

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

CARLOS MIGUEL PARAÍSO DINIZ GONÇALVES

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil

Orientador:

Mestre João Manuel Barrento da Costa

Júri:

Presidente:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Mestre Manuel Brazão de Castro Farinha

Mestre João Manuel Barrento da Costa

março de 2018

Agradecimentos

Apesar desta dissertação se apresentar como uma componente de avaliação individual, na verdade, não teria sido possível realizá-la sem a partilha de conhecimentos, companheirismo e o auxílio e cooperação de algumas pessoas. Por isso, não posso deixar de manifestar o meu agradecimento a todos os que, nas várias áreas e fases de estudo, contribuíram para a concretização deste meu trabalho.

Ao Professor João Barrento da Costa, orientador científico da minha dissertação, pela rigorosa orientação, partilha de conhecimentos e informação científica, pela pronta disponibilidade e incansável confiança demonstrada.

Ao meu amigo de sempre engenheiro Pedro Mira Vaz, pela dedicada disponibilidade que sempre teve para me ajudar a ultrapassar todas as dificuldades técnicas relacionadas com os equipamentos.

Às empresas Barratérmica, Barramestra, e Wattsky, pela disponibilização do conhecimento, recursos financeiros e equipamentos para a materialização deste trabalho.

A todos os meus amigos que, de uma forma sempre muito crítica e fiel, me transmitiram confiança e incentivaram na conclusão de mais uma etapa académica.

E por último, mas não menos importante, à minha família. Em especial à minha mulher Rita e à minha filha Madalena, pela disponibilidade que me proporcionaram para conduzir este trabalho, e todos os sacrifícios familiares inerentes. Sem o seu apoio não seria possível terminar esta etapa.

Resumo

A presente dissertação trata os problemas associados ao isolamento térmico de paredes duplas e pavimentos tradicionais com estrutura de madeira, com caixas de ar não preenchidas. Para aumentar a resistência térmica dos elementos construtivos utilizou-se um material inovador constituído por granulados de cortiça e borracha, que foi aplicado por introdução pneumática.

A metodologia proposta foi desenvolvida de modo a que a introdução do material granulado, nos espaços com ar, fosse feita através de furos com diâmetros não excedendo 20 mm. O material é colocado por meio de pistola pneumática.

Para a realização do trabalho foram construídos dois simuladores, um para paredes duplas e outro para pavimentos com estrutura de madeira. Os simuladores foram equipados com um sistema de produção de frio, tipo *split*, de modo a alterar as temperaturas interiores e exteriores.

Para seleção prévia de misturas com melhores desempenhos foi contruída uma célula térmica. Uma das misturas escolhida foi validada pelo LNEC.

A melhoria do comportamento térmico dos elementos construtivos com caixas de ar não preenchidas, permitiu a realização da reabilitação térmica em 10% do tempo e entre 30 e 70% nos custos de execução, quando comparada com as soluções mais correntes.

Palavras – Chave:

Isolamento térmico, reabilitação térmica, granulado de cortiça, granulado de borracha, material sustentável.

Abstract

The present dissertation deals with the problems related to the thermal insulation of double stud walls and traditional floors with wooden structure. In order to increase the thermal resistance of the building elements, an innovative material, consisting of granulated cork and rubber, was used.

The methodology proposed in this work was developed so that the granulated material could be filled into the air spaces through holes with diameters not exceeding 20 mm. The material is placed into the holes by means of a pneumatic device.

Two simulators were constructed, one for double stud walls and another for floors with wooden structure with stucco ceilings. Both simulators were performed with a free cooling production unit, in order to control the indoor and outdoor temperatures.

A thermal adiabatic chamber was built to select the different formulations to achieve the mixture with the best performance needed. One of the mixtures chosen was validated by the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC).

This study shows that the improvement of the thermal behavior of the building elements enables the thermal rehabilitation, in 10% of the time and with 30% and 70% of the costs, when compared to the most common solutions.

Key-words:

Thermal isolation, thermal rehabilitation, cork granulated, rubber granulated, sustainable material.

Glossário

Condutibilidade Térmica – Propriedade térmica típica de um material termicamente homogêneo que é igual à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e de área unitárias desse material por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces. A condutibilidade térmica caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor por parte dos materiais. A condutibilidade térmica é expressa em $W/m.^{\circ}C.$;

Coefficiente de transmissão térmica – O coeficiente de transmissão térmica de um elemento da envolvente de um edifício, é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este elemento separa;

Compostos Orgânicos Voláteis (COV) - um composto orgânico de origem antropogénica e biogénica, com exclusão do metano, que possa produzir oxidantes fotoquímicos por reação com óxidos de azoto na presença da luz solar;

Edifício – Construção fixa, encerrada, permanente, com acesso e caracterização independentes, e que compreende um ou mais espaços destinados à realização de atividades humanas;

Energia primária – Energia que entra no sistema energético sem sofrer qualquer alteração. Esta energia, ao ser transformada dá origem à energia final;

Energia Final - Energia resultante do processo de transformação da energia primária. É a energia que acaba por ser disponibilizada em diversas formas (eletricidade, combustíveis, gás, etc.);

Energias renováveis - Energia proveniente de fontes não fósseis e renováveis, nomeadamente geotérmica, hidrotérmica, eólica, solar, aerotérmica, oceânica, hídrica, de biomassa e de biogás;

Envolvente - É conjunto dos elementos de construção constituintes da fração ou edifício, compreendendo as paredes, pavimentos, coberturas e vãos, que separam o espaço interior útil do ambiente exterior, dos edifícios ou frações adjacentes, dos espaços não úteis e do solo;

Espuma de Poliuretano (PUR) - polímero termoendurecido com estrutura celular fechada, que pode ser aplicado como espuma rígida produzida com vaporização de Clorofluorcarbonetos (CFCs) ou como produto prefabricado que foi moldado com diversas formas, por exemplo, em placa;

Formaldeído - é o aldeído mais simples, cujas aplicações principais passam pela produção de resinas, sendo matéria-prima para diversos produtos químicos;

Lã de Rocha - à base de minerais naturais, tipicamente basalto ou dolomite, e resíduos reciclados que são fundidos, transformados em fibras e posteriormente misturados com um ligante;

Lã de Vidro - à base de areia e soda cáustica, com grande proporção de vidro reciclado e outros minerais. Estes materiais são fundidos, transformados em fibras e misturados com resinas orgânicas;

Poliestireno expandido (EPS) - forma celular rígida do poliestireno, com uma estrutura celular aberta. É um polímero termoplástico que pode, portanto, ser reprocessado e reciclado mais facilmente que os polímeros termoendurecidos;

Poliestireno extrudido (XPS) - Polímero termoplástico, com estrutura celular fechada que é normalmente mais forte, com elevado desempenho mecânico, quando comparado ao EPS;

Sistema passivo - Sistema construtivo concebido especificamente com o objetivo de reduzir as necessidades energéticas dos edifícios, sem que o conforto térmico dos ocupantes seja comprometido ou afetado.

Índice:

Agradecimentos	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Glossário	vii
Abreviaturas	xxiii
Símbolos	xxv
1 – Introdução	1
1.1- Enquadramento	1
1.2 - Objetivos.....	6
1.3 – Organização do trabalho.....	8
2 – Revisão Bibliográfica.....	11
2.1 – Isolantes concorrentes com a solução em estudo	11
2.1.1 - Poliestireno Expandido Moldado (EPS)	11
2.1.2 - Poliestireno Expandido Extrudido (XPS).....	13
2.1.3 - Lã de Mineral (MW).....	15
2.1.4 - Espuma Rígida de Poliuretano (PUR).....	17
2.1.5 - Espuma Rígida de Poli-isocianurato (PIR).....	20
2.1.6 - Aglomerado de cortiça expandida (ICB)	22
2.1.7 - Celulose – polissacarídeo	23
2.2 – Isolantes não concorrentes com a solução em estudo	25
2.2.1 - Polipropileno Expandido (EPP).....	25
2.3 – Novos materiais	27
2.3.1 - Painéis de isolamento a vácuo (VIP)	27
2.3.2 - Painéis preenchidos com gases (GFP).....	28
2.3.3 - Aerogéis.....	30
2.3.4 - Materiais de Isolamento gasoso (GIM)	33
2.3.5 - Materiais de nano-isolamento (NIM)	33

2.3.6 - Materiais de Isolamento Dinâmico (DIM)	34
3 – Trabalho Experimental	37
3.1 - Materiais e Equipamentos	37
3.1.1 - A cortiça	37
3.1.2 – A borracha dos pneus	38
3.1.3 – Local onde se realizou a investigação.....	43
3.1.4 – Simuladores e equipamentos de apoio à investigação	44
3.1.5 – Caracterização dos elementos potenciais a reabilitar	54
3.2 – Metodologia	59
3.2.1 – Recolha e análise de dados	59
4 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	85
4.1 - Considerações gerais	85
4.2 - Considerações finais	87
4.3 - Propostas de desenvolvimentos futuros	88
Referências bibliográficas	91

Índice de Anexos:

Anexo I - Boletim nº LNEC BE-CT_087-2015 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil	1
--	---

Índice de Figuras:

<i>Figura 1 – Caraterização dos edifícios segundo a sua época de construção – Censos 2011 (INE & LNEC, 2011)</i>	1
Figura 2 - Teto trabalhado em estuque impossível de isolar por métodos de isolamento tradicionais (“António Enes Morais, Lda,” 2013)	4
Figura 3 - Pavimento trabalhado impossível de isolar por métodos de isolamento tradicionais (Palácio do Campo das Princesas - Estado do Pernambuco, 2014).....	5
Figura 4 - Poliestireno (Plastimar, 2011)	12
Figura 5 - Poliestireno antes e depois da expansão (Plastimar, 2011)	12
Figura 6 - Placas de Poliestireno Expandido Extrudido (“Danosa/Eurofoam,” 2017)	13
Figura 7 - Aspeto físico da lã de rocha em formato de manta (“Isolaracustica,” n.d.)	15
Figura 8 - Aspeto comercial de painéis em lã de vidro (“Metalica,” n.d.).....	16
Figura 9 - Matérias primas do PUR: Isocionato (à esquerda) e Polioliol (à direita) (Departamento Engenharia Química - Universidade Nova de Lisboa - FCT, n.d.) ..	17
Figura 10 - Reação química de formação da PUR após agitação do Isocionato e Polioliol (Departamento Engenharia Química - Universidade Nova de Lisboa - FCT, n.d.)	18
Figura 11 - Espuma de PUR com fissuras por retração (“Documentário HGTV,” 2015)	18
Figura 12 - Espuma de PUR aplicada na caixa de ar de duas paredes, uma de alvenaria de tijolo e uma de alvenaria de pedra (“www.greenbuildingadvisor.com,” 2010)	19
Figura 13 - Painéis de PIR (“Archiexpo,” n.d.).....	20
Figura 14 - Painéis de ICB (“Isocor,” 2016).....	22
Figura 15 - Celulose ou polissacarídeo (SouthZEB, 2014)	23
Figura 16 - Painéis de isolamento em celulose (SouthZEB, 2014)	24
Figura 17 - Projeção de isolamento em celulose (SouthZEB, 2014).....	24
Figura 18 - Matéria prima do polipropileno antes da expansão (Isopor, 2017)	25
Figura 19 - Painel de VIP com as suas camadas constituintes (SouthZEB, 2014) 27	

Figura 20 - Esquema explicativo dos constituintes do painel GFP (SouthZEB, 2014)	29
Figura 21 - Seção transversal de um painel GFP (SouthZEB, 2014).....	29
Figura 22 - Aspeto exterior do painel GFP (SouthZEB, 2014).....	30
Figura 23 - Tela de aerogel (SouthZEB, 2014).....	31
Figura 24 - Aspeto translúcido do aerogel (SouthZEB, 2014)	31
Figura 25 - Fósforos dispostos sobre um disco de aerogel estão protegidos da chama da parte inferior (SouthZEB, 2014).....	32
<i>Figura 26 - Representação do esquema celular dos VIP e NIM (SouthZEB, 2014)</i>	34
Figura 27 - Cortiça (APCOR, n.d.).....	37
Figura 28 - Granulado de cortiça (APCOR, n.d.).....	38
Figura 29 - Pneus usados para reciclagem (" http://autos.culturamix.com ," 2017)...	39
Figura 30 - Granulado de pneu reciclado (" https://lista.mercadolivre.com.br ," 2017)	40
Figura 31 - Ciclo de vida dos pneus usados em Portugal. (Valor Pneu, 2015)	42
Figura 32 - Implantação dos simuladores P1 e P2.....	43
Figura 33 - Mecanismo de regulação da espessura da parede dupla.....	44
Figura 34 - Escala de regulação.....	45
Figura 35 - Canópia exterior.....	45
Figura 36 - Construção da parede dupla de alvenaria de tijolo sobre o mecanismo regulador	45
Figura 37 - Imagem da campanha de introdução da mistura	45
Figura 38 - Janelas acrílicas para inspeção	46
Figura 39 - Detalhe do pavimento amovível para inspeção	46
Figura 40- Imagem exterior do simulador.....	46
Figura 41 - Imagem interior do simulador com máquina climática	46
Figura 42 - Fasquiado para aplicação do estuque tradicional	47
Figura 43 - "cassete" em alumínio para ensaio de diferentes formulações do isolante em estudo	49
Figura 44 - Célula térmica	49
Figura 45 - Camara termográfica "Fluke", modelo "Ti10"	50
Figura 46 - Câmara endoscópica da marca "KRAFTWERK", ref ^a "Junior line".	51

Figura 47 - Sensor de temperatura da marca “MAXIM INTEGRATED”, ref ^a “DS18B20”	51
Figura 48 - Controladores da marca “WATTSKY”, ref: “V2”	52
Figura 49 - Quadro principal de comando dos simuladores e célula térmica	52
Figura 50 - Unidade evaporadora.....	53
Figura 51 - Unidade condensadora	53
Figura 52 – Pinça amperimétrica da marca “Velleman”, ref: “DCM 265”	54
Figura 53 - Teto tradicional em estuque (Gonçalves, 2017).....	55
Figura 54 - Painéis de estafe (Lamas J.M., 2003).....	55
Figura 55 - Soalho à Inglesa (Lamas J.M., 2003).....	56
Figura 56 - Soalho à Portuguesa (Lamas J.M., 2003).....	56
Figura 57 - Remate da junta entre pavimento e rodapé (“Rua Marquês de Sá da Bandeira 110,” 2016).....	57
Figura 58 - Interior da caixa de ar de uma parede de alvenaria de tijolo (Gonçalves, 2017)	57
Figura 59 - Imagem do interior da célula térmica com fonte de calor e sensores de temperatura.....	60
Figura 60 - Termografia da célula térmica durante a campanha de calibração do modelo com "cassete" de alumínio sem solução aplicada	62
Figura 61 - Preparação das tiras de XPS para introdução no interior da “cassete” da célula térmica – numeração	65
Figura 62 - Preparação das tiras de XPS para introdução no interior da célula térmica	65
Figura 63 - Amostras das diferentes formulações estudadas na célula térmica.....	68
Figura 64 - Esquema auxiliar de cálculo da transmissibilidade térmica das diversas superfícies da célula térmica.....	72
Figura 65 - Representação da ponte térmica linear existente a todo o perímetro da cassete portadora da mistura	73
Figura 66 - Janela de visualização do produto depositado na caixa de ar	75
Figura 67 - Edifício da escola Avé-Maria em Lisboa	76
Figura 68 - Parede após intervenção e inspeção do isolante em parede de estuque	76

Figura 69 - Parede após intervenção e inspeção do isolante sem demolição dos azulejos dos revestimentos	77
Figura 70 - Imagem com câmara endoscópica da mistura dentro da caixa de ar de uma parede de alvenaria de tijolo	78
Figura 71- Furação do teto para introdução da pistola.....	79
Figura 72 - Produto homogeneizado após introdução na caixa do pavimento.....	80
Figura 73 - Imagem termográfica do pavimento submetido na face inferior a -15,4 °C, e na face superior a 24,6 °C, com e sem solução de isolamento	80
Figura 74 - Furação para aplicação do isolante em pavimento a revestir com soalho	82
Figura 75 - Edifício residencial de estrutura gaioleira alvo da reabilitação com a mistura em estudo.....	82
Figura 76 - Aplicação do isolante sem desmontagem do soalho, através da desmontagem parcial do rodapé da divisão	83
Figura 77 - Aplicação da mistura em estudo em tetos trabalhados de tabique e estuque	84
Figura 78 - Aplicação da mistura em estudo entre vigas de betão armado selada com manta de PEF aluminizada como reforço de impermeabilização	84

Índice de Tabelas:

Tabela 1 - Caraterização do EPS de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)	13
<i>Tabela 2 - Caraterização do XPS de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3 - Caraterização da lã de rocha de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)</i>	<i>16</i>
Tabela 4 - Caraterização da lã de vidro de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)	16
<i>Tabela 5 - Caraterização da PUR de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)</i>	<i>19</i>

<i>Tabela 6 - Caraterização da PIR de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)</i>	21
Tabela 7 - Caraterização da ICB de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)	23
Tabela 8 - Caraterização térmica do EPP (Maier & Haber, 1998).....	26
Tabela 9 - Campanha de calibração do modelo com a "cassete" vazia	64
Tabela 10 - Campanha de calibração do modelo com a "cassete" preenchida com XPS	67
Tabela 11 - Campanhas de medição com a "cassete" preenchida com as diferentes misturas em estudo	72
Tabela 12 - Comparativo da solução em estudo com os isolamentos térmicos convencionais.....	86

Índice de Gráficos:

Gráfico 1 - Degradação da condutibilidade térmica com os anos (SouthZEB, 2014)	28
Gráfico 2 - Variação da condutibilidade térmica com a pressão do gás no aerogel (SouthZEB, 2014).....	32
Gráfico 3 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor sem mistura	61
Gráfico 4 - Perfil de temperaturas da célula térmica na fase final de estabilização do modelo de calibração	62
Gráfico 5 - Gráfico de estabilização de temperaturas da célula térmica para enchimento com XPS	67
Gráfico 6 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 1	69
Gráfico 7 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 2.....	69
Gráfico 8 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 3.....	70
Gráfico 9 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 4.....	70
Gráfico 10 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº5.....	71
Gráfico 11 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 6.....	71
Gráfico 12 - Evolução das temperaturas em diferentes camadas do pavimento durante o processo de arrefecimento do piso inferior com a solução em estudo aplicada.....	81

Abreviaturas

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers;

Btu - *British thermal unit*;

EM – Estado Membro;

EU – União Europeia;

EUA – Estados Unidos da América;

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*;

EPP - Polipropileno Expandido;

EPS – Poliestireno Expandido Moldado;

ETICS - *External Thermal Insulation Composite Systems*;

GEE – Gases Efeito de Estufa;

IES – *Illuminating Engineering Society of North America*;

IGCC – *International Green Construction Code*;

ICB – Aglomerado de Cortiça Expandida ou *Insulation Cork Board*;

IEA – *International Energy Agency*;

IEE – Indicador de Eficiência Energética;

NZEB – *Nearly Zero Energy Building*;

MW – *Mineral Wool*;

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico;

ODBC – Formato de base de dados específica para ser tratada por aplicações terceiras (Open Database Connectivity);

Ppm – Parte por milhão;

PCM – *Phase Change Material*;

PQ – Perito Qualificado;

PS – Polímero de Estireno;

PUR – Espuma Rígida de Poliuretano;

PVC- *Polyvinyl Chloride*;

QAI – Qualidade do Ar Interior;

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios;

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços;

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação;
SIGP – Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados;
SQL – *Structured Query Language* ou Linguagem de Consulta Estruturada;
SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios;
Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo;
TIM – Técnico de Instalação e Manutenção de Edifícios e Sistemas;
USGBC – *United States Green Building Council*;
XPS – Poliestireno Expandido Extrudido.

