

Stephanie dos Santos Capelas

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS INSTALADAS EM CÂMARA CLIMÁTICA

IMPLEMENTATION OF A MODEL TO SIMULATE THE THERMAL BEHAVIOR
OF ROOFS INSTALLED ON CLIMATIC CHAMBER

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões e pelo Professor Doutor António Tadeu

Setembro de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Stephanie dos Santos Capelas

Implementação de um modelo para simular o comportamento térmico de coberturas instaladas em câmara climática

IMPLEMENTATION OF A MODEL TO SIMULATE THE THERMAL BEHAVIOR OF ROOFS INSTALLED ON CLIMATIC CHAMBER

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões e pelo Professor Doutor António Tadeu.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Com a colaboração:



Coimbra, 8 de setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

O terminar desta etapa do meu percurso académico é marcado por diversas pessoas às quais pretendo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus orientadores, professor Nuno Simões e professor António Tadeu. Em especial, ao professor Nuno por toda aprendizagem transmitida. A sua disponibilidade e paciência foram fundamentais ao longo deste processo.

A todos os funcionários do ITeCons que me ajudaram de uma maneira ou de outra, em especial à Eliana Silva pela disponibilidade e tempo despendido.

Aos meus amigos, Eugénio, Roque, Mariana, Lígia, Célia e Rosário, que me ajudaram a descomplicar e acreditaram que eu ia dar o melhor de mim.

Ao meu namorado, André Areias, pelo apoio incondicional. A tua compreensão e confiança foram essenciais.

Aos meus pais e ao meu irmão que me ensinaram a dar sempre o melhor de mim. Obrigada por todo o carinho e força transmitida.

O presente trabalho teve o apoio do Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através dos projetos com as referências POCI-01-0247-FEDER- 003393 (green URBANLIVING), na componente do estudo experimental da cobertura, do projeto POCI-01-0145-FEDER-016852 (GRLF), na componente da implementação de modelos e do projeto POCI-01-0247-FEDER-003408 (Slimframe PV & Cork Skin), na componente do estudo da solução com acabamento a aglomerado de cortiça expandida.

RESUMO

O uso elevado de energia por parte dos edifícios surge como um dos problemas mais relevantes dos últimos tempos, surgindo a necessidade do estudo do comportamento térmico dos edifícios que depende muito das soluções que compõem a sua envolvente.

A cobertura é um dos elementos do edifício com maiores flutuações térmicas. O isolamento térmico é um dos componentes com maior impacto na redução destas flutuações, sendo de elevada importância conhecer a sua natureza e as suas propriedades. Estes materiais são relevantes pela resistência térmica que oferecem, mas também pelo seu comportamento quando sujeitos a um regime transiente, já que contribuem significativamente no atraso térmico.

Um exemplo de uma solução que pode apresentar um comportamento térmico bastante dinâmico é a cobertura verde porque além das propriedades dos materiais que a compõem têm o efeito do substrato e da vegetação. O comportamento destas camadas depende de diversos fatores, nomeadamente do teor de humidade, da densidade da vegetação, etc. O desenvolvimento e estudo deste tipo de soluções deve ser, por isso, alvo de investigação.

A motivação do presente trabalho prende-se com a avaliação do uso de aglomerado de cortiça expandida em soluções de coberturas verdes e da necessidade de implementar modelos que permitam a sua simulação em condições específicas de uso.

No presente trabalho, a implementação e validação dos modelos de simulação foi realizada para os regimes permanente e transiente. Após a validação dos modelos através da comparação dos resultados obtidos nas simulações com as medições efetuadas numa campanha experimental efetua-se uma análise de três casos de estudo de modo a perceber as alterações ocorridas nas trocas de calor consoante os modelos se encontrem secos ou saturados, adicionando-se uma camada de substrato em dois casos de estudo, com propriedades diferentes.

Os fluxos de calor ao longo do modelo com aglomerado de cortiça expandida aumenta cerca de 23%, quando saturado. Já os modelos com substrato têm fluxos de calor com um aumento entre os 30% e os 35%, quando saturados.

Palavras-chave: Comportamento térmico, cobertura verde, aglomerado de cortiça expandida, isolamento térmico, regime permanente, regime transiente.

ABSTRACT

The high energy use by buildings reveals itself as one of the most relevant problems of recent times, arising the need to study the thermal behavior of buildings that depends a lot on the solutions considered for its surroundings.

The roof is one of the elements of the building with greater thermal fluctuations. Thermal insulation is one of the components that has the greatest impact in reducing these fluctuations, and it is of great importance to know its nature and properties. These materials are relevant for the thermal resistance they present, but also for their behavior when subjected to a transient state, since they contribute significantly to the thermal delay.

An example of a solution that can present a very dynamic thermal behavior is the green roof because in addition to the properties of the materials that compose it have the effect of the substrate and the vegetation. The behavior of these layers depends on several factors, namely the moisture content, the density of the vegetation, etc. The development and study of such solutions should therefore be the subject of research.

The motivation of the present work is to evaluate the use of expanded cork agglomerates in green roofing solutions and the need to implement models that allow its simulation under specific conditions of use.

In the present work, the implementation and validation of the simulation models was performed for the permanent and transient states. After the validation of the models through the comparison of the results obtained in the simulations with the measurements achieved by an experimental campaign. An analysis of three case studies is performed in order to perceive the changes occurred in the heat exchanges according to whether the models are dry or saturated, by adding a layer of substrate in two case studies with different properties.

The heat fluxes along the model with expanded cork agglomerate increases about 23% when saturated. Already the substrate models have heat flows with an increase between 30% and 35% when saturated.

Keywords: Thermal behavior, green roof, insulation cork board, thermal insulation, steady state, transient state.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	vii
Índice de Gráficos.....	viii
Abreviaturas.....	x
Simbologia.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Estrutura da dissertação	8
2 Metodologia de validação dos modelos	10
2.1 Validação do modelo 1D (em regime transiente)	10
2.1.1. Software BISTRA	10
2.1.1 Descrição do modelo	11
2.1.2 Condições de fronteira.....	12
2.1.3 Caso 1 – Situação de inverno sem molhagem	12
2.1.4 Caso 2 – Situação de inverno com molhagem.....	13
2.1.5 Condutâncias térmicas	14
2.2 Implementação de um modelo 2D do sistema de cobertura	15
2.2.1 Descrição do modelo	15
2.2.2 Simulação em regime permanente.....	16
2.2.2.1 Condições de fronteira	17
2.2.2.2 Resistências térmicas superficiais	20
2.2.2.3 Análise de sensibilidade	20

2.3	Simulação em regime transiente	21
2.3.1	Condições de fronteira.....	21
2.3.2	Variações de temperatura no modelo da cobertura	21
2.3.3	Condutâncias térmicas	23
3	Casos de estudo	24
3.1.1	Modelo com aglomerado de cortiça seco e saturado.....	24
3.1.2	Modelo com substrato do tipo roof II seco e saturado	25
3.1.3	Modelo com substrato do tipo roof IV seco e saturado.....	25
4	Resultados	27
4.1	Validação do modelo 1D	27
4.2	Validação do modelo 2D	29
4.2.1	Fluxos de calor (regime permanente).....	29
4.2.2	Análise de sensibilidade	30
4.2.3	Comparação entre medições e simulações	31
4.3	Casos de estudo (Modelos em estado seco e saturado).....	35
4.3.1	Comparação entre casos de estudo	36
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	38
5.1	Conclusões	38
5.2	Trabalhos futuros	39
	Referências Bibliográficas.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de cobertura extensiva. [6].....	3
Figura 1.2 – Exemplo de cobertura intensiva. [6]	3
Figura 1.3 – Principais componentes duma cobertura verde.....	5
Figura 1.4 – Metodologia proposta.....	8
Figura 2.1 – Corte da parede com representação dos pontos de medição representados a cor de laranja.	11
Figura 2.2 - Condições de fronteira do modelo de simulação 1D.	12
Figura 2.3 – Representação em planta do modelo estudado com representação da localização dos alinhamentos de termopares através das células a laranja (alinhamentos 8.1, 8.2 e 2.1)...	16
Figura 2.4 – Representação das placas centrais do modelo 2D apresentado.....	16
Figura 2.5 – Condições de fronteira da solução inicial.	17
Figura 2.6 – Condições de fronteira da solução 1.	18
Figura 2.7 – Condições de fronteira da solução 2.	18
Figura 2.8 – Condições de fronteira da solução 3.	19
Figura 2.9 – Condições de fronteira da solução 4.	19
Figura 2.10 – Condições de fronteira para análise de sensibilidade; a) pormenorização de caixa de ar criada por não haver um contacto perfeito entre as placas e a laje; b) pormenorização da zona de passagem do tubo de drenagem das águas pluviais.	20
Figura 2.11 – Condições de fronteira do modelo 2D a utilizar na simulação em regime transiente.....	21
Figura 3.1 – Variação da condutibilidade térmica do aglomerado de cortiça de média densidade (MD) em função do teor em água. [11]	24
Figura 3.2 – Condições de fronteira do modelo com isolamento MD.	25
Figura 3.3 – Condições de fronteira do modelo com substrato do tipo roof II.	25
Figura 3.4 - Condições de fronteira do modelo com substrato do tipo roof IV.....	26

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Resumo dos benefícios das coberturas verdes.....	2
Quadro 1.2 – Descrição dos principais componentes de uma cobertura verde [2]	4
Quadro 1.3 – Resumo de propriedades do ICB standard e da MD. (Adaptado) [11].....	6
Quadro 1.4 – Comparação de abordagem tradicional de coberturas verdes e a solução abordada na presente dissertação.	7
Quadro 2.1 – Propriedades dos materiais constituintes do sistema multicamada.	11
Quadro 2.2 - Valores de condutâncias térmicas para modelo sem molhagem (caso 1) e modelo com molhagem (caso 2).....	14
Quadro 2.3 – Propriedades dos materiais constituintes do modelo.....	15
Quadro 2.4 – Propriedades do material do isolamento lateral e do material que constitui a câmara climática.	19
Quadro 2.5 – Valores de resistências térmicas superficiais (Adaptado) [15].....	20
Quadro 2.6 - Condutâncias térmicas do ambiente interior e exterior na situação de inverno e verão.	23
Quadro 3.1 – Propriedades dos materiais que constituem as camadas dos três casos de estudo.	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Caso 1: variação de temperatura no ambiente interior (laranja) e no ambiente exterior (azul) ao longo de 96 horas para a situação de inverno, sem simulação de molhagem.	13
Gráfico 2.2 – Caso 2: variação de temperatura no ambiente interior (laranja) e no ambiente exterior (azul) ao longo de 96 horas para a situação de inverno, com molhagem.....	13
Gráfico 2.3 – Caso 1: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de inverno.	22
Gráfico 2.4 – Caso 2: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de inverno.	22
Gráfico 2.5 – Caso 3: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de verão.	23
Gráfico 4.1 – Caso 1: variação de temperatura nos pontos ao longo da parede num período de 24 horas, numa situação de inverno sem molhagem. Medições efetuadas no provete (tracejado) e modelação no programa (linha contínua).	28
Gráfico 4.2 – Caso 2: variação de temperatura nos pontos ao longo da parede num período de 72 horas, numa situação de inverno com molhagem. Medições efetuadas no provete (tracejado) e modelação no programa (linha contínua).	28
Gráfico 4.3 – Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução inicial.	30
Gráfico 4.4 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 1.	30
Gráfico 4.5 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 2.	30
Gráfico 4.6 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 3.	30
Gráfico 4.7 – Análise de sensibilidade: comparação de fluxos de calor entre solução 2, solução considerando o espaçamento entre laje e ICB e a solução com tubo de drenagem.....	31
Gráfico 4.8 – Variação da temperatura nos pontos correspondentes aos três alinhamentos do modelo 2D, na situação de inverno.	32
Gráfico 4.9 – Variação da temperatura nos pontos correspondentes aos três alinhamentos do modelo 2, na situação de verão.....	32
Gráfico 4.10 – Caso 1: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de inverno (variação dos 0°C aos 15°C).	33
Gráfico 4.11 – Caso 2: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de inverno (variação dos 5°C aos 15°C).	34
Gráfico 4.12 – Caso 3: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de verão (variação dos 10°C aos 35°C).....	34
Gráfico 4.13 – Fluxos de calor ao longo do modelo com MD seco e saturado.....	35

Gráfico 4.14 – Fluxos de calor ao longo do modelo com substrato do tipo roof II seco e saturado.	36
Gráfico 4.15 – Fluxos de calor ao longo do modelo com substrato do tipo roof IV seco e saturado.....	36
Gráfico 4.16 – Fluxos de calor ao longo dos modelos correspondentes aos três casos de estudo (seco).	37
Gráfico 4.17 – Fluxos de calor ao longo dos modelos correspondentes aos três casos de estudo (saturado).....	37

ABREVIATURAS

IGRA - *International Green Roof Association*

XPS - Poliestireno extrudido

EPS - Poliestireno expandido

PU - Espuma de poliuretano

ICB - Aglomerado de cortiça expandida

FAUP - Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

UC - Universidade de Coimbra

MD - Aglomerado de cortiça de média densidade

OSB - *Oriented Strand Board*

LBLN - *Lawrence Berkeley National Laboratory*

SIMBOLOGIA

ρ - Densidade (kg. m^{-3})

λ - Condutibilidade térmica ($\text{W. m}^{-1}. ^\circ\text{C}^{-1}$)

Wp - Absorção de água de curta duração por imersão parcial (Kg. m^{-2})

τ - Resistência ao corte (kPa)

c - Calor específico ($\text{J. kg}^{-1}. ^\circ\text{C}^{-1}$)

Q - Fluxo de calor (W. m^{-2})

h_i - Condutância térmica do ambiente interior ($\text{W. m}^{-2}. ^\circ\text{C}^{-1}$)

h_e - Condutância térmica do ambiente exterior ($\text{W. m}^{-2}. ^\circ\text{C}^{-1}$)

θ_i - Temperatura do ar no ambiente interior ($^\circ\text{C}$)

θ_{si} - Temperatura à superfície do OSB ($^\circ\text{C}$)

θ_e - Temperatura do ar no ambiente exterior ($^\circ\text{C}$)

θ_{se} - Temperatura à superfície do MD ($^\circ\text{C}$)

R_{se} - Resistência superficial exterior ($\text{m}^2. ^\circ\text{C}. \text{W}^{-1}$)

R_{si} - Resistência superficial interior ($\text{m}^2. ^\circ\text{C}. \text{W}^{-1}$)

R_s - Resistência térmica superficial ($\text{m}^2. ^\circ\text{C}. \text{W}^{-1}$)

U - Coeficiente de transmissão térmica ($\text{W. m}^{-2}. ^\circ\text{C}^{-1}$)

1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo faz-se uma abordagem geral ao tema que motivou o estudo realizado ao longo da dissertação, enumeram-se os principais objetivos a cumprir e apresenta-se uma breve descrição da estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento e motivação

O rápido crescimento económico e consequentemente o aumento da urbanização resultou no aparecimento de diversos problemas ambientais como cheias, a diminuição da qualidade da água e do ar, o efeito da ilha de calor e o elevado uso de energia por parte dos edifícios. ([1],[2])

Na Europa, o setor da construção representa cerca de 40% do consumo total de energia e 36% das emissões globais de CO₂. [3] Devido ao consumo elevado de energia e recursos dos edifícios surgem várias abordagens sustentáveis, tecnologias verdes e mais eficientes em termos energéticos. Neste contexto, destacam-se as coberturas verdes que são frequentemente identificadas como uma importante estratégia para tornar os edifícios mais sustentáveis. [4]

Uma cobertura verde é composta por diversas camadas com características específicas para garantir um comportamento adequado. São construídas por diversos motivos, espaços para uso social, por opção arquitetónica, para aumentar o valor da propriedade ou para obtenção de benefícios ambientais específicos, como por exemplo a retenção de águas pluviais.

