

Análise do desempenho de uma fachada de dupla pele

Aplicação a um caso de estudo

Joana Patrícia Cheira Vinagre

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Professor Doutor Fernando Vitor Marques da Silva

Júri

Presidente: Professor Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida
Orientadora: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Vogal: Professor Doutor Rogério José da Silva Correia Duarte

Outubro de 2017

Resumo

O tipo de fachada de um edifício influencia o desempenho energético do mesmo. Quando se trata de uma fachada inteiramente envidraçada surgem vários condicionamentos para se conseguir um sistema funcional, esteticamente atraente e, ao mesmo tempo, energeticamente eficiente.

É essencial implementarem-se soluções que assegurem o conforto dos ocupantes e que sejam economicamente viáveis. As fachadas de dupla pele, constituídas por dois panos envidraçados separados por um espaço de ar que pode ser ventilado, permitem contornar algumas dificuldades que existem na aplicação de fachadas envidraçadas, nomeadamente a eficiência energética, sendo capaz de garantir condições de iluminação natural adequadas e estética apelativa.

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento térmico nas estações de Inverno e Verão de uma fachada de dupla pele naturalmente ventilada, de um edifício existente em Lisboa.

Os resultados mostram que o comportamento térmico de uma fachada de dupla pele é, particularmente, sensível ao nível de radiação solar incidente, às características do vento e da ventilação da cavidade. A maior diferença de temperatura entre o ar na cavidade e o ambiente interior acontece no Verão, enquanto a menor diferença ocorre no Inverno. Os maiores valores de temperatura do ar no canal são registados no Verão em dias de céu limpo. O efeito da radiação solar incidente é mais significativo do que o efeito do vento. A acção do vento é um parâmetro mais complexo, capaz de diversificar o comportamento do fluxo de ar, devido aos diferentes coeficientes de pressão que se obtêm com a variação da direcção do vento.

Palavras-Chave: Fachadas de dupla pele; Comportamento térmico; Ventilação natural; Vento; Radiação Solar

Abstract

The façade of a building influences its energy performance. A fully glazed façade present several obstacles to overcome in order to achieve a functional system, aesthetically attractive and with an energetically advantageous response.

It is essential to implement Solutions that ensure the indoor comfort of the users and are economically viable. Double skin façades, constituted by two glazing panes separated by an air gap that can be ventilated, are an option that contours the difficulties that exist in the application of glazed façades, namely concerning its energy efficiency, ensuring, at the same time, the daylighting levels and appealing aesthetics.

In this study, the thermal behavior of a naturally ventilated double-skin façade was evaluated in a building sited in Lisbon.

The results show that the thermal behavior of a double skin façade is particularly sensitive to the incident solar radiation level, wind characteristics and cavity ventilation. The largest temperature difference between air in the cavity and the indoor environment occurs in summer, while the smallest difference occurs in winter. The highest values of air temperature in the channel are recorded in the summer on sunny days. The effect of incident solar radiation was more significant than the effect of wind. The wind action is a much more complex parameter, able to diversify the air flow behavior, due to the different pressure coefficients that are obtained with the variation of the air direction.

Keywords: Double skin facades; Thermal behavior; Natural ventilation; Wind; Solar radiation

Agradecimentos

O caminho foi longo e mostrou-me que, com perseverança e muito trabalho tudo é possível. Mas só vale a pena quando partilhado com algumas pessoas, às quais lhes dirijo o meu sincero agradecimento nos seguintes parágrafos.

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Doutora Maria Glória Gomes, orientadora científica deste trabalho, pela oportunidade em trabalhar neste tema e pela infindável disponibilidade demonstrada, desde o primeiro momento. Ao Engenheiro Fernando Marques da Silva, do LNEC, co-orientador científico do presente trabalho, agradeço por me ter acompanhado neste projecto com a máxima paciência e disponibilidade. Agradeço, a ambos, o facto de, por vezes, terem abdicado do vosso tempo para esclarecer todas as minhas questões, a permanente preocupação e a revisão cuidadosa do manuscrito.

Aos meus pais, a quem agradeço tudo o que me permitiram viver. Obrigado pelo eterno apoio, pelo empenho entregue para que eu pudesse usufruir da melhor educação. À minha Mãe, um obrigado por me dar a conhecer o verdadeiro significado de lealdade e generosidade. Ao meu Pai, agradeço por me mostrar, todos os dias, a perseverança e a resiliência que um vencedor deve ter. Espero que esta etapa, que agora termino, vos possa orgulhar e retribuir todo o carinho, apoio e dedicação com que sempre me presentearam.

Ao meu irmão, agradeço o facto de estar sempre a torcer por mim, a compreensão, serenidade e carinho que, todos os dias, me transmite. Espero ser uma inspiração para a tua vida e ajudar-te a acreditar que, com coragem e determinação, todos os teus sonhos podem ser realidade.

Ao André, um sincero obrigado por todo o carinho, por se mostrar sempre disponível em ouvir as minhas dúvidas, desânimos, pelo permanente apoio, ajuda e pela confiança sempre tão entusiasta do meu trabalho.

A minha maior motivação é a força do quanto vocês acreditam em mim.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Índice	vii
Índice de Tabelas	xi
Índice de Figuras	xi
Lista de abreviaturas e símbolos	xvii
Abreviaturas.....	xvii
Símbolos.....	xvii
Símbolos Gregos	xviii
Índices	xviii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos e metodologia.....	2
1.3 Organização do trabalho.....	2
2. Estado da Arte	5
2.1 Conceito de fachadas de dupla pele.....	5
2.2 Evolução histórica das fachadas de dupla pele	5
2.3 Estudos anteriores no âmbito das fachadas de dupla pele.....	8
2.4 Classificação das fachadas de dupla pele	13
2.4.1 Tipo de Ventilação.....	13
2.4.1.1 Ventilação Natural	13
2.4.1.2 Ventilação Mecânica.....	13
2.4.1.3 Ventilação Híbrida	14
2.4.2 Configuração da Fachada	14
2.4.2.1 Confinada (“Box window type”).....	14
2.4.2.2 Chaminé (“Shaft box type”).....	15
2.4.2.3 Corredor (“Corridor facade”).....	15
2.4.2.4 Multi-Piso (“Multi-storey”).....	16
2.4.3 Percurso do fluxo de ar	17
2.4.3.1 Exaustão de ar (EA)	17

2.4.3.2 Insuflação de ar (IA)	17
2.4.3.3 Circulação de ar exterior (CE)	17
2.4.3.4 Circulação de ar interior (CI).....	17
2.4.3.5 Tampão térmico (TT)	17
2.5 Ventilação Natural: Processos indutores	18
2.5.1 Acção do Vento	18
2.5.2 Acção Térmica	20
2.6 Efeitos do vento	22
2.6.1 Camada limite atmosférica	22
2.6.2 Camada limite urbana	23
2.6.3 Velocidade média do vento	24
2.6.3.1 Lei de potência	24
2.6.3.2 Lei logarítmica	24
2.6.4 Velocidade de atrito de uma zona urbana	25
2.6.5 Perfil da Camada Limite Urbana	26
2.7 Processos de transferência de calor	28
2.7.1 Condução	28
2.7.2 Convecção	28
2.7.3 Radiação	29
2.8 Desempenho térmico de fachadas de dupla pele	29
2.9 Funcionalidade: Vantagens e Desvantagens.....	31
2.9.1 Acústica.....	31
2.9.2 Ventilação	31
2.9.3 Higrotérmica.....	32
2.9.4 Iluminação natural	32
2.9.5 Risco de Incêndio.....	32
2.9.6 Energia	33
2.9.7 Estética	33
2.9.8 Custos	33
3. Caso de Estudo	35
3.1 Descrição e caracterização do caso de estudo.....	35

3.2 Dados do Vento	38
3.2.1 Correção da velocidade do vento	38
3.2.1.1 Características locais.....	39
3.2.2 Cálculo e correção dos ângulos de incidência do vento.....	42
3.2.3 Correção dos coeficientes de pressão	43
3.3 Dados da temperatura e da radiação solar	46
3.4 Procedimento experimental	47
4. Análise e discussão de resultados.....	49
4.1 Caracterização das campanhas de monitorização	49
4.2 Análise particular de dias de interesse	49
4.2.1 Análise da temperatura interior e exterior	50
i) Dias úteis com céu limpo.....	50
ii) Dias úteis com céu nublado.....	51
iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo	52
iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado.....	53
4.2.2 Análise da radiação solar	53
i) Dias úteis com céu limpo.....	53
ii) Dias úteis com céu nublado	55
4.2.3 Relação entre radiação solar e diferença de temperatura média do ar no canal e a temperatura do espaço interior, por cada fachada e estação do ano	57
4.2.5 Análise dos perfis horizontais de temperatura.....	59
i) Dias úteis com céu limpo.....	60
ii) Dias úteis com céu nublado.....	61
iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo	62
iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado.....	63
4.2.6 Análise dos perfis verticais de temperatura.....	64
i) Dias úteis com céu limpo.....	64
ii) Dias úteis com céu nublado.....	65
iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo	67
iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado.....	67
4.2.2 Análise da acção do vento	68
i) Dias úteis com céu limpo.....	68

ii) Dias úteis com céu nublado	69
iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo	70
iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado.....	71
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	73
5.1 Conclusões	73
5.2 Limitações e propostas de desenvolvimentos futuros.....	76
Referências Bibliográficas	79
ANEXOS	A1
A1. Determinação das categorias de terreno para a determinação da acção do vento	A1
A2. Distribuição espacial dos valores de coeficientes de pressão do vento, por Orme, Liddament, por e Wilson (1998)	A2
A3. Caracterização das campanhas de monitorização	A4

