



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Estudo Experimental da Ventilação e do
Comportamento Térmico de uma Cobertura em Telha
Cerâmica com Beiral Ventilado e Sub-telha***

Luís Pedro Rodrigues Almeida

Leiria, setembro de 2013



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Estudo Experimental da Ventilação e do
Comportamento Térmico de uma Cobertura em Telha
Cerâmica com Beiral Ventilado e Sub-telha***

Luís Pedro Rodrigues Almeida

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor João António Esteves Ramos,
Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de
Leiria

Leiria, setembro de 2013

*Dedico esta dissertação aos meus pais
como forma da minha gratidão*

Agradecimentos

É com muita satisfação que expresso aqui o mais profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram a realização deste trabalho possível.

Gostaria antes de mais agradecer ao Professor Doutor João António Esteves Ramos, meu orientador, pelo imprescindível e valioso apoio prestado em todas as fases de execução desta dissertação, desde a ideia original até a redacção, o qual foi sempre pronto e profícuo, a minha sincera gratidão e profundo reconhecimento.

À empresa Umbelino Monteiro, S.A. desejo manifestar o meu agradecimento pelo interesse manifestado no desenvolvimento do trabalho e pela pronta disponibilidade na construção da cobertura da célula de teste.

À empresa Prélis, S.A., agradeço a disponibilidade do tijolo térmico e da mão de obra para a construção de estrutura de alvenaria da envolvente exterior vertical.

À Escola Superior e Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria pela disponibilização do espaço fornecido para a construção da célula de teste.

Aos meus colegas e amigos que, de uma forma ou outra, me apoiaram ao longo da elaboração desta dissertação.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais pelo apoio e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados e pelo constante encorajamento a fim de prosseguir a elaboração deste trabalho.

A todos, um grande Obrigado!

Resumo

Os métodos tradicionais utilizados na construção, envolvendo soluções não sustentáveis e novos regulamentos na área do desempenho térmico e ambiental dos edifícios, têm vindo a aumentar o desenvolvimento de novos projectos com incorporação de tecnologias passivas. Este estudo foi concebido para estudar o impacto da ventilação natural gerado entre o lado interior da telha cerâmica e os canais da sub-telha ondulada para coberturas com beiral ventilado, assim como a análise do seu desempenho térmico através da avaliação das transferências de calor na telha cerâmica e também na caixa-de-ar. Foi construída uma célula de teste e testada sob as condições exteriores para se obter dados de temperatura a partir do desvão e do telhado, de modo a comparar o fluxo de calor, em regime transiente. Observando os resultados, conclui-se que a utilização de telhado ventilado reduz as transferências de calor entre as camadas da cobertura. Os resultados experimentais indicaram que o número de Reynolds é inferior a 1800 e a velocidade média do ar foi de 0,2 m/s. Estes resultados comprovam que o fluxo de ar de ventilação natural é laminar, principalmente durante condições quentes de verão com elevada radiação solar.

Palavras-chave: Fluxo transiente de calor, telhado com beiral ventilado, ventilação natural na cavidade, telha cerâmica, Tecnologias passivas de construção.

Abstract

The traditional methods used in construction, involving unsustainable solutions and the new regulations in the area of thermal and environmental performance of buildings, have been increasing the development of new projects incorporating passive technologies. This research was designed to study the impact of natural ventilation generated between of the lower side of the ceramics tiles and the channels in the under roof systems for roofs with vented eaves, as well as the analysis of the thermal performance through the evaluation of heat transfer on the ceramic tile and also in the ventilated layer. It was built a cell-test and tested under outdoor conditions to obtain temperature data from the attic and the roof in order to compare the heat flux, in transient regime. Observing the results, it is concluded that the use of ventilated roof reduces the heat transfer between of the roof layers. The experimental results indicated that the Reynolds number is bottom a 1800 and the average velocity of the air was of 0,2 m/s. These results prove that the flow air natural ventilation is laminar especially during hot summer conditions with high solar radiation.

Key-Words: Transient heat flow, roof with ventilated eaves, Natural ventilation of the cavity, ceramic tile, passive construction technologies.

Índice de Figuras

FIGURA 2.1- PRINCIPAIS TIPOS DE REVESTIMENTOS APLICADOS NAS COBERTURAS INCLINADAS.	5
FIGURA 2.2- SOLUÇÕES ESTRUTURAIS CONSTRUTIVAS DE COBERTURA COM BEIRAL VENTILADO.	7
FIGURA 2.3- ACESSÓRIOS PARA FIXAÇÃO DAS TELHAS CERÂMICAS.	7
FIGURA 2.4- SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA EXECUÇÃO DA CUMEEIRA.	8
FIGURA 2.5- MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NUMA COBERTURA VENTILADA.	9
FIGURA 2.6- TROCAS DE CALOR DE UMA SECÇÃO (<i>i</i>) DA CAIXA-DE-AR.	10
FIGURA 2.7- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA COBERTURA FORMADA POR DUAS PLACAS.	10
FIGURA 2.8- PERCENTAGEM DE ECONOMIA DA ENERGIA DE UMA COBERTURA VENTILADA EM SITUAÇÕES DE FLUXO LAMINAR E TURBULENTO DA CAIXA-DE-AR.	13
FIGURA 2.9- ILUSTRAÇÃO GRÁFICA DA CORRELAÇÃO OBTIDA ENTRE A TAXA DE FLUXO DE AR INDUZIDA E A DIFERENÇA DE TEMPERATURA DO AR ENTRE A CAIXA-DE-AR E O AR EXTERIOR.	14
FIGURA 2.10- DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE SUPERIOR E INFERIOR DA CAVIDADE.	16
FIGURA 2.11- VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA CAVIDADE (VENTILADA E NÃO VENTILADA).	16
FIGURA 2.12- DESEMPENHO DA COBERTURA COM ISOLAMENTO APLICADO NAS VERTENTES.	17
FIGURA 2.13- DESEMPENHO DA COBERTURA COM ISOLAMENTO APLICADO NA ESTEIRA HORIZONTAL.	17
FIGURA 2.14- SISTEMA INTEGRADO DE VENTILAÇÃO PASSIVA DA COBERTURA E HABITAÇÃO.	18
FIGURA 3.1- LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA DE TESTE.	22
FIGURA 3.2- ESBOÇOS INICIAIS DA CONSTRUÇÃO DA CÉLULA-TESTE.	23
FIGURA 3.3- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CÉLULA-TESTE.	23
FIGURA 3.4- CONSTRUÇÃO DAS PAREDES DA CÉLULA-DE-TESTE.	24
FIGURA 3.5- APLICAÇÃO DA PLACA SUB-TELHA NATURTHERM.	24
FIGURA 3.6- CONSTRUÇÃO DA COBERTURA DA CÉLULA DE TESTE.	25
FIGURA 3.7- EXECUÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE DA MEMBRANA IMPERMEÁVEL E DO TELHÃO.	25
FIGURA 3.8- APLICAÇÃO DA MEMBRANA E FIXAÇÃO MECÂNICA DO TELHÃO COM GRAMPO APROPRIADO.	25
FIGURA 3.9- TELHA VENTILADORA E REMATES LATERAIS.	26
FIGURA 3.10- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA (<i>WIRELESS VANTAGE PRO2™ PLUS</i>).	27
FIGURA 3.11- SENSORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA DO AR (<i>LOGTAG® HAXO-8</i>).	27
FIGURA 3.12- INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO MULTIFUNÇÕES, <i>TESTO 435</i>	28
FIGURA 3.13- SONDA DE MEDIÇÃO DE MOLINETE.	28
FIGURA 3.14- SONDA DE SUPERFÍCIE.	28
FIGURA 3.15- LOCALIZAÇÃO DOS REGISTRADORES LOGTAG NA COBERTURA DA CÉLULA-TESTE.	29
FIGURA 3.16- LOCALIZAÇÃO DOS REGISTRADORES LOGTAG NO INTERIOR DA CÉLULA-TESTE.	30
FIGURA 3.17- REGISTO FOTOGRÁFICO DA INSTALAÇÃO DOS SENSORES LOGTAG.	30
FIGURA 3.18- INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES NA SUPERFÍCIE EXTERIOR DA TELHA E DO ANEMÓMETRO DE VELOCIDADE NA CAIXA-DE-AR.	31
FIGURA 3.19- INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES. A) SUPERFÍCIE INFERIOR DA TELHA CERÂMICA, B) SUPERFÍCIE SUPERIOR DA PLACA SUB-TELHA.	31
FIGURA 3.20- INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO: A) REGISTRADOR LOGTAG NA PLACA NATURTHERM, B) INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO MULTIFUNÇÕES, <i>TESTO 435</i>	32
FIGURA 3.21- FOTO DA CÉLULA DE TESTE.	33

FIGURA 3.22- CIRCUITO TÉRMICO: FLUXOS DE CALOR NA COBERTURA NUM INSTANTE.	35
FIGURA 3.23- MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA COBERTURA.	36
FIGURA 3.24- FLUXO DE CALOR VARIÁVEL PARA A SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO CERÂMICO.	38
FIGURA 3.25- FLUXO DE CALOR VARIÁVEL CORRESPONDENTE À CAIXA-DE-AR DA COBERTURA.	40
FIGURA 3.26- FLUXO DE CALOR VARIÁVEL TRANSMITIDO AO DESVÃO DA COBERTURA ATRAVÉS DA PLACA SUB-TELHA.	42
FIGURA 4.1- DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA DESDE O DIA 11 A 14 DE MAIO.	44
FIGURA 4.2- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DA COBERTURA DESDE O DIA 11 A 14 DE MAIO.	45
FIGURA 4.3- DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA DESDE O DIA 17 A 20 DE MAIO.	46
FIGURA 4.4- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DA COBERTURA DESDE O DIA 17 A 20 DE MAIO.	47
FIGURA 4.5- DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA DESDE O DIA 23 A 26 DE MAIO.	48
FIGURA 4.6- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DA COBERTURA DESDE O DIA 23 A 26 DE MAIO.	49
FIGURA 4.7- DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA DESDE O DIA 31 DE MAIO A 3 DE JUNHO.	50
FIGURA 4.8- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DA COBERTURA DESDE O DIA 31 DE MAIO A 3 DE JUNHO.	51
FIGURA 4.9- DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA DESDE O DIA 6 A 9 DE JUNHO.	52
FIGURA 4.10- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DA COBERTURA DESDE O DIA 6 A 9 DE JUNHO.	53
FIGURA 4.11- COMPORTAMENTO PSICOMÉTRICO DO AR DA CAIXA-DE-AR DA COBERTURA.	54
FIGURA 4.12- RESUMO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DESDE O DIA 5 A 11 DE JUNHO.	55
FIGURA 4.13- RESUMO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DESDE O DIA 25 A 30 DE JUNHO.	55
FIGURA 4.14- COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE DO AR NA CAIXA-DE-AR EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR EM DIAS DE CÉU NUBLADO.	58
FIGURA 4.15- COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE DO AR NA CAIXA-DE-AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EXTERIOR EM DIAS DE CÉU NUBLADO.	58
FIGURA 4.16- COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE DO AR NA CAIXA-DE-AR EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR EM DIAS DE CÉU LIMPO.	59
FIGURA 4.17- COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE DO AR NA CAIXA-DE-AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EXTERIOR EM DIAS DE CÉU LIMPO.	59
FIGURA 4.18- COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O FLUXO DE AR INDUZIDO.	60
FIGURA 4.19- COMPARAÇÃO ENTRE O CAUDAL MÁSSICO E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE INTERIOR DA TELHA E DO AR DA CAIXA-DE-AR.	61
FIGURA 4.20- COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE EXTERIOR COM A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE INTERIOR DA TELHA CERÂMICA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.	62
FIGURA 4.21- COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA CAIXA-DE-AR EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.	63
FIGURA 4.22- COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA CAIXA-DE-AR COM A RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E TEMPERATURA AMBIENTE EXTERIOR.	64
FIGURA 4.23- CORRELAÇÃO ENTRE A DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES DA CAIXA-DE-AR E A INTENSIDADE DA RADIAÇÃO INCIDENTE.	64
FIGURA 4.24- COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA E O ACUMULADO NA TELHA CERÂMICA.	67
FIGURA 4.25- COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA PARA A TELHA CERÂMICA E O DEVOLVIDO PARA A ENVOLVENTE EXTERIOR PELA TELHA CERÂMICA NO DIA 15 DE JUNHO.	67
FIGURA 4.26- COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA NO REVESTIMENTO CERÂMICO E O FLUXO DE CALOR QUE FICA ACUMULADO NA TELHA CERÂMICA NO DIA 15 DE JUNHO.	68
FIGURA 4.27- COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA NA TELHA CERÂMICA E O FLUXO DE CALOR QUE SAI PARA O AR DA CAIXA-DE-AR NO DIA 15 DE JUNHO.	68
FIGURA 4.28- COMPARAÇÃO DO FLUXO DE CALOR DISSIPADO POR VENTILAÇÃO NATURAL, Q_v , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DA TELHA CERÂMICA, $T(X2)$ PARA O DIA 26 DE JUNHO.	70
FIGURA 4.29- COMPARAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DISSIPADA POR VENTILAÇÃO NATURAL, Q_v E DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA O DESVÃO, Q_c , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DA TELHA CERÂMICA, $T(X2)$ PARA O DIA 26 DE JUNHO.	70

FIGURA 4.30- COMPARAÇÃO DO FLUXO DE CALOR DISSIPADO POR VENTILAÇÃO NATURAL, Q_v , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DA TELHA CERÂMICA, $T(X2)$, PARA O DIA 30 DE JUNHO.	71
FIGURA 4.31- COMPARAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DISSIPADA POR VENTILAÇÃO NATURAL, Q_v E DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA O DESVÃO, Q_c , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DA TELHA CERÂMICA, $T(X2)$, PARA O DIA 30 DE JUNHO.	71
FIGURA 4.32- COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA PARA O DIA 30 NA HORA DE MAIOR FLUXO DE CALOR.	72
FIGURA 7.1- SECÇÃO TRANSVERSAL DO CANAL DA CAIXA-DE-AR.....	84

Índice de Tabelas

TABELA 2.1- VALORES DE REFLETÂNCIA SOLAR E EMITÂNCIA INFRAVERMELHA.	12
TABELA 2.2- RESUMO DOS PRINCIPAIS ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM REGIME PERMANENTE.	15
TABELA 2.3- RESUMO DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DINÂMICO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONSTRUÇÃO DE COBERTURAS.	17
TABELA 2.4- RESUMO DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DINÂMICO DE COBERTURAS INTEGRANDO SISTEMAS DE VENTILAÇÃO PASSIVA.	19
TABELA 3.1- PERÍODO DE MONITORIZAÇÃO DA CÉLULA DE TESTE E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.	32
TABELA 4.1- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 11 ATÉ AO DIA 14 DE MAIO.	43
TABELA 4.2- RESULTADOS DO ENSAIO DESDE O DIA 11 ATÉ AO DIA 14 DE MAIO.	44
TABELA 4.3- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 17 ATÉ AO DIA 20 DE MAIO.	45
TABELA 4.4- RESULTADOS DO ENSAIO DESDE O DIA 17 A 20 DE MAIO.	46
TABELA 4.5- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 23 ATÉ AO DIA 26 DE MAIO.	47
TABELA 4.6- RESULTADOS DO ENSAIO DESDE O DIA 23 A 26 DE MAIO.	48
TABELA 4.7- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 31 DE MAIO ATÉ AO DIA 3 DE JUNHO.	49
TABELA 4.8- RESULTADOS DO ENSAIO DESDE O DIA 31 DE MAIO A 3 DE JUNHO.	50
TABELA 4.9- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 6 ATÉ AO DIA 9 DE JUNHO.	51
TABELA 4.10- RESULTADOS DO ENSAIO DESDE O DIA 6 A 9 DE JUNHO.	52
TABELA 4.11- RESULTADOS OBTIDOS DA VENTILAÇÃO, VELOCIDADE MÉDIA E MÁXIMA REGISTRADA NA CAIXA-DE-AR, NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 5 A 11 DE JUNHO.	56
TABELA 4.12- RESULTADOS OBTIDOS DA DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM DE VENTILAÇÃO DESENVOLVIDA NA CAIXA-DE-AR NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 5 A 11 DE JUNHO.	56
TABELA 4.13- RESULTADOS OBTIDOS DA VENTILAÇÃO, VELOCIDADE MÉDIA E MÁXIMA REGISTRADA NA CAIXA-DE-AR NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 25 A 30 DE JUNHO.	57
TABELA 4.14- RESULTADOS OBTIDOS DA DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM DE VENTILAÇÃO DESENVOLVIDA NA CAIXA-DE-AR NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 25 A 30 DE JUNHO.	57
TABELA 4.15- RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DO AR INDUZIDO NA CAIXA-DE-AR PARA O CORRESPONDENTE DIA DE MEDIÇÃO.	60
TABELA 4.16- DADOS METEOROLÓGICOS DESDE O DIA 15 ATÉ AO DIA 18 DE JUNHO.	65
TABELA 4.17- COMPARAÇÃO DAS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR OCORRIDAS NA TELHA CERÂMICA PARA OS DIAS 15 E 16 DE JUNHO.	66
TABELA 4.18- COMPARAÇÃO DAS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR OCORRIDAS NA TELHA CERÂMICA PARA OS DIAS 17 E 18 DE JUNHO.	66
TABELA 4.19- RESUMO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS DO EXTERIOR, DA SUPERFÍCIE INTERIOR DA TELHA CERÂMICA E DO AR DA CAIXA-DE-AR DESDE O DIA 25 ATÉ A 30 DE JUNHO.	69
TABELA 4.20- RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS DO FLUXO DE CALOR MÁXIMO DE ESCOAMENTO DO AR ATRAVÉS DA CAIXA-DE-AR E FLUXO DE CALOR MÁXIMO TRANSFERIDO AO DESVÃO DA COBERTURA.	69
TABELA 4.21- RESUMO DO CÁLCULO DAS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR PARA O DIA 30 DE JUNHO.	72

Lista de Símbolos

Designação		Unidades
A_s	- Área da secção transversal	$[m^2]$
c_p	- Calor específico	$[J/Kg \text{ } ^\circ C]$
D_h	- Diâmetro hidráulico	$[m]$
g	- Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
Gr	- Número de Grashof	
$h_{(c)}$	- Coeficiente de transferência de calor por convecção	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
$h_{(r)}$	- Coeficiente de transferência de calor por radiação	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
I	- Radiação Solar Incidente	$[W/m^2]$
k	- Condutividade térmica	$[W/m \cdot ^\circ C]$
\dot{m}	- Caudal mássico do ar	$[kg/s]$
L	- Comprimento característico do volume de controlo	$[m]$
Nu	- Número de Nusselt	
Pr	- Número de Prandtl	
Q	- Fluxo de transferência de calor	$[W/m^2]$
R	- Resistência térmica	$[m^2 \cdot ^\circ C/W]$
Ra	- Número de Raleigh	
Re	- Número de Reynolds	
t	- Tempo	$[s]$
T_∞	- Temperatura do ar exterior	$[^\circ C]$
$T_{(x_1)}$	- Temperatura superfície exterior da telha cerâmica	$[^\circ C]$
$T_{(x_2)}$	- Temperatura superfície interior da telha cerâmica	$[^\circ C]$
$T_{(x_3)}$	- Temperatura superfície exterior da sub-telha	$[^\circ C]$
$T_{(x_4)}$	- Temperatura superfície intermédia da sub-telha	$[^\circ C]$
$T_{(x_5)}$	- Temperatura superfície interior da sub-telha	$[^\circ C]$

$T_{(desvão)}$	- Temperatura do ar interior do desvão	[°C]
T_{Sol_ar}	- Temperatura sol_ar	[°C]
U	- Coeficiente de transferência de calor global	[W/m ² .K]
v_{ar}	- Velocidade do ar	[m/s]
\dot{V}	- Caudal volúmico	[m ³ /s]

Símbolos gregos:

α	- Absortividade	
α_t	- Difusividade térmica	[m ² /s]
β	- Coeficiente de expansão volumétrica	[°C]
Δx	- Variação característica da largura da secção do volume de controlo	[°C]
Δy	- Variação da altura da secção	[°C]
Δz	- Variação do comprimento da secção	[°C]
ΔT	- Variação da temperatura	[°C]
ε	- Emissividade	
θ	- Ângulo de inclinação	[°]
μ	- Viscosidade dinâmica	[kg/m.s]
ρ	- Massa específica	[kg/m ³]
σ	- Constante de Stefan Boltzmann	[w/m ² .K ⁴]
ϑ	- Viscosidade cinemática	[m ² .s]
ω	- Humidade absoluta	[g/kg]

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. TIPOLOGIA DAS COBERTURAS INCLINADAS	5
2.1.1. <i>Características estruturais de coberturas em telha cerâmica</i>	6
2.1.2. <i>Estratégias de ventilação de coberturas em telha cerâmica</i>	7
2.2. PRINCÍPIOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS VENTILADAS	8
2.3. CONTROLO TÉRMICO DE COBERTURAS VENTILADAS	11
2.3.1 <i>Desempenho térmico dos materiais</i>	11
2.3.2 <i>Caracterização do escoamento do ar na caixa-de-ar</i>	12
2.3.3 <i>Estudos experimentais do comportamento térmico de coberturas</i>	15
2.4. RESUMO E CONCLUSÕES	20
3. CASO DE ESTUDO	21
3.1 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1.1. <i>Localização e orientação</i>	22
3.1.2. <i>Célula de teste: desenho e construção</i>	22
3.1.3. <i>Instrumentação utilizada e sistema de aquisição de dados</i>	26
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.2.1. <i>Procedimento, medições e dados de base</i>	29
3.2.2. <i>Condicionantes e pressupostos experimentais</i>	33
3.2.3. <i>Mecanismos da Transferência de Calor na Cobertura</i>	34
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	43
4.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E TERMO-HIGROMÉTRICO	43
4.2. ESTUDO DA VENTILAÇÃO NATURAL DA CAIXA-DE-AR	55
4.2.1 <i>Análise estatística do escoamento do ar na caixa-de-ar</i>	56
4.2.2 <i>Comparação do número de Reynolds, caudal mássico e coeficiente de transferência de calor por convecção na caixa-de-ar</i>	60
4.3. COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS MATERIAIS	62
4.3.1 <i>Comparação das temperaturas superficiais para a telha cerâmica</i>	62
4.3.2 <i>Comparação das temperaturas superficiais da caixa-de-ar</i>	63
4.4. ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DOS ELEMENTOS DA COBERTURA	65
4.4.1 <i>Análise das transferências de calor através das telhas cerâmicas</i>	65
4.4.2 <i>Análise da transferência de calor através da caixa-de-ar e da placa sub-telha</i>	69

5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	73
5.1.	CONCLUSÕES.....	73
5.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	74
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
7.	APÊNDICE.....	81

1. Introdução

Nos últimos anos, com o crescente custo relacionado com o consumo de energia e a maior sensibilidade da população para as questões relacionadas com a eficiência energética e ambiental, a conservação de energia em edifícios tem incentivado o desenvolvimento de diversas soluções que proporcionam o consumo de energia de forma sustentável. Para promover a eficiência energética dos edifícios foi introduzida em 2002 a diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético de edifícios (EPBD) tendo sido reformulada em 19 de maio de 2010, com a Diretiva 2010/31/UE. No caso Português a transposição da Diretiva levou a adotar o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), (Decreto-Lei n.º 80/2006), essencialmente para os edifícios de habitação. No entanto, o RCCTE atribui grande relevância a sistemas de refrigeração, de aquecimento e preparação de águas quentes sanitárias (AQS) atribuindo ainda pouca importância à qualidade da construção e à integração de soluções passivas (Araújo, *et al.*, 2012). A cobertura constitui um dos principais elementos da envolvente opaca dos edifícios onde a escolha dos materiais e a implementação de tecnologias passivas adequadas determinam a *performance* térmica de um edifício. As tecnologias passivas devem considerar as condições exteriores não como agentes externos indesejáveis, mas sim como recursos úteis na contenção dos requisitos de energia no aquecimento ou arrefecimento de um edifício.

O clima de Portugal é caracterizado por elevadas amplitudes térmicas entre dias amenos e noites com forte arrefecimento. As amplitudes térmicas interferem no conforto térmico dos edifícios e dificultam o planeamento de soluções que garantam a eficácia durante todo o ano. O clima Português apresenta contrastes climáticos para diversas regiões do país, com verão fresco e inverno suave no litoral norte e centro, inverno muito frio e o verão muito quente nas regiões do interior, apresentando apenas características tipicamente mediterrâneas a sul de Portugal Continental. O arquipélago dos Açores é caracterizado por

temperaturas amenas e o arquipélago da Madeira apresenta um clima com características tipicamente subtropicais. Neste contexto, a análise do desempenho térmico de um edifício deve ser efetuada conforme o clima local, no sentido de se encontrar quais as melhores estratégias a adotar na construção ou reabilitação térmica de uma edificação.

As coberturas em Portugal são tipicamente inclinadas e revestidas com telhas cerâmicas fazendo parte do património edificado Português. No entanto, este tipo de solução por vezes apresenta diversas anomalias, tais como, colonização biológica, defeitos no isolamento térmico, cor e desníveis inadequados (Garcez, *et al.*, 2012). Outro problema está associado a defeitos no sistema de ventilação, dando-se-lhe pouca importância e muitas vezes desconhecendo-se as suas vantagens. Uma das soluções passivas consiste na construção de coberturas ventiladas que diminuam a transferência de calor através do telhado, diminuindo os gastos a nível energético, e consequentemente o aumento do conforto térmico do edifício. As coberturas ventiladas podem ser definidas como um sistema de proteção cuja principal característica é a existência de uma caixa-de-ar, resultante do afastamento entre o revestimento e a placa inferior.

A caixa-de-ar promove movimentos ascendentes de ar proveniente tanto do gradiente de densidade induzida pela diferença de temperatura no ar na caixa-de-ar, ou então pela pressão do vento. Este fluxo de ar ajuda a eliminar uma parte significativa do calor transmitido a partir do telhado, nos dias de verão com maior intensidade de radiação solar. Portugal é caracterizado por valores significativamente altos de radiação solar originando elevadas temperaturas nas superfícies do telhado e na caixa-de-ar. O sobreaquecimento do revestimento da cobertura durante a incidência solar pode causar condições térmicas indesejadas nos edifícios.

Existem diferentes métodos para caracterizar o comportamento térmico de coberturas ventiladas, podendo ser testes laboratoriais, desenvolvidos em laboratório com modelos que permitam simular um telhado ventilado ou estudos de campo com a construção de células de teste, que permitem a avaliação experimental do comportamento térmico dinâmico integrado com o estudo do efeito do clima local. Estes estudos são de extrema importância para se quantificar as características dos elementos construtivos dos edifícios no desenvolvimento de novos projetos de construção sustentável.

1.1 Objetivos

- O principal objetivo desta dissertação consiste em analisar o comportamento térmico de uma cobertura com beiral ventilado, revestido com telha cerâmica, e com sub-telha, no sentido de caracterizar as vantagens da integração de uma caixa-de-ar ventilada. Para o efeito recorre-se à construção de uma célula-de-teste para se proceder a uma análise dinâmica da cobertura, analisando a influência que a ventilação da caixa-de-ar oferece em relação ao comportamento térmico e conforto térmico.
- Analisar a metodologia experimental e a instrumentação que permita caracterizar as transferências de calor e os perfis de temperatura e humidade na caixa-de-ar, assim como, as correspondentes trocas de calor para os diferentes materiais empregues na solução construtiva.
- Caracterizar a ventilação natural da caixa-de-ar, analisar a temperatura superficial dos materiais e transferências de calor globais através da cobertura.

1.2 Estrutura da dissertação

De acordo com os objetivos mencionados, a presente dissertação está estruturada em cinco Capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro Capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objetivos deste trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.

Neste Capítulo é feito o estado da arte das coberturas inclinadas, apresentando-se uma revisão da literatura sobre métodos de avaliação das transferências de calor e do desempenho térmico de diversos tipos de soluções construtivas de coberturas. São apresentados diversos estudos em regime permanente e simulações para além dos estudos em regime dinâmico.

Capítulo 3 – Caso de Estudo.

Neste Capítulo descreve-se a metodologia experimental, bem como a célula-de-teste em estudo e a instrumentação utilizada.

Capítulo 4 – Apresentação e Análise de Resultados.

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos das medições efetuadas, fazendo-se, também, a respetiva análise, tais como a avaliação do comportamento térmico e termo-higrométrico, estudo da ventilação natural, análise da temperatura superficial dos materiais e transferências de calor através dos elementos da cobertura.

Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros.

Este último Capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, sendo ainda apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

No presente capítulo é apresentada uma abordagem das principais tipologias das coberturas inclinadas usadas em Portugal. Apresenta-se ainda uma revisão dos mecanismos de transferência de calor que decorrem em coberturas ventiladas, das propriedades térmicas de diversos materiais e das propriedades do escoamento do ar que circula na caixa-de-ar de uma cobertura ventilada. A revisão englobou a análise de diversas publicações, permitindo fundamentar cientificamente as melhores estratégias de controlo térmico a adotar na construção ou reabilitação de coberturas em edifícios, em particular na componente da eficiência energética e da construção sustentável.

2.1. Tipologia das coberturas inclinadas

As coberturas inclinadas são construídas em betão armado (laje maciça ou aligeirada) ou então numa estrutura metálica ligeira. Na camada exterior destas coberturas são aplicados diversos tipos de revestimentos que tornam a cobertura impermeável, podendo ser opacos ou translúcidos, caracterizados por diversas configurações e propriedades apresentando-se no organograma seguinte uma breve revisão dos principais tipos existentes, Figura 2.1.

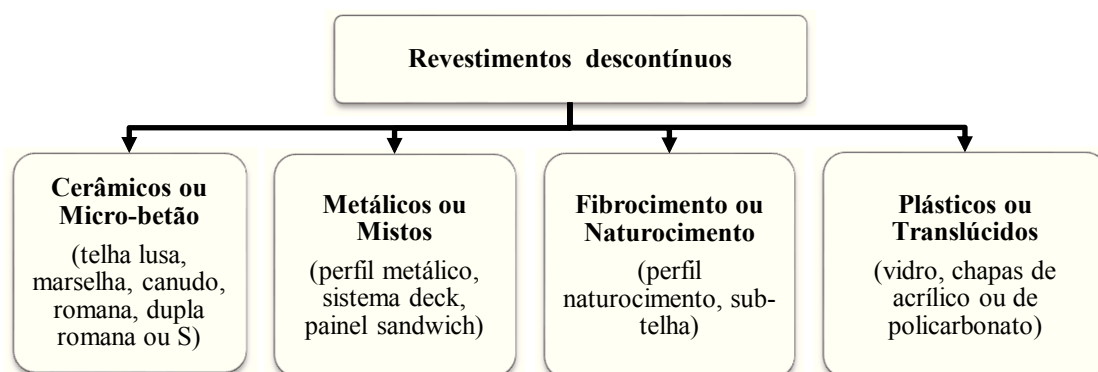


Figura 2.1- Principais tipos de revestimentos aplicados nas coberturas inclinadas.

Fonte: Adaptado de (Borges, 2008) e de (Garcez, 2009).