Símbolos

Caracteres Romanos

A - área [m²]

A_s - área do sólido [m²]

c - capacidade térmica [J/kg.°C]

c_p - calor específico do ar [J/kg.°C]

c_p - capacidade térmica volumétrica [J/m³.°C]

e - espessura [m]

h_c - coeficiente de condutância térmica superficial por convecção [W/m².°C]

h_r - coeficiente de condutância térmica superficial por radiação [W/m².°C]

H₂O - água [-]

I - inércia térmica [J.m⁻².°C.s^{-1/2}]

K - condutância térmica [W/m².°C]

L_m - largura do modelo [m]

L_{PTL} - comprimento da ponte térmica linear [m]

N_i - necessidades anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m².ano]

N_{ic} - necessidades nominais de aquecimento [kWh/m².ano]

N_v - necessidades anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m².ano]

N_{vc} - necessidades nominais de arrefecimento [kWh/m².ano]

Q - fluxo de calor [W]

Q_{a-a} - fluxo de calor por convecção ar-ar [W]

Q_{a-s} - fluxo de calor por condução ar-sólido [W]

Q_c - fluxo de calor por condução [W]

Q_{calc} - fluxo de calor calculado [W/m]

Q_{PTL} - fluxo de calor que atravessa uma ponte térmica plana [W]

Q_r - fluxo de calor por radiação [W]

R_{ph} - taxa de renovação de ar por hora [m³/h]

R_{se} - resistência térmica superficial exterior [m².°C/W]

R_{si} - resistência térmica superficial interior [m².°C/W]

T_c - temperatura em grau Celsius [°C]

U - coeficiente de transmissão térmica superficial [W/m².°C]

$U_{\text{máx}}$ - coeficiente de transmissão térmica superficial máximo [W/m².°C]
 U_{med} - coeficiente de transmissão térmica superficial médio [W/m².°C]
 U_{ref} - coeficiente de transmissão térmica superficial de referência [W/m².°C]
 U_{tot} - coeficiente de transmissão térmica superficial total [W/m².°C]
 U_{zona} - coeficiente de transmissão térmica superficial de uma zona [W/m².°C]
 V - volume [m³]
 w - teor de humidade [%]

Caracteres gregos

A - difusividade térmica [m²/s]
 Δt - intervalo de tempo [s]
 ΔT - gradiente térmico [°C]
 Δx - espessura da amostra [m]
 Δx_{cal} - espessura a amostra de calibração [m]
 λ - coeficiente de Condutibilidade Térmica (W/m.°C);
 λ_{cal} - condutibilidade térmica de calibração [W/m.°C]
 θ - temperatura [°C]
 θ_e - temperatura exterior [°C]
 θ_i - temperatura interior [°C]
 ρ - massa volúmica aparente (kg/m³) ;
 Ψ - coeficiente de transmissão térmica linear [W/m.°C]
 Ψ_{ref} - coeficiente de transmissão térmica linear de referência [W/m.°C]

1 – Introdução

1.1- Enquadramento

O património edificado em Portugal é constituído por uma percentagem significativa de edifícios antigos, sendo comum a utilização de pavimentos em madeira e tetos de estuque. Muitas destas soluções construtivas foram realizadas com complexas e elegantes aplicações em estuque e pintadas, existindo imóveis classificados de interesse nacional, de interesse público ou de interesse municipal, de valor inestimável.

Segundo o Instituto Nacional de Estatística, nos Censos realizados em 2011, a caracterização dos edifícios segundo a sua época de construção distribuem-se conforme a Figura 1 (INE & LNEC, 2011).

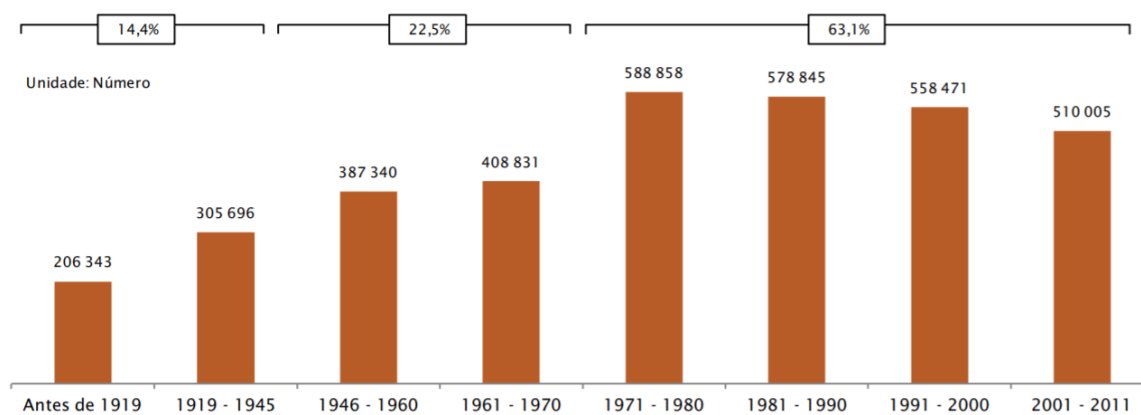


Figura 1 – Caracterização dos edifícios segundo a sua época de construção – Censos 2011 (INE & LNEC, 2011)

Em especial na década de 70, 80 e 90 do séc. XX, as paredes de alvenaria de tijolo surgem no património edificado com panos duplos de alvenaria, na maioria dos casos sem qualquer isolamento nas caixas de ar entre os referidos panos.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

De referir ainda que em 2011, cerca de 1 milhão de edifícios do parque habitacional necessitam de intervenção ao nível da reabilitação urbana nas suas diferentes áreas (INE & LNEC, 2011).

Os edifícios devem ser isolados na sua vertente térmica por razões de natureza diversa:

Numa perspetiva legal

Da transposição para o ordenamento jurídico nacional da Diretiva 2002/91/CE de 16 de dezembro, do Parlamento Europeu, o Governo Português publicou três Decretos-Lei em 2006 um dos quais teve implicação direta na utilização dos isolamentos térmicos, o Decreto-Lei nº 80 de 2006 de 4 de abril, criando o “RCCTE – Regulamento das Características e Comportamento Térmico dos Edifícios”.

Em 2013 no seguimento da transposição para o ordenamento jurídico nacional da nova *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), diretiva 2010/31/EU de 19 de maio, do Parlamento Europeu, foi publicado o Decreto-Lei nº 118 de 2013 de 20 de agosto que veio revogar os anteriores Decreto-Lei de 2006. A mais recente atualização do Decreto-Lei nº 118 de 2013 é o Decreto-Lei nº 28 de 2016 de 23 de junho.

Na perspetiva da Qualidade do Conforto

Deverão ser isolados de modo a proporcionar um melhor conforto térmico no interior dos edifícios, e melhorar a salubridade das habitações, promovendo a ventilação adequada e evitando as condensações e desenvolvimento de fungos e bactérias.

Na perspetiva Económica

Visando a eficiência energética, tirando partido do efeito da radiação solar direta sobre os edifícios, nas estações frias. O investimento em isolamento térmico é compensado pelas poupanças e, aquecimento e arrefecimento dos edifícios/frações, melhorando o conforto térmico.

Na perspetiva de operação e manutenção do Edifício

Através de um eficaz isolamento térmico, o edifício melhora o seu comportamento físico face às grandes amplitudes térmicas reduzindo a probabilidade de desenvolvimento das diversas patologias na sua envolvente interior e exterior.

Quando é abordada a necessidade de intervenção na construção com o objetivo de melhoria térmica de pavimento horizontais e cobertura, sem a demolição e reconstrução subsequente, não existem no mercado soluções tecnologicamente eficazes. Ao nível das paredes duplas, o problema é idêntico atendendo à necessidade de demolição de um dos panos quando a beneficiação se pretende no interior das paredes, as soluções passam pelo recurso à projeção de poliuretano projetado e/ou novos panos de alvenaria ou painéis de gesso cartonado. Nestas soluções existem, contudo, diversas fragilidades como de seguida se explana.

Se a beneficiação for pelo exterior, as soluções passam pelo recurso ao aumento da espessura destes elementos através de sistemas “ETICS” (*External Thermal Insulation Composite Systems*), sendo na prática aplicado mecanicamente uma solução de isolamento em EPS, XPS ou outro, e revestido com um barramento de base cimentícia, armado com redes de fibra de vidro. Estas soluções são, no entanto, frágeis sob o ponto de vista mecânico (facilmente perfuráveis), inflamáveis no isolamento, com oxidação a médio prazo dos perfis de arranque que são tipicamente metálicos, e em contato com zonas húmidas.

Os métodos atuais existentes para melhorar o isolamento dos elementos construtivos da envolvente, por preenchimento dos espaços de ar referidos, passam pela injeção de espumas de poliuretano, sendo, no entanto, bastante ineficazes quer pela falta de homogeneidade que criam após aplicação, quer pelos esforços que introduzem nos elementos (muitas vezes fragilizando-os), durante o seu processo expansivo, até à sua destabilização dimensional.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

O recurso a soluções de acrescento de panos de alvenaria ou painéis de gesso cartonado pelo interior, comportam também dificuldades acrescidas no encontro destes novos panos com os elementos adjacentes, nomeadamente guarnições de portas, remates de tetos, rodapés e vãos de janelas.

Durante anos de atividade profissional ligada à reabilitação de edifícios, o autor da presente dissertação identificou a falta de soluções de melhoria do isolamento térmico aplicáveis a património existente e falhas ao tentar obter soluções tentando aproximar as antigas soluções arquitetónicas e construtivas às crescentes exigências de isolamento térmico preconizados no Decreto-Lei nº 118 de 2013 (Estado Português, 2013) que assegura a transposição da Diretiva nº 2010/31/EU (Parlamento Europeu, 2010).

Assim sendo, tanto na reabilitação total ou parcial de edifícios ao nível de pavimentos e tetos com espaços de ar entre os materiais de acabamentos das duas faces dos elementos construtivos, como na construção onde já existe caixa de ar nos paramentos exteriores, as soluções existentes passam por alterações estruturais e dimensionais significativas e onerosas. O teto trabalhado da (Figura 2) explana bem a problemática associada à dificuldade de beneficiação térmica de um teto com a complexidade artística que a fotografia permite visualizar.



Figura 2 - Teto trabalhado em estuque impossível de isolar por métodos de isolamento tradicionais (“António Enes Morais, Lda,” 2013)

A melhoria térmica em pavimentos de madeira ou tetos em estuque tem o mesmo género de problema quanto às limitações da operação de melhoria térmica. A Figura 3, representa o pavimento de uma das salas do Palácio do Campo das Princesas, no estado do Pernambuco – Brasil, onde a complexidade do pavimento inviabiliza a beneficiação térmica do pavimento com recurso a soluções de isolamento tradicionais.



Figura 3 - Pavimento trabalhado impossível de isolar por métodos de isolamento tradicionais (Palácio do Campo das Princesas - Estado do Pernambuco, 2014)

A aplicação tradicional de isolantes quando o pavimento é intervencionado pela sua face superior, passa pela remoção de tábuas a fim de permitir o acesso aos espaços confinados lateralmente por barrotes de madeira e o pavimento e fasquiado com estuque ou estafe nas faces superiores. Quando se pretende a intervenção pela face inferior (teto da divisão inferior), obriga à demolição integral do estuque e ornamentos, sancas de remate e fasquiado de suporte, com todo o impacto que o tempo de execução e perturbação induz na obra.

1.2 - Objetivos

A presente dissertação visa o estudo de uma solução de isolante térmico composto por granulado de cortiça, granulado de borracha reciclada de pneus e ar, na forma de granulado seco, com aplicação direta através de ar comprimido para aplicação na construção civil, em especial no âmbito da reabilitação de edifícios. Esta solução de isolamento visa a melhoria significativa dos coeficientes de condutibilidade térmica dos elementos construtivos (paredes e pavimentos) minimizando o custo da intervenção na edificação e reabilitação, com especial destaque no património classificado ou de relevante complexidade e condicionalismo arquitetónico. Nestes últimos casos indicados, sendo a sua aplicação feita de uma forma eficaz, menos intrusiva e mais económica é por vezes mesmo a única exequível face a condicionantes arquitetónicas e patrimoniais específicas.

A solução permite também reciclar subprodutos da indústria corticeira, através da reciclagem de todo o género de derivados de cortiça, como a utilização das subcamadas menos nobres da exploração corticeira que são vulgarmente resíduos, rolhas de cortiça usadas, revestimentos de cortiça em final de vida removidos de habitações e de outras aplicações. Relativamente à borracha, preconizou-se a utilização de borracha proveniente da reciclagem de pneus com uma constituição base de polímero de borracha, adiante designada como apenas “borracha”, com percentagens de incorporação entre os 40 % a 55 % (incluindo NR – Borracha natural; SBR – Borracha de estireno-butadieno; IR – Borracha de isopreno; IIR – Borracha de isobutileno-isopreno; IIR “modified” – Borracha de halogéneo isobutileno-isopreno; BR – Borracha de polibutadieno; NBR – Borracha de Acrilonitrilo-butadieno), Negro de fumo (CAS# 1333-86-4; EC# 215-609-9) – 20 % a 25 %, reutilizando e reciclando também este resíduo.

Com o presente estudo, preconizou-se a melhoria das características térmicas destes elementos quando dispõem de caixa de ar, aplicando o produto por meio de ar comprimido para o espaço disponível. A intervenção é significativamente mais económica por não recorrer à demolição dos paramentos existentes e não recorrer

ao aumento da espessura das paredes com todos os impactos estéticos e funcionais ao nível dos encontros de tetos/sancas e pavimentos/rodapés.

O enquadramento legislativo europeu transposto pelo referido Decreto-Lei nº 118 de 2013 (Estado Português, 2013), promove cada vez mais a melhoria (exigência) dos parâmetros de condutibilidade das soluções para as construções novas, mas o mercado, para além das soluções intrusivas e caras já referidas, não dispõem de uma solução com a versatilidade e reduzido grau de impacto como a que se estudou.

Pretendeu-se assim, após investigação e otimização da solução de isolamento em estudo, melhorar o estado da arte ao nível do isolamento térmico das edificações existentes, sendo que, colateralmente se obtém uma melhoria nos parâmetros acústicos.

Foram identificados os aspetos relevantes tendo sido desenvolvidos em ambiente laboratorial, no sentido de otimizar a solução de isolamento, bem como a sua aplicação.

Feita uma pesquisa prévia sobre a solução que se estudou junto do Instituto Nacional da Propriedade Industrial, concluiu-se que o sistema de isolamento proposto tem carácter de inovação pelo que já foi efetuado o pedido de depósito da patente.

Listam-se de seguida as questões de investigação que a dissertação preconizou responder:

Q1. Quais as percentagens de cortiça, borracha e ar que maximizam a eficácia da mistura ao nível da melhoria da condutibilidade térmica total da solução?

Q2. Qual a granulometria de cada componente que maximiza a eficácia da mistura ao nível da condutibilidade térmica total da solução?

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Q3. Qual a granulometria de cada componente que otimiza a eficiência da introdução da solução nos espaços de forma pneumática?

Q4. Qual o melhor esquema geométrico de projeção da solução com o objetivo de maximizar a introdução da solução nos espaços existentes:

Q4.1. ao nível dos pavimentos de madeira com soalho tradicional de madeira da face superior e estuque/estafe na face inferior com aplicação pela face inferior;

Q4.2. ao nível dos pavimentos de madeira com soalho tradicional de madeira da face superior e estuque/estafe na face inferior com aplicação pela face superior.

1.3 – Organização do trabalho

A dissertação está organizada em 4 capítulos, incluindo este capítulo inicial onde se faz o enquadramento do trabalho e se apresenta a forma como está estruturada.

Neste capítulo 1 é feito um enquadramento histórico do Património e da problemática associada ao isolamento térmico. São abordadas as soluções de isolamento existentes atualmente bem como a evolução legislativa que leva hoje em dia a que os requisitos mínimos de isolamento seja cada vez mais exigentes. São também definidos os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica acerca da matéria em estudo.

No capítulo 3 é explanado o trabalho experimental realizado, abordando os materiais, equipamentos, métodos e metodologia.

No capítulo 4, apresentam-se as conclusões bem como propostas de investigação futuras.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações
novas e existentes

2 – Revisão Bibliográfica

A solução de isolamento em estudo é uma solução baseada numa mistura de granulado de borracha e granulado de cortiça reciclados. A granulometria de cada constituinte bem como a percentagem de cada parcela, condiciona os resultados técnicos em termos de isolamento e na sua aplicação. No mercado existem diversos produtos, referindo-se de seguida os principais isolantes concorrentes existentes.

Designa-se como isolantes térmicos, os materiais e produtos que apresentam uma condutibilidade térmica inferior a $0,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ e uma resistência térmica superior a $0,30 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008).

2.1 – Isolantes concorrentes com a solução em estudo

2.1.1 - Poliestireno Expandido Moldado (EPS)

O EPS, é o acrónimo da designação de *Expanded PolyStyrene* ou Poliestireno Expandido (Figura 4), em português, sendo um plástico celular e rígido derivado do petróleo.

O EPS é uma espuma de poliestireno moldada, constituída por pequenas esferas de poliestireno, permitindo criar placas de isolamento térmico (SouthZEB, 2014).

Esta expansão é executada com recurso à injeção de um agente químico na fase de reação da polimerização designado de agente expensor (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 4 - Poliestireno (Plastimar, 2011)

Os agentes de expansão mais utilizados no processo de fabricação são os hidrocarbonetos criogénicos, como por exemplo o CO₂.

A estrutura resultante do processo expansivo é uma estrutura porosa, parcialmente aberta (SouthZEB, 2014).



Figura 5 - Poliestireno antes e depois da expansão (Plastimar, 2011)

Neste material deverá ser tido em conta que a condutibilidade térmica aumenta com o teor de humidade existente na estrutura, podendo criar limitações à sua utilização em casos de exposição a elevadas concentrações de humidade (SouthZEB, 2014).

Em termos de caracterização técnica, resumem-se na Tabela 1 as características do EPS segundo o ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008).

Tabela 1 - Caracterização do EPS de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
Poliestireno Expandido Moldado (EPS)	<11	0,055
	11-13	0,045
	13-15	0,042
	15-20	0,04
	>20	0,037

O EPS é produzido tipicamente em placas ou em contínuo em linhas de produção em série (SouthZEB, 2014).

2.1.2 - Poliestireno Expandido Extrudido (XPS)

O poliestireno expandido extrudido é também designado por XPS é um produto derivado do petróleo (SouthZEB, 2014).

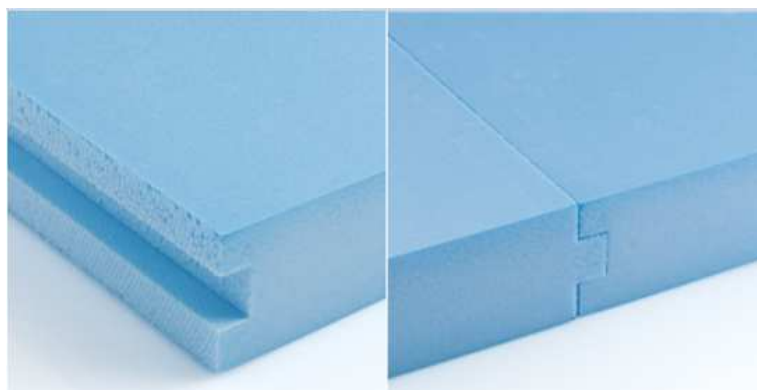


Figura 6 - Placas de Poliestireno Expandido Extrudido (“Danosa/Eurofoam,” 2017)

Um XPS (designação universal de eXtruded PolyStyrene) ou um Poliestireno Extrudido é um isolante térmico fabricado em painéis ou placas rígidas de espuma de natureza sintética (Figura 6), com estrutura celular fechada (processo de extrusão), que contém um gás expansor (p.e. HFC, CO₂, C₆H₁₂) que é adicionado no processo de fabrico (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

O XPS, é uma espuma rígida de poliestireno que se diferencia do EPS por ser obtida por um processo de extrusão em contínuo, sendo as placas posteriormente cortadas depois de frias, em linha com a produção (SouthZEB, 2014).

Apresenta face ao EPS uma maior resistência à absorção de humidade, permitindo a sua utilização em soluções mais expostas à intempérie e humidade relativa elevada (SouthZEB, 2014).

Também a sua condutibilidade térmica aumenta com o aumento do teor de humidade, sendo que a sua estrutura é porosa e de células fechadas (SouthZEB, 2014).

Caracteriza-se de seguida na (Tabela 2) o XPS anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Tabela 2 - Caracterização do XPS de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L. Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ $[kg/m^3]$	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$
Poliestireno Expandido Extrudido (XPS)	25-40	0,037

Atualmente, o XPS é o isolante térmico mais utilizado na construção civil, sendo instalado principalmente em coberturas, pavimentos e paredes em contato com o terreno (SouthZEB, 2014).

2.1.3 - Lã de Mineral (MW)

A lãs minerais, são materiais fibrosos obtidos a partir de rochas basálticas ou calcária, e de areias siliciosas e carbonato sódio, sendo muito usadas no isolamento térmico de habitações.

A condutibilidade térmica da lã mineral aumenta com o teor de humidade, pelo que deve estar sempre protegida da intempérie e de eventuais condensações de vapor de água, de modo a não perder as suas características isolantes (SouthZEB, 2014).