A vegetação de uma cobertura verde depende do uso de substratos específicos, que é o meio de crescimento das plantas, que pode ir desde os 50 mm até mais de um metro de profundidade, dependendo da capacidade de carga da cobertura e dos objetivos do projeto. [5]

O uso de coberturas verdes é motivado pelos diversos benefícios que apresenta. Algumas das suas vantagens são diretas para o edifício, outras apenas se forem implementadas em escalas maiores, como bairros ou cidades, com benefícios à escala urbana. [3]

Podem atuar sobre várias áreas simultaneamente, no entanto, distinguem-se três áreas principais: o meio-ambiente, a economia e a estética. No Quadro 1.1 apresentam-se os principais benefícios associados à instalação de coberturas verdes. [3]

Quadro 1.1 – Resumo dos benefícios das coberturas verdes.

Benefícios económicos	Benefícios ambientais	Benefícios estéticos e sociais
Redução do consumo de energia [4]	Mitigação do efeito “ilha de calor” urbano [4]	
Aumento do valor da propriedade [5]	Mitigação da poluição do ar [4] Redução do Ruído [4] Gestão da água pluviais [4] Melhoria da qualidade da água [2] Criação, preservação de habitats e biodiversidade ecológica [4]	Criação de espaços recreativos e aumento de espaços verdes [5]

A cobertura é a componente do edifício com maiores flutuações de temperatura ao longo do tempo, apresentando um comportamento térmico bastante dinâmico e muito dependente da solução que compõe a sua envolvente.

Apresentam-se de seguida os tipos de cobertura mais comuns, listando-se e descrevendo-se as principais camadas de uma cobertura verde comum. De acordo com a *International Green Roof Association* (IGRA) as coberturas verdes podem classificar-se em três tipos: coberturas intensivas, coberturas extensivas e coberturas semi-intensivas ou semi-extensivas. Esta classificação difere, principalmente, no tipo de utilização pretendida, na profundidade de solo e no tipo de vegetação utilizada. Descrevem-se de seguida cada uma delas.

Coberturas verdes extensivas

As coberturas verdes extensivas são leves e têm uma camada de substrato menor que 200 mm de profundidade. As necessidades de manutenção são mínimas, requerendo pouca quantidade de água e utilizam espécies de plantas de crescimento baixo, principalmente suculentas. ‘*ecoroofs*’ ou ‘*brown roof*’ são termos frequentemente utilizados para descrever este tipo de coberturas.

As coberturas que são projetadas de modo a aumentar a biodiversidade local, criando habitats e alimento para animais selvagens são conhecidas como *'biodiverse green roof'*. [5] Um exemplo deste tipo de cobertura poder ser observado na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Exemplo de cobertura extensiva. [6]

Coberturas verdes intensivas

As coberturas verdes intensivas são mais pesadas que as coberturas extensivas com uma camada de substrato mais profunda e com maior variedade de plantas. Tem maiores necessidades de manutenção e irrigação que as coberturas extensivas e são paisagens altamente projetadas, podendo ser colocadas diretamente em estruturas com elevada capacidade de carga, como por exemplo, parques de estacionamento. Como podem suportar maior carga, este tipo de cobertura pode ser acessível a pessoas. *'Roof gardens'* ou *'podium roofs'* são termos usados para descrever este tipo de cobertura. O termo *'Roof garden'* é usado para descrever coberturas com menor espaço usado para a vegetação e maior importância dada a estruturas como plataformas e passadiços, como se pode ver na Figura 1.2. [5]



Figura 1.2 – Exemplo de cobertura intensiva. [6]

As coberturas extensivas eram projetadas como estruturas leves e sem acesso ao público enquanto que as coberturas intensivas eram projetadas como espaços harmoniosos para as pessoas. Recentemente essa ideia foi alterada, não havendo fronteiras tão definidas e surgindo os termos coberturas semi-intensivas ou semi-extensivas, usados para descrever as características principais destas categorias. [5]

Estrutura de uma cobertura verde

Ao contrário das coberturas tradicionais, as coberturas verdes são mais complexas, apresentando diversas camadas necessárias para o seu bom funcionamento. Dependendo do tipo de cobertura e do projeto associado com o tipo de desempenho necessário e as cargas suportadas, normalmente uma cobertura verde apresenta os componentes apresentados no Quadro 1.2 e esquematizados na Figura 1.3, que podem variar ao nível da espessura e da sua tipologia.

Quadro 1.2 – Descrição dos principais componentes de uma cobertura verde [2]

Vegetação	Esta camada pode ser constituída por plantas, arbustos ou árvores. É aconselhável a escolha da vegetação consoante as condições climáticas do local, disponibilidade de nutrientes e os impactes das plantas no ecossistema.
Substrato	É o meio de crescimento para a vegetação e, portanto, influencia diretamente a eficiência da cobertura. De todas as camadas da cobertura verde, o substrato é a camada com maior carga na estrutura.
Filtro	A principal função do filtro é separar o substrato de crescimento do sistema de drenagem e, assim, evitar que partículas, como por exemplo detritos das plantas e partículas finas do solo, entrem no sistema de drenagem e causem problemas de entupimento.
Sistema de drenagem	Promove o balanço ótimo entre o ar e a água na estrutura da cobertura verde, removendo o excesso de água do substrato e garantindo condições aeróbias. Também protege e membrana à prova de água e melhora as propriedades térmicas da cobertura.
Camada impermeável e barreira anti-raiz	A camada impermeável é fundamental para garantir que não haja escoamento para as camadas inferiores da cobertura. O tipo de cobertura associado ao custo e o tempo de vida útil determina a natureza da impermeabilização. A barreira anti-raiz protege a estrutura da cobertura das raízes que poderiam penetrar nas camadas inferiores.

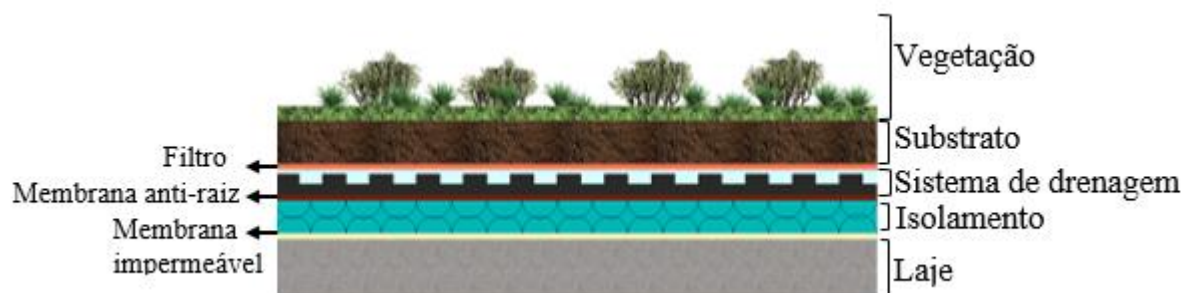


Figura 1.3 – Principais componentes duma cobertura verde.

O isolamento térmico é usado quer nas coberturas convencionais, quer nas coberturas verdes de modo a melhorar o desempenho térmico dos edifícios. Os materiais mais usados em coberturas são o poliestireno extrudido (XPS), poliestireno expandido (EPS), a espuma de poliuretano (PU) e o aglomerado de cortiça expandido (ICB). [7]

A motivação do presente trabalho prende-se com o uso do aglomerado de cortiça expandida para substituir os isolamentos convencionais e explorar a sua capacidade de retenção e drenagem de água.

A cortiça é obtida através da casca dos sobreiros (*Quercus Suber*), com produção em Portugal, Espanha, norte de África e algumas zonas da Itália, sendo um material renovável, natural e sustentável. Tem como principais características, a leveza, a elasticidade, bom isolamento térmico e acústico, bom comportamento ao fogo e a vibrações e durabilidade. ([8],[9])

A importância da cortiça para o meio ambiente advém do seu papel crucial nos processos ecológicos como por exemplo a retenção de água, a conservação do solo e o armazenamento de carbono. [10]

Aglomerado de cortiça expandido (ICB)

O ICB é produzido através de aglomerado de cortiça expandida e comercializado em placas isolantes de diversas espessuras, dependendo do uso e da sua aplicação. A utilização deste material tem vindo a aumentar no setor da construção devido às suas características de isolamento que revelam ser melhores que as características da cortiça natural. [9]

O aglomerado de cortiça expandida é um material renovável fabricado através de resíduos ou cortiça de baixo valor, que são colocados em autoclaves usando vapor com temperaturas superiores a 300°C e recurso a pressão, não sendo necessário a adição de qualquer elemento de ligação para obtenção das placas de isolamento. [9]

Assim, é um produto natural, reciclável e com elevada durabilidade. Com estas características e seguindo as diretrizes para a sustentabilidade pode considerar-se o ICB como uma solução verde e sustentável para isolamento térmico dos edifícios, tendo em conta que os limites de regeneração natural de cortiça não sejam ultrapassados. [9]

Com o aumento do uso do aglomerado de cortiça expandida no revestimento exterior de fachadas e coberturas, foi criada uma solução melhorada do ICB, através da colaboração das empresas Amorim Isolamentos e Saint Gobain Weber com o ITeCons/UC e a FAUP.

Esta solução é um aglomerado de cortiça personalizado de média densidade (MD), mais resistente às agressões do ambiente exterior, já que garante melhor resistência mecânica e maior durabilidade, permanecendo um bom isolante térmico.

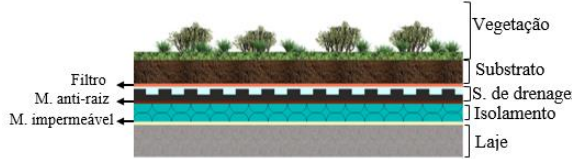

No Quadro 1.3 podem verificar-se as diferenças nas principais propriedades do aglomerado de cortiça expandida *standard* e do aglomerado de cortiça de média densidade. [11]

Quadro 1.3 – Resumo de propriedades do ICB *standard* e da MD. (Adaptado) [11]

	ICB <i>standard</i>	MD
Densidade, ρ ($kg.m^{-3}$)	90-110	140-160
[Seco] Condutibilidade térmica, λ ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	0,037	0,0421
[23°C; 50% de H.R.] Condutibilidade térmica, λ ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	0,0389	0,0426
Absorção de água de curta duração por imersão parcial, Wp ($Kg.m^{-2}$)	0,34	0,18
Resistência ao corte. τ (kPa)	55	110

No Quadro 1.4 faz-se uma comparação entre as coberturas verdes tradicionais e a solução proposta no presente trabalho, tendo por base o aglomerado de cortiça expandido como isolamento térmico.

Quadro 1.4 – Comparação de abordagem tradicional de coberturas verdes e a solução abordada na presente dissertação.

	<p>As coberturas verdes tradicionais são compostas por diversas camadas, constituindo um sistema complexo e bastante dinâmico no que diz respeito ao comportamento térmico.</p>
	<p>A solução de cobertura proposta é mais simples e tem como abordagem a camada de aglomerado de cortiça expandida que pode funcionar como camada de isolamento e retenção de água. São ainda estudados modelos com dois tipos de substratos diferentes para avaliar a influência das propriedades dos mesmos.</p>

1.2 Objetivos

Com base na motivação apresentada anteriormente optou-se pelo uso do aglomerado de cortiça como material isolante para integrar no sistema de cobertura verde, por ser um material natural, abundante em Portugal, com bom comportamento térmico e ter a capacidade de retenção de água. De seguida apresentam-se os objetivos definidos no âmbito deste trabalho.

Objetivo principal: **Implementar um modelo para simular** sistema de cobertura verde inserida numa câmara climática e **efetuar a sua respetiva validação**.

Fase 1

- Implementação de um modelo de simulação 1D, em regime transiente, de um sistema multicamada;
- Validação do modelo 1D através da comparação dos resultados da simulação com os obtidos numa campanha experimental (2 ensaios numa situação de inverno).

Fase 2

- Implementação de um modelo 2D do sistema de cobertura verde;
- Análise do modelo 2D em regime permanente (situação de inverno e de verão) e validação do respetivo modelo através da comparação de resultados da simulação com os obtidos experimentalmente;

- Validação do modelo 2D em regime transiente (2 situações de inverno e 1 situação de verão) através da comparação de resultados da simulação com os obtidos experimentalmente.

Fase 3

- Implementação e análise de três casos de estudo através da comparação dos fluxos de calor ao longo de modelos secos e de modelos saturados:
 - Modelo com MD;
 - Modelo com MD + substrato (2 tipos de substrato).
- Comparação entre casos de estudo.