Os revestimentos fornecem uma proteção importante ao interior da habitação, contra os agentes atmosféricos, permitindo a separação das condições ambientais locais exteriores das condições de conforto térmico no interior de um edifício. As transferências de calor através da cobertura são uma resposta às variações das condições meteorológicas sobre o revestimento da cobertura. No entanto, o revestimento aplicado isoladamente não permite por si só cumprir as necessidades de conforto térmico dos edifícios, pelo que, é importante a aplicação de outros materiais (isolamento térmico) que permitam garantir as condições térmicas desejadas e simultaneamente diminuir os custos relacionados com a climatização dos edifícios. Atualmente são incorporados materiais isolantes como estratégia em assegurar o conforto térmico dos edifícios, em que, os principais tipos de materiais isolantes aplicados são:

- Mantas ou placas de lã mineral (MW)
- Espuma rígida de poliuretano (PUR)
- Placas de aglomerado de cortiça expandida (ICB)
- Placas de poliestireno expandido (EPS) ou extrudido (XPS)

Observa-se que nos atuais sistemas construtivos de coberturas inclinadas o material isolante é aplicado na vertente inclinada sob o revestimento ou na esteira horizontal, em conformidade com as soluções apresentadas no ITE 50 do LNEG. Na análise das diferentes tipologias de coberturas inclinadas a revisão abrangeu particularmente as que empregam o isolamento térmico na vertente da cobertura revestida com telha cerâmica.

2.1.1. Características estruturais de coberturas em telha cerâmica

Na generalidade, uma cobertura inclinada em telha cerâmica integra principalmente a telha cerâmica como revestimento, uma estrutura secundária que sustenta o revestimento (ripas e contra ripado), materiais isolantes e uma estrutura resistente que suporta a totalidade da cobertura. Uma tipologia de cobertura que permite garantir as condições de conforto térmico do desvão da cobertura é caracterizada pela colocação do isolamento sob a telha cerâmica com o beiral ventilado (Figura 2.2-a). Recentemente, uma nova estratégia construtiva aplicada principalmente na reabilitação de coberturas inclinadas, consiste numa tipologia que utiliza placas sub-telha que permitem reforçar a estanquidade da cobertura com elevada capacidade de isolamento e ainda apresenta a capacidade de favorecer a ventilação da estrutura devido à sua configuração ondulada (Figura 2.2-b).

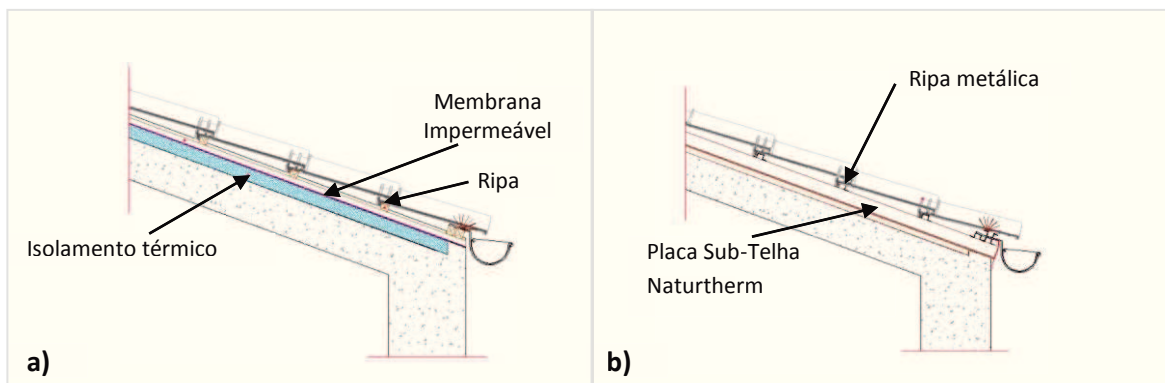


Figura 2.2- Soluções estruturais construtivas de cobertura com beiral ventilado.
a) Isolamento sob a telha; b) isolamento integrado em placa sub-telha.

Fonte: Adaptado de (Dep. Técnico - Umbelino Monteiro S.A.)

2.1.2. Estratégias de ventilação de coberturas em telha cerâmica

Uma cobertura ventilada consiste numa estrutura que funciona com uma caixa-de-ar ventilada desde o beirado até à cumeeira, integrando diversas estratégias de ventilação na fixação e no suporte do revestimento. Destaca-se a fixação mecânica do beiral através de grampos metálicos apropriados, sem qualquer tipo de argamassa que possa obstruir a entrada e a saída do ar e dificultar a sua ventilação (Figura 2.3-a,b). A estrutura de suporte do revestimento exterior é constituída por ripas perfuradas permitindo assegurar a circulação de ar na totalidade da área sob a face interior da telha (Figura 2.3-c).



Figura 2.3- Acessórios para fixação das telhas cerâmicas.

Fonte: (Guia de Aplicação ADVANCE Lusa - Umbelino Monteiro S.A.)

O escoamento do ar no interior da caixa-de-ar é originado por convecção natural, que é aquecido pela ação do calor ganho pela radiação solar na telha. Para potenciar a circulação do ar são ainda aplicadas telhas ventiladoras no telhado. Na execução da cumeeira é aplicada uma membrana impermeável e ventiladora, (Figura 2.4-a) com telhão assente sobre remate, suportado e fixo mecanicamente (Figura 2.4-b,c).

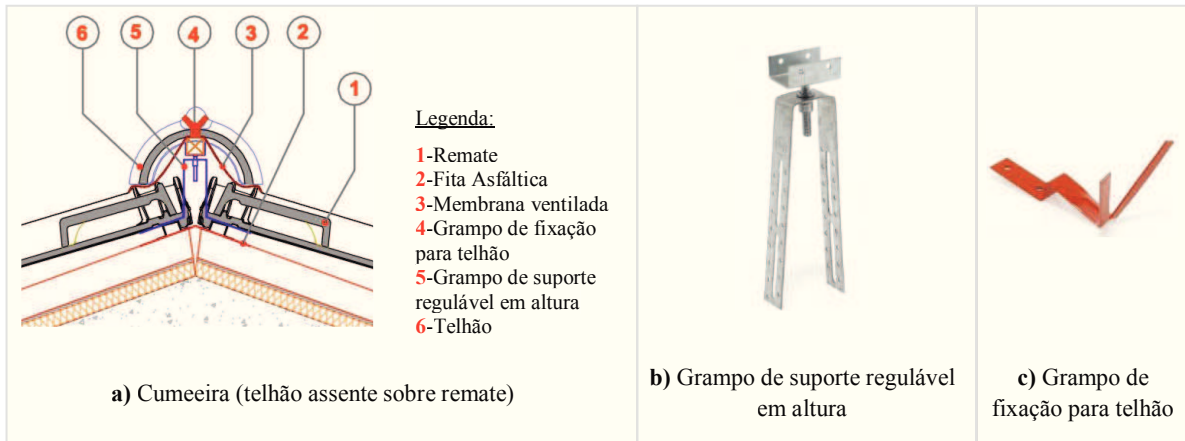


Figura 2.4- Soluções construtivas na execução da cumeeira.

Fonte: (Guia de Aplicação ADVANCE Lusa - Umbelino Monteiro S.A.)

2.2. Princípios da transferência de calor em coberturas ventiladas

A quantidade de calor que atravessa uma cobertura é determinada pelos mecanismos de transferência de calor e correspondentes balanços térmicos. A diferença de temperatura entre o exterior e o interior em cada momento determina o sentido do fluxo de calor por condução nos materiais constituintes, nas diversas camadas. A potência calorífica transmitida quer para o espaço interior (Q_{in}), quer para o exterior (Q_{out}), resulta dos balanços energéticos por radiação (Q_{Rad}) e por convecção (Q_{Conv}) nas superfícies respectivas.

$$Q_{in} = Q_{in.Conv} + Q_{in.Rad} \quad [W] \quad (1)$$

$$Q_{out} = Q_{out.Conv} + Q_{out.Rad} \quad [W] \quad (2)$$

O estudo de uma cobertura ventilada requer ainda a análise quantitativa do fluxo de calor que é dissipada pela caixa-de-ar ventilada (Q_v), apresentada pela equação (3).

$$Q_v = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad [W] \quad (3)$$

em que,

\dot{m}	=	Caudal mássico de ar, [kg/s]
c_p	=	Calor específico do ar a pressão constante, [J/kg.K]
T_{in} e T_{out}	=	Temperatura do ar nas secção de entrada e de saída da caixa-de-ar, respetivamente, [K]

A Figura 2.5 ilustra que a quantidade total de energia ganha da incidência solar (Q_{SO}) fica sujeita ao balanço de transferência de calor no revestimento exterior da cobertura, é trocada

na caixa-de-ar ventilada (Q_v) e transmitido por condução e convecção para o desvão no interior.

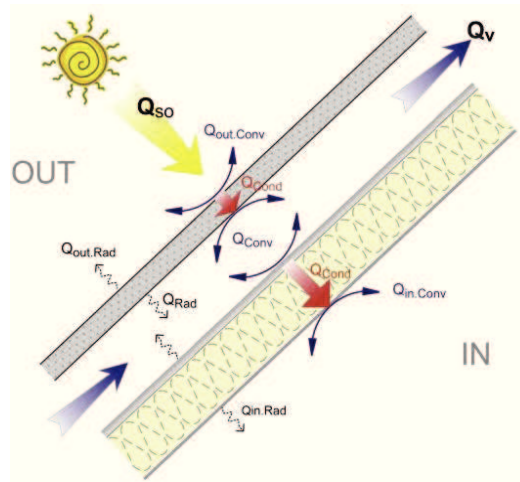


Figura 2.5- Mecanismos de transferência de calor numa cobertura ventilada.

Fonte: (Lee, *et al.*, 2009)

Susanti, *et al.*, 2011, desenvolveram um modelo numérico característico das transferências de calor de uma cobertura ventilada, através da formulação de equações de balanço de energia em regime estacionário. A cobertura foi dividida em várias secções similares ao longo da caixa-de-ar (Figura 2.6). O balanço de energia do revestimento da secção (i) foi modelado conforme apresentado pela equação (4). O modelo engloba a quantidade de radiação absorvida e radiação libertada pelo revestimento, trocas de calor por convecção com o ar ambiente e com ar interior da caixa-de-ar e trocas de calor por radiação entre as duas placas onduladas. Este caso de estudo trata-se de uma cobertura de uma fábrica (Figura 2.7).

$$\alpha I - \varepsilon \sigma t_{u(i)}^4 + h_a(t_0 - t_{u(i)}) = h_u \left(t_{u(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) + h_{rd}(t_{u(i)} - t_{l(i)}) \quad (4)$$

em que,

I	= Radiação solar incidente, [W/m^2]
α	= Absortividade
$t_{u(i)}$	= Temperatura do revestimento (placas de metal), [K]
$t_{l(i)}$	= Temperatura da placas inferiores (fibrocimento), [K]
$t_{(i-1)}$ e $t_{(i)}$	= Temperaturas do ar à entrada e à saída da secção, respetivamente, [K]
h_a e h_u	= Coeficientes de transferência de calor por convecção da superfície exterior e interior do revestimento, respetivamente), [W/m^2]
h_{rd}	= Coeficiente de transferência de calor por radiação, [W/m^2]
t_0	= Temperatura do ar exterior, [K]

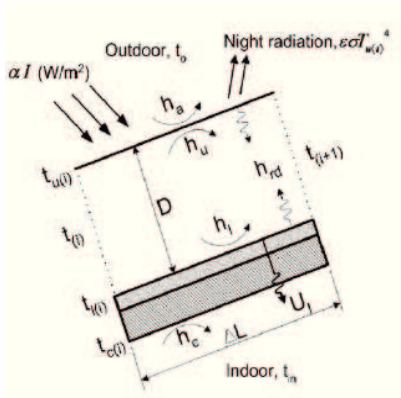


Figura 2.6- Trocas de calor de uma secção (i) da caixa-de-ar.
Fonte: (Susati, *et. al.*, 2011)

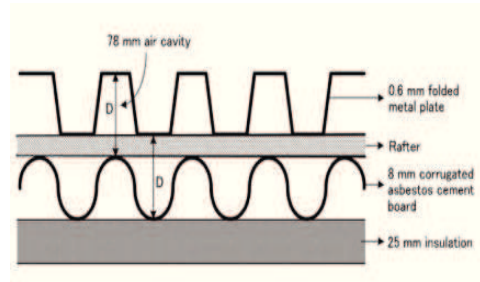


Figura 2.7- Representação esquemática de uma cobertura formada por duas placas.
Fonte: (Susati, *et. al.*, 2011)

O balanço de energia para a caixa-de-ar da secção (i) foi modelado conforme apresentado pela equação (5). O modelo engloba as trocas de calor por convecção com as duas superfícies que formam a caixa-de-ar ventilada cuja diferença iguala o calor transportado pelo fluxo de ar na caixa-de-ar. A temperatura do ar na primeira secção de entrada é considerada como sendo igual à do ar exterior. A temperatura de ar que sai de uma secção é igual á temperatura de entrada da secção adjacente na direção do fluxo de ar.

$$\left[h_u \left(t_{u(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) + h_l \left(t_{l(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) \right] \times W \Delta L = c \rho v W D (t_{(i)} - t_{(i-1)}) \quad (5)$$

em que,

$t_{u(i)}$	=	Temperatura do revestimento (placas de metal), [K]
$t_{l(i)}$	=	Temperatura das placas inferior (fibrocimento), [K]
$t_{(i-1)}$ e $t_{(i)}$	=	Temperaturas do ar de entrada e saída da secção, respetivamente, [K]
h_u e h_l	=	Coefficiente de transferência de calor por convecção da superfície do revestimento e da placa de fibrocimento, respetivamente), [W/m^2]
W	=	Largura da caixa-de-ar da secção (i), [m]
D	=	Altura da caixa-de-ar da secção (i), [m]
ΔL	=	Variação do comprimento da caixa-de-ar da secção (i), [m]
v	=	Velocidade do ar no interior da caixa-de-ar, [m/s]

O equilíbrio térmico das placas inferiores foi formulado por um balanço de energia, em regime estacionário apresentado pela equação (6), que compreende a troca de calor por convecção e radiação com a placa inferior e o calor transferido por condução para a espaço útil interior.

$$h_l \left(\frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} - t_{l(i)} \right) + h_{rd}(t_{u(i)} - t_{l(i)}) = U_l(t_{l(i)} - t_{in}) \quad (6)$$

em que,

U_l	=	Coefficiente global de transferência de calor da envolvente exterior para o espaço útil interior, $[W/m^2 \cdot K]$
t_{in}	=	Temperaturas do espaço útil interior, $[K]$
h_l	=	Coefficiente de transferência de calor por convecção da placa de fibrocimento, $[W/m^2]$

2.3. Controlo térmico de coberturas ventiladas

A preocupação em reduzir os custos relacionados com a climatização de edifícios tem vindo a intensificar-se nos últimos anos. Na caracterização do desempenho térmico de uma cobertura inclinada deve-se considerar inúmeras características, principalmente, a forma da cobertura, tipo de revestimento empregue, inércia térmica dos materiais, ventilação da estrutura, localização e orientação geográfica, entre outras. A regulamentação atual assenta no pressuposto de que os edifícios devem assegurar as condições térmicas interiores em função da zona climática onde estão inseridos, numa perspetiva de diminuir os consumos energéticos despendidos na climatização.

2.3.1 Desempenho térmico dos materiais

Na caracterização térmica de uma cobertura inclinada é importante estudar o comportamento térmico de todos os materiais aplicados. No entanto, a legislação Portuguesa em vigor é muito limitada no que se refere aos critérios de inclusão dos materiais. A principal estratégia para reduzir as transferências de calor pela cobertura consiste principalmente na aplicação de isolamento térmico, numa perspetiva de garantir a qualidade térmica do espaço interior do edifício. No entanto, nos países com clima ameno ou quente, existem uma crescente preocupação em desenvolver coberturas com a função de manter a estrutura do telhado fria, principalmente durante o verão, os chamados “telhados frios”. Segundo Boixo, *et al.*, (2012), telhados frios, são um método barato para economizar energia e melhorar o nível de conforto dos edifícios. Um telhado frio é definido por um sistema de cobertura caracterizado por ter elevada capacidade em reflectir a radiação solar apresentando elevada emissividade à radiação infravermelha (Synnefa e Santamouris, 2012). As transferências de calor podem ser reduzidas significativamente através de uma cobertura que apresente cor clara (Suehrcke, *et al.*, 2008). Na Tabela 2.1

estão representados os valores de refletância solar e emitância infravermelha de alguns dos revestimentos empregues na construção de coberturas (Kültür e Türkeri, 2012).

Tabela 2.1- Valores de refletância solar e emitância infravermelha.

Fonte: Adaptado de (Kültür e Türkeri, 2012).

Cobertura	Reflectância solar	Emitância infravermelha
Cimento /argila:		
Telha de barro - branco	0.60 – 0.80	0.90 – 0.93
Telha de barro - vermelho	0.16 – 0.45	0.83 – 0.95
Telha de cimento - branco	0.65 – 0.80	0.85 – 0.90
Telha de cimento - vermelho	0.10 – 0.12	0.85 – 0.90
Metal:		
Sem pintura	0.20 – 0.60	0.05 – 0.35
Pintado - branco	0.60 – 0.75	0.80 – 0.90
Pintado - vermelho	0.25 – 0.45	0.80 – 0.90
Betão:		
Betão modificado	0.10 – 0.20	0.85 – 0.95
Superfície mineral:		
Telhas de asfalto - branca	0.20 – 0.30	0.80 – 0.90
Telhas de asfalto - vermelha	0.25 – 0.30	0.80 – 0.90
Telhas de asfalto - preta	0.04 – 0.05	0.80 – 0.90

Outra estratégia de controlo térmico cada vez mais empregue na construção de coberturas consiste na utilização de barreiras radiantes. As barreiras radiantes são normalmente feitas de folhas finas de alumínio, em conjunto com outro material, com o alumínio aplicado em uma ou em ambas as faces das folhas. Michels, et al., (2008), observou que as barreiras radiantes reduziram os ganhos térmicos no verão e as perdas no inverno, o que se traduz numa diminuição do consumo de energia relacionada com o aquecimento ou arrefecimento de um edifício. Medina *et al.*, (2000) verificam que as reduções de fluxos de calor obtidas pelas barreiras radiantes são inversamente proporcionais ao aumento da resistência térmica do isolamento.

2.3.2 Caracterização do escoamento do ar na caixa-de-ar

A radiação solar absorvida pela superfície exterior do revestimento é conduzida até à superfície interior e depois por convecção para o ar na caixa-de-ar o que proporciona o aumento da temperatura do ar, provocando uma diferença de densidades, o que estimula a circulação natural do ar. O aumento progressivo da sua velocidade está diretamente relacionado com o aumento da incidência solar sobre o revestimento (Miller, *et al.* 2007).

O comportamento do escoamento do ar pode ser estabelecido por diversas correlações que permitem prever a taxa de fluxo de ar e o aumento de temperatura dentro da caixa-de-ar de uma cobertura ventilada em resultado da sua geometria e inclinação. Os coeficientes de transferência de calor determinados, como sejam o número de Nusselt e Reynolds são em resultado do número de Rayleigh, da espessura, comprimento e inclinação da caixa-de-ar (Khedari, *et al.*, 2002; Villi, *et al.*, 2009 e Miller, *et al.*, 2007). O fluido desloca-se em regime laminar e quanto maior for o número de Rayleigh maior a velocidade do fluido a partir de um determinado valor pode surgir instabilidade do fluido e o movimento pode alterar-se para regime turbulento (Miller, *et al.*, 2007). Ciampi, *et al.*, 2005 analisaram a transferência de calor para duas tipologias de telhado ventilado (VR1 e VR2) com a mesma resistência térmica global. A análise foi efectuada em situações de fluxo laminar e de fluxo turbulento no interior da caixa-de-ar. A figura seguinte ilustra a tendência percentual de economia de energia (S) em resultado da variação da altura (h) e do ângulo de inclinação (θ) dos respectivos telhados. O termo (S) representa em percentagem o fluxo de calor médio que entra através dos telhados ventilados.

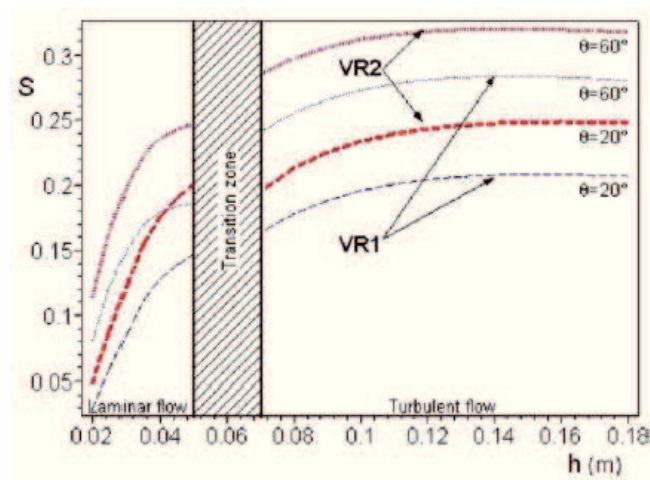


Figura 2.8-Percentagem de economia da energia de uma cobertura ventilada em situações de fluxo laminar e turbulento da caixa-de-ar.

Fonte: Ciampi, *et al.*, 2005

Segundo os autores, uma boa concepção na construção de uma cobertura permite economizar mais de 30% da energia necessária para o arrefecimento de um edifício durante o verão. Este desempenho térmico é alcançável através da adequada distribuição do material isolante e dos parâmetros de concepção da caixa-de-ar, constatando que o desempenho aumenta à medida que a altura e a inclinação da caixa-de-ar aumenta.

Villi, *et al.*, (2009) desenvolveram um modelo de energia, através de correlações lineares, para a taxa de fluxo de ar transportado através da caixa-de-ar em termos de diferença de temperatura do ar entre a temperatura do ar da caixa-de-ar e da temperatura do ar exterior (Figura 2.9).

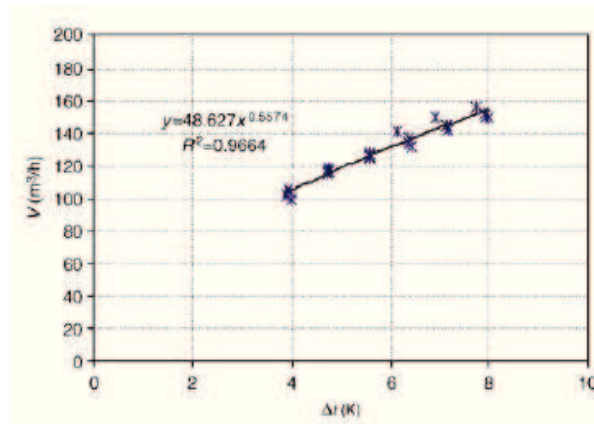


Figura 2.9-Ilustração gráfica da correlação obtida entre a taxa de fluxo de ar induzida e a diferença de temperatura do ar entre a caixa-de-ar e o ar exterior.

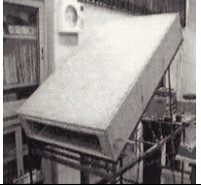



Fonte: Villi, *et al.* (2009)

2.3.3 Estudos experimentais do comportamento térmico de coberturas

Nos últimos anos são vários os estudos experimentais realizados com o objetivo de quantificar o comportamento térmico de coberturas ventiladas. Os investigadores recorreram a diferentes métodos para a caracterização do comportamento térmico de coberturas ventiladas, desenvolvendo em laboratório modelos que permitiram simular um telhado ventilado ou realizado estudos de campo com a construção de células de teste, que permitem a avaliação experimental do comportamento térmico dinâmico, conjugando o estudo do efeito da variação do clima local tal como realizado no presente trabalho. Os protótipos laboratoriais e as células-teste são normalmente providos com instrumentação específica que garante o registo contínuo de dados em determinado período de tempo.

Nos estudos em regime permanente, os modelos laboratoriais desenvolvidos são constituídos normalmente por um canal aberto retangular inclinado em que a estrutura superior é sujeita a aquecimento permanente de forma a simular a radiação solar incidente sobre um revestimento da cobertura. Na Tabela 2.2 encontra-se uma revisão de alguns estudos, integrando as principais configurações geométricas e parâmetros analisados.

Tabela 2.2- Resumo dos principais estudos experimentais em regime permanente.

Referência bibliográfica	Dimensões da cavidade (m)	Ângulo de inclinação	Medições experimentais	Variáveis testadas	Foto
Khedari, <i>et al.</i> , (2002)	1,36 x 0,68 x 0,14	30°	temperatura e velocidade do ar	altura da cavidade	
W. Puangsombut, <i>et al.</i> , (2007)	1,5 x 0,70 x 0,19	30°	temperatura e velocidade do ar	utilização de barreira radiante e altura da cavidade	
L. Susanti, <i>et al.</i> , (2008)	4,0 x 0,78 x 0,0482	20° e 30°	temperatura e velocidade do ar	tamanho das aberturas de entrada e saída	
Lee, <i>et al.</i> , (2009)	2,0 x 1,4 x 0,4	variável (0° a 90°)	temperatura, velocidade do ar	largura, profundidade e forma da cavidade	

Os investigadores, através da avaliação da distribuição dos valores registados das temperaturas das superfícies da cavidade e da velocidade do ar verificaram que na generalidade ocorre de forma natural a indução do ar no interior da caixa-de-ar. Susanti, *et al.*, (2008) verificaram que a temperatura das superfícies da caixa-de-ar segue uma tendência crescente ao longo do canal, mesmo quando fez variar a configuração da abertura de entrada e saída do ar da cavidade, como representado na Figura 2.10. Das várias conclusões retidas por W. Puangsombut, *et al.*, (2007) constataram ainda que a utilização de uma barreira radiante na camada inferior da estrutura aumenta a transferência de calor por convecção livre através do canal, com efeitos significativos no aumento da ventilação natural e melhoria do fluxo de ar induzido. Khedari, *et al.* (2002) verificaram que o aumento da altura da cavidade produzia melhores taxas de ventilação induzida. Lee, *et al.*, (2009) verificam que a extração de calor da caixa-de-ar por convecção do ar difere com a profundidade, largura e forma da caixa-de-ar, conforme ilustrado na Figura 2.11.

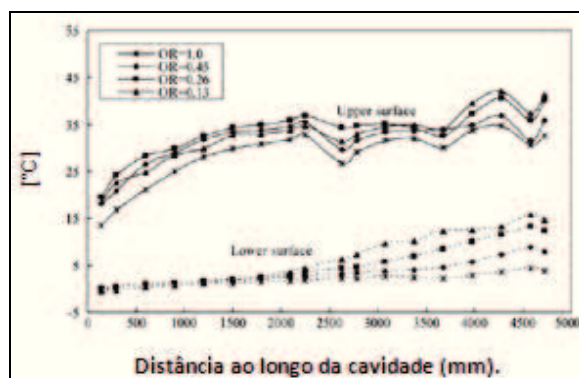


Figura 2.10- Distribuição da temperatura da superfície superior e inferior da cavidade.
 Fonte: Khedari, *et al.* (2002)

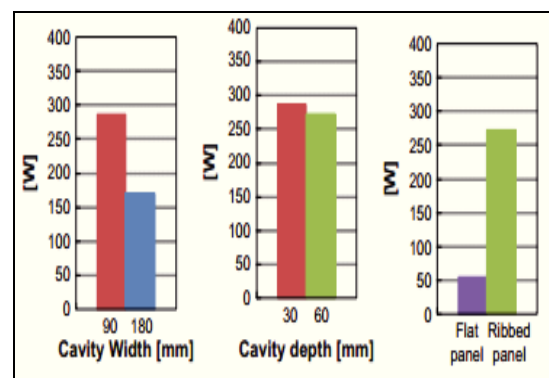







Figura 2.11- Variação da temperatura na cavidade (ventilada e não ventilada).
 Fonte: Lee, *et al.*, (2009)

Nos ensaios experimentais em regime dinâmico, os investigadores desenvolveram diversas células de teste constituídas por um pequeno compartimento, na maior parte dos casos construído em alvenaria e integrando uma cobertura, tal como realizado no presente estudo. Na Tabela 4 encontra-se uma revisão dos principais estudos experimentais desenvolvidos em regime dinâmico, os quais integram a avaliação do desempenho térmico de coberturas isoladas ou ventiladas. Na generalidade, os estudos avaliam o efeito das variações climáticas (temperatura externas e radiação global) sobre o desempenho térmico das coberturas. A espessura, localização do isolamento e tipo de revestimento exterior aplicado são características estruturais incluídas na avaliação do desempenho térmico de coberturas.

Tabela 2.3- Resumo de estudos experimentais de avaliação do desempenho térmico dinâmico de diferentes estratégias de construção de coberturas.

Referência bibliográfica	Clima local	Aplicação do estudo	Secções testadas	Foto das células-teste
Özdeniz e Hançer (2005).	Clima quente e húmido (Tropical)	Conforto térmico e economia de energia com diferentes coberturas	14 tipos de coberturas: 7 inclinadas e 7 planas	
D'Orazio, et. al. (2008)	Clima temperado (mediterrâneo)	Efeito do tamanho da secção transversal do beirado ventilado.	4 tipos de cobertura ventiladas 1 não ventilada	
D'Orazio, et. al. (2010)	Clima temperado (mediterrâneo)	Desempenho térmico de coberturas altamente isoladas	6 tipos de coberturas com isolamento EPS (espessura de 12cm)	
Ong, K.S. (2011)	Clima quente e húmido (Tropical)	Localização do isolamento e sistemas de ventilação passiva	6 tipos de coberturas com 15° de inclinação	
Zakaria et al. (2011)	Clima quente e húmido (Tropical)	Avaliação da energia térmica do edifício com isolamento na esteira horizontal	2 células-teste (1 célula de controlo e 1 célula de teste com isolamento)	

Os resultados dos estudos revelam a importância da ventilação das coberturas na remoção da humidade, dissipação do calor e a poupança energética com a aplicação de isolamento térmico. Segundo Özdeniz e Hançer, (2005) a colocação de isolamento numa cobertura inclinada com sótão permite economizar cerca de 28% da energia despendida na climatização. O efeito da aplicação do isolamento nas vertentes do telhado ou sobre esteira horizontal foi testado por Ong, (2011) com a construção de diferentes telhados testados simultaneamente ao ar livre na estação de verão. O autor constatou que o isolamento nas vertentes do telhado foi mais eficaz, impedindo a entrada do calor no sótão, no entanto, com um aumento considerável da temperatura das telhas.

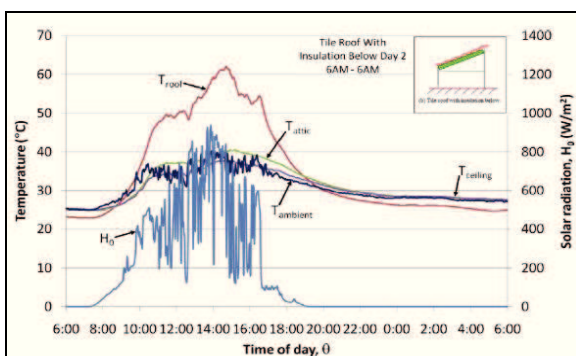


Figura 2.12- Desempenho da cobertura com isolamento aplicado nas vertentes.

Fonte: Ong, (2011)

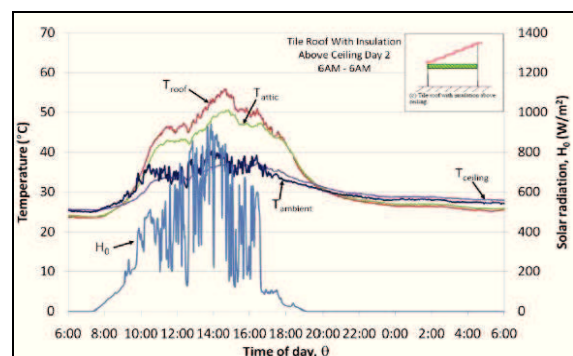


Figura 2.13- Desempenho da cobertura com isolamento aplicado na esteira horizontal.

Fonte: Ong, (2011)

Zakaria, *et al.*, (2011) verificaram que a colocação do isolamento na esteira horizontal reduz as necessidades de aquecimento devido ao atraso térmico proporcionado pela inércia térmica da placa com o isolamento, tornando a habitação quente durante o período nocturo. D'Orazio, *et al.*, (2008) e D'Orazio, *et al.*, (2010) verificam ainda que o revestimento da cobertura com telhas cerâmicas apresentam melhores desempenhos térmicos, devido à elevada permeabilidade ao ar que permite maior trocas com o meio externo, assim como, constitui um material que permite um equilíbrio das trocas de calor por radiação.