2.1.3.1 - Lã de rocha

A lã de rocha (Figura 7) provém de fibras minerais obtidas a partir de rochas vulcânicas, entre elas o basalto e o calcário.



Figura 7 - Aspeto físico da lã de rocha em formato de manta ("Isolaracustica," n.d.)

Após serem aquecidas as rochas basálticas e outros minerais a altas temperaturas, acima do 1300 °C, estas são transformados em filamentos que são aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitindo a fabricação de produtos fibrosos e porosos, leves, flexíveis ou até muito rígidos, dependendo do grau de compactação.

Caracteriza-se de seguida na Tabela 3 a lã de rocha, anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Tabela 3 - Caracterização da lã de rocha de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m^3]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
Lã de Rocha	20-35	0,045
	35-100	0,040
	100-180	0,042

2.1.3.2 – Lã de vidro

A lã de vidro (Figura 8), pelas suas propriedades físicas e químicas, é um dos mais tradicionais isolantes térmicos usados no mundo.

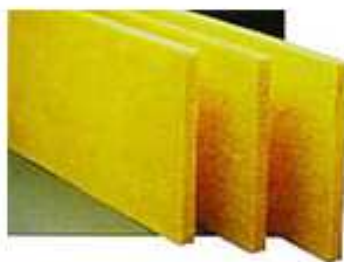


Figura 8 - Aspeto comercial de painéis em lã de vidro ("Metalica," n.d.)

A base da lã de vidro de fabricação é uma areia natural de sílica e sódio, a que se junta vidro reciclado (casco), matérias primas usadas no fabrico do vidro.

Caracteriza-se de seguida na Tabela 4 a lã de vidro, anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Tabela 4 - Caracterização da lã de vidro de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m^3]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
Lã de Vidro	8-15	0,045
	15-100	0,040

Tanto as lãs de rocha com as lãs de vidro são comercializadas em mantas utilizadas em caixas de ar de construções leves. São também comercializada em placas (mais densas) sendo mais vocacionada para aplicações em pavimentos e coberturas, podendo ainda ser comercializadas em blocos (SouthZEB, 2014).

A aplicação de lãs como isolamento, sendo uma solução técnica comercializável em painel ou rolo, é apenas exequível em paredes ou pavimentos e tetos durante a construção inicial, pois obriga a ter um acesso direto às zonas a intervencionar. Em contexto de reabilitação, obriga a demolições o que encarece a solução quando comparada com a solução pouco intrusiva em estudo.

2.1.4 - Espuma Rígida de Poliuretano (PUR)

O poliuretano é um produto sólido, com textura de espuma. É obtido a partir da reação química, entre o isocianato e o polioliol (Figura 9), sendo estes polímeros sintéticos derivados do petróleo (SouthZEB, 2014).



Figura 9 - Matérias primas do PUR: Isocianato (à esquerda) e Polioliol (à direita) (Departamento Engenharia Química - Universidade Nova de Lisboa - FCT, n.d.)

Durante o processo de expansão a estrutura celular é fechada por preenchimento de um gás expansivo (Figura 10) (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 10 - Reação química de formação da PUR após agitação do Isocionato e Polioliol (Departamento Engenharia Química - Universidade Nova de Lisboa - FCT, n.d.)

A PUR apresenta-se comercialmente em placas, projetado diretamente sobre as superfícies a isolar, injetado *in situ* ou entre paramentos metálicos (painéis sanduiche) com o objetivo de criar isolamento térmico em estruturas e revestimentos na construção civil.

Contudo, com o passar dos anos, a PUR retrai, e com esta retração, perde o seu efeito de aderência e muita da sua eficácia promovendo inúmeras pontes térmicas planas e lineares. A Figura 11 ilustra uma fissura por retração da PUR com o tempo.



Figura 11 - Espuma de PUR com fissuras por retração (“Documentário HGTV,” 2015)

Outro problema muito comum é a impossibilidade de controlar as falhas de expansão da PUR dentro das caixas de ar. A Figura 12 representa uma parede que 10 semanas após aplicação deficiente da PUR, condensou tanta humidade na caixa de ar que houve necessidade de remoção física do pano de alvenaria interior.



Figura 12 - Espuma de PUR aplicada na caixa de ar de duas paredes, uma de alvenaria de tijolo e uma de alvenaria de pedra (“www.greenbuildingadvisor.com,” 2010)

Caracteriza-se a PUR de seguida na Tabela 5, anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Tabela 5 - Caracterização da PUR de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
Espuma Rígida de Poliuretano		
<i>em placas</i>	20-50	0,040
<i>projetado ou injetado "in situ"</i>	20-50	0,042
<i>entre paramentos metálicos (painéis sanduíche)</i>	35-50	0,037

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

2.1.5 - Espuma Rígida de Poli-isocianurato (PIR)

A principal diferença entre PUR e PIR é a presença na PIR de uma quantidade elevada de estruturas anelares de isocianurato, que são criadas pela combinação de três moléculas de isocianato. Tecnicamente, diferencia-se do PUR por apresentar uma elevada resistência térmica a altas temperaturas (Giunta D'albani et al., 2017).



Figura 13 - Painéis de PIR ("Archiexpo," n.d.)

Por reagirem extremamente rápido, as formulações de PIR fluem com dificuldade, o que dificulta o preenchimento e produção de painéis.

Quanto às suas características gerais a PIR tem:

- Baixo coeficiente de condutibilidade térmica, conforme indicado na Tabela 6, devido à sua estrutura celular fechada, que contrariamente às espumas de estrutura celular abertas (Gravit, Kuleshin, Khametgalieva, & Karakozova, 2017);
- Têm também uma maior resistência ao ar e ao vapor de água (Gravit et al., 2017);
- Não obstante a sua resistência à temperatura, a PIR tem uma temperatura operacional entre os 100°C e os 150°C (Gravit et al., 2017);

A PIR apresenta-se comercialmente em placas ou entre paramentos metálicos (painéis sanduíche). Tem melhores comportamentos a altas temperaturas, o que lhe confere mais segurança ao incêndio. É um produto de fácil adequação à PUR atendendo a que os equipamentos que produzem os pré-laminados de PUR se adequam facilmente aos pré-laminados de PIR.

Atualmente, em função direta das suas vantagens comparativas, a PIR é usado em mais de 60 % de todas as construções comerciais e industriais e em mais de 20 % dos empreendimentos residenciais dos Estados Unidos da América, segundo dados da Associação Norte-americana de Transformadores de Sistemas de Isolamento em Poliisocianurato (“PIMA,” 2018). Caracteriza-se a PIR de seguida na Tabela 6, anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Tabela 6 - Caracterização da PIR de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$
Espuma Rígida de Poli-isocianurato		
<i>em placas</i>	20-50	0,040
<i>projetado ou injetado "in situ"</i>	20-50	0,042
<i>entre paramentos metálicos (painéis sanduíche)</i>	35-50	0,037

Sendo o PIR uma solução em painel também é apenas exequível em paredes ou pavimentos e tetos durante a construção inicial, pois obriga a ter um acesso direto às zonas a intervencionar. Em contexto de reabilitação, obriga igualmente a demolições o que encarece a solução quando comparada com a solução estudada, menos intrusiva.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

2.1.6 - Aglomerado de cortiça expandida (ICB)

O Aglomerado de Cortiça Expandida, deriva de uma matéria-prima natural e renovável obtida da casa dos sobreiros (SouthZEB, 2014).

O ICB é produzido utilizando a cortiça que resulta de processos industriais como é o caso da falca, utilizando os elementos constituintes da própria cortiça exsudados da própria resina, como ligantes intergranulares naturais (Lopes, 2011).



Figura 14 - Painéis de ICB ("Isocor," 2016)

O processo de cozedura é realizado por insuflação de vapor de água sobreaquecida num intervalo de temperaturas entre 300 e 370 °C, e submetido a uma pressão de cerca de 40 kPa. O vapor é produzido tipicamente em caldeiras alimentadas com os resíduos provenientes da trituração, ou seja, energia proveniente da biomassa (Lopes, 2011).

Caracteriza-se de seguida na Tabela 7 o ICB anexando-se as características da sua condutibilidade térmica:

Tabela 7 - Caracterização da ICB de acordo com quadro I.1 do ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
Aglomerado de Cortiça Expandida	90-140	0,045

O ICB é comercializado para a construção civil em granulado e em placas com diferentes espessuras (SouthZEB, 2014).

A aplicação de painéis de ICB também é apenas exequível em paredes ou pavimentos e tetos durante a construção, pois obriga a ter um acesso direto às zonas a intervencionar. Em contexto de reabilitação, obriga também a demolições o que encarece a solução quando comparada com a solução pouco intrusiva em estudo.

2.1.7 - Celulose – polissacarídeo

A celulose ou polissacarídeo (Figura 15) é manufaturada a partir de papel ou fibra vegetal reciclada (SouthZEB, 2014) .



Figura 15 - Celulose ou polissacarídeo (SouthZEB, 2014)

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 16 - Painéis de isolamento em celulose (SouthZEB, 2014)

O processo produtivo dá ao material uma consistência parecida à da lã. Adiciona-se ácido bórico (H_3BO_3) e bórax (borato sódico) para melhorar as propriedades do produto (SouthZEB, 2014).

É produzido principalmente como flocos mas também na forma de placas e mantas (SouthZEB, 2014).

Tipicamente é instalado por injeção nas caixas de ar das paredes das casas de madeira (Figura 17) (SouthZEB, 2014), mas de forma direta na superfície.



Figura 17 - Projeção de isolamento em celulose (SouthZEB, 2014)

A sua condutibilidade térmica típica situa-se entre $0,040 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ e $0,050 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ (SouthZEB, 2014).

A condutibilidade térmica aumenta com o aumento do teor de humidade ($0,040 \text{ W/m.}^\circ\text{C} \leq \lambda \leq 0,066 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ para um aumento de humidade de 0 % a 6 %) (SouthZEB, 2014).

A aplicação de celulose apenas é exequível em paredes durante a construção inicial, pois a introdução projetada apenas é eficaz quando aplicada de forma direta na superfície. Quando aplicada em painel, a solução apenas é elegível com a reconstrução de novo pano pelo interior.

2.2 – Isolantes não concorrentes com a solução em estudo

2.2.1 - Polipropileno Expandido (EPP)

O EPP é uma espuma de Polipropileno composta por uma estrutura celular que é criada pela injeção de um gás expansor. A consistência da espuma divide-se em duas estruturas diferentes: uma matriz composta pelo polímero e uma estrutura de bolsas em vácuo (Maier & Haber, 1998).



Figura 18 - Matéria prima do polipropileno antes da expansão (Isopor, 2017)

Nas espumas de EPP com estrutura de célula fechada as células gasosas são completamente encapsuladas pela estrutura celular criada pelo polímero, enquanto

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

que na estrutura de célula aberta, os gás não é confinado estando assim em contato por diversas passagens (Maier & Haber, 1998).

A presença de espaços em vácuo e descontinuidades, permitem uma redução do consumo de matéria prima (Maier & Haber, 1998).

As propriedades do EPP incluem uma boa resistência ao calor, boa resistência química e boas características como isolante térmico. O EPP não absorve água, mas e no entanto permeável ao vapor de água e outros gases (Maier & Haber, 1998).

Tabela 8 - Caracterização térmica do EPP (Maier & Haber, 1998)

Material	Massa volúmica aparente seca, ρ $[kg/m^3]$	Condutibilidade Térmica, valor de cálculo, λ $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$
Polipropileno Expandido (EPP)	10	0,042

O EPP tem como mercados típicos a indústria automóvel, isolamento e aplicações estruturais (Maier & Haber, 1998).

Na construção civil o EPP é muito utilizado em manta de redução acústica na base de pavimentos flutuantes (Maier & Haber, 1998).

2.3 – Novos materiais

Os materiais que de seguida se explanam necessitam todos de exposição das superfícies a intervencionar, o que, em contexto de reabilitação urbana, obriga a demolição de um dos panos da parede ou a revestimentos no caso de pavimentos ou tetos. Não são por isso soluções concorrentes com a solução estudada.

2.3.1 - Painéis de isolamento a vácuo (VIP)

São painéis constituídos por um centro poroso de sílica de fumo, envolto em várias camadas de polímero metalizado (Figura 19) estrutura de camadas simples, dupla ou tripla (SouthZEB, 2014).

Os aminados são produzido em placas/painéis (SouthZEB, 2014).



Figura 19 - Painel de VIP com as suas camadas constituintes (SouthZEB, 2014)

Relativamente às suas características em termos de isolamento térmico, apresentam uma condutibilidade térmica típica situada entre $0,003 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} \leq \lambda \leq 0,004 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Devido à estrutura porosa de seu interior, estão suscetíveis a:

- cortes, perfurações e outros danos externos (a condutibilidade pode aumentar até 5x – 0,02 W/m.°C neste caso);
- humidade e penetração de ar (a condutibilidade térmica pode duplicar o valor após 25 anos, atingindo cerca de 0,008 W/m.°C) (SouthZEB, 2014).

Como consequência, os VIP's não podem ser cortados ou ajustados no local de aplicação e as suas propriedades térmicas diminuem com o tempo (Gráfico 1) (SouthZEB, 2014).

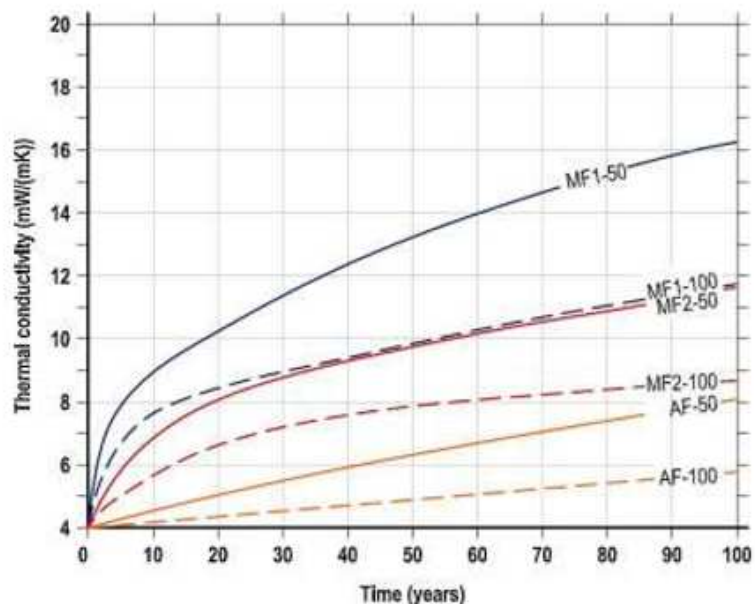


Gráfico 1 - Degradação da condutibilidade térmica com os anos (SouthZEB, 2014)

2.3.2 - Painéis preenchidos com gases (GFP)

Os painéis preenchidos com gases ou GFP (Figura 20 e Figura 21), têm uma estrutura similar aos painéis de VIP (SouthZEB, 2014).

Constituídos por uma camada barreira exterior e um região estanque interior (Figura 20), onde é aplicado um gás menos condutor que o ar (e.g. Árgon – Ar, Kriptón – Kr or Xénon – Xe) (SouthZEB, 2014).

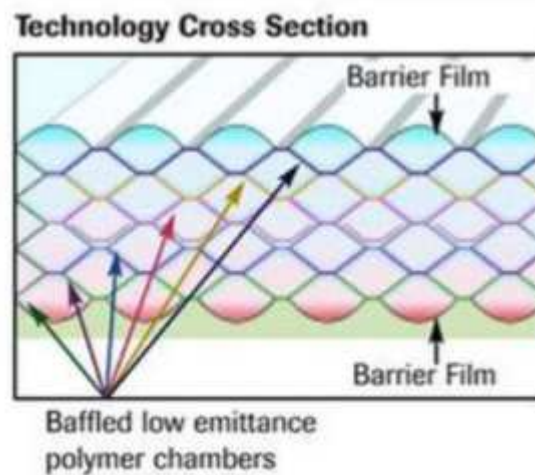


Figura 20 - Esquema explicativo dos constituintes do painel GFP (SouthZEB, 2014)

Relativamente às suas características de isolamento térmico, os valores típicos de condutibilidade térmica são teoricamente inferiores a $0,010 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, apesar de medições feitas em protótipos apresentarem valores até $0,040 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (SouthZEB, 2014).



Figura 21 - Seção transversal de um painel GFP (SouthZEB, 2014)

Comparados com os painéis VIP, apresentam condutibilidade térmica superior e têm a vantagem de o gás que os preenchem não necessitar de ser mantido em vácuo, o que torna o material menos suscetível às penetrações de humidade e de ar (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Além disso, a transferência de calor por radiação é reduzida devido à baixa emissividade das superfícies internas (SouthZEB, 2014).



Figura 22 - Aspeto exterior do painel GFP (SouthZEB, 2014)

Assim como os painéis VIP, estão vulneráveis a cortes, perfurações e danos externos (SouthZEB, 2014).

2.3.3 - Aerogéis

Os aerogéis são géis praticamente secos, com elevada porosidade (Figura 23 e Figura 24) (SouthZEB, 2014).

São sintetizados por químicos sol-gel tradicionais, de baixa temperatura. O material mais usado na sua produção é a sílica (SouthZEB, 2014).



Figura 23 - Tela de aerogel (SouthZEB, 2014)

Relativamente ao seu processo produtivo para a sintetização e preparação do gel utilizam-se nanopartículas sólidas de sílica, dispersas em líquido, aglomeradas para formar uma rede 3D contínua. Pela secagem do gel, a estrutura sólida é isolada do meio líquido (SouthZEB, 2014).



Figura 24 - Aspeto translúcido do aerogel (SouthZEB, 2014)

Os valores teóricos de condutibilidade térmica podem chegar $0,004 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, a 50 mbar (SouthZEB, 2014).

Atualmente, segundo alguns estudos, os materiais comercializados apresentam valores de condutibilidade térmica na ordem de $0,013$ a $0,014 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (SouthZEB, 2014).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Os aerogéis apresentam boa resistência à compressão, mas são muito frágeis devido à baixa resistência à tensão (SouthZEB, 2014).

O Gráfico 2 representa a variação do λ com a pressão do gás no aerogel.

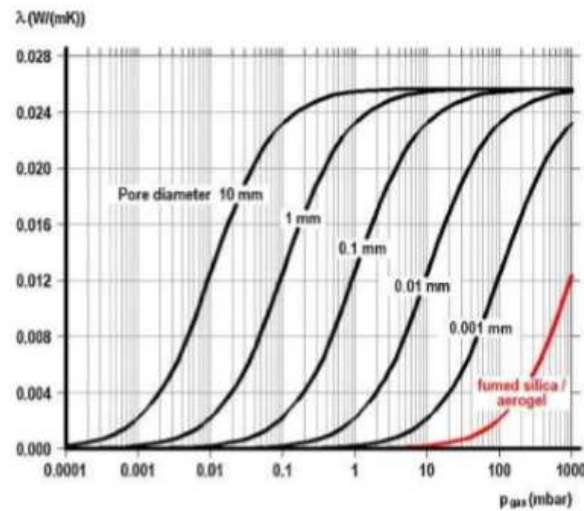


Gráfico 2 - Variação da condutibilidade térmica com a pressão do gás no aerogel (SouthZEB, 2014)

Os aerogéis exibem ainda resistências ao fogo e ao calor elevadas Figura 25 (SouthZEB, 2014).

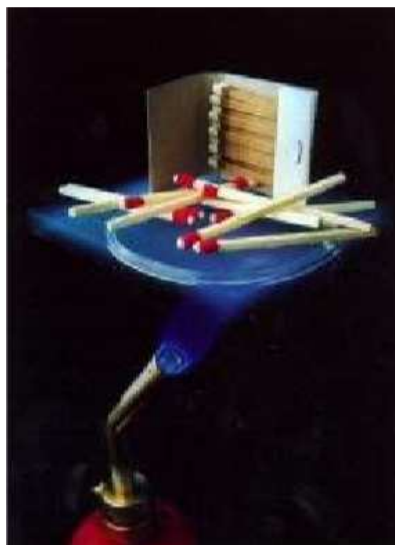


Figura 25 - Fósforos dispostos sobre um disco de aerogel estão protegidos da chama da parte inferior (SouthZEB, 2014)

Podem ser produzidos como materiais opacos ou translúcidos, possuindo grande variedade de aplicações (SouthZEB, 2014).

2.3.4 - Materiais de Isolamento gasoso (GIM)

Os GIM são basicamente um material homogéneo com estrutura de poros fechados preenchidos com um gás de baixa condutância (e.g. Árgon – Ar, Kriptón – Kr or Xénon - Xe), de condutibilidade térmica inferior a $0,004 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ em condição ideais (SouthZEB, 2014).