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Quadro síntese sobre investigações anteriores	9
Tabela 2.2 - Tipo de escoamento numa camada limite urbana.....	26
Tabela 3.1 - Dados gerais considerados na correcção da velocidade do vento.....	39
Tabela 3.2 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de NO a SO e NE a SE	40
Tabela 3.3 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de Sul.....	41
Tabela 3.4 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de Norte	42
Tabela 3.5 - Dados do edifício para ajuste dos valores do coeficiente de pressão	43
Tabela 3.6 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados na recolha de dados.	48
Tabela 4.1 – Intervalos temporais da campanha.....	49
Tabela 4.2 - Horário do funcionamento automático do dispositivo de sombreamento.	49
Tabela 4.3 – Dias particulares de interesse sujeitos a análise	50

Índice de Figuras

Figura 2.1 – a): Sistemas de fachada de dupla pele aplicado em Steiff Factory, Gingen 1903; b): Instalações industriais da empresa Steiff em 1904; c): Goethe Institut em 2017	6
Figura 2.2 – Edifício Lloyd’s Building e respectiva planta do piso térreo	7
Figura 2.3 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Confinada” (vista frontal e corte em perfil).....	14
Figura 2.4 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Chaminé” (vista frontal e corte em perfil).....	15
Figura 2.5 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Corredor” (vista frontal e corte em perfil)	16
Figura 2.6 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Multi-Piso” (vista frontal e corte em perfil).....	16
Figura 2.7 - Diagrama das diferentes opções quanto ao percurso do ar, que flui através de fachadas de dupla pele.....	17
Figura 2.8 - Representação de sobrepções e depressões geradas nas faces de um edifício.....	19
Figura 2.9 - Circulação do fluxo de ar no interior de um edifício.	19

Figura 2.10 – Representação do perfil de velocidades na CLA.....	22
Figura 2.11 - Variação na temperatura do ar desde uma região rural até o centro da cidade.....	23
Figura 2.12 - Razão entre a área média das fachadas e a área total em planta.	25
Figura 2.13 – Representação do perfil da camada limite urbana e do deslocamento d	27
Figura 2.14 - Esquema genérico da transferência de radiação e fluxo de ar numa fachada de dupla pele	30
Figura 3.1 – Fotografias do Edifício H.	35
Figura 3.2 – Planta geral do edifício monitorado	36
Figura 3.3 – Fotografia representativa dos dois panos e vista do canal.....	36
Figura 3.4 –Esquema de admissão/exaustão do ar de ventilação da FDP	37
Figura 3.5 - Ilustração do perfil da fachada (à esquerda: piso 15; à direita: piso 16).	37
Figura 3.6 – Localização e respectiva orientação do edifício H e do anemómetro do Cabeço das Rolas	38
Figura 3.7 – Representação gráfica das interpolações lineares para a estimativa dos coeficientes de pressão - cp	44
Figura 3.8 – Esquema de separação do escoamento numa secção em planta rectangular	45
Figura 3.9 – Exemplo de incidências do vento consideradas para a definição dos coeficientes de pressão.....	46
Figura 3.10 – Esquema da colocação dos dispositivos de monitorização na campanha realizada.....	47
Figura 3.11 – Representação do posicionamento dos sensores.....	48
Figura 4.1 – Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo.....	51
Figura 4.2 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias úteis com céu limpo.....	51
Figura 4.3 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado.....	52
Figura 4.4 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias úteis com céu nublado.....	52
Figura 4.5 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana com céu limpo.	52

Figura 4.6 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias de fim-de-semana com céu limpo.	52
Figura 4.7 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana com céu nublado.	53
Figura 4.8 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias de fim-de-semana com céu nublado.	53
Figura 4.9 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo na fachada SW.....	54
Figura 4.10 - Radiação no plano horizontal verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo na fachada SW.....	54
Figura 4.11 – Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, na fachada NW, em dias de céu limpo.....	54
Figura 4.12 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo, na fachada SW.	55
Figura 4.13 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo, na fachada NW.	55
Figura 4.14 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado na fachada SW.	55
Figura 4.15 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado na fachada SE.	55
Figura 4.16 - Localização do edifício H e do edifício vizinho cuja fachada é envidraçada	56
Figura 4.17 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, na fachada NW, em dias de céu nublado.	56
Figura 4.18 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada SW.	57
Figura 4.19 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada NW.	57
Figura 4.20 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada SE.	57

Figura 4.21 - Variação em dias úteis da diferença entre a temperatura do ar no canal e a temperatura interior em cada fachada e em cada estação do ano: a) em dias de céu limpo; b) em dias de céu nublado.....	58
Figura 4.22 - Variação em dias úteis da radiação, em cada fachada e em cada estação do ano: a) em dias de céu limpo; b) em dias de céu nublado.	59
Figura 4.23 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (SW).	60
Figura 4.24 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (SE).	60
Figura 4.25 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (SW).	60
Figura 4.26 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (SE).	60
Figura 4.27 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (NW).	61
Figura 4.28 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (NW).	61
Figura 4.29 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 2 (SW).	61
Figura 4.30 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 4 (SW).	61
Figura 4.31 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 2 (NW).	62
Figura 4.32 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 4 (NW).	62
Figura 4.33 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu limpo, campanha 1 (SW).....	63
Figura 4.34 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu limpo, campanha 4 (SW).....	63
Figura 4.35 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana de céu limpo na fachada SW.	63
Figura 4.36 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu nublado, campanha 2 (SW).	64
Figura 4.37 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu nublado, campanha 3 (SW).	64
Figura 4.38 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 1 (NW).	64
Figura 4.39 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 1 (SW).	64
Figura 4.40 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (NW).	65
Figura 4.41 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (SW).	65
Figura 4.42 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (SE).	65
Figura 4.43 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (NW).	66
Figura 4.44 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (SW).	66
Figura 4.45 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (NW).	66
Figura 4.46 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (SW).	66

Figura 4.47 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (SE).	66
Figura 4.48 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (SE).	66
Figura 4.49 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 3 (NW).	67
Figura 4.50 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 3 (SW).	67
Figura 4.51 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 2 (NW).	68
Figura 4.52 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 2 (SE).	68
Figura 4.53 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (NW).	68
Figura 4.54 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (SE).	68
Figura 4.55 – Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 1.....	69
Figura 4.56 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 2.	69
Figura 4.57 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias úteis com céu limpo, fachada SE.....	69
Figura 4.58 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 4.	69
Figura 4.59 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 2 (NW).	70
Figura 4.60 - Velocidade e direcção do vento em dias úteis de céu nublado, campanha 2.	70
Figura 4.61 - Perfil vertical de temperatura, dias fim-de-semana de céu limpo, campanha 2 (SE).	70
Figura 4.62 - Velocidade e direcção do vento em dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 2.	70
Figura 4.63 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de- semana com céu limpo, fachada SW.	71
Figura 4.64 - Velocidade e direcção do vento em dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 1.	71
Figura 4.65 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de- semana com céu nublado, fachada SW.	71

Figura 4.66 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu nublado, fachada NW.....	71
Figura 4.67 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu nublado, fachada SE.....	72
Figura 4.68 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de fim-de-semana limpo, campanha 3.	72
Figura 4.69 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (SW).	72
Figura 4.70 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de fim-de-semana nublado, campanha 3.	72

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

AVAC	Sistemas de climatização de espaços interiores por meio de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado
BBRI	Belgium Building Research Institute
CCU	Camada de Cobertura Urbana
CLA	Camada Limite Atmosférica
DSF	Double Skin Facade
E	Este
EC 1	Eurocódigo 1 - NP EN 1991 – Acções em estruturas Parte 1-1: Acções gerais, pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios
FDP	Fachada de dupla pele
INCM	Imprensa Nacional-Casa da Moeda
IPQ	Instituto Português da Qualidade
IST	Instituto Superior Técnico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
n.d.	Não disponível
NE	Nordeste
NO / NW	Noroeste
O	Oeste
SE	Sudeste
SO / SW	Sudoeste

Símbolos

A	Área	m ²
c _p	Coeficiente de pressão	-
d	Deslocamento	m
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Condutância térmica superficial local	(W/ m ² K)
H	Altura média	m
\bar{h}_r	Altura média da camada de cobertura urbana	m
k	Constante de Von Kármán	-
L	Distância entre dois pontos	m
p	Pressão	Pa
q	Densidade de fluxo de calor local	(W/m ²)
Q̇	Calor gerado	W
Q/V	Caudal	m ³ /h
T	Temperatura	K

U	Condutividade térmica	W/(mK)
U	Velocidade do vento	ms ⁻¹
\bar{U}	Velocidade média	ms ⁻¹
u_*	Velocidade de atrito	ms ⁻¹
x	Distância entre dois pontos	m
z	Cota – Altura acima do solo	m
z_0	Altura de rugosidade	m
z_{ref}	Altura de referência acima do solo	m

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de rugosidade	-
β	Inclinação da superfície	rad
Δ	Varição	-
δ	Espessura da camada limite	m
θ	Ângulo de incidência do vento no edifício	Graus [°]
λ	Tipo de escoamento / Condutibilidade térmica	- / W/(mK)
τ	Tensão exercida	N/m ²
ρ	Massa volúmica	kg/m ³

Índices

1	Efeitos locais
10	Efeitos globais
a	Característica do fluido
c	Calor local por convecção
$cond$	Condução
$conv$	Convecção
e	Exterior
f	Frontal
imp	Impulsão
i	Espaço interno
p	Plana
ref	Valor de referência
s	Valor à superfície
t	Ação Térmica / Total
u	Urbana
v	Ação do Vento
w	Superfície exposta do sólido

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas e os problemas ambientais associados à acção humana levaram à preocupação do público em geral sobre o desenvolvimento sustentável da sociedade. Nos últimos anos, tem havido um esforço crescente em promover a redução da emissão de gases de efeito de estufa em todo o mundo com o objectivo de atenuar o impacto sobre a saúde e minimizar o uso de energia (Chan, 2014).