Os estudos de coberturas ventiladas podem ainda integrar sistemas de ventilação que promovam o arrefecimento da habitação com a renovação do ar interior nas estações mais quente do ano. Estes sistemas apresentam como principal vantagem o aproveitamento da área da cobertura exposta à radiação solar, permitindo induzir a ventilação natural do ar do interior da habitação, conduzindo o calor para o exterior através da caixa-de-ar da cobertura inclinada, como esquematizado na Figura 2.14, (Awbi, 1998).

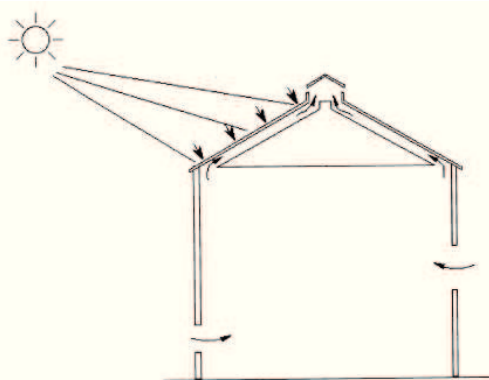


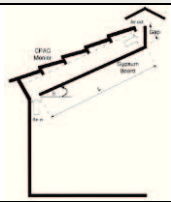
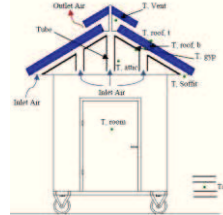
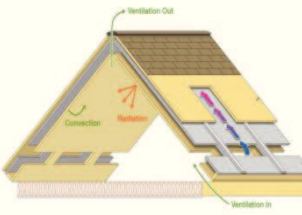
Figura 2.14- Sistema integrado de ventilação passiva da cobertura e habitação.

Fonte: Awbi, 1998

Também Khedari, *et al.*, (1997) e Hirunlabh, *et al.*, (2001) discutiram a possibilidade de integrar uma cobertura ventilada que permitisse induzir a ventilação natural do ar interior da habitação melhorando o seu conforto térmico. Khedari, *et al.*, (2000) conduziram o estudo experimental testando diferentes espessuras e diferentes dimensões das aberturas de entrada e saída do ar da caixa-de-ar. Posteriormente, Hirunlabh, *et al.*, (2001) demonstraram que o sistema de ventilação passiva pode fornecer uma parte significativa da ventilação da habitação, embora não o suficiente para proporcionar o arrefecimento adequado a fim de garantir o conforto térmico. Susakunphaisan, *et al.*, (2011) desenvolveram uma célula de teste com a integração de um sistema de ventilação entre a sala e a caixa-de-ar da cobertura, constituído por nove tubos de 0,15 m de diâmetro. Os

autores verificaram que o sistema pode reduzir cerca de 4°C da temperatura média da sala. Miller, *et al.*, (2011) desenvolveram um protótipo com telhas de asfalto, utilizando como isolamento placas de EPS que foram revestidas com folhas de alumínio em ambos os lados e encaixadas sobre as vigas. A restante estrutura é composta por placas de OBS aplicadas na fronteira da cobertura com o sótão, assim como, entre o isolamento e o revestimento exterior. Estas placas são revestidas com folhas de alumínio, na superfície fronteira do sótão e na superfície virada para o revestimento, para reduzir as perdas ou os ganhos de calor por radiação, respectivamente. A ventilação desenvolve-se entre a camada de isolamento e a camada constituída por placas de OBS mais a exterior, desde a captação do ar interior pelas aberturas criadas nos materiais até ao topo da cobertura onde o ar é libertado. Os autores verificaram que o sistema necessita de ser optimizado, principalmente no período de inverno, uma vez que limita os ganhos de calor durante o dia e a quantidade de calor retida durante a noite não compensa as perdas diurnas para que possa ser adotado no projeto clima frio. Na Tabela 5, encontra-se uma revisão de alguns desses estudos com a avaliação do comportamento térmico dinâmico da eficácia do sistema, apresentando-se as principais configurações geométricas utilizadas e materiais aplicados.

Tabela 2.4- Resumo de estudos experimentais de avaliação do desempenho térmico dinâmico de coberturas integrando sistemas de ventilação passiva.

Referência	Dimensões C x L (m)	Inclinação (%)	Altura da cavidade (cm)	Revestimento exterior	Materiais das camadas inferiores	Representação esquemática
Khedari, <i>et al.</i> (1997), Khedari, <i>et al.</i> (2000) e Hirunlabh, <i>et al.</i> (2001)	1,5 x 1	30	14	Telhas de betão	Placas de gesso	
Susakunphaisan1, <i>et al.</i> (2011)	1,2 x 1,5	30	14	Telhas de betão	Placas de gesso	
Miller, <i>et al.</i> (2011)	-	-	2,54	Telhas de asfalto	EPS / Folhas de alumínio	

2.4. Resumo e conclusões

Da revisão bibliográfica efetuada constata-se que a maioria dos estudos são direcionados para encontrar soluções de coberturas que protejam o edifício do sobreaquecimento da cobertura e conseqüentemente os protejam da alteração brusca da temperatura interior para uma zona de desconforto térmico durante os dias mais quentes, principalmente no verão, e assim reduzem as necessidades de arrefecimento activo dos edifícios. Outros estudos são direcionados para uma solução que permita reter a maior quantidade de calor no edifício durante os dias mais frios do inverno ou quando sujeito ao arrefecimento noturno. No geral, os estudos encontrados demonstram que a redução das transferências de calor pela cobertura é alcançável através da instalação de isolamentos térmicos e barreiras radiantes, resultando numa poupança significativa da energia e de custos relacionados com a climatização do edifício, permitindo manter a temperatura interior dentro da zona de conforto.

Os sistemas de ventilação passiva da cobertura resumem-se sobretudo nas seguintes vantagens:

- Redução das transferências de calor através da dissipação do calor por convecção natural do ar do interior da caixa-de-ar;
- Redução da humidade e de possíveis condensações;
- Evita o sobreaquecimento da estrutura e sua degradação;
- Adaptação às futuras normas relativas à construção sustentável.

Outros estudos afirmam que o efeito da reflexão solar do telhado altera consideravelmente o desempenho térmico da cobertura de um edifício, pelo que, deve ser um parâmetro considerado quando se precede à concepção de uma cobertura em função da zona climática onde o edifício se encontra abrangido. O isolamento térmico e as barreiras radiantes permitem atingir elevadas performances térmicas, no entanto, segundo alguns estudos, uma aplicação excessiva prejudica a capacidade de ganhos solares importantes no aquecimento passivo da habitação. Assim, um bom projeto de cobertura deve limitar os ganhos de calor durante o verão e ao mesmo tempo limitar as perdas de calor no inverno ou durante o arrefecimento noturno.

3. Caso de estudo

No presente capítulo pretende-se desenvolver uma metodologia de forma a caracterizar o regime dinâmico da transmissão de calor de uma cobertura inclinada com beiral ventilado e sub-telha instalado pela empresa Umbelino Monteiro S.A. Para tal, recorreu-se à construção de uma célula de teste que permitiu analisar o comportamento dinâmico, revelado pelo perfil de temperatura e de humidade ao longo do tempo, quando sujeita a ciclos diários de ganhos solares e de arrefecimento noturno, assim como caracterizar o efeito da ventilação da caixa-de-ar como uma estratégia estrutural no contributo da melhoria das condições de conforto térmico e eficiência energética de um edifício. Esta investigação iniciou-se com o desenho da célula de teste. Com a participação ativa do autor procedeu-se à sua construção com a colaboração da empresa Prélis, Lda, que executou as paredes, e com a empresa Umbelino Monteiro S.A. que executou a cobertura. A metodologia aplicada para a avaliação das trocas de calor deste tipo de solução consistiu na elaboração de equações de balanços de energia para as diferentes camadas construtivas e no tratamento estatístico de todos os resultados obtidos ao longo do período de medição, nas estações da primavera e verão.

3.1 Material e métodos

Para atender aos objetivos propostos foi necessário a escolha do local para se proceder à construção da célula de teste, assim como a selecção de toda a instrumentação necessária para registar a evolução temporal dos diversos parâmetros meteorológicos, temperaturas superficiais, perfis de temperatura e humidade do ar ao longo da caixa-de-ar e ainda no interior da célula de teste. Foi ainda fundamental caracterizar a estrutura, geometria e a identificação das características térmicas dos materiais de construção e respetivas dimensões. Este estudo foi dividido em períodos distintos, inicialmente com o registo dos perfis de temperatura e humidade do ar ao longo da caixa-de-ar, e posteriormente o registo da velocidade do ar na caixa-de-ar e a análise das temperaturas superficiais dos materiais.

3.1.1. Localização e orientação

A construção do protótipo foi realizada no Campus 2 da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, nas seguintes coordenadas geográficas de $+39^{\circ} 44'$, $-8^{\circ} 49'$. A célula de teste foi construída e orientada ao quadrante sul, de forma a otimizar os ganhos solares. No que diz respeito ao zonamento climático (Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril), a célula de teste está localizada numa zona climática de Inverno (I2), com um número de graus-dias de aquecimento ($GP=1610$ °C.dias), com duração da estação de aquecimento de 6 meses, e numa zona climática de Verão (V1-N), com uma temperatura do ar exterior de projecto no verão de $T_{atm}=19^{\circ}\text{C}$. Verifica-se que o inverno é mais exigente que o verão. Tendo em conta os dados relativos à intensidade da radiação solar incidente para uma superfície horizontal de 730 KWh/m², verifica-se que o clima é favorável a ganhos solares.

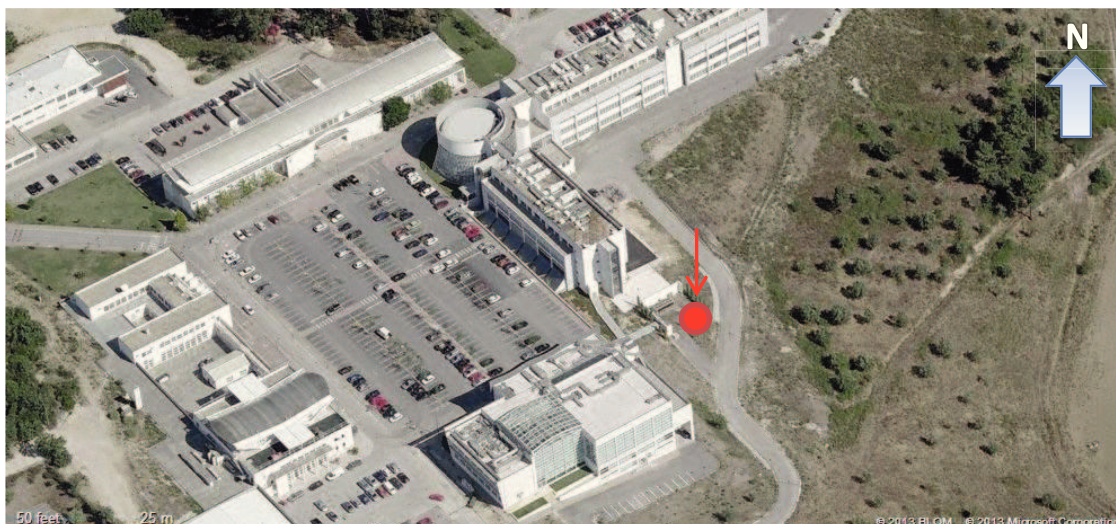


Figura 3.1- Localização da célula de teste.

3.1.2. Célula de teste: desenho e construção

A célula de teste representa um protótipo modelo em escala reduzida de uma habitação típica com sótão e cobertura ventilada. Apresenta uma estrutura em parede simples de alvenaria de tijolo térmico com sótão separado pela colocação de isolamento XPS de 4 cm no desvão da cobertura, permitindo o enquadramento de uma solução preconizada com objetivo do estudo das flutuações térmicas do desvão da cobertura. A cobertura é composta por duas placas sub-telha Nartutherm aplicadas diretamente sobre as paredes de alvenaria, (Figura 3.2).

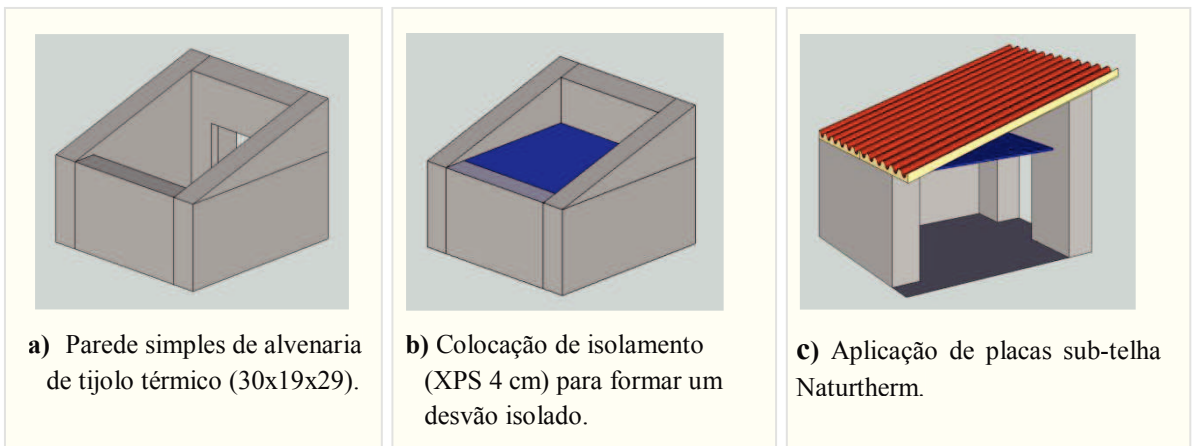


Figura 3.2- Esboços iniciais da construção da célula-teste.

O protótipo foi construído com uma área de aproximadamente de 4,67 m² e com cobertura de 2,5 metros de comprimento e 30% de inclinação, como ilustrado na Figura 3.3.

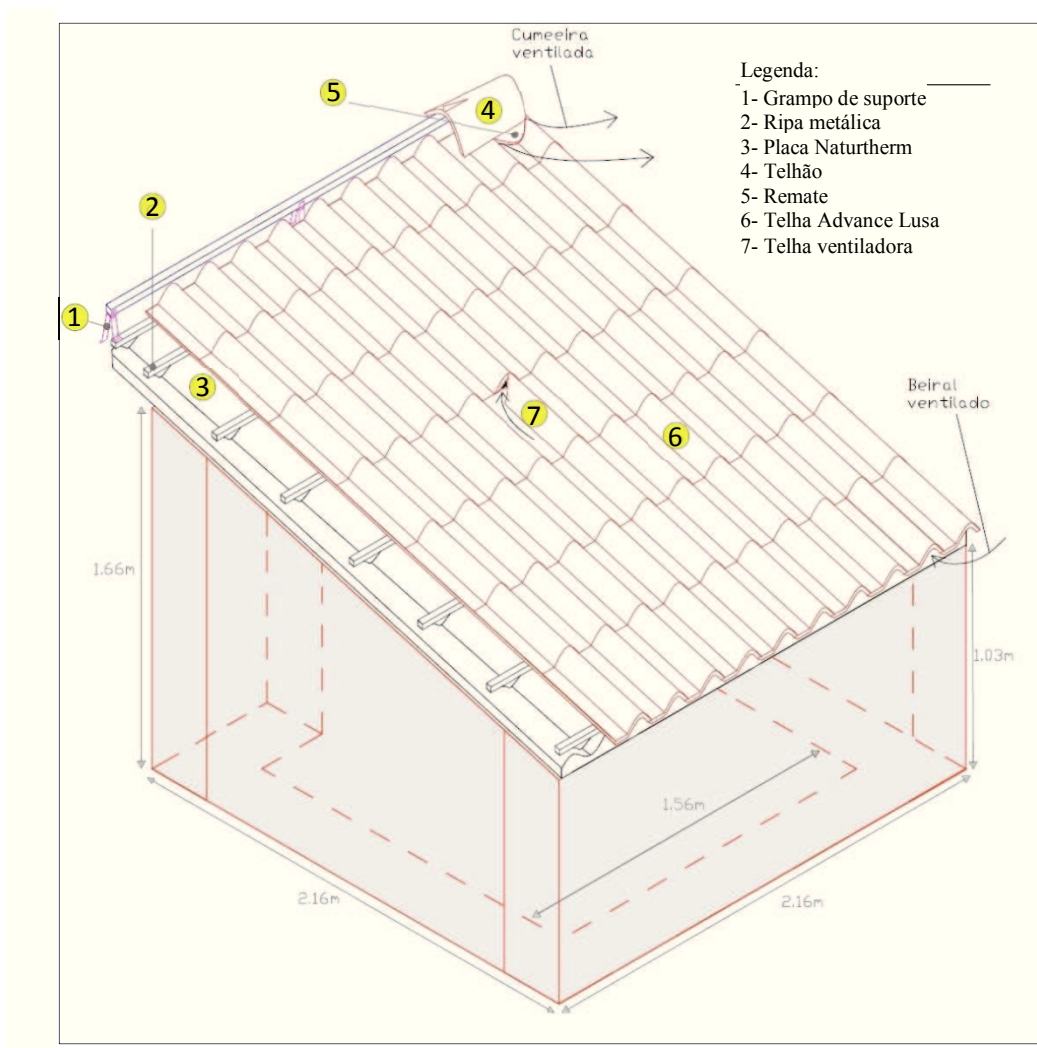


Figura 3.3- Representação esquemática da célula-teste.

Como referido anteriormente, a célula de teste foi construída em parede simples de alvenaria de tijolo térmico e sobre a mesma aplicado um revestimento de argamassa (reboco) para auxiliar a parede de alvenaria a cumprir as suas funções, em particular estanquicidade à água, como ilustrado na Figura 3.4-a,b. As principais características geométricas e térmicas do tijolo térmico disponibilizado pela empresa Prélis S.A., utilizado na construção da célula de teste estão representadas na Figura 3.4-c.



Figura 3.4- Construção das paredes da célula-de-teste.

As placas sub-telha Naturtherm foram fixas mecanicamente no topo da parede de alvenaria Figura 3.5-a,b. As principais características geométricas e térmicas das placas sub-telha utilizadas na construção da cobertura da célula de teste estão representadas na Figura 3.5-c. A placa sub-telha Naturtherm apresenta excelentes propriedades de isolamento térmico devido à espuma de poliuretano rígido que contém agregado à placa de cimento reforçado. O acabamento da superfície inferior é composto por uma folha de alumínio, o que proporciona uma barreira anti-vapor.



Figura 3.5- Aplicação da placa sub-telha Naturtherm.

A estrutura de suporte do revestimento exterior é constituída por ripas metálicas perfuradas que permite assegurar a circulação de ar na totalidade da cobertura sob a face interior da telha (Figura 3.6-a). Destaca-se a fixação mecânica do beiral através de grampos metálicos apropriados, sem qualquer tipo de argamassa que possa obstruir a entrada e a saída do ar e impedir a sua ventilação (Figura 3.6-b,c).



Figura 3.6- Construção da cobertura da célula de teste.

Na execução da cumeeira foi aplicada uma membrana impermeável e ventiladora, com telhão assente sobre remate, suportado e fixo mecanicamente como ilustrado nas Figura 3.7 e Figura 3.8).



Figura 3.7- Execução da estrutura de suporte da membrana impermeável e do telhão.



Figura 3.8- Aplicação da membrana e fixação mecânica do telhão com grampo apropriado.

Para potenciar a circulação do ar foi aplicada uma telha ventiladora no telhado, como ilustrado na Figura 3.9-a. Os remates laterais e as meia-telha foram fixos mecanicamente e com mástique, como ilustrado na Figura 3.9-b,c.



Figura 3.9- Telha ventiladora e remates laterais.

3.1.3. Instrumentação utilizada e sistema de aquisição de dados

Para estudar o comportamento térmico dinâmico da célula de teste, nomeadamente o comportamento da cobertura foi utilizado um conjunto de instrumentação que permite a recolha de dados importantes no desenvolvimento desta investigação. A principal vantagem da avaliação do comportamento térmico das envolventes opacas de edifícios em regime dinâmico consiste na recolha de dados importantes das condições meteorológicas locais, assim como, o estudo de um edifício em função de uma determinada região climática. Nesta investigação foi utilizada a estação meteorológica *Wireless Vantage Pro2™ Plus* composta por um conjunto de sensores integrados, instalada junto da célula de teste. Inclui sensores de temperatura e humidade do ar, pluviómetro, anemómetro e sensores de radiação solar como esquematizado na Figura 3.10. Os sensores de temperatura e humidade do ar estão protegidos pelo protetor de radiação solar para minimizar o impacto da radiação solar nas leituras dos respetivos sensores. As medições foram registadas a cada 5 minutos e enviadas para a consola *Vantage Pro2™*. O sistema de transmissão de dados *wireless* do conjunto de sensores integrados é alimentado por energia solar que envia os dados para a consola *Vantage Pro2™* por ondas de rádio de baixa intensidade.



Figura 3.10- Estação meteorológica (*Wireless Vantage Pro2™ Plus*).

Na medição da temperatura e humidade relativa do ar na caixa-de-ar da cobertura utilizaram-se registadores LogTag, com uma precisão de 0.1%HR e 0.1°C/°F. O LogTag é um registor, robusto, de pequena dimensão e auto-suficiente, sensível à temperatura e a humidade do ar com elevada capacidade de memória. Os LogTag foram configurados para obter registo contínuo de dados em intervalos de amostragem de 5 minutos. Os LogTag foram instalados em vários locais da caixa-de-ar da cobertura e no interior do desvão não ventilado.



Figura 3.11- Sensores de temperatura e humidade relativa do ar (*LogTag® HAXO-8*).

Durante os ensaios experimentais, utilizaram-se dois instrumentos de medição multifuncional (*Testo, 435*) para se registrar a temperatura superficial dos materiais e velocidade do fluxo de ar na caixa-de-ar. Nesta investigação foram utilizados sensores de temperatura (termopares) e de velocidade (sonda de medição de molinete).



Figura 3.12- Instrumento de medição multifunções, *Testo 435*.

A sonda de medição de molinete tem um diâmetro de 60 mm, podendo ser utilizado a uma temperatura de 0 a +60 °C, com exactidão de $\pm(0.1 \text{ m/s} + 1.5\% \text{ do v.m.})$. O sensor da temperatura para determinação da temperatura média superficial da face superior do revestimento cerâmico e da temperatura das faces superficiais correspondente à caixa-de-ar, possuem um sistema de triplo sensor, podendo ser utilizado de -20 a +70 °C, com exactidão de ± 0.1 .



Figura 3.13- Sonda de medição de molinete.

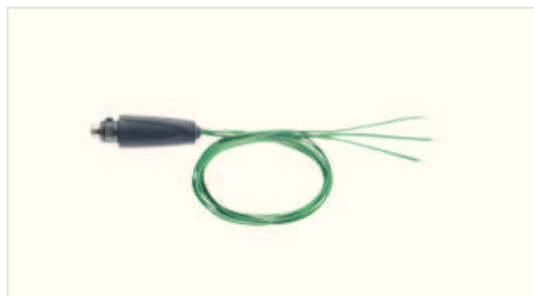


Figura 3.14- Sonda de superfície.

3.2 Metodologia experimental

O estudo do desempenho térmico de uma cobertura em regime dinâmico consiste num processo complexo devido a um conjunto diversificado de variáveis relacionadas com os fatores ambientais que variam significativamente ao longo do tempo. Neste capítulo pretende-se apresentar a metodologia experimental levada a cabo para avaliar o comportamento térmico e termo-higrométrico, e ainda o efeito da ventilação natural, através dos dados experimentais obtidos da instrumentação utilizada na célula de teste.

3.2.1. Procedimento, medições e dados de base

A caixa-de-ar de uma fiada de telhas da cobertura foi instrumentada com placas LogTag, com espessamentos similares entre si de 0,6 metros de comprimento, como esquematizado na Figura 3.15. Com base na combinação dos mecanismos de transferência de calor, a formulação do modelo de cálculo permitiu a quantificação das transferências de calor associadas ao revestimento cerâmico, a quantificação da energia dissipada pela cumeeira, e ainda, o cálculo do balanço energético para a placa sub-telha, permitindo assim determinar a energia transmitida em regime transiente para cada camada construtiva.

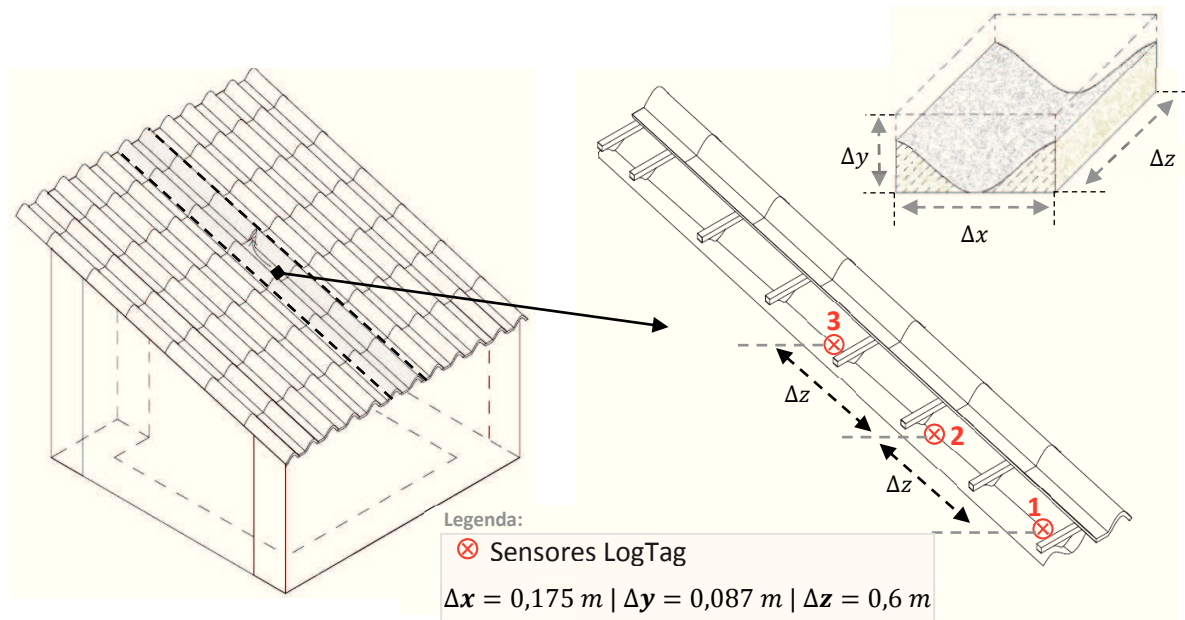


Figura 3.15- Localização dos registadores LogTag na cobertura da célula de teste.

Os sensores colocados na cobertura estão espaçados similarmente entre si com o objetivo de se desenvolverem balanços de energia e criar um modelo matemático das transferências de calor resultantes para este tipo de cobertura. Foram também instalados dois sensores no

interior da célula de teste, um no desvão da cobertura e outro no compartimento inferior, como esquematizado na Figura 3.16.

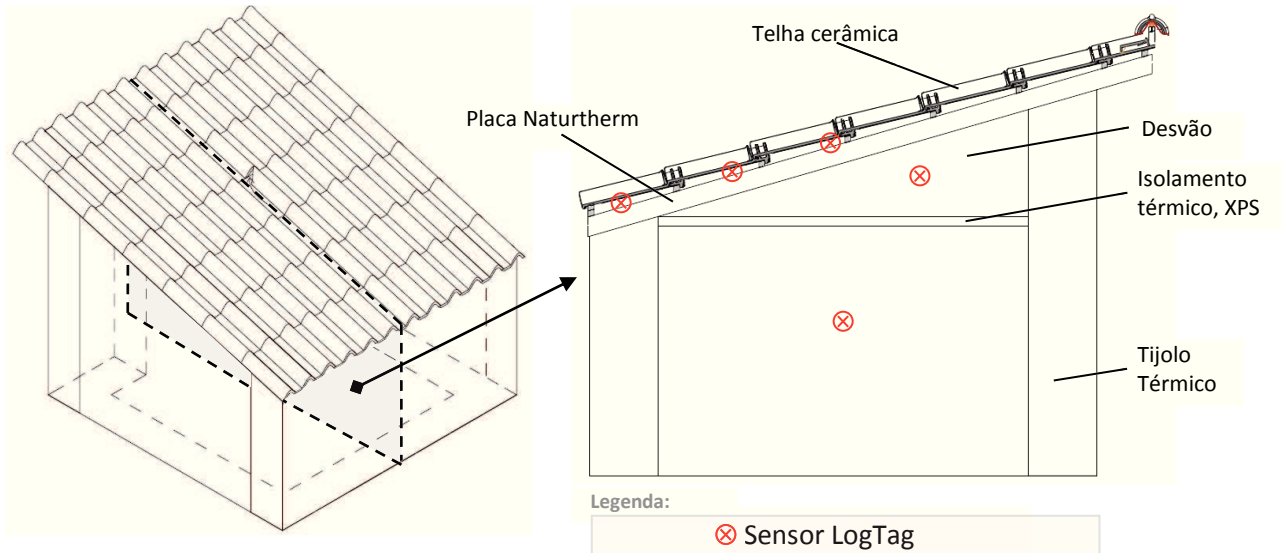


Figura 3.16- Localização dos registadores LogTag no interior da célula-de teste.

Na Figura 3.17, apresentam-se fotografias da instalação dos registadores LogTag, em conformidade com a indicação apresentada na figura anterior.



Figura 3.17- Registo fotográfico da instalação dos sensores LogTag.

Na Figura 3.18 são apresentadas fotográficas da instalação dos termopares e do anemómetro de velocidade com o objetivo de se obter o registo da temperatura superficial da telha cerâmica e da velocidade de fluxo de ar que se desenvolve naturalmente na caixa-de-ar da cobertura ao longo do tempo.

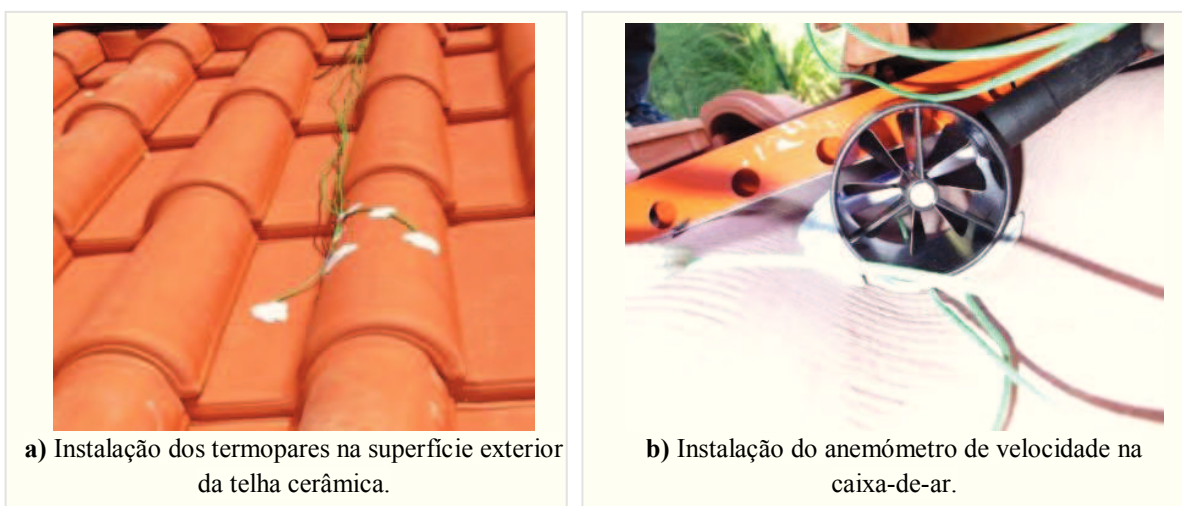


Figura 3.18- Instalação dos termopares na superfície exterior da telha e do anemómetro de velocidade na caixa-de-ar.

