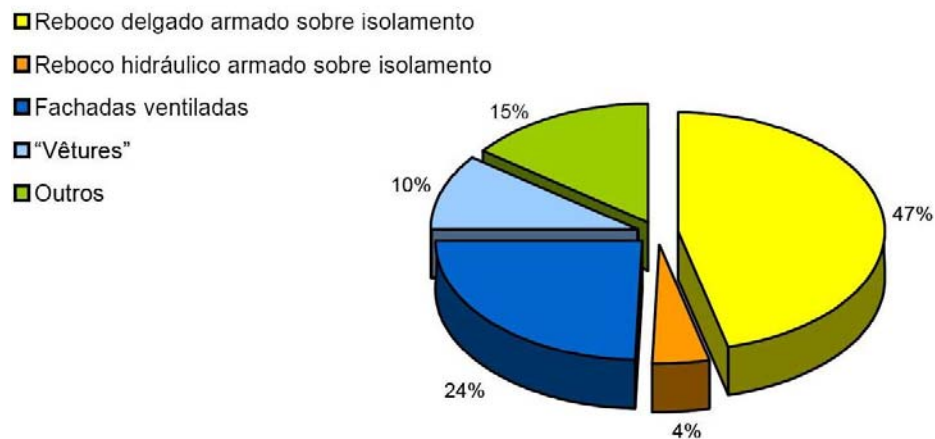


Fig. 2 – Distribuição do uso dos diferentes tipos de isolamento pelo exterior em França no ano de 1994 [10]

O ETICS pode ter duas variantes que diferem no modo de fixação do isolamento térmico ao suporte. Este pode ser colado ou fixado mecanicamente que pode ou não incluir uma colagem [10] e [11].

### 2.1.3. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ETICS

De acordo com alguns autores, o ETICS surgiu depois do fim da segunda grande guerra mundial como consequência de diversas pesquisas efectuadas, de forma a diminuir os consumos energéticos para o aquecimento das habitações, numa época de crise económica.

A sua primeira aplicação ocorreu na Alemanha e data da década de 50 do século XX, sendo aplicado nos Estados Unidos da América na década seguinte.

Com a crise energética do final dos anos 60 e início dos anos 70 o seu uso intensificou-se. Em Portugal o seu uso começou a ser generalizado apenas na década de 90, essencialmente em reabilitações [10].

### 2.1.4. VANTAGENS DO ETICS

A utilização do ETICS envolve inúmeras vantagens, destacando-se as seguintes, de acordo com [10] e [11]:

- Redução das pontes térmicas com a aplicação de isolamento térmico de forma contínua pelo exterior;
- Economia de energia devido à redução das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do ambiente interior;
- Diminuição do risco de condensações superficiais e internas;
- Aumento da inércia térmica interior dos edifícios, dado que a maior parte da massa das paredes se encontra pelo interior da camada de isolamento térmico. Este facto traduz-se na melhoria do conforto térmico de Inverno, por aumento dos ganhos solares úteis, e também de Verão devido à capacidade de regulação da temperatura interior;
- Extinção de um dos dois panos de alvenaria das paredes duplas, aumentando-se assim a área habitável;
- Redução do peso das paredes e das cargas permanentes sobre a estrutura;

- Melhoria da impermeabilização das paredes;
- Colocação em obra sem perturbação dos ocupantes, no caso de reabilitações de fachadas;
- Simplicidade no método construtivo;
- Aumento da durabilidade das fachadas, evitando que o suporte esteja sujeito a grandes variações térmicas;
- Tipo de sistema de isolamento pelo exterior mais económico;
- Facilidades na reparação de eventuais patologias, evitando incómodos para os moradores, uma vez que as reparações se efectuam maioritariamente pelo exterior do edifício.

## 2.2. APROVAÇÃO TÉCNICA DO ETICS

### 2.2.1. ENQUADRAMENTO DA APROVAÇÃO TÉCNICA

Em 1960 foi fundada a UEAtc (União Europeia para a aprovação da tecnologia na construção) por organismos representantes de diversos países europeus, com o objectivo de facilitar o intercâmbio de conhecimentos científicos e questões práticas entre os seus membros, tanto em construção em geral e sobre as práticas nacionais em particular. Outro grande objectivo passava por facilitar o procedimento de reconhecimento mútuo de normas nacionais, essencialmente ligadas a produtos “não tradicionais”, pelo procedimento de confirmação que adapta o documento original para as diferentes exigências nacionais, oferecendo aos fabricantes apoio nesse âmbito através de orientações técnicas [12] e [13].

Posteriormente em 1988 surgiu a directiva 89/106 DPC (Directiva dos Produtos de Construção) [4] para aproximar as disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos de construção. Desta directiva destacam-se os seguintes princípios:

- Imposição de requisitos relativos à segurança da construção, à saúde, à durabilidade, à poupança de energia, ao ambiente, aos aspectos económicos entre outros de interesse público;
- Consciência de que os referidos requisitos são objecto de exigências normativas nacionais e consequentemente são entraves às trocas comerciais no interior da CE (Comunidade Europeia) de produtos de construção;
- Necessidade de elaboração de documentos interpretativos para ser dada forma concreta aos requisitos essenciais nas normas harmonizadas ou outras especificações técnicas a nível europeu e ETA (aprovações técnicas europeias – ATE em português);
- Reconhecimento do CEN( Comité Europeu de Normalização) e do Cenelec (Comité Europeu de Normalização Electrotécnica) como organismos competentes para a adopção de normas harmonizadas, para que a troca de produtos de construção no mercado interno se processe correctamente;
- Desdobramento em classes de exigência os requisitos essenciais e o comportamento funcional dos produtos nos documentos interpretativos e nas especificações técnicas de modo a serem englobadas as diversas condições existentes nos Estados-membros;
- Permissão para o uso e para a comercialização de um produto se estiver conforme uma norma harmonizada, uma ETA, uma especificação técnica não harmonizada mas reconhecida a nível comunitário ou então se esse produto se afastar de especificações técnicas existentes e se for de reduzida importância no que respeita aos requisitos essenciais, a sua aptidão para uso pode ser certificada por recurso a um organismo aprovado, apresentando, qualquer dos casos referidos, a marcação “CE” que lhes permitirá a sua livre utilização na Comunidade;
- Considerando que, na ausência de normas harmonizadas e de aprovações técnicas europeias, as normas nacionais ou outras especificações técnicas não harmonizadas

podem ser reconhecidas como fornecendo uma base adequada para a presunção de que os requisitos essenciais estão preenchidos;

- Necessidade de assegurar a conformidade entre os produtos e as normas harmonizadas e com as aprovações técnicas não harmonizadas reconhecidas a nível europeu;
- Produtos cujas normas europeias não possam ser estabelecidas ou previstas dentro de um prazo razoável, ou produtos que se afastem substancialmente de uma norma, a respectiva aptidão para o uso pode ser comprovada por recurso às ETAG (directrizes comuns para a elaboração de aprovações técnicas europeias) sendo que as ETAG serão elaboradas a partir dos documentos interpretativos.

Surge também associado a esta directiva a EOTA (European Organisation of Technical Approvals) que consiste numa organização constituída por diversos organismos Europeus cuja missão é desenvolver uma metodologia comum para a concepção, e reconhecimento mútuo de ETA entre os Estados-membros, coordenar e elaborar ETAG e desenvolver os procedimentos comuns de apreciação específicos para determinados produtos CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure) servindo ambos como base para a concessão da ETA [4], [14] e [15].

A necessidade de elaboração de ETA provém da necessidade de regular a introdução no mercado Europeu de produtos de construção inovadores. Esta função específica está patente nas condicionantes que a DPC [4] impõe aos produtos passíveis de uma ETA:

- Produtos que se afastem significativamente de normas harmonizadas ou de normas nacionais aprovadas;
- Caso não exista uma norma harmonizada ou norma nacional aprovada nem esteja previsto na EOTA um mandato para a sua elaboração.

A ETA apresenta-se assim num âmbito diferente das Normas Europeias harmonizadas que traduzem o estado do conhecimento e reflectem a situação do mercado em maior escala. Ao contrário destas, a ETA, é uma especificação técnica de carácter individual, relativa a um ou mais produtos específicos do mesmo tipo produzidos por um determinado fabricante. Sendo que este produto ou produtos apresentam sempre uma inovação tecnológica e a complexidade a ela associada [14].

Como tal, a DPC [4] define que a EOTA deverá criar directrizes para a elaboração de ETA, nas quais constem determinados parâmetros:

- A lista de documentos interpretativos utilizados para a definição dos requisitos essenciais aplicáveis;
- Os requisitos essenciais que o produto terá que satisfazer;
- Os processos de ensaio exigíveis;
- O método de apreciação e de avaliação dos resultados dos ensaios;
- Os processos de controlo e comprovação de conformidade de todo o processo de fabricação;
- O prazo de validade da ETA.

A ETAG pode então ser resumida a uma base técnica para avaliação da aptidão para o uso de um produto para um destino. Uma ETAG não é, ela própria, uma especificação técnica segundo a DPC [14] e [15]. A DPC define que sempre que exista uma ETAG a elaboração de uma ETA será nela baseada.

### 2.2.2. ETAG 004

O guia para a aprovação técnica europeia 004, define:

- Os requisitos de desempenho para o ETICS, para a utilização como isolamento exterior das paredes do edifício;
- Os métodos de verificação utilizados para analisar os diversos aspectos de performance;
- Os critérios de avaliação utilizados para avaliar o desempenho para o uso destinado;
- As presumíveis condições para a concepção e execução.

As directivas UEAtc para a Homologação de Sistemas de Isolamento Térmico Exterior de Fachadas por Revestimento Delgado sobre Isolante, Junho de 1988 e UEAtc Guia Técnico para a Avaliação dos Sistemas de Isolamento Exterior com Lã Mineral, Abril de 1992 formaram a base essencial para a elaboração desta ETAG.

A aplicação e a satisfação das disposições de uma ETAG (exames, testes e métodos de avaliação) é um requisito para a elaboração de uma ETA e consequentemente uma presunção de aptidão de um produto para o uso definido. Isto diferencia uma ETAG das normas europeias harmonizadas, que são a base directa para a comprovação da conformidade.

Os requisitos previstos nesta ETAG são definidos em termos de objectivos e de acções relevantes a serem tidas em conta. Eles especificam valores e características, a conformidade com os quais dá a garantia de que as exigências estabelecidas são satisfeitas, onde quer que o estado da arte o permita, depois de terem sido confirmados como adequados para o produto particular pela ETA [16].

A ETAG 004 foi resumida nas tabelas 1 a 7 que se seguem nas quais se apresentou em destaque os ensaios que foram alvos de estudo nesta dissertação.

Tabela 1 – Requisito Essencial 1

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER1 Resistência mecânica e estabilidade		Incluídos no ER4	

Tabela 2 – Requisito Essencial 2

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER2 Segurança contra incêndios	Averiguar a Produção de fumo Averiguar a Projecção de faúlhas	Norma EN13501-1	O Sistema é classificado de A1 a F O regulamento nacional contra incêndios pode obrigar a colocação de fixações mecânicas

Tabela 3 – Requisito Essencial 3

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER3 Higiene, saúde e ambiente	Verificar a capilaridade	Teste de capilaridade	Absorção da água na camada base deverá ser $> 1\text{kg/m}^2$ e absorção do reboco delgado armado $< 1\text{kg/m}^2$
	Verificar se o revestimento final deverá ser sujeito a testes Higrotérmico		No caso de revestimentos finais não cimentícios e a absorção da água na camada base for $> 0,5\text{kg/m}^2$ , após 24h de teste, o revestimento final tem que ser submetido a teste Higrotérmico
	Verificar se o ensaio Congelamento/ Descongelação é necessário		O ensaio congelamento/ descongelamento é necessário se a absorção da camada base ou do reboco delgado armado após 24h for $> 0,5\text{kg/m}^2$
	Verificar se ocorrem bolhas ou descamação no revestimento final, fendas ou falhas associadas a juntas do isolamento térmico, destacamento da camada base ou do revestimento final, fendas permitindo entrada de água no isolamento térmico	<b>Envelhecimento Higrotérmico</b> (Testes Calor/Frio e Calor/Chuva)	As patologias não podem ocorrer durante ou no fim dos testes
	Verificar as patologias anteriores	Teste Congelamento/ Descongelação	Após a aplicação do método simulado não se podem verificar as patologias Após o teste ultra sónico o rácio do módulo dinâmico para a camada base tem que exceder 0,9
	Resistência do revestimento final ao impacto	<b>Impacto de um corpo rígido</b>  Teste de Perfuração	Dependendo do tamanho do diâmetro de impacto e da presença ou não de fendas nos pontos de impacto, o sistema é classificado em 3 níveis que representam diferentes probabilidades de exposição ao impacto num edifício
	Resistência à difusão do vapor de água	Difusão de vapor de água	A resistência à difusão de vapor de água do reboco delgado não deverá exceder o correspondente a um $S_d$ de 2m, caso o isolamento térmico seja plástico celular e 1m caso seja MW

Tabela 4.1 – Requisito Essencial 4

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
	O teste seguinte efectua-se sempre, independentemente do tipo de fixação usado		
	Testar a força da ligação do reboco delgado armado ao isolamento (Após Envelhecimento Higrotérmico)	<b>Ensaios de arrancamento</b>	A força da ligação deverá ser no mínimo de 0,08N/mm <sup>2</sup> ou então a ruptura acontecer no isolamento térmico
		Análise da concepção dos pormenores construtivos (norma EN ISO 13788)	Os pormenores construtivos deverão ser pensados de modo a evitar a penetração de água no interior do sistema incluindo condensações
		Análise da concepção dos Trabalhos	Os trabalhos deverão ser executados por trabalhadores especializados. Deve ser registado na ETA todos os detalhes dos procedimentos efectuados.
ER4 Segurança na utilização	Verificação se o suporte é adequado para a aplicação do ETICS	Análise do Suporte para a fixação adesiva	<p>O suporte deve ser resistente, deve estar seco e não deve conter materiais soltos</p> <p>O suporte pode ser novo e constituído por betão ou alvenarias desde que não contenha nenhum contaminante</p> <p>Outros tipos de suportes deveram ser submetidos a testes in-situ</p> <p>Suportes antigos poderão ter que ser alvo de uma preparação para a colagem do ETICS</p> <p>Quando há dúvidas sobre a qualidade de um suporte antigo, este deve ser submetido a testes in-situ</p> <p>Quando a suporte é submetido a testes in-situ a resistência à tracção deve ser no mínimo de 0,08N/mm<sup>2</sup></p>
		Análise do Suporte para a fixação mecânica	As paredes de betão (EC2) ou alvenaria (EC6) consideram-se que preenchem os requisitos. Para os outros substratos, a adequação tem de ser verificada por meio de testes in-situ, como descrito na directiva para plástico âncoras da EOTA

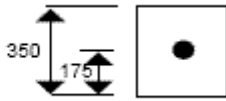
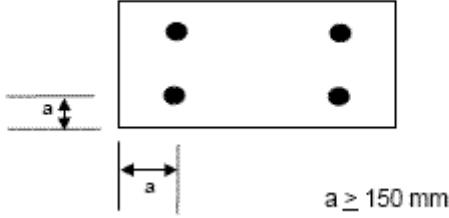
Tabela 4.2 – Requisito Essencial 4

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER4 Segurança na Utilização	Força das ligações parcialmente ou totalmente adesivas (não se considera o efeito das fixações mecânicas)	Força da ligação da camada adesiva ao suporte	Em condições secas: A força da ligação deverá ser pelo menos $0,25\text{N/mm}^2$ Após a imersão em água: A força da ligação deverá ser pelo menos $0,03\text{N/mm}^2$ após 2 horas e $0,08\text{N/mm}^2$ após 7 dias
		Força da ligação da camada adesiva ao isolamento térmico	Em condições secas: A força da ligação deverá ser pelo menos $0,08\text{N/mm}^2$ ou a falha ocorrer coesivamente no isolamento Após a imersão em água: A força da ligação deverá ser pelo menos $0,03\text{N/mm}^2$ após 2 horas e $0,08\text{N/mm}^2$ após 7 dias
		Teste de vento dinâmico	O teste seguinte efectua-se exclusivamente se o isolamento não for constituído por lã mineral nem por plástico celular.  Efectua-se este teste se o isolamento térmico não for constituído por lã mineral nem por plástico celular.  $R_d \geq S_d$ (com a introdução dos factores de segurança nacionais)

Tabela 4.3 – Requisito Essencial 4

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaio a realizar	Análise
ER4 Segurança na utilização	Força das fixações mecânicas atravessando somente o isolamento térmico (não se considera o efeito das fixações adesivas)	A execução dos testes seguintes depende das disposições construtivas representadas na Fig. 3.	
		Teste de arrancamento das fixações	A resistência das fixações mecânicas em condições secas ou húmidas, se apropriado, devem constar na ETA
		Teste do bloco de espuma	A resistência das fixações em N deve constar na ETA
		Teste do deslocamento	A ETA deverá conter uma expressão para calcular o comprimento da parede ou a distância das juntas de dilatação (L) $L = U_e / \epsilon_s + 10^{-5} \times \Delta T$ sendo $U_e$ a extensão do isolamento térmico, $\Delta T$ a variação da temperatura na camada base e $\epsilon_s$ o valor do encolhimento ponderado do isolamento quando condicionado 56 dias a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 5) \%$ de humidade relativa
		Os testes seguintes efectuam-se exclusivamente se o isolamento não for constituído por lã mineral nem por plástico celular.	
	Força das fixações mecânicas através da armadura (não se considera o efeito das fixações adesivas)	Teste de vento dinâmico	$R_d \geq S_d$ (com a introdução dos factores de segurança nacionais)
		Teste do deslocamento	Igual ao descrito em cima para o mesmo teste
		Teste do bloco de espuma	A resistência das fixações em N deve constar na ETA
		Teste do deslocamento	Igual ao descrito acima para o mesmo teste
		Os testes seguintes efectuam-se exclusivamente se o isolamento não for constituído por lã mineral nem por plástico celular.	
	Teste de vento dinâmico	$R_d \geq S_d$ (com a introdução dos factores de segurança nacionais)	
	Teste do deslocamento	Igual ao descrito acima para o mesmo teste	

1 – Ancoragens não colocadas no painel da junta

Provetes de teste	Método de teste
<p>(1a)</p> 	<p>Teste de arrancamento das fixações</p>
<p>or</p> <p>(1b)</p>  <p><math>a \geq 150 \text{ mm}</math></p>	<p>Teste do bloco de espuma</p>

2 – Ancoragens colocadas no painel da junta

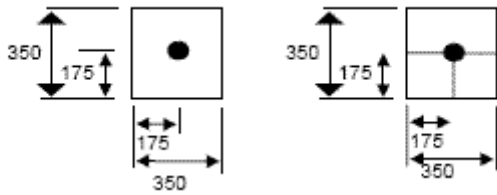
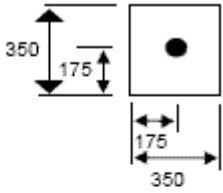
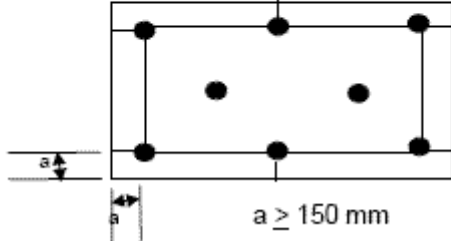
Provetes de teste	Método de teste
<p>(2a)</p> 	<p>Teste de arrancamento das fixações</p>
<p>or</p> <p>(2b)</p>  <p>and</p>	<p>Teste de arrancamento das fixações</p>
 <p><math>a \geq 150 \text{ mm}</math></p>	<p>Teste do bloco de espuma</p>

Fig. 3 – Testes a executar mediante a colocação das fixações mecânicas

Tabela 5 – Requisito Essencial 5

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER5 Protecção contra o ruído			Não considerado pela ETAG 004 dado que estes requerimentos devem ser satisfeitos por toda a parede incluindo o ETICS tal como as janelas e outras aberturas.

Tabela 6 – Requisito Essencial 6

Requisitos Essenciais (ER)	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar	Análise
ER6 Economia de energia e retenção de calor	Resistência Térmica	<b>Cálculo do coeficiente de transmissão térmica usando uma Hot-Box</b> segundo a norma ISO 8990	<p>Ao valor calculado soma-se uma variável <math>\Delta x</math> que depende das fixações mecânicas</p> <p><math>\Delta x = x_p \cdot n</math> sendo <math>x_p</math> 0.004W/°C quando as fixações são de aço galvanizado revestido com um material plástico e 0.002W/°C quando são de aço inoxidável e também revestidas com um material plástico e <math>n</math> representa o numero de fixações por m<sup>2</sup></p> <p>O valor da resistência térmica de todo o sistema tem que ser superior a 1m<sup>2</sup>.°C/W</p> <p>Este valor tem que estar contido na ETA</p>

Tabela 7 – Aspectos de durabilidade e aptidão à utilização durante a vida útil do sistema

Aspectos de durabilidade e aptidão à utilização durante a vida útil do sistema	Objectivo dos Ensaios	Ensaios a realizar e Análise
	Resistência à temperatura, à humidade e à retracção	<b>Os ensaios realizados para este ER já foram abordados em ER4. Trata-se do ensaio de teste da força de ligação entre a camada base e o isolamento térmico, após um ciclo de envelhecimento higrotérmico (Calor/Frio e Calor/Chuva)</b>

### 2.2.3. CONSTITUINTES DO SISTEMA

O ETICS é constituído por diversos componentes que são aplicados necessariamente sobre um suporte vertical da fachada exterior de um edifício, podendo este ser horizontal desde que não esteja exposto à precipitação.

O termo "suporte" refere-se a uma parede, que por si só já contém requisitos de resistência mecânica (resistência às cargas estáticas e dinâmicas) e estanquidade ao ar. O suporte pode estar rebocado, pintado, conter revestimentos orgânicos, minerais ou elementos cerâmicos, mas tem que existir uma preparação conveniente e a certificação do bom estado da sua aderência ao suporte de modo que a aplicação do ETICS seja viável. As paredes de suporte podem ser de dois tipos:

-Paredes em Alvenaria - construídas a partir de unidades de barro, cimento, silicato de cálcio, betão celular autoclavado ou pedra.

-Paredes de Betão - paredes constituídas por betão, feito in-situ ou pré-fabricado.

Os constituintes do ETICS são agrupados nos “componentes do sistema”. Estes componentes dividem-se no produto de colagem, no isolamento térmico e no reboco delgado armado que compreende a camada base, a armadura, o primário e o revestimento final [16].

O produto de colagem é utilizado para a preparação da cola que irá fixar o isolamento térmico ao suporte. Em geral, este produto é prefabricado, sendo apenas necessária a adição de água, um ligante, em geral resina, ou 30% do peso do produto em cimento Portland.

O isolamento térmico permitido por [16] pode ser constituído por materiais plásticos celulares, EPS (poliestireno expandido moldado) ou XPS (poliestireno expandido extrudado) por exemplo, lã mineral (MW) ou de outro tipo, desde que cumpram os requisitos estipulados. A sua principal função é conferir ao sistema propriedades de resistência térmica. A sua espessura é, como tal, variável e definida de acordo com o coeficiente de transmissão térmico desejável.

A camada base consiste num reboco que é realizado por múltiplas passagens directamente sobre o isolamento térmico, no qual estará totalmente embebida a armadura.

A armadura é normalmente constituída por redes de fibra de vidro, com protecção anti-alcálico incorporadas na camada base permitindo-lhe ganhar resistência mecânica, melhorando a resistência ao choque do reboco se reforçada.

A camada de primário é muito fina e à base de resinas em solução aquosa que é aplicado sobre a camada base e serve como preparação para a aplicação do revestimento final. Pode no entanto não existir.

Para revestimento final é normalmente usado um revestimento plástico espesso (RPE). Podendo ser utilizados outros revestimentos, desde que sejam testados convenientemente. Esta última camada funciona como uma proteção contra os agentes climáticos e é aplicada sobre a camada base ou sobre o primário caso exista. [16]

Como já foi referido no capítulo 2.1.2, para além do sistema de colagem do isolamento térmico ao suporte, existe outro auxiliado por fixações mecânicas que podem ser usadas temporariamente enquanto a cola não seca ou de forma permanente funcionando como sistema auxiliar de segurança caso o sistema descole.

A Fig. 4 representa a constituição usual de uma parede ETICS.

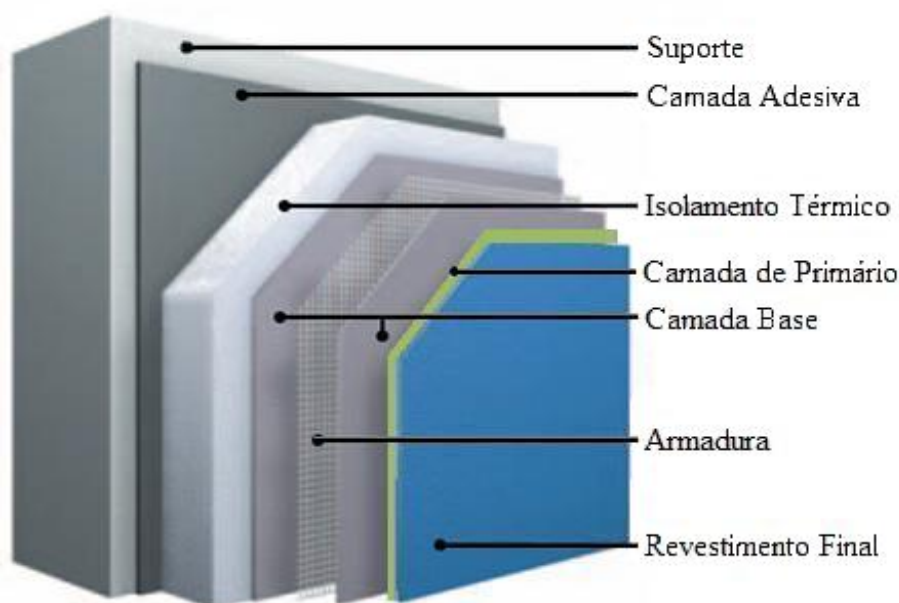


Fig. 4 – Diversos Componentes de uma parede ETICS e suporte [17]

## 2.3. PATOLOGIAS FREQUENTES NO ETICS

### 2.3.1. INCIDÊNCIA DAS PATOLOGIAS

Sendo o ETICS uma solução construtiva com componentes produzidos em obra, o desempenho futuro de todo o sistema depende das condições atmosféricas do momento de aplicação e secagem e do modo de aplicação do ETICS. Como tal, o ETICS está sujeito ao aparecimento de diversas patologias, sendo que a sua maioria tem como origem o incumprimento dos procedimentos adequados para a sua aplicação.

De todas as patologias verificadas destacam-se os destacamentos e/ou empolamentos do reboco e do revestimento final e as microfissuras, apesar da descolagem parcial e a queda generalizada do sistema apresentarem uma importante fatia nas patologias registadas. Outras patologias observadas mas de menor ocorrência estão associadas ao aspecto do revestimento final, às infiltrações através do sistema, ao aparecimento de bolores e algas, à degradação ao nível do piso térreo entre outras anomalias como pode ser observado na Fig. 5.