Devido à natureza da sua nano-estrutura, não são suscetíveis à humidade e infiltração de ar nos nano-poros, mantendo excelentes características mesmo com o normal processo de envelhecimento (SouthZEB, 2014).

São similares aos VIM, com a única diferença de que o vácuo é substituído por um gás de baixa condutância (SouthZEB, 2014).

2.3.5 - Materiais de nano-isolamento (NIM)

Com origem na ideia dos VIP e dos VIM, os NIM são basicamente um material homogéneo de estrutura de poros pequenos, abertos ou fechados, com condutibilidade térmica em geral inferior a $0,004 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ em condições ideais (SouthZEB, 2014).

Ao contrário dos VIM's e dos GIM's, a estrutura reticular dos NIM's não precisa de ser estanque ao ar ou humidade durante a sua vida útil (superior a 100 anos). Os NIM's atingem baixa condutibilidade térmica sem a aplicação de vácuo nos poros, através do uso do efeito Knudsen (SouthZEB, 2014).

Uma vez que os NIM's não são afetados pela humidade ou pelas infiltrações de ar, é esperado que apresentem excelentes características de envelhecimento. NO

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

entanto, atendendo a que são novos materiais, ainda não se dispõem de informação histórica do comportamento ao longo do tempo (SouthZEB, 2014).

Na Figura 26, representa-se esquematicamente as diferenças entre a estruturas celular dos VIP e dos NIM.

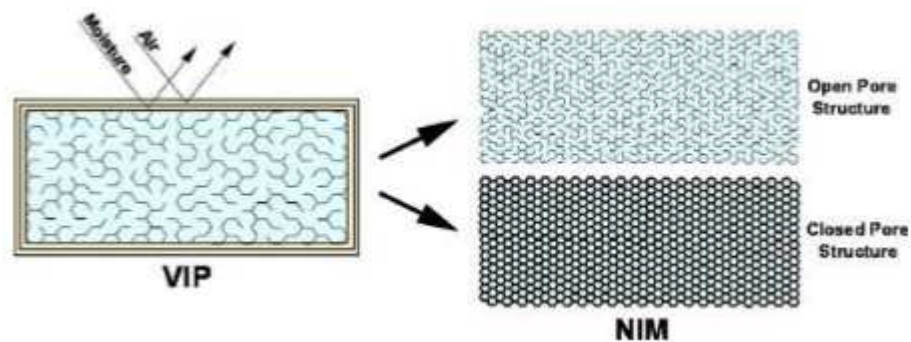


Figura 26 - Representação do esquema celular dos VIP e NIM (SouthZEB, 2014)

2.3.6 - Materiais de Isolamento Dinâmico (DIM)

Um material de isolamento dinâmico (DIM) é um material cuja condutibilidade térmica pode ser controlada num intervalo desejado. É possível controlar a condutibilidade térmica ao modificar de forma controlada:

- o conteúdo ou concentração do gás no interior dos poros, incluindo o caminho livre médio das moléculas gasosas e interface gás-superfície;
- a emissividade da superfície interna dos poros;
- a condutibilidade térmica do estado sólido do entrançado (SouthZEB, 2014).

Os DIM's podem representar uma boa solução de isolamento térmico em climas do sul, onde um valor muito baixo para U (tão baixo quanto o possível, dependendo apenas de aspetos económicos) é necessário para minimizar as perdas térmicas

durante o inverno, mas, por outro lado, um valor de U significativamente mais alto é essencial como nível ótimo de isolamento para minimizar as necessidades de arrefecimento (foi observado que valores de U muito baixos possuem efeitos inversos nas necessidades de arrefecimento, e na respetiva energia consumida sazonalmente) (SouthZEB, 2014).

Relativamente às Matérias Primas base da presente dissertação, conforme já referido, tem como base a cortiça, na sua forma granulada, e a borracha reciclada de pneu. No capítulo seguinte faz-se uma abordagem mais profunda a cada um dos principais constituintes da solução.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações
novas e existentes

3 – Trabalho Experimental

3.1 - Materiais e Equipamentos

3.1.1 - A cortiça

A cortiça provém dos sobreiros (*Quercus Suber L.*, Figura 27) e é uma matéria-prima 100 % natural, e 100 % reciclável, que é extraída sem nunca prejudicar o normal desenvolvimento da árvore. A cortiça extraída é aproveitada a 100 %. Mais de 50 % do seu volume é ar, o que a torna muito leve (SouthZEB, 2014).

Tem uma densidade de cerca de 200 kg/m³ (Gil, 2012).

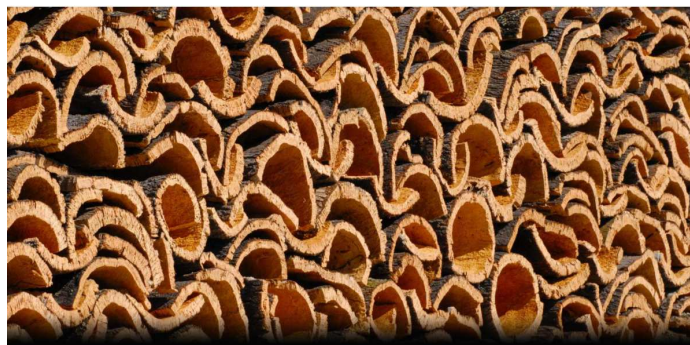


Figura 27 - Cortiça (APCOR, n.d.)

É totalmente impermeável a líquidos e praticamente impermeável a gases, graças à suberina e cerina presentes na constituição das suas células. É também um isolante térmico e elétrico e um bom absorvedor acústico e anti-vibrático, sendo ainda praticamente imputrescível (Gil, 2012).

Atendendo à sua flexibilidade, as suas células quando comprimidas, dobram e encurvam não existindo expansão celular lateral nem deformação do domínio plástico, recuperando naturalmente a sua forma inicial (Gil, 2012).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

A cortiça tem uma elevada estabilidade química, biológica e boa resistência ao fogo (Gil, 2012).

Foram inclusivamente feitos estudos de produtos medicinais com base em derivados de cortiça atendendo ao seu potencial antifúngico (Mendes, 2013).



Figura 28 - Granulado de cortiça (APCOR, n.d.)

Para a mistura estudada, utilizou-se o granulado de cortiça proveniente dos recortes de rolhas e outros restos de produção da transformação da cortiça (Figura 28).

3.1.2 – A borracha dos pneus

A existência de pneus (Figura 29) de automóveis, surge naturalmente com a revolução industrial e com o advento do automobilismo. Inicialmente homogéneo e derivando de borracha natural, tornou-se ao longo do tempo um consumível altamente tecnológico transformando-se gradualmente num material heterogéneo, composto por diversas borrachas até à sua constituição atual (borracha natural, de isobutileno-isopreno, borracha halogenada isobutileno-isopreno, borracha de polibutadieno e as borrachas acrilonitrilo-butadieno), com um elevado nível de precisão tecnológico no seu desenho, construção e design. Um estudo de Brendan

Rodgers, e Walter Waddell ilustra bem a complexidade referida, no capítulo 14 do seu livro *“The Science and Technology of Rubber”* (Rodgers & Waddell, 2013).

Segundo dados da entidade nacional de gestão da recolha e valorização de pneus – a Valor Pneu – durante o ano 2016 foram valorizadas 89.042 toneladas de pneus, geradas 80.283 toneladas de pneus usados, tendo sido recolhidos e devidamente valorizadas 83.469 toneladas de pneus de viaturas automóveis (Valor Pneu, 2015).



Figura 29 - Pneus usados para reciclagem (“<http://autos.culturamix.com>,” 2017)

Atendendo à sua abundância, existem formas de reciclar os pneus que passam pela recauchutagem (vulcanização de uma banda de desgaste no piso anterior), embora seja cada vez mais raro o recurso a esta operação, atendendo aos riscos que comporta por eventual destacamento da vulcanização.

A problemática associada à reciclagem deste produto e o enquadramento legislativo da sua valorização, são de seguida explanados para melhor enquadramento desta “nova” matéria prima, e em especial o granulado de borracha proveniente da reciclagem dos pneus (Figura 30).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 30 - Granulado de pneu reciclado (“<https://lista.mercadolivre.com.br>,” 2017)

3.1.2.1 - A Gestão de pneus na Europa e em Portugal

Como resultado da Diretiva Europeia 1999/31/EC (EC, 1999), é atualmente proibido em Portugal depositar pneus usados em aterro. Esta diretiva orientadora obriga os Estados-Membros a concentrarem os seus esforços na responsabilidade ambiental e em recolher e tratar adequadamente os seus pneus usados (Valor Pneu, 2015).

Não existe nenhuma legislação europeia específica que regule a recolha e tratamento dos pneus usados. Cada Estado-Membro pode definir o seu próprio sistema de gestão.

Na União Europeia existem três sistemas de gestão (APA, 2017).

- o sistema de responsabilidade de produtor (adotado em Portugal);
- o sistema de taxas;
- o sistema de mercado livre.

É perfeitamente possível que os países mudem de um sistema de gestão para outro.

Um dos países que se está a preparar para mudar de um sistema de mercado livre para um sistema de responsabilidade de produtor é por exemplo a Itália (APA, 2017).

No que concerne à recolha e valorização de pneus no final do seu “ciclo de vida”, o Decreto-Lei n.º 111 de 2001, de 6 de abril, indica os princípios e normas aplicáveis à sua gestão de modo a que seja reduzida ao mínimo a quantidade de resíduos a eliminar, referindo formas de valorização como a reciclagem, a recauchutagem, a produção de granulado de borracha, de entre outras formas que possam contribuir para uma melhoria do desempenho ambiental de todos os intervenientes no “ciclo de vida” dos pneus (APA, 2017).

O referido Decreto-Lei n.º 111 foi sucessivamente alterado pelo o Decreto-Lei n.º 43 de 2004, de 2 de março, pelo Decreto-Lei n.º 178 de 2006, de 5 de setembro e pelo Decreto-Lei n.º 73 de 2011, de 17 de junho.

Procura-se assim no atual quadro legislativo, que a gestão de pneus usados seja mais sustentável, promovendo-se a recauchutagem e apoiando formas de valorização dos pneus no final da sua vida útil.

Outro objetivo da legislação vigente é o de transferir a responsabilidade dos produtores de pneus para entidades credenciadas para a sua valorização, terminando apenas nesse momento a sua responsabilidade.

No nosso país a entidade responsável por regular a valorização dos pneus é a empresa “Valor Pneu” sendo ainda a entidade gestora do “Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados” (SGPU). A sua atividade é suportada pela legislação já referida.

Os pneus usados têm em Portugal o ciclo de vida descrito na Figura 31.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

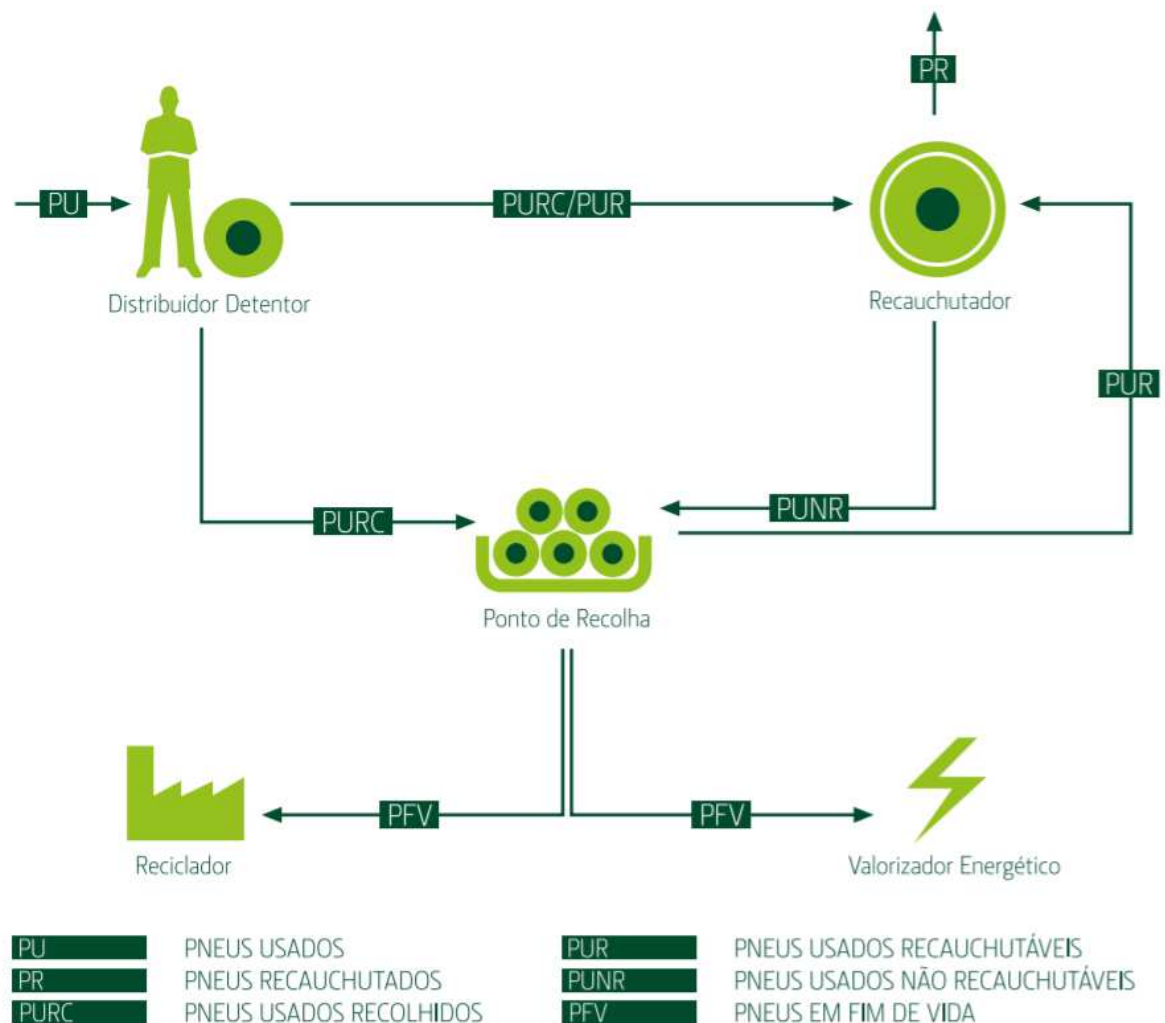


Figura 31 - Ciclo de vida dos pneus usados em Portugal. (Valor Pneu, 2015)

A Lista Europeia de Resíduos classifica os pneus usados com o código 160103, significando que não são resíduos perigosos (CE, 2014), podendo ser transformados e reutilizados na construção civil, encerrando a cadeia de valor do seu ciclo de vida de forma segura e sustentável.

Para a mistura em estudo, a utilização que se fez do pneu, foi a utilização do granulado de pneu, já liberto das malhas metálicas que fazem parte da constituição do pneu.

O estudo da solução foi limitado à aplicação do produto por propulsão de ar, e/ou a granel, nas soluções de elementos construtivos existentes, aplicado diretamente nos espaços de ar aquando da construção ou reabilitação.

3.1.3 – Local onde se realizou a investigação

A investigação foi realizada no laboratório de Estruturas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, do Instituto Politécnico de Lisboa. Os simuladores que de seguida se descrevem (designados por P1 e P2) ocuparam o espaço junto à “parede de reação” (Figura 32).

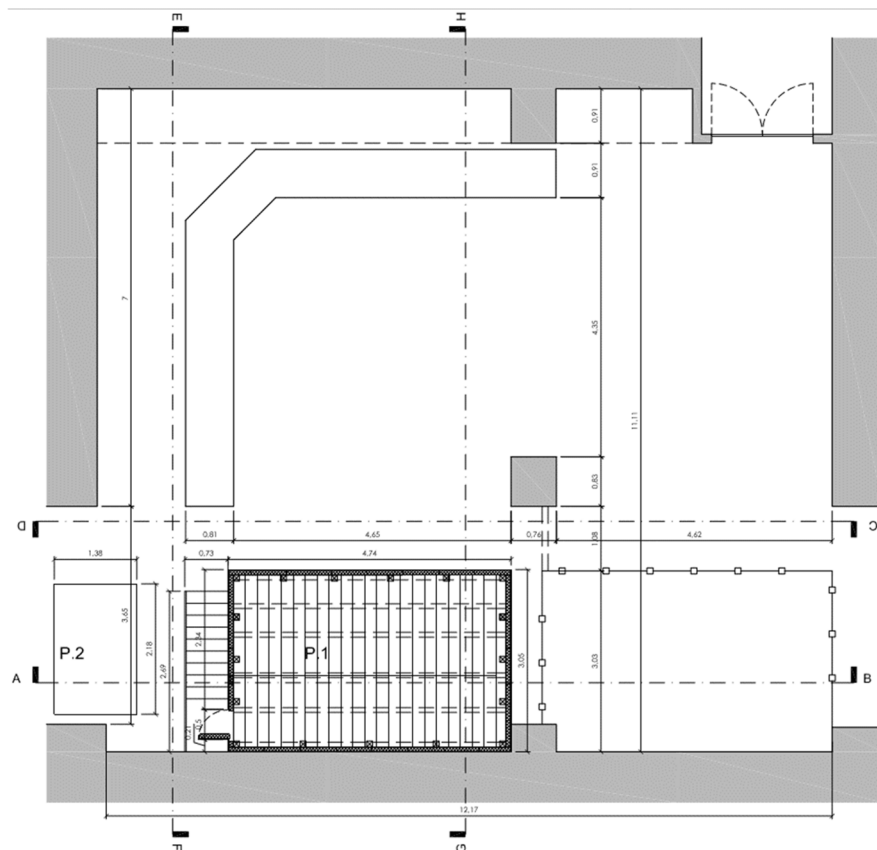


Figura 32 - Implantação dos simuladores P1 e P2

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

3.1.4 – Simuladores e equipamentos de apoio à investigação

A investigação utilizou dois simuladores (um simulador para elementos estruturais verticais, um simulador para elementos estruturais horizontais) e uma célula térmica para testes da condutibilidade térmica das diferentes formulações.

3.1.4.1 – Simulador para elementos estruturais verticais (simulador P1)

O simulador para elementos estruturais verticais, paredes com panos duplos (simulador P1, Figura 33 a Figura 37), permitiu simular a espessura da lâmina de ar entre panos através de um mecanismo regulador com escala de medição (Figura 34). O simulador foi todo confinado com uma caixa opaca (Figura 35) e dotado de sistema de climatização na zona simulando o exterior e na zona simulado o interior, permitindo recriar diferentes condições de temperatura e humidade exteriores de projeto. Todo o simulador foi dotado de janelas para inspeção visual;



Figura 33 - Mecanismo de regulação da espessura da parede dupla



Figura 34 - Escala de regulação



Figura 35 - Canópia exterior



Figura 36 - Construção da parede dupla de alvenaria de tijolo sobre o mecanismo regulador



Figura 37 - Imagem da campanha de introdução da mistura

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

3.1.4.2 – Simulador para elementos estruturais horizontais (simulador P2)

O simulador para elementos estruturais horizontais (simulador P2, Figura 40), permitiu simular o espaço confinado pelos barrotes de madeira, soalho na face superior e estuque na face inferior, construído de forma tradicional (Figura 42). O simulador foi todo confinado com uma caixa opaca e dotado de sistema de climatização na zona simulando o exterior e na zona simulando o interior, permitindo recriar diferentes condições de temperatura e humidade exteriores de projeto (Figura 41). Todo o simulador foi dotado de sensores de temperatura e controlo independentes, bem como janelas para inspeção visual (Figura 38 e Figura 39).