Na Figura 3.19 é apresentado fotografias da instalação dos termopares, fixos com plasticina, na superfície interior da telha cerâmica e na superfície superior da placa sub-telha Naturtherm.

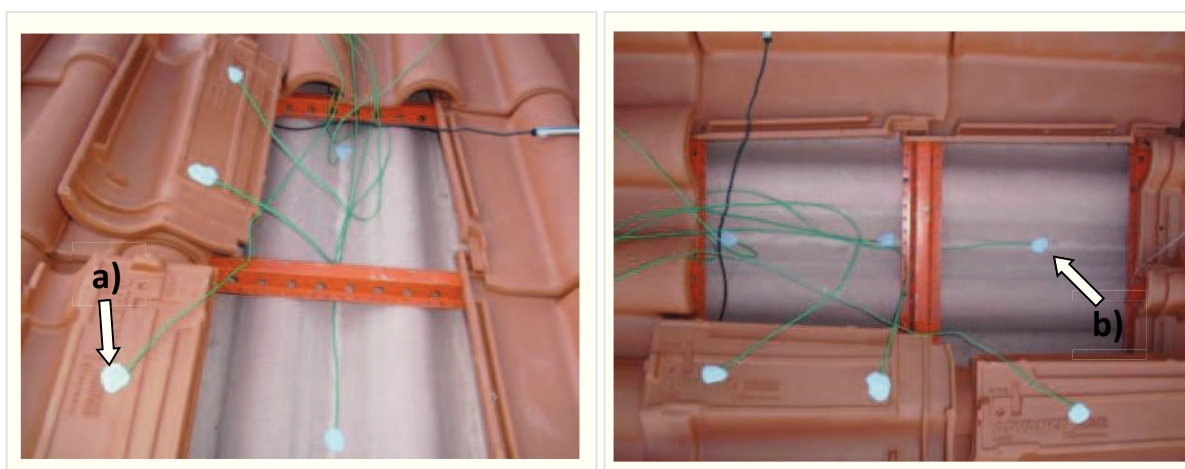


Figura 3.19- Instalação dos termopares. a) Superfície interior da telha cerâmica, b) Superfície superior da placa sub-telha.

Na Figura 3.20 apresenta-se a instalação de uma placa Logtag numa fenda criada na camada intermédia entre a placa de cimento reforçado e a espuma de poliuretano rígido. Apresenta-se ainda uma fotografia dos instrumentos de medição multifuncional (*Testo 435*), que recolheram os dados dos respectivos sensores instalados, representados anteriormente na Figura 3.13 e na Figura 3.14.



Figura 3.20- Instalação da instrumentação: a) registrador LogTag na placa Naturtherm, b) instrumentos de medição multifunções, Testo 435.

A experiência foi conduzida entre Maio e Julho, nas estações da primavera e verão, tendo sido realizada em duas fases distintas. Começou-se por analisar o comportamento térmico e psicrométrico da cobertura ventilada, através de análise estatística dos perfis de temperatura e humidade do ar da caixa-de-ar num período compreendido entre o dia 11 de Maio até ao dia 6 de Junho e, numa segunda fase, a análise detalhada do comportamento térmico da cobertura ventilada com a análise da temperatura superficial dos materiais e da ventilação induzida na caixa-de-ar. A Tabela 3.1 resume os períodos de monitorização e a respectiva instrumentação utilizada.

Tabela 3.1- Período de monitorização da célula de teste e instrumentação utilizada.

Data	11/05→06/06	05/06→11/06	15/06→18/06	22/06→24/06	25/06→30/06
Estação meteorológica (Wireless Vantage Pro2™ Plus)	✓	✓	✓	✓	✓
Sensores de temperatura e humidade relativa do ar (LogTag® HAXO-8)	✓	✓	✓	✓	✓
Sondas de superfície aplicada na superfície exterior da telha cerâmica		✓	✓		
Sondas de superfície aplicada na superfície interior da telha cerâmica			✓	✓	✓
Sondas de superfície aplicada na superfície superior da placa Naturtherm				✓	
Sonda de medição da velocidade do ar com sonda molinete		✓			✓

3.2.2. Condicionantes e pressupostos experimentais

A célula de teste padece de elementos perturbadores correspondentes à geometria dos edifícios e muros localizados nomeadamente a norte (N) e a oeste (W) da célula de teste que a protegem dos ventos. Na direção este (E) localiza-se algumas árvores que atenuam parcialmente a radiação direta ao início da manhã.



Figura 3.21- Foto da célula de teste.

No entanto, o sombreamento das árvores considerou-se insignificante. Outros pressupostos são de seguida apresentados:

- A caixa-de-ar é plana, com uma espessura (Δy) de 0,087 metros.
- O tamanho das aberturas à entrada e o à saída são iguais.
- As propriedades dos materiais são independentes da temperatura.
- A temperatura das superfícies das paredes interiores do desvão é igual à temperatura do ar interior.

3.2.3. Mecanismos da Transferência de Calor na Cobertura

Um dos procedimentos adotados para determinar a transferência de calor através da cobertura consistiu na caracterização da temperatura sol-ar, em função da radiação solar incidente, coeficiente de absorção de superfície exterior, temperatura do ar exterior e coeficiente de transmissão de calor superficial exterior determinada pela equação desenvolvida por Mackay e Wright (Stamper, *et. al.*, 1979):

$$T_{sol_ar} = T_{\infty} + \frac{I \alpha}{h_{(x_1)}} \quad (7)$$

em que,

T_{sol_ar}	=	Temperatura sol-ar, [°C]
T_{∞}	=	Temperatura do ar exterior, [°C]
I	=	Radiação solar incidente, [W/m^2]
$h_{(x_1)}$	=	Coefficientes de transferência de calor por convecção da superfície exterior), [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
α	=	Coefficiente de absorção da superfície exterior.

Em coberturas ventiladas o comportamento térmico da cobertura depende também da taxa de ventilação que ocorre na caixa-de-ar assim como da dinâmica da transferência de calor entre o exterior e o ambiente interior associado aos três mecanismos que decorrem em simultâneo, mecanismo de condução, convecção e de radiação térmica. Assim para se caracterizar o comportamento térmico da cobertura, recorreu-se a um conjunto de equações de balanço de energia. A análise do comportamento térmico da cobertura depende do sentido do fluxo térmico, em cada instante, podendo apresentar sentido ascendente ou descendente, conforme a diferença de temperatura entre o exterior e o ambiente interno. Numa primeira fase analisou-se os perfis de temperatura e humidade do ar na caixa-de-ar e avaliou-se a capacidade da cobertura em se opor à passagem do fluxo de calor e de acumular energia, sem a libertar imediatamente, contribuindo para a contenção das oscilações da temperatura no ar no interior. Para tal, foram analisadas as propriedades de atraso e de amortecimento térmico que estão associadas à inércia térmica, dado que o fluxo de calor que penetra na cobertura não a atravessa imediatamente mas sim com um certo atraso e amortecimento térmico. A eficiência da cobertura depende também do comportamento psicométrico do ar da caixa-de-ar, isto é, a capacidade da cobertura diminuir possíveis condensações através da ventilação natural. Para isso, a partir do

diagrama psicrométrico analisaram-se as propriedades termodinâmicas do fluxo de ar ao longo da caixa-de-ar. A análise consiste em verificar se as telhas cerâmicas, devido à sua estrutura porosa, conseguem absorver uma determinada quantidade de vapor de água contido no ar da caixa-de-ar da cobertura, ou se, pelo contrário, existe libertação do vapor de água para o ar da caixa-de-ar.

A transmissão de calor numa cobertura não acontece de forma estacionária uma vez que as condições exteriores estão em constante alteração e a massa da cobertura proporciona um atraso térmico significativo na transmissão de calor para o desvão. No entanto, o conhecimento da taxa de transferência de calor em estado quase estacionário é útil para se interpretar algumas das propriedades térmicas. O circuito térmico em analogia com um circuito eléctrico ilustrado na Figura 3.22 representa os fluxos de calor que fluem desde a superfície exterior do revestimento cerâmico até ao ar interior do desvão para um dado instante (estado quase estacionário).

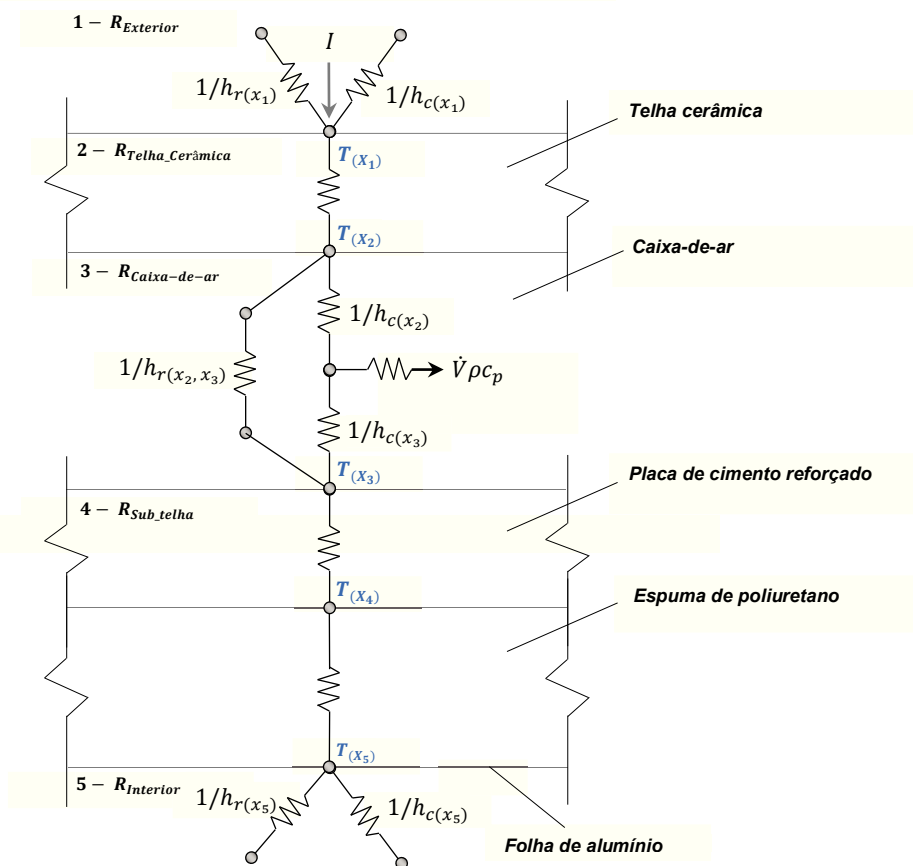


Figura 3.22- Circuito térmico: fluxos de calor na cobertura num instante.

Assim, um coeficiente global de transmissão de calor (U) que define-se um estado quase estacionário, representativo da quantidade de calor que atravessa a cobertura por unidade de tempo resume-se à seguinte equação:

$$U = \frac{1}{R_{Exterior} + R_{Telha} + R_{Caixa-de-ar} + R_{Sub_telha} + R_{Interior}} \quad (8)$$

A avaliação do comportamento térmico de uma cobertura em condições de regime dinâmico permite a caracterização da transferência transiente de calor para cada camada construtiva através da realização de balanços de energia respeitando a primeira lei da termodinâmica da conservação de energia. A Figura seguinte sintetiza o balanço de energia numa secção da cobertura.

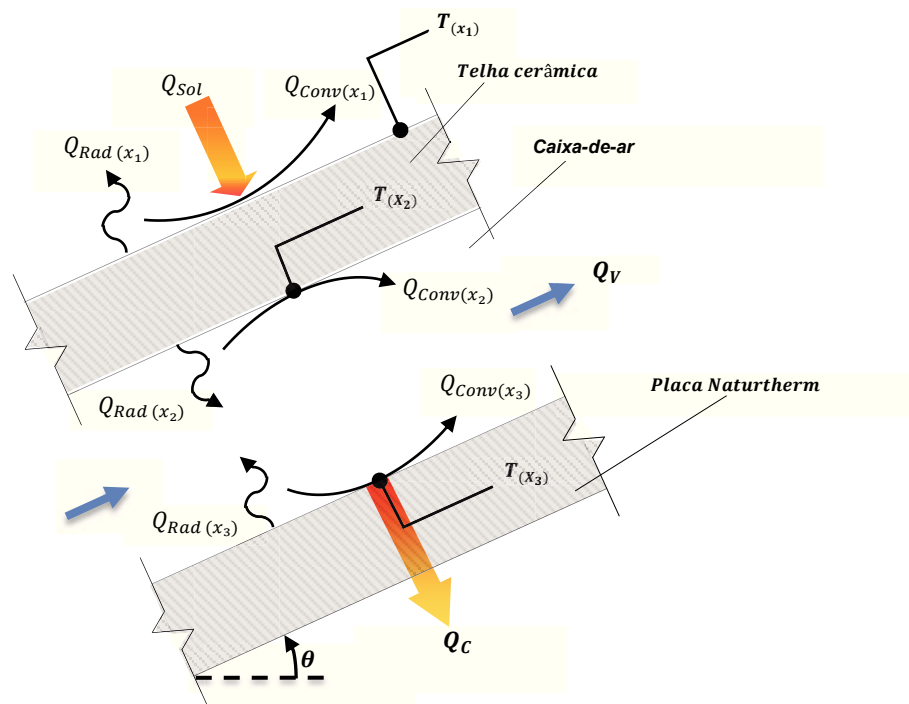


Figura 3.23-Mecanismos de transferência de calor na cobertura.

A condução transiente de calor consiste num processo de transferência de calor que depende do tempo, variando sempre que o sistema sofre uma alteração das suas condições operacionais, isto é, alteração das condições de convecção nas superfícies ou das condições de radiação à superfície, pela alteração da temperatura das superfícies, do sentido do fluxo de calor, ou ainda, da acumulação ou dissipação de energia interna dos respetivos

materiais. De seguida é apresentada a metodologia para o cálculo dos fluxos de transferência de calor para cada camada construtiva da cobertura com beiral ventilado e sub-telha.

- Determinação do fluxo de calor variável para a superfície exterior do revestimento:

A temperatura na superfície exterior do revestimento cerâmico depende das condições ambientais exteriores (da radiação solar, da velocidade do vento e da temperatura exterior), e ainda, das propriedades óticas da superfície do revestimento (tais como, da absorção solar e da emissividade térmica). Para uma determinada intensidade de radiação solar incidente (I) sobre o revestimento, parte do fluxo de calor é absorvido pela superfície (Q_{sol}) e a restante parte refletida para o exterior, tal que:

$$Q_{sol} = \alpha \cdot I \quad (9)$$

O fluxo de calor emitido pelo revestimento para o meio envolvente depende da sua temperatura superficial, $T_{(x_1)}$, e o fluxo de calor perdido por convecção para o ar exterior à temperatura $T_{(\infty)}$ depende do coeficiente de convecção, $h_{c(x_1)}$. O fluxo de calor transmitido para o revestimento cerâmico pode ser obtido por um balanço de energia definido por um volume de controlo na superfície exterior do revestimento, resumindo-se à seguinte equação:

$$Q_{sol} = Q_{S(1)} + Q_{E(1)} \quad (10)$$

O termo $Q_{E(1)}$ representa o fluxo de calor que é absorvido por condução para o interior do revestimento cerâmico, por unidade de área. O termo $Q_{S(1)}$ representa a capacidade do revestimento em diminuir o impacto da radiação solar e de reduzir o fluxo de calor transmitido estando diretamente relacionado com o fluxo de calor radiativo, emitido para o exterior pela superfície, $Q_{rad(x_1)}$ e com o fluxo de calor convectivo, $Q_{conv(x_1)}$ trocado com o ar exterior. O fluxo de calor radiativo é dado pela lei de Stefan-Boltzmann, onde $T_{(x_1)}$ é a temperatura absoluta da superfície (em Kelvin) e σ é a constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$). A capacidade de absorção do revestimento cerâmico aplicado na célula de teste apresenta um valor de $\alpha = 0,75$ e a emissividade (ϵ) considerou-se igual à absorvidade (α) através da simplificação da Lei de Kirchhoff's

(Özisik, 1977). O fluxo de calor convectivo é proporcional a diferença de temperaturas entre a superfície e o ar exterior, onde $h_{c(x_1)}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção para o qual se adotou o valor de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$. O valor de $h_{c(x_1)}$ considerado nesta investigação é similar ao inverso do valor da resistência térmica superficial para o exterior apresentado do quadro VII.1 do RCCTE. Assim, o termo $Q_{S(1)}$ é calculado pela seguinte equação:

$$Q_{S(1)} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{(x_1)}^4 + h_{c(x_1)} \cdot (T_{(x_1)} - T_{(\infty)}) \quad (11)$$

Verifica-se que o balanço de energia para a superfície do revestimento cerâmico representado pelo volume de controlo, $VC_{(1)}$ é caracterizado pelo total de fluxo de calor recebido, Q_{Sol} , e o total do fluxo de calor perdido, como ilustrado na Figura 3.24. Sintetizando, o balanço de transferência de calor para a superfície do revestimento cerâmico pode ser representado como ilustrado na seguinte equação:

$$Q_{E(1)} = Q_{Sol} - Q_{Conv(x_1)} - Q_{Rad(x_1)} \quad (12)$$

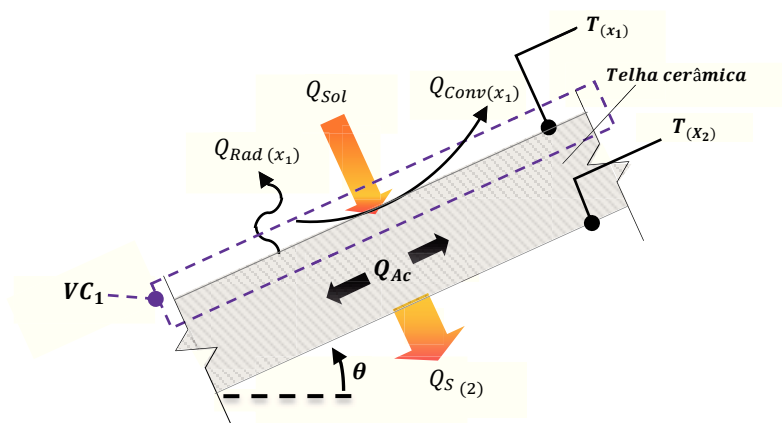


Figura 3.24- Fluxo de calor variável para a superfície do revestimento cerâmico.

- Determinação do fluxo e acumulação de calor variável no interior do revestimento:

A transferência de calor através do revestimento cerâmico está diretamente relacionada com a diferença de temperatura, a espessura, a resistência térmica e a capacidade calorífica do material cerâmico. A conservação de energia para o revestimento cerâmico pode ser

representada pelo seguinte balanço de energia.

$$Q_{Ac} = Q_{E(1)} - Q_{S(2)} \quad (13)$$

O calor acumulado, Q_{Ac} , resulta da diferença entre a quantidade de fluxo de calor que entra, $Q_{E(1)}$ e da quantidade de fluxo de calor que sai da telha cerâmica, $Q_{S(2)}$. O calor acumulado por unidade de área da telha é função do calor específico e da variação de temperatura, ΔT ao longo de um intervalo de tempo, tal que:

$$Q_{Ac} = \frac{M \cdot c_p}{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (14)$$

A relação entre a capacidade do material para conduzir a energia térmica e a capacidade para acumular o calor define-se pela difusividade térmica (α_t) determinada pelo quociente entre a condutividade térmica (λ) e o produto da massa específica (ρ) e com o calor específico unitário (c_p), representado pela seguinte equação:

$$\alpha_t = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (15)$$

Substituindo a massa da telha por unidade de área em função da sua espessura (e), a equação (14) toma a seguinte forma:

$$Q_{Ac} = \rho \cdot e \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (16)$$

A variação de temperatura (ΔT) representa a diferença entre a temperatura superficial exterior, $T_{(x_1)}$, e a temperatura superficial interior, $T_{(x_2)}$ do respetivo revestimento cerâmico.

- Determinação do fluxo de calor variável correspondente à caixa-de-ar da cobertura:

A transferência de calor para o ar que flui através da caixa-de-ar está diretamente relacionada com a transmissão de calor da superfície quente do revestimento cerâmico por convecção para o ar da caixa-de-ar. O ar por sua vez, transfere o calor para a superfície da sub-telha provocando uma variação da sua temperatura superficial. Acontece ainda fluxos de calor entre a superfície interior do revestimento e a superfície da sub-telha em contato

com o ar da caixa-de-ar. Verifica-se que balanço de energia para a caixa-de-ar representado pelo volume de controlo, $VC_{(2)}$, Figura 3.25, está associado ao fluxo de calor que entra para a caixa-de-ar $Q_{S(2)}$ e posteriormente ao fluxo de calor que entra para a sub-telha, $Q_{E(3)}$ e o que se dissipa pela caixa-de-ar, Q_V definido a partir dos seguintes balanços de transmissão de calor:

$$Q_{S(2)} = Q_{Rad(x_2)} + Q_{Conv(x_2)} \quad (17)$$

$$Q_{E(3)} = Q_{S(2)} - [Q_{V(sai)} + Q_{V(entra)}] \quad (18)$$

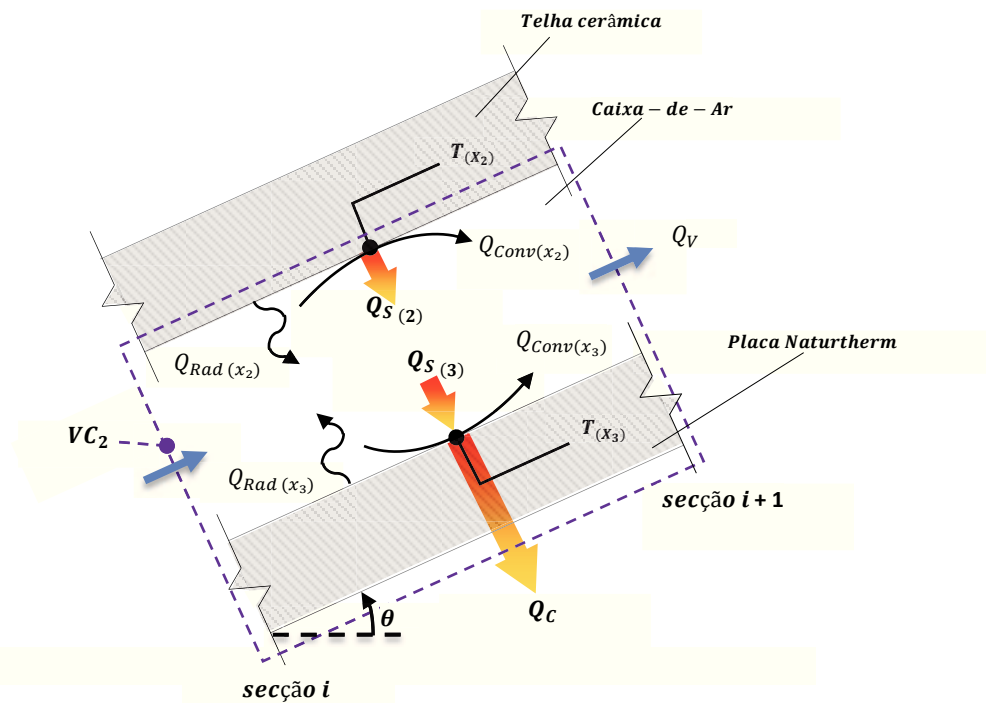


Figura 3.25-Fluxo de calor variável correspondente à caixa-de-ar da cobertura.

O fluxo de calor transmitido entre as partículas do ar provoca uma diminuição da densidade do ar resultando um movimento do ar por convecção natural ao longo da caixa-de-ar. O escoamento do ar é registado experimentalmente por um anemómetro de velocidade, fundamental para determinar o caudal volúmico (\dot{V}) e o respetivo caudal mássico (\dot{m}), obtido pelo produto da massa específica (ρ) e o caudal volúmico, para um respetivo volume específico (v) calculado a partir da temperatura e humidade relativa do ar registada experimentalmente. O balanço de transmissão de calor associado ao escoamento do respetivo ar da caixa-de-ar é apresentado pela seguinte equação:

$$h_{c(x_2)} \cdot \left(T_{(x_2)} - \frac{T_{(i)} + T_{(i+1)}}{2} \right) + h_{c(x_3)} \cdot \left(T_{(x_3)} - \frac{T_{(i)} + T_{(i+1)}}{2} \right) = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{(i+1)} - T_{(i)}) \quad (19)$$

No cálculo da transferência de calor por convecção natural os coeficientes de convecção natural foram considerados iguais para ambas as superfícies da caixa-de-ar, tendo sido calculados através da metodologia apresentada no Apêndice A. Resumindo, o balanço energético para a caixa-de-ar corresponde ao fluxo de calor que entra e sai da caixa-de-ar para um definido volume de controlo, como anteriormente ilustrando na Figura 3.25 com a representação dos fluxos de calor que entram e saem nesse volume de controlo, assim como a identificação das temperaturas superficiais que foram determinadas experimentalmente.

A potência calorífica que é transportado pelo ar da caixa-de-ar é determinada em função do caudal volúmico do escoamento (\dot{V}), massa específica e capacidade calorífica do ar através da seguinte equação:

$$Q_V = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{(i+1)} - T_{(i)}) \quad (20)$$

A transmissão de calor por radiação entre o revestimento e a placa sub-telha foi determinada pela seguinte equação (Çengel, 2011):

$$Q_{rad(x_2, x_3)} = \frac{\sigma \cdot (T_{(x_2)}^4 - T_{(x_3)}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (21)$$

- Determinação do fluxo de calor variável transmitido para o desvão da cobertura:

O calor transmitido para o desvão da cobertura é determinado através da equação de transferência de calor desde o ar na caixa-de-ar até ao ar no desvão da cobertura:

$$Q_C = U \cdot \left(\left(\frac{T_{(i)} + T_{(i+1)}}{2} \right) - T_{(Desvão)} \right) \quad (22)$$

O valor do coeficiente de transmissão térmica (U) para a placa sub-telha é fornecido pelo fabricante pelo que a transferência de calor é calculada pelo produto entre o coeficiente de transmissão térmica e a variação entre a temperatura média do ar da caixa-de-ar e a temperatura do ar no desvão, $T_{(Desvão)}$. O valor de $T_{(x_4)}$ na interface da placa com a espuma

isolante foi registado com o objectivo de observar o perfil de temperatura na transição entre a placa de cimento reforçado e a espuma de poliuretano da placa sub-telha. A Figura 3.26 ilustra esquematicamente o fluxo de calor transmitido ao desvão da cobertura através da placa sub-telha.

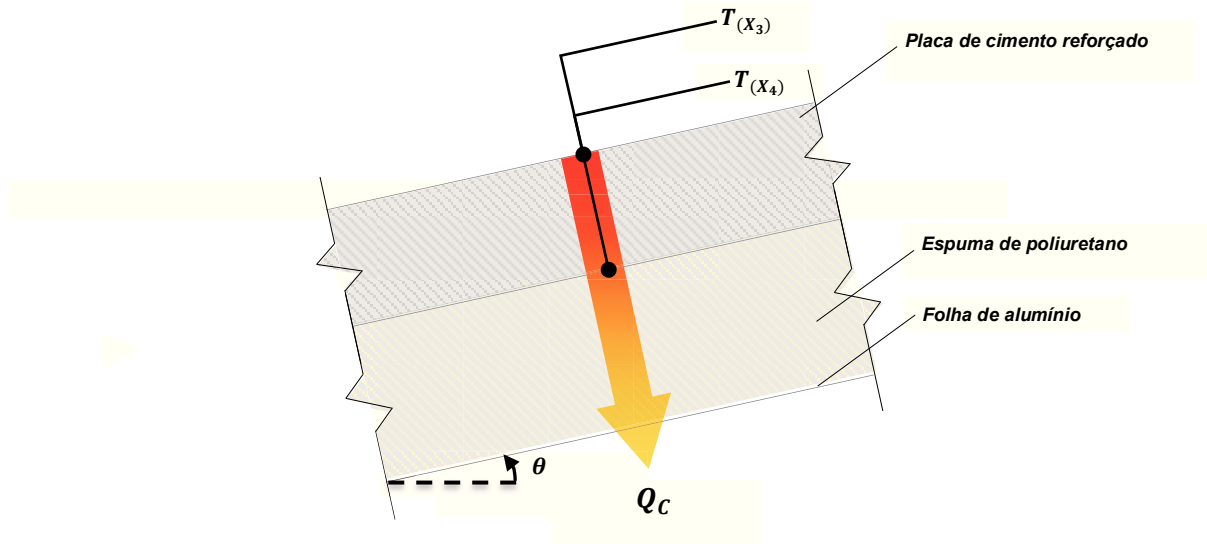


Figura 3.26- Fluxo de calor variável transmitido ao desvão da cobertura através da placa sub-telha.

4. Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados obtidos, avalia-se a potencialidade da solução construtiva na melhoria do comportamento térmico de um edifício para as diferentes flutuações térmicas diárias. Avalia-se qual o efeito da ventilação natural, assim como, as trocas de calor entre a cobertura e o meio envolvente.

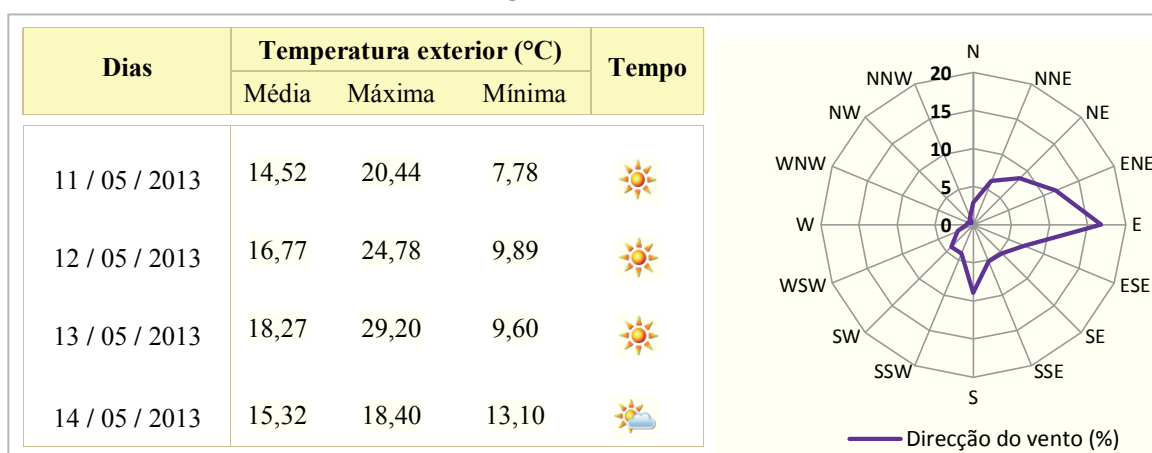
4.1. Análise do comportamento térmico e termo-higrométrico

Seguidamente apresentam-se os resultados mais significativos e elucidativos que evidenciam o comportamento térmico e psicométrico da cobertura ventilada revelado pelos perfis de temperatura e humidade ao longo da caixa-de-ar e no desvão para os correspondentes períodos de monitorização, em função das condições meteorológicas.

- Período de monitorização de 11 a 14 Maio:

Os resultados obtidos no período de monitorização de 11 a 14 Maio são representados pelos perfis de temperaturas e humidade do ar ao longo da caixa-de-ar nas 3 secções descritas na *secção 3.2.1*, e da temperatura do desvão da cobertura como ilustrados na Figura 4.1 e Figura 4.2. Os dados meteorológicos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Dados meteorológicos desde o dia 11 até ao dia 14 de Maio.