Actualmente, os consumos de energia assentam sobretudo em combustíveis de origem fóssil, pelo que são geradores de emissões de gases com efeito de estufa, que têm impactes ambientais consideráveis (Gomes, 2010). Portanto, para abordar e prevenir problemas como o excesso de consumo de energia não renovável, os edifícios precisam da aplicação de tecnologias com características sustentáveis (Musa, 2016).

Existem muitas definições de sustentabilidade nos edifícios, mas um dos requisitos é conduzir ao menor uso de recursos não renováveis, compatibilizado com as características que o edifício dispõe para ser o mais independente possível desse tipo de energia (Butera, 2005). Outro dos objectivos é alcançar um desempenho funcional máximo que implique proporcionar conforto térmico propício em diferentes zonas com diferentes condições climáticas com reduzido consumo de energia (Musa, 2016). Caso não seja aplicado um projecto eficiente e adaptável às condições quer do próprio edifício quer da zona onde está inserido, ter-se-á uma construção com um consumo de energia muito elevado. Em edifícios com grandes áreas envidraçadas, cujas trocas de calor pela envolvente têm um peso relevante no balanço energético do edifício, esta preocupação deverá ser ainda maior.

Beneficiando da sua aparência estética e conceito moderno, a aplicação do sistema de fachada de dupla pele, tem vindo a crescer consideravelmente nos últimos anos (Shen, 2016). Um sistema de fachada de dupla pele é essencialmente um conjunto de duas "peles" maioritariamente de vidro separadas por um espaço de ar (Butera, 2005). Este sistema teve origem na Europa e tem capacidade de regular cargas de arrefecimento e aquecimento de energia, dentro dos espaços interiores dos edifícios. Tem, assim, a potencialidade de economizar o custo de exploração dos edifícios (de energia), a longo prazo (Musa, 2016). A aplicação de um sistema de fachada de dupla pele surge, em alternativa a uma simples fachada cortina envidraçada, com o propósito de melhorar o conforto dos ocupantes, os consumos de energia associados e o próprio comportamento higrotérmico dos edifícios.

1.2 Objectivos e metodologia

A presente dissertação tem como objectivo principal a avaliação experimental do comportamento térmico de fachadas de dupla pele, com recurso a resultados experimentais obtidos em campanhas de monitorização no âmbito do IEA Annex 44, com o efeito da ventilação natural incorporado. De modo a alcançar este objectivo, estabeleceram-se os seguintes objectivos:

- Compreender o conceito de fachada de dupla pele, conhecer a sua evolução histórica e realizar uma revisão de conhecimentos através da consulta de estudos de investigação anteriores neste âmbito;
- Classificar as fachadas de dupla pele, identificando as suas configurações mais frequentes e modo de funcionamento, nomeadamente quanto ao tipo de ventilação, tipo de ventilação e modo de ventilação;
- Caracterizar o desempenho térmico da fachada de dupla pele; conhecer as diferentes vantagens e desvantagens associadas a este sistema, e os processos indutores de ventilação natural e de transferência de calor;
- Seleccionar um caso de estudo, e elaborar uma caracterização geométrica e construtiva do edifício, e da fachada de dupla pele em particular, e definir as campanhas de monitorização e os parâmetros a analisar (valores de radiação incidente, velocidade do vento, características do sistema de AVAC, entre outros.);
- Organizar os dados recolhidos nas campanhas de monitorização e seleccionar os que têm maior interesse de serem analisados e estabelecer correlações entre os diferentes parâmetros analisados e compreender como é que estes estão relacionados com o comportamento térmico do edifício.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, os objectivos e a organização do trabalho desenvolvido.

O estado da arte está presente no Capítulo 2, onde se faz uma breve contextualização do conceito e da evolução histórica das fachadas de dupla pele, dos tipos de ventilação que podem surgir neste tipo de fachada e das suas possíveis configurações. Aborda-se também a questão da funcionalidade das fachadas de dupla pele referindo-se algumas das suas vantagens e desvantagens. São também apresentados alguns estudos anteriores de diversos autores, sobre o desempenho térmico deste tipo de fachada.

No Capítulo 3 descreve-se o caso de estudo e a campanha experimental. Faz-se a caracterização do edifício seleccionado como caso de estudo e do procedimento experimental adoptado na campanha experimental. São também descritos o período da campanha de recolha de dados e a forma utilizada para a avaliação do desempenho térmico da fachada de dupla pele do edifício.

Os resultados experimentais, referentes à campanha experimental são apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões principais do trabalho e aponta possíveis desenvolvimentos futuros na sequência do presente estudo.

Por fim, apresentam-se as Referências Bibliográficas e um conjunto de Anexos com informação mais detalhada que se considerou pertinente para complementar o documento.

2. Estado da Arte

2.1 Conceito de fachadas de dupla pele

As fachadas de dupla pele caracterizam-se por ser um sistema constituído por dois panos envidraçados com um espaço de ar entre eles que pode ser ventilado que faz a separação entre o espaço interior e exterior. Estes dois panos (peles) envidraçados fazem jus à designação “dupla pele”. Esta tecnologia é reconhecida como sendo uma solução arquitectónica que, consegue aliar uma estética atraente e moderna à capacidade de otimizar consumos de energia e de melhorar o conforto interior, contrariamente ao que se encontra numa fachada envidraçada tradicional (Gomes, 2010).

Este sistema de fachadas tem sido utilizado em maior escala, desde os anos noventa, por razões técnicas e estéticas em edifícios de serviços “inovadores” (Huckemann, 2009). Pretende-se com este sistema obter edifícios com fachadas envidraçadas sem comprometer um bom isolamento térmico e ventilação natural (Blanco, 2014).

As FDP têm vindo a ser utilizadas na maioria dos países da Europa, com o intuito de economizar energia no período de Inverno. A elaboração deste tipo de fachada é o resultado de muitos anos de investigação e desenvolvimento nos domínios da concepção estrutural, tecnológica e material, térmica, energética, lumínica e acústica (Urbán, 2016).

Outra característica que diferencia este sistema de dupla pele da fachada tradicional de vidro é o facto de se poder tirar partido da passagem de ar no canal existente entre os dois panos. A possibilidade de se adaptar este sistema às variações sazonais do clima reforça a flexibilidade funcional é outra vantagem deste sistema de fachada em relação ao convencional. O estudo do projecto deste tipo de fachadas tem alcançado um nível de aperfeiçoamento no qual se pode citar a chamada “fachada inteligente” (Sacht, 2012).

A aplicação deste tipo de sistema dependerá do fim a que se destina, tendo como possíveis razões, a estética; a incorporação num sistema de climatização de um edifício que pode ser conjugado com a ventilação do próprio edifício através de trocas de energia entre a caixa-de-ar e o seu interior. Mas os principais objectivos de uma fachada deste tipo serão a entrada abundante de luz e a criação de uma barreira térmica para proporcionar maior conforto aos que se encontram no interior do edifício.

2.2 Evolução histórica das fachadas de dupla pele

Analisando a história da arquitectura de edifícios percebe-se que um sistema de fachadas de dupla pele não é algo novo. Contudo, o conceito de FDP é relativamente recente e pertence aos sistemas dinâmicos de construção que se adaptam conforme a variação climática (Kalyanova, 2008).

Em 1849, Jean-Baptiste Jobard, então director do Museu da Indústria em Bruxelas, descreveu uma versão de uma fachada de múltipla pele ventilada mecanicamente. Este fotógrafo francês mencionou

que, no Inverno o ar quente deve circular entre dois vidros, bem como o ar frio, no caso de ser Verão (Saelens, 2002).

Inicialmente, surgiu, uma parede de cortina de dupla pele, na Fábrica de Steiff em Gingen, Alemanha. Este edifício foi projectado, em 1903, por Richard Steiff, filho do dono da fábrica e as prioridades eram maximizar o aproveitamento da luz do dia tendo em conta o clima frio e os ventos fortes sentidos naquela região. A solução foi aplicar uma estrutura de três andares, aproveitando o piso térreo para um armazém e os dois pisos superiores para áreas de trabalho, Figura 2.1 b). Trata-se uma estrutura de aço que sustenta uma armação de secções em T fixadas com grampos para os lados interno e externo de cada coluna. Desta forma, a armação suporta as duas camadas da dupla pele, deixando um espaço vazio com dimensões consideráveis, cerca de 25cm. A Figura 2.1 a) apresenta um esboço do funcionamento do sistema referido (Crespo, 2002).

O edifício foi bem sucedido e foram construídos dois anexos em 1904 e 1908 com o mesmo sistema de dupla pele, mas desta vez foi aplicado madeira em vez de aço na estrutura por razões orçamentais. (Crespo, 2002). Estes edifícios mantêm-se, até hoje, em funcionamento como Goethe Institut, como se pode verificar na Figura 2.1 c).