Figura 38 - Janelas acrílicas para inspeção



Figura 39 - Detalhe do pavimento amovível para inspeção



Figura 40- Imagem exterior do simulador



Figura 41 - Imagem interior do simulador com máquina climática

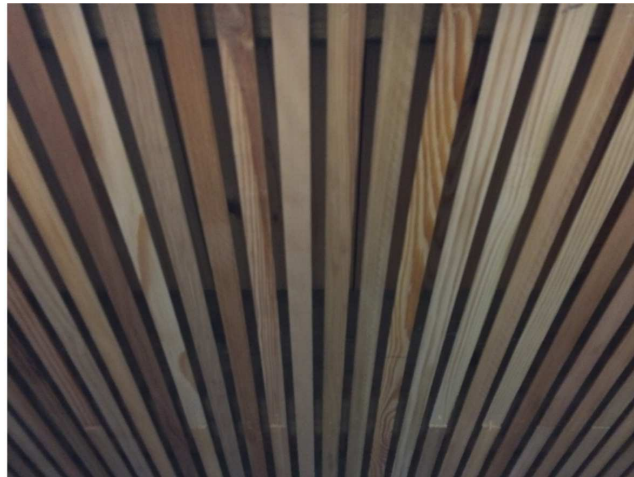


Figura 42 - Fasquiado para aplicação do estuque tradicional

Foi paralelamente desenvolvida uma pistola de ar comprimido semelhante às normalmente utilizadas na decapagem por jato de areia, sendo que o mecanismo da pistola sofreu sucessivas alterações até estar otimizado o mecanismo propulsor/granulometria da mistura, atendendo a que existiam entupimentos e problemas associados à dispersão das diferentes densidades dos materiais e diferentes granulometrias.

Também todo o sistema de propulsão passou por diferentes fases, com diversos insucessos até se alcançar uma combinação entre a propulsão, mecanismo de introdução e sistema de aplicação otimizados.

A pistola recebe a mistura a granel e propulsiona pneumáticamente a mistura para o espaço a melhorar termicamente. Foram criados diversos acessórios terminais para a pistola com o objetivo de maximizar a introdução da mistura em cada uma das situações de introdução. Estes dispositivos foram sendo também sucessivamente alterados até se conseguir a otimização para cada ponto de aplicação.

Acerca da afinação da granulometria da mistura seca foi estudada tendo em conta as diferentes densidades do granulado de borracha e do granulado de cortiça, nomeadamente a forma como se deposita, de modo mais ou menos homogéneo, nos espaços a tratar após a propulsão pneumática.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

O granulado de borracha reveste-se de particular interesse pela componente de atenuação acústica que não sendo alvo da presente dissertação, é um dos desenvolvimentos a ser estudado no futuro.

3.1.4.3 – Célula térmica

A célula térmica (Figura 44), foi construída com o objetivo de identificar, de entre as diversas soluções de mistura, com diferentes percentagens de cada componente e diferentes granulometrias, quais as que apresentavam um coeficiente de condutibilidade térmica mais baixo.

A análise da célula térmica permitiu diferenciar e despistar de entre as diversas formulações, as que seriam selecionadas para a fase de testes de introdução pneumática nos espaços a melhorar termicamente.

A célula térmica foi constituída por painéis de XPS de 8 cm de espessura, protegidos mecanicamente por MDF de 10 mm de espessura.

A zona de permuta térmica está localizada na parede frontal, com uma abertura de 48 cm x 48 cm que aloja uma “cassete” de alumínio feita em chapa de 1 mm de espessura (Figura 43). O alumínio comporta-se assim como um “super-condutor” sendo por isso negligenciável o efeito da sua resistência térmica no âmbito do estudo dos coeficientes de transmissão térmica que se pretendem maximizar com o presente equipamento.

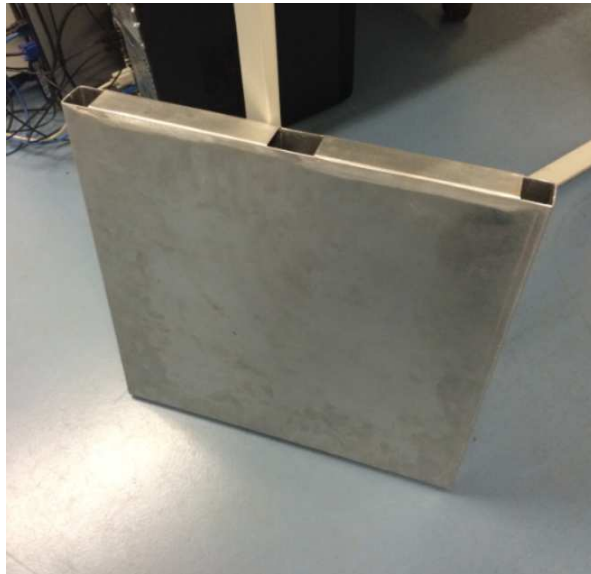


Figura 43 - "cassete" em alumínio para ensaio de diferentes formulações do isolante em estudo

A célula térmica tem forma cúbica e tem 1 m de aresta interior, sendo sido dotada de três sensores de temperatura de alta precisão (um no exterior e dois no interior, colocados a duas alturas diferentes) e fonte de calor controlada, com registo de dados ODBC (Open Database Connectivity), que permitiu a caracterização de diferentes formulações com vista à otimização da solução granulométrica, para posterior afinação da metodologia de introdução pela via pneumática.



Figura 44 - Célula térmica

Foram constituídas diversas amostras da solução, compostas por borracha, cortiça e ar, em diferentes proporções por forma a otimizar a mistura ideal.

A solução otimizada obtida a partir de diferentes misturas caracterizadas com o apoio da célula térmica, foi submetida a testes no LNEC (Laboratório Nacional de

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Engenharia Civil) a fim de validar os valores dos coeficientes de condutibilidade térmica estimados previamente (Anexo I).

3.1.4.4 – Câmara Termográfica

As medições termográficas feitas às superfícies termicamente relevantes nos diferentes simuladores, foram realizadas com recurso a uma câmara termográfica da marca “FLUKE (Fortive Corporation, Estados Unidos da América)”, modelo “Ti10” (Figura 45). A câmara referida é na prática uma câmara híbrida, que permitiu a visualização da imagem real com a sobreposição de uma imagem na gama dos infra-vermelhos, permitindo imagens mais enquadradas na envolvente.



Figura 45 - Câmara termográfica "Fluke", modelo "Ti10"

3.1.4.5 – Câmara Endoscópica

O equipamento utilizado para inspeção das caixas de ar, em especial nos edifícios onde foi ensaiada a aplicação *in situ* da mistura em estudo, foi uma câmara endoscópica da marca “KRAFTWERK (Kraftwerk Europe GA, Bischoffsheim, França)”, ref^a “Junior line” (Figura 46).



Figura 46 - Câmara endoscópica da marca "KRAFTWERK", refª "Junior line".

A utilização desta câmara permitiu perceber as condições prévias de introdução da mistura em estudo nos espaços, bem como o aspeto do produto após a aplicação.

3.1.4.6 – Sensores de temperatura

Todos os sensores de temperatura utilizados na presente dissertação são da marca "MAXIM INTEGRATED" (Maxim Integrated Products Inc, San José, Califórnia, Estados Unidos da América), refª "DS18B20" (Figura 47). São sensores digitais com uma precisão da décima de grau, permitindo o registo de temperaturas com a precisão necessária para o estudo de materiais isolantes.



Figura 47 - Sensor de temperatura da marca "MAXIM INTEGRATED", refª "DS18B20"

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

3.1.4.7 – Automação e controlo

Os autómatos utilizados para a recolha de dados são da marca “WATTSKY” (Wattsky, Lda, Lisboa, Portugal), ref^a: “V2” (Figura 48) também desenvolvidos pelo autor da presente dissertação e permitiram a recolha de dados e armazenagem em base de dados para produção da informação das campanhas de medição.



Figura 48 - Controladores da marca “WATTSKY”, ref: “V2”

A transmissão de dados foi feita através de um “router” 3G em comunicação com uma base de dados ODBC instalada no site da “Amazon.com”, interligado no quadro de comando que centralizou todos os sensores, autómatos e comandos (Figura 49).



Figura 49 - Quadro principal de comando dos simuladores e célula térmica

3.1.4.8 – Equipamento de frio industrial

O equipamento de produção de frio instalado para simulação de condições climática adversas foi constituído por uma unidade evaporadora com três ventoinhas e uma unidade exterior da marca “PECOMARK” (Pecomark, Barcelona, Espanha), refª “STL034Z012/PK” a funcionar com fluido frigorigéneo R404A (Figura 50 e Figura 51).



Figura 50 - Unidade evaporadora



Figura 51 - Unidade condensadora

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

3.1.4.9 – Pinça amperimétrica

A pinça amperimétrica, permitiu a validação dos consumos elétricos da fonte, bem como o diagnóstico de avarias e calibração de sensores. Utilizou-se um equipamento da marca “VELLEMAN” (Velleman Inc, Gavere, Belgica), refª “DCM 265” (Figura 52).



Figura 52 – Pinça amperimétrica da marca “Velleman”, ref: “DCM 265”

3.1.5 – Caracterização dos elementos potenciais a reabilitar

Pressupõem-se que os elementos construtivos onde possa vir a ser aplicada a mistura alvo da proposta de investigação têm tipicamente a seguinte constituição física:

3.1.5.1 - Ao nível dos tetos

- nos edifícios gaioleiros e pombalinos, constituídos por um fasquiado trapezoidal em madeira com afastamento de 1 cm, com uma primeira camada de cal e areia designada por reboco, uma segunda camada de pasta de cal, gesso e areia de esboço com 3 a 5 mm designada de esboço e uma camada de pasta de gesso e cal aérea com 3 mm designada de estuque (Figura 53).



Figura 53 - Teto tradicional em estuque (Gonçalves, 2017)

- nos edifícios construídos após os anos 50 do séc. XX, constituídos por painéis de estafe (gesso e linhaça, Figura 54), sendo posteriormente substituídos por painéis de gesso cartonado, com as juntas tratadas e rematadas com rede em fita e pasta de gesso.



Figura 54 - Painéis de estafe (Lamas J.M., 2003)

A aplicação da mistura pode ser feita de forma direta aplicando o sistema a granel, sempre que haja um acesso franco pela face superior que permita a aplicação com controlo de qualidade ou propulsão de forma pneumática através de orifícios de 10 a 20 mm de diâmetro;

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

3.1.5.2 - Ao nível dos pavimentos

- nos edifícios gaioleiros e pombalinos, constituídos por vigamentos de barrotes de madeira com seção variável, revestidos a soalho tradicional de madeira com 20 mm de espessura e largura variável, rematados junto à parede com rodapés em madeira e por vezes um segundo perfil de remate da junta também em madeira. O encaixe entre soalhos de pavimento pode ser à “Inglesa” (Figura 55) ou à “Portuguesa” (Figura 56). O espaço entre barrotes adota largura variável tipicamente entre os 40 e os 60 cm.

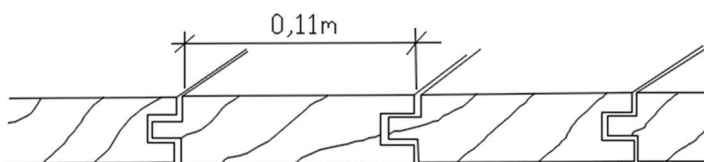


Figura 55 - Soalho à Inglesa (Lamas J.M., 2003)

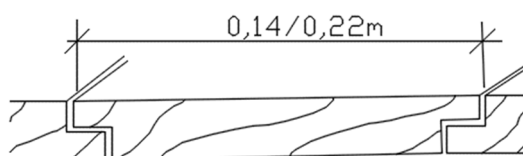


Figura 56 - Soalho à Portuguesa (Lamas J.M., 2003)

A aplicação da mistura pode ser feita de forma direta aplicando o sistema a granel, sempre que haja um acesso franco pela face superior que permita a aplicação com controlo de qualidade, propulsionado de forma pneumática através dos rodapés ou apenas removendo o perfil de remate da junta entre o pavimento e rodapé, quando este exista (Figura 57).



Figura 57 - Remate da junta entre pavimento e rodapé ("Rua Marquês de Sá da Bandeira 110," 2016)

3.1.5.3 - Ao nível das paredes

- em geral aplicável a todas as paredes que disponham de caixa de ar (Figura 58), tipicamente a partir dos anos 70 e 80 do séc. XX, em alvenaria de tijolo ou painéis de gesso cartonado, sempre constituídas por dois panos com uma caixa de ar de espessura variável entre os panos, permitindo a aplicação da solução ou por propulsão pneumática através de orifícios de 10 mm ou a granel durante a construção.

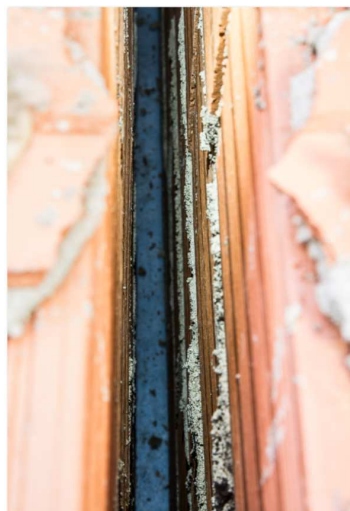


Figura 58 - Interior da caixa de ar de uma parede de alvenaria de tijolo (Gonçalves, 2017)

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

A aplicação da mistura pode ser feita de forma direta aplicando o sistema a granel, sempre que haja um acesso franco pela face superior que permita a aplicação com controlo de qualidade ou propulsionando de forma pneumática através dos orifícios a criar com cerca de 10 a 20 mm de diâmetro.

3.2 – Metodologia

Foram realizadas diversas amostras com diferentes formulações percentuais com granulados de cortiça e borracha. Também foram realizadas diferentes combinações granulométricas com vista à otimização da introdução do produto nos espaços. Estas amostras foram propulsionadas com diferentes valores de pressão e diferentes mecanismos de introdução, desenvolvendo-se assim a pistola e acessórios de introdução da mistura, o dimensionamento do sistema de produção pneumático e pressão otimizada de serviço, bem como método de introdução pneumática para cada situação.

Recorrendo aos simuladores, foram otimizados os processos de introdução do produto visando a sua homogeneidade nas 3 dimensões espaciais, tendo as introduções sido validadas com recurso às janelas de inspeção existentes nos protótipos.

Paralelamente foram analisadas as melhores formulações no LNEC com vista à validação/confirmação dos coeficientes de condutibilidade térmica estimados com a utilização da célula térmica.

3.2.1 – Recolha e análise de dados

De seguida explanam-se os métodos e técnicas utilizados para recolha e análise de dados:

- métodos/técnicas para recolha de dados:

Os dados foram recolhidos por autómatos com capacidade de registo ODBC, permitindo a armazenagem de todos os dados das monitorizações térmicas em base de dados SQL.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

- métodos/técnicas para análise de dados:

Atendendo a que todos os dados foram armazenados em base de dados SQL, o tratamento foi feito de forma gráfica e em tabelas para cada uma das simulações. Recorreu-se à plataforma “Librato” (<https://www.librato.com>) para produção de gráficos com base nos dados recolhidos.

3.2.1.1 – Célula térmica

a) Campanha de calibração do modelo sem preenchimento da “cassete”

A primeira campanha de medições na célula térmica visou a calibração do modelo com base na fonte de calor controlada e com base nos elementos constituintes de toda a envolvente da célula térmica.

A célula foi infraestruturada com uma fonte luminosa incandescente, geradora de energia térmica por efeito joule. Assistiu-se assim a um aumento expetável do registo da temperatura nos sensores interiores de forma gradual, com declive acentuado (Figura 59).



Figura 59 - Imagem do interior da célula térmica com fonte de calor e sensores de temperatura

Apresenta-se no Gráfico 3 a rampa de evolução das temperaturas interiores e exterior durante a campanha de calibração do modelo. A partir do momento em que se ligou a fonte geradora de calor, assistiu-se ao referido aumento de temperatura nos sensores interiores e constância de registo no sensor exterior.

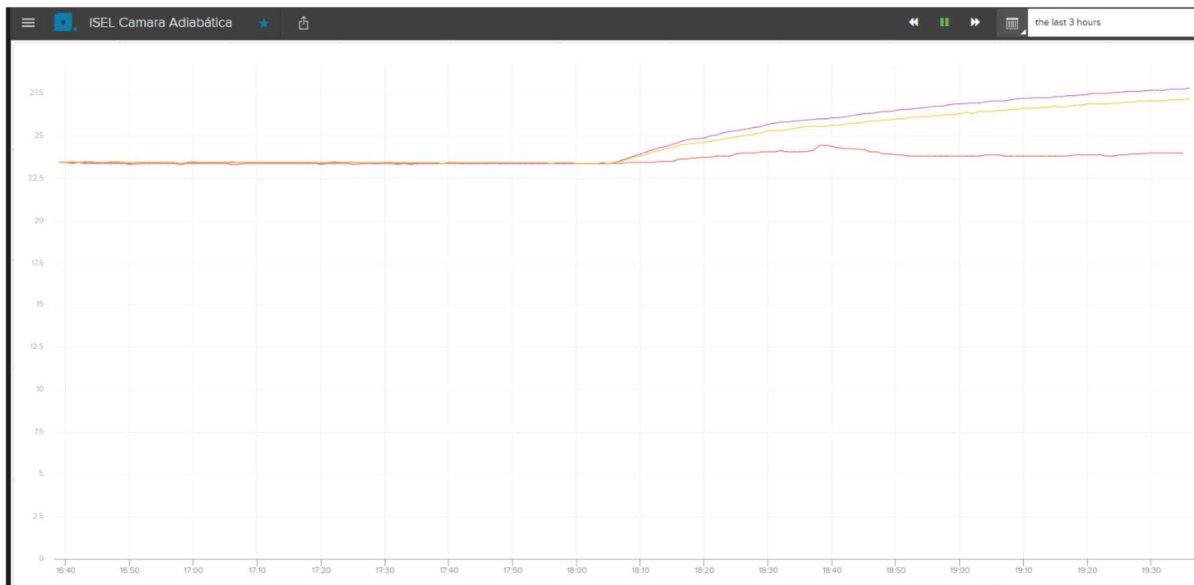


Gráfico 3 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor sem mistura

Após uma subida progressiva das temperaturas interiores, as curvas de registo das temperaturas começaram a estabilizar definindo um patamar conforme se apresenta no Gráfico 4, permitindo o cálculo do λ referente à condutibilidade térmica da “cassete” sem qualquer enchimento no seu interior (Figura 60).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

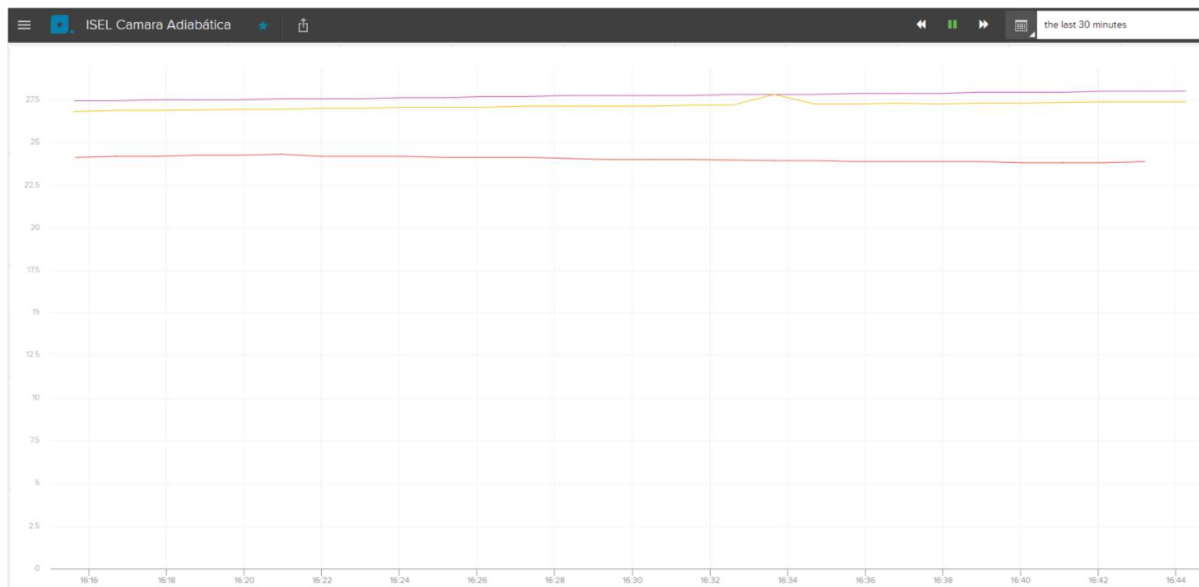


Gráfico 4 - Perfil de temperaturas da célula térmica na fase final de estabilização do modelo de calibração

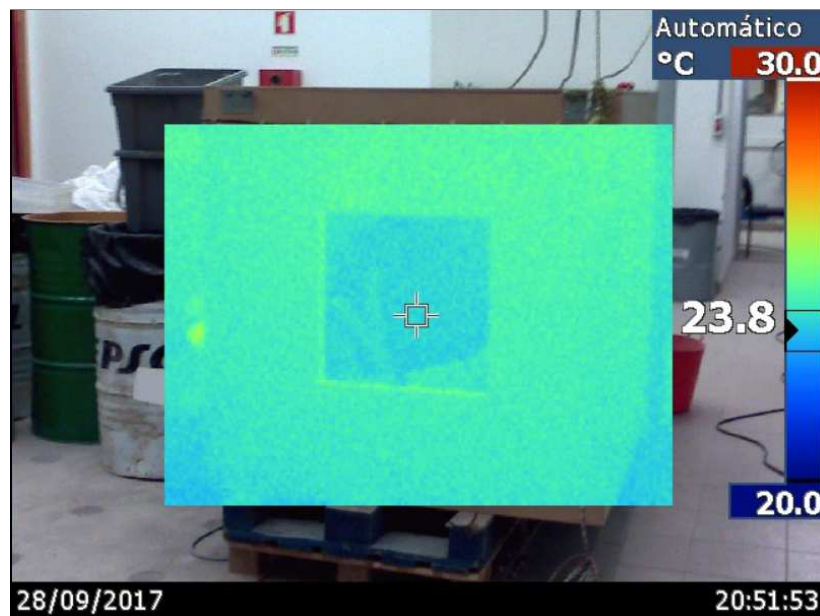


Figura 60 - Termografia da célula térmica durante a campanha de calibração do modelo com "cassete" de alumínio sem solução aplicada

Apresenta-se de seguida o cálculo da potência de aquecimento da fonte na fase de calibração do modelo com a "cassete" sem preenchimento:

$$Q = U \times A \times (\Delta T) \quad [W] \quad (3.1)$$

$$Q = \left[\sum_{i=1}^7 U_i \times A_i \right] \times \Delta T \quad (3.2)$$

$$\text{Considerando } U = \frac{1}{\sum_i^n R_i + R_{si} + R_{si}} \quad (3.3)$$

$$Q = \left[3 \left(\frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,13 + 0,13} \times 1 \right) + (1 \times 1 - 0,48 \times 0,48) \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,13 + 0,13} + 1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,10 + 0,10} + 1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,17 + 0,17} + 0,48 \times 0,48 \times \frac{1}{\frac{0,002}{170} + 0,13 + 0,13} \right] \times (27,625 - 24,19) \quad (3.4)$$

$$Q = 11,66655 [W] \quad (3.5)$$

em que

- $\lambda_{aluminio} = 170 [W/m \cdot ^\circ C]$;
- $\lambda_{XPS} = 0,037 [W/m \cdot ^\circ C]$;
- R_{si} para ascendente em elementos horizontais = $0,10 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$;
- R_{si} para descendente em elementos horizontais = $0,17 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$;
- R_{si} para ascendente em elementos verticais = $0,13 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$.