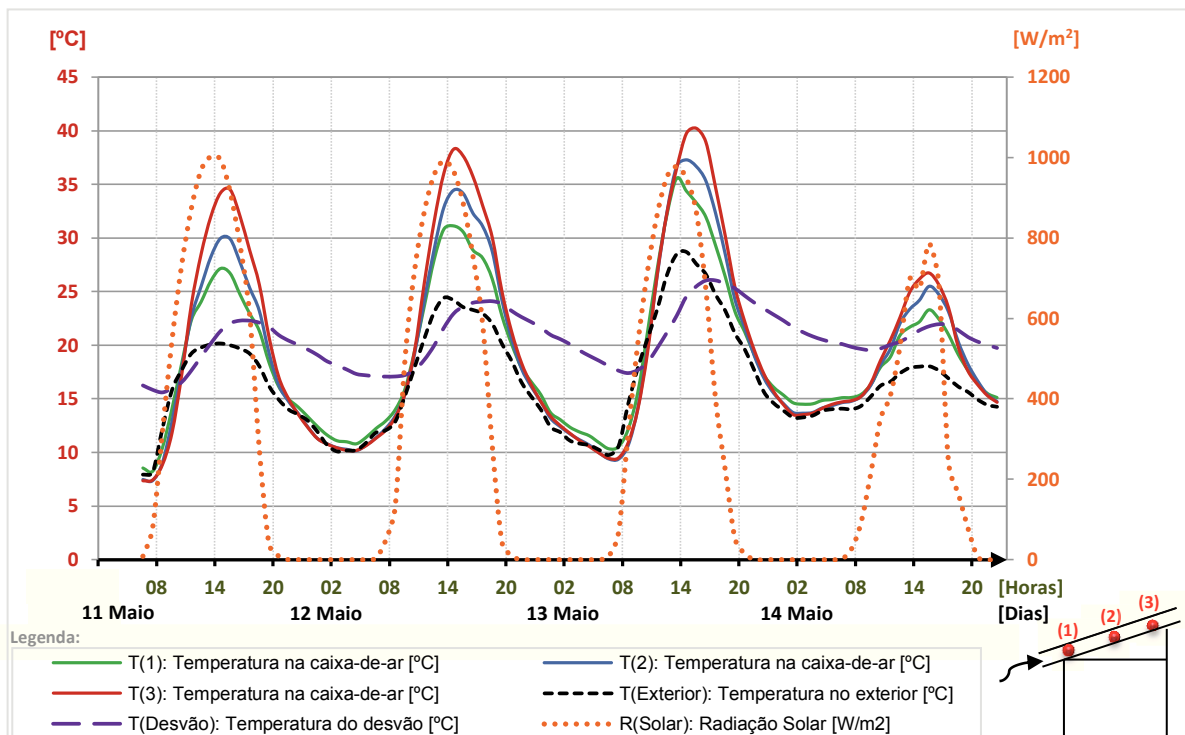


Figura 4.1- Desempenho térmico da cobertura desde o dia 11 a 14 de Maio.

Verifica-se um comportamento térmico semelhante ao longo dos dias com o aumento da temperatura do ar ao longo da caixa-de-ar. Constata-se que as condições meteorológicas são tipicamente amenas mas com noites de forte arrefecimento nocturno, o que origina elevadas amplitudes térmicas diárias. A cobertura apresenta um favorável amortecimento térmico durante o dia verificando-se ainda que a temperatura do desvão não desceu para além dos 15°C durante o arrefecimento nocturno conforme apresentado na Tabela 4.2. O dia 14 corresponde a um dia com alguma nebulosidade, motivo pelo qual se observa algumas instabilidade na temperatura do ar na caixa-de-ar, assim como, valores de temperaturas relativamente inferiores aos restantes dias. Na Tabela seguinte apresentam-se as propriedades de atraso e de amortecimento térmico associadas á inércia térmica da cobertura.

Tabela 4.2- Resultados do ensaio desde o dia 11 até ao dia 14 de Maio.

Data	Temperatura Sol-ar (°C)		Temperatura Desvão (°C)		Inércia térmica	
	T _{Máx.}	Registo	T _{Máx.}	Registo	Amortecimento	Atraso
11-05-2013	40,92	13h:35m	22,4	17h:05m	18,52	03h:30m
12-05-2013	44,44	13h:50m	24,1	17h:10m	20,34	03h:20m
13-05-2013	48,58	14h:05m	26,1	17h:35m	22,48	03h:30m
14-05-2013	43,42	13h:35m	22	17h:15m	21,42	03h:40m

Através da comparação da temperatura sol-ar máxima e a temperatura máxima registada no desvão verificou-se um razoável amortecimento térmico da cobertura da ordem de 20°C com um atraso térmico de cerca de 3h30min (Tabela 4.2). Na Figura seguinte verifica-se que durante as primeiras horas solares a humidade relativa do ar diminui ao longo da caixa-de-ar qualitativamente semelhante ao perfil de humidade relativa do ar exterior.

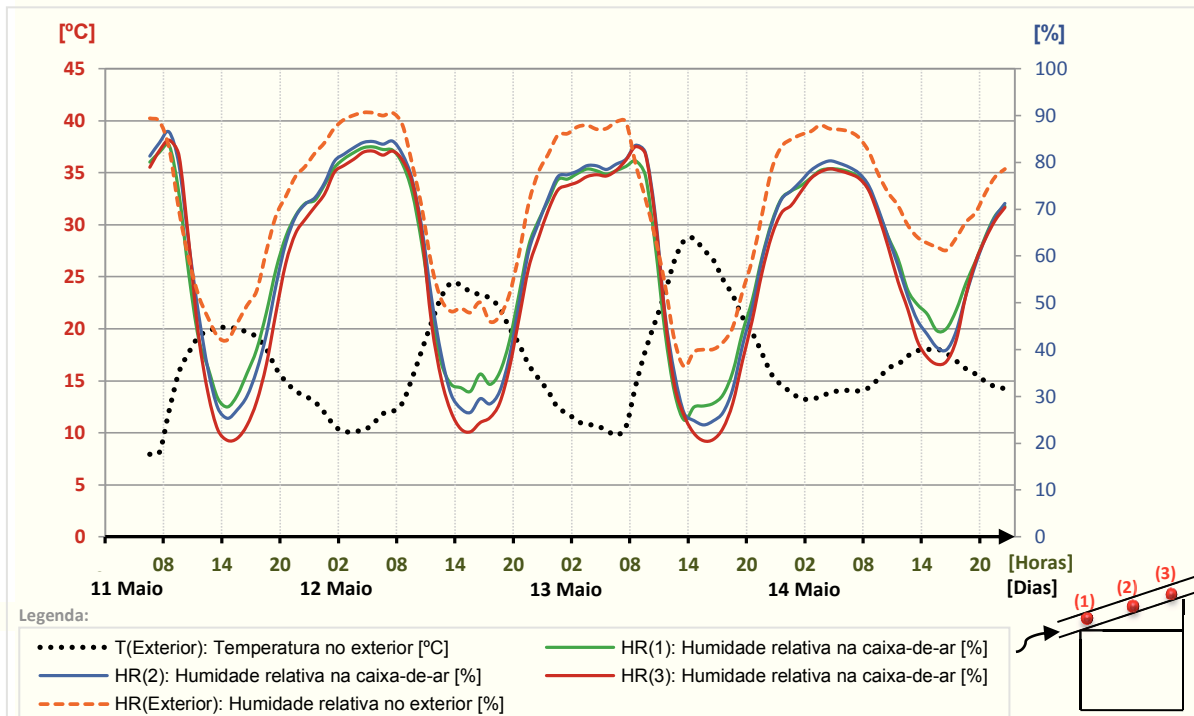


Figura 4.2- Comportamento psicrométrico da cobertura desde o dia 11 a 14 de Maio.

• Período de monitorização de 17 a 20 Maio:

Os resultados meteorológicos obtidos no período de monitorização de 17 a 20 Maio são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Dados meteorológicos desde o dia 17 até ao dia 20 de Maio.

Dias	Temperatura exterior (°C)			Tempo
	Média	Máxima	Mínima	
17 / 05 / 2013	12,64	16,30	10,20	
18 / 05 / 2013	13,19	17,40	9,60	
19 / 05 / 2013	12,87	18,20	8,80	
20 / 05 / 2013	13,38	20,00	5,70	

— Direcção do vento (%)

Dos resultados obtidos constata-se que os dias apresentam elevadas amplitudes térmicas exteriores destacando-se a maior amplitude térmica no dia 20 com uma diferença de 14,3°C. No entanto, a temperatura do desvão não acompanhou o forte arrefecimento nocturno apresentando um comportamento térmico favorável e expressivo (Figura 4.3).

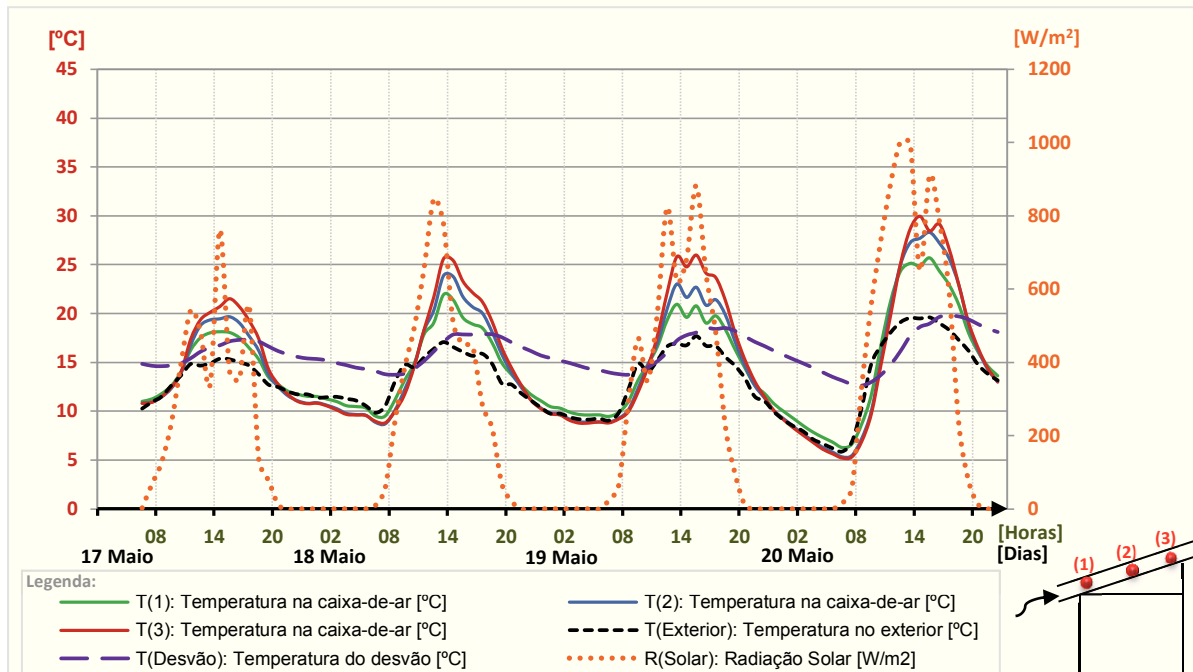


Figura 4.3- Desempenho térmico da cobertura desde o dia 17 a 20 de Maio.

Devido a alguma nebulosidade, os perfis de temperatura ao longo da caixa-de-ar são menos expressivos do que o período de medição anterior. Verifica-se que a temperatura do desvão se manteve praticamente constante ao longo dos 4 dias de medição. Os ganhos térmicos diários e a dissipação lenta do calor durante o forte arrefecimento nocturno contribuiu para a contenção do calor interior no desvão, mantendo-o a uma temperatura relativamente superior à temperatura exterior. Observou-se também uma elevada capacidade amortecimento e atraso térmico (Tabela 4.4).

Tabela 4.4- Resultados do ensaio desde o dia 17 a 20 de Maio.

Data	Temperatura Sol-ar (°C)		Temperatura Desvão (°C)		Inércia térmica	
	T _{Máx.}	Registo	T _{Máx.}	Registo	Amortecimento	Atraso
17-05-2013	40,74	14h:40m	17,3	17h:50m	23,44	03h:10m
18-05-2013	41,76	13h:40m	17,9	18h:40m	23,86	05h:00m
19-05-2013	40,88	14h:25m	18,6	18h:25m	22,28	04h:00m
20-05-2013	43,54	14h:00m	19,9	16h:50m	23,64	02h:50m

Na Figura seguinte verifica-se um comportamento semelhante ao período de medição anterior, com a variação da humidade relativa do ar na caixa-de-ar influenciada pela variação da humidade do ar exterior e da intensidade da radiação solar.

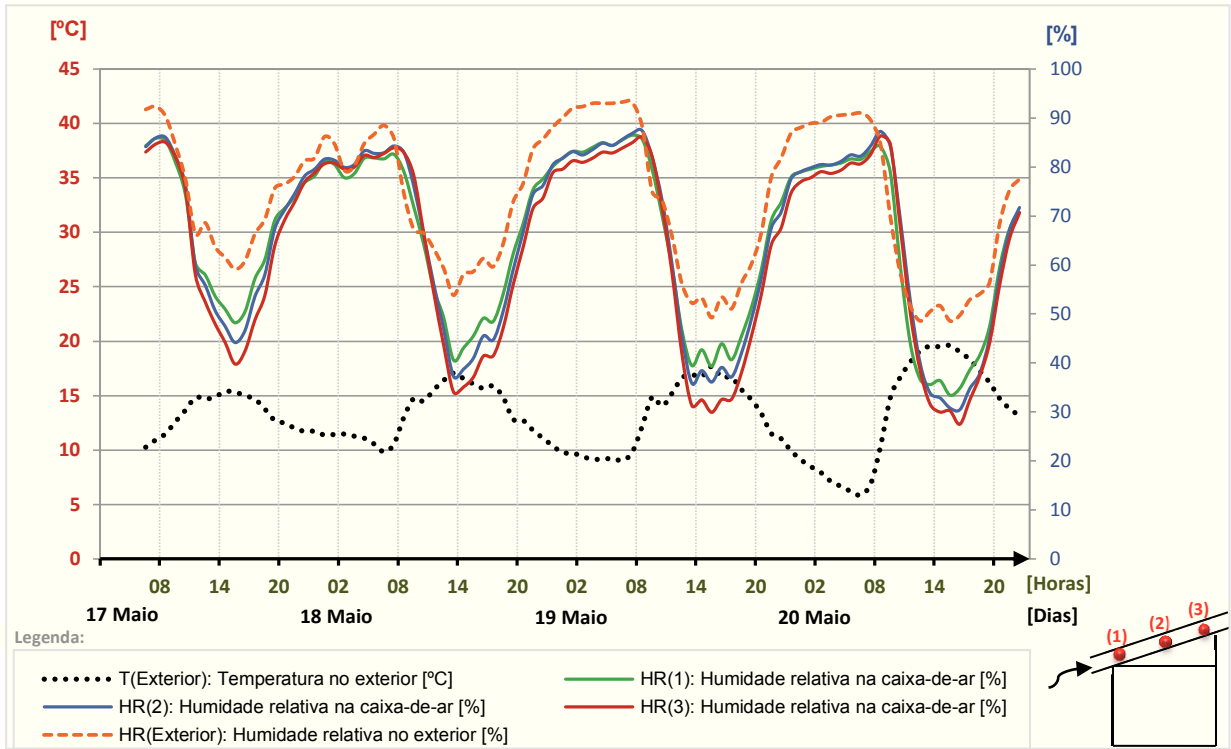


Figura 4.4- Comportamento psicrométrico da cobertura desde o dia 17 a 20 de Maio.

• Período de monitorização de 23 a 26 Maio:

Os resultados obtidos no período de monitorização de 23 a 26 Maio são ilustrados nas Figuras 4.5 e 4.6. Os dados meteorológicos são apresentados na Tabela 4.5 evidenciando dias amenos mas com noites de forte arrefecimento nocturno.

Tabela 4.5- Dados meteorológicos desde o dia 23 até ao dia 26 de Maio.

Dias	Temperatura exterior (°C)			Tempo
	Média	Máxima	Mínima	
23 / 05 / 2013	17,77	24,10	13,60	☀️
24 / 05 / 2013	19,49	23,80	9,70	☀️
25 / 05 / 2013	15,65	23,30	8,70	☀️
26 / 05 / 2013	14,96	18,70	12,50	☁️

— Direcção do vento (%)

Os resultados obtidos neste período de medição são semelhantes ao intervalo de medição para os dias de 11 a 14 de Maio. A cobertura apresenta um favorável amortecimento térmico durante o dia e a variação da temperatura do desvão apresentou comportamento semelhante ao longo dos dias de medição, comportamento este relacionado pelo valor máximo de temperatura exterior alcançado ser similar para os diferentes dias.

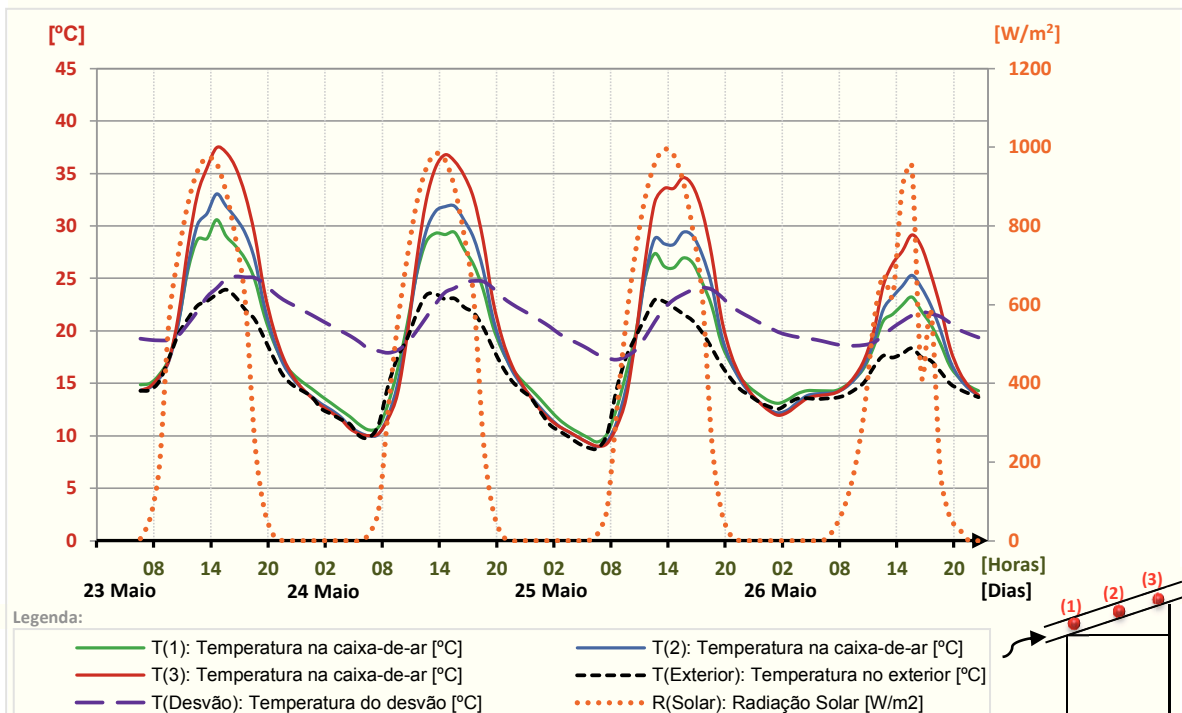


Figura 4.5- Desempenho térmico da cobertura desde o dia 23 a 26 de Maio.

Observando a Tabela 4.6, percebe-se, que os valores de atraso térmico não apresentam um comportamento idêntico. Porém, esta discrepância resulta da temperatura máxima do ar exterior registada apresentar valores superiores, proporcionando um maior atraso térmico em relação ao intervalo de medição para os dias de 11 a 14 de Maio.

Tabela 4.6- Resultados do ensaio desde o dia 23 a 26 de Maio.

Data	Temperatura Sol-ar (°C)		Temperatura Desvão (°C)		Inércia térmica	
	T _{Máx.}	Registo	T _{Máx.}	Registo	Amortecimento	Atraso
23-05-2013	42,92	14h:45m	25,3	16h:50m	17,62	02h:05m
24-05-2013	43,48	13h:20m	24,8	18h:20m	18,68	05h:00m
25-05-2013	43,14	13h:35m	24,2	17h:40m	18,94	04h:05m
26-05-2013	42,64	12h:30m	21,8	16h:55m	20,84	04h:25m

No que se refere ao comportamento psicométrico verifica-se que durante o dia a humidade

relativa do ar da caixa-de-ar diminui, resultados similares aos períodos de monitorização anteriormente investigados.

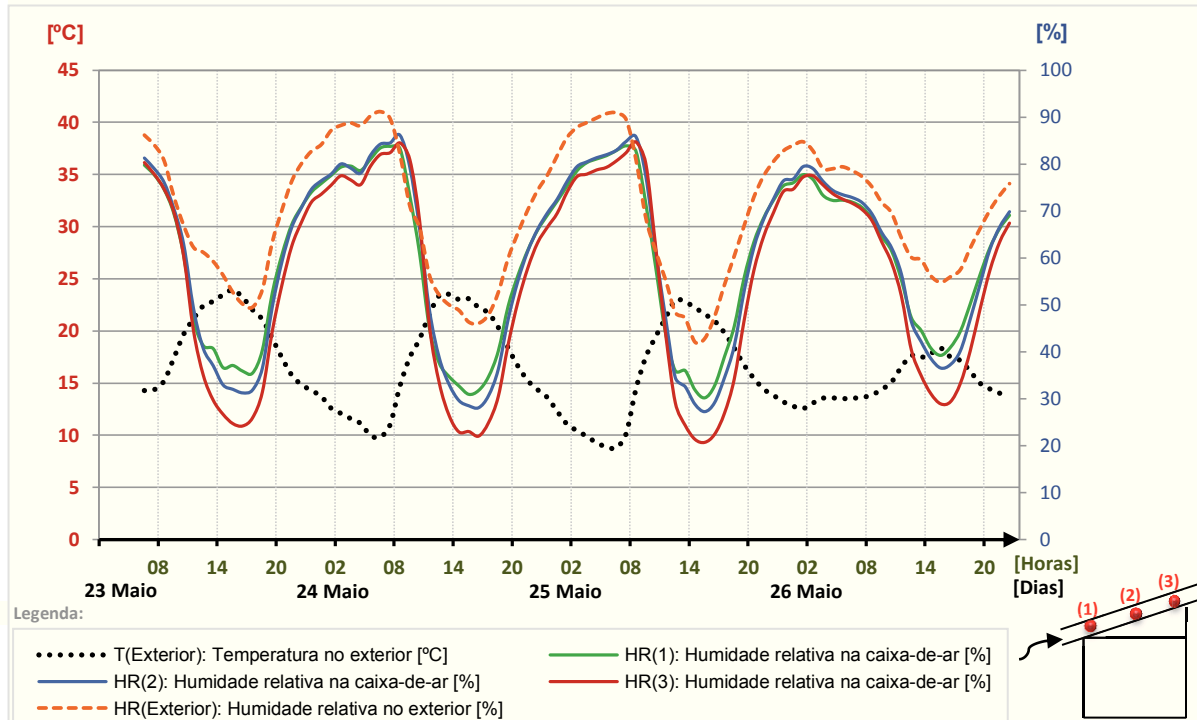


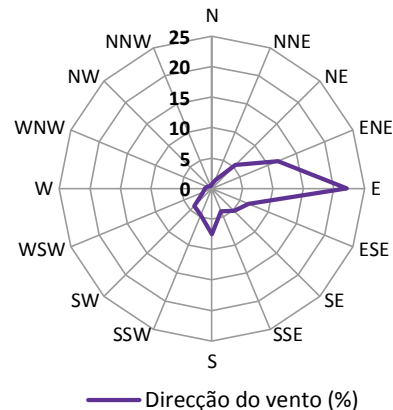
Figura 4.6- Comportamento psicrométrico da cobertura desde o dia 23 a 26 de Maio.

• Período de monitorização de 31 de Maio a 3 de Junho:

Os resultados obtidos na quarta semana de monitorização para a célula de teste são apresentados na Tabela 4.8 e as curvas dos perfis de temperaturas e humidade ao longo da caixa-de-ar e desvão da cobertura estão ilustradas nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente. Os dados meteorológicos são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Dados meteorológicos desde o dia 31 de Maio até ao dia 3 de Junho.

Dias	Temperatura exterior (°C)			Tempo
	Média	Máxima	Mínima	
31 / 05 / 2013	16,12	22,10	9,20	☀️
01 / 06 / 2013	17,88	25,40	9,50	☀️
02 / 06 / 2013	20,67	30,30	10,40	☀️
03 / 06 / 2013	21,80	30,90	11,50	☀️



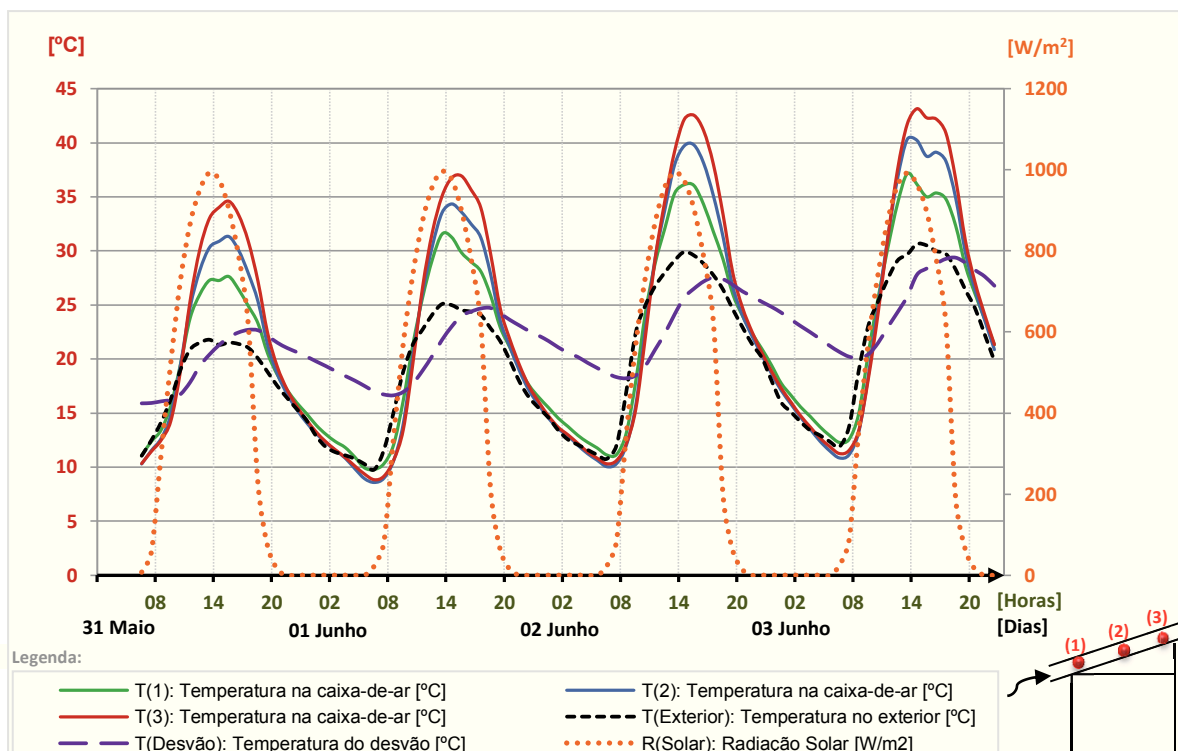


Figura 4.7- Desempenho térmico da cobertura desde o dia 31 de Maio a 3 de Junho.

Verifica-se um comportamento térmico semelhante ao longo dos dias com o aumento da temperatura do ar ao longo da caixa-de-ar. Analisando as condições meteorológicas observa-se que o período de monitorização decorreu em dias quentes mas com noites de forte arrefecimento nocturno. A cobertura apresenta uma favorável contenção das oscilações de temperatura derivadas do arrefecimento nocturno, no entanto, verifica-se um sobreaquecimento do desvão da cobertura devido à combinação de várias situações propícias a este efeito, a elevada exposição solar, a inexistência de ventos na direcção sul que podem proporcionar uma maior ventilação da caixa-de-ar e ainda, de referir que o desvão é um compartimento que não é ventilado. No que se refere ao comportamento psicrométrico (Figura 4.8) os resultados são semelhantes aos anteriormente analisados.

Tabela 4.8- Resultados do ensaio desde o dia 31 de Maio a 3 de Junho.

Data	Temperatura sol-ar (°C)		Temperatura desvão (°C)		Inércia térmica	
	T _{Máx.}	Registo	T _{Máx.}	Registo	Amortecimento	Atraso
31-05-2013	42,08	13h:35m	22,8	17h:40m	19,28	04h:05m
01-06-2013	45,42	13h:45m	24,8	18h:15m	20,62	04h:30m
02-06-2013	49,62	14h:40m	27,6	17h:50m	22,02	03h:10m
03-06-2013	50,30	14h:20m	29,4	18h:40m	20,90	04h:20m

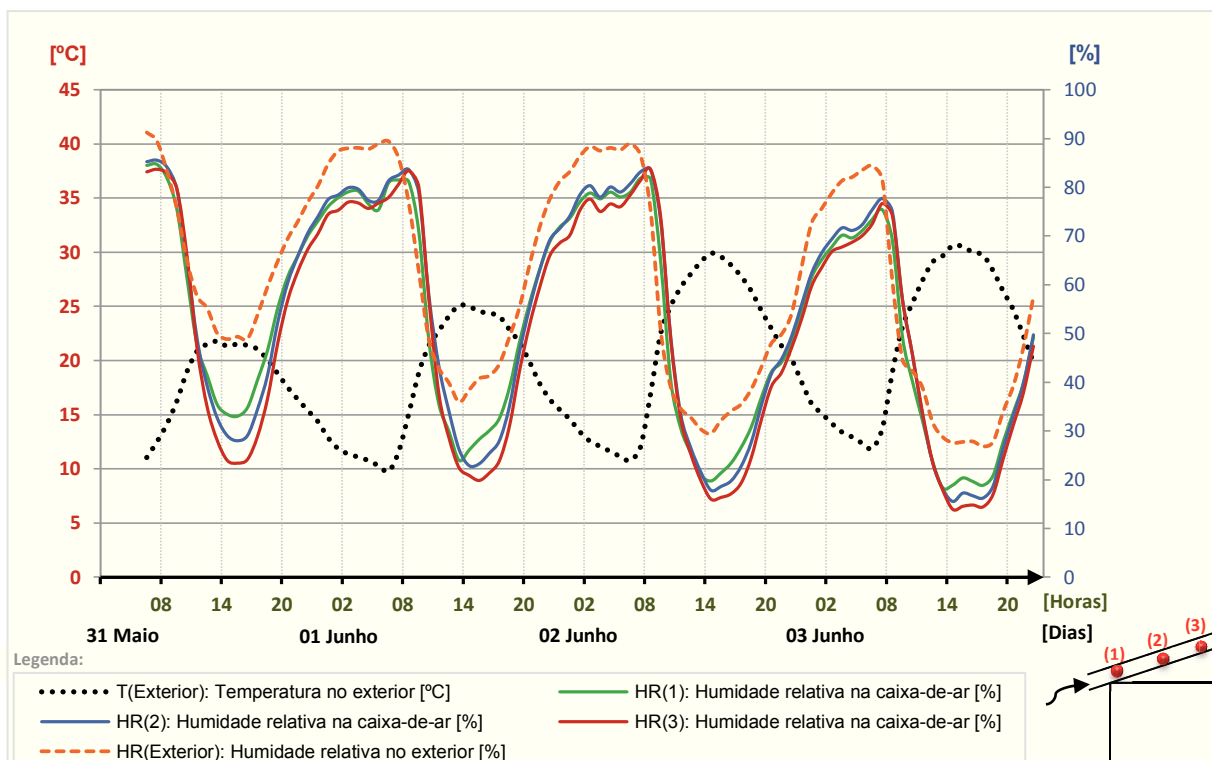


Figura 4.8- Comportamento psicrométrico da cobertura desde o dia 31 de Maio a 3 de Junho.