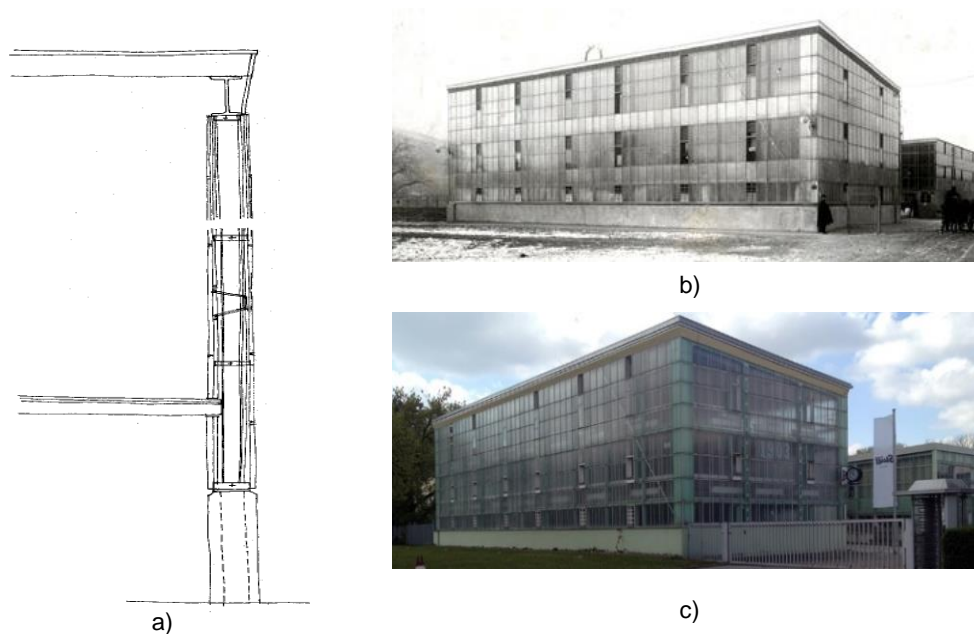


Figura 2.1 – a): Sistemas de fachada de dupla pele aplicado em Steiff Factory, Gingen 1903 (Crespo, 2002); b): Instalações industriais da empresa Steiff em 1904; c): Goethe Institut em 2017 (Goethe Institut)

Na Áustria, em 1903, Otto Wagner ganhou a competição para o Post Office Savings Bank, edifício que foi construído em duas fases e tem uma clarabóia em dupla pele no salão principal que ocupa três das cinco naves do edifício. Nos anos 70, surgiu a necessidade de introduzir condutas de para a aplicação de sistemas de ar condicionado (Crespo, 2002).

Outro exemplo surgiu no ano de 1929, por Le Corbusier, em que apresentou um conceito conhecido como “mûr neutralisant” que, através da cavidade de ar, as perdas e ganhos da transmissão desperceceriam com a circulação do ar à temperatura interior. No entanto, esta teoria não foi bem sucedida, pois faltava perceber que o ar circulante necessita de energia para ser aquecido ou arrefecido (Saelens, 2002).

Richard Rogers começou a projectar, em 1978, o Lloyd’s Building (apresentado na Figura 2.2), em Londres. Este edifício foi terminado no ano de 1986 e tem terminais em forma de leque, no piso térreo, que admitem ar na parte inferior da dupla pele fazendo com que o ar quente suba para o topo, onde é recolhido na sala das máquinas e lançado ao sistema, envolvendo efectivamente o edifício no seu próprio ar. Estas fachadas incorporaram as ideias sobre a ventilação iniciadas por Le Corbusier (Crespo, 2002). A fachada do referido edifício foi concebida com entradas de ar ao nível do Solo, equipadas com amortecedores mecânicos e saídas de retorno de ar ao nível da cobertura (Barnás, 2014).

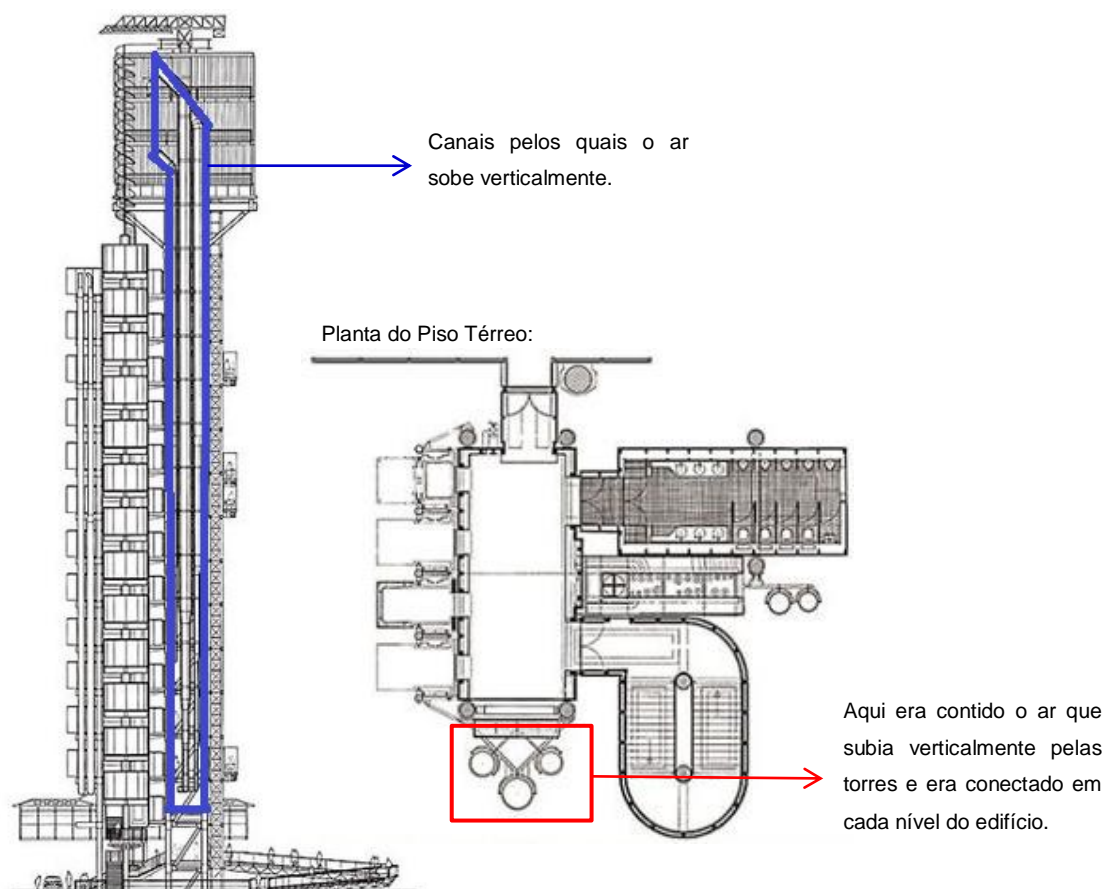


Figura 2.2 – Edifício Lloyd’s Building e respectiva planta do piso térreo (adaptado de Google Images)

No ano 1989, foi construído o edifício da Caixa Geral de Depósitos na Av. da República, em Lisboa, tendo sido este o primeiro edifício com FDP em Portugal. Este edifício foi projectado por MC Arquitectos (Gomes, 2010).

Nos anos 90 dois factores influenciaram maioritariamente o progresso de fachadas de dupla pele. O aumento da preocupação afectaram os projectos arquitectónicos tanto a nível técnico bem como por questões políticas. A evolução de hardware e de software permitiu que se resolvesse cálculos complexos para adaptar as fachadas ao design e funcionalidade pretendidos (Crespo, 2002).

Em 1995, o Museu de Arte Moderna, em Nova Iorque organizou a exibição de “Light Construction” realizada por Terence Riley. Esta exposição tinha como foco primordial os projectos de arquitectura e instalações caracterizados pela transparência. Foram estudadas diferentes estratégias, entre as quais destaca-se a conjugação de tiras de vidro e cobre e a combinação entre betão e vidro (Crespo, 2002).

Com a evolução deste tipo de sistema de fachada surgiu um pano exterior composto por alas móveis de vidro. Nos dias frios, com as alas externas fechadas consegue-se uma infiltração mínima de ar, garantindo maior isolamento da fachada, menores perdas de calor e, consequentemente mais conforto térmico. Nos dias quentes, as alas podem ser abertas para maior circulação de ar e, assim, usufruir de uma ventilação natural. As alas podem ser ajustadas, pelos ocupantes do edifício (Poirazis, 2004).

2.3 Estudos anteriores no âmbito das fachadas de dupla pele

Nos últimos anos, o uso de fachadas de dupla pele ganhou popularidade na prática de construção moderna em todo o mundo (Marques da Silva, 2008).

Tal como em qualquer avanço tecnológico, surge a necessidade de se certificar a eficiência destes novos elementos, por forma a se justificar o investimento empregue na sua aplicação numa construção contemporânea.

Deste modo, têm sido realizados estudos através da aplicação de aparelhos de medição de caudal de ar e de temperatura em edifícios já existentes, permitindo averiguar se este sistema de fachadas implicaria ou não uma poupança de energia. Com o desenvolvimento de software surgiu mais uma ferramenta para que fosse possível desenvolver soluções teóricas de fachada e a sua integração em diferentes condições relativamente à envolvente de um determinado edifício.

Os estudos têm-se focado essencialmente na eficiência energética de uma FDP. Desta forma, tem-se analisado questões como a distância entre os panos de vidro, o tipo de vidro, o tipo de dispositivos de sombreamento e a própria orientação do edifício para avaliar a radiação solar incidente.