1.3 Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo da presente dissertação faz um enquadramento do tema, destacando as coberturas verdes como possíveis soluções ambientais. Introduzem-se benefícios deste tipo de solução, nomeadamente em termos de comportamento térmico e apresenta-se a cortiça como uma alternativa para este tipo de solução. Destacam-se assim as suas propriedades, benefícios e identifica-se o tipo de aglomerado de cortiça utilizado no estudo.

No segundo capítulo descreve-se pormenorizadamente toda a metodologia de cálculo e validação dos modelos implementados. A Figura 1.4 ilustra a sequência de etapas seguida no presente trabalho.

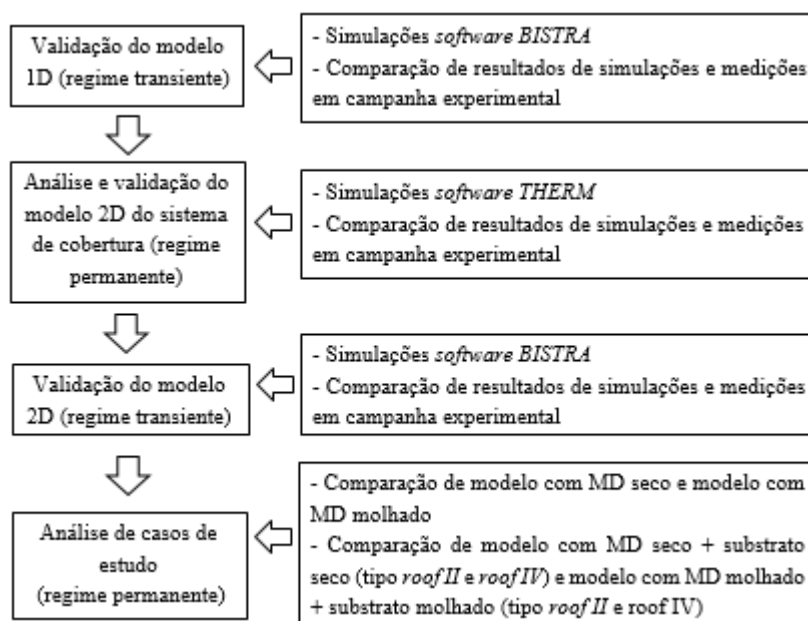


Figura 1.4 – Metodologia proposta.

No terceiro capítulo apresentam-se os resultados obtidos ao longo do presente trabalho e respetiva análise e discussão dos resultados.

Os resultados apresentam-se divididos em três grupos principais. O primeiro diz respeito à validação do modelo 1D. No segundo ponto apresenta-se a análise de resultados para validação do modelo 2D em regime permanente e regime variável. Por último, apresentam-se os resultados obtidos para os três casos de estudo.

O capítulo quatro enumera as principais conclusões obtidas ao longo do estudo apresentados e possíveis trabalhos futuros com interesse no presente tema e desenvolvimento do mesmo.

2 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A metodologia utilizada no âmbito deste trabalho tem por base o uso de modelos de simulação numérica. Numa primeira fase obteve-se a validação de um sistema multicamada em regime transiente através de um modelo de simulação 1D utilizando o *software* de simulação, *BISTRA*. Numa segunda fase criou-se um modelo de um sistema de cobertura 2D, simulando o modelo em regime permanente com recurso ao *software* de simulação, *THERM* e em regime transiente utilizando novamente o *BISTRA*. Em paralelo, ocorrem campanhas experimentais em provetes de grande dimensão, com medições de temperatura e fluxos de calor através de termopares e fluxímetros, respetivamente. Após a validação dos modelos 1D e 2D efetuou-se uma análise de três casos de estudo através de simulações com os modelos no estado seco e nos modelos molhados, em regime permanente e com recurso ao *software* de simulação *THERM*.

2.1 Validação do modelo 1D (em regime transiente)

2.1.1. *Software BISTRA*

O *BISTRA* é um *software* de análise térmica para transferência de calor em regime transiente e objetos bidimensionais. A forma dos objetos é livre e a sua constituição pode ter vários materiais e condições de fronteira. A geometria do objeto é definida por uma imagem colorida num formato *bitmap*. Os dados de entrada necessários para a associação são as propriedades físicas dos objetos e as condições de fronteira. Cada cor do objeto corresponde a um material. Neste tipo de programa as condições de fronteira alteram-se ao longo do tempo e são descritas através de funções com base em parâmetros pré-definidos ou através de ficheiros definidos pelo utilizador com base nos valores que constituem a função num determinado intervalo de tempo. ([12], [13])

O *software* estabelece automaticamente uma grelha triangular de elementos. O sistema de nós resultante corresponde aos vértices dos triângulos. A temperatura nos nós é calculada e consequentemente os fluxos de calor. [12]

Os resultados podem ser visualizados com recurso a animações, nomeadamente apresentando a evolução das isotérmicas ao longo do tempo previamente definido (representadas por cores específicas correspondente a um intervalo de temperatura específica). O *software* permite ainda a obtenção de listas alfanuméricas da temperatura, fluxos de calor e outras variáveis previamente definidas, em intervalos de tempo previamente definidos. Estes valores podem ainda ser exportados para obtenção de gráficos, facilitando a análise dos resultados. [13]

2.1.1 Descrição do modelo

O sistema multicamada estudado tem a configuração de uma parede constituída por uma camada de OSB com 20 mm de espessura, uma argamassa (do tipo *bonding mortar*) de 5 mm de espessura e placas de MD com 70 mm de espessura. As propriedades dos materiais constituintes de cada uma das camadas da parede encontram-se apresentadas no Quadro 2.1.

Na campanha experimental a parede é colocada numa câmara climática contendo um alinhamento de termopares, dois termopares na superfície do OSB e de MD, um terceiro na interface OSB/argamassa e os restantes distribuídos ao longo da camada de MD, com um intervalo de 15 mm entre si. O modelo de simulação corresponde a um corte da parede ensaiada, com a criação de células para obtenção da temperatura nos pontos correspondentes à localização dos termopares. Na Figura 2.1 pode ver-se o esquema correspondente ao sistema multicamada.



Figura 2.1 – Corte da parede com representação dos pontos de medição representados a cor de laranja.

Quadro 2.1 – Propriedades dos materiais constituintes do sistema multicamada.

	Condutibilidade térmica, λ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) ¹	Densidade, ρ ($kg \cdot m^{-3}$) ²	Calor específico, c ($J \cdot Kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) ³
MDFachada	0.0419	156	1530
Argamassa de colagem	0.610	1400	1000
OSB	0.130	550	1200

¹ Condutibilidade térmica medida através do aparelho *λ Meter-Meßtechinck EP500*.

² EN1602:2013 *Thermal insulation products for building applications - Determination of the apparent density*, European Committee for Standardization, (2013)

³ Determinação através de *differential scanning calorimetry*, seguindo o *ratio method*, exceto a argamassa e colagem em que foi usado o valor tabelado na EN 1745:2012

2.1.2 Condições de fronteira

A implementação de um modelo de simulação para obtenção de resultados mais precisos envolve a criação de condições de fronteira representando o mais fielmente possível as condições a que está sujeito, assim como a criação de um modelo geométrico que corresponda ao provete ensaiado.

Na Figura 2.2 pode ver-se a representação das condições de fronteira. A vermelho e em contacto com a camada de OSB tem-se o ambiente interior, cujas variações de temperatura correspondem às variações no interior da câmara climática.

A simulação do ambiente exterior é do lado em contacto com a MD e está representado a azul na Figura 2.2, e também é obtido com recurso a uma câmara climática que, neste caso, simula as condições exteriores.

A imposição das fronteiras adiabáticas deveu-se ao facto de se considerar que o fluxo de calor é unidirecional, havendo fluxos de calor apenas entre os ambientes interior e exterior (ou seja, não existindo fluxo no sentido vertical na solução representada na figura).

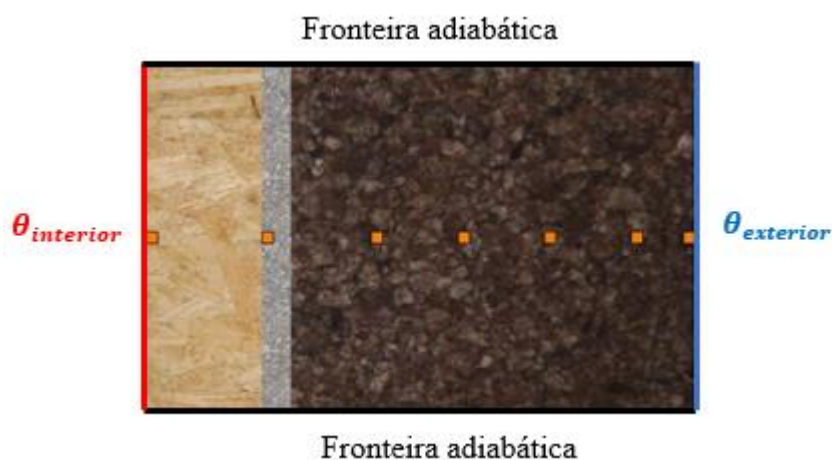


Figura 2.2 - Condições de fronteira do modelo de simulação 1D.

2.1.3 Caso 1 – Situação de inverno sem molhagem

Num primeiro ensaio, a parede encontra-se seca (sem simulação de chuva, ou seja, sem molhagem) e está sujeita às variações de temperatura do ambiente exterior e interior apresentadas no Gráfico 2.1. A função correspondente a estas variações introduzidas no *software* estabelece um período de simulação de 96 horas.

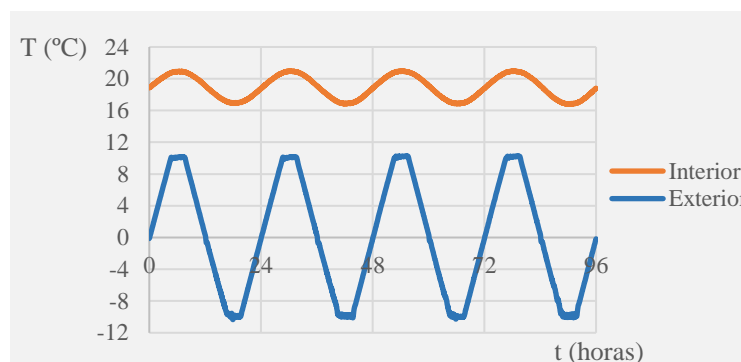


Gráfico 2.1 – Caso 1: variação de temperatura no ambiente interior (laranja) e no ambiente exterior (azul) ao longo de 96 horas para a situação de inverno, sem simulação de molhagem.

2.1.4 Caso 2 – Situação de inverno com molhagem

Num segundo ensaio a parede sofre uma molhagem de 1 hora, no lado exterior, ou seja, em contacto com a camada de MD. A molhagem ocorre com recurso a uma rede de aspersores que garantem a exposição da superfície a $1 \text{ l.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ seguindo as recomendações da ETAG 004⁴.

As variações de temperatura do ambiente interior e do ambiente exterior desta nova situação encontram-se apresentadas no Gráfico 2.2. No modelo de simulação efetuou-se igualmente esta alteração de valores, obtendo-se novas funções para a variação da temperatura no ambiente interior e no ambiente exterior, programadas no *software*.

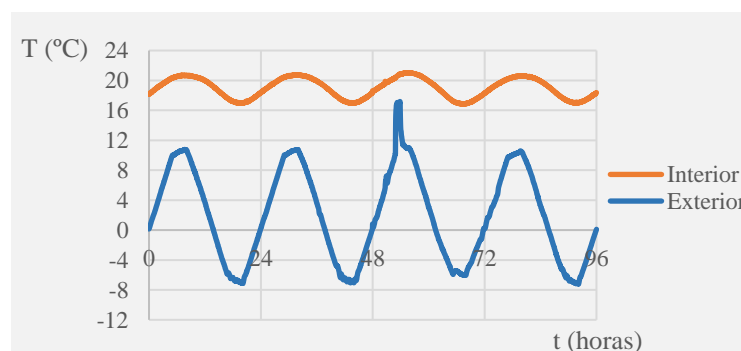


Gráfico 2.2 – Caso 2: variação de temperatura no ambiente interior (laranja) e no ambiente exterior (azul) ao longo de 96 horas para a situação de inverno, com molhagem.

⁴ *Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems (etics) with rendering - 2013*

2.1.5 Condutâncias térmicas

O *software* utilizado necessita de valores de condutâncias térmicas associadas ao fenómeno de convecção e radiação para que seja possível a obtenção dos resultados pretendidos. Como tal, para aumentar o rigor dos resultados, as condutâncias térmicas utilizadas foram calculadas com base nos resultados experimentais obtidos em regime permanente. Para esse efeito, aplicaram-se as equações 2.1 e 2.2. Os valores utilizados nestas equações correspondem à média dos valores medidos pelos termopares e fluxímetros após verificação do regime permanente.

$$Q = h_i(\theta_i - \theta_{si}) \quad \text{Equação 2.1}$$

$$Q = h_e(\theta_{se} - \theta_e) \quad \text{Equação 2.2}$$

em que:

Q - Fluxo de calor ($W \cdot m^{-2}$);

h_i - Condutância térmica do ambiente interior ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$);

h_e - Condutância térmica do ambiente exterior ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$);

θ_i - Temperatura do ar no ambiente interior ($^\circ C$);

θ_{si} - Temperatura à superfície do OSB ($^\circ C$);

θ_e - Temperatura do ar no ambiente exterior ($^\circ C$);

θ_{se} - Temperatura à superfície do MD ($^\circ C$).

Os valores de condutâncias térmicas utilizados na simulação encontram-se apresentados no Quadro 2.2 verificando-se uma alteração de valores na condutância térmica do ambiente exterior devido à presença de ventilação no caso 1, ocorrendo a vedação da mesma no caso 2 devido à molhagem ocorrida na parede.

Quadro 2.2 - Valores de condutâncias térmicas para modelo sem molhagem (caso 1) e modelo com molhagem (caso 2).