Comparando o valor obtido, pela campanha de medições, com a potência da fonte de calor de 10 W, considerou-se razoável que o valor obtido no cálculo da potência da fonte térmica devido à não incorporação das pontes térmicas lineares que se identificaram ao longo do perímetro da “cassete” de alumínio.

Na Tabela 9, encontra-se a tabela de cálculo da campanha de calibração:

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Tabela 9 - Campanha de calibração do modelo com a "cassete" vazia

Grandeza	Obs	Valor	Unid
Q		11,2167	W
A1'	face traseira	1	m2
U1'		0,4129	W/m2°C
A2'	Face frontal	0,7696	m2
U2'		0,4129	W/m2°C
A3'	topo	1	m2
U3'		0,4233	W/m2°C
A4'	base	1	m2
U4'		0,3997	W/m2°C
A5'	face esquerda	1	m2
U5'		0,4129	W/m2°C
A6'	face direita	1	m2
U6'		0,4129	W/m2°C
a_ex	cassete	0,2304	m2
U_ex		3,8460	W/m2°C
ΔT		3,4350	adim
Text		24,19	°C
Tint supr		27,94	°C
Tint inf		27,31	
λ		171,270	W/m°C

b) Campanha de calibração com "cassete" preenchida por XPS

No âmbito dos procedimentos de calibração da célula térmica, foi feita nova campanha com a cassete de alumínio integralmente preenchida com XPS, tendo sido cortadas diversas tiras deste material de forma a ser possível preencher o interior da "cassete" pelos orifícios existentes (Figura 61 e Figura 62).

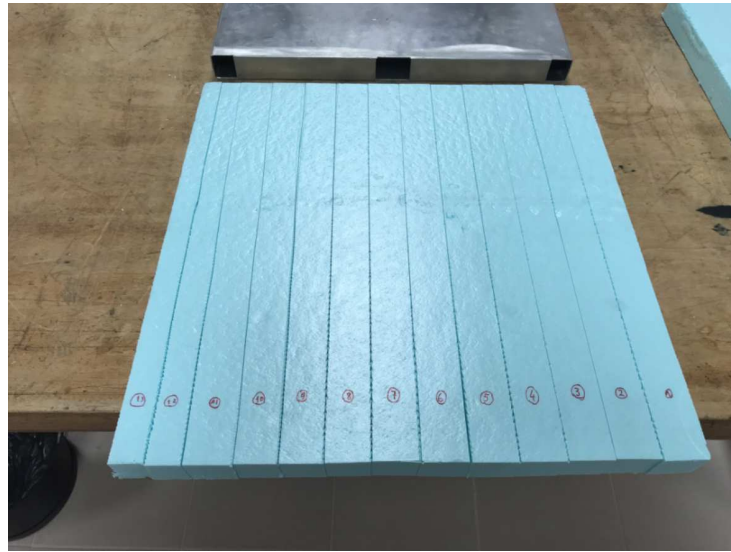


Figura 61 - Preparação das tiras de XPS para introdução no interior da “cassete” da célula térmica – numeração

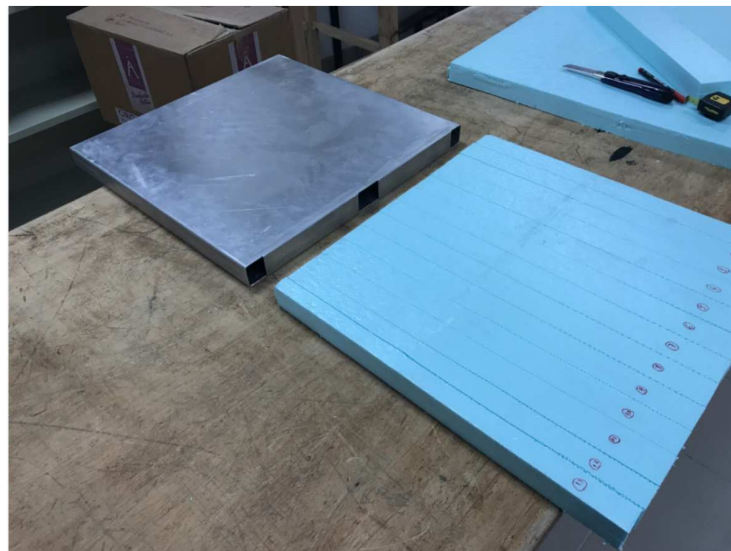


Figura 62 - Preparação das tiras de XPS para introdução no interior da célula térmica

Apresenta-se de seguida o cálculo do coeficiente de condutibilidade térmica na fase de calibração do modelo com a “cassete” com preenchimento em XPS e adotando o valor da potência da fonte de calor calculado em (3.5):

$$Q = U \times A \times (\Delta T) \quad [W] \quad (3.6)$$

$$Q = [\sum_{i=1}^7 U_i \times A_i] \times \Delta T \quad (3.7)$$

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

$$\text{Considerando } U = \frac{1}{\sum_i^n R_i + R_{si} + R_{se}} \quad (3.8)$$

$$11,2167 = \left[1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,13 + 0,13} + (1 \times 1 - 0,48 \times 0,48) \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,13 + 0,13} + \right. \\ \left. 1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,1 + 0,1} + 1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,17 + 0,17} + 1 \times 1 \times \frac{1}{\frac{0,08}{0,037} + 0,13 + 0,13} \times 2 + 0,48 \times 0,48 \times \right. \\ \left. \frac{1}{\frac{0,002}{171,27} + \frac{0,03}{\lambda} + 0,13 + 0,13} \right] \times (26,595 - 22,25) \quad (3.9)$$

$$\lambda_{do \text{ enchimento}} = 0,03412 \text{ [W/m.}^\circ\text{C]} \quad (3.10)$$

em que:

- $\lambda_{aluminio_corrigido} = 171,27 \text{ [W/m.}^\circ\text{C]};$
- $\lambda_{XPS} = 0,037 \text{ [W/m.}^\circ\text{C]};$
- R_{si} para ascendente em elementos horizontais = $0,10 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C)/W]};$
- R_{si} para descendente em elementos horizontais = $0,17 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C)/W]};$
- R_{si} para ascendente em elementos verticais = $0,13 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C)/W]}.$

Atendendo à precisão envolvida e erro atingido, considerou-se a célula térmica calibrada para os valores das campanhas seguintes atendendo à reduzida diferença entre os valores de condutibilidade térmica de $0,03412 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ e o $0,0370 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, expectável para o XPS.

No Gráfico 5, apresenta-se o gráfico de estabilização de temperaturas da célula térmica para a calibração com XPS:

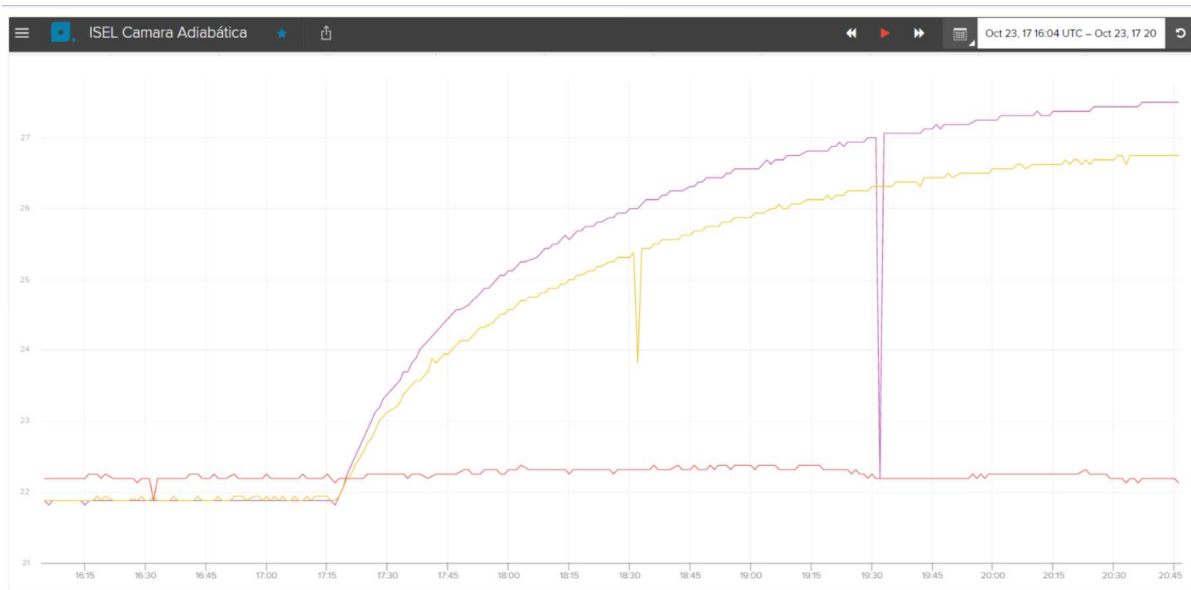


Gráfico 5 - Gráfico de estabilização de temperaturas da célula térmica para enchimento com XPS

Na Tabela 10, encontra-se a tabela do cálculo do λ da mistura, resultado da campanha de calibração:

Tabela 10 - Campanha de calibração do modelo com a "cassete" preenchida com XPS

Grandeza	Obs	Valor	Unid
Q		11,2167	W
A1'	face traseira	1	m2
U1'		0,4129	W/m2°C
A2'	Face frontal	0,7696	m2
U2'		0,4129	W/m2°C
A3'	topo	1	m2
U3'		0,4233	W/m2°C
A4'	base	1	m2
U4'		0,3997	W/m2°C
A5'	face esquerda	1	m2
U5'		0,4129	W/m2°C
A6'	face direita	1	m2
U6'		0,4129	W/m2°C
a_ex	cassete	0,2304	m2
U_ex		0,8777	W/m2°C
ΔT		4,3450	adim
Text		22,25	°C
Tint supr		26,94	°C
Tint inf		26,25	°C
λ		0,03412	W/m°C

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

c) Campanhas de medição das soluções em estudo

Para estas campanha de medições, foi feito o enchimento da “cassete” com diferentes formulações de granulados de cortiça e de borracha (grânulos entre 3mm e 5mm), tendo-se procedido de seguida à estabilização da célula térmica e à medição dos coeficientes de condutibilidade térmica de cada uma das formulações (Figura 63).



Figura 63 - Amostras das diferentes formulações estudadas na célula térmica

Os gráficos que de seguida se apresentam (Gráfico 6 ao Gráfico 11) representam a estabilização das temperaturas após a mudança da formulação na “cassete” da célula térmica experimental.



Gráfico 6 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 1

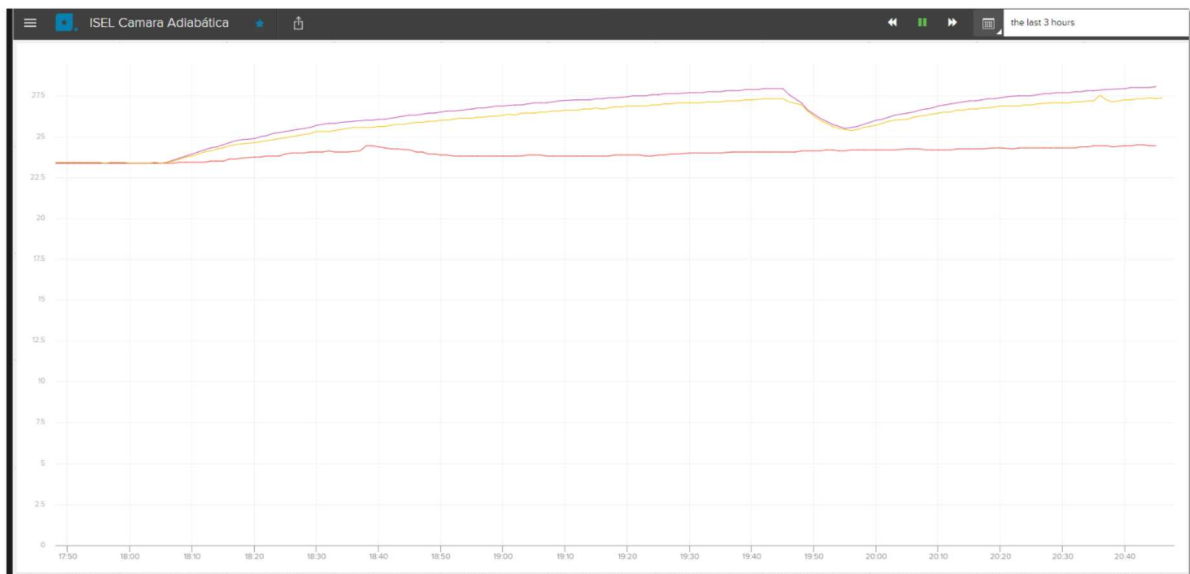


Gráfico 7 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº 2

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

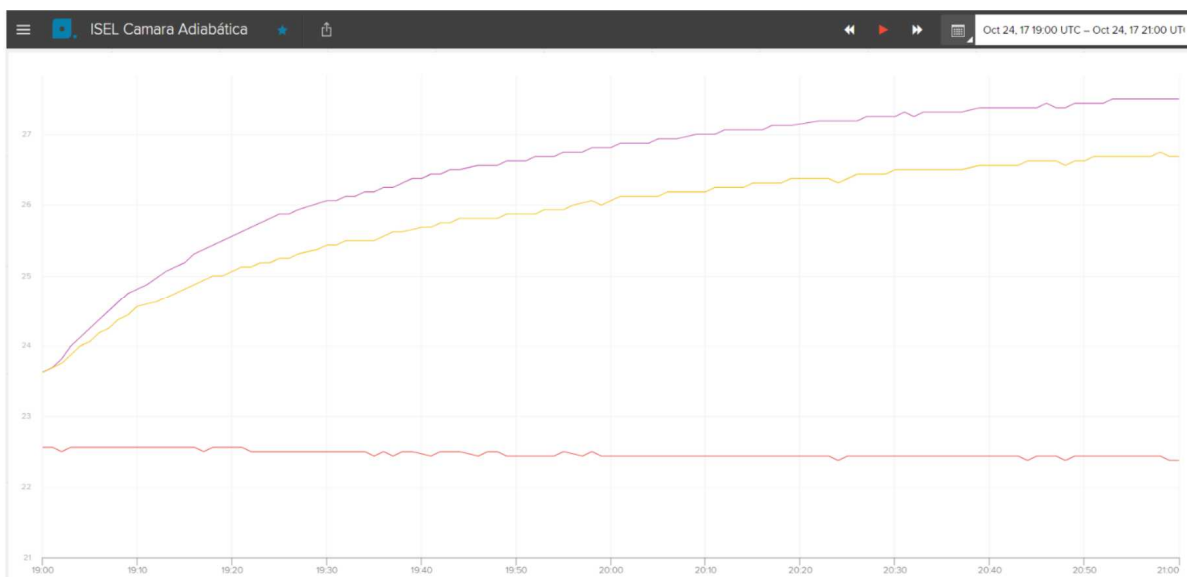


Gráfico 8 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura n.º 3

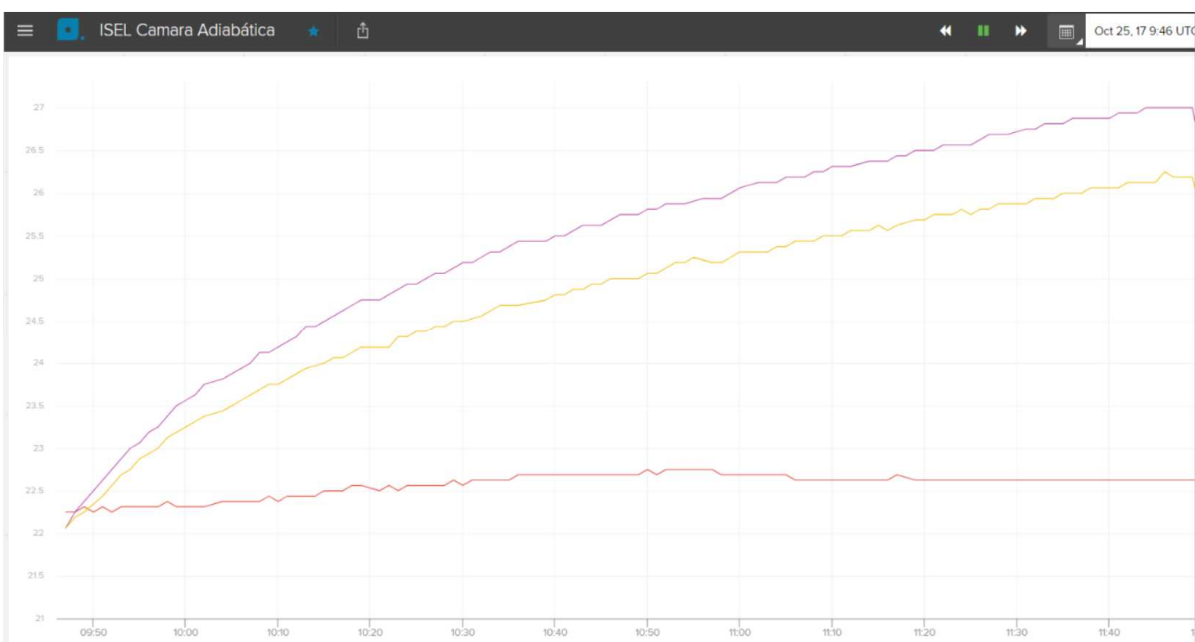


Gráfico 9 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura n.º 4

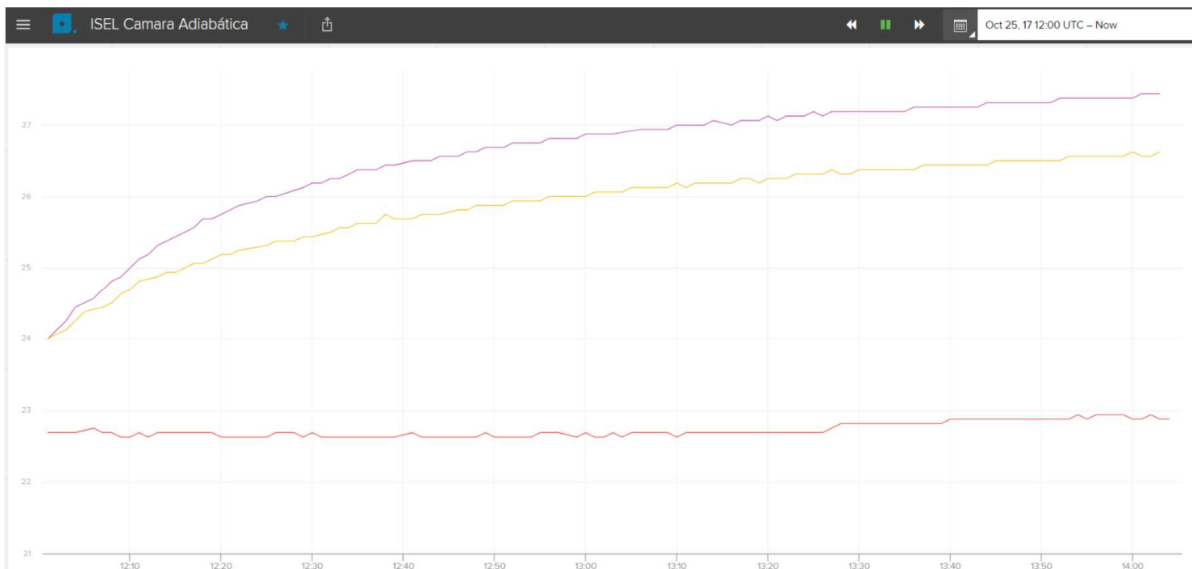


Gráfico 10 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº5



Gráfico 11 - Estabilização das temperaturas na célula térmica após ligação da fonte de calor com mistura nº6

O esquema da Figura 64 representa cada uma das superfícies estudadas e que incorporam o cálculo dos coeficientes de transmissibilidade térmica e os coeficientes de transmissão térmica.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

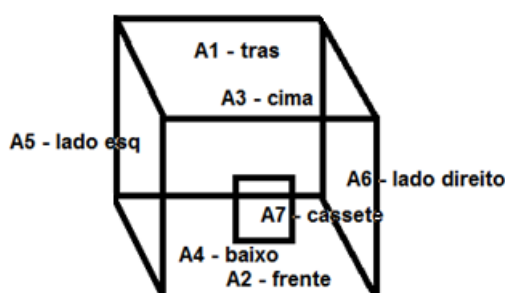


Figura 64 - Esquema auxiliar de cálculo da transmissibilidade térmica das diversas superfícies da célula térmica

Após o tempo de estabilização da célula térmica, os valores recolhidos da campanha foram os que se indicam na Tabela 11.