- Descolagem generalizada e queda do sistema
- Descolagem parcial do sistema
- Infiltrações através do sistema
- Microfissuração
- Destacamento e/ou empolamento do reboco e do revestimento final
- Bolores e algas
- Anomalias associadas aos aspecto do revestimento
- Degradação ao nível do r/c
- Outras anomalias

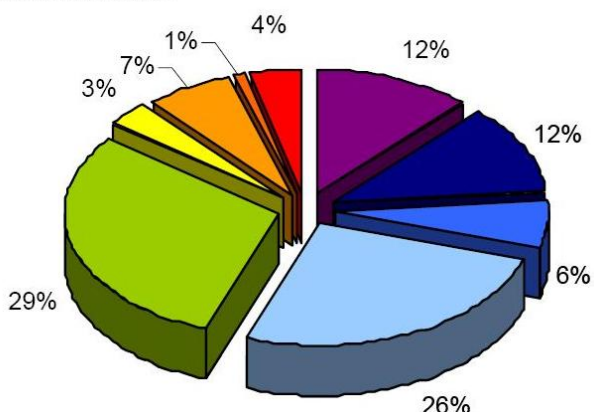


Fig. 5 – Distribuição da ocorrência de diversas patologias no ETICS [10]

A Fig. 5 representa a realidade Francesa, sendo espectável que para o caso Português as patologias associadas aos bolores e algas apresentem uma maior preponderância.

Nestas patologias a grande maioria deve-se ao incumprimento de alguns dos requisitos para a aplicação do ETICS, por falha da mão-de-obra ou pelo desrespeito das condições atmosféricas exigíveis. Nestes casos a sua prematura detecção pode ser efectuada por intermédio de alguns ensaios experimentais.

Quanto ao aparecimento de manchas resultantes do desenvolvimento de microorganismos, como algas e bolores, é algo que pode ser diminuído com a aplicação de biocidas incorporados no revestimento final, apesar deste método não ser completamente eficaz.

A degradação ao nível do piso térreo é resultado de alguma fragilidade na resistência ao choque que o sistema apresenta ao nível do revestimento final. Esta condicionante pode ser em parte desvalorizada uma vez que alguns edificios possuem ao nível do R/C estabelecimentos comerciais apresentando envidraçados na envolvente exterior. Existe no entanto uma selecção exigências para as paredes a este nível, sendo a sua armadura reforçada para maior protecção do sistema [10].

### 2.3.2. RELEVÂNCIA DOS ENSAIOS DESCRITOS NA ETAG 004 PARA A PREVENÇÃO DE PATOLOGIAS

Os destacamentos e/ou empolamentos do reboco e do revestimento final, microfissurações, infiltrações de água no sistema devido a fendas no reboco delgado armado, algumas anomalias associadas ao revestimento do sistema e a descolagem generalizada ou parcial do sistema, podem ser estudadas através de ensaios higrotérmicos referidos na Tabela 3 referente ao requisito essencial (ER) 3 e através dos ensaios de arrancamento e de choque de esfera que lhe sucedem. Os ensaios de arrancamento aferem essencialmente a resistência das ligações entre os componentes do sistema, referidos na Tabela 4 e Tabela 7

As infiltrações de água podem ser evitadas se os pormenores construtivos dos pontos de remate do sistema estiverem bem pensados e se os trabalhos de construção lhes forem fieis. Este ponto está envolvido no âmbito do ER4 referido na Tabela 4.

Para se evitar uma degradação excessiva do ETICS, o ER3 exige a elaboração de ensaios de resistência ao impacto a partir dos quais se classifica o ETICS em 3 categorias que definem o nível de acessibilidade a que o sistema pode estar sujeito:

Categoria I – Zonas facilmente acessíveis aos peões no nível térreo e sujeitos ao impacto de corpos rígidos mas não ao uso anormalmente severo

Categoria II – Zonas sujeitas ao impacto de objectos duros atirados mas em localizações suficientemente altas para limitar o tamanho dos objectos. Ou zonas em que o acesso é apenas usual a pessoas com incentivo para o bom uso (proprietários).

Categoria III – Zonas nas quais a probabilidade de serem deterioradas devido a impactos causados por pessoas ou por objectos é muito reduzida.

Os bolores, as algas e outras manchas não fazem parte dos requisitos essenciais, não estando por isso contemplados na ETAG 004.

# 3

## INFRA-ESTRUTURA EXPERIMENTAL

### 3.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido em 2.2.2 a ETAG 004 define diversos ensaios para avaliar o desempenho de diferentes parâmetros do ETICS. Ao nível da segurança contra incêndios a ETAG remete para a norma EN 13501-1, na qual se averigua a produção de fumo e faúlhas de todos os componentes do sistema. Quanto aos parâmetros de higiene, saúde e ambiente, é estipulada a execução de um teste de capilaridade ao qual, dependentemente dos seus resultados, se segue a realização de testes que visam o comportamento higrotérmico, os testes de calor/frio e calor/chuva. Posteriormente efectuam-se testes de congelamento/descongelamento para aferir a capacidade do ETICS em aguentar a expansão da água característica da sua solidificação. Após a execução dos testes higrotérmicos, com o objectivo de se estudar a resistência do revestimento final ao impacto, a ETAG 004 indica os ensaios de impacto de um corpo rígido e o teste de perfuração. Para se analisar a resistência à difusão são propostos testes em amostras diferentes das que foram sujeitas aos ensaios anteriores. Quanto ao parâmetro da segurança na utilização a norma europeia exige a realização de ensaios de arrancamento para testar a força da ligação da camada base ao isolamento térmico após sujeitar o ETICS ao envelhecimento higrotérmico, qualquer que seja o tipo de fixação utilizado no mesmo. Dependendo do tipo de fixação utilizado (mecânica ou adesiva) efectuam-se outros testes para aferir o estado das ligações dos diversos componentes do ETICS conforme as tabelas 4.1 e 4.2 e Fig. 3. Por último é referido o cálculo do coeficiente de transmissão térmica usando uma Hot-Box.

Com o objectivo de elaborar alguns dos ensaios atrás referidos fez-se uma análise das condições disponíveis no Laboratório de Física das Construções (LFC) na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Tendo em conta a infra-estrutura disponível optou-se pela execução dos seguintes ensaios: impacto de um corpo rígido referido na Tabela 3; ensaio de arrancamento citado na Tabela 4.1 e Tabela 7; o envelhecimento higrotérmico (Tabela 3) e determinação do coeficiente de transmissão térmica (Tabela 6). Os ensaios foram efectuados num provete com a tecnologia ETICS instalada, existente no LFC. O provete utilizado não tinha sido alvo, até então, de outros estudos.

Os diversos equipamentos utilizados, assim como o provete ensaiado, serão descritos pormenorizadamente nos subcapítulos seguintes.

### 3.2. CÂMARA CLIMÁTICA FITOCLIMA 1000 EDTU, CÂMARA VISITÁVEL E PORTA PROVETES

A câmara climática (Fitoclíma 1000 EDTU), com potencialidades que permitem variar a temperatura e a humidade relativa, foi adaptada de modo a possibilitar a execução de testes de simulação em paredes com 1.9m x 1.9m. A adaptação consistiu na anexação à referida câmara de uma outra câmara de

tamanho superior, sendo visitável. A esta última é fixado um porta provetes. A Fitoclima 1000 EDTU está representada na Fig. 6 enquanto que o pormenor da ligação entre a Fitoclima 1000 EDTU com a câmara visitável pode ser observado na Fig. 7.



Fig. 6 – Câmara climática Fitoclima 1000 EDTU



Fig. 7 – Ligação da câmara climática à câmara visitável

A envolvente da Fitoclima 1000 EDTU é constituída por materiais de alta resistência térmica para minimizar as perdas de calor enquanto a estanquidade ao ar é conseguida por intermédio de vários vedantes.

O aquecimento da câmara é conseguido por intermédio de convectores equipados com três resistências de aquecimento com um total de 8000W (uma de 2000W e duas de 3000W). Para auxiliar os convectores a aquecer a câmara de forma rápida e homogénea, existem duas ventoinhas. O arrefecimento é efectuado com recurso à ventilação mecânica proporcionada por um compressor, não sendo possível a determinação da sua potência. Para a humedificação existe um banho termostático com resistência de 1500W e para a desumidificação é mais uma vez utilizada a evaporação mecânica.

A gama de temperaturas que a Fitoclima 1000 EDTU consegue atingir vai desde -50 até 180°C com uma precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  enquanto a gama de humidade relativa situa-se desde 10 a 98% com uma precisão de  $\pm 2\%$ .

O controlo destas potencialidades é efectuado por intermédio do sistema “ClimaPlus V” através de um computador ligado à Fitoclima 1000 EDTU ou então no ecrã táctil inserido na porta da mesma, apresentado na Fig. 8. Este sistema possui duas alternativas para o funcionamento da Fitoclima 1000 EDTU. Pode ser introduzido uma única temperatura e humidade relativa que após serem atingidos pela câmara climática se mantêm constantes até nova instrução do utilizador. A alternativa é a elaboração de um programa constituído por diversos patamares de diferentes temperaturas e humidades relativas no qual se indicam as durações que se pretende que essas temperaturas e humidades relativas se mantenham constantes e as durações para a passagem entre os diversos patamares existentes.

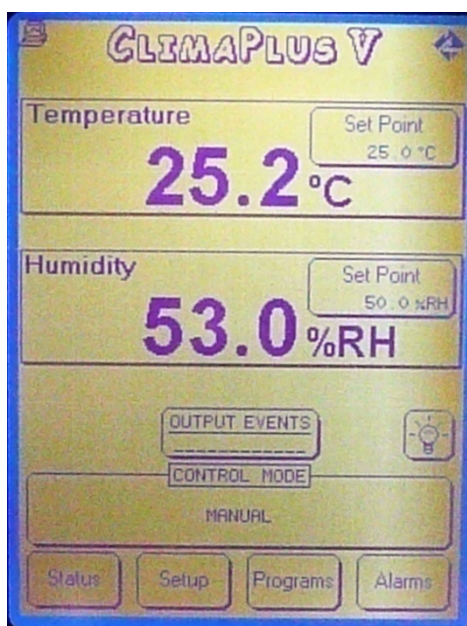


Fig. 8 – Quadro principal do ecrã táctil do sistema CIMAPLUS V

Os gráficos da variação da temperatura e da humidade relativa em função do tempo e os dados que lhes servem de base, são registados pelo sistema de controlo e podem ser obtidos pelo utilizador. Quanto ao valor percentual das potências de aquecimento e arrefecimento que são utilizadas em

função do tempo, podem também ser obtidos como base de dados embora não possam ser visualizados graficamente.

A câmara visitável possui uma porta com 2,0 metros de altura e 0,8 metros de largura. No seu interior existem dois passa-muros para possibilitar a passagem de cabos entre o interior e o exterior, estando devidamente isolados. Possui também uma abertura com a dimensão exactamente igual à da porta da câmara Fitoclima 1000 EDTU para que a passagem do ar climatizado por esta, se processe da forma mais eficiente possível e contém ainda uma outra abertura a toda a altura e largura da câmara à qual está anexado um acessório móvel, o porta provetes. É neste acessório móvel que se constrói o provete.

Todas as paredes das câmaras são elaboradas em materiais com grande resistência térmica para evitar perdas térmicas pela envolvente e maximizá-las pelo provete. As Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13 que se seguem foram tiradas às câmaras e ao porta provetes em questão.



Fig. 9 – Pormenor da ligação da câmara visitável à Fitoclima1000 EDTU



Fig. 10 – Porta da câmara visitável e acessório móvel porta provetes



Fig. 11 – Proвете e os dois passa-muros vistos do lado interior da câmara visitável



Fig. 12 – Passa-muros vistos do lado exterior



Fig. 13 – Dispositivo móvel do de colocação provete

### 3.3. PROVETE

O provete instalado tem 3,61m<sup>2</sup> de área (1,9m x 1,9m) e é constituído por um suporte de alvenaria de betão leve de agregados de argila expandida com 20 cm de espessura que possui um coeficiente de transmissão térmica de 1,30 W/m<sup>2</sup>.°C segundo as informações obtidas através do seu fabricante. Para o assentamento horizontal dos blocos de alvenaria foi usada uma argamassa leve, seca e pré-doseada, à base de cimento Portland e areias calibrada. A sua densidade ( $\gamma$ ) seca é de 1400±150Kg/m<sup>3</sup>. Em obra basta apenas adicionar água à mistura. A argamassa de assentamento foi distribuída de forma contínua e uniforme em todos os leitos ao longo da fiada. As juntas verticais são secas e sem argamassa, com excepção das duas juntas contíguas à ligação entre a parede e o contorno do acessório móvel porta provetes. A resistência térmica do suporte, calculada em capítulos posteriores, foi aproximadamente de 0,6 m<sup>2</sup>.°C/W.

O isolamento térmico utilizado foi o EPS 100 com 6 cm de espessura, sendo a sua resistência térmica aproximadamente igual a 1,62 m<sup>2</sup>.°C/W. Foi colado ao suporte usando uma argamassa de colagem pré-doseada em pó com resistência à tracção maior que 0,08 MPa. A argamassa utilizada é seca e pré-doseada, reforçada com fibras, composta por cimento Portland e cargas minerais calibradas. Em obra há apenas a necessidade de adicionar água ao produto pré-doseado uma vez que este é fornecido em forma de pó. A densidade em pasta da camada base é de 1500 ± 150 kg/m<sup>3</sup>.

A camada base é constituída por duas aplicações da mesma argamassa de colagem pré-doseada em pó utilizada para colar o isolamento térmico ao suporte. A primeira aplicação é efectuada com cerca de 2mm, envolvendo a armadura e a segunda, aplicada após a secagem da primeira, com cerca de 1,5 mm, envolvendo completamente a armadura.

A armadura em rede de fibra de vidro foi aplicada sobre a primeira aplicação da camada base, ainda fresca, utilizando uma talocha em inox. Nas emendas de armadura foi efectuada uma sobreposição de cerca de 10 cm na vertical, sensivelmente a meio do provete.

Para o revestimento final optou-se pela aplicação de duas soluções distintas:

- Do lado esquerdo do provete aplicou-se sobre a camada base uma camada cimentícia constituída por argamassa pré-doseada em pó tipo cimentício com 1 mm de espessura seguida de uma pintura de cor branca, aplicada com rolo. A camada cimentícia aplicada é um produto para revestimento de fachadas, interior ou exterior, texturado e como o nome indica de base cimentícia. É aplicada com talocha.
- Do lado direito do provete aplicou-se sobre a camada base um primário de aderência e como revestimento final utilizou-se um revestimento plástico espesso (RPE), com cerca de 1 mm de espessura, de cor branca. O RPE utilizado é um produto para revestimento de fachadas, texturado, à base de copolímeros acrílicos e com silicone incorporado e é aplicado com talocha.

A Fig. 14 representa os dois tipos de revestimentos finais divididos por uma faixa cinzenta.



Fig. 14 – Provete ETICS evidenciando os dois revestimentos finais aplicados

Nesta parede ETICS não foi utilizado qualquer perfil de arranque nem fixações mecânicas.

O ETICS instalado no suporte foi aprovado como apto para o uso pelo CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment tendo entretanto a validade da ETA expirado. O produto está actualmente aprovado pela SITAC – Swedish Institute for Technical Approval in Construction.

### 3.4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Para as medições e o seu registo foram utilizados dois registadores de dados, diversos termopares, seis fluxímetros e dois medidores e registadores de temperatura e humidade relativa do ar.

Os aparelhos utilizados para a medição do ar da nave do Laboratório de Física das Construções são dois “Hobo” de pequena dimensão que contêm uma bateria que lhes confere uma autonomia energética considerável. Os sensores estão incorporados numa caixa o que dificulta a leitura instantânea do ar, medindo e registando os valores com um desfasamento de tempo na ordem dos 15 minutos. Os sensores podem ser retirados da caixa para se obter tempos de resposta mais curtos desde que sejam convenientemente protegidos. A gama de leitura de temperaturas é de -40 a 75°C e de humidade relativa é de 0 a 95%, danificando-se se sujeitos a condensação. Possuem um erro de precisão para o registo de temperaturas perto dos 20°C na ordem de 1,5°C. São programados, unicamente através de um software que pode ser instalado em qualquer computador, para medirem dados de humidade relativa e temperatura do ar em intervalos de tempo variáveis de acordo com as necessidades do utilizador. Estes aparelhos de medição funcionam também como registadores de dados, o que lhes permite funcionarem de forma independente ao contrário dos termopares e dos fluxímetros. As variações do período de tempo durante o qual estes aparelhos de medição têm capacidade de armazenamento em função do intervalo de tempo que se escolhe para o registo, é visualizável no software de programação. A Fig. 15 ilustra o equipamento referido.



Fig. 15 – Medidores e registadores de humidade relativa e temperatura do ar

Numa primeira fase do trabalho dispôs-se de dezoito termopares, catorze dos quais foram colocados em diversos pontos da superfície do provete e apenas dois nas paredes da câmara que o continham. Os restantes quatro termopares foram colocados no momento da construção do provete estando localizados na interface de alguns constituintes do ETICS. Os termopares “1” e o “6” foram colocados entre o suporte e o isolamento térmico e os termopares “2” e o “7” foram colocados entre o isolamento térmico e a camada base. As três figuras seguintes, Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18 ilustram estas disposições sendo que os termopares colocados nas interfaces dos materiais estão representados nas Fig. 16 e Fig. 18 entre áspas.

## Vista Exterior

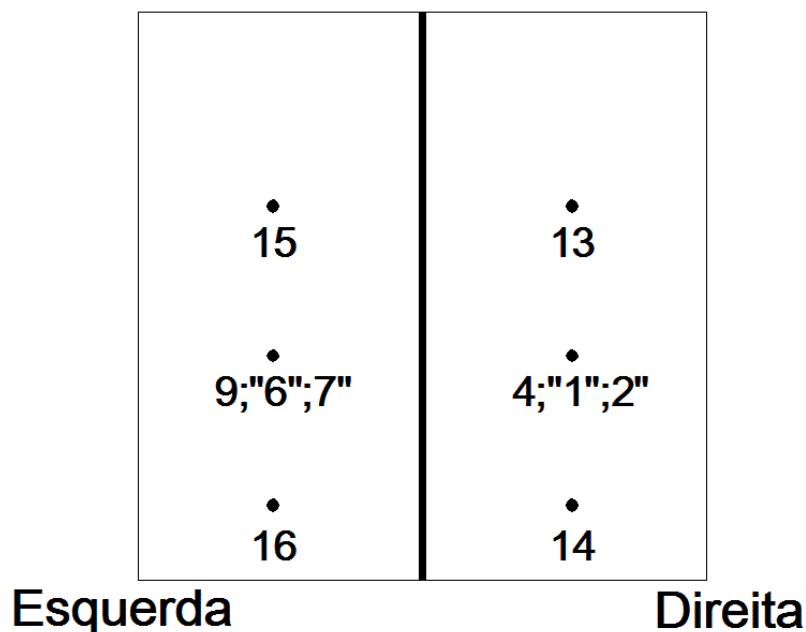


Fig. 16 – Esquema da distribuição dos termopares no lado exterior do provete

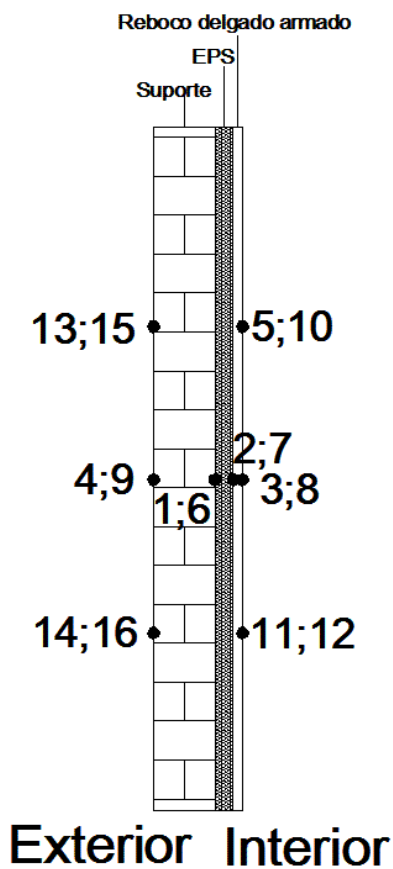


Fig. 17 – Esquema da distribuição dos termopares no perfil do provete

### Vista Interior

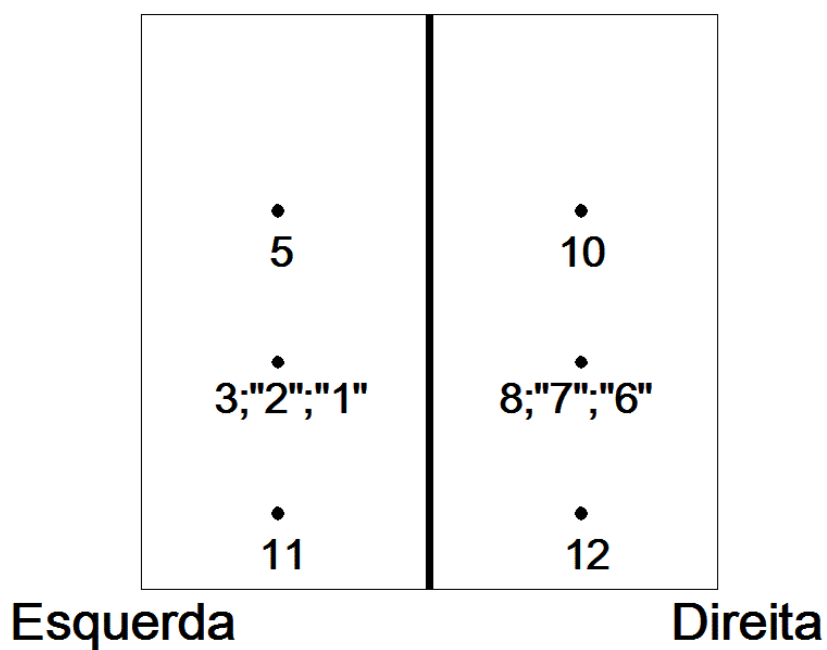


Fig. 18 – Esquema da distribuição dos termopares no lado interior do provete

Os termopares “17” e “18” não representados nas figuras anteriores, foram colocados na superfície superior da câmara que continha o provete, o “17” do lado exterior e o “18” do lado interior.

Os termopares utilizados foram os do tipo T de condutores unifilares com 0.5 mm, os quais possuem uma precisão de 5% e uma gama de medida dos -50 aos 105°C. Para a sua colocação nas superfícies do provete e da câmara climática foi utilizada uma cola epoxídica.

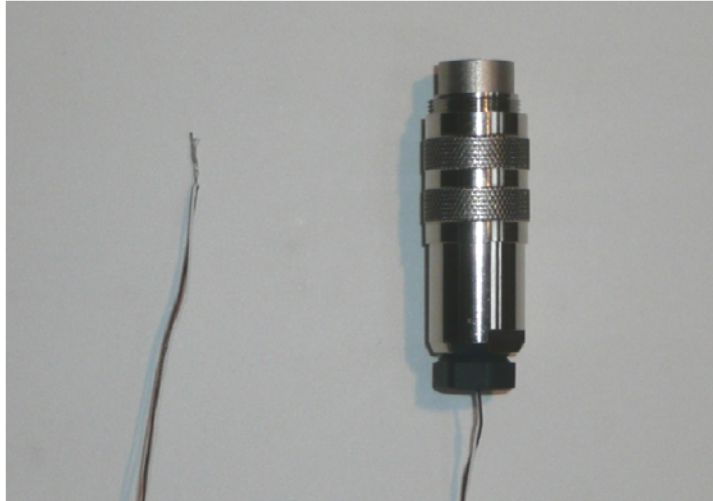


Fig. 19 – Termopar do tipo T

Os fluxímetros utilizados foram colocados no lado interior do provete e dispostos de diferentes formas para se obter a medição do fluxo de calor em algumas heterogeneidades inerentes a um suporte de alvenaria unido com argamassa. Para a sua colocação foi utilizada a cola epoxídica já referida.

A temperatura máxima de utilização que os fluxímetros admitem é de 90°C e têm uma precisão de 5%. Cada fluxímetro possui um valor de calibração diferente que é multiplicado pelo valor que estes registam para se obter uma densidade de fluxo.

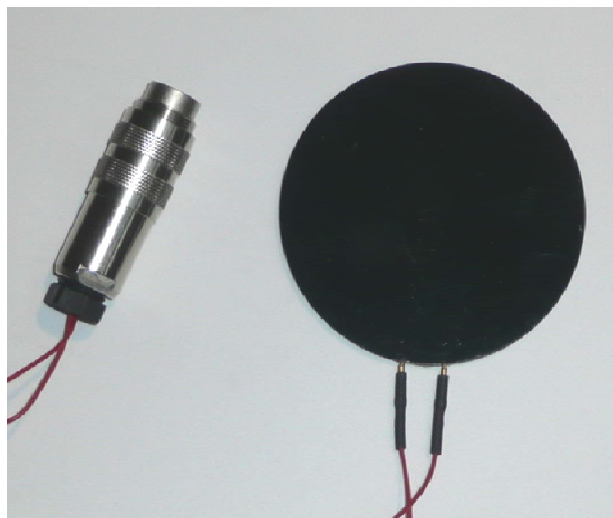


Fig. 20 – Fluxímetro

## Vista Exterior

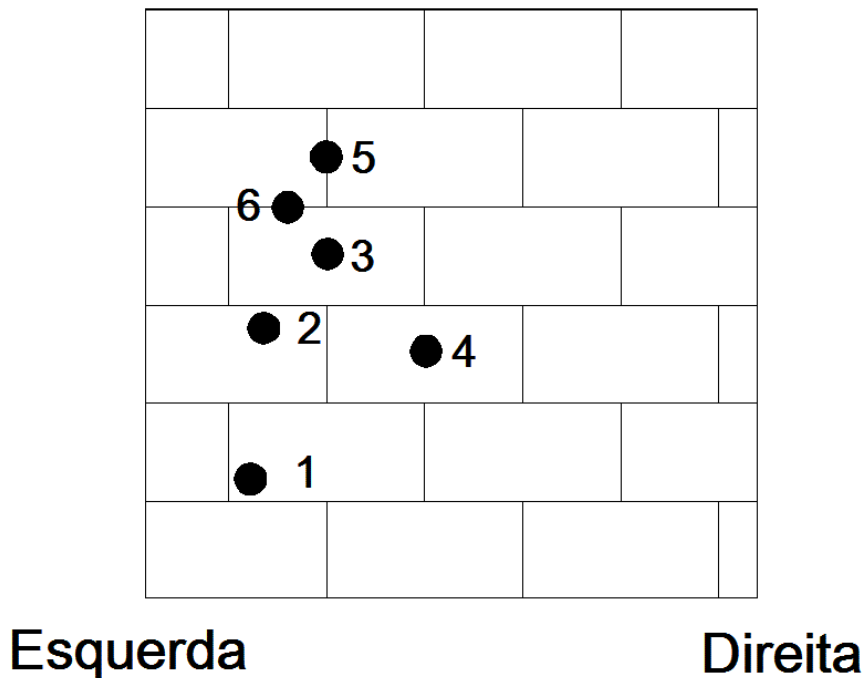


Fig. 21 – Esquema da distribuição dos fluxímetros relativamente às heterogeneidades do suporte

Os registadores de dados utilizados continham diferente número de entradas. Foi utilizado um com quatro entradas durante todo o estudo experimental e um com dezoito apenas na primeira etapa. Ambos os registadores possuem uma precisão no registo de dados de cerca de 0,1%.

Os registadores de dados podem utilizar intervalos de medição mínimos de um segundo, acumulando 128.000 valores ou 512.000 valores no máximo (dependendo do modelo). Caso se opte por intervalos de tempo relativamente elevados, como é o caso em estudo, onde se efectuaram registos de quinze em quinze minutos, os registadores de dados podem permanecer ligados e em registo por períodos de tempo relativamente elevados. Os aparelhos registam a informação dos vários sensores simultaneamente, podendo enviar os mesmos para um computador ou mesmo para uma impressora, directamente.