	Caso 1	Caso 2
Condutância térmica do ambiente interior, h_i ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	6,26	6,26
Condutância térmica do ambiente exterior, h_e ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	4,16	5,80

2.2 Implementação de um modelo 2D do sistema de cobertura

Após validação do modelo 1D implementou-se um modelo 2D de um sistema de cobertura com o objetivo da validação do mesmo através da comparação dos resultados das simulações com os resultados das medições obtidas em laboratório, do provete colocado na câmara climática. No âmbito do presente trabalho o modelo implementado e sujeito a validação corresponde a uma laje de betão isolada com aglomerado de cortiça expandida, instalada na câmara climática. A implementação deste modelo 2D é a base para a implementação dos casos de estudo, que futuramente poderão ser implementados numa cobertura verde.

2.2.1 Descrição do modelo

O modelo de cobertura estudado é constituído por uma laje de betão com 155 mm de espessura e uma camada superior constituída por placas de aglomerado de cortiça expandida com 100 mm de espessura.

As placas de ICB encontram-se numeradas de 1 a 12 e posicionadas consoante a representação esquemática da Figura 2.3. Todas as placas exceto a placa 10 e a placa 12 têm $500 \times 500 \text{ mm}^2$. A laje de betão tem 1568 mm de largura e 2370 mm de comprimento. As propriedades dos materiais constituintes do modelo encontram-se referidas no Quadro 2.3.

Na campanha experimental existem 3 alinhamentos de termopares, um primeiro alinhamento no lado esquerdo da placa 8, um segundo alinhamento no lado direito da placa 8 e um terceiro alinhamento no lado esquerdo da placa 2. A representação dos mesmos pode ser observada na Figura 2.3.

Os termopares encontram-se colocados de 25 em 25 mm ao longo ICB, havendo ainda dois termopares aplicados à superfície, na laje e no ICB, e um terceiro na interface. Todos os alinhamentos apresentam a mesma configuração.

Quadro 2.3 – Propriedades dos materiais constituintes do modelo.

	Condutibilidade térmica, λ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Densidade, ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	Calor específico, c ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
Betão ⁵	1,4	2300	880
Aglomerado de cortiça expandida (ICB) ⁵	0,038	100	1560

⁵ Dados obtidos no artigo *Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions* (2012)

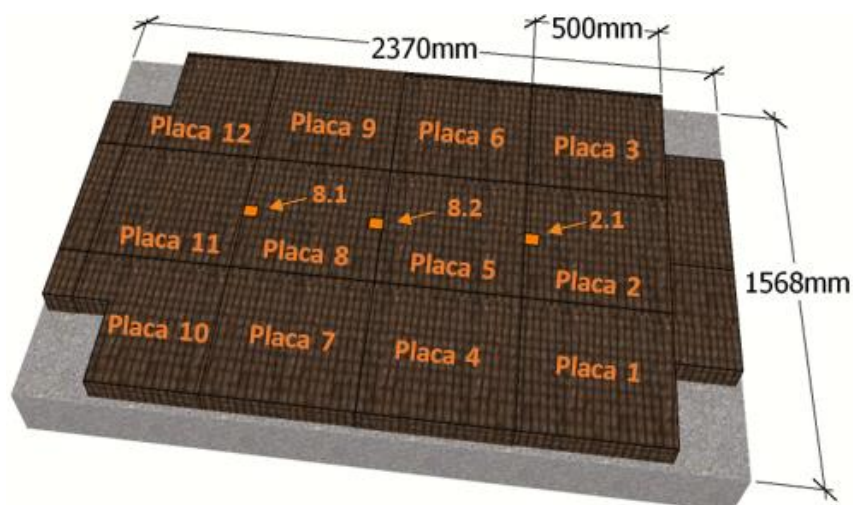


Figura 2.3 – Representação em planta do modelo estudado com representação da localização dos alinhamentos de termopares através das células a laranja (alinhamentos 8.1, 8.2 e 2.1).

2.2.2 Simulação em regime permanente

Para efeitos de simulação considerou-se a parte central do modelo pormenorizado na Figura 2.4. Numa primeira fase, estudou-se o modelo em regime permanente com recurso ao *software THERM* e com o principal objetivo da obtenção dos fluxos de calor ao longo de cada um dos elementos apresentados e a temperatura nos pontos correspondentes à localização dos termopares colocados nas medições da campanha experimental.

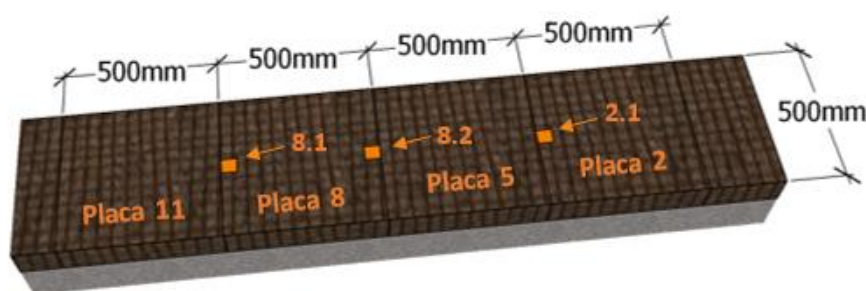


Figura 2.4 – Representação das placas centrais do modelo 2D apresentado.

O *software* utilizado foi o *THERM*, o qual foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBLN)*. Esta ferramenta de cálculo permite o cálculo de transferência de calor bidimensional através de componentes usados na construção como as janelas, paredes, fundações, coberturas e portas, em regime permanente. [14]

A análise de transferência de calor através do *THERM* permite a avaliação da eficiência energética do componente estudado e de padrões de temperatura que podem estar relacionados com problemas de condensação, danos causados pela humidade e integridade estrutural. [14]

A análise de transferência de calor bidimensional por condução através do *THERM* tem por base o método dos elementos finitos. A interface do programa permite o desenho de secções transversais dos modelos a serem analisados, sendo a mesma representada através de combinações de polígonos. Em cada polígono são definidas as propriedades do material que o constituem e introduzem-se as condições de fronteira nas superfícies no contorno do objetivo desenhado. Os resultados são apresentados de diversas formas, incluindo, coeficientes de transferência de calor (U), isotérmicas, vetores de fluxo de calor e temperaturas locais. [14]

2.2.2.1 Condições de fronteira

Situação Inverno

Na campanha experimental, o modelo descrito anteriormente é colocado numa câmara climática em contacto com um ambiente exterior com uma temperatura constante de 5°C e um ambiente interior com uma temperatura constante de 20°C. Os primeiros resultados obtidos em simulação obtiveram-se através do modelo inicial representado na Figura 2.5, correspondente ao momento inicial da colocação do provete na câmara climática.



Figura 2.5 – Condições de fronteira da solução inicial.

No entanto, com a crescente necessidade da análise detalhada do modelo foram sendo criadas diversas soluções, com adição de componentes e a alteração das condições de fronteira. Na campanha experimental, o modelo colocado na câmara climática não tem as laterais completamente em contacto com a câmara e, por este motivo, considerou-se, para efeitos de simulação, a existência de caixas de ar com 30 mm de largura em ambas as laterais do modelo.

A opção da modelação das caixas de ar no *software* de simulação deveu-se ao facto do valor da resistência térmica daquele espaçamento ser menor quando comparada com a resistência térmica do ambiente exterior. Esta solução, denominada de solução 1 encontra-se representada na Figura 2.6 onde se observam as alterações efetuadas às condições de fronteira, surgindo neste caso, as fronteiras adiabáticas, ou seja, não existem trocas de calor, garantindo um fluxo unidirecional ao longo do modelo, no sentido vertical e ascendente.



Figura 2.6 – Condições de fronteira da solução 1.

De modo a melhorar o isolamento térmico nas laterais do provete colocou-se granulado de cortiça no espaçamento de 30 mm de largura e simulou-se a solução 2 (ver Figura 2.7), substituindo a caixa de ar pelas propriedades do granulado de cortiça indicadas no Quadro 2.4. O isolamento térmico garante que não existam trocas de calor ao longo das laterais do modelo, considerando-se novamente as fronteiras adiabáticas, havendo um fluxo unidirecional ao longo do modelo.



Figura 2.7 – Condições de fronteira da solução 2.

Por último, o modelo denominado de solução 3 introduz a existência das paredes da câmara climática. Era necessário perceber a influência da câmara de climática nas trocas de calor do modelo com o exterior da câmara e, para esse efeito, criou-se um terceiro ambiente com uma temperatura de 15°C, simulando o ambiente envolvente da câmara. A câmara climática é constituída por espuma de poliuretano com as propriedades indicadas no Quadro 2.4 e tem uma espessura de 95 mm. A Figura 2.8 representa esquematicamente as condições de fronteira consideradas nesta solução.

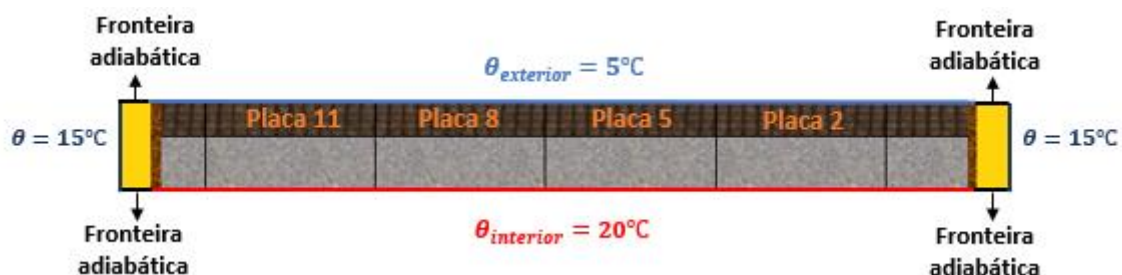


Figura 2.8 – Condições de fronteira da solução 3.

Situação Verão

Quer ao nível experimental, quer ao nível da simulação, o principal objetivo do estudo é a análise do desempenho térmico do modelo para temperaturas que representem a situação de inverno e a situação de verão. No caso do verão considerou-se uma temperatura exterior constante de 30°C , apresentando-se a solução 4, com as condições de fronteira descritas na Figura 2.9.

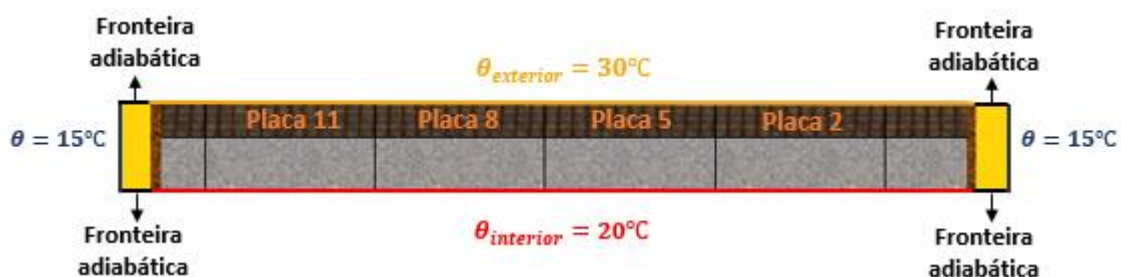


Figura 2.9 – Condições de fronteira da solução 4.

Quadro 2.4 – Propriedades do material do isolamento lateral e do material que constitui a câmara climática.

	Condutibilidade térmica, λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Densidade, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Calor específico, c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Granulado de cortiça expandida ⁶	0,041	70	1560
Espuma de Poliuretano ⁷	0,05	70	1500

⁶ ETA 17/0389

⁷ ISO 10456:2007

2.2.2.2 Resistências térmicas superficiais

No cálculo dos fluxos de calor efetuado pelo *software* necessitou-se da condutância térmica superficial que corresponde ao inverso da resistência térmica superficial. Para tal, utilizaram-se os valores teóricos das resistências térmicas, apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Valores de resistências térmicas superficiais (Adaptado) [15]

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial, R_s ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)	
	Exterior R_{se}	Interior R_{si}
Horizontal	0,04	0,13
Vertical (ascendente)	0,04	0,10
Vertical (descendente)	0,04	0,17

2.2.2.3 Análise de sensibilidade

Com o objetivo de perceber a influência de determinados detalhes e características do modelo efetuou-se uma análise de sensibilidade. No provete da campanha experimental as placas de ICB não se encontram perfeitamente assentes na laje de betão, havendo zonas com um espaçamento até aproximadamente 3 mm. De modo a analisar a influência deste espaçamento nas trocas de calor do modelo efetuou-se uma simulação com as condições de fronteira da solução 2 adicionando uma caixa de ar entre o ICB e a laje, conforme representado na Figura 2.10(a). Também a colocação de um tubo na laje, utilizado para possível drenagem de água, foi alvo de simulação. Com aproximadamente 46 mm de diâmetro o tubo encontra-se posicionado consoante a Figura 2.10(b).

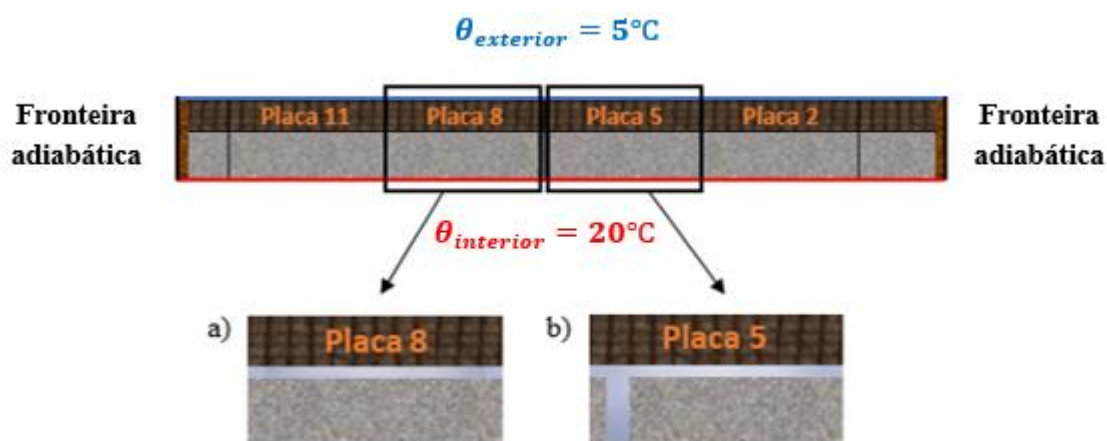


Figura 2.10 – Condições de fronteira para análise de sensibilidade; a) pormenorização de caixa de ar criada por não haver um contacto perfeito entre as placas e a laje; b) pormenorização da zona de passagem do tubo de drenagem das águas pluviais.