Tabela 11 - Campanhas de medição com a "cassete" preenchida com as diferentes misturas em estudo

		vazio (só alumínio)	com XPS	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	
Grandeza	Obs									Unid
Q		11,21667	11,2167	11,21667	11,21667	11,21667	11,21667	11,21667	11,21667	W
A1'	face traseira	1	1	1	1	1	1	1	1	m2
U1'		0,41285	0,41285	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	W/m2°C
A2'	Face frontal	0,7696	0,7696	0,7696	0,7696	0,7696	0,7696	0,7696	0,7696	m2
U2'		0,41285	0,41285	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	W/m2°C
A3'	topo	1	1	1	1	1	1	1	1	m2
U3'		0,42334	0,42334	0,423341	0,423341	0,423341	0,423341	0,423341	0,423341	W/m2°C
A4'	base	1	1	1	1	1	1	1	1	m2
U4'		0,39965	0,39965	0,399654	0,399654	0,399654	0,399654	0,399654	0,399654	W/m2°C
A5'	face esquerda	1	1	1	1	1	1	1	1	m2
U5'		0,41285	0,41285	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	W/m2°C
A6'	face direita	1	1	1	1	1	1	1	1	m2
U6'		0,41285	0,41285	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	0,412854	W/m2°C
a_ex	cassete	0,2304	0,2304	0,2304	0,2304	0,2304	0,2304	0,2304	0,2304	m2
U_ex		3,84598	0,87769	1,034581	1,390051	1,561726	2,045122	2,140168	2,351197	W/m2°C
ΔT		3,435	4,345	4,285	4,155	4,095	3,935	3,905	3,84	adim
Text		24,19	22,25	22,5	22,44	22,44	22,63	22,63	22,88	°C
Tint supr		27,94	26,94	27,13	27	26,94	27	26,94	27,13	°C
Tint inf		27,31	26,25	26,44	26,19	26,13	26,13	26,13	26,31	
λ		171,270	0,03412	0,04246	0,06530	0,07888	0,13103	0,14476	0,18148	W/m°C
esp_interior		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	m
esp_aluminio		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	m
$\lambda_{aluminio}$		171	171,27	171,27	171,27	171,27	171,27	171,27	171,27	W/m°C
Rext		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	m2.°C/W
Rext		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	m2.°C/W

d) Considerações sobre as campanhas

Uma necessidade de correção identificada resulta da existência de uma ponte térmica linear ao longo de todo o perímetro da cassetete de alumínio portadora das soluções de mistura (Figura 65). Estas perdas foram incorporadas na fonte de calor, atendendo ao seu comportamento linear. As implicações tidas com esta incorporação traduziram-se num “aumento da potência” da fonte de calor de 1,22 W face ao valor inicial da fonte de calor com potência de fábrica de 10 W.



Figura 65 - Representação da ponte térmica linear existente a todo o perímetro da cassetete portadora da mistura

A tecnologia de alta precisão dos sensores escolhidos revelou-se adequada à precisão necessária para as campanhas de medição.

A célula térmica permitiu, de um modo expedito, seleccionar, comparativamente as melhores formulações, sendo que para maior precisão científica e confirmação da condutibilidade térmica da solução, foram feitos ensaios no LNEC (Anexo I)

Obtiveram-se valores da mesma ordem de grandeza, apurando-se um valor de $\lambda=0,0653 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ na célula térmica e um valor de $\lambda=0,0591 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ apurado no ensaio do LNEC, tendo sido validada a informação que a célula térmica proporcionou, em especial na seleção prévia de formulações da mistura válidas termicamente para os ensaios de propulsão pneumática e aplicação no simulador para elementos de alvenaria verticais e no simulador para pavimentos horizontais com estrutura de madeira.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

A mistura selecionada da campanha foi a amostra nº 2 (Tabela 11) atendendo a que foi a formulação que melhor deu resposta às seguintes exigências funcionais:

- Exigências de habitabilidade: Conforto térmico e higrotérmico;
- Exigências de durabilidade e economia: Minimização dos custos de construção.

A mistura tem, também, um coeficiente de transmissibilidade térmica que, após testes no LNEC (Anexo I) a posiciona na classificação de isolante térmico atendendo a que tem um $\lambda < 0,065 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, conforme referenciado no ITE 50 do LNEC (Carlos A. Pina Santos; L Matias, 2008)

A amostra nº 2 abriu também o caminho para o desenvolvimento futuro da caracterização acústica do produto, podendo ser alvo de um trabalho de investigação futuro.

3.2.1.2 – Simulador para elementos estruturais verticais com panos duplos (simulador P1)

O simulador em questão, permitiu testar o enchimento da caixa de ar e perceber a forma como a mistura se deposita no interior da caixa de ar das paredes de alvenaria, atendendo a que o simulador foi dotado de diversas janelas de visualização da deposição do produto, no topo e nas partes laterais do simulador.

As paredes do simulador, tendo sido rebocadas, permitiram também aferir o melhor método de perfuração, bem como a escolha de diferentes brocas (cranianas e sólidas) com diferentes diâmetros.

Foram também ensaiadas diferentes velocidades de furação, com e sem precursão.



Figura 66 - Janela de visualização do produto depositado na caixa de ar

a) Campanhas de introdução da mistura *in situ*

Após os testes em laboratório, foi feita uma campanha de grande dimensão no edifício da Escola Avé-Maria, da Fundação José de Almeida Eusébio, sito na Rua dos Lusíadas em Lisboa, alvo de reabilitação, com o objetivo de melhorar termicamente a envolvente.

O edifício, em betão armado da década de 70/80 do séc. XX, foi intervencionado ao nível da envolvente exterior. As paredes são constituídas por alvenaria de tijolo com caixa de ar não preenchida com as espessuras da caixa de ar a variarem entre os 5 cm nas empenas laterais e 10 cm na fachada principal e tardoz do edifício.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 67 - Edifício da escola Avé-Maria em Lisboa

Foram feitas campanhas de introdução da mistura em cerca de 900 m² de paredes, através da furação prévia, imediatamente abaixo das vigas existentes.



Figura 68 - Parede após intervenção e inspeção do isolante em parede de estuque

Os orifícios com cerca de 10 a 20 mm de diâmetro, permitiram a introdução pneumática da mistura isolante térmica, preenchendo a totalidade da caixa de ar existente. A tecnologia de introdução pneumática, permitiu a beneficiação de paredes sem a remoção dos revestimentos existentes (Figura 69).



Figura 69 - Parede após intervenção e inspeção do isolante sem demolição dos azulejos dos revestimentos

A avaliação da eficácia de introdução da mistura, foi feita mediante três mecanismos de controlo:

- O cruzamento das quantidades de material introduzido *versus* volume disponível para introdução na caixa de ar a beneficiar, permitindo despistar pano a pano, a eventual existência de bolsas não preenchidas;
- A validação do enchimento no interior da parede através de câmara endoscópica (Figura 70);

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 70 - Imagem com câmara endoscópica da mistura dentro da caixa de ar de uma parede de alvenaria de tijolo

- A furação com broca de 8mm na base da parede, no sentido de assegurar que a mistura chegasse à base do pano de alvenaria intervencionado.

b) Considerações sobre as campanhas

Para melhoria futura deste protótipo, será importante proceder à medição *in situ* da condutibilidade térmica através de instrumentação que permita a medição por método transiente, através de uma sonda de superfície com base na análise da resposta térmica do material ensaiado relativamente a impulsos térmicos ou utilizando o método estacionário de fluxo de calor.

3.2.1.3 - Simulador para elementos estruturais horizontais (simulador P2)

Este simulador serviu um interesse muito prático, no sentido de permitir estudar as diferentes possibilidades de introdução do produto em pavimentos e tetos de construção típica do início do séc. XX.

Houve o cuidado de utilizar técnicas construtivas e formular argamassas de estuque destinadas aos barramentos, com os ingredientes e tempos de cura tanto quanto possível similares aos usados na época, de modo a permitir reproduzir as características dos materiais tradicionais.

O simulador em questão foi dotado de janelas de visualização laterais. Na face inferior e na face superior, alternadamente, uma das tábuas permitiu o acesso à caixa de pavimento, o que permitiu estudar também a forma de dispersão do produto dentro da caixa do pavimento durante a propulsão, e a eventual segregação granular atendendo às diferentes densidades de produtos constituintes.

Este simulador permitiu ainda ter uma percepção dos limites de projeção da mistura em estudo de forma homogênea. Foi conseguido um limite de 4,5 m de comprimento com projeção homogênea, de cada um dos dois lados em que foi feita a aplicação.

Este limite permite uma extensão de intervenção máxima de 9 m de comprimento o que garante a intervenção na grande maioria dos pavimentos e tetos pois mesmo em grandes edifícios como em palacetes, onde os vãos são normalmente maiores, não existem, em geral, vãos longitudinais com estas dimensões atendendo à fluência dos barrotes de madeira.

A Figura 71 ilustra a furação inicial do teto de estuque para posterior introdução da mistura em estudo.



Figura 71- Furação do teto para introdução da pistola

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

A Figura 72, imagem do simulador de elementos estruturais horizontais, ilustra o aspeto do produto homogeneizado, na caixa de ar do pavimento, após a introdução do produto.



Figura 72 - Produto homogeneizado após introdução na caixa do pavimento

Recorreu-se também à termografia a fim de identificar zonas onde pudesse existir eventual falha de cobertura que levassem à formação de pontes térmicas, tendo-se obtido imagens muito satisfatórias conforme se pode verificar na Figura 73, com temperaturas no piso inferior simuladas de $-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e superior de $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. O Gráfico 12 explana a evolução do registo de temperaturas desde o momento em que se arrefeceu o piso inferior do simulador.

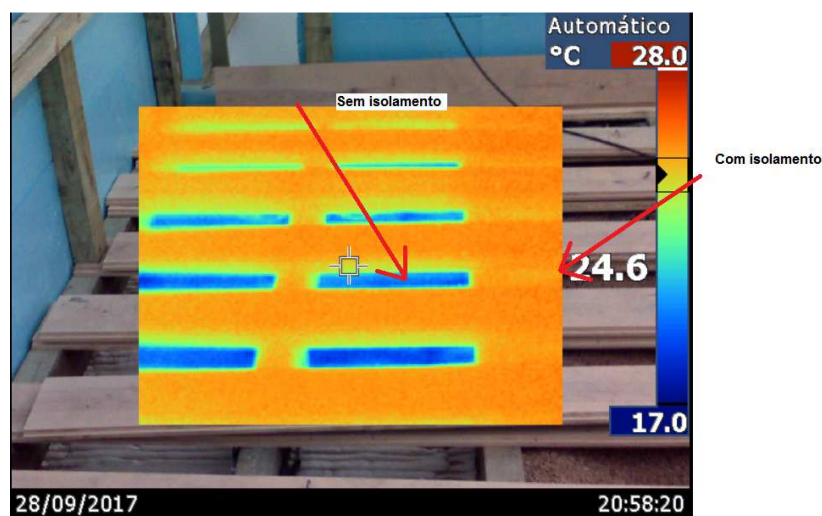
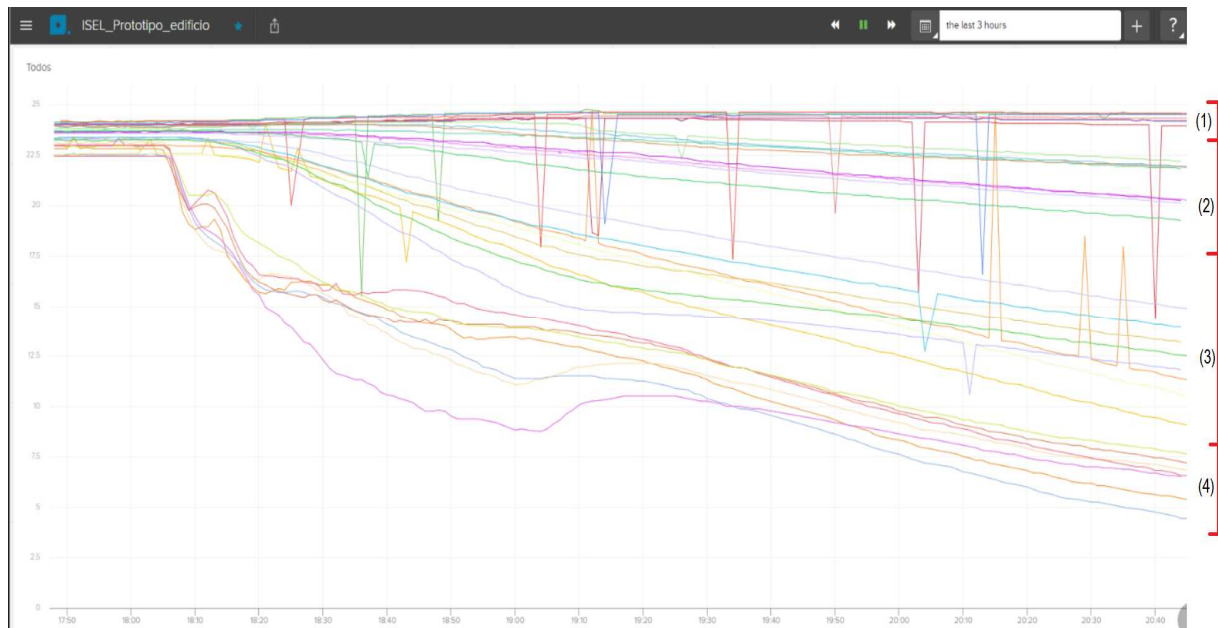


Figura 73 - Imagem termográfica do pavimento submetido na face inferior a $-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, e na face superior a $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, com e sem solução de isolamento



Legenda:

- (1) sensores de pavimento instalados na face superior das tábuas;
- (2) sensores de pavimento instalados na face inferior (caixa de ar);
- (3) sensores instalados na face superior (caixa de ar);
- (4) sensores instalados na face inferior (espaço a $-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Gráfico 12 - Evolução das temperaturas em diferentes camadas do pavimento durante o processo de arrefecimento do piso inferior com a solução em estudo aplicada

No âmbito da presente dissertação, foi possível ainda proceder a diversos ensaios em casos reais, com aplicação *in situ* da solução isolante para beneficiação de um pavimento de uma habitação no Largo da St^a Cruz do Castelo em Lisboa, que iria receber pavimento final e necessitava de uma beneficiação térmica sem a demolição da base de pavimento já existente (Figura 74).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

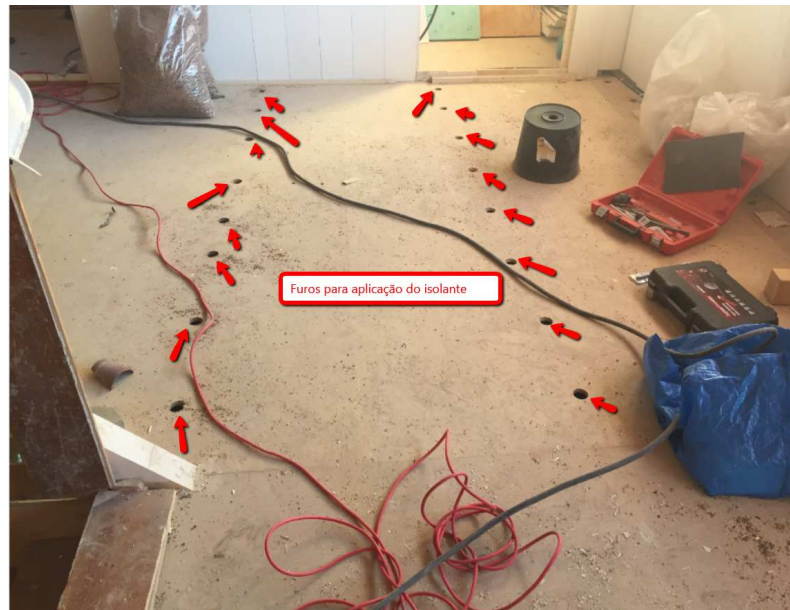


Figura 74 - Furação para aplicação do isolante em pavimento a revestir com soalho

A aplicação do produto como solução de isolamento térmico, permitiu poupanças significativas atendendo a que não foi necessário remover a base de pavimento já executada, tendo apenas sido necessário fazer a furação para introdução pneumática da mistura isolante.

Um outro edifício alvo de ensaio *in situ* foi um edifício habitacional de construção gaioleira, do início do séc. XX, na Rua Marquês de Sá da Bandeira 110 em Lisboa (Figura 75).



Figura 75 - Edifício residencial de estrutura gaioleira alvo da reabilitação com a mistura em estudo

Ao nível dos pavimentos apenas foi necessário remover o remate do rodapé para permitir a introdução pneumática da mistura em estudo, junto a duas paredes laterais, perpendiculares à orientação dos barrotez do pavimento (Figura 76).



Figura 76 - Aplicação do isolante sem desmontagem do soalho, através da desmontagem parcial do rodapé da divisão

Foi ainda realizada a introdução pneumática num teto de tabique e estuque com 100 anos, com alguma degradação visível, tendo-se sido feito o preenchimento dos espaços entre vigas. Atendendo à densidade da solução otimizada (260 kg/m^3), houve um aumento de 26 kg/m^2 (10 cm de produto aplicado), não tendo havido cedências da estrutura existente (Figura 77).

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



Figura 77 - Aplicação da mistura em estudo em tetos trabalhados de tabique e estuque

Numa moradia unifamiliar na Rua 25 de abril 14 na Corredora - Sesimbra, foi feita a aplicação da solução a granel num anexo como solução de isolamento entre vigas de betão armado. A preparação do suporte foi executada com painéis de gesso cartonado do interior, sendo posteriormente aplicada a mistura em estudo e selada com manta de espuma de polietileno expandido e película de alumínio como reforço de impermeabilização (Figura 78).



Figura 78 - Aplicação da mistura em estudo entre vigas de betão armado selada com manta de PEF aluminizada como reforço de impermeabilização

4 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

4.1 - Considerações gerais

O trabalho realizado incidiu na avaliação experimental, em laboratório e *in situ*, do comportamento físico da mistura isolante de cortiça e borracha, bem como a aferição da melhor formulação da mistura para otimização térmica, nas suas proporções de borracha, cortiça e ar, bem como as diferentes granulometrias.