Os registadores de dados podem ser operados através do painel de controlo ou de um computador. Neste caso optou-se por efectuar todas as programações no próprio painel de controlo, dada a dificuldade em instalar um computador no local onde se realizaram os ensaios. Sendo posteriormente trabalhados e estudados num computador.

Estes registadores de dados permitem a utilização de variados sensores, e não necessariamente sensores de temperatura e de fluxos de calor sendo para tal dotados de portas analógicas roscadas com 14 pinos. Assim, através destas entradas é possível substituir os sensores a utilizar, havendo apenas a necessidade de programar esses canais convenientemente, em função do tipo de sensores a utilizar. No caso em estudo utilizaram-se sensores de fluxo de calor e temperatura, tendo havido a necessidade de programar, em cada caso, os sensores em uso [18].



Fig. 22 – Registadores de dados

### 3.5. APARELHOS PARA ENSAIOS MECÂNICOS

#### 3.5.1. ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Para efectuar os ensaios de arrancamento utilizou-se um motor-reductor e um dinamómetro ilustrados na Fig. 23. Este equipamento funciona a uma velocidade de acordo com o estipulado pela ETAG004 [16] para os ensaios referidos nas Tabela 4.0 e 4.1 do capítulo anterior.



Fig. 23 – Motor-reductor e dinamómetro

O equipamento referido funciona exercendo uma força de tracção num parafuso de cabeça esférica que é fixado a uma rosca perfeitamente centrada numa das faces da pastilha. A força máxima obtida é indicada e registada no dinamómetro em daN.

Utilizaram-se pastilhas metálicas circulares com 5,0 cm de diâmetro e 1,8 cm de espessura que foram coladas ao provete com auxílio de uma cola à base de resinas epoxi, que suporta temperaturas até +65°C. A embalagem da cola apresenta-se sob a forma de uma seringa com dois tubos, com composições diferentes, para permitir a fácil e exacta dosagem de ambos que ao serem misturados, reagem quimicamente proporcionando uma colagem de alta resistência. As duas faces circulares das pastilhas metálicas e a cola utilizada podem ser visualizadas na Fig. 24.



Fig. 24 – Pastilhas metálicas circulares com 5 cm de diâmetro e cola à base de resinas epoxi

### 3.5.2. ENSAIO DE CHOQUE DE UM CORPO RÍGIDO

Para efectuar este ensaio, já referido na Tabela 3 do capítulo anterior, foi usado o aparelho Martinet Baronnie constituído por uma barra rígida provida com um nível à qual está fixado um pêndulo com a possibilidade de se anexar na sua extremidade uma esfera de 0,5 kg de massa que ao ser largada de uma altura máxima de 0,61 m produz um impacto numa superfície vertical de 3 Joules. Para se visualizar melhor o impacto da esfera na superfície vertical polvilhou-se grafite na primeira. A imagem seguinte foi tirada ao aparelho utilizado.



Fig. 25 – Aparelho Martinet Baronnier



## 4

## DESEMPENHO TÉRMICO

## 4.1. INTRODUÇÃO

Com o capítulo 4 inicia-se a campanha experimental desenvolvida nesta dissertação. Estruturalmente optou-se por dividir o capítulo em duas partes, efectuando-se um procedimento experimental com objectivos distintos em cada uma de modo a analisar-se as propriedades térmicas do provete referido em 3.3. Preferiu-se organizar no capítulo 4.2 todas as determinações numéricas utilizadas nos dois procedimentos experimentais referidos, uma vez que estão relacionadas.

A primeira parte focou-se no cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) do provete através dos fluxímetros descritos em 3.5 procedendo-se numa outra fase ao estudo do comportamento dinâmico do provete quando sujeito a diferentes temperaturas. A primeira fase está contemplada no requerimento essencial 6 da ETAG 004 [16], como foi referido na Tabela 6. Para além de [16] exigir que o R do ETICS seja superior a  $1 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ , em Portugal existe um regulamento (RCCTE [9]) que define um valor máximo admissível para o U em função de cada uma das três zonas climáticas existentes.

Após a determinação de U, iniciou-se o capítulo 4.5 no qual se analisou a potencialidades da câmara climática utilizada.

Por fim, elaborou-se o capítulo 4.6 no qual se discutiram os resultados obtidos e se apresentaram algumas conclusões.

## 4.2. AVALIAÇÃO NUMÉRICA

Para existir um valor comparável ao coeficiente de transmissão térmica (U) do provete estudado obtido por via experimental procedeu-se inicialmente ao seu cálculo por via analítica.

O cálculo do U por via analítica, através da expressão (1) que se segue, foi baseado nas informações obtidas directamente dos fabricantes de alguns dos componentes do provete assim como por recurso a valores tabelados em [9] e [22].

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum R} \quad (1)$$

Sendo que  $R_{si}$  (resistência térmica superficial interior) e  $R_{se}$  (resistência térmica superficial exterior) foram obtidos directamente de [9] e iguais a  $0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ , para o caso em estudo uma vez que o lado

exterior está em contacto com o ar da nave do laboratório de Física das Construções que se considerou ser pouco ventilado. O valor de R (resistência térmica) varia dependendo de cada um dos componentes do provete tendo sido apenas considerados, com propriedades térmicas relevantes, o isolamento térmico e o suporte em alvenaria de betão leve. A resistência térmica do reboco delgado armado foi considerada desprezável dado que o seu valor é reduzido e bastante inferior ao valor referenciado na ETAG 004 (0,02 m<sup>2</sup>.°C/W).

Para o EPS aplicado, que possuía um valor mínimo de densidade volúmica seca de 20 kg/m<sup>3</sup> obteve-se por intermédio do seu fabricante o valor de 0,037 W/(m.°C) para a condutibilidade térmica,  $\lambda$ . A espessura (e) do isolamento térmico é, como já foi referido em 3.3 igual a 6cm e como tal, obteve-se um valor da resistência térmica de valor aproximado a 1,62 m<sup>2</sup>.°C/W usando para tal a expressão (2).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (2)$$

A partir dos dados fornecidos pelo fabricante dos blocos de alvenaria em betão leve, o seu coeficiente de transmissão térmica é de 1,3 W/(m<sup>2</sup>.°C). Considerando para R<sub>se</sub> o valor de 0,04 m<sup>2</sup>.°C/W e para R<sub>si</sub> o valor de 0,13 m<sup>2</sup>.°C/W, obteve-se o valor da resistência térmica para o suporte foi igual a 0,6 m<sup>2</sup>.°C/W. Este valor foi conseguido usando e expressão (3).

$$R = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \quad (3)$$

O reboco delgado armado é constituído essencialmente por argamassas de cimento como foi referido em 3.3 e por um revestimento plástico em acrílico no caso do lado do provete com RPE. A condutibilidade térmica,  $\lambda$ , segundo [22] é de 0,8 W/(m.°C) para as argamassas e 0,2 W/(m.°C) para o RPE. Usando a expressão (2) concluiu-se que o valor da resistência térmica do reboco delgado armado é aproximadamente 0,008 m<sup>2</sup>.°C/W para o revestimento final cimentício e 0,012 m<sup>2</sup>.°C/W para o RPE. As espessuras consideradas estão apresentadas em 3.3. Estes valores, como foi referido, não foram contabilizados para o cálculo de U do provete estudado. Como tal, o U obtido através de (1) para o provete é igual a 0,40 W/(m<sup>2</sup>.°C).

Em paralelo com este cálculo verificou-se, por mera curiosidade, o valor tabelado em [22] para o coeficiente de transmissão térmica do sistema de isolamento térmico pelo exterior com revestimento aplicado sobre o isolante (ETICS) e do suporte que, para os constituintes aproximados do provete em estudo indicava um valor de 0,45 W/(m.°C). Este valor apenas pode ser visto como uma referência para a proximidade do U real uma vez que é calculado com base em valores de referência, não específicos dos materiais aplicados.

Para a elaboração do segundo estudo introduzido em 4.1, foi necessário estimar o equilíbrio teórico de cada perfil transversal do provete para os quatro patamares de temperaturas estudados, apresentados na Fig. 33 e Fig. 34. Para tal utilizou-se a metodologia descrita de seguida.

Recorrendo à expressão (4) seguinte calculou-se a densidade de fluxo, F, para cada um dos quatro patamares de temperaturas considerados e indicados no capítulo 4.4, a partir das temperaturas do ar interior da câmara climática, t<sub>i</sub> e exterior, t<sub>e</sub>. O coeficiente de transmissão térmica (U) utilizado para este cálculo foi o obtido analiticamente anteriormente apresentado.

$$F = U \cdot (t_i - t_e) \quad (4)$$

Posteriormente, utilizando o valor de F obtido, calculou-se a temperatura superficial exterior,  $t_{se}$ , a partir da resistência térmica superficial exterior,  $R_{se}$ , retirada de [9] ( $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ ) e de  $t_e$  conhecido, utilizando a expressão (5).

$$F = \frac{1}{R_{se}} \cdot (t_{se} - t_e) \quad (5)$$

A temperatura da interface da camada base e do isolamento térmico ( $t_1$ ) foi calculada utilizando a expressão (6).

$$F = \frac{1}{R_{1-se}} \cdot (t_1 - t_{se}) \quad (6)$$

Sendo F, o valor calculado em (4),  $t_{se}$  o valor calculado em (5) e  $R_{1-se}$ , a resistência térmica do suporte cujo cálculo já foi referido, sendo igual a  $0,6 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ .

A temperatura da interface seguinte ( $t_2$ ) foi calculada de modo análogo ao anterior através da expressão (7).

$$F = \frac{1}{R_{2-1}} \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

Na qual os valores de F e  $t_1$  e o valor da resistência térmica do isolamento térmico do provete,  $R_{2-1}$  já foram calculados.

Por fim calculou-se a temperatura superficial interior,  $t_{si}$ , da mesma forma utilizada anteriormente através da expressão (8):

$$F = \frac{1}{R_{si-2}} \cdot (t_{si} - t_2) \quad (8)$$

Na qual F e  $t_2$  e a resistência térmica do reboco delgado armado,  $R_{si-2}$ , são valores já calculados.

### 4.3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

Para a determinação por via experimental do coeficiente de transmissão térmica usou-se o equipamento descrito em 3.2 que, apesar de ligeiras diferenças relativamente ao mencionado em [16], em conjunto com os fluxímetros e os termopares (capítulo 3.5), tem as potencialidades suficientes para o pretendido.

Para se calcular o valor de U experimental decidiu-se programar a câmara climática para duas temperaturas distintas, calculando-se um U para cada uma delas. As temperaturas escolhidas foram 35°C e 26°C.

Esta campanha experimental teve início na fase final do presente trabalho, tendo-se à disposição apenas o registador de dados com quatro canais. Como tal, optou-se pela disposição de apenas seis fluxímetros, colocados como é possível observar na Fig. 21, em pontos distintos dos blocos térmicos e da argamassa de assentamento para se tentar aferir se numa parede ETICS a heterogeneidade do suporte tem algum significado a nível térmico.

Para ser possível o cálculo do U eram também precisos os valores das temperaturas superficiais interiores,  $t_{si}$ , e exteriores,  $t_{se}$ , nas zonas onde os fluxímetros seriam colocados. Para isso seriam precisos doze termopares, necessitando de ser colocados dois por direcção transversal dos fluxímetros, sendo depois trocadas as entradas, no registador de dados, convenientemente de acordo com os fluxímetros que se estariam a registar. Devido à limitação do material disponível, não era possível a colocação de tantos termopares, tendo-se optado apenas pela colocação de dois ao nível de um fluxímetro, ficando estes em registo contínuo e admitindo-se como válidos para os fluxos obtidos em todos os seis fluxímetros. A opção pela localização dos referidos termopares baseou-se num estudo realizado na primeira parte da presente dissertação (capítulo 4.4) no qual se determinou a diferença dos registos obtidos através dos termopares nas posições ilustradas nas Fig. 17 e Fig. 18 com o valor médio das temperaturas do ar no ambiente em que estavam inseridos (interior ou exterior da câmara climática). Esta diferença pode ser visualizada nas imagens seguintes.

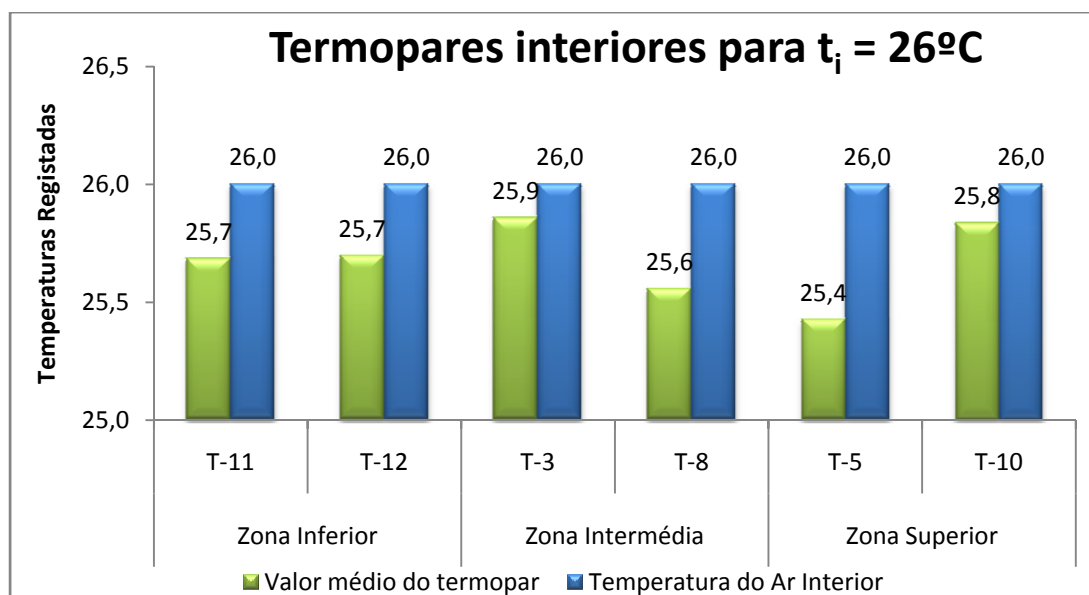
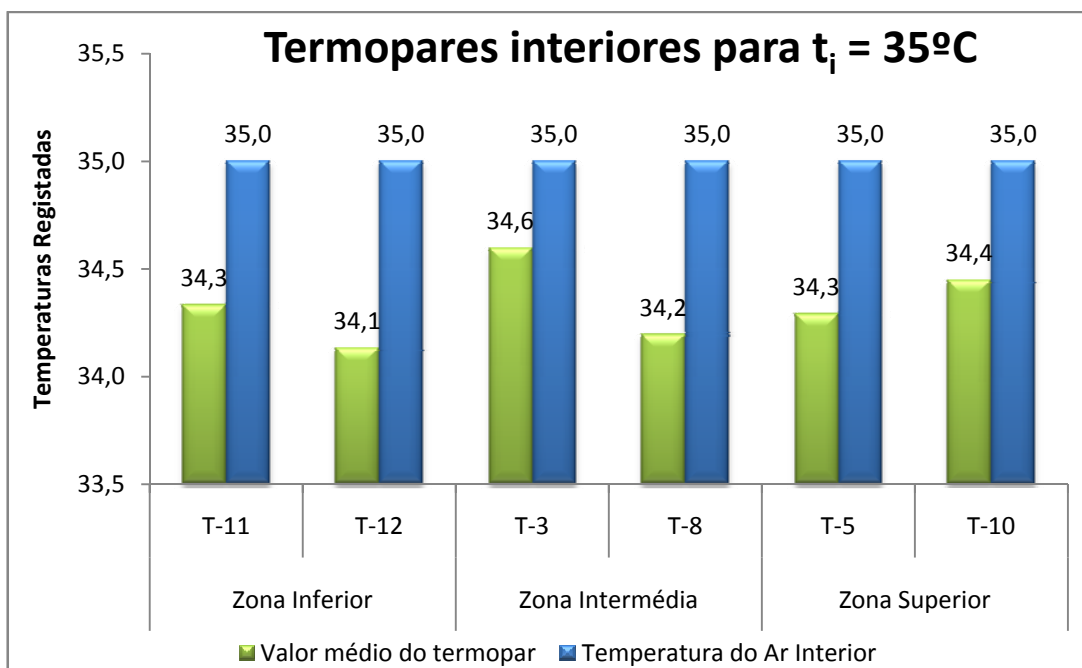


Fig. 26 – Registos obtidos através dos termopares colocado no interior da câmara climática a 26°C

Fig. 27 – Registos obtidos através dos termopares colocado no interior da câmara climática a  $35^\circ\text{C}$ 

Por observação das Fig. 26 e Fig. 27 concluiu-se que a diferença entre os diversos valores não tinha explicação baseada na convecção ascendente do ar quente ou na possível deficiente distribuição do ar na câmara climática, estando na sua possível origem os erros de medição inerentes aos diversos termopares. Complementarmente a estes gráficos elaborou-se a Tabela 8, apresentando a diferença entre a medição de cada termopar colocado no lado interior do provete e a média de todos os termopares colocados do mesmo lado.

Tabela 8 – Desvios das medições obtidas através dos termopares colocados na superfície interior do provete

	Zona inferior		Zona intermédia		Zona superior	
Termopares	T11	T12	T3	T8	T5	T10
Diferença de registo de cada termopar relativamente à média de todos os termopares da Fig. 26	$0^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$	$+0,2^\circ\text{C}$	$-0,1^\circ\text{C}$	$-0,3^\circ\text{C}$	$+0,1^\circ\text{C}$
Diferença de registo de cada termopar relativamente à média de todos os termopares da Fig. 27	$0^\circ\text{C}$	$-0,2^\circ\text{C}$	$+0,3^\circ\text{C}$	$-0,1^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$	$+0,1^\circ\text{C}$

Para as gamas de temperatura interiores que se utilizaram neste capítulo ( $26^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$ ), obtiveram-se diferenças pouco significativas entre os termopares colocados do lado interior como é possível observar na Tabela 8, sendo que não foi estipulada nenhuma posição menos adequada para a colocação dos dois termopares a partir destes resultados.

Contudo, decidiu-se fazer um processo de análise idêntico, considerando apenas os termopares colocados do lado exterior do provete. As Fig. 28 e Fig. 29 são análogas às Fig. 26 e Fig. 27 mas considerando apenas os termopares exteriores.

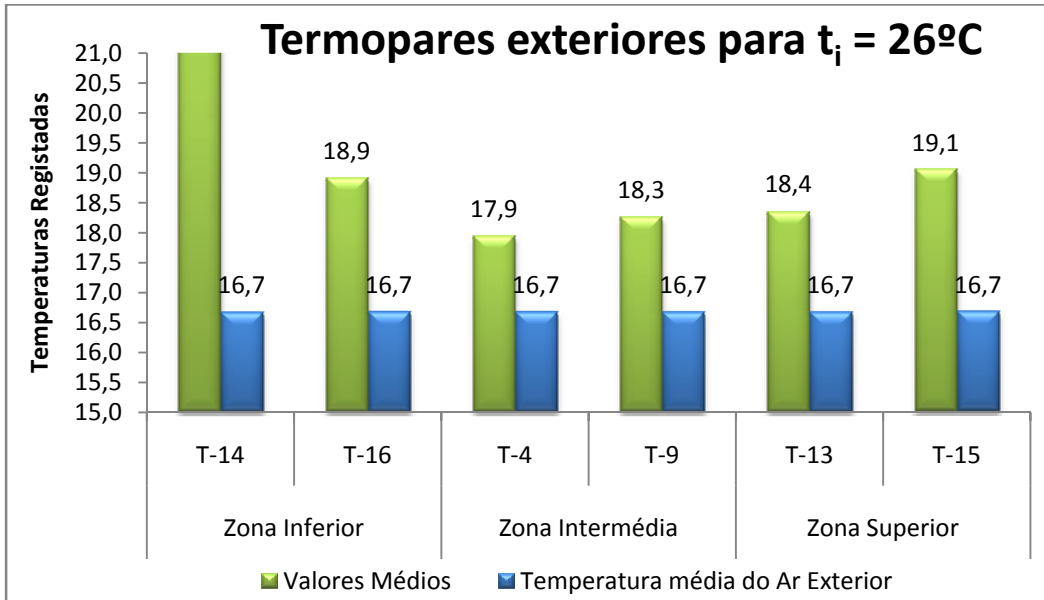


Fig. 28 – Registos obtidos através dos termopares colocado no exterior da câmara climática a  $26^\circ\text{C}$

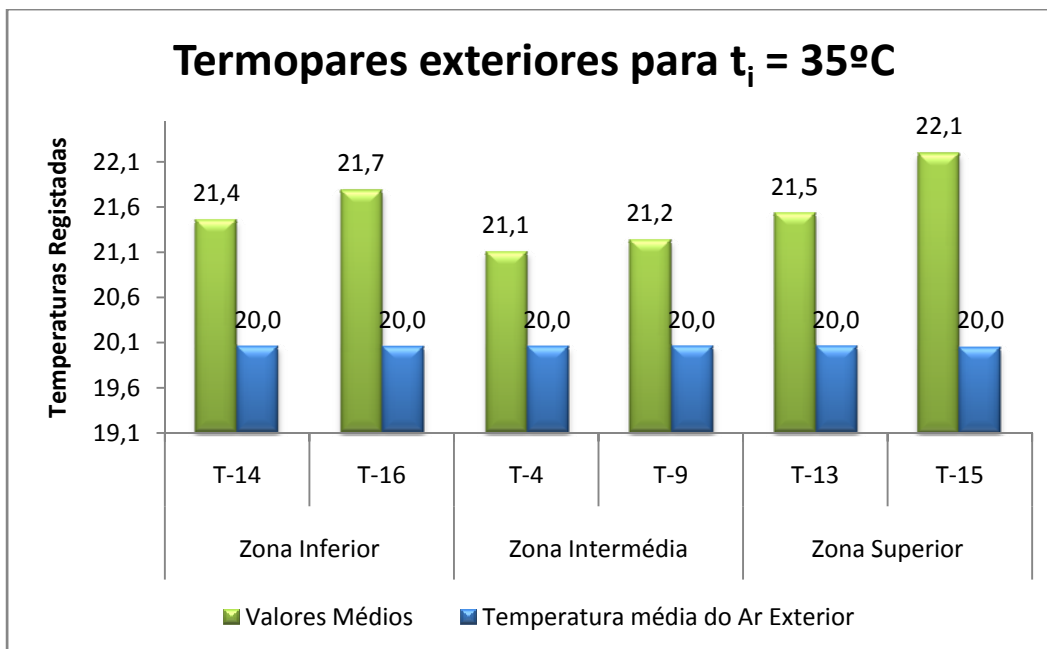


Fig. 29 – Registos obtidos através dos termopares colocado no exterior da câmara climática a  $35^\circ\text{C}$

Observando-se os termopares colocados do lado exterior do provete, verifica-se que a diferença entre os valores médios registados nos termopares e os valores médios das temperaturas exteriores diferem numa amplitude de valores superior à observada para o lado interior. Este facto pode dever-se a um

menor controlo da estabilidade da temperatura do lado exterior do provete uma vez que está em contacto directo com a nave laboratorial onde se efectuaram estes estudos.

Os maiores desfasamentos observados nas Fig. 28 e Fig. 29, entre os valores médios registados nos termopares e os valores médios das temperaturas exteriores, correspondem aos termopares “15” e “16”. De seguida apresenta-se a Tabela 9 que apresenta a diferença entre a medição de cada termopar colocado no lado interior do provete e a média de todos os termopares colocados do mesmo lado.

Tabela 9 – Desvios das medições obtidas através dos termopares colocados na superfície exterior do provete

Termopares	Zona inferior		Zona intermédia		Zona superior	
	T14	T16	T4	T9	T13	T15
Diferença de registo de cada termopar relativamente à média de todos os termopares da Fig. 28	-	+0,4°C	-0,6°C	-0,2°C	-0,1°C	+0,6°C
Diferença de registo de cada termopar relativamente à média de todos os termopares da Fig. 29	-0,1°C	+0,2°C	-0,4°C	-0,3°C	0°C	+0,6°C

Por análise da Tabela 9 e das Fig. 28 e Fig. 29, evitou-se a colocação do termopar exterior a utilizar nesta etapa do presente trabalho na zona correspondente aos termopares “16” e “15”, indicada na Fig. 16. Apesar do termopar “4” apresentar desvios considerados relativamente à média dos registos de todos os termopares, é o termopar colocado no exterior que apresenta maior proximidade com o valor de referência (temperatura média do ar exterior) considerando-se como tal o mais fiável.

A partir destas condicionantes, e a limitação de comprimento imposta pelos cabos de transporte de dados dos fluxímetros para o registador de dados, optou-se pela colocação dos termopares e dos fluxímetros numa posição próxima do termopar “9” (lado exterior) e “8” (lado interior) indicada na Fig. 16 e Fig. 18. O fluxímetro escolhido para a mesma posição dos termopares foi o “3” indicado na Fig. 21.

O registo do termopar “T14” só foi possível de obter para a temperatura interior de 35°C, não estando operacional quando a temperatura programada foi de 26°C (Fig. 28).

O motivo para não se ter mudado os termopares de localização sempre que se alternavam os fluxímetros em registo foi motivado por dois factores: primeiro devido à instabilidade que a abertura da porta da câmara referida em 3.2 provoca nos fluxímetros, levando perto de uma hora a estabilizar e segundo devido ao facto da opção por este método desaproveitar uma entrada no registador de dados o que iria atrasar a conclusão deste estudo em seis dias uma vez que se definiu que se iriam registar os valores de pelo menos um dia completo para cada fluxímetro.

Antes de se iniciar o registo de dados procedeu-se ao escalonamento dos dois termopares usados de forma idêntica ao referido posteriormente em 4.4. Após este processo, o registo de dados foi iniciado tendo-se optado pela sequência de registo de dados apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Sequência do registo de dados

	Câmara a 26°C			Câmara a 35°C		
Dia de início	14-Jan	15-Jan	16-Jan	19-Jan	20-Jan	21-Jan
Hora de início	10:35	14:25	14:42	15:15	15:20	15:39
Canal 1	F5	F1	F3	F5	F1	F4
Canal 2	Tsi	Tsi	Tsi	Tsi	Tsi	Tsi
Canal 3	Tse	Tse	Tse	Tse	Tse	Tse
Canal 4	F2	F4	F6	F2	F6	F3

Segundo [19], a metodologia para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica baseia-se no procedimento descrito em seguida.

A partir dos registos obtidos directamente pelos fluxímetros, e utilizando ainda os valores médios obtidos nos termopares,  $t_{si}$  e  $t_{se}$ , obtém-se o valor da condutância térmica nas condições de ensaio,  $k_p$  em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . A expressão matemática (9) é a sugerida para o seu cálculo.

$$k_p = \frac{F}{t_{si} - t_{se}} \quad (9)$$

Na expressão (9) anterior, “F” representa a densidade de fluxo média dos fluxímetros utilizados. A expressão (10) é a utilizada para o seu cálculo.

$$F = \bar{F}_i = \frac{\sum(p \cdot Flx_{ni})}{\sum n} \quad (10)$$

Na qual, “p” representa o peso atribuído ao fluxímetro de ordem n, “ $Flx_{ni}$ ” representa a leitura obtida em cada fluxímetro de ordem n em cada intervalo de tempo i e “ $\bar{F}_i$ ” representa a média de todos os valores obtidos no intervalo de tempo i.