2.3 Simulação em regime transiente

Numa segunda fase efetuaram-se simulações em regime transiente com recurso ao *software BISTRA* com o principal objetivo de obter a distribuição de temperaturas ao longo do modelo de cobertura com a variação das temperaturas dos ambientes ao longo do tempo. Para efeitos de obtenção das temperaturas considerou-se os mesmos pontos de medição das simulações em regime permanente.

2.3.1 Condições de fronteira

Na simulação em regime transiente alteraram-se ligeiramente as condições de fronteira devido à mudança de *software* e de modo a aumentar a precisão dos resultados.

O modelo apresentado na Figura 2.11 foi realizado considerando o eixo de simetria da cobertura. A obtenção das temperaturas nos pontos correspondentes ao alinhamento 2.1 foram obtidas tendo por base esse eixo de simetria.

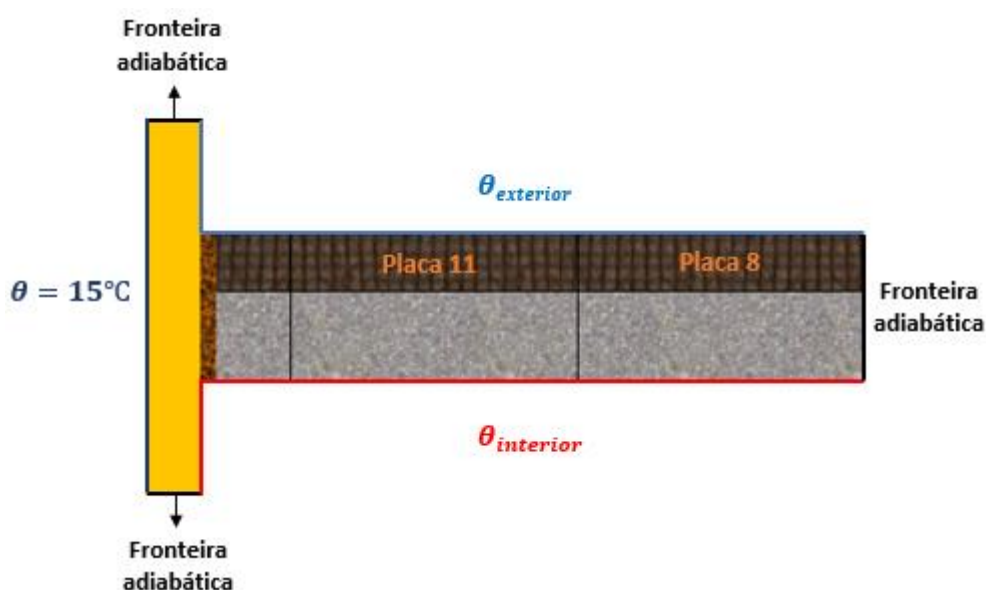


Figura 2.11 – Condições de fronteira do modelo 2D a utilizar na simulação em regime transiente.

2.3.2 Variações de temperatura no modelo da cobertura

As simulações em regime transiente obtiveram-se para duas situações representativas da estação de inverno e uma possível situação da estação de verão.

O Gráfico 2.3 apresenta a variação de temperaturas impostas na câmara climática para o primeiro caso da situação de inverno, admitindo uma variação da temperatura exterior entre os 0 e os 15°C.

No segundo caso da situação de inverno assume-se uma variação de temperatura exterior entre os 5 e os 15°C como se pode observar no Gráfico 2.4.

O Gráfico 2.5 apresenta a variação de temperaturas com maior amplitude no ambiente exterior da câmara climática, com uma variação entre os 10 e os 35 graus, possível situação do verão. A temperatura do ambiente interior, em todos os casos mencionados, é de aproximadamente 20 graus, havendo variações mínimas devido à camara climática.

As simulações efetuadas assumiram os valores apresentados em cada um dos gráficos referidos, quer para a temperatura do ambiente exterior como para a temperatura do ambiente interior, considerando as pequenas variações de temperaturas consideradas.

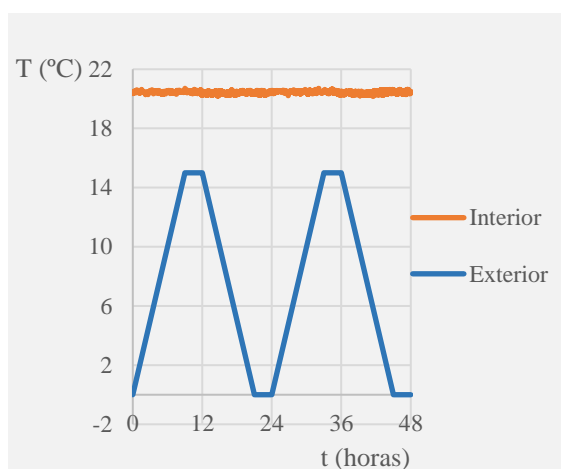


Gráfico 2.3 – Caso 1: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de inverno.

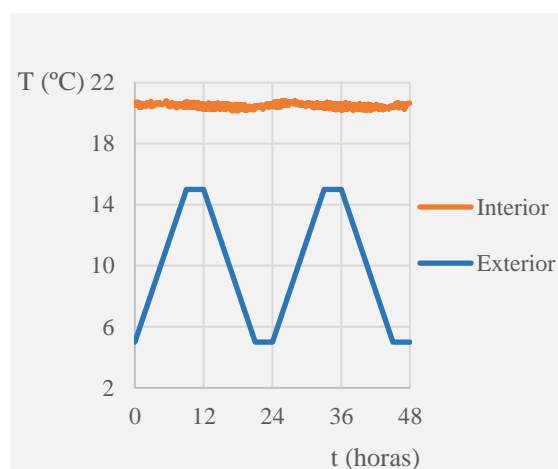


Gráfico 2.4 – Caso 2: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de inverno.

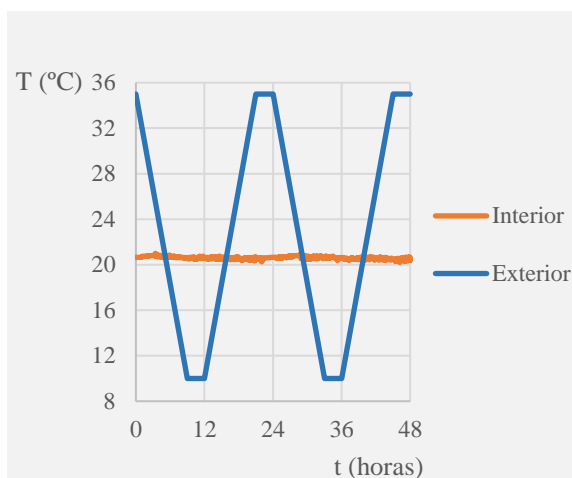


Gráfico 2.5 – Caso 3: variação de temperatura ao longo de 48 horas, numa situação de verão.

2.3.3 Condutâncias térmicas

As condutâncias térmicas utilizadas nas simulações em regime transiente do modelo de cobertura foram calculadas através da metodologia utilizada no cálculo das condutâncias térmicas do modelo 1D, com recurso aos resultados das medições dos termopares e fluxímetros na campanha experimental em regime permanente. As equações para o cálculo das condutâncias térmicas são idênticas às usadas no cálculo das condutâncias térmicas do modelo 1D. Obtiveram-se os valores expressos no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Condutâncias térmicas do ambiente interior e exterior na situação de inverno e verão.

	Inverno	Verão
Condutância térmica do ambiente interior, h_i ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	36,67	3,11
Condutância térmica do ambiente exterior, h_e ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	11	28

3 CASOS DE ESTUDO

Após validação do modelo 2D do sistema de cobertura através da comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados das simulações procedeu-se à implementação e análise de diversos casos de estudo.

A análise destes casos de estudo tem como principal objetivo perceber o efeito da água nos modelos de cobertura através da alteração das propriedades dos materiais entre o estado seco e saturado.

Na criação dos novos modelos de cobertura utilizou-se aglomerado de cortiça de média densidade (MD), em vez do aglomerado de massa volúmica *standard* (ICB) devido ao conhecimento da variação da condutibilidade térmica em função da variação do teor em água expressa na Figura 3.1. Para além da camada de MD adicionou-se ainda uma camada de solo com 80 mm de espessura. Para obtenção de resultados mais precisos, reduziu-se o modelo simulado anteriormente, tornando assim a malha dos elementos finitos, utilizada pelo programa, mais densa.

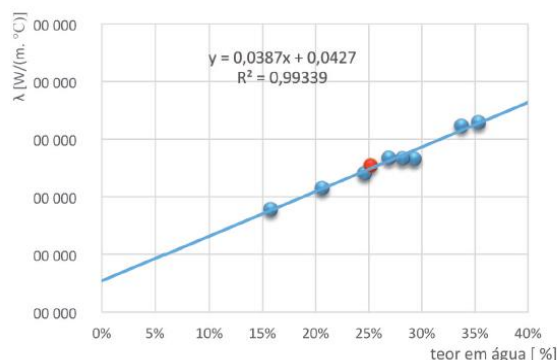


Figura 3.1 – Variação da condutibilidade térmica do aglomerado de cortiça de média densidade (MD) em função do teor em água. [11]

3.1.1 Modelo com aglomerado de cortiça seco e saturado

Numa primeira abordagem simulou-se o modelo de cobertura com a laje de betão e a camada de isolamento MD com as condições de fronteira expressas na Figura 3.2. O objetivo desta simulação é analisar o comportamento do modelo com MD, no que diz respeito às trocas de calor, registando as diferenças nos fluxos de calor consoante o modelo se encontre seco ou saturado.

A alteração dos valores de condutibilidade térmica para a comparação dos modelos seco e saturado corresponde aos valores apresentados no Quadro 3.1. Os substratos utilizados consideram dois tipos, um com a referência comercial *roof II* e outro *roof IV*.

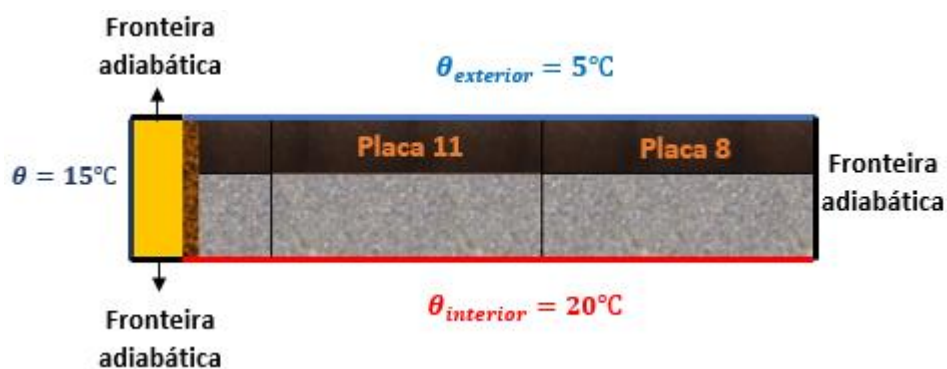


Figura 3.2 – Condições de fronteira do modelo com isolamento MD.

3.1.2 Modelo com substrato do tipo *roof II* seco e saturado

Após análise do modelo simplificado com a MD adicionou-se uma camada de substrato do tipo *roof II* com as características apresentadas no Quadro 3.1. Simulou-se o novo modelo do sistema de cobertura com as condições de fronteira apresentadas na Figura 3.3.

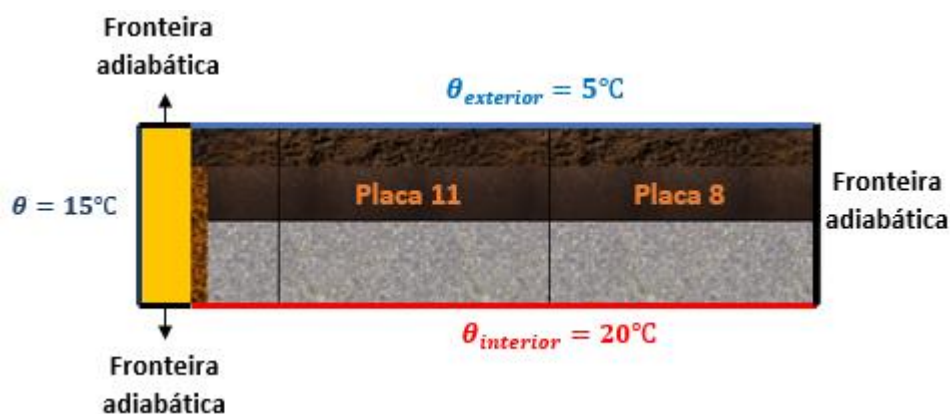


Figura 3.3 – Condições de fronteira do modelo com substrato do tipo *roof II*.

3.1.3 Modelo com substrato do tipo *roof IV* seco e saturado

Para uma análise comparativa entre dois modelos com dois tipos diferentes de solo simulou-se ainda o modelo com as condições de fronteira apresentadas na Figura 3.4 constituído pelo substrato do tipo *roof IV* com as características apresentadas no Quadro 3.1.

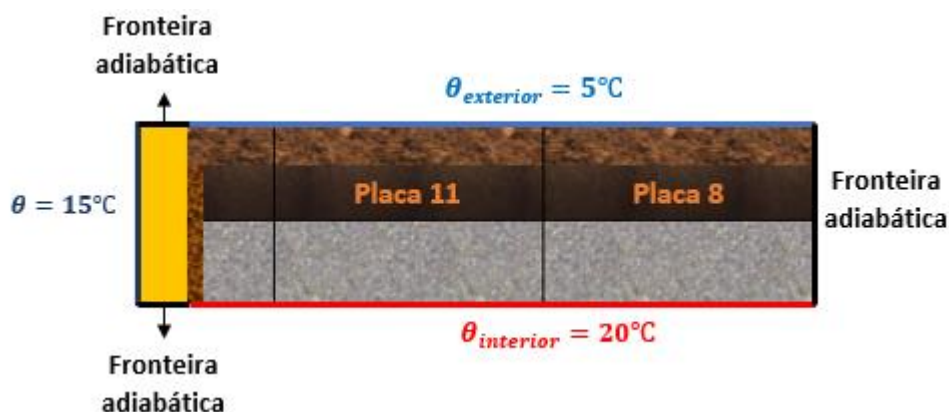


Figura 3.4 - Condições de fronteira do modelo com substrato do tipo roof IV.