• Período de monitorização de 6 a 9 de Junho:

Os resultados obtidos para o período de monitorização de 6 a 9 de Junho na célula de teste são apresentados na Tabela 4.10 e as curvas dos perfis de temperaturas e humidade do ar ao longo da caixa-de-ar e desvão da cobertura estão ilustradas nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente. Os dados meteorológicos são apresentados na Tabela 4.9, observando-se dias com elevada nebulosidade de fraca incidência solar.

Tabela 4.9- Dados meteorológicos desde o dia 6 até ao dia 9 de Junho.

Dias	Temperatura exterior (°C)			Tempo
	Média	Máxima	Mínima	
06 / 06 / 2013	17,12	21,60	13,90	
07 / 06 / 2013	18,50	24,00	13,10	
08 / 06 / 2013	14,64	18,00	11,80	
09 / 06 / 2013	15,50	18,00	12,80	

— Direcção do vento (%)

Analisando a Figura 4.9, percebe-se que a temperatura do ar da caixa-de-ar é próxima da temperatura do ar exterior. Porém, observa-se que não ocorre perturbações do ar no desvão da cobertura e que a temperatura do ar neste espaço é relativamente estável durante o ciclo diário. Isso significa que a cobertura apresenta capacidade de contenção das oscilações de temperatura derivadas do arrefecimento nocturno face à inércia térmica associada à massa da placa sub-telha Naturtherm.

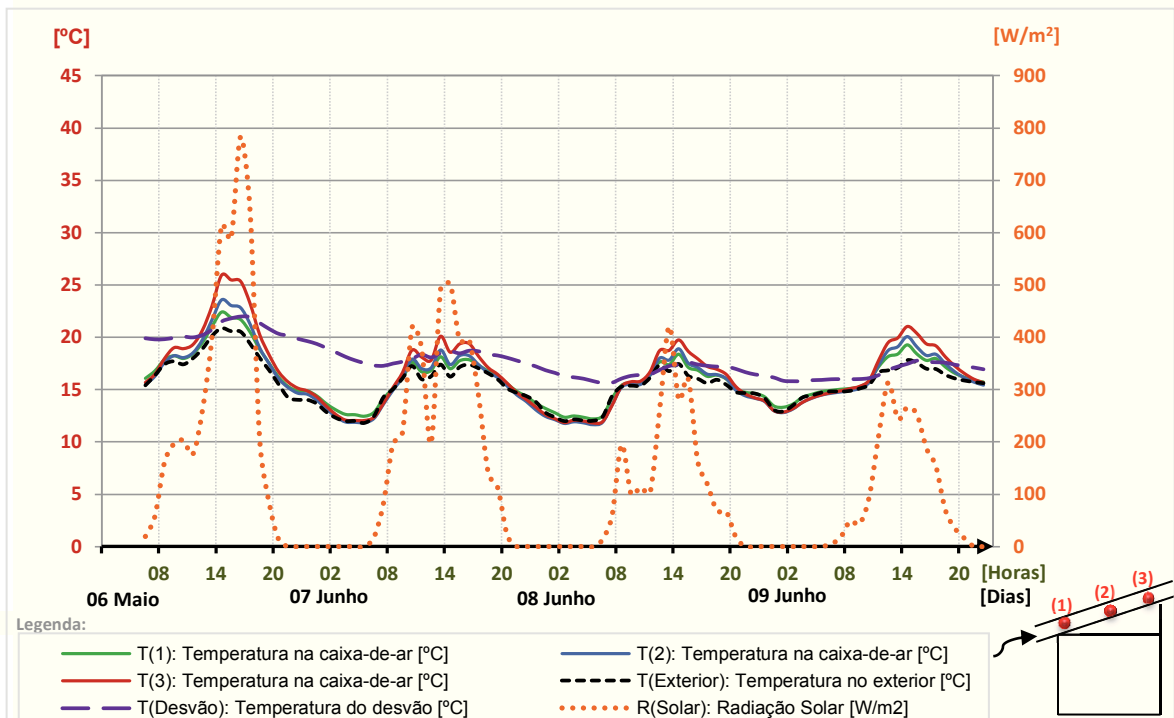


Figura 4.9- Desempenho térmico da cobertura desde o dia 6 a 9 de Junho.

Observando a Tabela 4.10, verifica-se que, há uma diminuição dos valores obtidos para o amortecimento e atraso térmico à medida que diminui a temperatura máxima sol-ar, resultado da fraca intensidade da radiação solar incidente.

Tabela 4.10- Resultados do ensaio desde o dia 6 a 9 de Junho.

Data	Temperatura sol-ar (°C)		Temperatura desvão (°C)		Inércia térmica	
	T _{Máx.}	Registo	T _{Máx.}	Registo	Amortecimento	Atraso
06-06-2013	45,80	14h:55m	22,1	18h:30m	23,70	03h:35m
07-06-2013	37,24	13h:50m	18,8	15h:25m	18,44	01h:35m
08-06-2013	29,06	15h:15m	17,7	16h:20m	11,36	01h:05m
09-06-2013	25,76	15h:00m	17,8	16h:50m	7,96	01h:05m

Na Figura 4.10, verifica-se que os valores de humidade relativa para o ar na caixa-de-ar, são significativamente superiores aos casos anteriormente analisados. Observa-se que os perfis de humidade relativa do ar da caixa-de-ar apresentam comportamento semelhante às oscilações da humidade relativa do ar exterior e da radiação solar incidente.

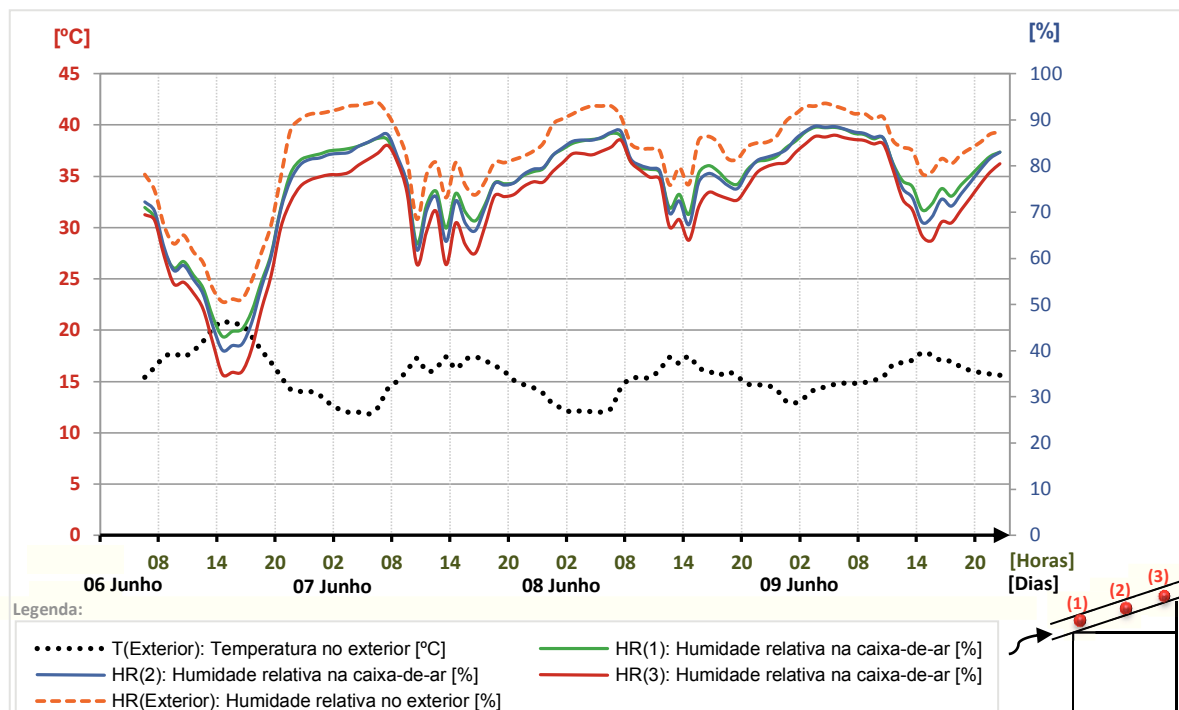


Figura 4.10- Comportamento psicrométrico da cobertura desde o dia 6 a 9 de Junho.

De forma geral, verifica-se que, para as variações dos perfis de temperatura e humidade relativa do ar na caixa-de-ar, a capacidade de amortecimento e o atraso térmico da cobertura são influenciadas pelas condições exteriores de temperatura, humidade relativa e da intensidade da radiação solar. Os resultados vão de encontro aos resultados obtidos em outras pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica desta dissertação, tais como, Özdeniz e Hançer (2005), D'Orazio, *et al.* (2010) Ong, K.S. (2011), em que uma cobertura isolada reduz as perdas térmicas devido à resistência térmica proporcionada pelo isolamento e a massa dos elementos da cobertura mantém o edifício quente durante o período nocturno. Em dias de grande amplitude térmica com elevado arrefecimento nocturno a cobertura apresentou uma boa contribuição para a contenção das oscilações da temperatura do ar interior, apresentado uma boa inércia térmica. No que se refere ao comportamento psicrométrico, verifica-se no geral que a humidade relativa do ar diminui

quando a intensidade da radiação solar é maior. No entanto, a análise dos perfis de umidade relativa do ar não permitem verificar a variação do vapor de água na caixa-de-ar. Assim, através da distribuição dos perfis de umidade absoluta da caixa-de-ar, observa-se que quando a temperatura do ar começa a aumentar, verifica-se um aumento de umidade absoluta, o que indica que o ar da caixa-de-ar está a receber vapor de água transmitido dos restantes elementos da cobertura, nomeadamente da sub-telha e da telha cerâmica.

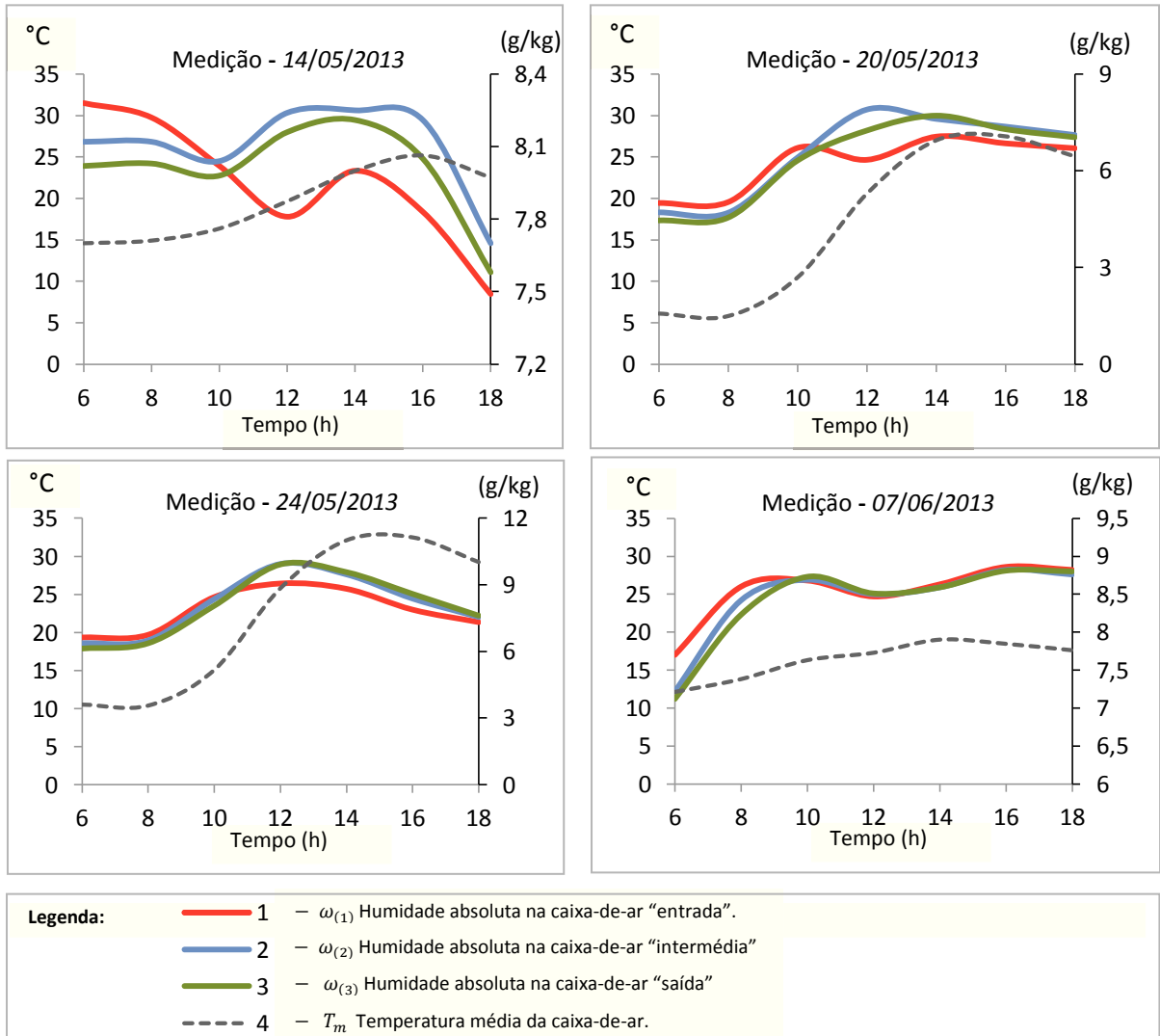


Figura 4.11- Comportamento psicrométrico do ar da caixa-de-ar da cobertura.

Observa-se que os perfis de umidade absoluta do ar na caixa-de-ar apresentam maiores oscilações entre as 10 e as 14 horas. Esta análise pode evidenciar a ocorrência de ventilação na caixa-de-ar eliminando parte do vapor de água que é transmitido para o ar da caixa-de-ar, e assim reduzir a possibilidade de se formarem condensações superficiais nos materiais.

4.2. Estudo da ventilação natural da caixa-de-ar

A análise dos resultados referentes à ventilação natural através da caixa-de-ar reuniu diversas variáveis que explicam o comportamento característico do fluxo de ar por convecção natural. Os dados resultaram de medições realizadas entre o dia 5 a 11 de Junho e entre os dias 25 a 30 de Junho com análise das condições meteorológicas apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.13 e das condições da caixa-de-ar, tais como, temperatura e humidade relativa e da velocidade de ar da caixa-de-ar medidos experimentalmente.

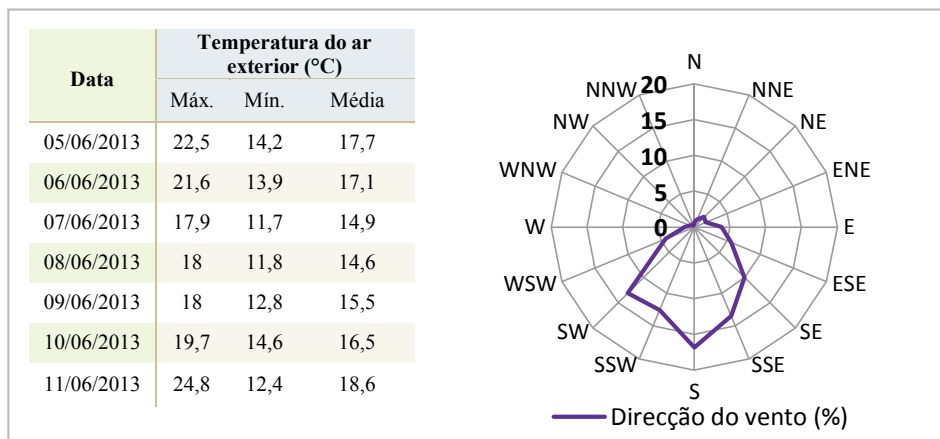


Figura 4.12- Resumo das condições meteorológicas desde o dia 5 a 11 de Junho.

No período de 5 a 11 de Junho verifica-se uma predominância da direcção do vento a sul, favorável ao desenvolvimento da ventilação na caixa-de-ar, com dias com elevada nebulosidade e temperaturas amenas. O período compreendido entre os dias 25 a 30 de Junho é caracterizado por dias muito quentes de céu limpo com predominância do vento a este.

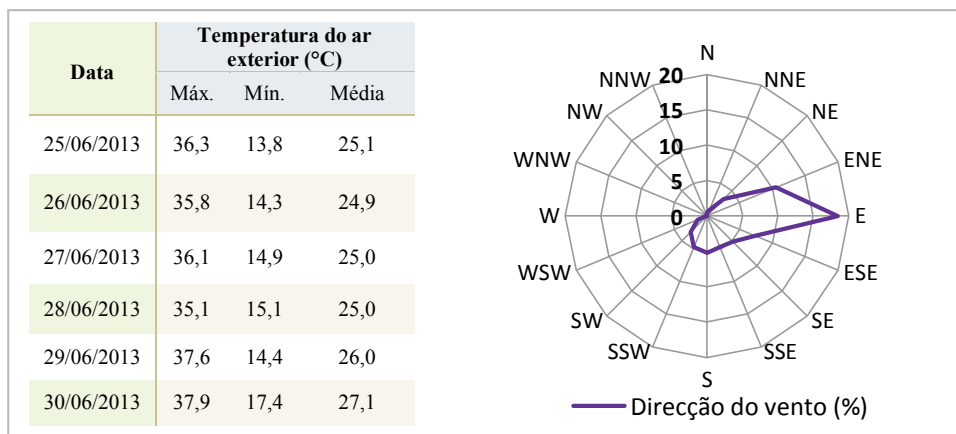


Figura 4.13- Resumo das condições meteorológicas desde o dia 25 a 30 de Junho.

4.2.1 Análise estatística do escoamento do ar na caixa-de-ar

Os resultados estatísticos referentes ao parâmetro velocidade do ar na caixa-de-ar podem ser observados desde a Tabela 4.11 até à Tabela 4.14. Observando a Tabela 4.11, verifica-se que os valores médios de velocidade variam entre 0,29 e 0,47 m/s e a velocidade máxima registada foi de 1,19 m/s.

Tabela 4.11- Resultados obtidos da ventilação, velocidade média e máxima registada na caixa-de-ar, no período compreendido entre 5 a 11 de Junho.

Data	05/06/2013	06/06/2013	07/06/2013	08/06/2013	09/06/2013	10/06/2013	11/06/2013
Ocorrências diárias (%)	28,3	44,8	39,5	29,5	21,0	29,9	37,0
Velocidade média (m/s)	0,33	0,38	0,47	0,32	0,29	0,33	0,36
Velocidade máxima (m/s)	0,81	1,17	1,19	0,84	0,65	0,85	0,92

A Tabela 4.12 apresenta uma distribuição por intervalos limitados de velocidade observando-se que o escoamento do ar acontece com maior frequência a uma velocidade média de [0,2-0,3] m/s. Constatou-se o facto de não haver registos inferiores a 0,2 m/s, porém, esta situação pode resultar da predominância da direcção do vento a sul favorável ao desenvolvimento da ventilação na caixa-de-ar.

Tabela 4.12- Resultados obtidos da distribuição da percentagem de ventilação desenvolvida na caixa-de-ar no período compreendido entre 5 a 11 de Junho.

Data	Velocidade do ar desenvolvido na caixa-de-ar durante os dias de medição (m/s)										
	[0,2-0,3]	[0,3-0,4]	[0,4-0,5]	[0,5-0,6]	[0,6-0,7]	[0,7-0,8]	[0,8-0,9]	[0,9-1]	[1-1,1]	[1,1-1,2]	[1,2-1,3]
05/06/2013	13,3%	7,7%	4,9%	1,5%	0,6%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
06/06/2013	13,3%	14,6%	9,5%	4,3%	1,9%	0,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07/06/2013	7,8%	8,3%	8,0%	6,3%	4,3%	2,7%	1,4%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%
08/06/2013	15,6%	7,9%	3,5%	1,6%	0,7%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
09/06/2013	13,3%	5,7%	1,3%	0,7%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10/06/2013	13,3%	9,5%	4,9%	1,6%	0,6%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
11/06/2013	13,3%	11,7%	6,8%	3,5%	1,3%	0,3%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Analisando a Tabela 4.13, verifica-se que os valores de velocidade média obtidos são inferiores aos obtidos no período de medição compreendido entre o dia 5 a 11 de Junho. Porém, verifica-se que os resultados obtidos da taxa de ventilação diária são mais homogéneos, sendo que, o valor médio de velocidade varia entre 0,056 e 0,1 m/s e a velocidade máxima registada foi de 0,678 m/s.

Tabela 4.13- Resultados obtidos da ventilação, velocidade média e máxima registada na caixa-de-ar no período compreendido entre 25 a 30 de Junho.

Data	25/06/2013	26/06/2013	27/06/2013	28/06/2013	29/06/2013	30/06/2013
Ocorrências diárias (%)	39,93	44,79	47,57	44,10	44,10	44,44
Velocidade média (m/s)	0,056	0,100	0,079	0,071	0,088	0,086
Velocidade máxima (m/s)	0,414	0,678	0,542	0,554	0,500	0,602

A Tabela 4.14 apresenta uma distribuição por intervalos limitados de velocidade para o período de medição entre 25 e 30 de Junho, observando-se que o escoamento do ar acontece com maior frequência a uma velocidade média entre [0,001-0,2] m/s.

Tabela 4.14- Resultados obtidos da distribuição da percentagem de ventilação desenvolvida na caixa-de-ar no período compreendido entre 25 a 30 de Junho.

Data	Velocidade do ar desenvolvido na caixa-de-ar durante os dias de medição (m/s)						
	[0,001-0,1]	[0,1-0,2]	[0,2-0,3]	[0,3-0,4]	[0,4-0,5]	[0,5-0,6]	[0,6-0,7]
25/06/2013	16,0%	14,6%	6,3%	2,8%	0,3%	0,0%	0,0%
26/06/2013	12,8%	9,4%	9,4%	5,9%	4,9%	2,1%	0,3%
27/06/2013	18,1%	14,6%	6,3%	6,6%	1,7%	0,3%	0,0%
28/06/2013	18,1%	12,5%	9,0%	1,4%	2,1%	1,0%	0,0%
29/06/2013	11,8%	12,5%	10,4%	5,2%	3,8%	0,3%	0,0%
30/06/2013	15,3%	12,2%	9,0%	3,5%	3,5%	0,7%	0,3%

Observou-se que para os dias com temperatura média superior existe um maior escoamento do ar na caixa-de-ar. Analisaram-se ainda os perfis de velocidade da caixa-de-ar em comparação com a intensidade da radiação solar e a velocidade do vento exterior para alguns dos dias de medição. Observa-se nas Figuras 4.14 e 4.16 que os perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar acompanham os perfis de radiação solar. De forma geral, verifica-se que a velocidade da caixa-de-ar foi mais elevada quando a radiação solar foi mais intensa. Esta correlação é um factor benéfico da ventilação natural no período do verão que permite dissipar o calor quando a intensidade da radiação solar é mais intensa. Verifica-se ainda que a velocidade do vento exterior favorece a velocidade do ar da caixa-de-ar, como ilustrado na Figura 4.15 e na Figura 4.17, onde os perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar apresentam algumas correlações com o perfil de velocidade do vento exterior.

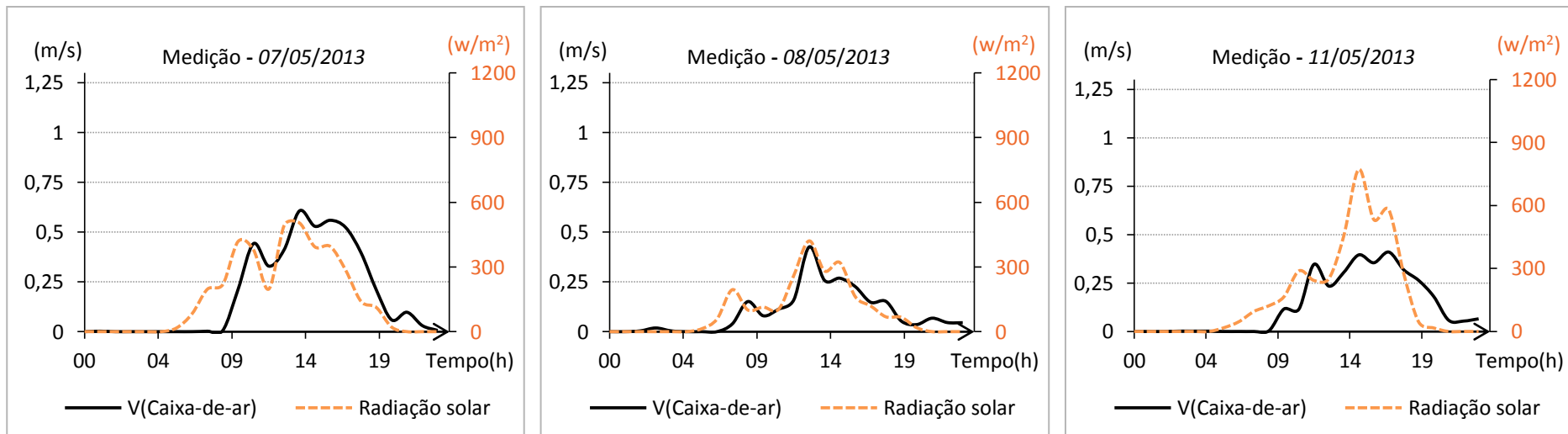


Figura 4.14- Comparação dos perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar em função da radiação solar em dias de céu nublado.

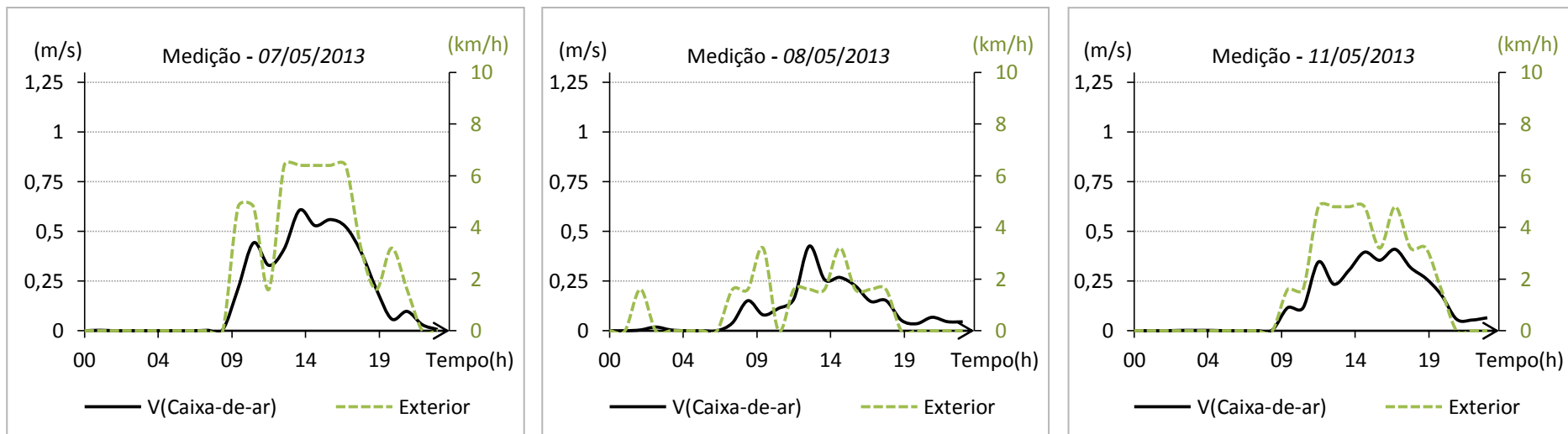


Figura 4.15- Comparação dos perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar em função da velocidade do vento exterior em dias de céu nublado.

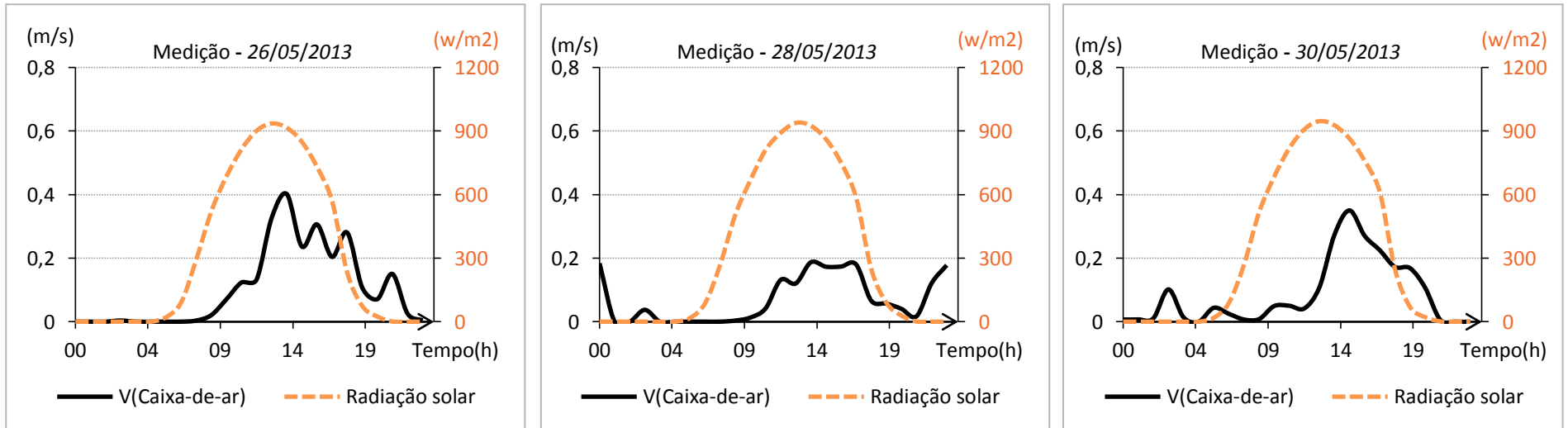


Figura 4.16- Comparação dos perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar em função da radiação solar em dias de céu limpo.

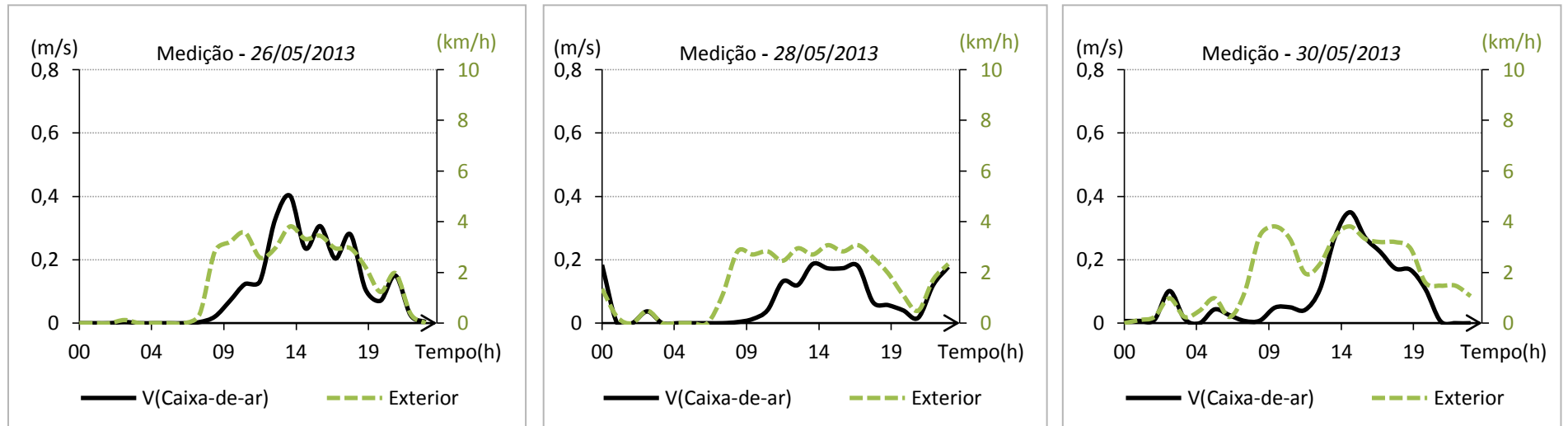


Figura 4.17- Comparação dos perfis de velocidade do ar na caixa-de-ar em função da velocidade do vento exterior em dias de céu limpo.