O peso atribuído a cada um dos fluxímetros está relacionado com a frequência de ocorrência das zonas onde os fluxímetros estão colocados. Esta parcela é utilizada quando alguns fluxímetros são colocados em zonas distintas de uma parede com por exemplo nas juntas de argamassa de união dos blocos de alvenaria, os quais se espera que registem fluxos maiores do que os obtidos nos blocos de alvenaria.

A obtenção do coeficiente de transmissão térmica do provete, nas condições padronizadas para a envolvente dos edifícios virá da expressão (11).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + R_{se} + R_{si}} \quad (11)$$

No caso do presente trabalho, uma vez que os fluxímetros utilizados continham um valor de calibração específico de cada fluxímetro, procedeu-se a uma ligeira alteração da expressão (10). Por outro lado, uma vez que os valores obtidos nos fluxímetros colocados não corresponderam ao esperado, não se considerou a parcela “p” da expressão (10) e só foram considerados para o cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica os valores obtidos através dos fluxímetros “3” e “4” colocados no centro dos blocos de alvenaria. Como tal, utilizou-se a expressão (12) ao invés da (10).

$$F = \bar{F}_t = \frac{\sum(Flx_{ni}) \cdot K_n}{\sum n} \quad (12)$$

Na qual “K<sub>n</sub>” representa o valor de calibração correspondente a cada fluxímetro n.

Os intervalos de tempo i de obtenção de dados foram de cinco minutos. Os valores apresentados na Tabela 11 são os valores médios da densidade de fluxo para cada fluxímetro no universo total dos valores obtidos para cada instante i.

Tabela 11 – Valores médios da densidade de fluxo para cada fluxímetro utilizado

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Temperatura a 26°C	0,31	0,33	0,40	0,40	0,35	0,39
Temperatura a 35°C	0,33	0,36	0,37	0,39	0,33	0,36
Valor médio da densidade de fluxo (W/m <sup>2</sup> )	0,32	0,35	0,39	0,40	0,34	0,38

Utilizando a expressão (9) e posteriormente a (11), calculou-se o coeficiente de transmissão térmica obtido por cada fluxímetro individual que serão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios do coeficiente de transmissão térmica para cada fluxímetro utilizado

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Temperatura a 26°C	0,30	0,32	0,38	0,38	0,33	0,37
Temperatura a 35°C	0,31	0,34	0,35	0,36	0,32	0,34
Valor médio de U (W/m <sup>2</sup> °C)	0,31	0,33	0,36	0,37	0,32	0,36

A evolução do registo do valor de U a cada intervalo i nos seis fluxímetros está representada nas duas figuras seguintes.

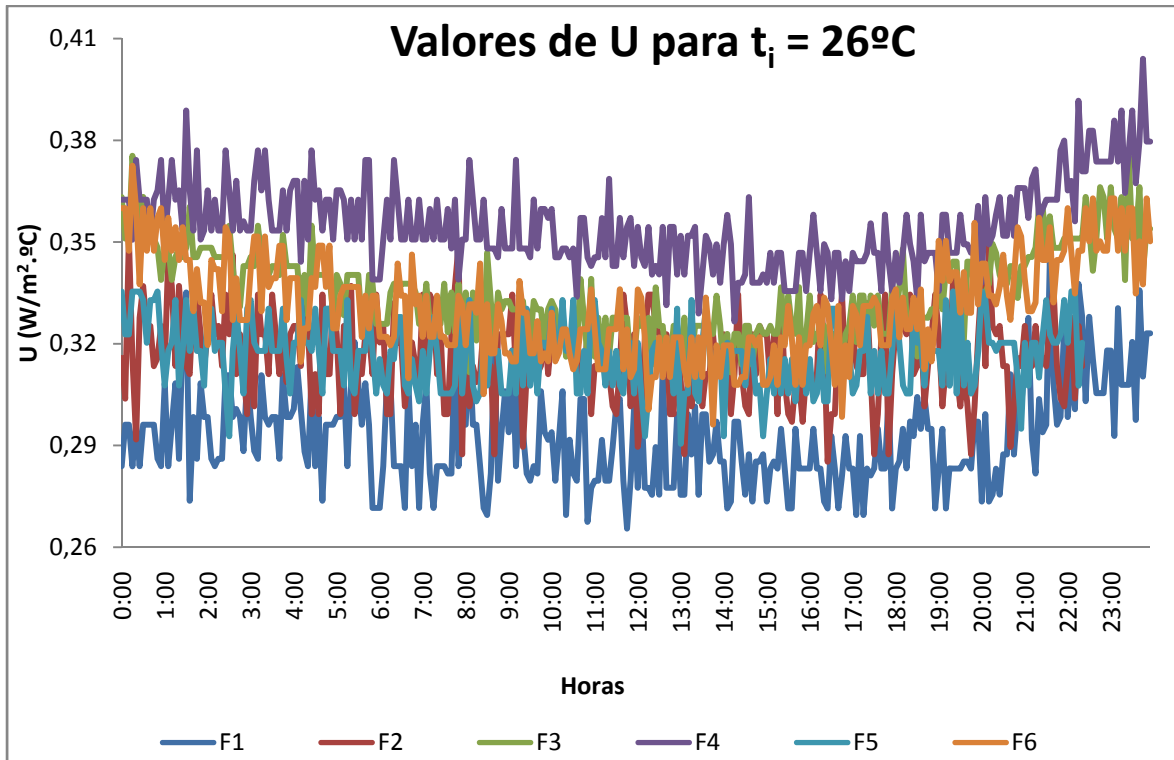


Fig. 30 – Evolução de U quando a temperatura da câmara climática é igual a 26°C

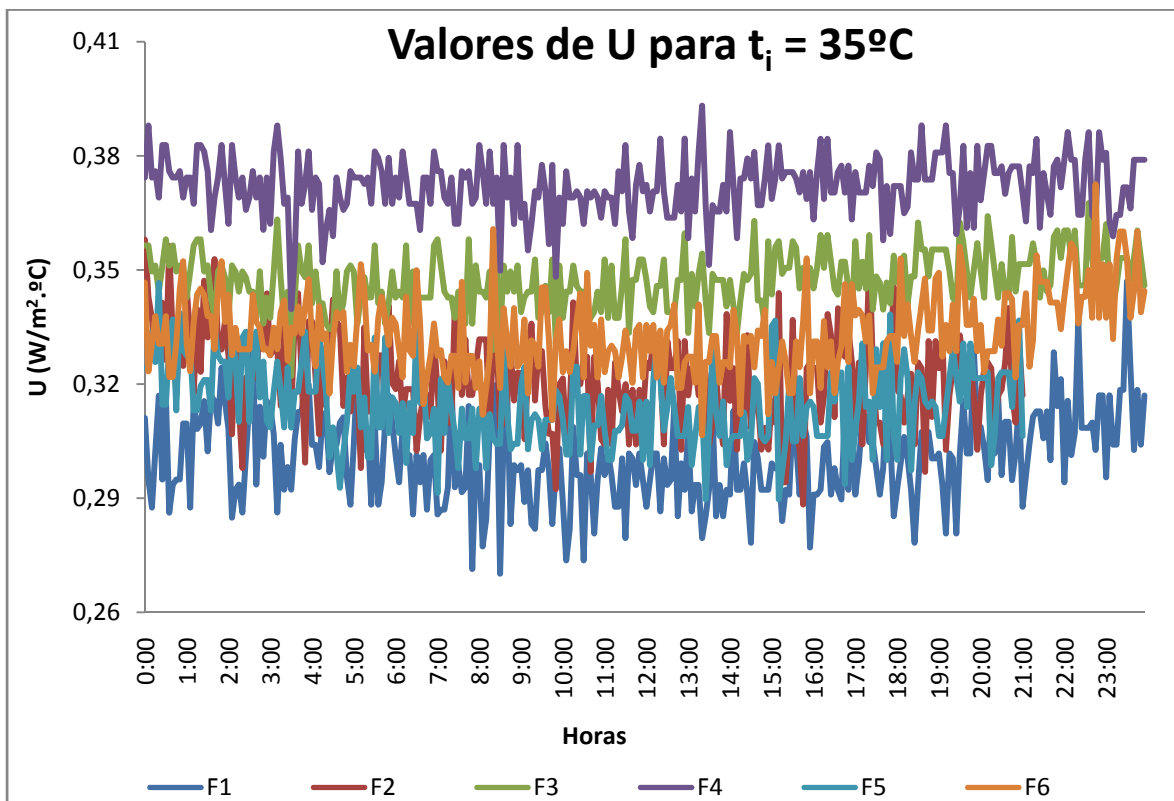


Fig. 31 – Evolução de U quando a temperatura da câmara climática é igual a 35°C

#### 4.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PROVETE NO ESTADO DE EQUILÍBRIO E EM REGIME DINÂMICO

Antes de se iniciar o estudo procedeu-se à calibração de todos os termopares como se demonstra seguidamente.

Colocaram-se os catorze termopares que não se encontravam embutidos no provete, no mesmo local do interior da câmara, a qual foi programada a uma temperatura constante de 25°C. O objectivo deste procedimento passa por se determinar as diferenças da medição de cada termopar relativamente aos 25°C do interior da câmara climática. As condições de 25°C no interior da câmara mantiveram-se durante aproximadamente doze horas, das quais se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores obtidos através de todos os termopares sujeitos à mesma temperatura

Termopares	3	4	5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Média de todos os valores registados	24,3	24,5	26,3	26,2	26,7	26,3	26,8	27,0	25,7	25,2	25,0	25,1	25,0	25,1
Valor máximo registado	24,3	24,6	26,3	26,3	26,8	26,4	26,9	27,1	25,8	25,3	25,1	25,2	25,1	25,2
Valor mínimo registado	24,2	24,4	26,2	26,1	26,6	26,3	26,7	26,8	25,6	25,1	25	25	24,9	25,1

A partir destes resultados determinou-se a diferença entre o valor médio de todos os registos e os 25°C que todos os termopares deveriam medir. O valor resultante foi introduzido no registador de dados de modo a que todas as futuras leituras estivessem já correctamente escalonadas. A correcção inserida está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Correcção obtida para cada um dos termopares

Termopares	3	4	5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Correcção	0,7	0,5	-1,3	-1,2	-1,7	-1,3	-1,8	-2,0	-0,7	-0,2	0,0	-0,1	0,0	-0,1

Após este procedimento, elaborou-se um programa para ser introduzido na câmara climática Fitoclima 1000 EDTU descrita em 3.2, composto por diversos patamares de temperaturas. Os patamares de temperaturas estudados foram escolhidos baseados na temperatura exterior média, registada no início deste trabalho, situada perto dos 20°C. Decidiu-se iniciar o estudo do provete programando na câmara climática uma temperatura superior à temperatura exterior de referência em 15°C, ou seja 35°C, seguindo-se a transição dessa temperatura para 5°C (menos 15°C que a temperatura exterior). Após estes dois patamares estudaram-se outros dois com temperaturas intermédias relativamente aos anteriores. Para esse efeito, programou-se a câmara climática a 10°C e posteriormente a 26°C.

O programa inserido na câmara climática está apresentado na Fig. 32 que se segue.

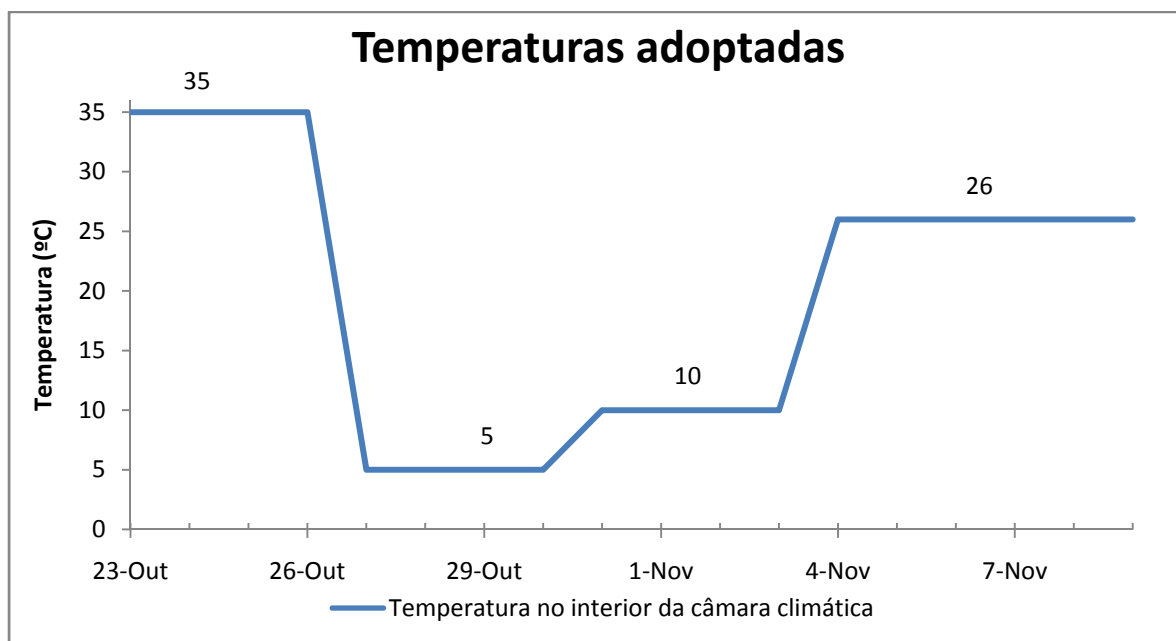


Fig. 32 – Ciclo adoptado para o estudo do comportamento dinâmico do ETICS

Para monitorizar os dados foram utilizados dezoito termopares e dois registadores de dados. A distribuição dos termopares pode ser consultada nas Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18.

Com base nos dados registados pelo sistema de motorização enquanto o programa decorria, elaboraram-se os seguintes estudos:

- Estado de equilíbrio por cada patamar de temperatura;
- Estado de transição entre os quatro patamares;
- Evolução da diferença entre os valores registados pelos termopares interiores e exteriores com os valores das temperaturas programadas no interior da câmara climática e os valores da temperatura do ar exterior, respectivamente.

Referente ao primeiro estudo elaborou-se um gráfico do perfil transversal do provete, por tipo de revestimento final, representando o estado de equilíbrio de cada patamar de temperaturas. Para a sua elaboração foram utilizados os registos dos termopares colocados nas interfaces dos componentes do provete referidos em 3.3. Os dados constituintes destes gráficos foram escolhidos criteriosamente de modo a evitar a consideração de dados falseados pela variação constante da temperatura exterior, como tal, foi escolhido para a elaboração de cada gráfico um instante após a temperatura correspondente ao termopar colocado na interface do isolamento e do suporte estar em equilíbrio.

Dos gráficos obtidos só irão ser apresentados, de seguida, os referentes ao revestimento final em revestimento cimentício uma vez que, como era expectável devido à reduzida resistência térmica do reboco delgado armado, os gráficos referentes ao mesmo acontecimento para os dois tipos de revestimento final são muito idênticos. Os cálculos realizados para se estimar o equilíbrio teórico de cada perfil transversal estão apresentados em 4.2.

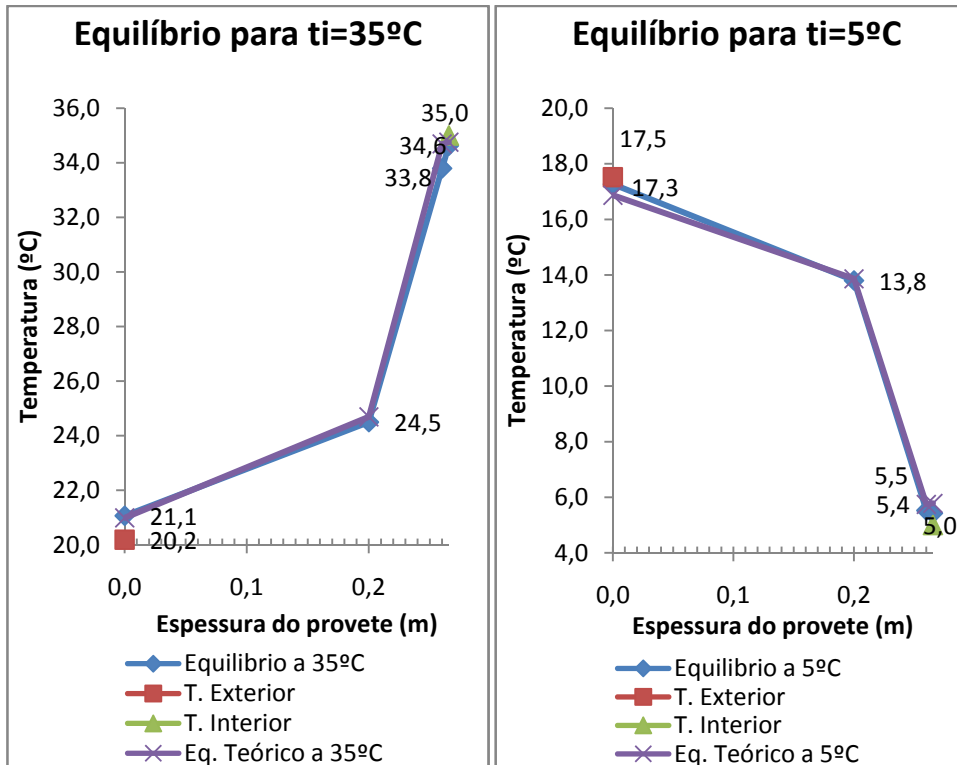


Fig. 33 – Perfil de temperaturas em equilíbrio do provete a  $35^\circ\text{C}$  e a  $5^\circ\text{C}$

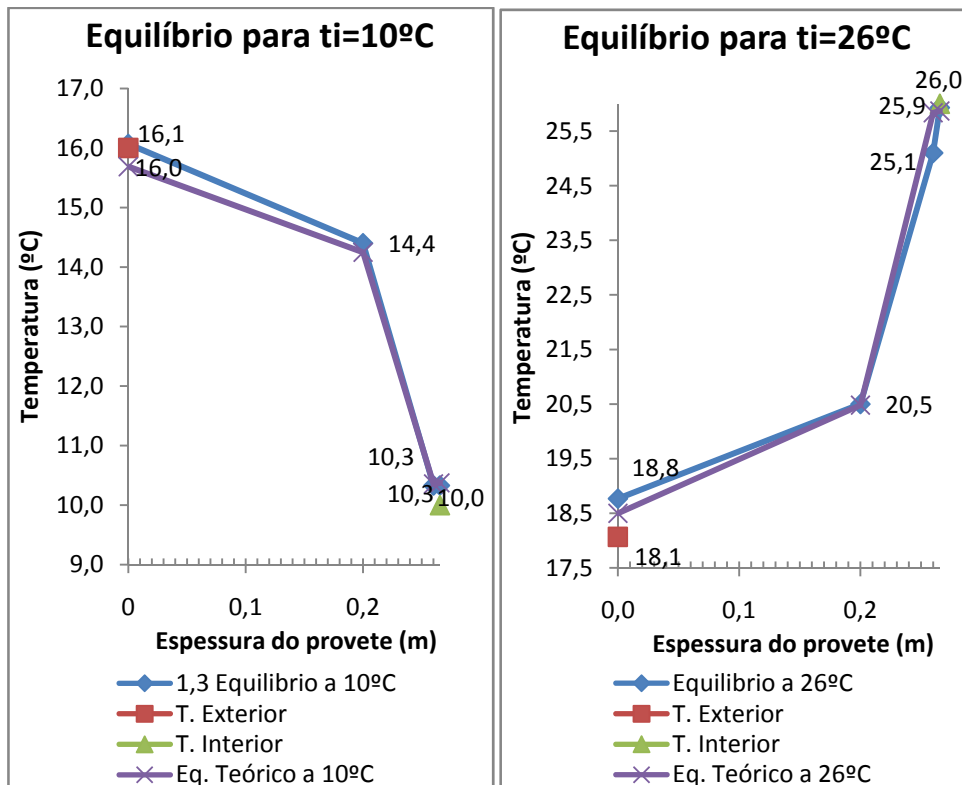


Fig. 34 – Perfil de temperaturas em equilíbrio do provete a  $10^\circ\text{C}$  e a  $26^\circ\text{C}$

Para ser possível efectuar o segundo estudo referido (transição das temperaturas dos quatro patamares), foram elaborados gráficos para ilustrar o comportamento dinâmico do provete quando este está sujeito à variação das temperaturas que ocorrem inter-patamares. Para tal, optou-se pela elaboração de um gráfico referente a cada tipo de revestimento final do provete, nos quais se representou a evolução ao longo do tempo da temperatura de todos os termopares. Para completar a observação foram também elaborados gráficos de perfil correspondendo a três fases distintas de cada transição. De seguida estão apresentados apenas os gráficos referentes ao revestimento final cimentício, uma vez que os gráficos correspondentes ao revestimento final RPE são idênticos.