Algumas das principais investigações quer experimentais, quer numéricas estão sintetizadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Quadro síntese sobre investigações anteriores

Tema	Referência	Localização	Estudo		Objectivo	Observações
			<i>Numérico</i>	<i>Experimental</i>		
Características térmicas	Andelković (2014)	Sérvia		X	Examinar a eficiência energética de um edifício, na Sérvia, equipado com FDP.	Os resultados mostraram o comportamento térmico das FDP. E, em condições extremas no Verão, o canal atingiu valores de temperatura muito altos.
			FDP naturalmente ventilada de vários pisos.			
	Gratia, e Herde (2006)	Bélgica		X	Avaliar o comportamento térmico de uma FDP orientada a Sul sem dispositivo de sombreamento.	Para dias de Sol a temperatura no canal foi superior à temperatura exterior, em média 20°C. Para dias de céu nublado, esta diferença foi no máximo de 10°C.
			Aplicação de um sistema de fachada dupla pele em clima belga.			
	Barbosa (2015)	Inglaterra		X	Análise da influência dos principais parâmetros de projecto no conforto térmico em edifícios de ventilação natural com FDP sob condições tropicais.	O parâmetro mais influente no desempenho térmico do edifício é a aplicação de dispositivos de sombreamento dentro da cavidade, seguido pela largura da cavidade.
			Os parâmetros considerados, relacionados com o estudo de um edifício de escritórios no Rio de Janeiro, Brasil, foram: a profundidade da cavidade, posição das janelas, dispositivos de sombreamento e materiais.			

Tabela 2.1 - Quadro síntese sobre investigações anteriores (cont.)

Tema	Referência	Localização	Estudo		Objectivo	Observações
			<i>Numérico</i>	<i>Experimental</i>		
Desempenho energético	Saelens (2006)	Bélgica	X		Sistemas tradicionais de revestimento sob condições climáticas belgas.	Concluiu-se que a eficiência energética dos sistemas de fachada foi melhorada com a optimização da geometria e propriedades quer do vidro quer do dispositivo de protecção solar.
			Estratégias para melhorar o desempenho energético das FDP.			
	Gratia, e Herde (2006)	Bélgica		X	Avaliação do impacto de uma FDP sobre os consumos de energia.	Concluiu-se que o impacto da presença da FDP é fraco em comparação com o impacto induzido pela utilização de estratégias de arrefecimento naturais, pelo nível de isolamento e pelo nível de ganhos internos.
			Análise feita de acordo com a orientação do edifício para três diferentes níveis de isolamento.			

Tabela 2.1 - Quadro síntese sobre investigações anteriores (cont.)

Tema	Referência	Localização	Estudo		Objectivo	Observações
			<i>Numérico</i>	<i>Experimental</i>		
Desempenho energético	Ballestini (2004)	Itália		X	Análise da aplicação da FDP no restauro de uma fábrica industrial, num clima mediterrânico.	Demonstrou que a aplicação de uma FDP poderia resultar numa poupança energética até 12%.
			Aplicação de um sistema de fachada de dupla pele com ventilação natural			
Ventilação	Ji e Cook (2007)	Reino Unido		X	Análise da influência da existência de estores com lâminas com várias inclinações diferentes no comportamento da fachada.	Concluiu-se que, para além da sua função de sombreamento, os estores laminados contribuíam para uma melhor ventilação natural da cavidade. Determinou-se que a presença de um estore pode melhorar a ventilação natural até 35%.

Tabela 2.1 - Quadro síntese sobre investigações anteriores (cont.)

Tema	Referência	Localização	Estudo		Objectivo	Observações
			<i>Númerico</i>	<i>Experimental</i>		
Influência do vento	Gratia, e Herde (2007)	Bélgica	X		Análise da influência do vento na temperatura atingida na cavidade de uma FDP. Comparando um dia de Inverno com céu limpo e sem vento.	Verificou-se que a temperatura reduzia (cerca de 13,6°C) com uma velocidade do vento de 4ms ⁻¹ , realçando a importância de uma ventilação eficiente das FDP.
			Realizado através de um programa de simulação energética de edifícios			
Influência do vento	Marques da Silva, e Gomes, (2008)	Portugal		X	Análise da distribuição de pressões internas em FDP, em vários andares.	Os dados experimentais mostraram uma distribuição de pressão na parede interna dependente do layout, que é consideravelmente diferente do edifício sem alçado. Os coeficientes de pressão dentro do intervalo FDP mostraram-se sempre negativos independentemente da direcção do vento incidente.
			Referente a um conjunto de testes de túnel de vento feitos em um modelo de construção com diferentes layouts de FDP de vários pisos.			

2.4 Classificação das fachadas de dupla pele

Segundo Dickson (2004), as fachadas são classificadas de acordo com o tipo de ventilação que predomina na cavidade de ar existente entre os dois panos envidraçados.

2.4.1 Tipo de Ventilação

O tipo de ventilação de uma fachada de dupla pele é função da força motriz do fluxo de ar dentro da cavidade, existente entre os dois panos envidraçados. Esta força pode ter origem em fenómenos naturais - ventilação natural -, em meios mecânicos – ventilação mecânica -, ou ser o resultado da conjugação de ambos os sistemas referidos (Gomes, 2010; Marques da Silva, 2005).

2.4.1.1 Ventilação Natural

Uma das principais vantagens das FDP é que permitem a ventilação natural e se for bem projectada, a ventilação natural pode levar a uma redução no uso de energia durante o período de ocupação do edifício e melhorar o conforto de quem o ocupa (Poirazis, 2008).

A ventilação natural ocorre devido a diferenciais de temperatura e pressão existentes em passagens com comunicação entre o interior e o exterior do edifício. O fenómeno térmico baseia-se no facto de o ar quente ser mais leve do que o ar frio, provocando a circulação da massa de ar entre duas zonas que estão em contacto entre si. Também pode ocorrer através da acção do vento, devido ao gradiente de pressões entre as zonas de abertura. Como depende de fenómenos naturais como variáveis a rugosidade do território, a existência de urbanização, florestas ou grandes massas de água, este tipo de ventilação é bastante variável e complexo no que toca à previsão do desempenho do sistema de fachada de dupla pele (Gomes, 2010).

2.4.1.2 Ventilação Mecânica

Relativamente à ventilação mecânica, a diferença de pressão entre a entrada e a saída resulta de um ventilador isolado ou integrado no próprio sistema de climatização. A taxa de fluxo de ar pode ser considerada como uma variável conhecida e os efeitos térmicos dinâmicos admitem-se como sendo desprezáveis (Saelens, 2002; Gomes, 2010).

Se a ventilação da cavidade for do tipo mecânico o caudal de ar é normalmente conhecido e, assim sendo, o fluxo de ar é facilmente obtido (Kalyanova, 2008). Isto acontece porque o caudal apresenta menores variações e permite um controlo maior do que no caso da ventilação natural (Gomes, 2010).

Os sistemas em que a ventilação é assistida mecanicamente permitem que o edifício seja selado, garantindo um melhor isolamento acústico em comparação com os sistemas naturalmente ventilados. Tem a vantagem de que, quando o clima é mais austero, o sistema ventilação mecânica pode manter o efeito tampão da fachada constante reduzindo a influência do ar exterior para o ambiente interior. Neste caso, recorre-se a meios mecânicos para que o ar seja forçado a entrar no canal. O ar, ao

subir, liberta o calor existente na cavidade e, no final, esse ar pode ser expulso ou reciclado. (Poirazis, 2008).

2.4.1.3 Ventilação Híbrida

Uma FDP com ventilação híbrida caracteriza-se por ser um sistema que coexiste os dois sistemas anteriores e pode funcionar tanto com ventilação natural como com mecânica, dependendo das condições climáticas e das necessidades de ventilação. (Gomes, 2010).

2.4.2 Configuração da Fachada

A configuração da fachada baseia-se na classificação do Instituto de Pesquisa de Edifícios da Bélgica (BBRI) para FDP, a mais conhecida e amplamente adoptada na Europa. Foram efectuadas alterações a essa classificação, reunindo algumas das principais características com outros sistemas de classificação, incluindo o método de classificação utilizado nos EUA. Saelens (2002) classificou as fachadas de dupla pele, considerando a geometria da cavidade, apresentadas a partir do ponto 2.4.2.1 até ao 2.4.2.4:

2.4.2.1 Confinada (“Box window type”)

Neste caso, cada janela do edifício é autónoma, tratando-se de uma FDP em menor escala. Isto é, as divisões horizontal e vertical dividem a fachada em caixas menores e independentes. É um sistema semelhante ao de uma janela dupla com a particularidade de o canal entre os vidros ser ventilado. – Figura 2.3;

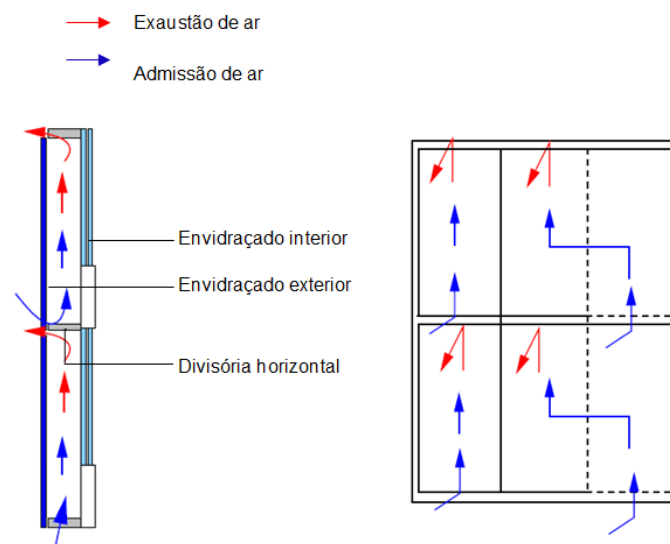


Figura 2.3 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo "Confinada" (vista frontal e corte em perfil) (adaptado de Faggembauu, 2006).