Quadro 3.1 – Propriedades dos materiais que constituem as camadas dos três casos de estudo.

	Condutibilidade térmica, λ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)			Densidade, ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	
	Saturado	Seco	Diminuição de λ	Seco	Saturado
Aglomerado de cortiça de média densidade (MD) ⁸	0,0582	0,0427	-26, %	150	-
Siro Mistura 076.00 Roof II ⁹	0,378	0,153	-59,52%	550,7	803,3
Siro Mistura 086.00 Roof IV ¹⁰	0,425	0,097	-77,1%	618,9	897,8

⁸ Construção Magazine nº 65, Jan/Fev de 2015, (pp. 28-34)

⁹ Ensaio de provetes com dimensões: 155 x 155 x 75 mm³ (20/04/2016)

¹⁰ Ensaio de provetes com dimensões: 155 x 155 x 75 mm³ (24/05/2016)

4 RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações realizadas ao longo do trabalho, através da apresentação em gráficos para posterior análise e discussão. Dividiu-se este capítulo em 3 secções principais.

Na secção 4.1 os resultados apresentados dizem respeito à validação do modelo 1D, onde ocorre a comparação entre os resultados obtidos nas simulações da presente dissertação e os resultados obtidos na campanha experimental.

Na secção 4.2 apresentam-se os resultados relativos à validação do modelo 2D, com uma análise gráfica dos fluxos de calor das várias soluções modeladas, em regime permanente, uma análise de sensibilidade efetuada em determinadas características do modelo. Por último, efetuou-se uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações e os resultados obtidos na campanha experimental, em regime permanente e em regime transiente.

Na terceiro e último ponto, apresentam-se os resultados dos três casos de estudo considerados, ao nível dos fluxos de calor nos modelos secos e saturados e uma comparação entre casos de estudo.

4.1 Validação do modelo 1D

A validação do modelo 1D efetuou-se com recurso à comparação dos resultados obtidos em simulação e as medições realizadas numa campanha experimental. No primeiro caso obteve-se a variação de temperatura no modelo 1D ao longo de 24 horas, numa situação de Inverno, a seco. No Gráfico 4.1 encontram-se representadas as variações de temperatura em cada um dos pontos considerados ao longo do modelo e verifica-se uma boa aproximação das curvas de simulação e das curvas da campanha experimental, validando o modelo 1D.

Num segundo caso obteve-se a variação de temperatura no modelo 1D ao longo de 72 horas para uma situação de Inverno e com molhagem. Através da análise do Gráfico 4.2 pode verificar-se novamente uma boa aproximação das curvas do modelo simulado e das curvas do provete ensaiado na câmara climática.

É de realçar que a representação das curvas de temperatura no gráfico corresponde à variação das temperaturas ao longo do modelo. Como se verifica uma temperatura crescente ao longo do gráfico, significa que nos aproximamos cada vez mais do ambiente interior do modelo.

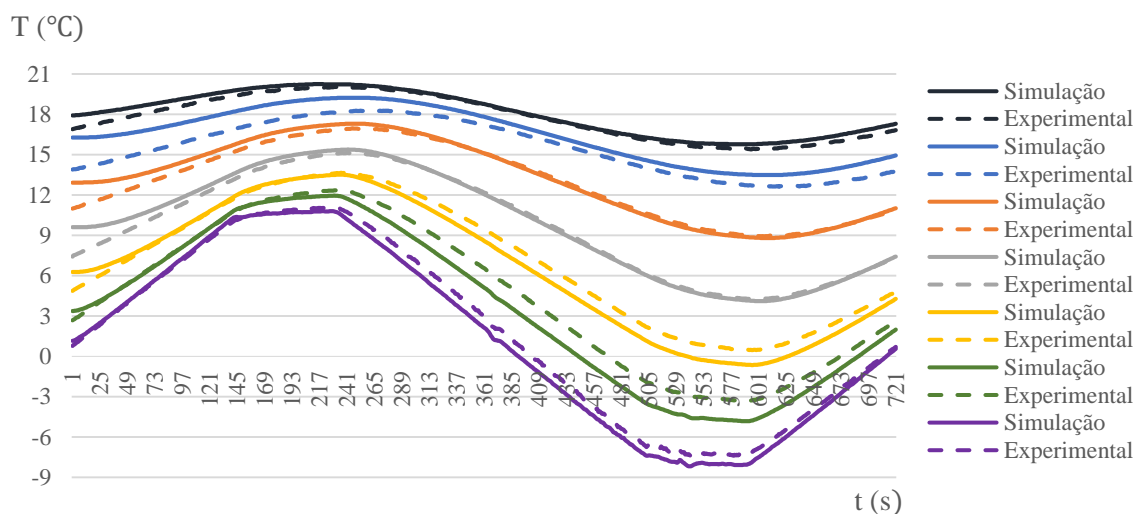


Gráfico 4.1 – Caso 1: variação de temperatura nos pontos ao longo da parede num período de 24 horas, numa situação de inverno sem molhagem. Medições efetuadas no provete (tracejado) e modelação no programa (linha contínua).

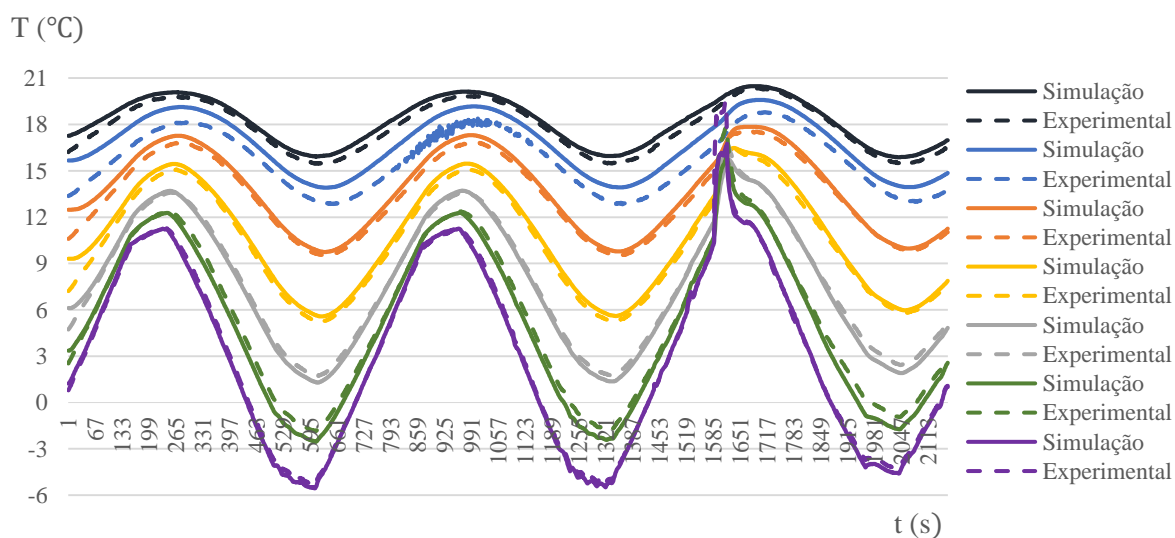


Gráfico 4.2 – Caso 2: variação de temperatura nos pontos ao longo da parede num período de 72 horas, numa situação de inverno com molhagem. Medições efetuadas no provete (tracejado) e modelação no programa (linha contínua).

4.2 Validação do modelo 2D

Para a validação do modelo 2D começou por se analisar os fluxos de calor nos diversos modelos criados de modo a perceber qual o melhor modelo a implementar. De seguida, efetuou-se uma análise de sensibilidade para garantir a obtenção de resultados mais precisos. Por último, obteve-se uma comparação entre os resultados das simulações e os resultados da campanha experimental, em regime permanente e em regime variável.

4.2.1 Fluxos de calor (regime permanente)

A análise dos fluxos de calor das diversas soluções ocorreu em regime permanente. Neste tipo de regime, os fluxos de calor dos vários troços do modelo 2D devem ter valores aproximados para se garantir que o fluxo de calor é unidirecional. No modelo 2D do sistema de cobertura estudaram-se 4 condições de fronteira diferentes para obtenção da solução com os resultados mais coerentes e precisos.

Através da análise dos fluxos de calor em cada troço do modelo 2D, considerando a divisão das placas de ICB, conclui-se que a solução inicial tinha valores de fluxos de calor bastante diferentes entre os vários troços como se pode observar no Gráfico 4.3. Esta diferença nos valores do fluxo de calor deveu-se ao facto da laje de betão não estar isolada nas laterais e, portanto, não garantia um fluxo de calor unidirecional.

O modelo 2D representativo da solução 1 apresenta melhorias consideráveis no que diz respeito à aproximação dos valores dos fluxos de calor em cada troço indicados no Gráfico 4.4, no entanto, não se pode considerar a solução ideal em regime permanente.

As soluções 2 e 3 são as soluções com melhores resultados relativamente aos valores de fluxos de calor ao longo dos troços do modelo como se pode observar no Gráfico 4.5 e no Gráfico 4.6, respetivamente.

O modelo da solução 3 é o modelo de cobertura que melhor representa o comportamento utilizado na campanha experimental porque considera a câmara climática utilizada na mesma. Sendo assim este é o modelo considerado nas simulações posteriores.

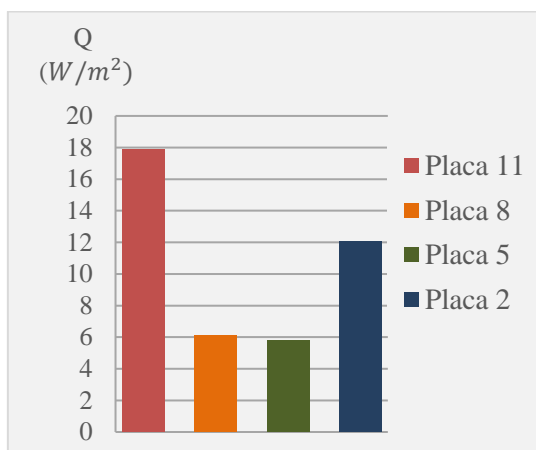


Gráfico 4.3 – Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução inicial.

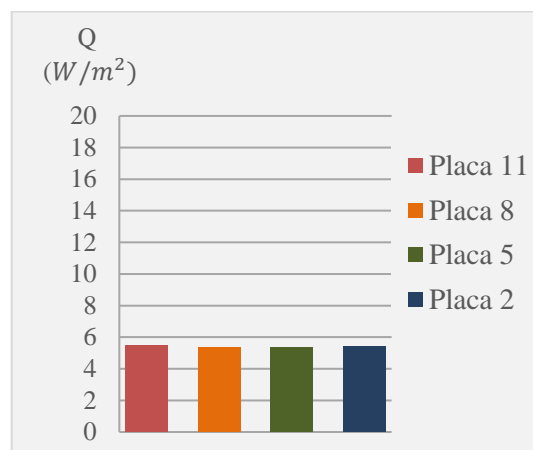


Gráfico 4.5 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 2.

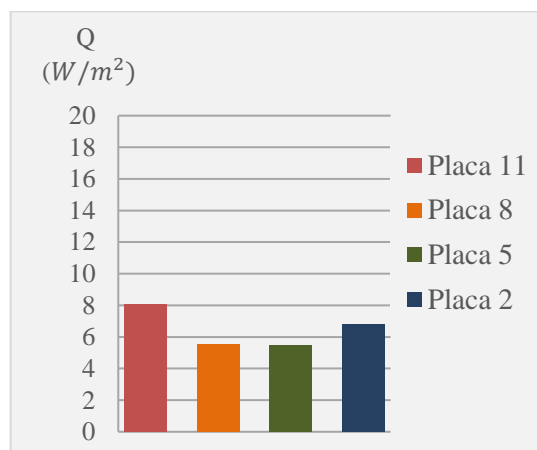


Gráfico 4.4 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 1.

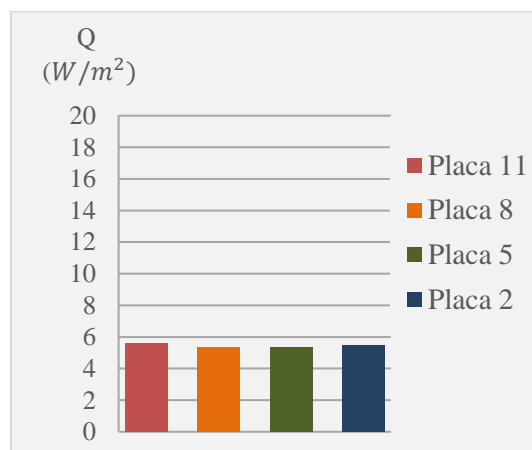


Gráfico 4.6 - Fluxos de calor ao longo das 4 placas de ICB do modelo 2D da solução 3.

4.2.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é apresentada nesta secção, com recurso a gráficos de comparação dos fluxos de calor em cada uma das soluções. Através da análise do Gráfico 4.7 verifica-se que o espaçamento existente entre a laje de betão e as placas de ICB do modelo estrutural da cobertura, assim como a presença do tubo de drenagem de água não têm uma influência significativa nas trocas de calor do modelo 2D do sistema de cobertura.

Os fluxos de calor das soluções com a caixa de ar diminuem em cerca de 1,5% relativamente à solução 2, considerando-se assim estes valores desprezáveis.