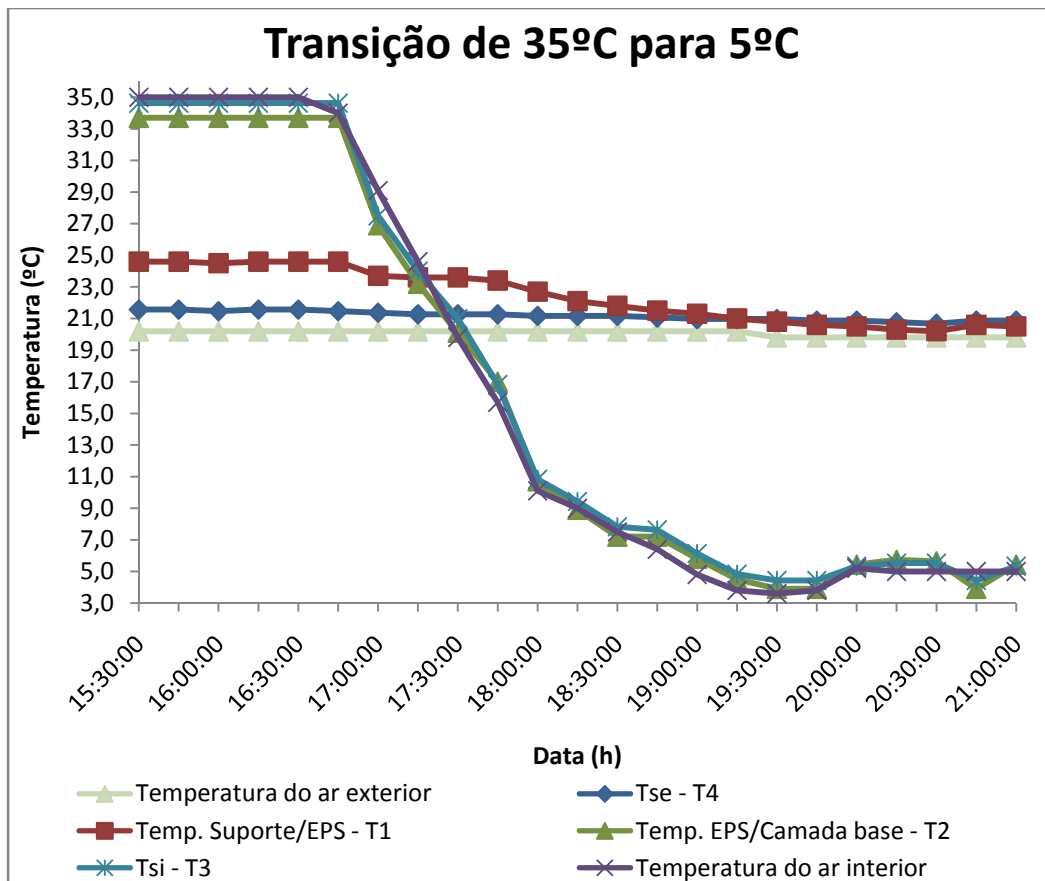


Fig. 35 – Estudo da transição do patamar de 35°C para 5°C

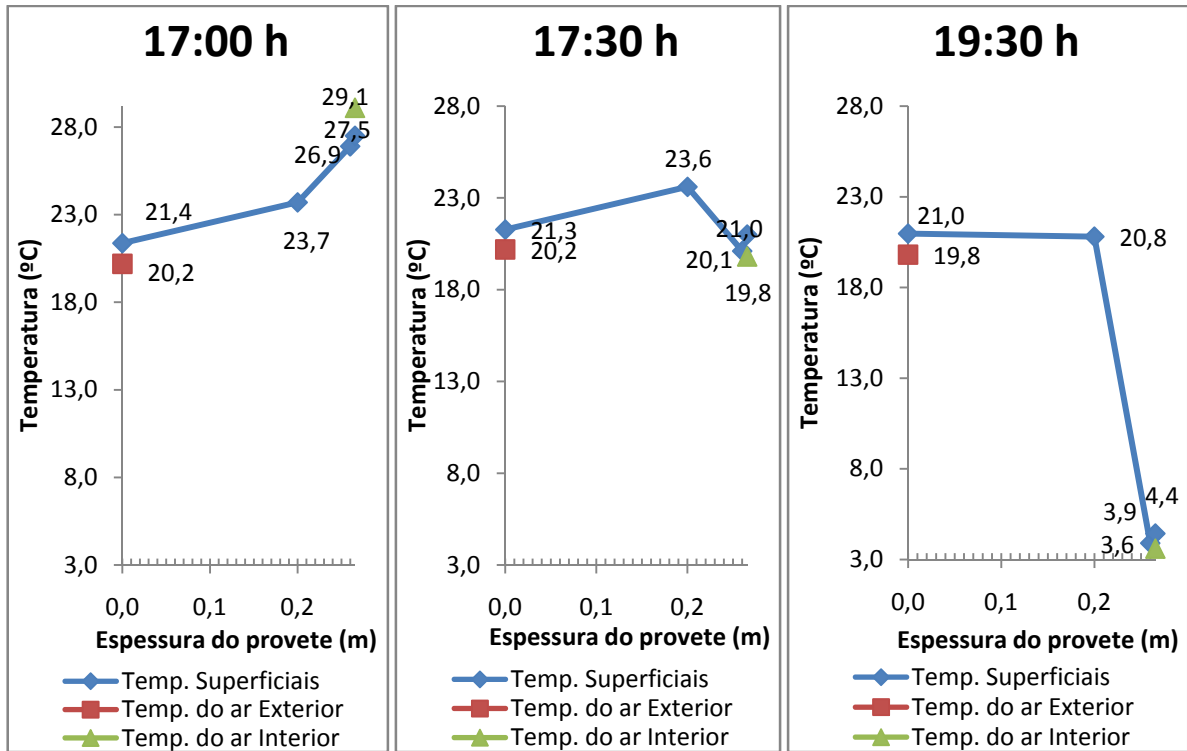


Fig. 36 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 35°C para 5°C

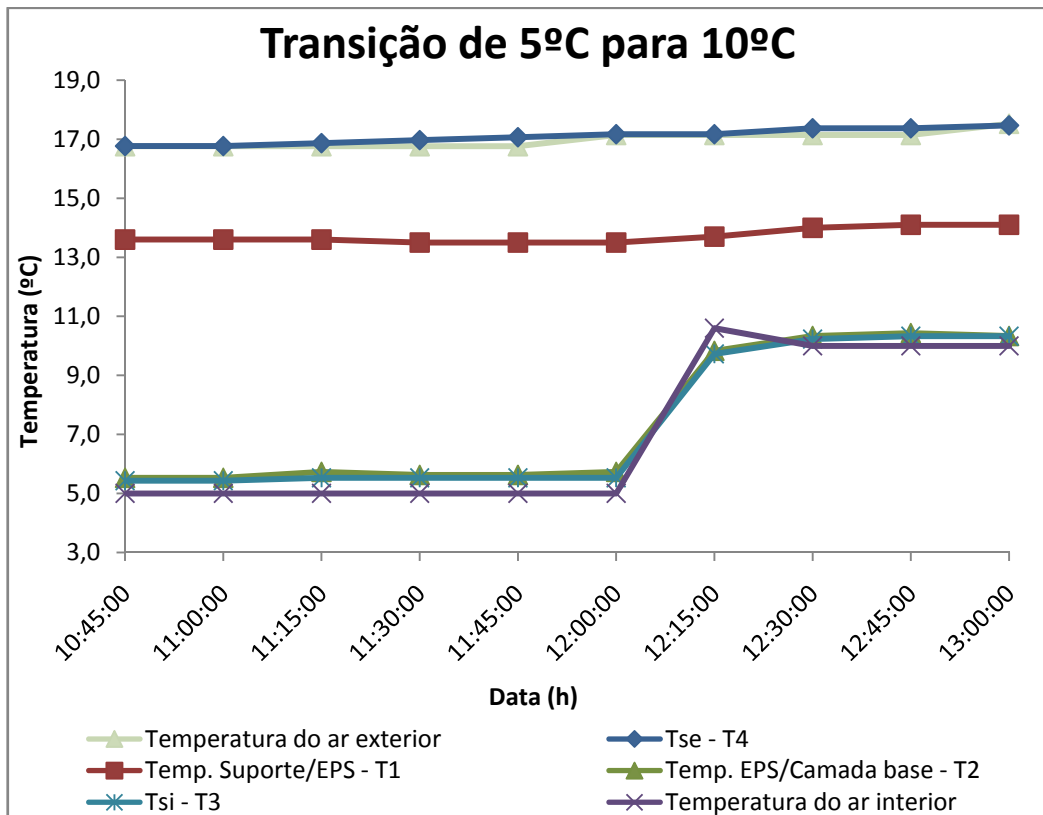


Fig. 37 – Estudo da transição do patamar de 5°C para 10°C

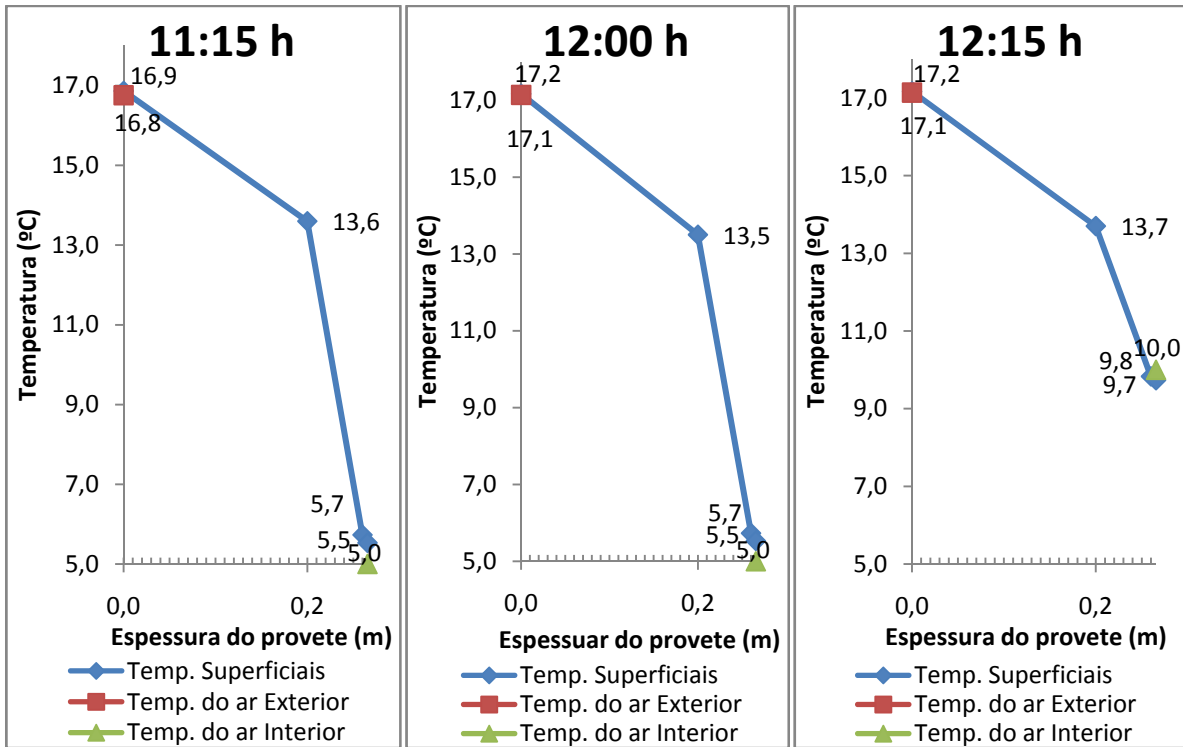


Fig. 38 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 5°C para 10°C

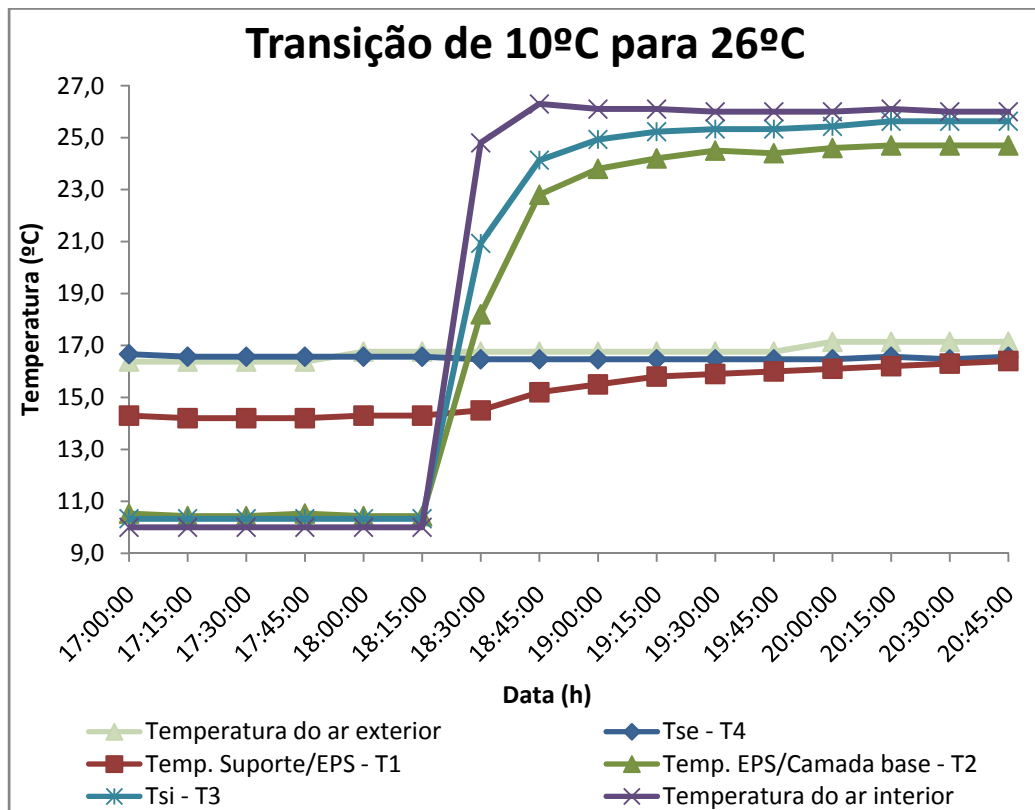


Fig. 39 – Estudo da transição do patamar de 10°C para 26°C

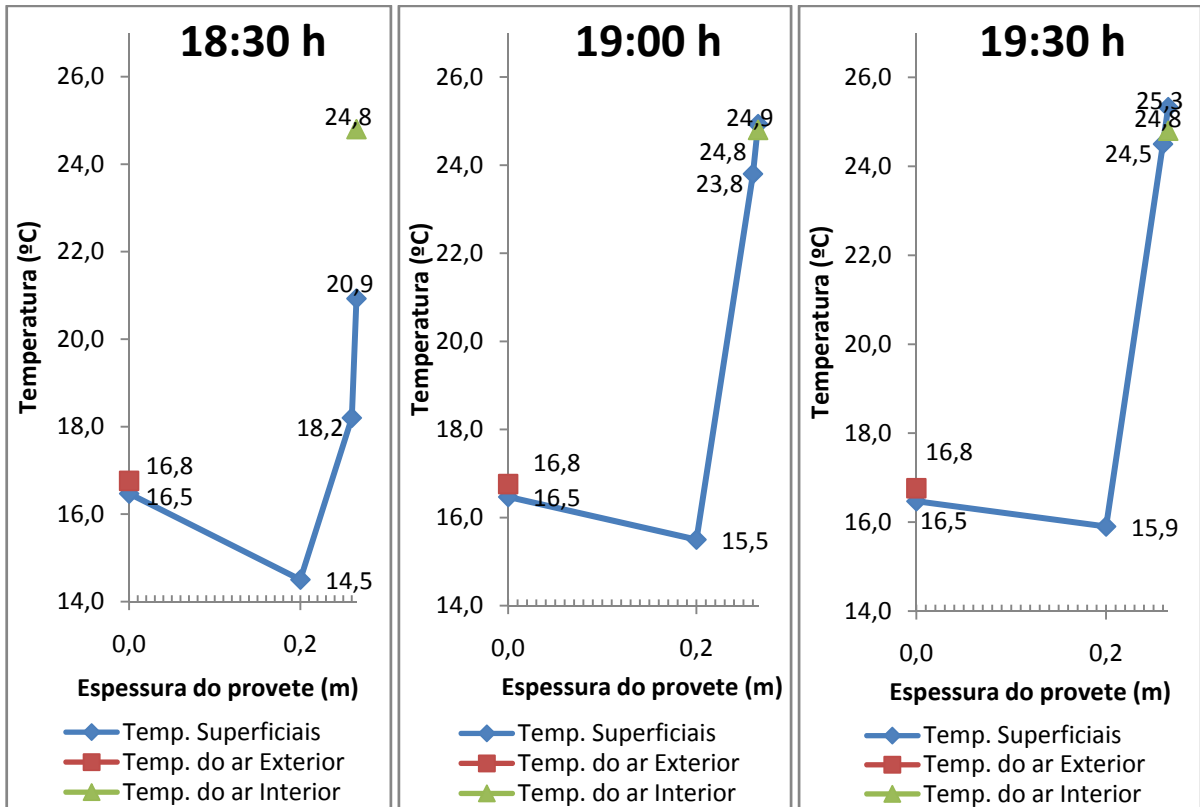


Fig. 40 – Perfis correspondentes a diferentes fases da transição do patamar de 10°C para 26°C

Por fim, para se estudar a evolução da diferença da temperatura superficial registada nos dois lados do provete com a temperatura do ar de cada lado, elaboraram-se os gráficos apresentados nas Fig. 41 e Fig. 42. Este estudo teve como objectivo o cálculo das resistências superficiais interior ( $R_{si}$ ) e exterior ( $R_{se}$ ). Com base nas Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28, e Fig. 29 observa-se que os termopares “3” e “4”, que registam os valores das temperaturas superficiais interiores e exteriores respectivamente, foram os que mediram um valor mais aproximado das referências (temperatura do ar interior e exterior respectivamente”, como tal, foi apenas a partir destes dois termopares que se elaboraram as Fig. 41 e Fig. 42. Os cálculos de  $R_{se}$  e  $R_{si}$  também foram efectuados a partir destes dois termopares e serão apresentados posteriormente em 4.6.

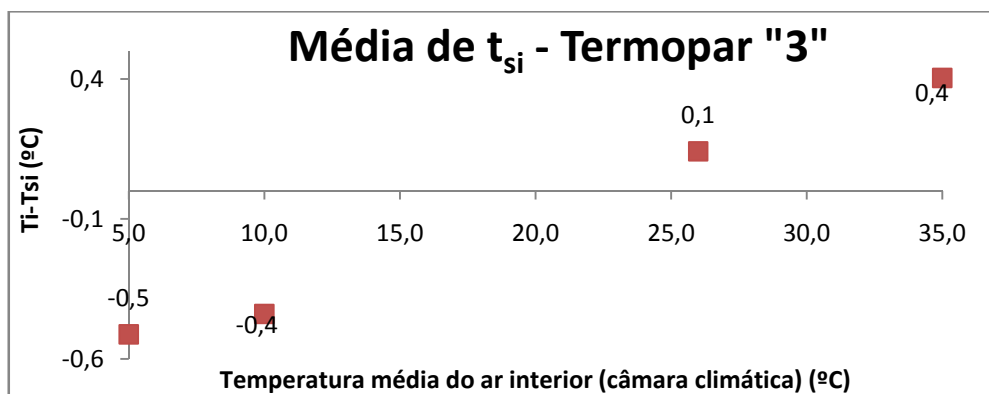


Fig. 41 – Diferença entre a temperatura interior e a  $t_{si}$  média registada nos termopares interiores

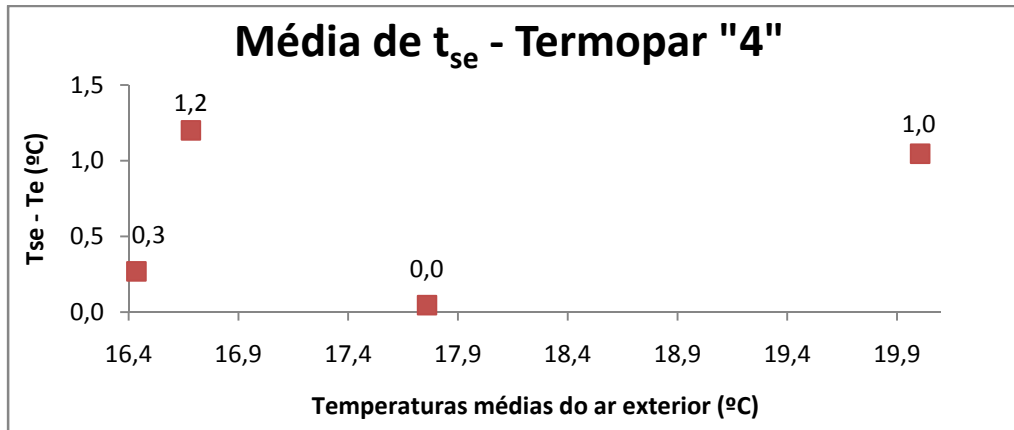


Fig. 42 – Diferença entre a  $t_{se}$  média registada nos termopares exteriores e a temperatura média exterior

Os gráficos anteriores foram obtidos a partir dos registos médios do estado de equilíbrio para os patamares de temperaturas programados.

Na Fig. 41 o eixo dos “xx” representa a temperatura programada no interior da câmara climática para cada patamar de temperatura. Na Fig. 42° o eixo dos “xx” representa a temperatura exterior média registada durante cada patamar. No patamar de 35°C a temperatura média exterior registada foi de 20,0 °C, para o patamar de 5°C foi de 17,8°C, para o patamar de 10°C foi de 16,4°C e para o patamar de 26°C a temperatura média exterior registada foi de 16,7°C. A variação da temperatura exterior em função da temperatura interior programada na câmara climática enquanto decorreu o ensaio pode ser visualizada nas Fig. 43 e Fig. 44.

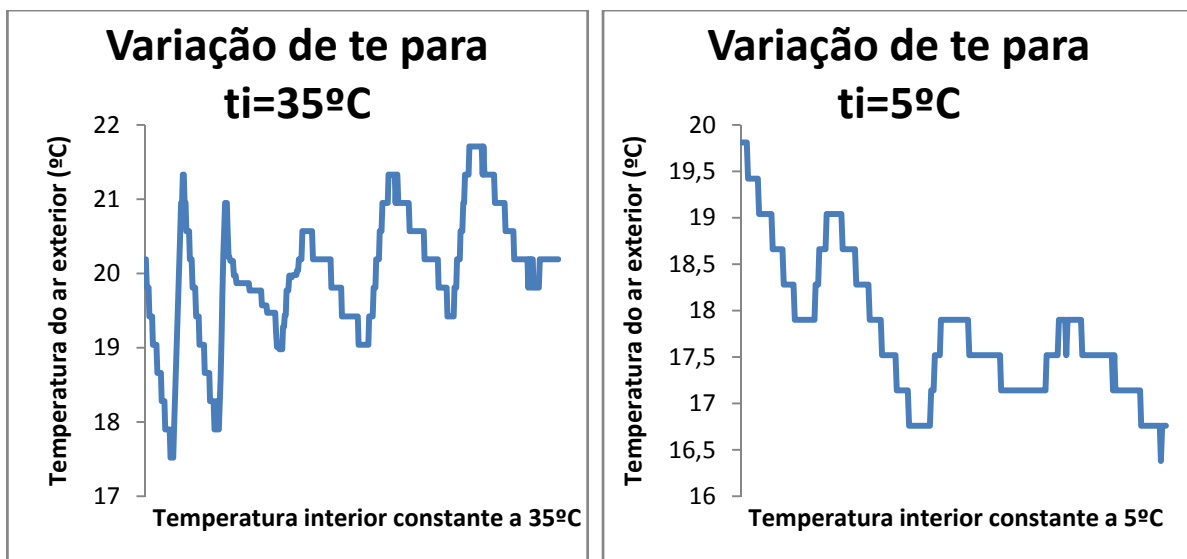


Fig. 43 – Evolução da temperatura exterior quando a temperatura programada interior era de 35°C e 5°C

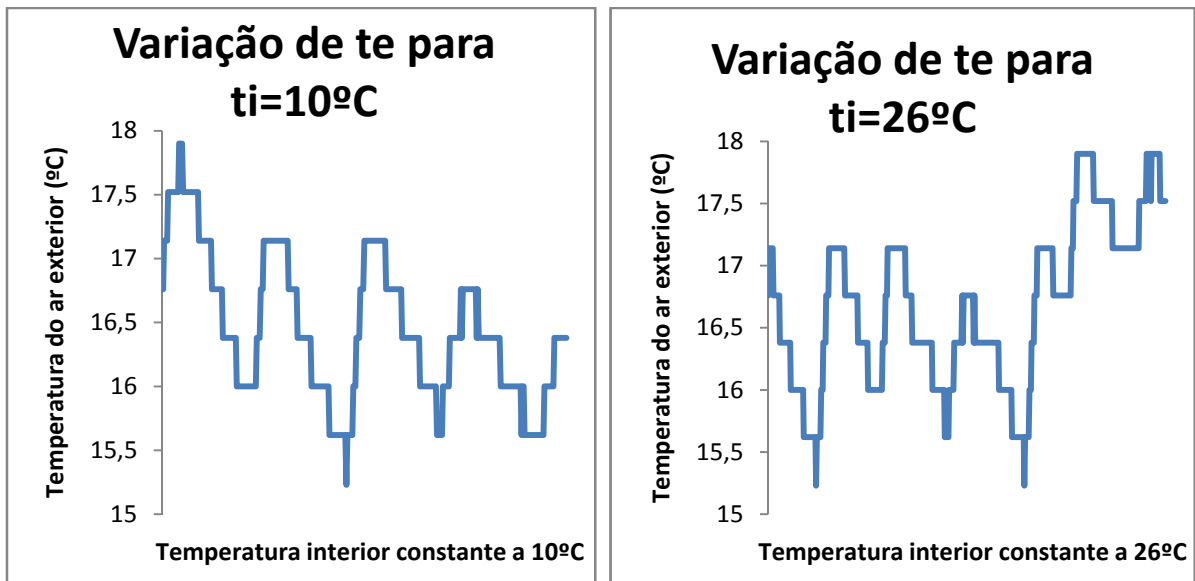


Fig. 44 - Evolução da temperatura exterior quando a temperatura programada interior era de 10°C e 26°C

#### 4.5. ANÁLISE DAS POTENCIALIDADES DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO

O método utilizado para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica diferiu de [20] e [21], uma vez que não se possuía o equipamento recomendado para simular o lado frio do provete, como já foi referido. Por outro lado, não tinham sido calculadas até à data as perdas térmicas,  $G$ , do equipamento descrito em 3.2 pelas zonas indicadas na Fig. 45, indispensáveis para a metodologia seguida pelos documentos acima apresentados.

A existência de duas câmaras climáticas permite que uma simule as condições de uma câmara fria e a outra de uma câmara quente de modo a maximizar o fluxo de calor através do provete, situado na interface das duas câmaras. Dado que a norma [21] exige que os fluxos de calor através das paredes da câmara quente sejam inferiores a 25% do fluxo de calor que atravessa o provete, a existência de duas câmaras climáticas permite que uma (a câmara quente) seja programada a uma temperatura próxima da temperatura do ar do local onde a Hot-Box está instalada e que a câmara fria funcione a uma temperatura inferior a essa de modo a criar-se um gradiente de temperaturas. Este procedimento irá fazer reduzir as trocas térmicas da câmara quente com o ar exterior e maximizar os fluxos de calor através do provete, cumprindo-se assim os 25% máximos para as perdas térmicas da câmara quente. A utilidade do uso de duas câmaras climáticas é grande quando se trata de provetes com reduzido coeficiente de transmissão térmica, sendo neste caso impossível a utilização da metodologia de [21] só com uma câmara climática dado que as perdas térmicas ultrapassam os 25% referidos. Segundo [19] e [23] com uma única câmara é possível a determinação do coeficiente de transmissão térmica de janelas que é um provete com pouca resistência térmica.

Contudo, não existe um só tipo de câmaras climáticas. O referido anteriormente, é válido para as câmaras climáticas calibradas ou seja, as que precisam de um ensaio com um provete de conhecido  $U$  para se determinar as perdas térmicas da câmara quente. O equipamento utilizado e descrito em 3.2 é deste tipo. Existem ainda as câmaras quentes com guarda, que foram construídas para se minimizarem as perdas térmicas pelas suas paredes qualquer que fosse o gradiente entre o ar interior da câmara quente e o ar do local de instalação deste equipamento. Isto conseguiu-se com a construção de duas câmaras quentes, uma dentro da outra. A temperatura da câmara envolvente (câmara maior) é

programada automaticamente de forma a manter-se à mesma temperatura que o utilizador escolhe para a câmara envolvida (câmara mais pequena), evitando-se assim trocas térmicas entre a câmara mais pequena e a sua envolvente, maximizando-se os fluxos de calor através provete até à câmara fria. Neste tipo de equipamento o coeficiente de transmissão térmica pode ser calculado a partir de [20] e [29].

Existe ainda a possibilidade de se incluir na câmara quente, dos dois tipos, um ecrã de cor preta próximo do provete de forma a serem quantificadas as trocas térmicas por radiação. Esta solução é referida no documento [20].

Porém, o cálculo do coeficiente de transmissão térmica através da utilização de fluxímetros com o equipamento utilizado é possível.

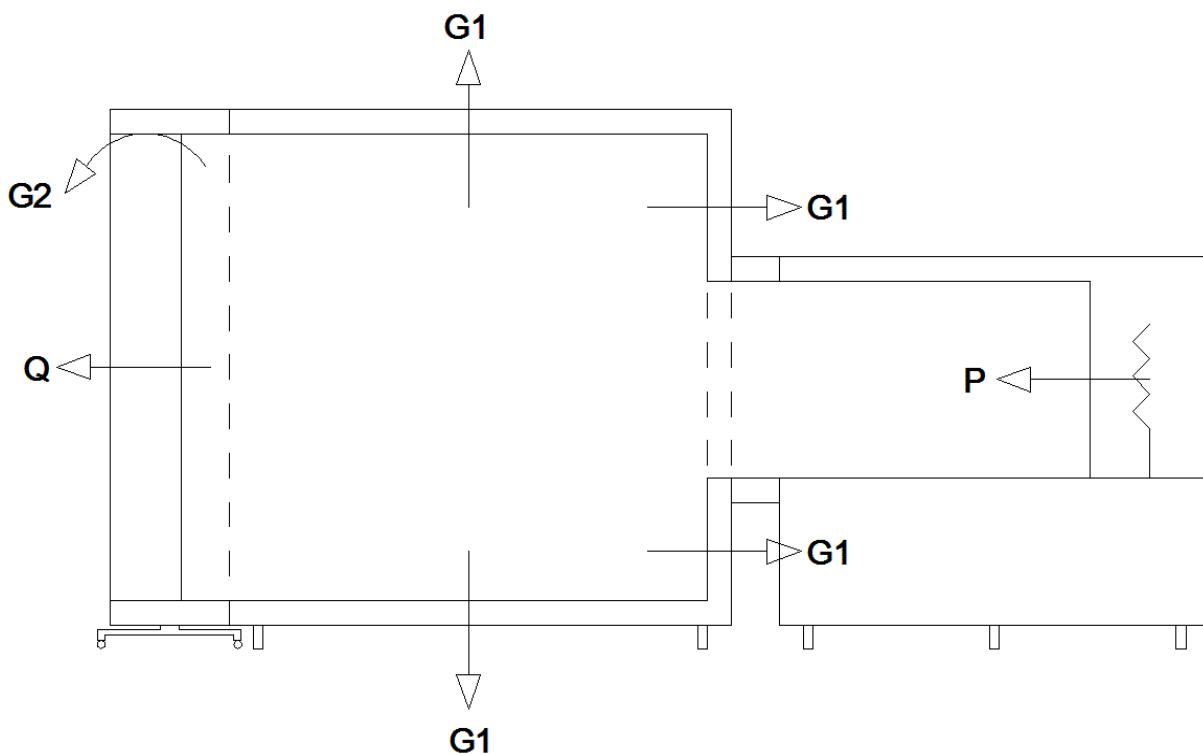


Fig. 45 – Esquema representativo da potência e perdas do equipamento utilizado

O cálculo das perdas do equipamento à disposição poderia ter sido efectuado como refere [19] e [21] com a construção de um novo provete de condutibilidade térmica,  $\lambda$ , conhecida e de espessura idêntica à do provete que se pretende calcular o  $U$ . A partir deste novo provete calculava-se a potência efectiva,  $Q$ , que atravessa o provete de calibração que subtraída à potencia fornecida pela câmara,  $P$ , conduz ao valor do fluxo de calibração,  $G$ , para uma dada diferença de temperatura entre o interior da câmara quente e o exterior,  $\Delta T$ .  $Q$  e  $G$  seriam calculadas pelas expressões (13) e (14) respectivamente.

$$Q = (t_{si} - t_{se}) \cdot A \cdot U \quad (13)$$

Em que “A” é a área do provete, “e” a espessura e “ $t_{si}$ ” e “ $t_{se}$ ” as temperaturas superficiais interiores e exteriores respectivamente.

$$G = P - Q \quad (14)$$

A curva de calibração de G em função de  $\Delta T$  é obtida usando as potencialidades do programa de cálculo EXCEL, tendo como base um número suficiente de dados de modo a que o coeficiente de correlação da referida curva seja próximo de 1. A partir do cálculo de G o coeficiente de transmissão térmica é calculado pela expressão (15).

$$U = \frac{1}{\frac{A \cdot (t_i - t_e)}{P - G} - \frac{A \cdot (t_i - t_{si})}{P - G} - \frac{A \cdot (t_{se} - t_e)}{P - G} + R_{se} + R_{si}} \quad (15)$$

Sendo “ $t_i$ ” e “ $t_e$ ” a temperatura interior e exterior da câmara respectivamente.

Este método não foi realizado uma vez que a utilização dos fluxímetros permite o cálculo do coeficiente de transmissão térmica do provete sem ter que se recorrer às potências da câmara e à sua calibração.

Contudo, efectuou-se neste trabalho uma tentativa para a determinação das perdas da câmara, não para se calcular o U do provete em ETICS mas através dele, pela mesma metodologia mas por ordem inversa.