2.4.2.2 Chaminé (“Shaft box type”)

As fachadas do tipo chaminé encontram-se horizontalmente divididas, fazendo com que o ar de exaustão seja convergido para uma coluna central, esta conduta estende-se ao longo de toda a altura do edifício e contribui para o efeito chaminé. As fachadas deste tipo são compostas por módulos individuais de forma semelhante às fachadas confinadas. Os módulos são aplicados adjacentermente e de forma alternada com condutas comuns de ventilação. O ar entra através das aberturas individuais localizadas na base de cada módulo e é transferido para a coluna de ventilação, de onde é guiado de forma ascendente até ao exterior, quando atinge o topo (efeito chaminé) – Figura 2.4;

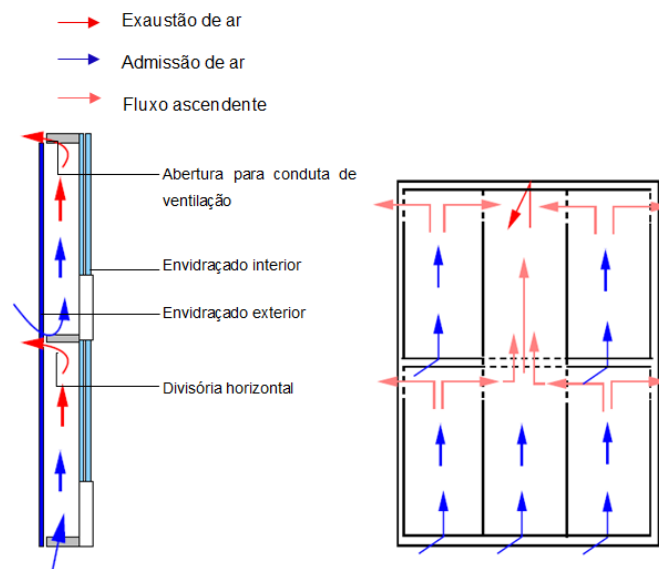


Figura 2.4 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Chaminé” (vista frontal e corte em perfil) (adaptado de Faggembauu, 2006).

2.4.2.3 Corredor (“Corridor facade”)

Este tipo de fachada caracteriza-se por uma cavidade dividida horizontalmente, essa divisão é realizada, ao nível de cada piso, por razões acústicas, de ventilação ou de segurança contra incêndio. A sua configuração é muito semelhante à fachada do tipo chaminé, sem a coluna, e funcionando piso a piso – Figura 2.5;

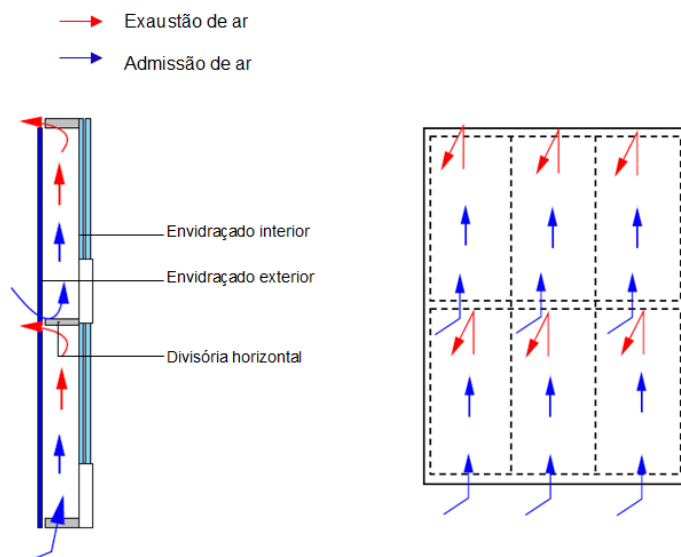


Figura 2.5 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Corredor” (vista frontal e corte em perfil) (adaptado de Faggembau, 2006).

2.4.2.4 Multi-Piso (“Multi-storey”)

Este tipo de fachada é caracterizado por não apresentar qualquer divisão horizontal ou vertical entre os dois panos. A ventilação da cavidade de ar é realizada através de grandes aberturas perto do pavimento e da cobertura do edifício, isto é, o ar circula ao longo de toda a fachada do edifício. – Figura 2.6.

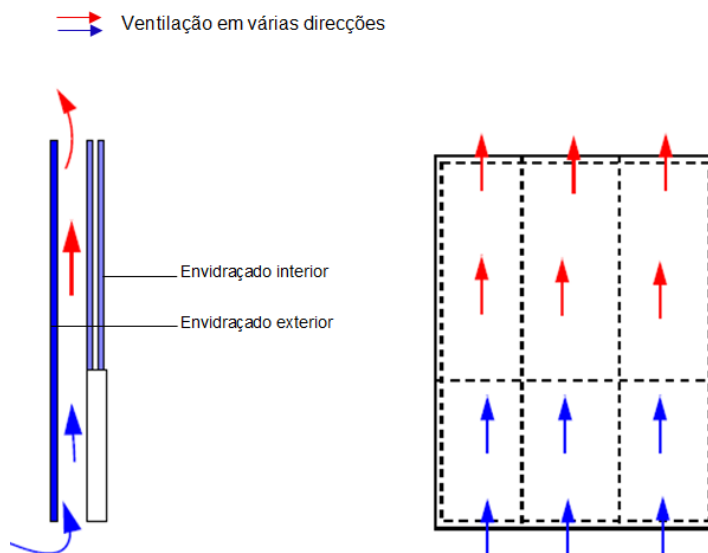


Figura 2.6 - Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Multi-Piso” (vista frontal e corte em perfil) (adaptado de Faggembau, 2006).

Por fim e citando Gomes, (2010) “com base num levantamento de mais de 200 edifícios reais com FDP em 21 países diferentes, foram identificadas as tipologias mais frequentemente utilizadas, com destaque para o caso português. Concluiu-se que tanto em Portugal como nos restantes países, a FDP multi-piso naturalmente ventilada e com circulação de ar exterior é a tipologia mais utilizada”.

2.4.3 Percurso do fluxo de ar

Os critérios de classificação definidos por Perino (2008) vão além do tipo de ventilação e englobam, também, o percurso do fluxo de ar e a configuração da fachada. O autor considera que o percurso do fluxo de ar é uma questão muito importante e que está associada à forma como as fachadas de dupla pele se integram nos sistemas de energia e controlo do edifício. O autor descreve como possíveis tipologias, as que estão referidas desde o ponto 2.4.3.1 até ao 2.4.3.5:

2.4.3.1 Exaustão de ar (EA)

A fachada tem como função extrair o ar interior, Figura 2.7 a).

2.4.3.2 Insuflação de ar (IA)

A fachada tem como função insuflar ar para o interior, Figura 2.7 b).

2.4.3.3 Circulação de ar exterior (CE)

O canal de circulação do ar da fachada é ventilado por ar exterior sem ligação com o interior, Figura 2.7 c).

2.4.3.4 Circulação de ar interior (CI)

O canal de circulação do ar da fachada é ventilado por ar interior sem ligação com o exterior, Figura 2.7 d).

2.4.3.5 Tampão térmico (TT)

A fachada actua de acordo com as configurações acima referidas e depende das condições interiores/exteriores e dos sistemas de controlo locais, Figura 2.7 e).

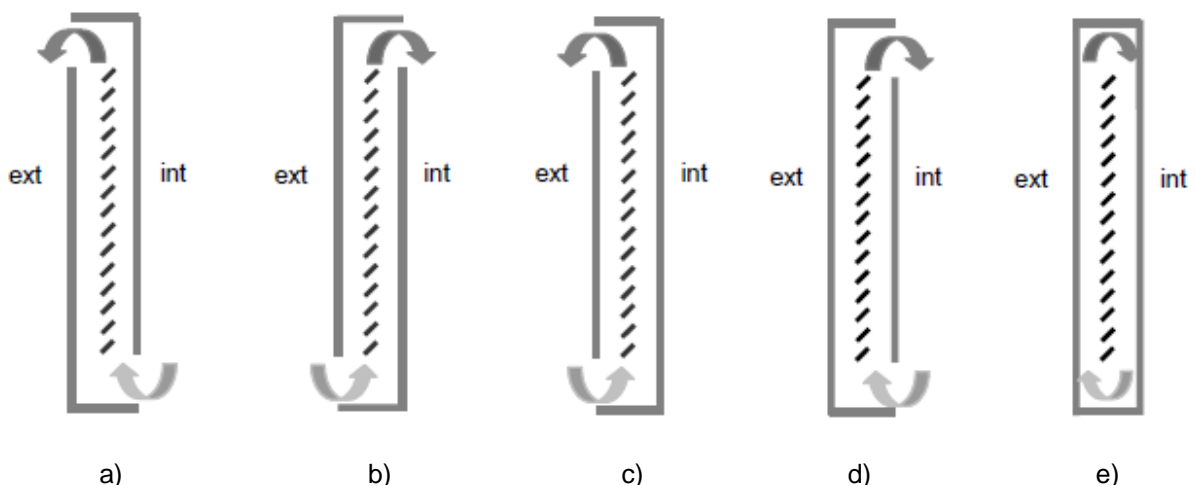


Figura 2.7 - Diagrama das diferentes opções quanto ao percurso do ar, que flui através de fachadas de dupla pele (Gomes, 2002).