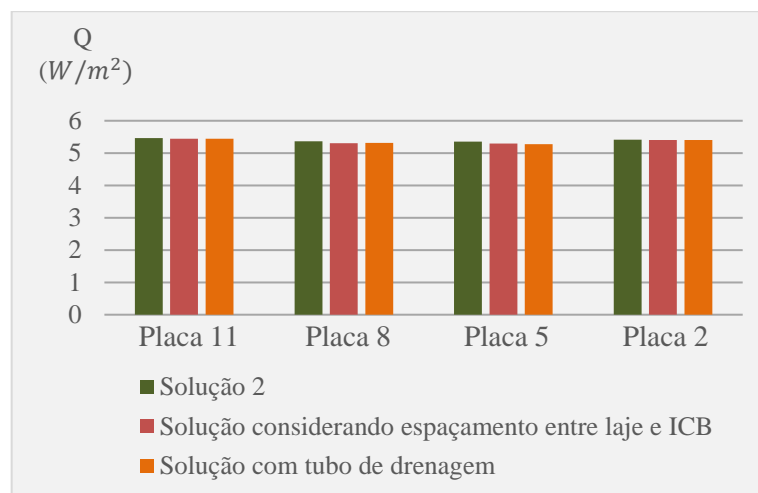


Gráfico 4.7 – Análise de sensibilidade: comparação de fluxos de calor entre solução 2, solução considerando o espaçamento entre laje e ICB e a solução com tubo de drenagem.

4.2.3 Comparação entre medições e simulações

Com a escolha do modelo a utilizar e a análise de sensibilidade para obtenção de resultados mais rigorosos, efetuou-se uma comparação entre os valores de temperatura obtidos nos pontos definidos ao longo do modelo de simulação e as temperaturas medidas no provete colocado na câmara climática. Primeiro obteve-se a comparação dos resultados em regime permanente.

Através da análise do Gráfico 4.8, que mostra a variação da temperatura dos pontos correspondentes aos três alinhamentos considerados para a situação de inverno, verifica-se uma boa aproximação entre as curvas das simulações e as obtidas através das medições. Já na situação de verão (Gráfico 4.9), verifica-se um ligeiro afastamento relativamente às curvas das simulações, que se concluiu dever-se ao reposicionamento dos termopares após uma intervenção no provete.

Após validação do modelo 2D em regime permanente obteve-se os resultados para regime transiente. A apresentação dos resultados do modelo 2D, em regime transiente, fez-se relativamente ao alinhamento de pontos 8.1.

É de realçar ainda que as curvas apresentadas nos gráficos revelam a variação de temperatura dos termopares e dos pontos simulados desde a superfície da laje de betão (temperaturas superiores) até à superfície do ICB (temperaturas inferiores).

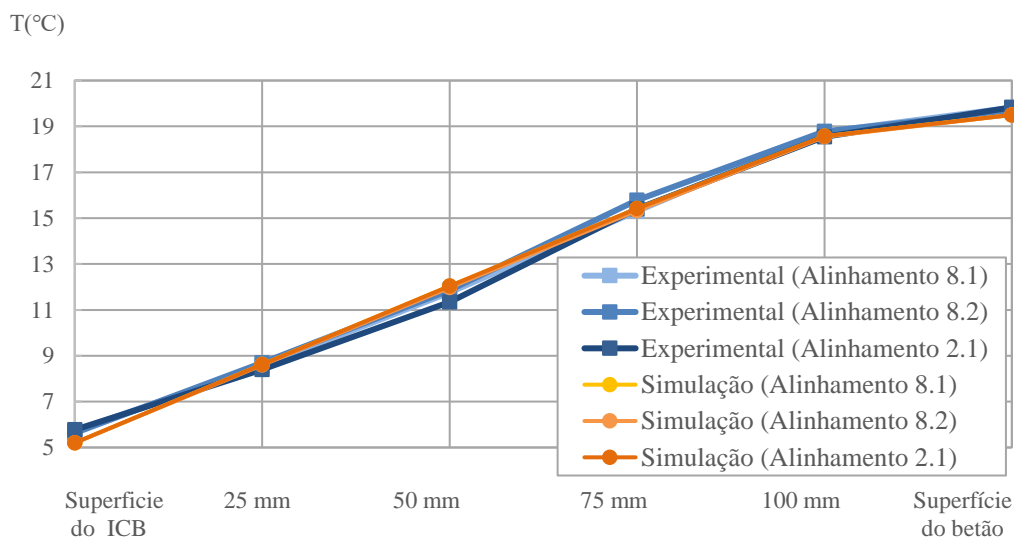


Gráfico 4.8 – Variação da temperatura nos pontos correspondentes aos três alinhamentos do modelo 2D, na situação de inverno.

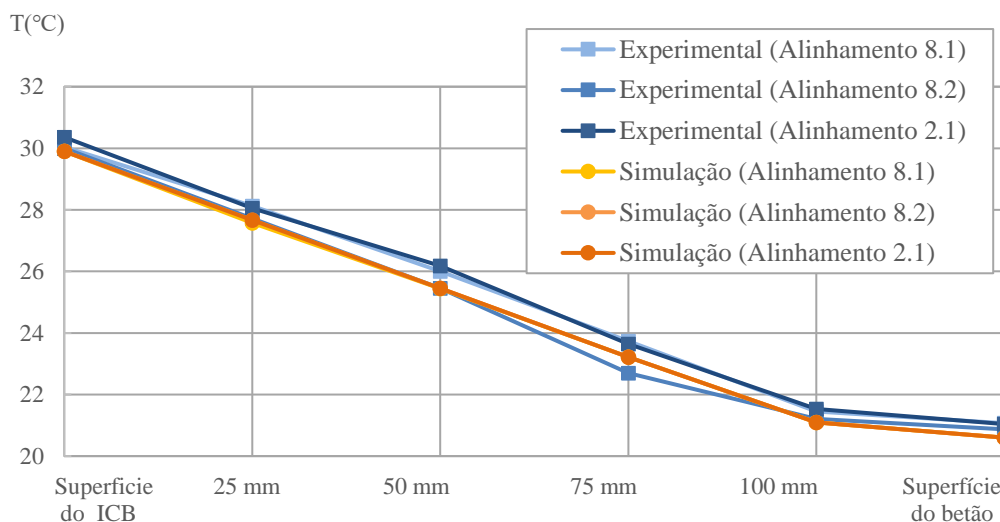


Gráfico 4.9 – Variação da temperatura nos pontos correspondentes aos três alinhamentos do modelo 2, na situação de verão.

O Gráfico 4.10 apresenta a comparação entre as temperaturas obtidas na simulação e as medições efetuados no provete ao longo de 48 horas.

Nos pontos mais próximos do exterior verifica-se uma melhor aproximação entre as curvas da simulação e as curvas da campanha experimental, havendo uma diferença de 1°C, no máximo, nas restantes curvas, que pode ser justificada devido à incerteza das medições efetuadas pelos termopares e à variação das resistências térmicas do ar na câmara climática.

Os resultados obtidos para o caso 2 da situação de inverno apresentados no Gráfico 4.11 são idênticos aos resultados obtidos para o caso 1 da situação de inverno, verificando uma melhor aproximação das curvas representantes dos pontos mais próximos do exterior e uma diferença de 1,3°C, no máximo, das restantes curvas.

Para o caso 3, representante da situação de verão, os resultados melhoram bastante, havendo uma sobreposição quase perfeita das curvas da simulação e das curvas da campanha experimental. Pode observar-se os resultados desta situação no Gráfico 4.12.

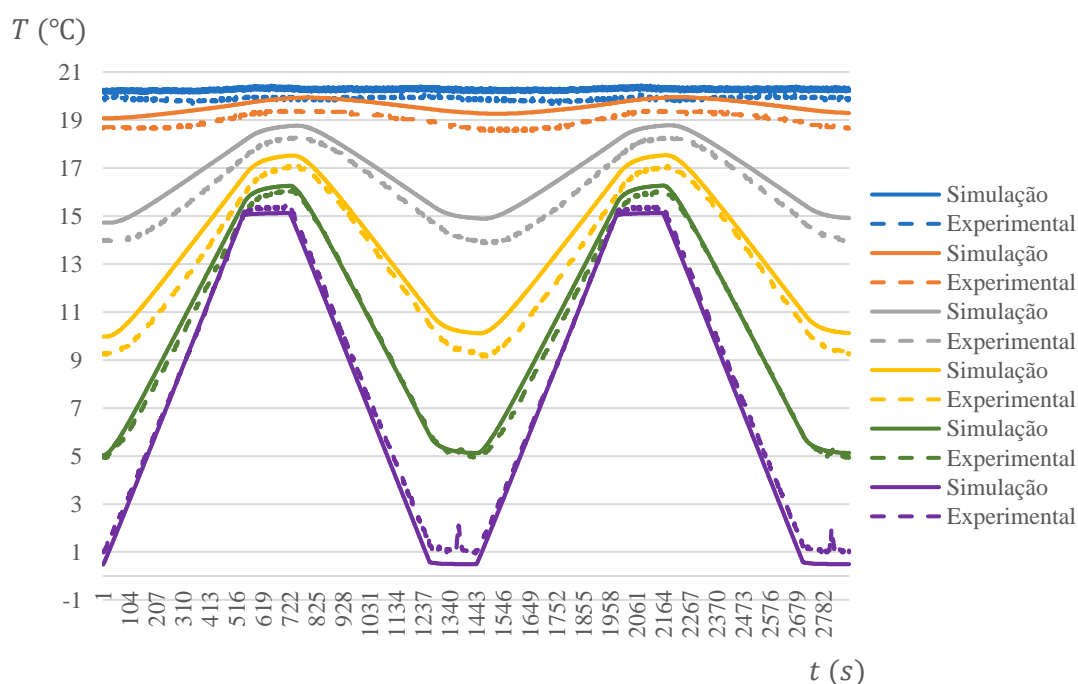


Gráfico 4.10 – Caso 1: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de inverno (variação dos 0°C aos 15°C).

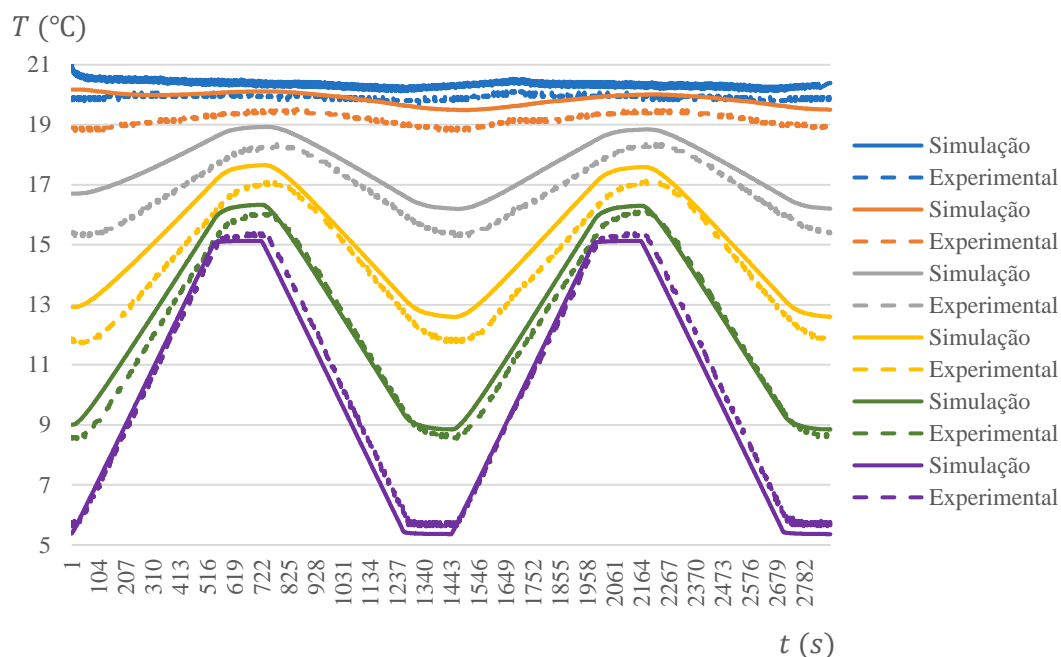


Gráfico 4.11 – Caso 2: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de inverno (variação dos 5 $^{\circ}\text{C}$ aos 15 $^{\circ}\text{C}$).

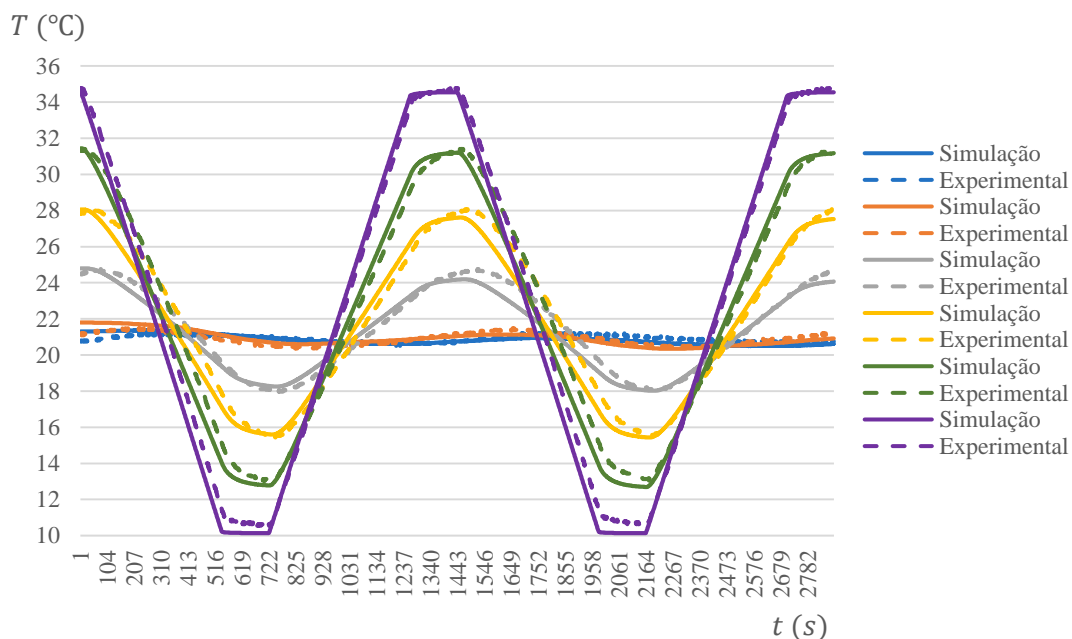


Gráfico 4.12 – Caso 3: variação da temperatura nos pontos correspondentes ao alinhamento 8.1, num período de 48 horas, numa situação de verão (variação dos 10 $^{\circ}\text{C}$ aos 35 $^{\circ}\text{C}$).