Primeiro calculou-se Q pela expressão (13) a partir do U obtido por intermédio dos fluxímetros. Posteriormente deveria-se ter conseguido determinar P com a informação obtida através da câmara climática. Como já foi referido em 3.2, a câmara climática utiliza uma potência de arrefecimento proveniente de um compressor, e apresenta como output o seu valor em percentagem da potência total. Contudo, o valor da potência total do compressor, por não ser linear, não foi possível de obter até à data, tendo, no entanto, o fabricante do mesmo se comprometido a fornecer esta informação quando possível. Como tal, decidiu-se elaborar a formulação numérica que irá possibilitar o cálculo das perdas da câmara de forma simplificada. O valor de P deveria ter sido obtido através da expressão (16).

$$P = P_{aq} \cdot (\%P_{aq}) - P_{ar} \cdot (\%P_{ar}) \quad (16)$$

Na qual,  $P_{aq}$  representa a potência total de aquecimento da máquina que é igual a 8000W,  $(\%P_{aq})$  a potência efectiva de aquecimento fornecida pelo sistema de controlo da máquina,  $P_{ar}$  a potência total de arrefecimento da máquina variável em função de “ $t_i$ ” e  $(\%P_{ar})$  a potência efectiva de arrefecimento fornecida pelo sistema de controlo da máquina.

Após o cálculo de P e Q devia ter-se obtido G por (14).

O valor das perdas térmicas G varia em função do gradiente de temperaturas do ar interior e exterior da câmara climática,  $\Delta T$ , devendo-se por isso considerar alguns  $\Delta T$  diferentes para se obter a curva de calibração da câmara. Cada  $\Delta T$  programado conduz a um ponto da curva de calibração. Esses pontos são calculados pela expressão (18).

$$G = (P_{aq} \cdot (\%P_{aq}) - P_{ar} \cdot (\%P_{ar})) - A \cdot U \cdot \Delta T \quad (17)$$

Posteriormente à determinação de alguns pontos, deve-se elaborar um gráfico com o G em função de  $\Delta T$  a partir do qual se obtém uma linha de tendência, usando-se a mesma para a determinação de todos os valores de G segundo  $\Delta T$ .

Sendo U o valor do coeficiente de transmissão térmica de um provete conhecido utilizado para calibração. No caso em estudo o valor a utilizar seria o determinado experimentalmente para o provete (0,37 W/(°C.m<sup>2</sup>)).

#### 4.6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

O estudo do comportamento térmico do provete permitiu analisar diferentes solicitações a que uma parede ETICS pode ser sujeita por variação da temperatura de um dos lados da parede, no caso em estudo o revestimento final, simuladas pela câmara climática.

Observou-se a partir da Fig. 33 que o gráfico do perfil transversal obtido para o patamar de temperaturas a 35°C é praticamente coincidente com o teórico. A mesma situação não se verifica quando o patamar de temperaturas está situado a 5°C, 10°C e 26°C existindo uma diferença entre os valores registados e os esperados principalmente no ponto correspondente à temperatura superficial exterior como poder ser observado na Fig. 33 e na Fig. 34. Este facto pode ser explicado por erros de medição do termopar “4”, registando valores muito elevados, e pela consideração inicial do R<sub>se</sub>. É possível também verificar que, como seria expectável, os dois gráficos presentes na Fig. 33 têm um comportamento simétrico uma vez que a diferença entre as temperaturas interiores e exteriores é idêntica.

Analisando a Fig. 34, verifica-se que estes dois gráficos, à semelhança do ocorrido na Fig. 33, também são aproximadamente simétricos.

Observando todos os perfis transversais do estado de equilíbrio (Fig. 33 e Fig. 34) constata-se que apesar de ter existido uma variação da temperatura interior na ordem dos 30°C e uma variação da temperatura exterior pouco significativa, a temperatura da interface do isolamento térmico e do suporte em alvenaria de betão leve só sofreu uma alteração de 10,7°C aproximadamente. Esta diferença de valores deve-se ao efeito do isolamento térmico e demonstra a influência que o ETICS para a durabilidade do suporte.

Para facilitar a interpretação e a própria escrita deste capítulo apresentam-se de seguida as localizações descritivas complementares das Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18 referentes aos termopares utilizados nos gráficos do capítulo 4.2.

- Termopar “1” (t1) – Localizado na interface do isolamento térmico e dos blocos de alvenaria constituintes do “suporte”;
- Termopar “2” (t2) – Localizado na interface do isolamento térmico com a camada base;
- Termopar “3” (t3) – Colocado na superfície do provete do lado climatizado (interior da câmara climática);
- Termopar “4” (t4) – Situado na superfície do provete do lado não climatizado (exterior da câmara climática).

Considerando o primeiro gráfico de transição entre os patamares de 35°C e 5°C (Fig. 35), observa-se que a temperatura do termopar “3” e a temperatura do termopar “2”, variam na mesma ordem de

grandeza que a temperatura interior da câmara descrita em 3.2. Este facto deve-se essencialmente à reduzida resistência térmica do reboco delgado armado. O início da sua variação ocorre ao mesmo tempo que a temperatura da câmara climática inicia a transição entre temperaturas dos patamares referidos. Observando as temperaturas registadas correspondentes aos termopares “1” e “4”, observa-se que a gama de temperaturas que estes termopares atingem é significativamente inferior aos termopares “2” e “3” e ocorre principalmente de forma muito mais lenta. Enquanto os termopares “2” e “3” atingem o equilíbrio aproximadamente três horas depois de iniciarem a evolução de temperaturas como pode ser observado Fig. 35 os termopares “1” e “4” só a atingem passados mais de três dias estabilizando em valores que podem ser visualizados na Fig. 46 que se segue. A evolução das temperaturas dos perfis transversais durante a transição de 35°C para 5°C pode ser observada na Fig. 36.

Apesar do desfasamento de tempo para o termopar “4” atingir o equilíbrio estar directamente relacionado com a evolução da temperatura exterior não controlada, o desfasamento de tempo para o termopar “1” atingir o equilíbrio deve-se maioritariamente ao efeito do isolamento térmico e à inércia térmica que a sua posição no elemento construtivo lhe confere. Pode também ser observado que a variação de temperatura de “1” ocorre de forma mais brusca no início do processo de transição de temperaturas diminuindo sensivelmente quatro graus em apenas cinco horas. A evolução prossegue embora de forma mais lenta. Esta evolução aproxima-se de uma curva logarítmica como pode ser visualizado na imagem seguinte:

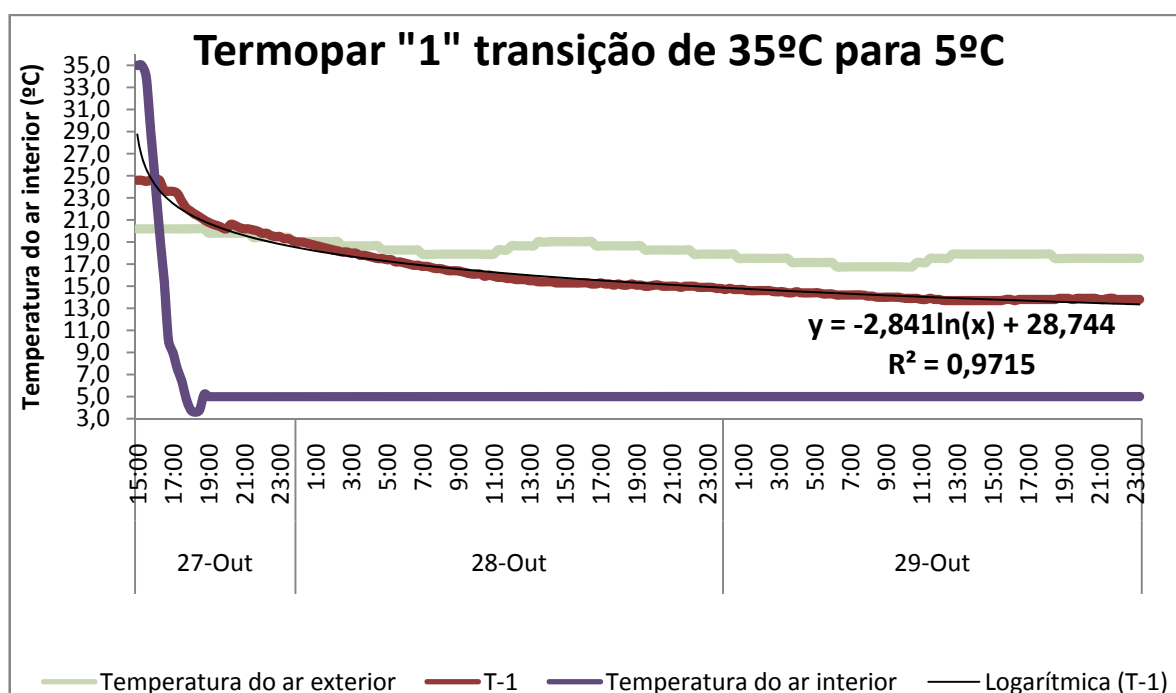


Fig. 46 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 35°C para 5°C

Na Fig. 37 e com o auxílio da Fig. 47, apesar de forma menos evidente que na Fig. 35/Fig. 46 devido à reduzida variação de temperaturas que as primeiras ilustram, observa-se que o equilíbrio do termopar “1” só é atingido perto de um dia depois de se iniciar a transição de temperaturas enquanto que o equilíbrio de “2” e “3” é atingido em sensivelmente quarenta e cinco minutos. Os gráficos representativos do perfil transversal de três fases distintas da transição da temperatura de 5°C para

10°C apresentados na Fig. 38, ajudam a perceber a diferença de velocidade da alteração de temperaturas uma vez que no perfil das 12:00h os termopares “2” e “3” registavam 5,7 e 5,5°C respectivamente e no perfil das 12:15h (apenas quinze minutos depois) apresentavam mais 4°C cada um aproximadamente enquanto o termopar “1” apenas apresentou uma subida de 0,2°C de um perfil para o outro.

À semelhança do que havia acontecido no caso anterior, a evolução de temperaturas de “1” assemelha-se a uma curva logarítmica apresentada na Fig. 47.

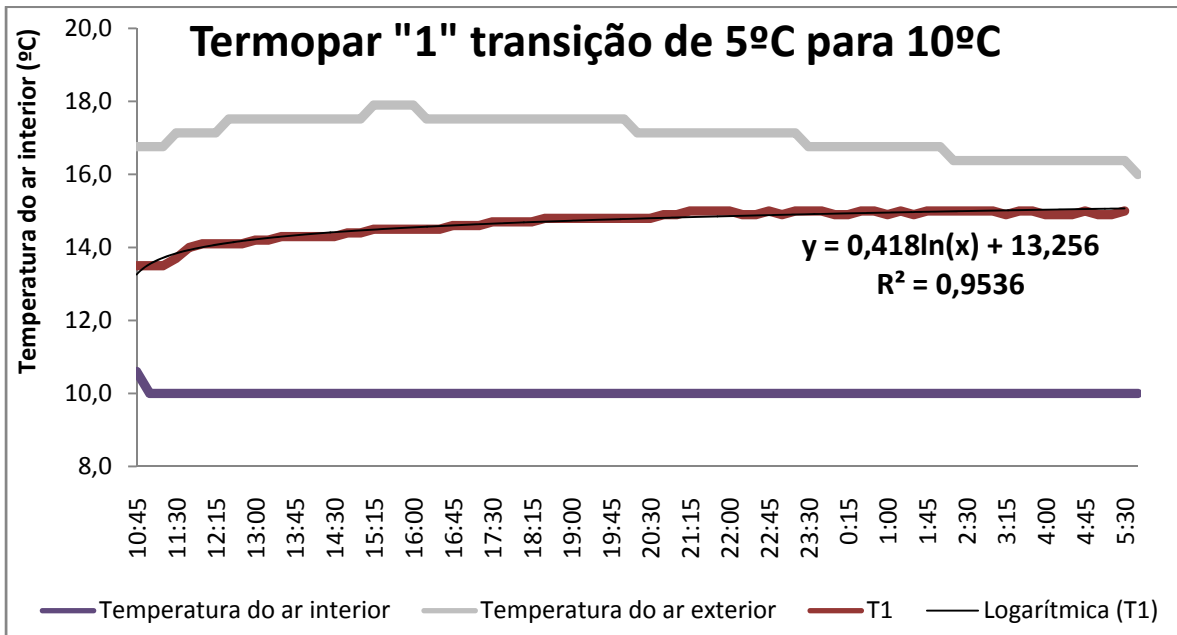


Fig. 47 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 5°C para 10°C

Tendo em conta os dados fornecidos pela Fig. 39, que ilustra a variação de temperaturas de 10°C para 26°C, como sucedeu nas transições referidas anteriormente, os termopares “2” e “3” atingiram o equilíbrio ao fim de pouco tempo (duas horas), enquanto o termopar “1” só o atinge passados um dia e quinze horas aproximadamente como pode ser visualizado na Fig. 48. A evolução de “1” ocorre nas primeiras quatro horas com uma variação de aproximadamente 2°C e até atingir o equilíbrio (mais um dia e meio aproximadamente) varia apenas outros 2°C e como tal, pode ser aproximada a uma curva logarítmica.

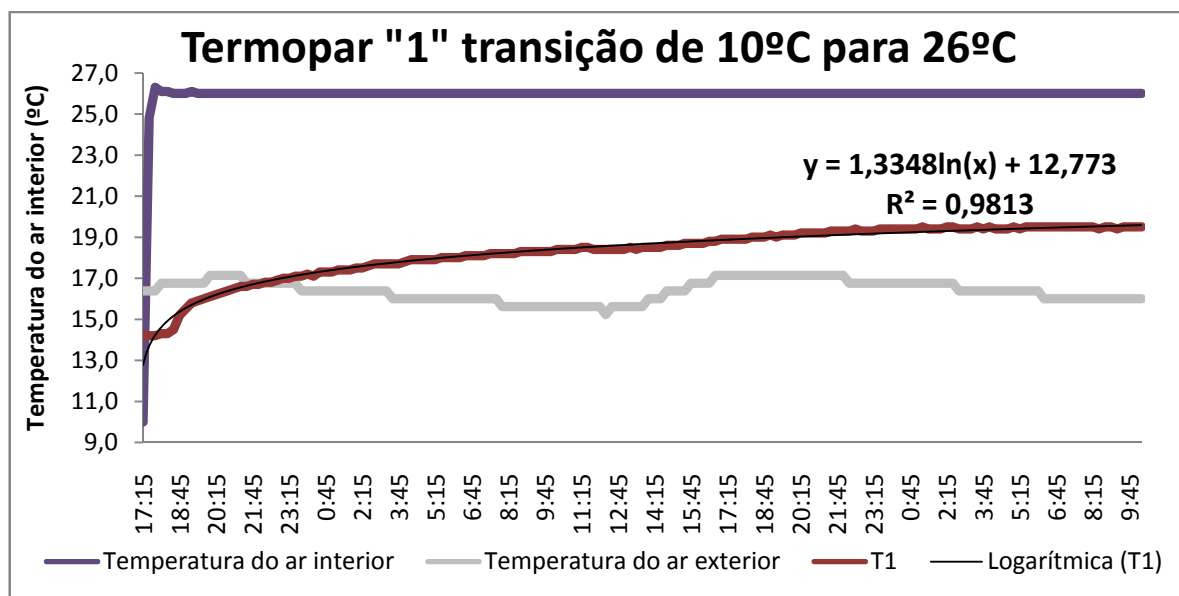


Fig. 48 – Evolução da temperatura correspondente ao termopar “1” – transição de 10°C para 26°C

Através das Fig. 41 e Fig. 42, calculou-se o valor da resistência superficial média exterior e interior obtido para as diferentes temperaturas interiores de cada patamar programado e para as temperaturas exteriores registadas para cada um dos referidos. As temperaturas exteriores registadas durante o decorrer o programa podem ser visualizadas em Fig. 43.

Tabela 15 – Valores obtidos para a Resistência Superficial interior e exterior

Ti				
Ti (°C)	35,0	26,0	10,0	5,0
Tsi (°C)	34,6	25,9	10,4	5,5
Ti-Tsi (°C)	0,4	0,1	-0,4	-0,5
Te				
Tse (°C)	21,0	17,9	16,7	17,8
Te (°C)	20,0	16,7	16,4	17,8
Tse-Te (°C)	1,0	1,2	0,3	0,0
Cálculos				
Fluxo	6,1	3,6	2,8	5,5
Rsi	0,07	0,04	0,16	0,09
Rse	0,17	0,34	0,10	0,01

Para a elaboração da Tabela 15 foi apenas considerado o termopar “4” para os valores médios das temperaturas exteriores e o termopar “3” para as temperaturas superficiais interiores como já foi referido em 4.4.

O cálculo dos fluxos e das resistências térmicas superficiais foi efectuado de acordo com as expressões (4), (5) e (7).

Quanto ao capítulo 4.3, constatou-se que os valores obtidos a partir dos seis fluxímetros não são exactamente os valores esperados. Quando se optou pela disposição dos fluxímetros em diferentes zonas da parede, pretendia-se que os valores dos coeficientes de transmissão térmica de cada um estivessem perto de um determinado valor previamente calculado com o auxílio de [22] e das informações fornecidas pelos fabricantes dos materiais dos provetes. A tabela seguinte apresenta os valores obtidos teoricamente e utilizados como referência qualificativa entre o coeficiente de transmissão térmica esperado nos diversos fluxímetros.

Tabela 16 – Valores utilizados para uma referência qualificativa dos diversos U

Fluxímetro	Posição	Coefficiente de transmissão térmica teórico
F3 e F4	No centro dos blocos de betão leve	≈ 0,40
F6	Na junta horizontal de argamassa de assentamento	≈ 0,46
F5	Na junta vertical de argamassa de assentamento	>0,46
F1 e F2	Nos blocos de betão leve, próximos da argamassa de assentamento	>0,40 e <0,46

O coeficiente de transmissão térmica teórico para os fluxímetros “3” e “4” foi o calculado em 4.3.

O coeficiente de transmissão térmica teórico para o fluxímetro “6” foi obtido pela expressão (1) considerando  $R_{se}$  igual a  $R_{si}$  ( $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ ) e a condutibilidade térmica da argamassa de assentamento igual a  $0,7 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$ .

O fluxímetro “5” foi colocado numa junta vertical que, como foi referido em 3.3, não está preenchida com argamassa esperando-se para este valor de U fosse o maior de todos.

Os fluxímetros “1” e “2” foram colocados perto das juntas de argamassa esperando-se por isso valores de U intermédios.

Contudo, os valores obtidos e já apresentados na Tabela 12 não contém, para todos os fluxímetros, valores próximos aos esperados da Tabela 16. Os erros obtidos podem ter algumas origens: como a variação continua da temperatura superficial exterior pelos motivos já referidos; a velocidade do ar no interior da câmara climática; sendo a hipótese mais forte o facto da cola utilizada para se obter uma estanquidade ao ar entre os fluxímetros e a parede não ter sido a apropriada ou correctamente aplicada uma vez que os fluxímetros que apresentaram um valor mais próximo do esperado foram os únicos em

que se colocou cola no centro do fluxímetro para além da colocada na sua periferia. Como tal, decidiu-se desprezar os valores obtidos através dos fluxímetros “1”, “2”, “5” e “6”.

Posteriormente decidiu-se comparar a média de U obtido experimentalmente para o provete estudado com os valores estipulados regulamentarmente por [9] e [16] e ainda com níveis de qualidade térmica superior estabelecidos em [24] para as regiões de Portugal continental. A Tabela 17 apresenta o resumo desta comparação.

Tabela 17 – Comparação do U obtido experimentalmente com os valores regulamentares ou de referência

U experimental (W/m <sup>2</sup> .°C)	U [16] (W/m <sup>2</sup> .°C)	Umáx. (W/m <sup>2</sup> .°C)			Uref. [9] N1 [24] (W/m <sup>2</sup> .°C)			N2 [24] (W/m <sup>2</sup> .°C)			N3 [24] (W/m <sup>2</sup> .°C)			N4 [24] (W/m <sup>2</sup> .°C)		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
0,37	0,54	1,8	1,6	1,45	0,7	0,6	0,5	0,55	0,45	0,4	0,45	0,35	0,3	0,35	0,3	0,25

O valor de U de acordo com a ETAG 004 [16] foi obtido usando a expressão (1) considerando  $R_{se}$  igual a  $R_{si}$  (0,13 m<sup>2</sup>.C/W) e para as resistências dos materiais considerou-se o valor mínimo admitido por [16] para o ETICS (1 m<sup>2</sup>.°C/W) e o valor determinado para o suporte (0,60 m<sup>2</sup>.°C/W).

Constata-se que o provete estudado, cumpre os requisitos de [9] e [16] embora possua um coeficiente de transmissão térmica demasiado elevado para atingir o nível de qualidade térmica quatro de [24] e o nível três para as zonas I2 e I3.



# 5

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

### 5.1. INTRODUÇÃO

O capítulo 5 reporta-se à segunda campanha experimental efectuada nesta dissertação. Optou-se por dividi-lo em três capítulos. No primeiro a ser referido, consta a descrição do ciclo de envelhecimento acelerado adoptado e nos dois capítulos posteriores descreveram-se dois procedimentos experimentais distintos executados após sujeitar o ETICS ao envelhecimento acelerado.

Como já foi referido na Tabela 3, a ETAG 004 [16] prevê a elaboração de um envelhecimento acelerado sobre o ETICS, dependendo da capilaridade do mesmo. Este envelhecimento pode ser decomposto no envelhecimento higrotérmico (um ciclo calor/chuva e um ciclo calor/frio) e no congelamento/descongelamento. Devido aos equipamentos e provete disponíveis no Laboratório de Física das Construções, não era possível efectuar a totalidade dos ensaios de envelhecimento, sendo o ciclo calor/frio o único passível de ser realizado na sua totalidade, conseguindo a câmara climática mencionada em 3.2 satisfazer as exigências da ETAG 004 [16] embora existissem algumas diferenças entre o provete referido em 3.3 e o requerido na norma europeia.

No segundo capítulo descrevem-se e apresentam-se os resultados dos ensaios para se testar a força da ligação entre o reboco delgado armado e o isolamento térmico referidos na Tabela 4.1. Estes ensaios foram realizados de acordo com [16] com a excepção das pastilhas metálicas utilizadas que foram circulares e não quadrangulares.

No terceiro capítulo refere-se ao ensaio do impacto de um corpo rígido no revestimento final do ETICS. Este ensaio já mencionado na Tabela 3, foi executado de acordo com [16].

O último capítulo foi o escolhido para se analisar os resultados obtidos e tirarem-se algumas conclusões sobre eles.

### 5.2. CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO ADOPTADO

Os ensaios levados a cabo para prever a vida útil de um determinado produto de construção podem ser de curta duração ou naturais.

Contudo a acção dos efeitos dos agentes de degradação do meio ambiente é um processo longo e demorado, pelo que os ensaios de exposição natural nem sempre fornecem resultados práticos, num período de tempo suficientemente curto, sobre o comportamento dos materiais. Por outro lado, o

envelhecimento artificial acelerado consiste na exposição acelerada de materiais em laboratório, onde os agentes de degradação são controlados de maneira a simular o mais possível o ambiente natural. Contudo, a sua correlação com o ritmo natural nem sempre é fácil. Deve ter-se também em consideração que, devido a alguns agentes de degradação reagirem de um modo sinérgico no meio ambiente, não se pode esperar uma correlação directa entre as variações observadas nas condições controladas no laboratório com as variações verificadas no meio ambiente [25].

Tendo em conta que o ciclo calor/frio de [16] estava inserido num estudo higrotérmico constituído por dois tipos de ciclos (ciclo calor/frio e ciclo calor/chuva), dos quais só era possível a execução do primeiro, optou-se pela adopção de um ciclo de calor/frio diferente, que por si só representa-se um ensaio de envelhecimento acelerado completo, que já havia sido elaborado e utilizado num estudo anterior [25].

O ciclo de envelhecimento acelerado adoptado pretende simular as condições extremas que o RCCTE [9] admite para uma parede vertical com a probabilidade de ocorrência de 1%. Para a obtenção da temperatura superficial máxima foi considerado que o coeficiente de absorção da radiação solar  $\alpha_s$  era igual a 0,75, a radiação solar global incidente  $R_i$  do Verão,  $900 \text{ W/m}^2$ , a temperatura do ambiente exterior  $t_e$  máxima de  $37^\circ\text{C}$  e a condutância térmica superficial exterior,  $h_e$ , de  $18 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  a partir da expressão (19).

$$t_{se} \cong t_e + \frac{\alpha_s R}{h_e} \quad (19)$$

Desta expressão foi concluído que a temperatura superficial máxima é de aproximadamente  $75^\circ\text{C}$ .

Quanto à temperatura superficial inferior, esta foi adoptada igual à temperatura mínima que o RCCTE admite para Portugal Continental no Inverno,  $-5^\circ\text{C}$ .

No estudo [25], a câmara climática utilizada suportava variações da temperatura bruscas simultaneamente com variações de humidade relativa, existindo apenas a impossibilidade de controlar a humidade relativa para temperaturas negativas. No caso da Fitoclima 1000 EDTU, como já foi referido em 3.2, não possui grande precisão quando se altera significativamente a temperatura com uma dada humidade relativa fixada. Mesmo assim, o ciclo utilizado em [25] foi programado sem alterações na Fitoclima 1000 EDTU e iniciado no dia 18 de Novembro de 2008. A Fig. 49 indica a evolução da humidade relativa e da temperatura usando o programa retirado de [25] durante um ciclo completo (24 horas) iniciado no dia 19 de Novembro às 12 horas e 24 minutos. Os diversos estágios do ciclo podem ser visualizados na Tabela 8.



Uma vez que a disparidade entre o ciclo idealizado e o obtido foi significativa optou-se pela criação de um ciclo idêntico ao apresentado acima (Tabela 8) mas com o controlador da humidade relativa desactivado, mudando esta de forma não estipulada. As temperaturas do ciclo adoptado e as realmente obtidas estão apresentadas na Fig. 50 tal como a humidade relativa obtida nas câmaras, sem ter sido controlada.