2.5 Ventilação Natural: Processos indutores

O movimento de uma dada massa de ar é induzido por um diferencial de pressões quer seja originado pelo vento ou pela ventilação. Nos edifícios é a diferença de pressão entre os dois lados de uma abertura que promove o fluxo de ar que constitui a ventilação, como por exemplo, frinchas, janelas, portas, chaminés ou aberturas específicas para ventilação (Marques da Silva, 2013).

O escoamento do ar na cavidade de uma FDP é provocado por acções naturais, por gradientes térmicos e/ou por diferenças de pressão do vento, bem como por acções mecânicas através de ventiladores mecânicos. A pressão do ar pode ser descrita a partir das resultantes do peso próprio do ar (Gomes, 2010).

O fluxo de ar pode ser de origem térmica – devido à impulsão com origem na diferença de temperaturas entre o interior e o exterior –; ou eólica – devido à conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre a envolvente do edifício (Marques da Silva, 2013).

A ventilação de qualquer habitação deve ser geral e permanente, mesmo nos períodos de tempo em que a temperatura exterior obriga a manter as janelas fechadas (Silva, 2016).

No Inverno a diferença de temperatura entre o interior e o exterior deverá ser superior a 8°C, isto é: $(\theta_i - \theta_e) > 8^\circ\text{C}$. E, no Verão, os compartimentos principais devem ser ventilados sobretudo por abertura das janelas. As janelas devem localizar-se em fachadas com diferentes orientações (Silva, 2016).

2.5.1 Acção do Vento

A interacção do vento com o edifício determina a distribuição de pressão deste sobre a fachada, e é particularmente relevante nas FDP que operem com ventilação natural (Poirazis, 2008).

A pressão do vento é definida como a média de dois componentes. O primeiro, designado por pressão estática, está relacionado com grandes escalas dos movimentos do ar, que mudam lentamente no tempo. O segundo relaciona-se com as mudanças, em curto prazo, na velocidade e direcção do ar (Marques da Silva, 2005).

A fachada de dupla pele tem a capacidade de moderar a componente mais dinâmica da pressão do vento, que é responsável pelas mudanças em curto prazo, devido ao efeito combinado das aberturas nos panos interior e exterior em conjunto com a cavidade, que actua como um tampão (Marques da Silva, 2005).

A análise dos caudais de ar através das aberturas da envolvente pressupõe um estudo dos campos de pressões originados pela incidência do vento sobre o edifício. Estes campos traduzem-se em pressões e sucções, ou depressões, sobre as diferentes superfícies. É o desequilíbrio de distribuições de pressão que gera as forças que proporcionam os movimentos do ar através dos compartimentos do edifício (Rodrigues, 2014).

No caso de uma forma paralelepípedica simples, que é o caso de um edifício comum, quando o vento incide perpendicularmente a uma das superfícies, geram-se sobrepressões (+) sobre esta e depressões (-) na face oposta. A Figura 2.8 ilustra as sobrepressões e depressões geradas nas fachadas de um edifício (Rodrigues, 2014).

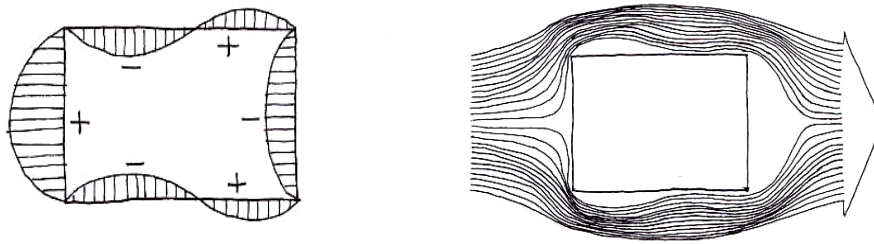


Figura 2.8 - Representação de sobrepressões e depressões geradas nas faces de um edifício (Rodrigues, 2014).

Relativamente à circulação no interior dos edifícios, o fluxo de ar toma o caminho mais fácil, isto é, o percurso em que a diferença de pressões é mais elevada e as resistências à sua passagem (perda de carga) são menores. A Figura 2.9 demonstra o referido. Podem, assim, existir zonas em que o ar não circula. Os vãos devem ser localizados em fachadas diferentes de forma a aproveitar o diferencial de pressão e aumentar a eficácia da ventilação (Rodrigues, 2014).

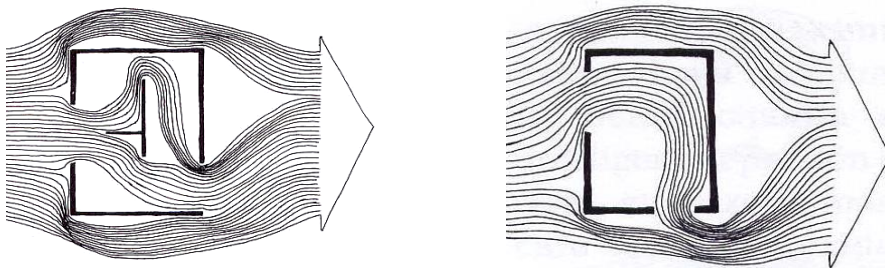


Figura 2.9 - Circulação do fluxo de ar no interior de um edifício (Rodrigues, 2014).

A ação do vento sobre um edifício é dependente da forma do mesmo, da incidência do vento e das características da sua vizinhança, como por exemplo obstáculos, orografia e rugosidade (Marques da Silva, 2013).

Quando o escoamento de um fluido é dificultado por um obstáculo, ocorre uma transformação da energia cinética do escoamento em energia de pressão e desenvolvem-se pressões ao longo das superfícies desse obstáculo. A distribuição da pressão de um dado edifício é normalmente expressa por um coeficiente de pressão adimensional, c_p , que relaciona a diferença entre a pressão local, p_s , num ponto localizado na própria superfície do corpo, e a pressão estática atmosférica, num ponto p_0 localizado a uma distância tal do obstáculo que não sofra interferência deste, com a pressão dinâmica do vento (Marques da Silva, 2005), a Equação 2.1 expressa o que foi referido.

$$c_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2} \quad (2.1)$$

em que:

- p_s É a pressão que actua num ponto à superfície do obstáculo.
- p_0 É a pressão estática num ponto não perturbado do escoamento.
- $\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2$ É a pressão dinâmica do vento não perturbado pelo obstáculo à altura de referência, que é tomada por convenção como a altura do obstáculo. Para efeitos de dimensionamento é habitual utilizar-se um coeficiente de pressão que resulta da média das pressões em zonas do edifício em que o efeito do vento é semelhante.

Segundo Marques da Silva (2013), de uma forma genérica tem-se que:

- envolventes de barlavento: $c_p > 0$
- todas as outras: $c_p < 0$

Em suma, os coeficientes de pressão permitem determinar o valor das pressões que actuem perpendicularmente às superfícies das estruturas e permitem determinar a acção do vento sob a forma de pressões. Os coeficientes podem assumir valores positivos e negativos, conforme as pressões sejam de sobrepressão ou sucção, respectivamente, tal como foi referido e ilustrado no início do ponto 2.5.1.

A resultante das pressões, devido à acção do vento, é então a força dinâmica motriz do escoamento, F^V , sendo o seu valor expresso pela Equação 2.2:

$$F^V = P_i A_i \leftrightarrow F_i^V = \frac{1}{2} \rho U_0^2 \times c_{pi} \times A_i \quad (2.2)$$

onde:

- P_i é a pressão local;
- A_i é a área da abertura;
- $\frac{1}{2} \rho U_0^2$ é a pressão dinâmica de referência, sendo que ρ é a massa volúmica do ar e U_0 a velocidade média do vento a uma altura de referência para a qual foram determinados os coeficientes de pressão (c_{pi}).

Note-se que, no caso dos coeficientes, c_{pe} , faz-se a distinção entre coeficientes aplicáveis à determinação dos efeitos globais da acção do vento (indicados por $c_{pe,10}$) e coeficientes aplicáveis à determinação de efeitos locais ($c_{pe,1}$), cujos valores estão estabelecidos na Tabela A1.2 do Anexo 1.

2.5.2 Acção Térmica

As acções térmicas em estruturas resultam de variações, num dado período de tempo, dos campos de temperatura característicos dos elementos constituintes. Tais variações podem ter diversas origens, como por exemplo variações climáticas (Mendes, 2017).

A intensidade dos efeitos térmicos depende de diversos factores, nomeadamente as condições climáticas locais, como por exemplo a temperatura do ar, a radiação solar e a velocidade do vento, a orientação e as características do revestimento das superfícies, os materiais constituintes. No caso de edifícios, os factores relacionam-se com as condições de aquecimento e ventilação, as características do isolamento térmico e o efeito de sombra de construções vizinhas (Mendes, 2017).

A segunda força promotora do escoamento resulta da acção térmica. Esta força tem origem na diferença de temperaturas entre o exterior e o interior do espaço considerado.

A existência de aberturas a diferentes cotas que promovem a comunicação entre o interior e o exterior do edifício e a diferença de temperaturas entre as duas zonas, induzem uma diferença de pressão que pode ser calculada pela Equação 2.3, de acordo com Marques da Silva (2013). Estes gradientes de pressão geram fluxos de ar e é gerada uma força de impulsão, devido à variação na massa volúmica do ar.

$$F_{imp}^T = \Delta p \times A \leftrightarrow F_{imp}^T = \Delta p \times gV \quad (2.3)$$

Sendo V o volume de fluido deslocado.

Segundo Marques da Silva (2013), o diferencial de pressões devido à componente térmica é dado pela Equação 2.4:

$$\Delta p^T = 0,021 H_{12} \Delta T \quad (2.4)$$

Em que H_{12} é a diferença em altura de duas aberturas.