4.2.2 Comparação do número de Reynolds, caudal mássico e coeficiente de transferência de calor por convecção na caixa-de-ar.

Na Tabela 4.15 apresenta-se o resumo do cálculo das variáveis características do ar induzido na caixa-de-ar para o período compreendido de 25 a 30 de Junho com as condições meteorológicas descritas anteriormente na Figura 4.13, de acordo com a formulação apresentada no Apêndice A. Observa-se que as variáveis apresentadas como o número de Prandtl, de Rayleigh e de Nusselt foram determinantes para se calcular o coeficiente de convecção para o caudal mássico de ar na caixa-de-ar.

Tabela 4.15- Resumo dos resultados obtidos para as variáveis características do ar induzido na caixa-de-ar para o correspondente dia de medição.

Data	25/06/2013	26/06/2013	27/06/2013	28/06/2013	29/06/2013	30/06/2013
Reynolds	254,01	458,55	369,36	328,32	396,95	379,39
Prandtl	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Rayleigh	$1,31 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{10}$	$1,28 \cdot 10^{10}$	$1,29 \cdot 10^{10}$
Nusselt	230,29	229,63	229,04	230,26	229,78	228,50
Caudal mássico (kg.s)	0,0009	0,0015	0,0012	0,0019	0,0013	0,0012
Coefficiente de convecção térmica ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	9,36	9,33	9,32	9,36	9,35	9,34

A Figura 4.18 ilustra que o número de Reynolds não ultrapassa o valor de 1800 para as horas de maior fluxo de calor. Pelos números de Reynolds obtidos constata-se que se está perante uma situação de fluxo laminar.

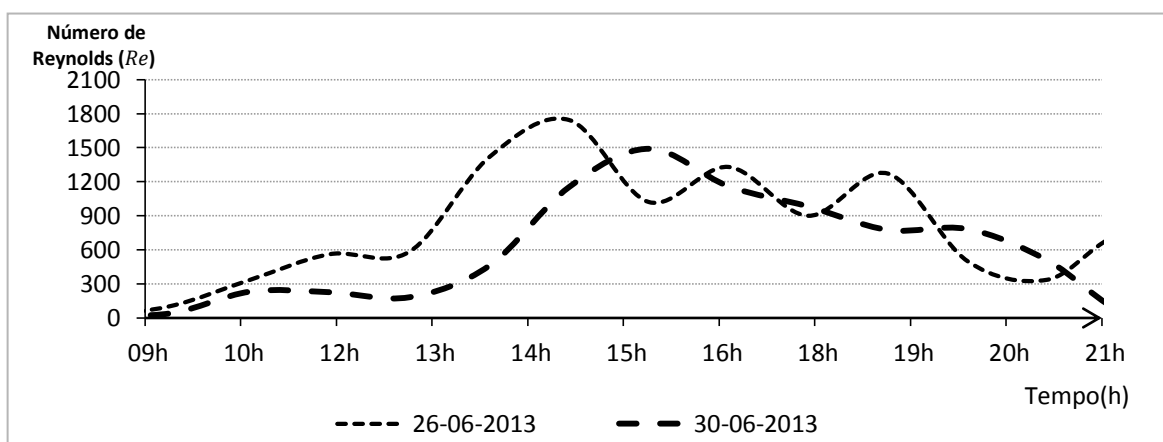


Figura 4.18- Comparação do número de Reynolds para o fluxo de ar induzido.

Os resultados mostram ainda que os valores correspondentes ao coeficiente de convecção térmica apresentam um valor aproximado de $9,3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. O caudal mássico variou em média entre 0,9 a 1,9 g/s. Através da Figura 4.19 verifica-se que quanto maior a temperatura da telha maior é o caudal mássico. Este resultado apresenta o benefício da cobertura com caixa-de-ar ventilada, pois dissipa o calor quando o revestimento (telha cerâmica) recebe maior quantidade de energia solar.

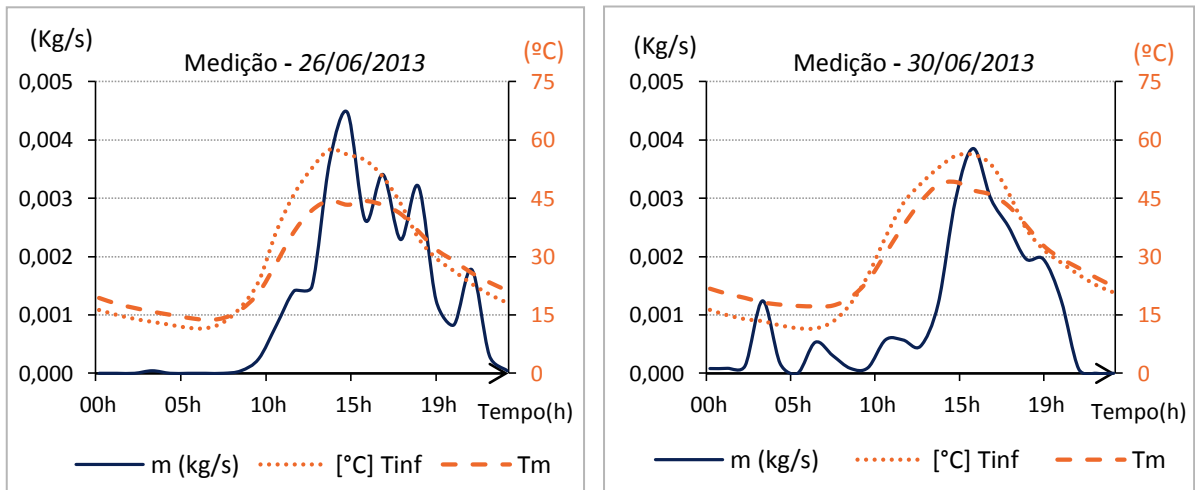


Figura 4.19- Comparação entre o caudal mássico e temperatura da superfície interior da telha e do ar da caixa-de-ar.

4.3. Comparação das temperaturas superficiais dos materiais

A comparação da diferença entre as temperaturas superficiais externa e interior da telha cerâmica com a radiação solar incidente encontra-se ilustrado na Figura 4.20. Já a comparação da variação das temperaturas superficiais da caixa-de-ar em função da radiação solar incidente apresenta-se na Figura 4.21. As temperaturas foram medidas na face superficial dos materiais através de termopares.

4.3.1 Comparação das temperaturas superficiais para a telha cerâmica

Observa-se que na Figura 4.20 existe uma variação de temperatura entre as superfícies da telha cerâmica, variação que aumenta com o aumento da intensidade da radiação solar. Analisando a variação de temperatura máxima registada, verifica-se que não coincide com o máximo de intensidade de radiação, ou seja, que há um desfasamento no tempo na resposta da massa da telha, ou seja a sua inércia térmica. Observa-se também uma variação negativa da temperatura entre as superfícies da telha cerâmica, ou seja a temperatura da superfície exterior torna-se inferior à superfície interior, que resulta da perda de calor da superfície exterior para o ambiente por convecção e radiação térmica, dado que a temperatura ambiente no período da noite e da madrugada é significativamente baixa.

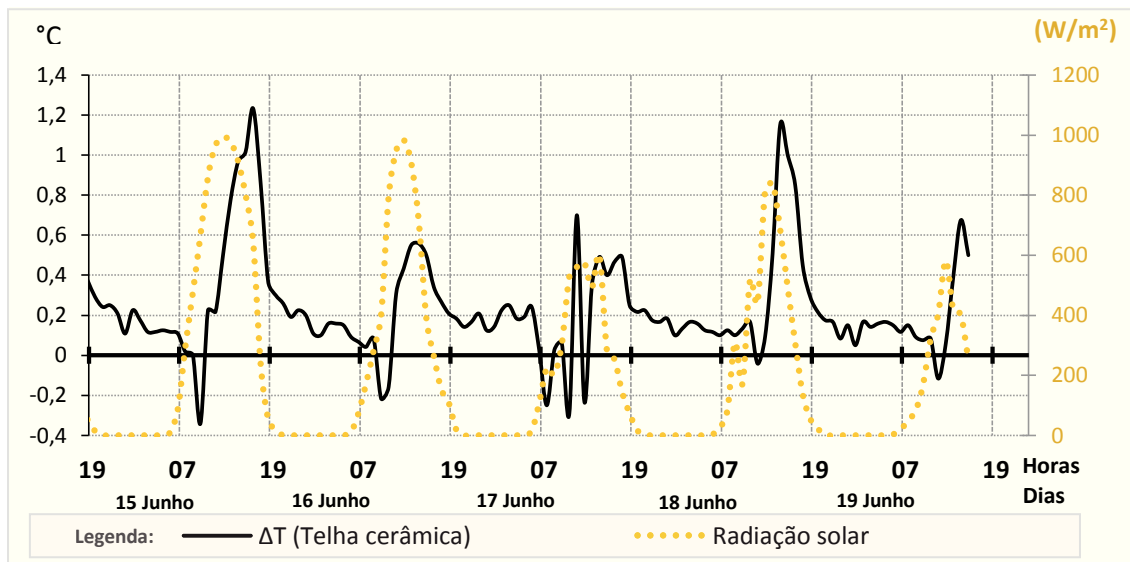


Figura 4.20- Comparação da diferença entre a temperatura da superfície exterior com a temperatura da superfície interior da telha cerâmica em função da radiação solar incidente.

4.3.2 Comparação das temperaturas superficiais da caixa-de-ar

Através da análise da Figura 4.21 verifica-se uma expressiva diferença entre as temperaturas superficiais da caixa-de-ar. Observam-se duas situações relevantes que influenciam o comportamento térmico de uma cobertura com caixa-de-ar com beiral ventilado e sub-telha, apresentando-se a seguinte análise:

- Durante as horas de incidência solar, verifica-se uma progressiva variação da diferença entre as temperaturas superficiais da caixa-de-ar, isto é, da superfície interior do revestimento cerâmico e da superfície exterior da placa sub-telha Naturtherm, atingindo um máximo que coincide com o máximo do ciclo diário de radiação solar incidente sobre o revestimento cerâmico. Esta variação máxima é aproximadamente de 12°C (Figura 4.22). A diferença de temperatura prova a importância da acção conjunta do revestimento cerâmico e da caixa-de-ar ventilada na crescente atenuação do fluxo de calor para o interior à medida que a intensidade da radiação solar aumenta.
- Durante o arrefecimento nocturno verifica-se uma inversão das temperaturas das superfícies com uma variação de temperatura entre as superfícies de aproximadamente 3,5°C, variação esta praticamente constante nesse período de tempo (Figura 4.22). Assim, durante o arrefecimento nocturno a caixa-de-ar ventilada pode ser favorável durante os dias mais quentes, refrescando a cobertura. Para os dias mais frios a caixa-de-ar parece não apresentar vantagem do ponto de vista térmico.

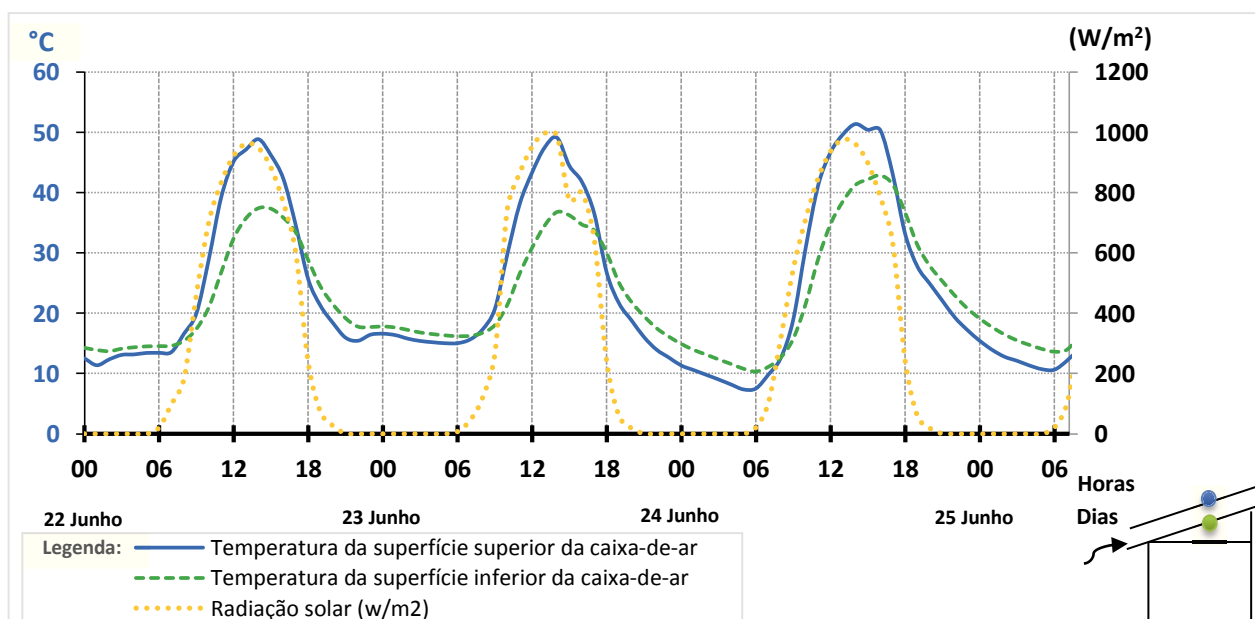


Figura 4.21- Comparação da variação das temperaturas superficiais da caixa-de-ar em função da radiação solar incidente.

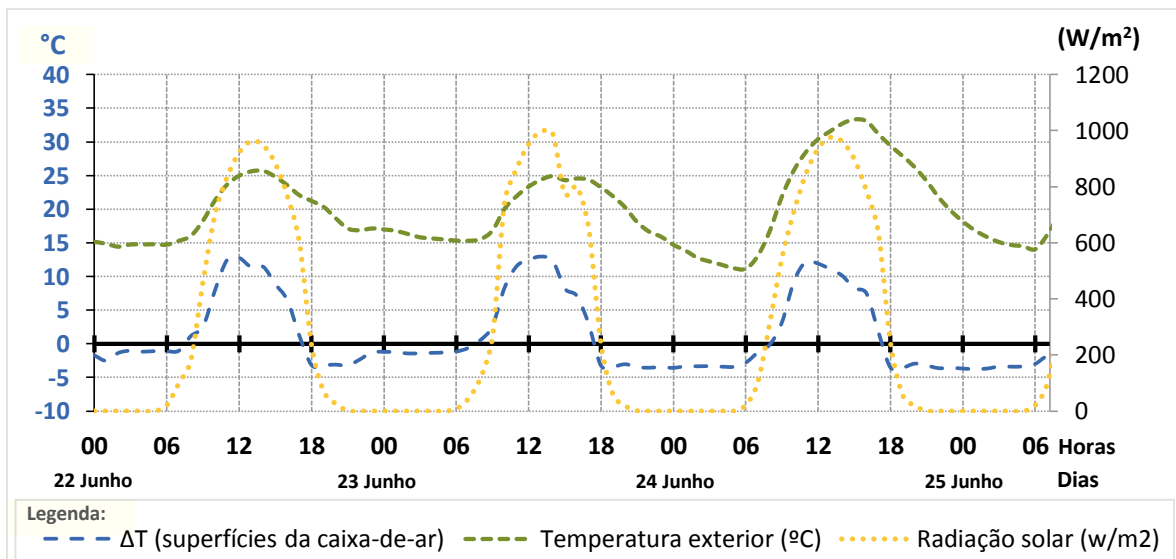


Figura 4.22- Comparação da diferença entre as temperaturas superficiais da caixa-de-ar com a radiação solar incidente e temperatura ambiente exterior.

A Figura 4.23 mostra a correlação entre a diferença entre as temperaturas das superfícies da caixa-de-ar e a intensidade da radiação solar. Observando o valor de R^2 , percebe-se que a correlação obtida representa uma correlação forte.

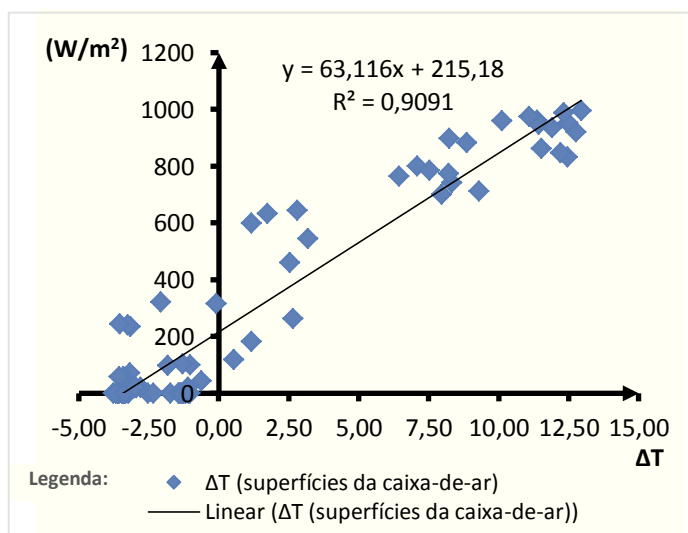


Figura 4.23- Correlação entre a diferença de temperatura das superfícies da caixa-de-ar e a intensidade da radiação incidente.




4.4. Análise de transferência de calor através dos elementos da cobertura

Nesta fase da investigação são apresentados os cálculos referentes as transferências de calor para as diferentes camadas da cobertura. A análise dividiu-se em duas fases distintas, devido a alternância dos termopares e do anemómetro de velocidade durante a fase de recolha de dados. Apresenta-se de seguida os resultados do fluxo de calor para as respectivas camadas construtivas.

4.4.1 Análise das transferências de calor através das telhas cerâmicas

Os dados meteorológicos relativos ao período de monitorização para o qual se realizou o estudo das transferências de calor para o revestimento cerâmico estão resumidos na Tabela 4.16. O período de estudo correspondeu a condições meteorológicas com alguma nebulosidade, no entanto, os resultados obtidos apresentaram comportamento semelhante no que se refere à resposta do revestimento cerâmico às cargas térmicas diárias.

Tabela 4.16- Dados meteorológicos desde o dia 15 até ao dia 18 de Junho.

Dias	Temperatura exterior (°C)			Tempo
	Média	Máxima	Mínima	
15 / 06 / 2013	18,51	23,40	14,80	
16 / 06 / 2013	18,24	23,30	14,40	
17 / 06 / 2013	16,29	19,90	13,70	
18 / 06 / 2013	16,68	21,10	13,80	



Nas Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam-se os resultados da transferência de calor ocorrida para o revestimento cerâmico durante um período compreendido entre os dias 15 a 18 de Junho calculado de acordo com o balanço energético apresentado na secção 3.2.3. Durante a incidência solar, apesar da pequena espessura do revestimento cerâmico verifica-se que apresenta capacidade de armazenar uma quantidade significativa do fluxo de calor que o atravessa. A quantidade de energia armazenada ocorre nas primeiras horas da incidência solar, quando a temperatura do revestimento cerâmico se encontra próximo da temperatura ambiente. Durante os quatro dias verifica-se que o fluxo de calor máximo armazenado

dá-se por volta das 11h, sendo que a partir deste registo a sua capacidade de armazenamento térmico apresenta uma redução significativa até ao ponto que começa a verificar-se a dissipação de algum do fluxo de calor armazenado. O fluxo de calor que entra no revestimento cerâmico, $Q_{E(1)}$, apresenta valor máximo quando a intensidade da radiação solar, I , é mais elevada. A quantidade de fluxo de calor que passa para o ar da caixa-de-ar, $Q_{S(2)}$, resulta da subtracção entre a quantidade de fluxo de calor captada pelo revestimento $Q_{E(1)}$, pelo fluxo de calor acumulado, Q_{Ac} . Verifica-se ainda que quando se atinge o máximo de calor armazenado, a diferença entre o fluxo de calor que entra para o revestimento e o que sai para o ar da caixa-de-ar acaba por ser pouco significativa.

Tabela 4.17: Comparação das transferências de calor ocorridas na telha cerâmica para os dias 15 e 16 de Junho.

Dia 15					Dia 16				
Hora	I	$Q_{E(1)}$	Q_{Ac}	$Q_{S(2)}$	Hora	I	$Q_{E(1)}$	Q_{Ac}	$Q_{S(2)}$
9	477,08	103,95	57,06	46,88	9	281,67	2,69	63,80	-61,11
10	665,75	385,17	138,46	246,71	10	400,17	146,18	57,33	88,85
11	859,08	640,43	110,67	529,76	11	794,75	574,58	138,60	435,98
12	965,83	779,21	47,40	731,76	12	948,08	807,64	124,00	683,64
13	993,50	872,27	70,13	802,14	13	983,83	863,41	47,13	816,28
14	977,92	863,68	7,53	856,14	14	908,42	768,20	-26,53	794,73
15	913,92	783,62	-35,00	818,62	15	713,42	523,06	-93,53	616,60

Tabela 4.18: Comparação das transferências de calor ocorridas na telha cerâmica para os dias 17 e 18 de Junho.

Dia 17					Dia 18				
Hora	I	$Q_{E(1)}$	Q_{Ac}	$Q_{S(2)}$	Hora	I	$Q_{E(1)}$	Q_{Ac}	$Q_{S(2)}$
9	202,83	-94,20	47,67	-146,86	9	310,00	-20,77	56,20	-76,47
10	303,50	8,97	32,93	-23,97	10	172,50	-125,39	10,40	-135,79
11	529,00	282,83	105,73	177,09	11	516,42	308,91	168,00	140,94
12	560,83	343,84	36,07	307,77	12	442,50	243,03	-2,33	245,37
13	574,75	350,89	11,60	339,29	13	812,75	638,60	155,47	523,13
14	479,75	254,44	-32,00	286,44	14	840,83	703,84	45,87	657,98
15	598,83	319,01	-15,53	334,55	15	683,33	546,84	-42,07	588,91

Para uma melhor interpretação dos dados na Figura 4.24 apresenta-se uma comparação entre o fluxo de calor que entra para o revestimento cerâmico e o que fica armazenado para um total de radiação solar incidente.

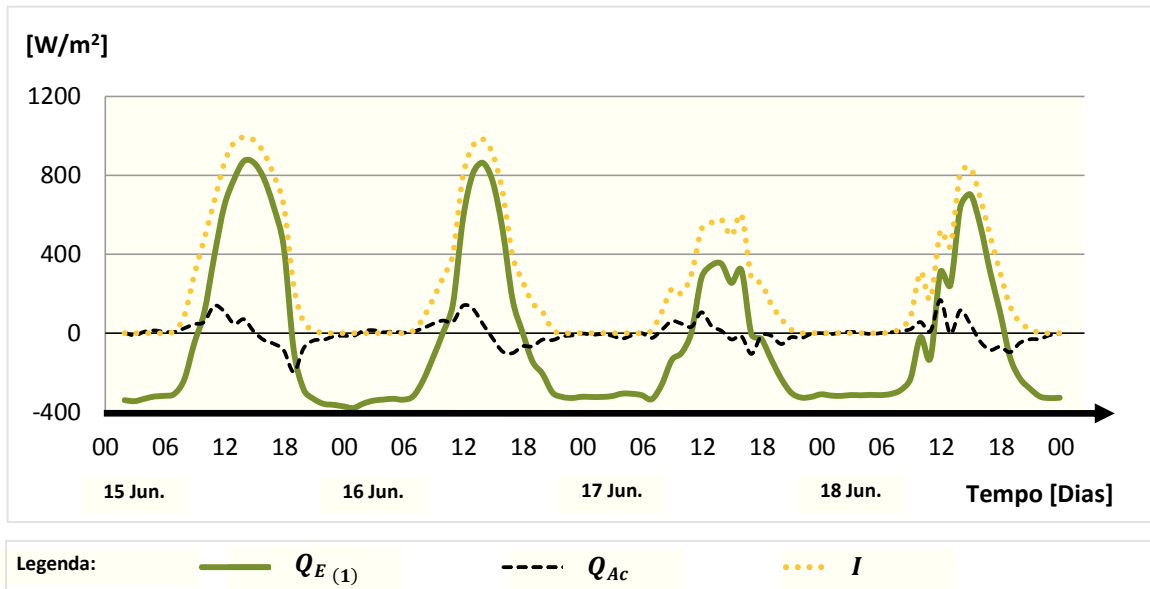


Figura 4.24- Comparação entre o fluxo de calor que entra e o acumulado na telha cerâmica.

No que se refere as propriedades ópticas do revestimento, verifica-se que uma parte da energia solar é refletida para o meio envolvente. Fez-se uma análise mais detalhada para o dia 15 de Junho, pelo facto de ser o dia que apresenta maior incidência solar. A Figura 4.25 compara o fluxo de calor que entra para o revestimento e o fluxo de calor emitido a partir da superfície da telha cerâmica para o exterior, $Q_{S(1)}$.

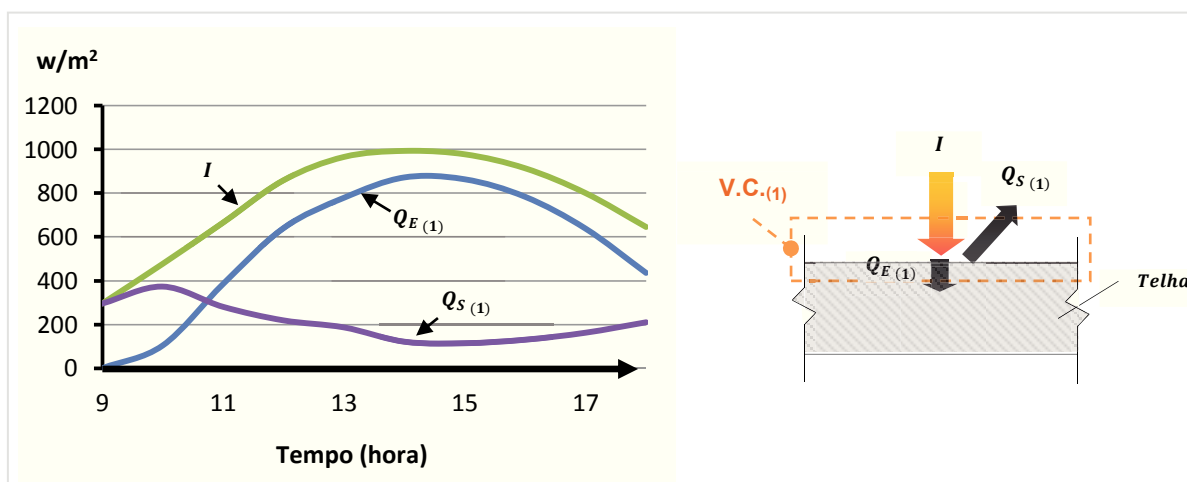


Figura 4.25- Comparação entre o fluxo de calor que entra para a telha cerâmica e o devolvido para a envolvente exterior pela telha cerâmica no dia 15 de Junho.

A Figura 4.26 apresenta uma comparação entre o fluxo de calor que entra no revestimento cerâmico e o fluxo de calor que fica acumulado na telha cerâmica.

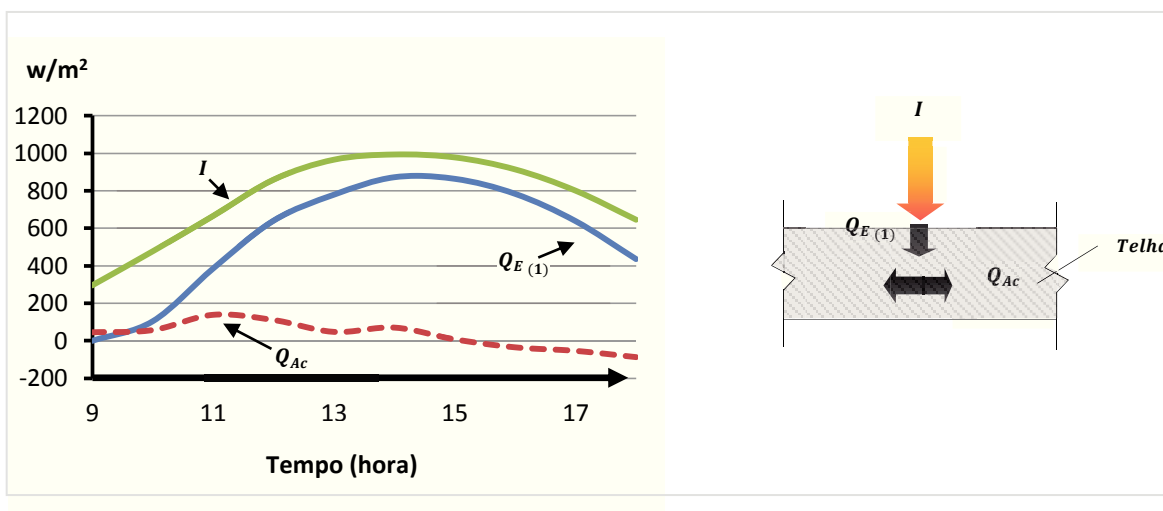


Figura 4.26- Comparação entre o fluxo de calor que entra no revestimento cerâmico e o fluxo de calor que fica acumulado na telha cerâmica no dia 15 de Junho.

Observa-se que o fluxo de calor acumulado depois de atingir o máximo apresenta uma tendência decrescente na capacidade de armazenamento de calor ao longo do dia.

Apresenta-se ainda na Figura 4.27 a comparação entre o fluxo de calor que entra no revestimento cerâmico e o fluxo de calor que sai para o ar da caixa-de-ar.

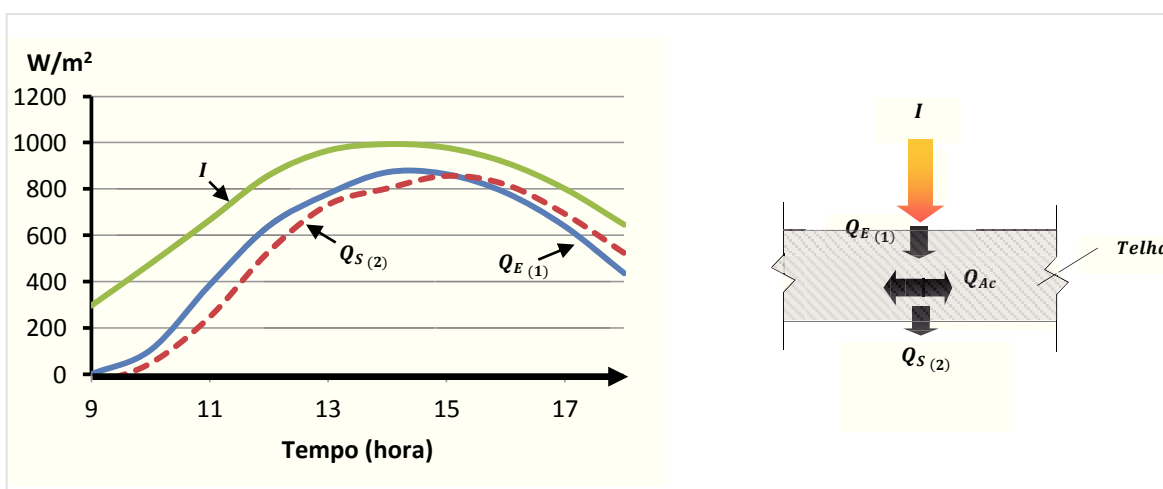


Figura 4.27- Comparação entre o fluxo de calor que entra na telha cerâmica e o fluxo de calor que sai para o ar da caixa-de-ar no dia 15 de Junho.