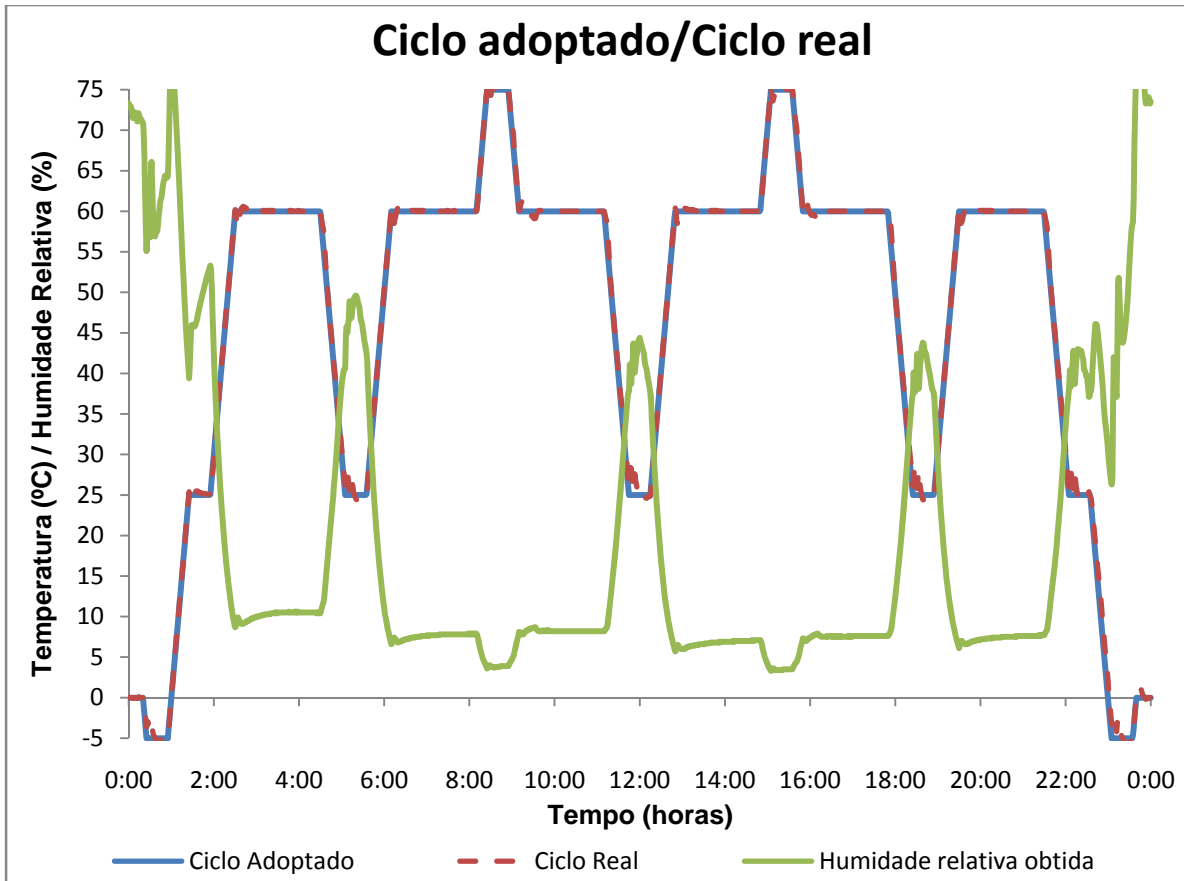


Fig. 50 – Ciclo de envelhecimento adoptado e ciclo real

Como é possível observar, ao deixar de se estipular a humidade relativa, os valores das temperaturas obtidas é praticamente coincidente com a temperatura programada.

O ciclo escolhido, com 24 horas, foi repetido de forma a formarem-se diferentes níveis de envelhecimento. A duração e o início dos diferentes níveis podem ser visualizados na Tabela 19.

Tabela 19 – Níveis de envelhecimento do ciclo adoptado

Nível de Envelhecimento	Data de início dos ciclos de envelhecimento	Duração do envelhecimento (dias) e número de repetição do ciclo
1	18-11-2008 (ciclo utilizado em [25])	3 + 7 dias
	21-11-2008 (ciclo adoptado)	
2	28-11-2008	13 dias
3	11-11-2008	13 dias
Duração total 36 dias		

A escolha da duração do ciclo adoptado não teve uma ligação directa com a avaliação do tempo de vida útil dos elementos uma vez que existe uma grande dificuldade em conseguir fazer uma correlação entre o envelhecimento acelerado e o envelhecimento natural [25].

O ciclo adoptado difere do ciclo calor/frio da ETAG 004 principalmente ao nível da duração, sendo análogos quanto aos princípios para a escolha das temperaturas. O ciclo calor/frio referido em [16], é composto pela repetição de cinco ciclos de 24h cada que compreende as fases apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Ciclo calor/frio referido em [16]

Níveis	Valor da Temperatura	Valor da Humidade Relativa	Duração do nível	Tempo de transição entre níveis
Inicial	10 a 25 °C	50%	48 horas	1 hora
1	50°C	0 a 10 %	7 horas	2 horas
2	-20°C	-	14 horas	
Duração total 120 horas (5 dias)				

As temperaturas definidas no ciclo de [16] (50°C e -20°C), coincidem com as temperaturas que a ETAG 004 define como as temperaturas extremas geralmente atingidas na Europa. O procedimento escolhido para o ciclo adoptado foi idêntico embora se tenham escolhido temperaturas extremas adaptadas à realidade Portuguesa.

Nestes ciclos de envelhecimentos simplificados não existe uma correlação directa entre a solicitação em laboratório e a solicitação real. Só com a realização de muitos ensaios, de forma a chegar-se a uma curva de degradação estatística e posterior comparação com a curva de degradação real (que também seria necessário determinar) seria possível estipular uma correlação aproximada [25]. Como tal, este ciclo permite principalmente perceber a alteração diferencial do desempenho dos dois tipos de revestimentos finais descritos em 3.3 em função de solicitações térmicas e perceber quais são as propriedades mais críticas após a execução de alguns ensaios.

Após a conclusão dos 3 níveis de envelhecimento apresentados na Tabela 19 do ciclo adoptado, deve verificar-se a existência de bolhas ou descamação no revestimento final, fendas ou falhas associadas a juntas do isolamento térmico, destacamento da camada base ou do revestimento final, fendas

permitindo entrada de água no isolamento térmico como é previsto pela ETAG 004 e já referido na Tabela 3. Desta análise não foi visualizada qualquer imperfeição no ETICS.

### 5.3. ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Como está previsto pela ETAG 004 [16] e já referido na Tabela 4.1, após submeter o ETICS ao envelhecimento higrotérmico efectua-se um ensaio de arrancamento para testar a força da ligação entre a camada base e o isolamento térmico.

Os procedimentos para a execução destes ensaios foram baseados em [16], [26] e [27], para os quais se utilizou diversas pastilhas metálicas circulares descritas no capítulo 3.5.1 e um motor-reductor descrito no mesmo capítulo. Durante os mesmos, a câmara climática foi desligada uma vez que os 75°C máximos que o ciclo adoptado, atinge são incompatíveis com a cola epoxi utilizada.

Os ensaios de arrancamento foram realizados *in situ* (no interior da câmara que continha o provete) nos dois revestimentos diferentes, tendo-se utilizado duas pastilhas por revestimento em cada ensaio.

O primeiro ensaio de arrancamento efectuou-se antes do início dos ciclos de envelhecimento e os ensaios posteriores foram realizados após o fim de cada um dos níveis de envelhecimento.

Antes da execução dos ensaios de arrancamento procedeu-se à colagem das pastilhas ao revestimento final do ETICS, utilizando uma cola à base de resinas epoxi, referida no capítulo 3.5.1, colocada e espalhada na face lisa das mesmas. Este procedimento pode ser visualizado nas Fig. 51, Fig. 52 e Fig. 53.

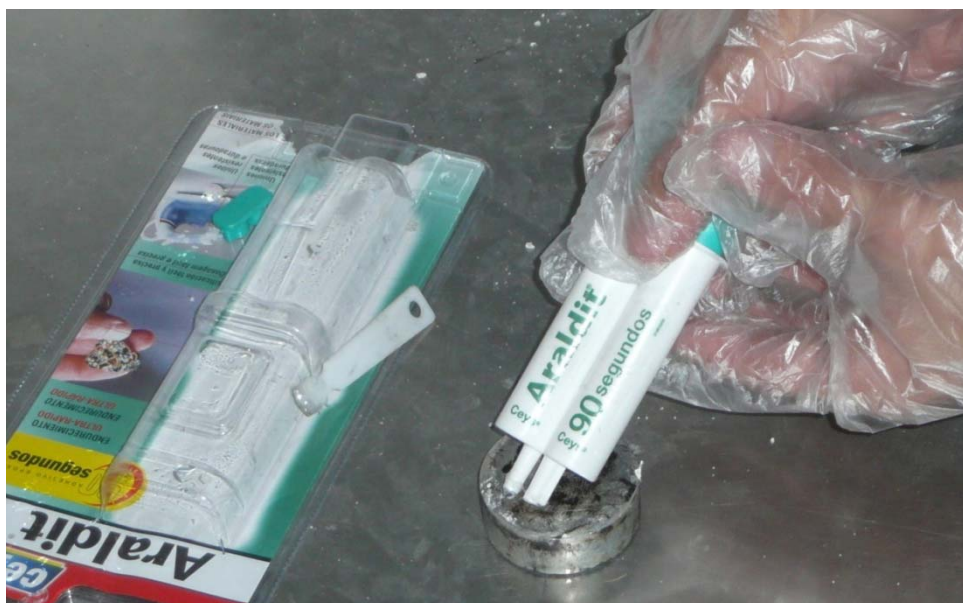


Fig. 51 – Colocação da cola epoxi na pastilha metálica circular

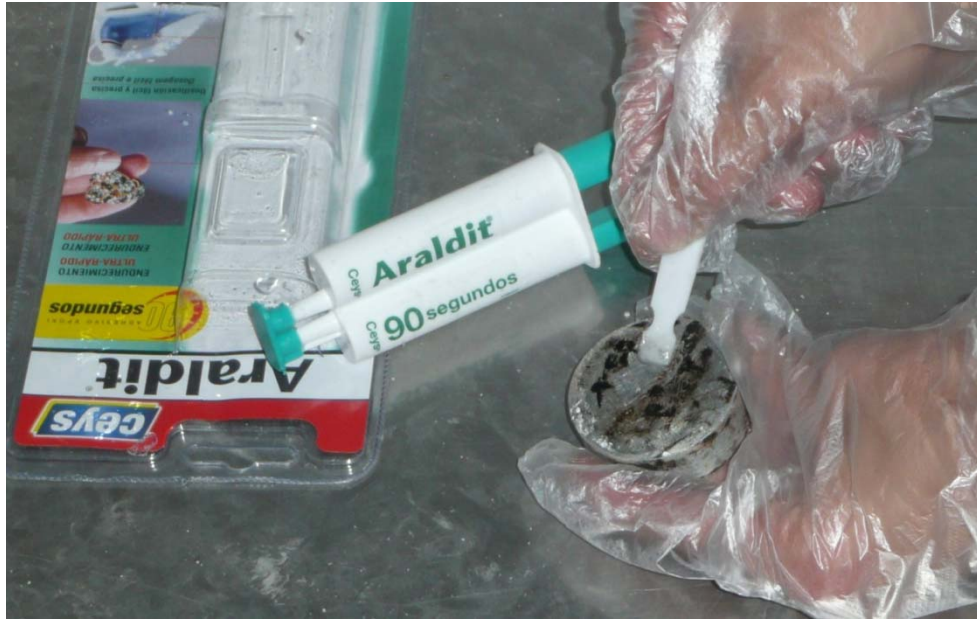


Fig. 52 – Mistura dos dois tipos de cola



Fig. 53 – Pastilhas fixadas ao provete

Após a secagem completa da cola, que se estima que ocorra num período de tempo nunca inferior a 6 horas, foram realizados cortes no reboco delgado armado até atingir o isolamento térmico com forma quadrangular com 5 cm de aresta, no qual se inscrevem as pastilhas metálicas, como ilustra a Fig. 54.



Fig. 54 – Execução de cortes no provete após a secagem da cola

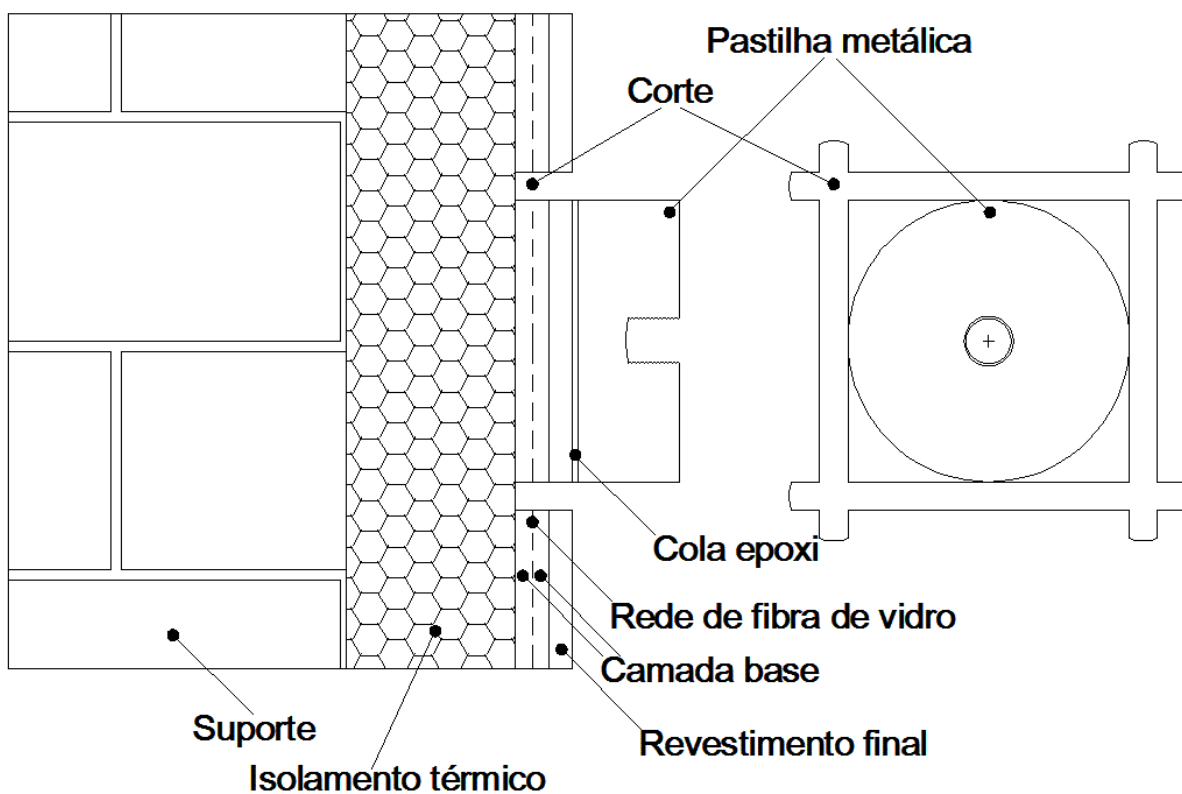


Fig. 55 – Esquema de princípio da fixação da pastilha metálica ao suporte

A acoplagem do motor-reductor e dinamómetro, ao parafuso, que é atarraxado às pastilhas circulares, ocorre só no momento da realização do ensaio arrancamento. A colocação do equipamento deve ser efectuada com o máximo cuidado de modo a não deteriorar o reboco delgado armado do ETICS antes de se iniciar o seu arrancamento. A Fig. 56 ilustra a colocação do equipamento na posição correcta.



Fig. 56 – Acoplagem do motor-reductor e dinamómetro

Os ensaios de arrancamento realizados foram catalogados com letras que diferiram consoante o nível de envelhecimento das amostras, antes da sua execução, e do revestimento em causa (cimentício ou RPE) e com números representando estes a ordem da realização dos ensaios por nível de envelhecimento. O posicionamento de todos os ensaios no provete pode ser visualizado na Fig. 57.

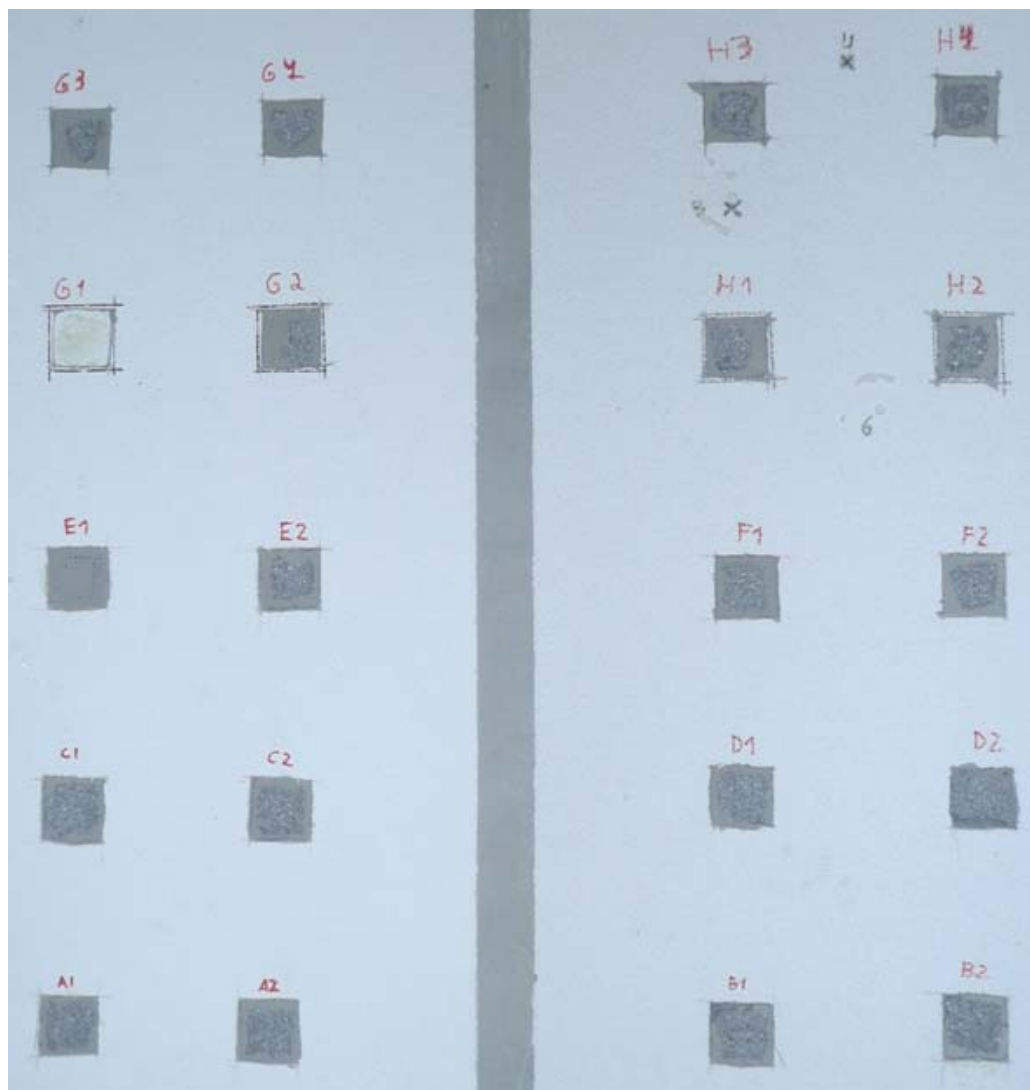


Fig. 57 – Posicionamento das amostras utilizadas nos ensaios de arrancamento

A ordem de elaboração de cada um dos ensaios visualizáveis na Fig. 57, está apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Ensaios de arrancamento elaborados

Enquadramento dos ensaios de impacto de um corpo rígido	Revestimento cimentício		RPE	
Antes do início do ciclo de envelhecimento acelerado	A1	A2	B1	B2
Após o 1º nível de envelhecimento	C1	C2	D1	D2
Após o 2º nível de envelhecimento	E1	E2	F1	F2
Após o 3º nível de envelhecimento	G1	G2	H1	H2
	G3	G4	H3	H4

Nos ensaios de arrancamento E1 ocorreu um erro no corte do reboco delgado armado, ficando o quadrado de 5 cm de lado da rede de fibra de vidro com ligações não cortadas como mostra a Fig. 58. Como tal, este ensaio foi rejeitado.



Fig. 58 – Pormenor da armadura de fibra de vidro deficientemente cortada

Os ensaios G1, G2, H1 e H2 foram repetidos uma vez que a cola ainda não estava completamente seca quando estes foram realizados, para além de terem sido efectuados por um operador menos experiente que o executante dos anteriores, tendo-se portanto, obtido forças de arrancamento irreais.

Todos os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de arrancamento

Ensaio	Área medida (mm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	Tensão de ruptura (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de ruptura
A1	2499	280	0,112	40% coesiva 60% adesiva
A2	2756	230	0,083	25% coesiva 75% adesiva
B1	2704	280	0,104	50% coesiva 50% adesiva
B2	2915	310	0,106	30% coesiva 70% adesiva
C1	2915	290	0,099	55% coesiva 45% adesiva
C2	2652	290	0,109	25% coesiva 75% adesiva
D1	2450	230	0,094	50% coesiva 50% adesiva
D2	2600	250	0,096	100% coesiva
E1	2550	190	0,075	50% coesiva 50% adesiva
E2	2600	210	0,081	25% coesiva 75% adesiva
F1	2426	220	0,091	40% coesiva 60% adesiva
F2	2300	200	0,087	30% coesiva 70% adesiva
G1	1963,5	80	0,041	100% adesiva (falha na cola)
G2	2070	90	0,043	40% coesiva 60% adesiva
H1	2162	50	0,023	50% coesiva 50% adesiva
H2	2115	90	0,043	50% coesiva 50% adesiva
G3	1856	100	0,054	25% coesiva 75% adesiva
G4	2104	150	0,071	40% coesiva 60% adesiva
H3	2400	210	0,088	50% coesiva 50% adesiva
H4	2000	160	0,080	20% coesiva 80% adesiva

Foram tiradas fotografias referentes a cada um dos ensaios realizados apresentando-se de seguida apenas as referentes aos ensaios válidos.

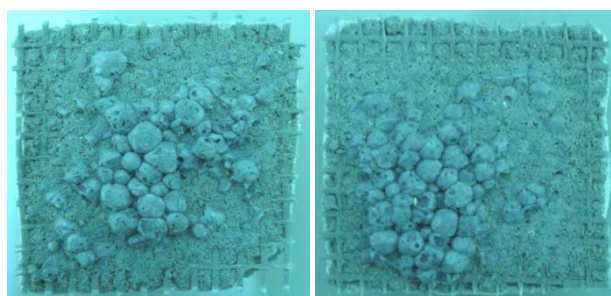


Fig. 59 – Amostras referentes aos ensaios A1 e A2

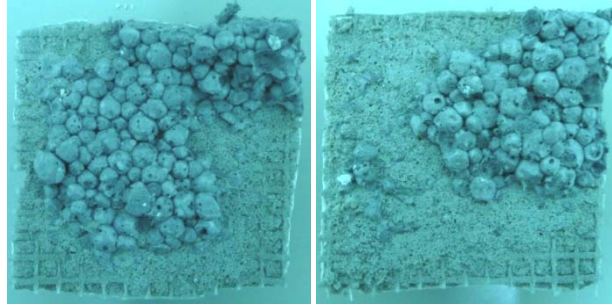


Fig. 60 – Amostras referentes aos ensaios B1 e B2

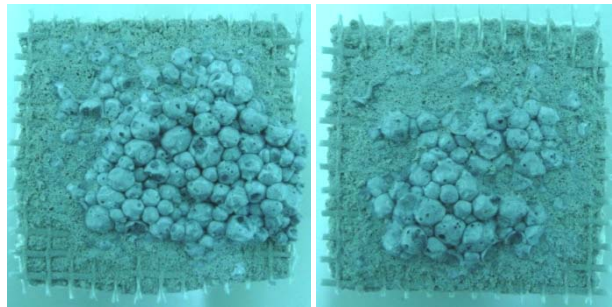


Fig. 61 – Amostras referentes aos ensaios C1 e C2

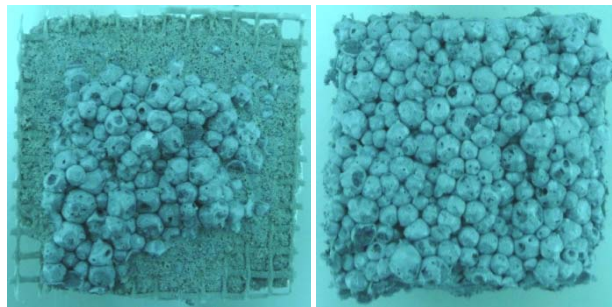


Fig. 62 – Amostras referentes aos ensaios D1 e D2

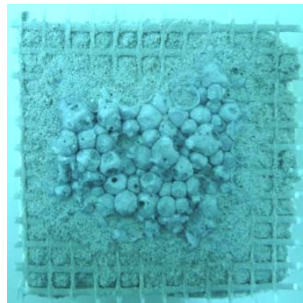


Fig. 63 – Amostras referentes aos ensaios E1

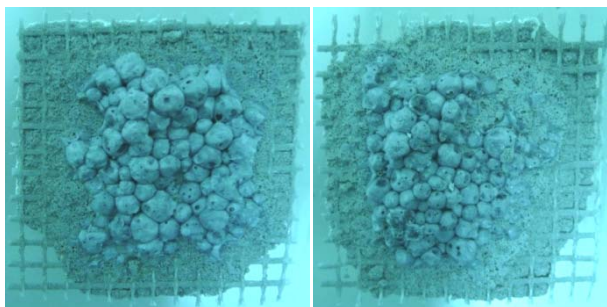


Fig. 64 – Amostras referentes aos ensaios F1 e F2

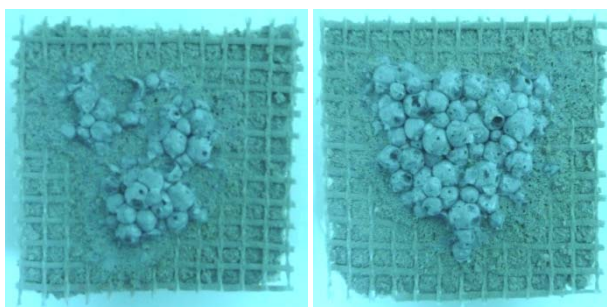


Fig. 65 – Amostras referentes aos ensaios G3 e G4

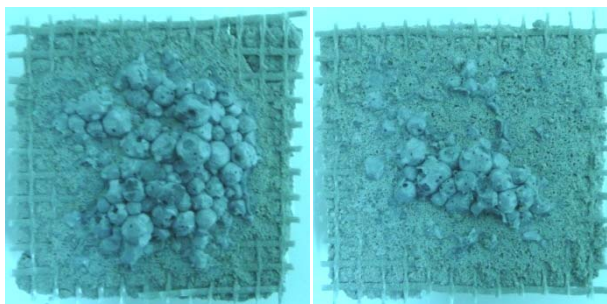


Fig. 66 – Amostras referentes aos ensaios H3 e H4

Como foi referido na Tabela 4.1, no âmbito do requisito de segurança na utilização ER4, pretende-se que os ensaios de arrancamento determinem a força das ligações adesivas. Como tal, a ETAG 004 definiu como valor mínimo para a tensão média de ruptura do arrancamento igual a  $0,08\text{N/mm}^2$  para a adesão entre o isolamento térmico e o reboco delgado armado ou então ocorrer coesivamente no isolamento térmico.

A Tabela 23, apresenta a data dos ensaios válidos realizados e a tensão média de ruptura obtida nos dois tipos de revestimento final existentes.

Tabela 23 – Tensão média de ruptura média por revestimento final

Data de realização dos ensaios	Ensaio	Tensão média de ruptura obtida (N/mm <sup>2</sup> )		Verificação
		Revestimento cimentício	RPE	
1º ensaio 18-11-2008	$\overline{A1A2}$	0,098		OK
	$\overline{B1B2}$		0,105	OK
2º ensaio 27-11-2008	$\overline{C1C2}$	0,104		OK
	D1		0,094	OK
3º ensaio 10-12-2008	E2	0,081		OK
	$\overline{F1F2}$		0,089	OK
4º ensaio 23-12-2008	$\overline{G3G4}$	0,063		KO
	$\overline{H3H4}$		0,084	OK

No campo “Verificação” da tabela anterior, considerou-se o requisito da ETAG 004 referido.

O ensaio D2 não foi contabilizado para a referida tabela uma vez que a sua ruptura foi exclusivamente coesiva pelo isolamento térmico, o que por si só é garantia do cumprimento do estabelecido em [16].

A evolução da força de ligação entre o reboco delgado armado e o isolamento térmico, obtida através dos quatro ensaios de arrancamento nos dois tipos de revestimentos finais existentes, está ilustrada na Fig. 73 e será alvo de discussão, posteriormente.