4.3 Casos de estudo (Modelos em estado seco e saturado)

Neste ponto os resultados expressam uma análise detalhada dos fluxos de calor nos três casos de estudo, efetuando-se comparações entre os modelos admitindo o estado seco e saturado das camadas de aglomerado de cortiça e substrato.

Para uma análise detalhada dos casos de estudo começou-se por comparar os resultados do modelo com MD seco e saturado e assim analisar o comportamento do modelo sem a colocação de substrato.

Através do Gráfico 4.13 verifica-se que os fluxos de calor diminuem em cerca de 23% quando o modelo se encontra seco, um valor muito próximo da diminuição da condutibilidade térmica que é de cerca de 26% quando a MD se encontra no estado seco.

Após a análise do modelo sem substrato, adicionou-se uma camada de substrato do tipo *roof II* obtendo-se os resultados expressos no Gráfico 4.14 que indicam uma diminuição de cerca de 29% nos fluxos de calor quando o modelo se encontra seco. Neste caso a diminuição nos fluxos de calor é bastante menor quando comparado com o valor de diminuição da condutibilidade térmica que é de cerca de 59% quando o substrato se encontra no estado seco.

No Gráfico 4.15 observam-se os resultados obtidos no modelo com substrato do tipo *roof IV* que tem uma diminuição de cerca de 77% na condutibilidade térmica quando este se encontra no estado seco. Neste gráfico pode verificar-se que a diminuição nos fluxos de calor do modelo quando se encontra no estado seco é de cerca de 36%.

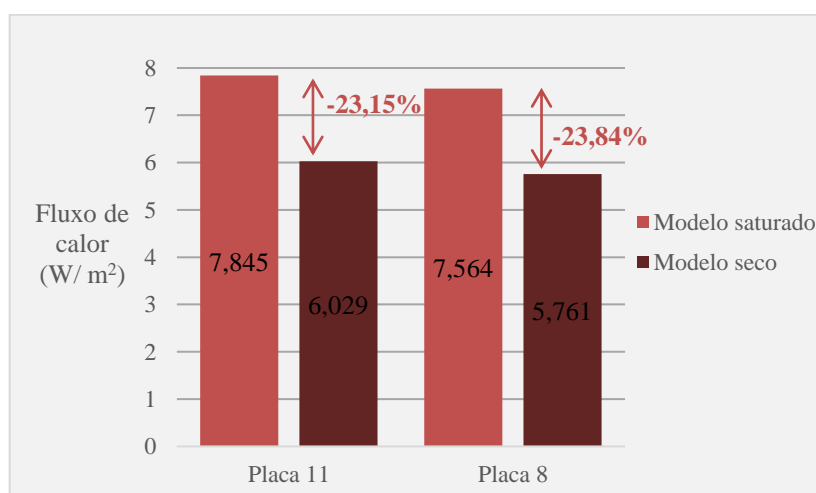


Gráfico 4.13 – Fluxos de calor ao longo do modelo com MD seco e saturado.

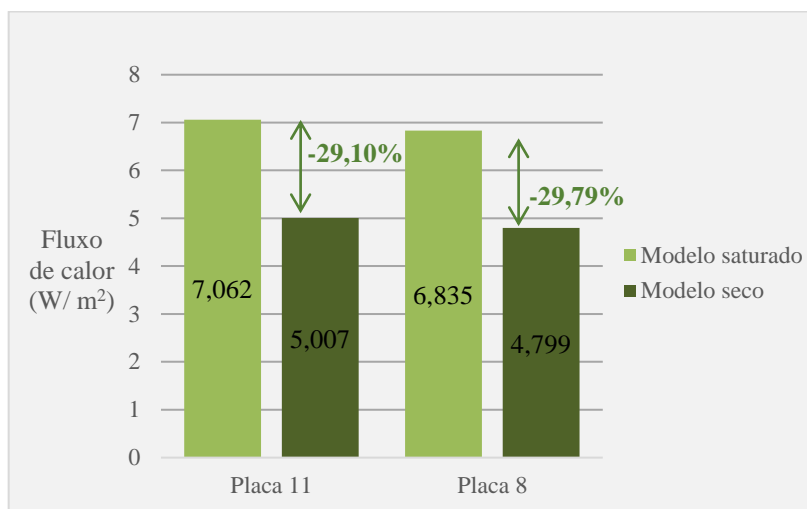


Gráfico 4.14 – Fluxos de calor ao longo do modelo com substrato do tipo *roof II* seco e saturado.



Gráfico 4.15 – Fluxos de calor ao longo do modelo com substrato do tipo *roof IV* seco e saturado.

4.3.1 Comparação entre casos de estudo

Após a análise de cada caso de estudo efetuou-se uma comparação entre os três modelos de modo a perceber qual seria a solução com menores fluxos de calor. No Gráfico 4.16 temos a comparação dos fluxos de calor dos diferentes modelos no estado seco e verifica-se que o modelo que tem menor fluxo de calor é o modelo com o substrato do tipo *roof IV*.

No estado saturado, Gráfico 4.17, a comparação dos fluxos de calor dos diferentes modelos revela que o modelo com menor fluxo de calor é o modelo com substrato do tipo *roof II*. Estes resultados devem-se ao facto do substrato do tipo *roof IV* ter uma condutibilidade térmica menor quando comparado com o substrato do tipo *roof II*, no estado seco. Pelo contrário, no estado saturado, o substrato do tipo *roof II* tem uma menor condutibilidade térmica quando comparado com o substrato do tipo *roof IV*.

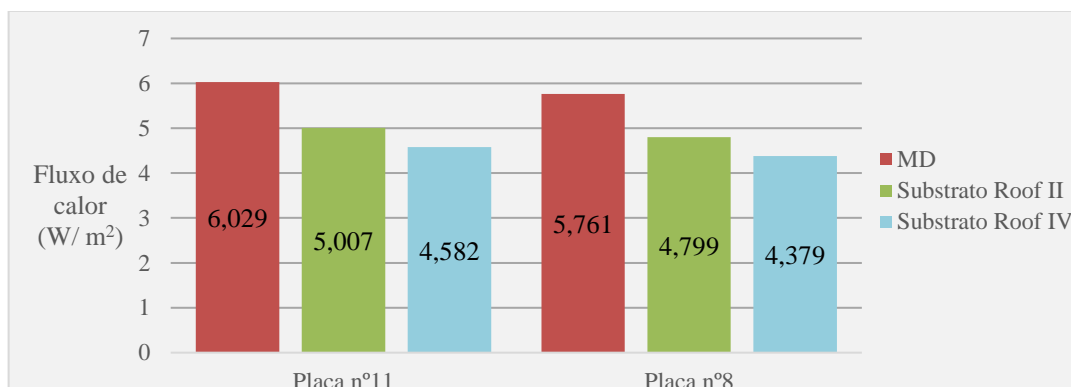


Gráfico 4.16 – Fluxos de calor ao longo dos modelos correspondentes aos três casos de estudo (seco).

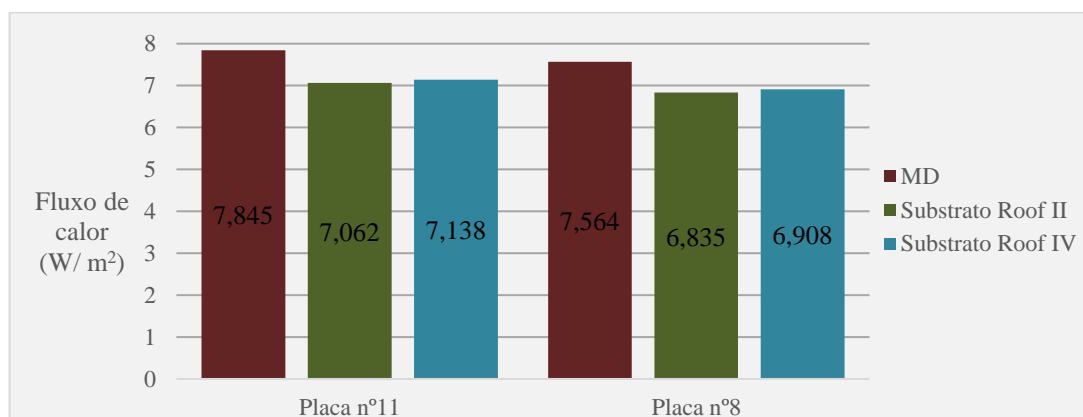


Gráfico 4.17 – Fluxos de calor ao longo dos modelos correspondentes aos três casos de estudo (saturado).

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas ao longo do estudo da presente dissertação e sugestões para a realização de trabalhos futuros no âmbito do tema apresentado.

5.1 Conclusões

Numa primeira parte, efetuou-se a análise do modelo 1D do sistema multicamada, obtendo-se as seguintes conclusões:

- A sobreposição das curvas do procedimento experimental e das curvas das simulações revela resultados muito próximos;
- A diferença entre a medição de alguns termopares e os resultados de simulação podem dever-se à incerteza de medição dos termopares, assim como à incerteza associada ao seu posicionamento;
- Com base nos resultados obtidos considerou-se que o modelo 1D ficou validado.

Numa segunda parte, efetuou-se uma análise do modelo 2D de um sistema de cobertura, concluindo-se que:

- O isolamento nas laterais do modelo 2D é fundamental para garantir fluxos de calor unidirecionais;
- O tubo de drenagem colocado no modelo e o espaçamento existente entre a laje de betão e a camada de ICB não são relevantes para a diminuição dos fluxos de calor;
- Em regime permanente, a sobreposição das curvas das simulações e das curvas da campanha experimental, em regime permanente, revelou resultados muito próximos;
- As diferenças existentes entre a medição dos termopares (na situação de verão) pode dever-se ao reposicionamento dos termopares após intervenção no provete;
- A sobreposição das curvas das simulações e das curvas da campanha experimental, em regime transiente, em ambas as situações de inverno, não coincide perfeitamente havendo diferenças que se podem dever às incertezas das medições dos termopares e às condutâncias térmicas dos ambientes que foram calculadas e colocadas no *software* como constantes, no entanto, em regime transiente há uma elevada dinâmica dos ambientes exterior e interior;
- No caso da situação de verão, a sobreposição das curvas das simulações e das curvas da campanha experimental, em regime transiente, revelam resultados coincidentes;

- Com base nos resultados obtidos, o modelo 2D do sistema de cobertura é considerado validado.

Na última parte do trabalho, procedeu-se à implementação e análise de três casos de estudo, concluindo-se que:

- No modelo com MD há uma diminuição de cerca de 23% dos fluxos de calor, entre os estados saturado e seco, valor bastante próximo da percentagem de diminuição da condutibilidade térmica, entre os estados saturado e seco;
- Nos modelos com substrato há uma diminuição entre 30% a 35% dos fluxos de calor, entre os estados saturado e seco;
- Em estado seco, o modelo que apresenta menores valores de fluxos de calor é o modelo com o substrato do tipo *roof IV* porque este tipo de solo apresenta o menor valor de condutibilidade térmica em estado seco;
- Em estado saturado, o modelo que apresenta menores valores de fluxos de calor é o modelo com o substrato do tipo *roof II* porque este tipo de solo apresenta o menor valor de condutibilidade térmica em estado saturado.

5.2 Trabalhos futuros

Para análise de um modelo completo de uma cobertura verde é necessário a colocação da vegetação, que apresenta complexidade adicional devido à ocorrência de diversos fenómenos associados como por exemplo a evapotranspiração.

Sugere-se como trabalhos futuros a implementação de um modelo de simulação de cobertura verde para validação do mesmo, através da obtenção dos fluxos de calor e temperatura. Se possível, realizar campanha experimental em simultâneo para comparação de resultados.

O modelo deve ser avaliado a seco e com molhagem para análise da alteração do comportamento térmico, devido à presença de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. William, A. Goodwell, M. Richardson, P. V. V Le, P. Kumar, and A. S. Stillwell, “An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies,” *Ecol. Eng.*, vol. 95, pp. 1–9, 2016.
- [2] K. Vijayaraghavan, “Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 740–752, 2016.
- [3] J. Coma, A. de Gracia, M. Chàfer, G. Pérez, and L. F. Cabeza, “Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs,” *Energy Build.*, vol. 144, pp. 175–180, 2017.
- [4] U. Berardi, A. GhaffarianHoseini, and A. GhaffarianHoseini, “State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs,” *Appl. Energy*, vol. 115, pp. 411–428, 2014.
- [5] N. Culnane *et al.*, “Growing green guide.” pp. 1–142, 2014.
- [6] “Zinco.” [Online]. Available: <http://www.zinco.pt/>. [Accessed: 20-May-2017].
- [7] N. Pargana, M. D. Pinheiro, J. D. Silvestre, and J. De Brito, “Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings,” *Energy Build.*, vol. 82, pp. 466–481, 2014.
- [8] F. Barreca and C. R. Fichera, “Thermal insulation performance assessment of agglomerated cork boards,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 96–103, 2016.
- [9] T. M. Mata, A. Martins, J. C. G. Esteves, and S. T. Ana, “Carbon footprint of the insulation cork board,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 925–932, 2017.
- [10] J. Sierra-Pérez, J. Boschmonart-Rives, A. C. Dias, and X. Gabarrell, “Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings,” *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 97–107, 2016.
- [11] N. Simões, R. Fino, L. Silva, J. P. Sousa, and C. Manuel, “MDFachada e MDCobertura: revestimento personalizável em cortiça expandida,” *Construção Mag.*, vol. 65, no. jan/fev, pp. 30–36, 2015.
- [12] PHYSIBEL, “Manual BISCO version 11.0w,” pp. 1–92, 2016.
- [13] PHYSIBEL, “Manual BISTRA version 3.1w,” pp. 1–54, 2011.

- [14] Lawrence Berkeley National Laboratory, “THERM 2.0: for analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Buildings Products,” no. June, p. 201, 1998.
- [15] P. dos Santos and L. Matias, “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edificios.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 1–171, 2006.