Observou-se que a partir das 15h o fluxo de calor devolvido para a envolvente exterior é superior ao fluxo de calor que entra para o revestimento cerâmico, ou seja quando a intensidade da radiação solar começa a diminuir.

4.4.2 Análise da transferência de calor através da caixa-de-ar e da placa sub-telha

Na Tabela 4.19 apresenta-se o resumo das temperaturas máximas do ambiente exterior, da superfície interior da telha cerâmica e do ar da caixa-de-ar desde o dia 25 até a 30 de Junho. Observa-se que para os dias analisados a temperatura máxima do ambiente envolvente da célula de teste apresenta temperaturas máximas superiores a 35°C. Fez-se a análise do fluxo de calor dissipado por ventilação natural através da caixa-de-ar e do fluxo de calor transferido através da placa sub-telha Naturtherm, como apresentado na Tabela 4.20.

Tabela 4.19: Resumo das temperaturas máximas do exterior, da superfície interior da telha cerâmica e do ar da caixa-de-ar desde o dia 25 até a 30 de Junho.

Dias	Condições Meteorológicas Exteriores		Superfície Interior Telha		Caixa-de-ar	
	Tmáx. (°C)	Registo (Hora)	Tmáx. (°C)	Registo (Hora)	Tmáx. (°C)	Registo (Hora)
25 / 06 / 2013	36,3	15h:35m	60,8	13h:40m	49,75	15h:05m
26 / 06 / 2013	35,8	13h:40m	58,3	13h:35m	45,55	13h:30m
27 / 06 / 2013	36,1	14h:45m	61,1	14h:15m	49,05	15h:10m
28 / 06 / 2013	35,1	15h:20m	56,5	14h:30m	47,1	15h:25m
29 / 06 / 2013	37,6	14h:10m	56,9	15h:50m	48,45	16h:15m
30 / 06 / 2013	37,9	14h:25m	62,1	14h:15m	49,95	14h:35m

Observa-se na Tabela seguinte que para os dias 26 e 30 de Junho correspondem aos dias onde se registam valores superiores de fluxo de calor transportado através da caixa-de-ar da cobertura com beiral ventilado e sub-telha.

Tabela 4.20- Resumo dos resultados obtidos do fluxo de calor máximo de escoamento do ar através da caixa-de-ar e fluxo de calor máximo transferido ao desvão da cobertura.

	25/06/2013		26/06/2013		27/06/2013		28/06/2013		29/06/2013		30/06/2013	
	Valor	Hora de registo	Valor	Hora de registo	Valor	Hora de registo	Valor	Hora de registo	Valor	Hora de registo	Valor	Hora de registo
I	981,69	13h	935,23	13h	951,46	13h	937,92	13h	912,62	13h	946,30	13h
Q_v	37,28	17h	133,93	14h	93,44	16h	50,10	17h	70,72	17h	121,41	15h
Q_c	72,49	13h	58,48	13h	64,76	14h	60,16	14h	60,84	15h	68,33	13h

Legenda:

I – Radiação solar incidente (W/m²).

Q_v – Transferência de calor para a ventilação do telhado (W/m²).

Q_c – Transferência de calor por condução (W/m²).

Na Figura 4.28, observa-se uma redução da temperatura da superfície interior da telha cerâmica, ou seja quando o fluxo de calor transportado através da caixa-de-ar aumenta.

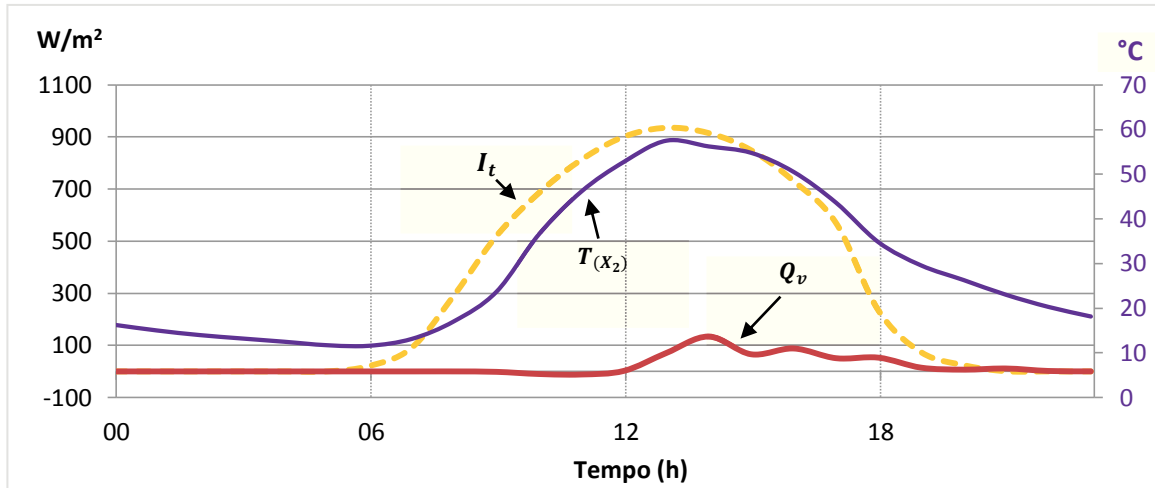


Figura 4.28- Comparação do fluxo de calor dissipado por ventilação natural, (Q_v), em função da temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(x_2)}$ para o dia 26 de Junho.

Analisando a Figura 4.29, verifica-se que a transferência de calor através da placa sub-telha aumenta com o aumento da temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(x_2)}$. No entanto, observa-se uma redução do fluxo de calor transmitido para o desvão através da placa sub-telha quando o fluxo de calor transportado por ventilação natural através do escoamento do ar na caixa-de-ar aumenta.

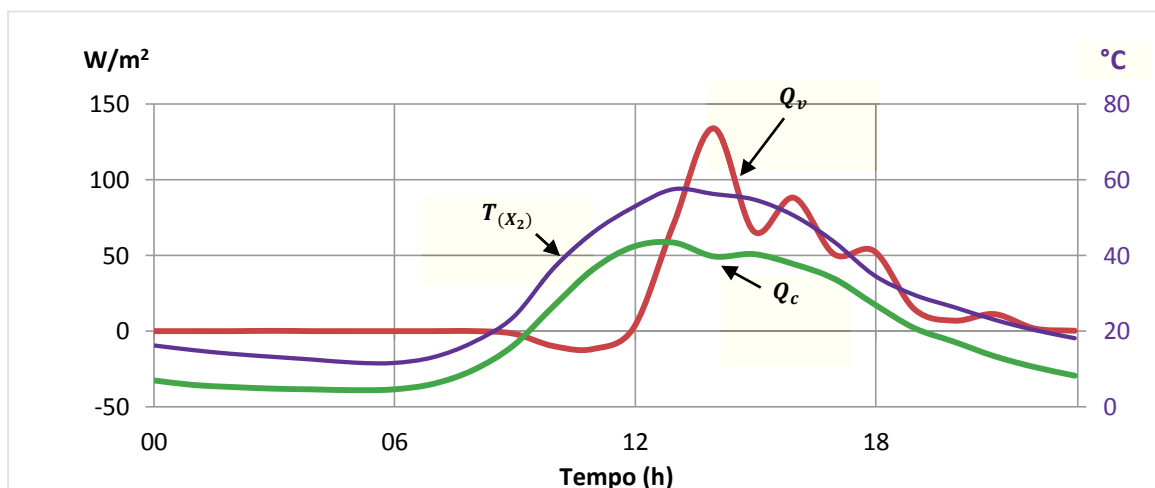


Figura 4.29- Comparação da transferência de calor dissipada por ventilação natural, (Q_v) e da transferência de calor para o desvão, Q_c , em função da temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(x_2)}$ para o dia 26 de Junho.

A ventilação natural é fulcral na redução dos extremos de temperatura do ar na caixa-de-ar e nas superfícies da caixa-de-ar, ou seja na redução significativa do fluxo de calor através da placa sub-telha. Fez-se a mesma análise para o dia 30 de Junho, tendo-se obtido resultados semelhantes, tal como ilustrado nas Figuras 4.30 e 4.31.

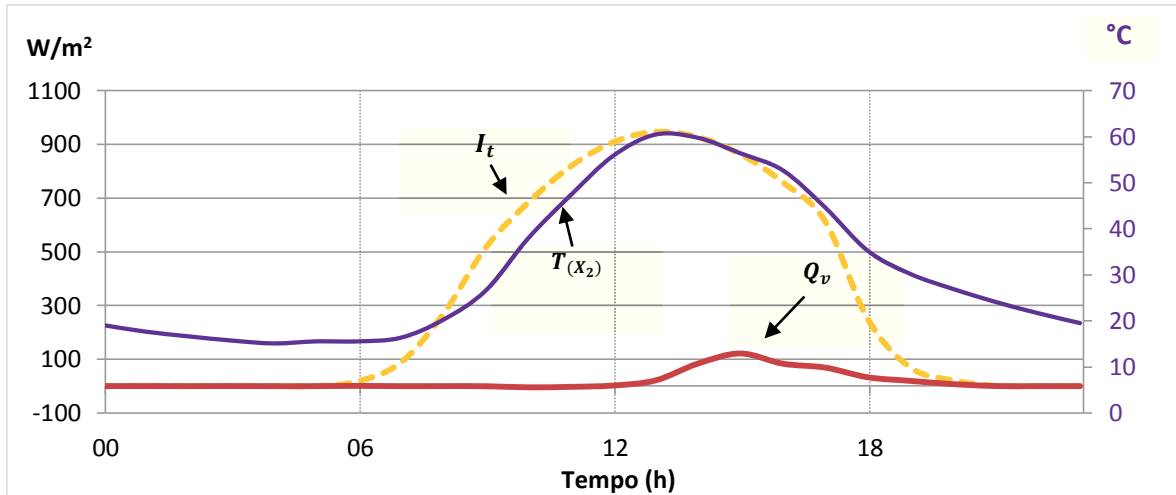


Figura 4.30- Comparação do fluxo de calor dissipado por ventilação natural, (Q_v), em função da temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(x_2)}$, para o dia 30 de Junho.

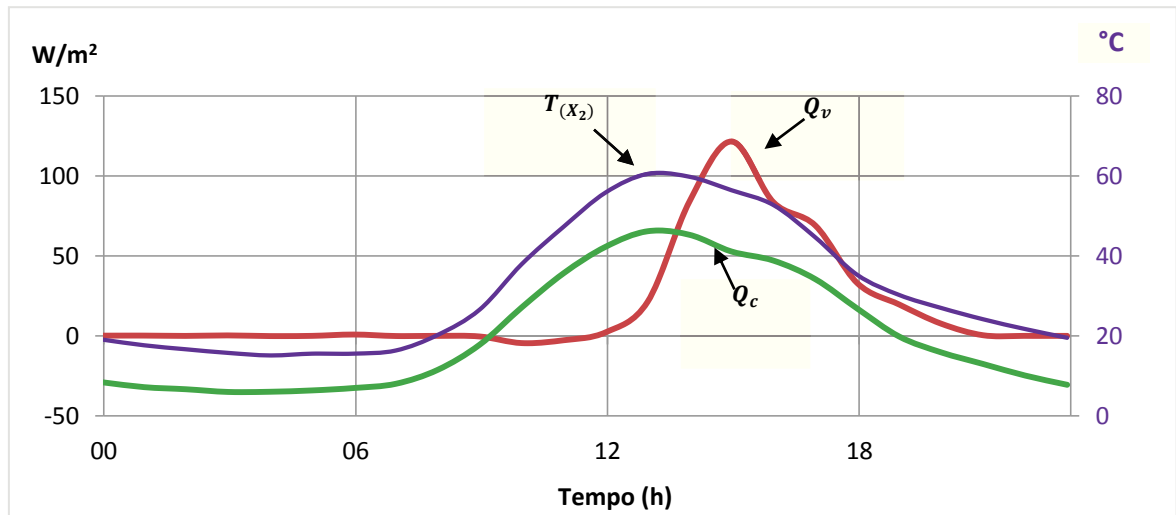


Figura 4.31- Comparação da transferência de calor dissipada por ventilação natural, (Q_v) e da transferência de calor para o desvão, Q_c , em função da temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(x_2)}$, para o dia 30 de Junho.

Na Tabela 4.21, apresenta-se os fluxos de calor para a caixa-de-ar e placa sub-telha Naturtherm, correspondente ao dia 30 de Junho. Observa-se que o fluxo máximo de calor acontece às 13h. No entanto, o caudal mássico e fluxo de calor para a ventilação da cobertura atingem o valor máximo às 15h.

Tabela 4.21- Resumo do cálculo das transferências de calor para o dia 30 de Junho.

<i>Dias</i>	<i>I</i>	$T_{(x_2)}$	\dot{m}	Q_V	Q_C	$Q_{Conv(x_2)}$	$Q_{Rad(x_2,x_3)}$
30-06 (11h)	817,77	47,27	0,0006	-2,73	39,12	536,92	116,03
30-06 (12h)	907,69	55,82	0,0005	2,19	55,64	671,65	143,53
30-06 (13h)	946,31	60,46	0,0012	21,21	65,33	685,71	157,72
30-06 (14h)	926,69	59,75	0,0030	83,96	63,12	604,62	152,71
30-06 (15h)	863,54	56,39	0,0039	121,41	52,69	533,19	135,53
30-06 (16h)	758,85	52,68	0,0030	83,48	47,01	386,15	110,64
30-06 (17h)	612,23	44,60	0,0025	68,89	35,40	90,55	75,69

Para a hora de maior fluxo de calor apresenta-se ilustrado na Figura seguinte a comparação entre diversos perfis de temperatura ao longo das camadas da cobertura com beiral ventilado e sub-telha, ou seja, $T_{(x_2)}$ corresponde à temperatura superficial interior da telha cerâmica, $T_{(caixa)}$ corresponde à temperatura média do ar na caixa-de-ar e $T_{(x_4)}$ a temperatura na interface da placa com a espuma isolante.

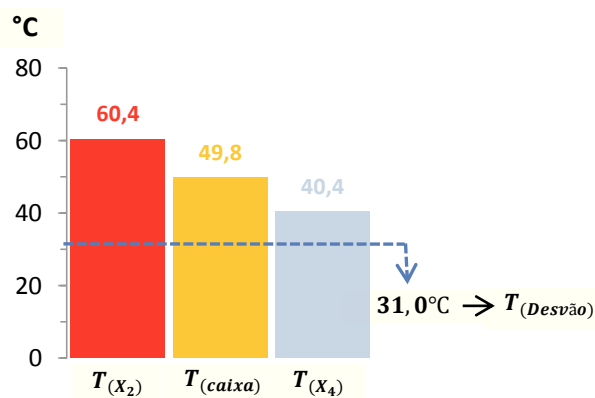


Figura 4.32- Comparação dos perfis de temperatura para o dia 30 na hora de maior fluxo de calor.

Verifica-se no geral, que para elevadas temperaturas exteriores, as diferentes camadas da cobertura apresentam uma favorável atenuação, verificando-se uma maior atenuação entre a telha cerâmica e a placa sub-telha Naturtherm.

5. Conclusão e trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Os recentes regulamentos na área de consumo de energia dos edifícios têm vindo a promover o desenvolvimento de novos projetos com o enquadramento de tecnologias passivas. Verificou-se ainda na literatura consultada a análise de diversas publicações que cientificamente avaliam diversas estratégias de controlo térmico e de eficiência energética na temática da construção de coberturas passivas e sustentáveis. Com o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação pretendeu-se aprofundar o conhecimento do comportamento térmico de uma cobertura com beiral ventilado e sub-telha. Pretendeu-se quantificar o seu desempenho térmico através da avaliação das transferências de calor nas diversas camadas construtivas e da ventilação natural na caixa-de-ar. Com o planeamento de uma célula de teste, construída e testada sob condições exteriores, obteve-se o registo de temperaturas do ar no desvão não ventilado e nas diversas superfícies e materiais da cobertura, de modo a se poder avaliar as trocas de calor em regime transiente.

Durante a análise do comportamento térmico e psicométrico concluiu-se que nos dias de fraca intensidade solar, a cobertura apresenta capacidade de absorver parte da radiação solar contribuindo para a contenção das oscilações de temperatura derivadas do forte arrefecimento nocturno, face à sua inércia térmica associada a massa da sub-telha. Concluiu-se ainda que os ganhos térmicos diários e a dissipação lenta de calor durante forte arrefecimento nocturno contribuem para a contenção do calor interior do desvão mantendo-o a uma temperatura superior à temperatura exterior. Durante os dias mais quentes obtiveram-se óptimas inércias térmicas com expressivos amortecimentos térmicos da ordem dos 20°C e atrasos térmicos superiores a 3 horas.

Da análise e interpretação dos resultados das transferências de calor através do revestimento cerâmico, permitiu concluir que a telha cerâmica apresenta capacidade de armazenar uma quantidade significativa do fluxo de calor que o atravessa. A quantidade de energia armazenada ocorre nas primeiras horas da incidência solar, quando a temperatura do revestimento cerâmico se encontra próximo da temperatura ambiente. A telha cerâmica apresenta ainda boas propriedades ópticas, concluindo-se que parte da energia solar é devolvida para o meio envolvente.

Os resultados referentes à caracterização da ventilação natural na caixa-de-ar mostram que os valores correspondentes ao coeficiente de transmissão de calor por convecção apresentam um valor aproximado de $9,3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. O caudal mássico variou em média entre 0,9 a 1,9 g/s. O número de Reynolds não ultrapassa o valor de 1800 para as horas de maior fluxo de calor concluindo-se que se está perante uma situação de fluxo laminar na caixa-de-ar. Para os dias com temperatura do ar exterior elevada concluiu-se que existe maior escoamento do ar através da caixa-de-ar em relação a dias com temperaturas mais baixas.

Concluiu-se ainda que as transferências de calor por condução entre a caixa-de-ar e o desvão da cobertura aumentam com o aumento da temperatura da telha cerâmica. No entanto, observa-se uma redução da transferência de calor por condução quando a transferência de calor por ventilação natural aumenta. Isto significa que o calor acumulado se dissipou através da caixa-de-ar para o exterior. Conclui-se que a ventilação natural é fulcral na redução dos extremos de temperatura do ar e das superfícies da caixa-de-ar originando a redução das transferências de calor por condução para o desvão da cobertura.

5.2. Trabalhos futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e das conclusões apresentadas nos pontos anteriores, muitas foram as questões abertas por este trabalho que poderão ser desenvolvidos na sequência desta dissertação, destacam-se as de maior interesse:

- Caracterizar de que forma a espessura da caixa-de-ar influencia as características do fluxo de ar.

- Caracterizar de que forma a cor do revestimento cerâmico influencia as características do fluxo de ar e as transferências de calor entre as diferentes camadas da cobertura com beiral ventilado e sub-telha.
- Integrar um sistema de ventilação passiva da cobertura e habitação: sistemas de ventilação que proporcionam o arrefecimento da habitação com a renovação do ar interior nas estações mais quente do ano. Estes sistemas apresentam como principal vantagem o aproveitamento da área da cobertura exposta à radiação solar permitindo induzir a ventilação do ar no interior da habitação, conduzindo o calor para o exterior através da caixa-de-ar da cobertura inclinada.

6. Referências Bibliográficas

- Anani, A., & Jibril, Z. (1998). Role of thermal insulation in passive designs of buildings. *Solar & Wind Technology*, Vol. 58, pp. 141 – 150.
- Araújo, C., Almeida, M., Bragança, L. (2013). Analysis of some Portuguese thermal regulation parameters. *Energy and Buildings*, Vol. 5, Issue 3, pp. 303 – 313
- Awbi, H. B. (1998). Chapter 7 - Ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 2, pp. 157 – 188.
- Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., & Castro, M.A., 2012. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*. Vol. 38, Issue 1, pp. 425-438.
- Borges, Ana Sofia Da Silva. (2008). *Metodologia da Fiscalização em Obras - Planos de Controlo de Conformidade (Coberturas)*. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto. Relatório de Projecto.
- Çengel, Y.A e Ghajar, A.J. (2011). Transferências de calor e massa: uma abordagem prática. 4ª edição, São Paulo, ed. Mcgraw-Hill.
- Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2005). Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy*, Vol. 79, Issue 2 pp. 183–192.
- Dep. Técnico - Umbelino Monteiro S.A., Eduardo Jesus. Website: <http://www.umbelino.pt/client/skins/english/geral.asp?page=529>.
- Dinçer, I. e Rosen, M.A. (2002). Thermal energy storage systems and applications. England. 2002.
- D'Orazio, M., Di Perna, C., Principi, P., & Stazi, A. (2008). Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance. *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue 5, pp. 911 – 916.
- D'Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2010). The effects of roof covering on the thermal performance of highly insulated roofs in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*. Vol. 40, Issue 5, pp. 1619-1627.
- Garcez, N. (2009). Sistema de inspecção e diagnóstico de revestimentos exteriores de

- coberturas inclinadas. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação.
- Garcez, N., Lopes, N., Brito, J., (2012). Pathology, diagnosis and repair of oiled roofs with ceramic tiles: Statistical characterization and lessons learned from inspections. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 807 - 819.
- Guia de Aplicação ADVANCE Lusa - Umbelino Monteiro S.A. Website: http://www.umbelino.pt/client/documentos/downloads/guias_aplicacao/10833_guia_advLusa_05.pdf.
- Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N., & Khedari, J. (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment*, Vol. 36, Issue 3, pp. 383 - 391.
- Incropera F.P. e DeWitt. D.P. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Son, Singapore
- Khedari, J., Hirunlabh, J. & Bunnag, T. (1997). Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses. *Energy and Buildings*, Vol. 26, Issue 2, pp. 159 - 164.
- Khedari, J., Mansirisub, W., Chaima, S., Pratinthong, N. & Hirunlabh, J. (2000). Field measurements of performance of roof solar collector. *Energy and Buildings*, Vol. 31, Issue 3, pp. 171-178.
- Khedari, J., Yimsamerjit, P., e Hirunlabh, J. (2002). Experimental investigation of free convection in roof solar collector. *Building and Environment*, Vol.37, Issue5, pp.455 - 459.
- Kültür, S., Türkeri, N. (2012) Assessment of long term solar reflectance performance of roof coverings measured in laboratory and in field. *Energy and Buildings*. Vol.48, pp.164-172.
- Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*. Issue 7, 2009, Vol. 44, pp. 1431-1439.
- Medina, M. A. (2000). On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. *Energy and Buildings*, Vol. 33, Issue 1, pp. 31 – 40.
- Michels, C., Lamberts, R., Güths, S. (2008). Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue 4, pp. 445 - 451.
- Miller, W., Atherton, S., Graves, R., e Ellis B. (2011). A Prototype Roof Deck Designed to

- Self-regulate Deck Temperature and Reduct Heat Transfer. Conference: 2011 International Roofing Symposium: Emerging Technologies and Roof System Performance. Washington DC, MD, USA.
- Miller, W., Keyhani, M., Stovall, T., Youngquist, A. (2007) “Natural Convection Heat Transfer in Roofs with Above-Sheathing Ventilation”, Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X, ASHRAE THERM X, <http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/staff/papers/19.pdf>
- Ong, K.S. (2011). Temperature reduction in attic and ceiling via insulation of several passive roof designs. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, Issue 6, pp. 2405 – 2411.
- Özdeniz, M. B., e Hançer, P. (2005). Suitable roof constructions for warm climates - Gazimağusa case. *Energy and Buildings*, Vol. 37, Issue 6, pp. 643 - 649.
- Özisik, M.N.(1977), Basic heat transfer, McGraw-Hill, New York, 1977
- Puangsoambut, W., Hirunlabh, J., Khedari, J., Zeghmati, B., Vin. M.M., (2007). Enhancement of natural ventilation rate and attic heat gain reduction of roof solar collector using radiant barrier. *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 6, pp. 2218 - 2226.
- Rathakrishaman, E. (2007). Fluid Mechanics: An Introduction, 2nd ed, New Delhi, 2007.
- Synnefa, A. e Santamouris, M. (2012). Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 35 - 41.
- Stamper, E and Koral, R. L. (1979). Handbook of Air Conditioning. Heating, and Ventilating. 3^a edição, New York, Industrial Press, Inc.
- Suehrcke, Harry., Peterson, L. e Selby, Neville. 2008. Effect of roof reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Energy and Buildings*. Vol. 40, Issue 12, pp. 2224-2235.
- Susanti, L., Homma, H., Matsumoto, H., Suzuki, Y. e Shimizu, M. (2008). A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain. *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue 12, pp. 2196 - 2206.
- Susanti, L., Homma, H., Matsumoto, H., Suzuki, Y. e Shimizu, M. (2010). Numerical simulation of natural ventilation of a factory roof cavity. *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 8, pp. 1337 - 1343.
- Susanti, L., Homma, H. e Matsumoto, H. (2011). A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory

- building. *Energy and Buildings*. Issue 1, 2011, Vol. 43, pp. 211-218.
- Susakunphaisan, E., Namprakail, P. e Puangsombut, W. (2011). Design of Tube to Enhance the Role of Roof Solar Collector. *Engineering and Technology*, Vol. 51 World Academy of Science.
- Villi, G., Pasut, W., e De Carli, M. (2009). CFD modelling and thermal performance analysis of a wooden. *Building Simulation*, Vol. 2, Issue 3, pp. 215–228.
- Zakaria, N., Zain-Ahmed, A., Ariffin, N., Halim, N., & Morris, F. (2011). Thermal energy evaluation of building with ceiling insulation in warm-humid tropical climate. *Humanities, Science and Engineering*, pp. 233 – 238.

7. Apêndice

Apêndice A – Caracterização do fluxo de ar na caixa-de-ar:

- **Cálculo do Número de Reynolds (Re):** A determinação do número de Reynolds permite caracterizar se o fluxo de ar na caixa-de-ar está em regime laminar (se apresenta valores de $Re < 2300$), turbulento se apresenta valores de $R > 4000$ ou de transição se Re apresenta valores intermédios. O número de Reynolds pode ser definido por (Çengel, 2011):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (\text{A.1})$$

onde:

ρ – Massa específica, kg/s

v – Velocidade média do fluido, m/s

D_h – Diâmetro hidráulico, m

μ – Viscosidade dinâmica, m^2/s

Note-se que a velocidade média do fluxo utilizada no cálculo de Reynolds é baseada na área da secção transversal do canal da caixa-de-ar (Figura 7.1). O diâmetro hidráulico da caixa-de-ar é definido pela seguinte equação (Çengel, 2011):

$$D_h = \frac{4 \cdot A_s}{P} \quad (\text{A.2})$$

onde P representa o perímetro da secção transversal em contacto com o ar. Assim, substituindo na equação (A.1), tem-se que,

$$Re = \frac{4 \cdot A_s \cdot \rho_{ar} \cdot v_{ar}}{P \cdot \mu} \quad (\text{A.3})$$

Sabendo que o caudal mássico para a secção transversal da caixa-de-ar é dado por:

$$\dot{m} = A_s \cdot \rho_{ar} \cdot v_{ar} \quad [\text{Kg/s}] \quad (\text{A.4})$$

Substituindo na equação (A.3), tem-se que,

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{P \cdot \mu} \quad (\text{A.5})$$

Para determinar a viscosidade recorreu-se à relação de Sutherland's definida por (Rathakrishaman, 2007):

$$\mu = 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{T^{3/2}}{T + 111} \right) \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{s} \right] \quad (\text{A.6})$$

onde T é a temperatura em Kelvin. Para determinar a condutividade térmica do ar recorreu-se à relação de Sutherland's definida por (Rathakrishaman, 2007):

$$k = 1,99 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T^{3/2}}{T + 112} \right) \quad [\text{J}/\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}] \quad (\text{A.6})$$

onde T é a temperatura em Kelvin.

- **Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para o ar da caixa-de-ar (h_c):** Os coeficientes de convecção na caixa-de-ar foram calculados a partir da definição do número de Nusselt através da seguinte equação:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{A.7})$$

onde:

k – Condutividade térmica do ar, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

L – Comprimento característico para o volume de controlo, m

A determinação do número de Nusselt (Nu) é fundamental para se determinar os coeficientes de transferência de calor por convecção. Para tal, o número de Nusselt foi calculado a partir da seguinte equação, para superfícies verticais ou com ângulo de inclinação até 60° (Dinçer, 2002):

$$Nu = \left[0,825 + 0,387Ra^{\frac{1}{6}} / \left(1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}} \right]^2 \quad (A.8)$$

onde, Ra representa o número de Rayleigh e Pr o número de Prandtl.

Para o cálculo do número de Rayleigh (Ra) recorreu-se a seguinte equação (Çengel, 2011):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{(x_2)} - T_{(mcaixa)}) \cdot L^3}{\vartheta^2} \times Pr \quad (A.9)$$

onde:

g – Aceleração da gravidade, $9,8 \text{ m/s}^2$

L – Comprimento característico para o volume de controlo, m

β – Coeficiente de expansão volumétrica, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $(1/T_f)$

ϑ – Viscosidade cinemática, m^2/s

Pr – Número de Prandtl

A propriedade do fluido foi avaliada na temperatura de filme T_f , apresentada na equação seguinte:

$$T_f = \frac{1}{2} (T_{(x_2)} - T_{(mcaixa)}) \quad (A.10)$$

onde:

$T_{(x_2)}$ – Temperatura da superfície superior da caixa-de-ar, $^{\circ}\text{C}$

$T_{(mcaixa)}$ – Temperatura média do ar da caixa-de-ar, $^{\circ}\text{C}$

O número de Prandtl descreve a relação entre a flutuação e a viscosidade da quantidade de movimentos e a difusividade térmica. É definido como:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\vartheta}{\alpha_t} \quad (\text{A.11})$$

onde:

C_p – Calor específico do ar, $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

k – Condutividade térmica do ar, $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

α_t – Difusividade térmica, m^2/s

Substituindo na equação (A.9), tem-se que,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{(x_2)} - T_{(m_{caixa})}) \cdot L^3}{\vartheta \cdot \alpha_t} \quad (\text{A.12})$$

onde, L representa o comprimento característico para o volume de controlo.

A viscosidade cinemática (ϑ) resulta do quociente entre a viscosidade dinâmica do ar com a sua densidade de massa, tal como, definido na equação seguinte:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho_{ar}} \quad [m^2 \cdot s] \quad (\text{A.13})$$

A secção transversal do canal da caixa-de-ar considerada neste estudo está ilustrada na Figura seguinte, limitada entre o revestimento cerâmico e a placa sub-telha:

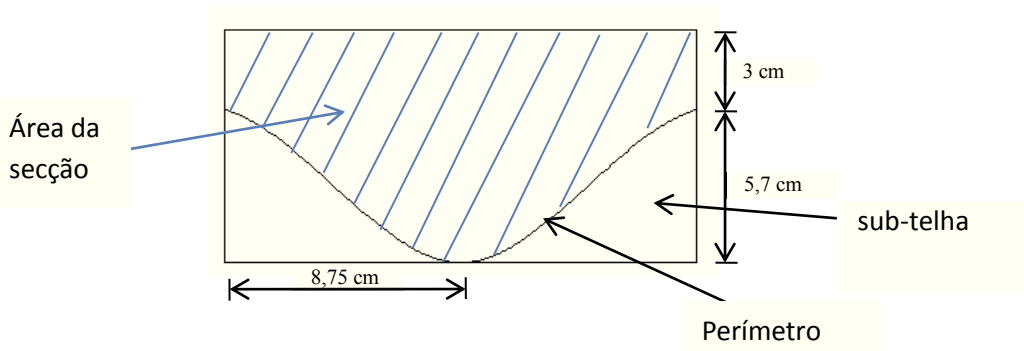


Figura 7.1- Secção transversal do canal da caixa-de-ar.