#### 5.4. ENSAIO DE CHOQUE DE UM CORPO RÍGIDO

A ETAG 004 [16] recomenda, para a verificação da resistência do revestimento final do ETICS ao impacto, a execução do ensaio de choque de um corpo rígido e do teste de perfuração como já foi referido na Tabela 3. Dentro do ensaio de choque de um corpo rígido existem duas variantes que diferem na energia produzida pelo impacto da esfera na parede vertical. O impacto de uma esfera de massa 1kg largada de uma altura de 1,02 m produz 10 Joules de energia e de uma esfera de massa 0,5kg largada de uma altura de 0,61 m produz 3 Joules.

No presente trabalho, só foi efectuado o impacto da esfera de 3 Joules utilizando, de acordo com [16] e [28], o aparelho Martinet Baronnie (capítulo 3.5.2) para esse efeito.

Conforme o recomendado em [16], o diâmetro e a eventual presença de fendas produzidas pelo impacto da esfera no provete foram registadas e fotografadas. Consoante estes resultados o provete é catalogado em três possíveis categorias já referidas em 2.3.2. A Tabela 24 contém as condicionantes para a categorização do provete após a execução do ensaio.

Tabela 24 – Critérios para a categorização do ETICS

Ensaio	Categoria I	Categoria II	Categoria III
Impacto de 3 Joules	Sem deterioração ou seja apenas com danos superficiais, desde que não haja fissuração.	Reboco delgado armado sem fissuras	Reboco delgado armado não perfurado ou seja não pode haver fissuração circular de modo a que esta atinja o isolante térmico ficando este visível

Os procedimentos para a execução deste ensaio estão ilustrados nas Fig. 67 e Fig. 68.



Fig. 67 – Colocação da esfera à altura normalizada



Fig. 68 – Impacto do corpo rígido no provete após o pêndulo ser largado

Deve existir o cuidado para que a esfera só atinja uma vez a parede por ensaio tendo por isso existido o cuidado de se retirar rapidamente o equipamento após o primeiro impacto.

Os resultados obtidos neste ensaio estão resumidos na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados obtidos dos ensaios de choque de um corpo rígido

Teste	Diâmetro do impacto (cm)	Observações
A1	2,5	Alguma fissuração
A2	2,6	Alguma fissuração
A3	2,7	Alguma fissuração
B1	3,5	Fissuração circular contudo não se vê o isolamento térmico
B2	3,7	Fissuração circular contudo não se vê o isolamento térmico
B3	3,6	Fissuração circular contudo não se vê o isolamento térmico

As fotografias aos danos provocados no provete de cada um dos seis ensaios são apresentadas de seguida.

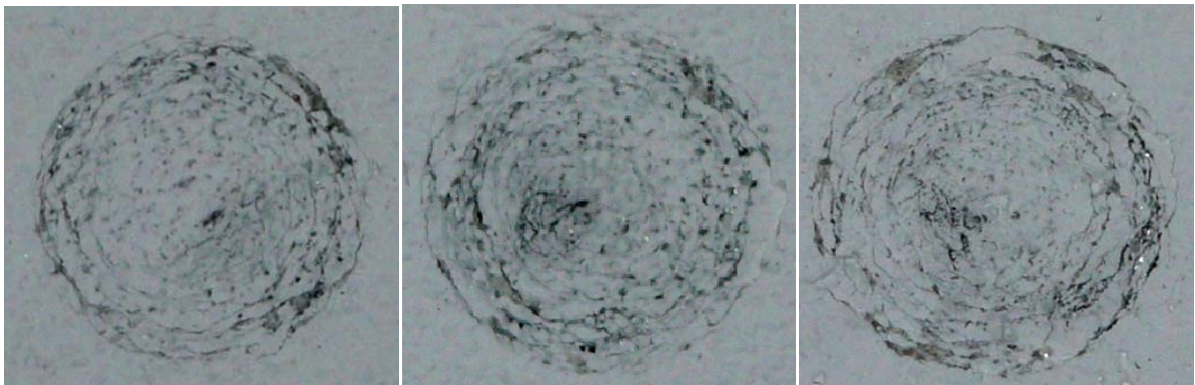


Fig. 69 – Ensaio na parede com revestimento cimentício



Fig. 70 – Ensaio na parede com RPE

### 5.5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como foi amplamente demonstrado aquando da execução dos ensaios de arrancamento (G1, G2, H1 e H2) após o nível de envelhecimento 3, estes requerem um grau de experiência elevado por parte do operador, sem a qual muito facilmente se podem obter resultados falseados. Este facto deve-se essencialmente à elevada participação que o operador tem durante a execução dos ensaios, nos quais tem que segurar no equipamento descrito em 3.5.1 numa posição desconfortável, sendo obrigado a permanecer imóvel durante alguns minutos até o ensaio acabar.

Outro factor preponderante para a obtenção de resultados fiáveis é o corte quadrangular efectuado através do reboco delgado armado até ao isolamento térmico. Este procedimento, conforme foi possível verificar, em estratos de pequena espessura existe a forte possibilidade dos vértices dos quadrados se deteriorarem antes do ensaio se iniciar o que implicará uma diminuição da área a ser traccionada pelo equipamento 3.5.1 e conseqüentemente leva à obtenção de uma tensão de ruptura de cálculo superior. Na Tabela 26 pode ser observado que a área obtida nas amostras relativas ao RPE é, em geral, inferior à obtida no revestimento cimentício. Esta diferença começa a ser notória após o início do ciclo de envelhecimento (2º, 3º e 4º ensaios de arrancamento). Este facto pode ser explicado pelas diferenças de espessura dos sistemas de armaduras observados nas amostras dos dois tipos de revestimentos finais. Embora, segundo as informações disponíveis, fornecidas pelos responsáveis pela construção do provete, referidas em 3.3, esta diferença de espessuras não exista. As imagens seguintes (Fig. 71 e Fig. 72), à mesma escala, evidenciam esta diferença.



Fig. 71 – Espessura do reboco delgado armado do revestimento cimentício

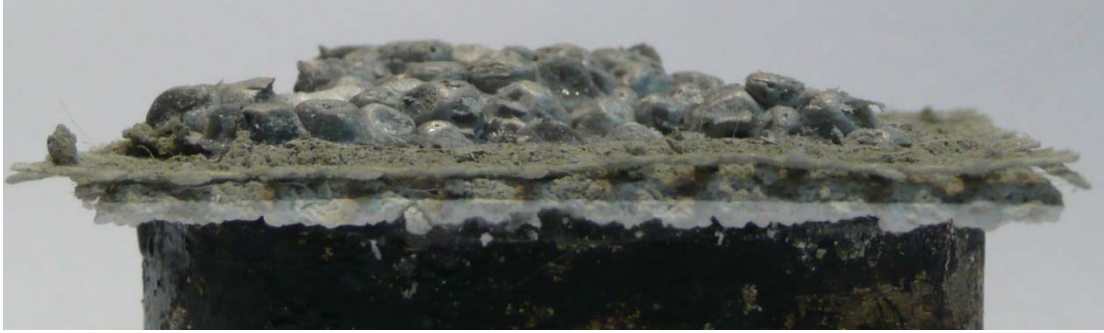


Fig. 72 – Espessura do reboco delgado armado do RPE

Tabela 26 – Evolução da área das amostras do provete arrancadas

Ensaio	Área média das amostras (mm <sup>2</sup> )	Varição entre as áreas do Revestimento cimentício (RC) e do RPE
1º ensaio	RC	2730
	RPE	2756,5
2º ensaio	RC	2783,5
	RPE	2525
3º ensaio	RC	2575
	RPE	2363
4º ensaio	RC	2450
	RPE	2200

O facto da espessura do revestimento cimentício ser superior ao RPE faz com que o último seja mais facilmente deteriorável quando sujeito ao corte e ao impacto de objectos, como será referido posteriormente ainda neste capítulo.

De acordo com as tensões médias obtidas por revestimento final em cada ensaio realizado, o RPE cumpriu sempre os requisitos de [16], enquanto o revestimento cimentício deixa de o cumprir após ser sujeito ao último nível de envelhecimento. Quando comparados, como pode ser visualizado na Fig. 73, o revestimento cimentício embora tenha apresentado valores de tensão de ruptura iniciais (antes do ciclo de envelhecimento) menores que o RPE, supera-o após o primeiro ciclo de envelhecimento atingindo inclusivamente um valor médio de tensão de ruptura superior ao inicial. Após este acréscimo de resistência, a tensão de ruptura decresce consideravelmente após a execução do 3º ensaio de arrancamento ficando com um registo pior que o RPE, facto que não se altera com o 4º ensaio. A tensão de ruptura do revestimento cimentício após a execução do primeiro ensaio tem um decréscimo aproximadamente linear, como pode ser observado na Fig. 73. A tensão de ruptura do RPE apresenta variações cada vez menores entre os ensaios de arrancamento, podendo a sua evolução ser aproximada a uma curva logarítmica como indica a Fig. 73.

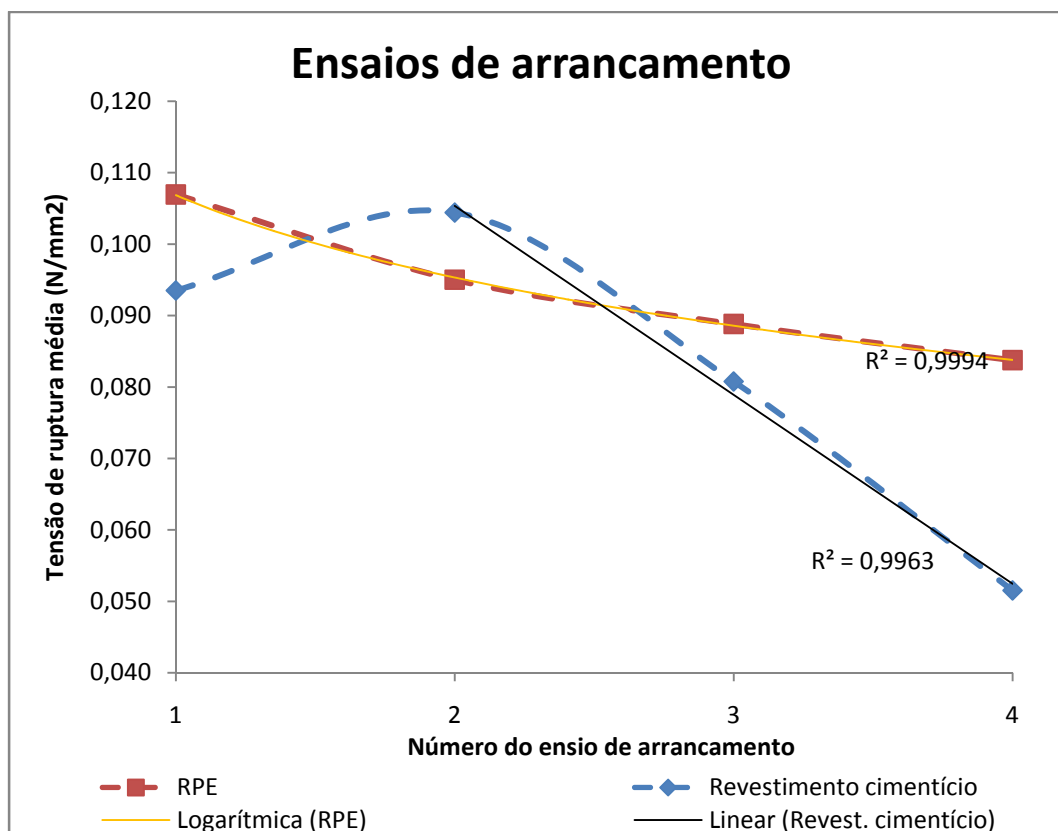


Fig. 73 – Evolução da força de ligação entre a camada base e o isolamento térmico

Ao nível dos ensaios de impacto de um corpo rígido os diâmetros dos danos visíveis no RPE são superiores aos registados no revestimento cimentício sendo essa diferença em média de 1,0 cm. O tipo de dano visualizado entre os dois revestimentos é ligeiramente diferente. Enquanto o RPE apresenta quase exclusivamente uma fissura, como pode ser visualizado em Fig. 70, aproximada a uma circunferência com 3.5 cm em média, o revestimento cimentício (Fig. 69) apresenta vários anéis de fissuras mas de profundidade inferior. Maiores profundidades nas fissuras implicam uma maior perda das ligações entre o círculo de danos e o resto da parede, sendo que no RPE o seu destacamento é quase alcançado, enquanto no revestimento cimentício isso não se verifica. Comparando os dois tipos de revestimento quanto à concavidade, o revestimento cimentício apresenta-a de forma mais evidenciada que o RPE.

Dado que só se pode efectuar o teste de impacto de 3 Joules e a categorização depende muito da interpretação não clara de [16] e da visualização in-situ dos danos, esta não é passível de falhas. No entanto apresenta-se na Tabela 27 a categorização dos dois tipos de revestimentos.

Tabela 27 – Categorização dos revestimentos finais aplicados no provete em estudo

Tipo de revestimento	Categoria
Revestimento cimentício	Categoria III
RPE	Categoria III

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido foi um estudo com uma forte componente laboratorial com alguma complexidade, no qual se utilizaram vários equipamentos do Laboratório de Física das Construções. Para a elaboração deste trabalho foram realizados vários ensaios ao longo de quatro meses, todos no referido laboratório.

### 6.2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

Após a conclusão da presente dissertação, pode-se afirmar que os principais objectivos propostos na mesma foram atingidos. O desempenho do provete disponível foi estudado ao nível da durabilidade e do comportamento térmico com sucesso, atingindo-se diversas conclusões, as quais serão apresentadas de seguida e ordenadas de acordo com os objectivos parciais definidos no capítulo 1.2.

- A elaboração do estado da arte sobre a aprovação técnica do ETICS permitiu concluir que, na actualidade, existe uma directiva europeia específica para esta solução construtiva, a ETAG 004. A sua principal função é impor que um conjunto de procedimentos laboratoriais, elaborados por classe de requisitos essenciais, seja efectuado de forma a garantir a aptidão ao uso do ETICS. Verificou-se que a ETAG 004 por si só não é suficiente para a aprovação técnica, uma vez que remete em muitos casos para normas específicas e anteriores a ela, como é o caso da ISO 8990 relativa à determinação do coeficiente de transmissão térmica;
- De todos os requisitos essenciais referidos na ETAG 004, destaca-se uma lacuna relativamente à prevenção de manchas originadas pelo desenvolvimento de microorganismos, algas e bolores.
- A partir do estudo do estado de equilíbrio ao nível térmico do provete em análise, foi possível concluir que, ao solicitá-lo a variações de temperatura na ordem 30°C, a superfície do isolamento térmico do lado oposto às solicitações de temperatura (interface do isolamento térmico com o suporte), sofreu uma variação de temperatura três vezes inferior. Esta constatação apoia uma das vantagens apontadas ao ETICS que é o aumento da durabilidade das fachadas, pela sua protecção a grandes variações de temperatura;
- Os três valores obtidos por meios distintos para o coeficiente de transmissão térmica apresentam alguma proximidade, apesar da experiência adquirida com os fluxímetros indicar que a metodologia utilizada para a sua fixação à parede vertical a estudar poderá ser melhorada. Obteve-se um valor médio experimental por intermédio dos fluxímetros de 0,37

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,  $0,4 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  usando expressões numéricas para o seu cálculo e  $0,45 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  o valor tabelado em [22]. A partir destes valores foi possível concluir que o provete estudado cumpre com grande margem o valor mínimo estipulado na ETAG 004 para a resistência térmica do ETICS ( $1 m^2 \cdot ^\circ C/W$ ). Os mesmos valores obtidos para o provete estudado permitem concluir que o ETICS cumpre os requisitos máximos e de referencia do RCCTE [16] para as fachadas da envolvente exterior de todas as zonas de Portugal. Porém, face aos valores propostos em [24] para diferentes níveis de qualidade térmica, permitiu concluir que a solução estudada não possui resistência térmica suficiente para satisfazer as exigências do nível 4 e de algumas regiões do nível 3 de qualidade térmica;

- A partir do estudo em regime dinâmico, foi bastante notório o papel retardador que a inércia térmica tem neste tipo de solução construtiva. Registando-se um equilíbrio no registo da temperatura da interface do isolamento térmico com o suporte apenas passados aproximadamente três dias para a variação de temperatura na ordem dos  $30^\circ C$ ;
- Para o cálculo da resistência térmica superficiais para o lado interior do provete,  $R_{si}$ , obteve-se um valor médio para os quatro valores determinados de  $0,09 m^2 \cdot ^\circ C/W$ . Este valor é um pouco inferior ao tabelado no RCCTE [9] o que pode ser explicado pela velocidade média do ar no interior do equipamento ser superior ao valor médio para o interior de um edifício. Os quatro valores obtidos para  $R_{se}$ , foram pouco credíveis uma vez que apresentaram grande disparidade entre si. O facto da determinação da temperatura superficial exterior apresentar alguma incerteza devido essencialmente à sua constante variação, aliado à utilização de um medidor para o ar exterior com um erro de precisão de  $1,5^\circ C$  e com uma leitura desfasada relativamente aos termopares de variável incerta podendo atingir até 15 minutos, podem ter sido as razões para a imprecisão dos resultados.
- Ao nível da durabilidade, concluiu-se que a utilização de ciclos simplificados de envelhecimento permite a comparação dos dois revestimentos distintos, presentes no provete em estudo, perante a mesma solicitação. Contudo não permitem tirar correlações directas com as solicitações reais ao nível da vida útil;
- A execução de diversos ensaios de arrancamento permitiu concluir que uma das grandes dificuldades deste ensaio está na sua correcta execução. Nos ensaios executados, notou-se que o uso de um xizato ou canivete para efectuar os cortes no provete para as amostras a traccionar, não é o indicado uma vez que as deteriora. Enquanto no acto do arrancamento a estabilidade promovida pelo operador ao equipamento, utilizado para o efeito, é fundamental;
- Contudo, os resultados obtidos apontam para a consideração do revestimento cimentício como inferior ao revestimento plástico espesso uma vez que o primeiro apresenta um decréscimo linear na sua resistência à tracção, ultrapassando o limite mínimo estabelecido pela ETAG 004 ( $0,08 N/mm^2$ ), enquanto o revestimento plástico espesso apresenta um decréscimo logarítmico, sem nunca atingir o valor mínimo imposto para ser considerado apto para uso.
- Pelo contrário ao referido anteriormente, após a execução dos testes de impacto de um corpo rígido no provete, permitiu verificar-se que o revestimento plástico espesso ficou mais danificado que o cimentício apresentando fissuras mais pronunciadas e profundas apesar de terem sido classificados na mesma categoria (Categoria III) segundo a interpretação de resultados obtida na ETAG 004. O efeito mais relevante neste resultado pode ter sido a diferente espessura observada nos dois revestimentos, tendo o RPE quase metade da espessura do RC;
- Apesar de não se ter executado o teste de perfuração, por não existir o aparelho indicado para o efeito, foi possível observar aquando da execução de cortes no provete, que o revestimento

cimentício apresenta maior resistência à perfuração que o revestimento plástico espesso. Para este facto foi determinante as diferentes espessuras observadas;

- Os três pontos anteriores referem-se a conclusões obtidas para os dois tipos de revestimentos finais que apenas se aplicam ao provete em questão e às condições específicas da sua aplicação, não podendo ser generalizadas para todos os casos essencialmente devido à diferença de espessuras observada nos dois tipos de revestimentos após a execução dos ensaios de arrancamento;
- Apesar de existirem métodos normalizados de medição para o coeficiente de transmissão térmica, [20] e [21], utilizando uma câmara quente calibrada, que é semelhante à utilizada neste estudo, não é possível que sejam seguidos dado que as perdas térmicas da câmara segundo este método teriam que ser inferiores a 25% do fluxo de calor que atravessa o provete o que, para um provete de baixo coeficiente de transmissão térmica como o estudado, aliado à inexistência de uma câmara fria, dificilmente se verifica. Outro factor preponderante para não se poder efectuar o cálculo do U do provete segundo [20] e [21] é o facto da potência de arrefecimento não ter sido, até à data limite de entrega desta dissertação, possível de obter. No entanto, o equipamento utilizado é um bom meio para efectuar estudos térmicos em regime dinâmico ou no estado de equilíbrio. A determinação de transmissões de calor através de provetes de reduzida resistência térmica como janelas, sem recorrer a fluxímetros, também é possíveis segundo a norma [23]. Enquanto a determinação do U de provetes com grande resistência térmica será possível com recurso a fluxímetros.

### 6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo desenvolvido nesta dissertação permite sugerir diversos estudos que possam dar continuidade ao trabalho iniciado. De seguida são indicadas algumas vias de continuidade:

- O desenvolvimento de microorganismos, algas e bolores e o conseqüente aparecimento de manchas está contabilizado como sendo uma das patologias mais recorrentes na solução construtiva estudada. Como tal, deveria ser abordado ao nível da ETAG 004;
- O aumento da resistência mecânica do revestimento final do ETICS deverá ser um estudo a considerar uma vez que, a degradação ao nível térreo é apontada como sendo uma das patologias mais recorrentes, sem ter como origem erros na aplicação do sistema;
- A diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior deverá continuar a fazer parte dos objectivos da investigação.

Para tal ser possível sugere-se a aquisição por parte do laboratório de Física das Construções de alguns equipamentos novos para melhorarem a performance dos equipamentos existentes, aumentando assim a utilização das suas potencialidades ou para se realizarem novos estudos laboratoriais que até à data não são possíveis de efectuar.

- Uma vez que a câmara climática Fitoclíma 1000 EDTU utilizada está anexada a uma outra câmara, sendo esta visitável e sem qualquer componente eléctrica facilmente danificável, sugere-se a elaboração de um mecanismo que permita a exposição do provete vertical à água, devendo esta ver reutilizada;
- Relativamente ao actual funcionamento da câmara climática, sugere-se a realização de uma pequena modificação, prevista pelo fabricante da mesma, para que a água, utilizada pela câmara para a alteração da humidade relativa, seja integrada num circuito de reutilização, evitando-se assim o desperdício de inúmeros litros de água potável;

- Quando existir a possibilidade, sugere-se ao Laboratório de Física das Construções a compra da restante parte constituinte da “Hot Box”, de modo a ser possível determinar o coeficiente de transmissão térmica de um provete de acordo com as normas [20] e [21] ou [29];
- Sugere-se ainda a aquisição de um pequeno equipamento para efectuar o teste de perfuração referido na ETAG 004 tal como uma nova peça para adaptar ao existente aparelho Martinet Baronne que permita que o impacto deste na parede tenha uma energia de 10 Joules. Com estes dois aparelhos a categorização completa do ETICS seria possível.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Matos, Maria. *Durabilidade como Critério de Projecto: O Método Factorial no contexto Português*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [2] Sá, Ana. *Durabilidade de Cimentos-Cola em Revestimentos Cerâmicos Aderentes a Fachadas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [3] Vanderley, John. *Arquitectura Sustentável*. I Simpósio Brasileiro de Construção Sustentável, 4 e 5 de Setembro de 2008, São Paulo. <http://www.sbcs08.org.br> 2/10/2008
- [4] Comissão das Comunidades Europeias (CEE) – Directiva Europeia 89/106/CEE -Directiva dos Produtos da Construção (DPC). Jornal Oficial das Comunidades Europeias n.º L 40 de 11/02/89, alterada pela Directiva 93/68/CE, publicada Jornal Oficial das Comunidades Europeias n.º L 220 de 30/08/93. Bruxelas, 1993.
- [5] [http://www.eco.edp.pt/Document/Guia\\_da\\_Eficiencia\\_energetica.pdf](http://www.eco.edp.pt/Document/Guia_da_Eficiencia_energetica.pdf), 10/01/2009
- [6] <http://www.futureng.com/parceiros/organismos/sce01.htm>, 10/01/2009.
- [7] Freitas, Vasco. *Seleção Técnico-Económica de Soluções para a Envolvente Exterior dos Edifícios*. Dezembro de 2007.
- [8] ADENE (2007). Certificação Energética e Ar Interior, Edifícios. Sessão de Informação sobre SCE – Porto. 09/10/2007.
- [9] Decreto-Lei n.º 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Diário da República (D.R.) I Série A. Lisboa: 4 de Abril.
- [10] Freitas, Vasco. *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior. Reboco Delgado Armado Sobre Poliestireno Expandido - ETICS*. Dezembro de 2002.  
[http://www.maxit.pt/media/12/tecdocs/revestimentos/HT\\_191A\\_02.pdf1.pdf](http://www.maxit.pt/media/12/tecdocs/revestimentos/HT_191A_02.pdf1.pdf) . 02/10/2008.
- [11] Patrocínio, Teresa. *Ficha Técnica – Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior*  
[http://www.construlink.com/Homepage/2003\\_GuiaoTecnico/Ficheiros/gt\\_395\\_construlink\\_17\\_12\\_02\\_2007.pdf](http://www.construlink.com/Homepage/2003_GuiaoTecnico/Ficheiros/gt_395_construlink_17_12_02_2007.pdf), 02/12/2008.
- [12] [http://www.ietcc.csic.es/index.php?id=559&no\\_cache=1&sword\\_list\[\]=ETA](http://www.ietcc.csic.es/index.php?id=559&no_cache=1&sword_list[]=ETA) 05/12/2008
- [13] [http://www.ueatc.com/ueatc\\_cen\\_eota.aspx](http://www.ueatc.com/ueatc_cen_eota.aspx) 05/12/2008
- [14] [http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/marcacao/introducao\\_eta\\_geral](http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/marcacao/introducao_eta_geral) 06/12/2008
- [15] [http://www.ietcc.csic.es/index.php?id=560&no\\_cache=1&sword\\_list\[\]=ETA](http://www.ietcc.csic.es/index.php?id=560&no_cache=1&sword_list[]=ETA) 05/12/2008
- [16] ETAG004 – Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering, European Organisation for Technical Approvals, Brussels, 2000.
- [17] [http://www.comercializadoramundial.com.mx/prod\\_herr\\_iefs.html](http://www.comercializadoramundial.com.mx/prod_herr_iefs.html) 07/12/2008
- [18] Teixeira, Ana Sofia. *Caracterização Experimental do Funcionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes para Tratamento de Humidade Ascensional*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [19] Sousa, Hipólito. *Determinação Experimental do Coeficiente de Transmissão Térmica de Alvenarias em Câmara Climática Calibrada. Relatório 57/99*. LNEC, Lisboa, 1999.

- [20] ISO/DIS 8990 – *Isolation Thermique – Determination of Steady-State Thermal Transmission Properties – Calibrated and Guarded Hot Box – Méthodes à la Bête Chaude Gardée et Calibrée*. Genève, ISO, 1991
- [21] ASTM C976-90 – *Standard Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box*. ASTM Philadelphia, 1991.
- [22] Matias, L., Santos, C., *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2006.
- [23] Bowen, R. P., *DBR's Approach for Determining the Heat Transmission Characteristic of Windows*, National Research Council Canadá, Ottawa, 1985.
- [24] Freitas, V., Guimarães, A., Ferreira, C., Alves, S., *A Medidas de Melhoria – Edifícios Residenciais Existentes, Porto, 2008*.
- [25] Quintela, Marisa. *Durabilidade de Revestimentos Exteriores de Parede em Reboco Monocamada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [26] ASTM D 4541-02, Standard Test Method for Pull-off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.
- [27] EN 1015-12 “Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates”.
- [28] FE Pa25 “*Revestimentos de Paredes – Ensaio de choque de esfera*”, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC.
- [29] ASTM – ASTM C236-87 – *Standard Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box*. ASTM Philadelphia, 1991.