Para aferir esse comportamento, procedeu-se à realização de ensaios físicos, tais como a aferição do coeficiente de condutibilidade térmica, bem como as diferentes formas possíveis de introduzir o produto nos espaços existentes nos elementos construtivos da construção civil.

Conseguiu-se após experimentação de diversas formulações identificar uma formulação adequada, isolante, com um $\lambda = 0,059 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ confirmada pelo LNEC (Anexo I).

A identificação da solução otimizada foi maximizada após diversos testes de introdução pneumática:

- no simulador de elementos verticais;
- no simulador de elementos horizontais, quer pelo andar superior através de rodapés, quer pela face inferior de estuque, simulando a reabilitação térmica sem demolições;
- em três edifícios com soluções construtivas diferentes.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

Tabela 12 - Comparativo da solução em estudo com os isolamentos térmicos convencionais

Aumento de paredes com isolamento de 7 cm		Custos €/m2				
Fases	Solução em estudo	XPS	EPS	Lã de Rocha	PUR	ETICS
Demolição	n/a	6	6	6	6	6
Fornecimento e aplicação de isolante	37,5	20,94	18,46	11,66	11,93	59,47
Construção do pano novo de alvenaria em tijolo de 7cm	n/a	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22
Estuque	n/a	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37
Pintura	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95
Execução de rodapés com pintura	n/a	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92
Execução de sancas com pintura	n/a	10,36	10,36	10,36	10,36	10,36
Afinação de encontros de vãos de portas	n/a	5	5	5	5	5
Limpeza de obra	0,15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Tempo da obra	refª.	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais
total	42,6	79,26	76,78	69,98	70,25	117,79
poupança %		46%	45%	39%	39%	64%

Pavimentos de madeira		Custos €/m2				
Fases	Solução em estudo	XPS	EPS	Lã de Rocha	PUR	ETICS
Demolição do pavimento	n/a	7	7	7	7	7
Demolição de rodapés	2	2	2	2	2	2
Fornecimento e aplicação de isolante	37,5	20,94	18,46	33,7	11,93	59,47
Fornecimento e recolocação de soalho	n/a	60	60	60	60	60
Recolocação de rodapés com envernizamento	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42
Afagamento	n/a	20	20	20	20	20
Envernizamento	n/a	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66
Limpeza de obra	0,15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Tempo da obra	refª.	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais
total	53,07	137,52	135,04	150,28	128,51	176,05
poupança %		61%	61%	65%	59%	70%

Tetos em estuque		Custos €/m2				
Fases	Solução em estudo	XPS	EPS	Lã de Rocha	PUR	ETICS
Demolição do teto	n/a	6,31	6,31	6,31	6,31	6,31
Fornecimento e aplicação de isolante	37,5	20,94	18,46	7,3	11,93	59,47
Recolocação de teto	n/a	26,99	26,99	26,99	26,99	26,99
Recolocação de sancas	n/a	10,36	10,36	10,36	10,36	10,36
Pintura do tecto	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
Limpeza de obra	0,15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Tempo da obra	refª.	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais	10 x mais
total	39,83	68,28	65,8	54,64	59,27	106,81
poupança %		42%	39%	27%	33%	63%

Na Tabela 12 apresenta-se um estudo comparativo entre os custos da solução em estudo e as soluções tradicionais, bem como os faseamentos inerente à operação de isolamento em paredes, pavimentos de madeira e tetos em estuque.

Como se pode constatar, além da redução de custos inerentes à operação, o fato da aplicação da mistura nos três cenários referidos ser muito menos intrusiva,

implica um tempo de execução de cerca de 10 vezes menos tempo que uma solução convencional, além de ser uma solução muito mais limpa, especialmente relevante em cenário de reabilitação de edifícios ocupados.

A solução de isolamento térmico estudada, não tem um concorrente direto na área da reabilitação, atendendo a que não necessita de demolições no interior das paredes, pavimento e tetos a reabilitar. Quando comparada com as soluções exteriores, é muito menos intrusiva arquitetonicamente que as soluções de *ETICS* referidas anteriormente.

Ao nível dos pavimentos e tetos, em especial no património histórico, apresenta-se de entre as soluções concorrentes estudadas no mercado como a única solução possível de utilizar para a melhoria térmica sem destruir os elementos construídos.

4.2 - Considerações finais

Com a presente dissertação responderam-se às questões colocadas no Capítulo 1:

R1. Foi selecionada uma formulação com percentagens de cortiça, borracha e ar que maximizam a eficácia da mistura ao nível da melhoria da condutibilidade térmica total da solução, previamente selecionada na célula térmica e posteriormente comprovada pelo LNEC conforme relatório de ensaio obtido (Anexo I), quer para elementos verticais (paredes), quer para elementos horizontais (pavimentos e tetos);

R2. Foi selecionada a granulometria de cada componente que maximizou a eficácia da mistura ao nível da condutibilidade térmica total da solução, tendo a afinação da formulação seguido a mesma tramitação da seleção referida em R1;

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

R3. Foi selecionada a granulometria de cada componente que otimizou a eficiência da introdução da solução nos espaços de forma pneumática, através de ensaios de introdução em simuladores no laboratório e *in situ*, conforme descrito. Foi também conseguido o desenvolvimento do mecanismo de introdução pneumático da formulação nos espaços a intervencionar, quer ao nível da pistola e acessórios, quer ao nível da técnica de aplicação da mistura nos espaços;

R4. Foi estudado o melhor esquema geométrico de projeção da solução com o objetivo de maximizar a introdução da solução nos espaços existentes:

R4.1. quer ao nível dos pavimentos de madeira com soalho tradicional de madeira da face superior e estuque/estafe na face inferior com aplicação pela face inferior;

R4.2. quer ao nível dos pavimentos de madeira com soalho tradicional de madeira da face superior e estuque/estafe na face inferior com aplicação pela face superior,

sendo resultado um perfil homogéneo de produto introduzido e comprovada a sua eficácia e eficiência por recurso à termografia, com indução prévia de condições adversas de frio numa das zonas do simulador.

4.3 - Propostas de desenvolvimentos futuros

O estudo da formulação de cortiça e borracha e a sua aplicabilidade possuem diversas outras características cujo estudo não se encontra concluído nesta dissertação, pelo que se podem desenvolver novos e mais diversos trabalhos, no domínio da investigação experimental ou laboratorial e científica.

Para futuros trabalhos, que tenham o objetivo de dar continuidade à presente investigação, propõe-se:

- A adição de materiais intumescentes que visem a melhoria da resistência ao fogo das partículas de borracha, que pela sua natureza são combustíveis;
- O estudo de acessórios que visem a otimização da aplicação da solução nos pavimentos, coberturas e paredes verticais;
- A quantificação do impacto que a solução tem sob o ponto de vista de atenuação acústica quer nos elementos de parede verticais, quer nos elementos horizontais, quer nas argamassas de regularização;
- A avaliação da condutibilidade térmica de betonilhas de regularização incorporando diferentes percentagens da formulação de borracha e cortiça e o respetivo comportamento com diferentes espessuras;
- O estudo de casos com aplicação do produto *in situ*, identificando as melhorias da solução em casos reais;
- Estudar o eventual impacto de compostos orgânicos voláteis do granulado de borracha no interior das edificações durante a estação de aquecimento, ou quando possam ocorrer situações de ganhos térmicos através dos elementos construtivos intervencionados.

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações
novas e existentes

Referências bibliográficas

- António Enes Morais, Lda. (2013). Retrieved from
<https://abmoliveira.wordpress.com/tag/molduras-gesso/>
- APA. (2017). www.apambiente.pt/. Retrieved February 19, 2017, from
<https://www.apambiente.pt/>
- APCOR. (n.d.). APCOR. Retrieved February 1, 2017, from <http://www.apcor.pt/>
- Archiexpo. (n.d.). Retrieved September 20, 2017, from
<http://www.archiexpo.com/pt/prod/europerfil/product-50760-1684096.html>
- Carlos A. Pina Santos; L Matias. (2008). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios ITE 50*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
[https://doi.org/ITE 50](https://doi.org/ITE%2050)
- CE. (2014). Lista de resíduos em conformidade com a Diretiva 2008/ 98/ CE do Parlamento Europeu e do Conselho - (2014/ 955/ UE).
- Danosa/Eurofoam. (2017). Retrieved September 20, 2017, from <http://www.eurofoam.pt/>
- Departamento Engenharia Química - Universidade Nova de Lisboa - FCT. (n.d.). Espumas de poliuretano. Retrieved from
<https://www.dq.fct.unl.pt/sites/www.dq.fct.unl.pt/files/poliuretano.pdf>
- Documentário HGTV. (2015). Retrieved from
https://www.youtube.com/watch?v=K2ns7mXG_-E
- EC. Council Directive 1999/31/EC of the 26 April 1999 on the landfill of waste, 182 Official Journal of the European Communities § (1999). <https://doi.org/10.1039/ap9842100196>
- Estado Português. (2013). Decreto Lei 118_2013. Portugal: Estado Português.
- Gil, L. (2012). Cortiça. *Ciência E Engenharia de Materiais de Construção*, 663–716.
- Giunta D'albani, A. W., De Kluiver, L. L., De Korte, A. C. J., Van Herpen, R. A. P., Weewer, R., & Brouwers, H. J. H. (2017). *Mass loss and flammability of insulation materials used in sandwich panels during the pre-flashover phase of fire*.
<https://doi.org/10.1002/fam>
- Gonçalves, M. (2017). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Gravit, M., Kuleshin, A., Khametgalieva, E., & Karakozova, I. (2017). Technical characteristics of rigid sprayed PUR and PIR foams used in construction industry.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012187>
- <http://autos.culturamix.com>. (2017). Retrieved September 4, 2017, from
<http://autos.culturamix.com>

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes

- <https://lista.mercadolivre.com.br>. (2017). Retrieved September 4, 2017, from <https://lista.mercadolivre.com.br>
- INE, & LNEC. (2011). *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*. <https://doi.org/978-989-25-0246-5>
- Isocor. (2016). Retrieved September 20, 2017, from <http://www.isocor.pt/produtos>
- Isolaracustica. (n.d.). Retrieved September 10, 2017, from <http://www.isolaracustica.com>
- Isopor. (2017). Isopor. Retrieved July 3, 2017, from <https://www.mundoisopor.com.br/>
- Lamas J.M. (2003). *Manual de Restauro e Recuperação/Guia do Construtor - Zona Antiga da Cidade da Horta*. (S. Horta: Fergráfica Artes Gráficas, Ed.).
- Lopes, G. (2011). *Avaliação do Ciclo de Vida de dois materiais de isolamento utilizados na construção civil: o poliestireno expandido e o aglomerado de cortiça expandida*. (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Ed.). Porto.
- Maier, C., & Haber, T. (1998). *Polypropylene : the Definitive User's Guide and Databook*. Elsevier. Retrieved from https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=pw_I2D0zkDYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=%22expanded+polypropylene%22+f oam+sheet&ots=lln591YJbf&sig=E-Q1RKNBsrJXZb2R3hcAU8_wv4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Mendes, S. T. de O. (2013). *Desenvolvimento de formas farmacêuticas de ação tópica com potencial antifúngico derivadas da cortiça*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10316/31048>
- Metalica. (n.d.). Retrieved September 10, 2017, from <http://wwwo.metalica.com.br>
- Palácio do Campo das Princesas - Estado do Pernambuco, B. (2014). Palácio do Campo das Princesas, Brasil. Retrieved from <http://www.pe.gov.br/>
- Parlamento Europeu. (2010). DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). *Jornal Oficial Da União Europeia*, 13–35.
- PIMA. (2018). Retrieved from <http://www.polyiso.org>
- Plastimar. (2011). Plastimar. Retrieved September 23, 2017, from <http://www.plastimar.pt/index.php?id=29>
- Rodgers, B., & Waddell, W. (2013). Tire Engineering. In *The Science and Technology of Rubber* (pp. 653–695). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394584-6.00014-5>
- Rua Marquês de Sá da Bandeira 110. (2016).
- SouthZEB, U. T. do C.-. (2014). South ZEB - Towards Near Zero Energy Buildings on South European Countries. Retrieved September 21, 2017, from <http://www.southzeb.eu/pt-pt/training/>
- Valor Pneu. (2015). *Relatório & Contas 2015*. Retrieved from

Referências bibliográficas

<http://www.valorpneu.pt/Cache/binImagens/XPQ032QXX4327SQcms5QzHYZKU.pdf>
www.greenbuildingadvisor.com. (2010). Retrieved September 4, 2017, from
<http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musings/when-sunshine-drives-moisture-walls>

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações
novas e existentes



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UIT - Unidade de Isolantes Térmicos

Boletim n.º	0087/2015 – UIT
Pág.	1/3
Processo n.º	0803/1301/11484
Pedido n.º	29/15

Visto

Dr. Ricardo Vaz
Chefe do NRJ

BOLETIM DE ENSAIO

Barratérmica, Lda.
Calçada da Consolação,
Nº 30,
7580-194 Alcácer do Sal

GRANULADO DE CORTIÇA E DE BORRACHA *THERMOBUILD* DETERMINAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

1 | Identificação

Referência do Cliente: --
Identificação da(s) amostra(s): 29/15-1
Descrição da(s) amostra(s): Granulado de cortiça e de borracha *Thermobuild*
Data de receção da(s) amostra(s): 2015-10-19
Data do ensaio: 2015-10-19/23

2 | Norma/Especificação de ensaio

Os ensaios de determinação da condutibilidade térmica foram realizados de acordo com o especificado na norma europeia EN 12667:2001-en – *Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance*.

A determinação da massa volúmica aparente dos provetes ensaiados, nas condições do presente ensaio, não faz parte do domínio de acreditação da UIT. A massa volúmica aparente foi determinada de acordo com os princípios gerais da norma europeia EN 1602:2013-en, após condicionamento dos provetes no ambiente adiante especificado.

Os ensaios incidiram sobre dois provetes com as seguintes dimensões nominais: comprimento e largura úteis iguais a 435 mm e espessuras de ensaio indicadas no quadro 1 (vd. 4).

Os provetes foram confinados lateralmente por um aro de poliestireno expandido extrudido (XPS), com dimensões faciais nominais exteriores de 500 mm x 500 mm, e suportados inferiormente por um velo poroso não tecido de fibra de vidro.

Os provetes foram ensaiados à temperatura média de referência de $(10,0 \pm 0,3)$ °C tendo sido, previamente, submetidos a secagem em estufa ventilada à temperatura de (70 ± 2) °C. Após secagem, e imediatamente antes de ensaio, os provetes foram protegidos com um filme transparente de polietileno, com vista a evitar a alteração do seu teor de água.

Os ensaios de determinação da condutibilidade térmica decorreram num ambiente caracterizado por uma temperatura de (23 ± 2) °C e uma humidade relativa de $(50 \pm 5)\%$.

LNEC DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
Av. do Brasil 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL - tel. (+351) 21 844 30 00 - fax: (+351) 21 844 30 20 - lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt



Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Só a indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas em invólucros, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

L0109
Ensaios

Solução de Isolamento Térmico com base em cortiça e borracha para edificações novas e existentes



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UIT - Unidade de Isolantes Térmicos

Boletim n.º 0087/2015 – UIT
Pág. 2/3
Processo n.º 0603/1301/11484
Pedido n.º 29/15

Visto
M. Rosário Veiga
Chefe do NRI

BOLETIM DE ENSAIO

3 | Procedimento de amostragem

Amostragem efetuada pela entidade requisitante.

A amostra, aquando da receção na UIT, apresentava-se acondicionada num saco de plástico opaco.

A amostra enviada para ensaio era constituída por um saco de granulado de cortiça e de borracha de designação comercial **Thermobuild**, com volume nominal de 0,05 m³, para aplicação em lajes tradicionais, coberturas e paredes duplas de alvenaria.

4 | Resultados dos ensaios

As espessuras dos provetes ensaiados e os resultados dos ensaios são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 — Valores individuais e médios obtidos nos ensaios de determinação da condutibilidade térmica de provetes de granulado de cortiça e de borracha **Thermobuild**

**Provetes submetidos a ensaio no estado seco
(após secagem em estufa ventilada à temperatura de 70±2 °C).**

Amostra	Provete	Características do provete			Condições de ensaio					Resultados dos ensaios
		Espessura de ensaio (x10 ⁻³ m)	Massa volumica aparente ⁷ após condicionamento e estabilização à temperatura de (70±2) °C (kg/m ³)	Teor de água inicial (kg/kg)	Direção e sentido do fluxo	Temp ^a média (°C)	Queda de temp ^a (°C)	Densidade de fluxo de calor (W/m ²)	Variação relativa de massa durante o ensaio (kg/kg)	Condutibilidade térmica $\lambda_{0,05}$ (W/m. °C)
29/15-1	A1	82,2	257,0	0,000	Vertical, ascendente	10,0	10,8	7,789	0,001	0,0595
	A2	82,4	263,2	0,000		10,1	10,7	7,606	0,001	0,0586
Média	---	---	260	---	---	10,1	---	---	---	0,0591

* - Aplicação manual dos grânulos

LNEC DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS - Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
Av. do Brasil 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL - tel. (+351) 21 844 30 00 - fax: (+351) 21 844 30 20 - lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são singulares transição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os testes ensaiados.

LNEC-2040



Visto


 M. Rosario Veiga
 Chefe do NRI

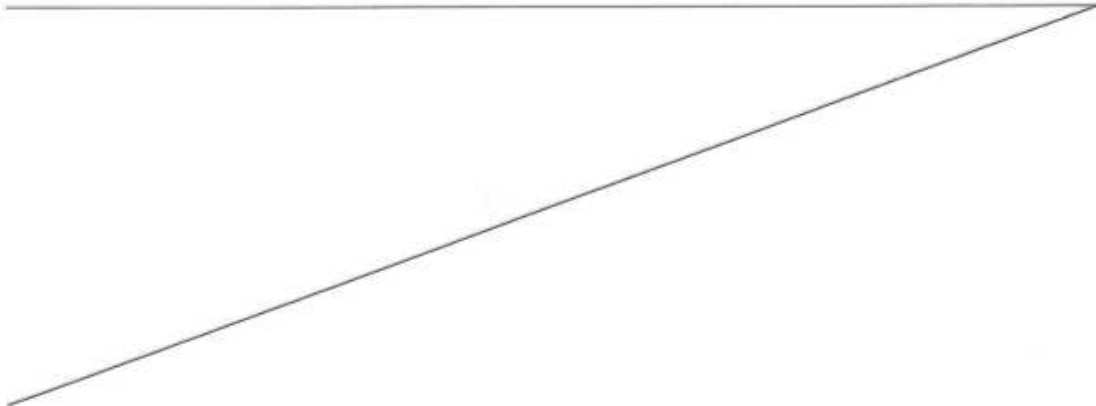
BOLETIM DE ENSAIO

5 | Observações

Os ensaios de determinação da condutibilidade térmica foram realizados num equipamento fluximétrico marca TAURUS, modelo TCA 500 P.

O equipamento fluximétrico é verificado periodicamente para a temperatura média de ensaio de 10 °C por técnicos da UIT. Utiliza-se um material de referência do *Institute for Reference Materials and Measurements* (IRMM), identificado por "IRMM-440. Resin Bonded Glass Fibre Board" ($\lambda = 0,0305 \text{ W/m}\cdot\text{C}$ a 10 °C) cuja curva de calibração se encontra em arquivo na UIT. A última verificação do equipamento fluximétrico ocorreu em 2015-09-24.

As determinações da condutibilidade térmica do produto *Thermobuild* apresentadas no presente Boletim de Ensaio ($\lambda_{10,0\%}$) dizem apenas respeito aos dois provetes identificados na secção 4, aplicados manualmente e ensaiados no estado seco. No âmbito da marcação CE deste produto será requerida a definição de um valor declarado (λ_D) daquele parâmetro. Para a definição do valor de cálculo representativo das aplicações previstas para o produto poderá ser requerida a correção do valor de $\lambda_{10,0\%}$ em função do teor de água de equilíbrio em ambientes definidos.



Colaboração


Manuel V. C. Sadio

Lisboa, LNEC, 23 de outubro de 2015

O TÉCNICO RESPONSÁVEL


 Cátia Alves

O COORDENADOR DA UIT


 C. A. Pina dos Santos

LNEC DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
 Av. do Brasil 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL - tel. (+351) 21 844 30 00 - fax: (+351) 21 844 30 20 - lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Sob a indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas em ensaios, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