É importante referir que o fluxo de ar interior de uma habitação difere consoante os valores das temperaturas das zonas. O sentido do movimento das massas de ar é ascendente se a temperatura do ar interior for superior à temperatura do ar exterior e toma o sentido contrário, descendente, quando a temperatura do ar interior é inferior à temperatura do ar da zona exterior.

Concluindo, no caso do vento e diferença térmica actuarem em simultâneo, o caudal gerado obtém-se a partir da Equação 2.5:

$$V = \sqrt{V_v^2 \pm V_t^2} \quad (2.5)$$

Em que V_v e V_t são, respectivamente, os caudais gerados pelo vento e pela acção térmica em caso de actuação isolada. Aplica-se o sinal (+) quando a acção térmica tem um efeito aditivo (sentido do caudal igual ao gerado pelo vento), e o sinal (-) em caso contrário (Rodrigues, 2014).

2.6 Efeitos do vento

2.6.1 Camada limite atmosférica

Devido à interacção com a superfície, a velocidade média do vento não é constante em altura e aumenta com a distância ao solo até uma certa altura. Esta instabilidade deve-se ao efeito da fricção aerodinâmica do ar com a superfície de atrito provocado pela rugosidade da mesma. A rugosidade aerodinâmica do solo pode impedir o livre fluxo do ar alterando a velocidade do vento. A uma altura suficientemente elevada o fluxo não é perturbado pela superfície e isso explica o gradiente de velocidades em altura. Este facto permite, também, que o fluxo de ar possa ser definido numa altura finita (Lopes, 2008).

A camada limite atmosférica é a parte da troposfera que é directamente afectada pela presença da superfície da Terra (Marques da Silva, 2013). A este nível, a velocidade torna-se uniforme e o escoamento é considerado livre (Ahuja *et al.*, 2006).

A rugosidade aerodinâmica do solo é definida pelas obstruções que perturbam o escoamento junto da superfície. Estas obstruções podem ser edifícios ou elementos naturais, como é o caso de montanhas ou árvores (Lopes, 2008).

A espessura da CLA pode ser definida como a altura gradiente e é a altura à qual o escoamento deixa de ser perturbado pela rugosidade aerodinâmica. Acima da altura da camada atmosférica perturbada, a variação em altura da velocidade do vento é desprezável e o perfil de velocidades médias assume um comportamento uniforme (Lopes, 2008).

A Figura 2.10 representa o perfil da CLA, sendo que a camada de ar acima da camada limite chama-se atmosfera livre. Relativamente à espessura da CLA, esta pode ir das centenas de metros a alguns quilómetros (Marques da Silva, 2013).

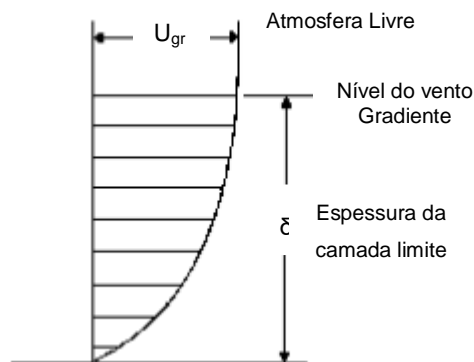


Figura 2.10 – Representação do perfil de velocidades na CLA (Marques da Silva, 2013).

O perfil de velocidades na CLA, num certo local e período de tempo, depende de factores como a velocidade média do vento acima da subcamada de rugosidade, das características do terreno, do

fluxo de calor, da presença de nuvens e do estado da CLA nas últimas seis a oito horas (Marques da Silva, 2013).

2.6.2 Camada limite urbana

Considerando uma zona urbana, correspondente ao caso de estudo, forma-se a camada limite urbana, em tudo semelhante à camada limite acima descrita, quando influenciada pela presença do edificado.

A CLU apresenta características distintas das regiões não urbanas adjacentes em virtude das alterações induzidas pela ocupação urbana no fluxo turbulento de calor e, geralmente, apresenta uma extensão vertical maior do que na região rural, porque na região urbana a intensidade da turbulência é maior, ver Figura 2.11.

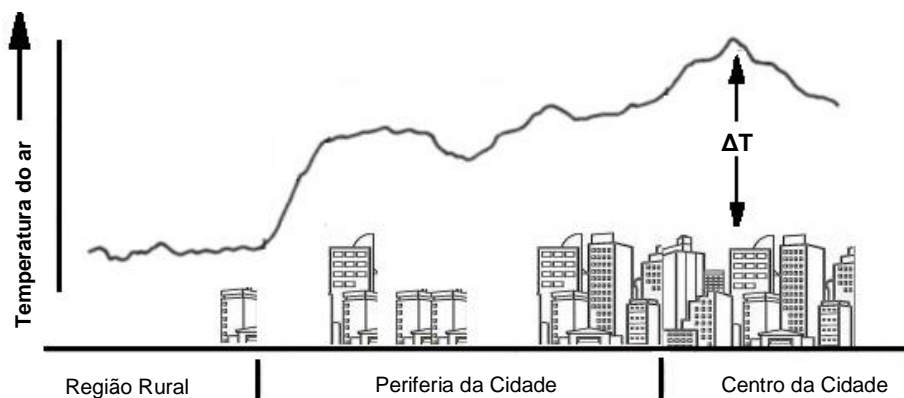


Figura 2.11 - Variação na temperatura do ar desde uma região rural até o centro da cidade (adaptado de OKE, 2002).

A CLU forma-se na direção do vento envolvendo toda a estrutura da cidade, como uma redoma cuja altura depende da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica, sendo o fluxo de ar influenciado pela geometria dos edifícios. A CLU divide-se em três camadas e a primeira é definida junto do solo, Camada de Cobertura Urbana (CCU), com uma espessura igual à altura média dos elementos de rugosidade, ou seja, dos elementos edificados e detém um campo de velocidades próprio dependente das condicionantes do local, como por exemplo do local. A segunda parte é dada pela Camada de Rugosidade, logo acima dos edifícios. Esta parte é conferida pela turbulência gerada pelos edifícios. A terceira camada, a Camada Inercial, é a zona onde imperam os efeitos de inércia e elevadas velocidades do vento. As alterações na vegetação de uma determinada região implicam alterações nas propriedades da superfície e conseqüentemente nas variações de massa de ar e de energia (OKE, 2002).

A evolução da construção numa determinada área pode gerar variações nos fluxos radiactivo e térmico. Assim sendo, processos como a urbanização podem gerar modificações nas características radiactivas, termodinâmicas e aerodinâmicas das zonas urbanas. (OKE, 2002).

2.6.3 Velocidade média do vento

Devido ao atrito existente na superfície terrestre, as velocidades do vento ao nível do solo são menores do que na atmosfera livre e são função da rugosidade da superfície, isto é, uma área com mais construção, menor será a velocidade próxima do solo. Contudo, em áreas urbanas, devido à interferência dos edifícios, o fluxo próximo ao solo exhibe transformações bruscas de velocidade e direção, as quais muito dificilmente se conseguem prever (Rodrigues, 2001)

A variação da velocidade média do vento com a altura, ilustrada na Figura 2.11, pode ser expressa matematicamente por duas leis, a lei da potência e a lei logarítmica. Sendo que a primeira representação matemática do perfil de velocidade média do vento foi a lei da potência e, que actualmente é a lei logarítmica, a mais utilizada para definir o perfil da velocidade média do vento, por ser a que revela melhores resultados. Ambas as leis descrevem a evolução da velocidade média do vento em altura até à altura da camada limite.

2.6.3.1 Lei de potência

Os modelos baseados nesta lei representam expressões empíricas desenvolvidas para o perfil de velocidade média vertical, do vento (Kalyanova, (2008), Simiu e Scanlan (1996)).

A Equação 2.6 expressa a lei de potência:

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.6)$$

Em que z é a cota do ponto onde se pretende estimar a velocidade do vento, $U(z)$. No caso de U_{ref} , este parâmetro representa a velocidade de referência do vento e z_{ref} a cota do local onde foi registado. O coeficiente α depende de vários factores como a rugosidade do local, cota, hora do dia, velocidade do vento, temperatura entre outros. Existem diversas aproximações para a sua determinação.

2.6.3.2 Lei logarítmica

Relativamente ao modelo da lei logarítmica, ele é fundamentalmente a descrição matemática da camada limite atmosférica. Este método aprovisiona resultados com mais qualidade do que o modelo referido anterior, em 2.6.3.1 (Kalyanova, (2008), Simiu e Scanlan (1996)). A lei logarítmica é definida pela Equação 2.7:

$$U(z) = \frac{1}{K} U^* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.7)$$

Onde K é a constante de Von Kármán ($K = 0,4$). O termo U^* representa a velocidade de atrito obtida pela massa específica do ar, ρ_{ar} , e τ_0 é a tensão exercida por este na superfície do terreno. U^* calcula-se a partir da Equação 2.8:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_{ar}}} \quad (2.8)$$

A lei logarítmica é ainda definida em função de um comprimento de rugosidade, z_0 , que depende de cada tipo de terreno. Em suma, a velocidade à altura do edifício, H , pode ser obtida pela Equação 2.9 (Gomes, 2010).

$$U_H = U_{Ref} \left(\frac{H}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.9)$$

2.6.4 Velocidade de atrito de uma zona urbana

A Figura 2.12 ilustra como se pode classificar o tipo de escoamento entre os edifícios, em função da incidência dos ventos e das características da zona urbana. A Equação 2.10 traduz que λ_f é a razão entre a área média das fachadas e a área total em planta. Sendo \bar{h}_r a altura média da camada de cobertura urbana (CCU) (Marques da Silva, 2017).

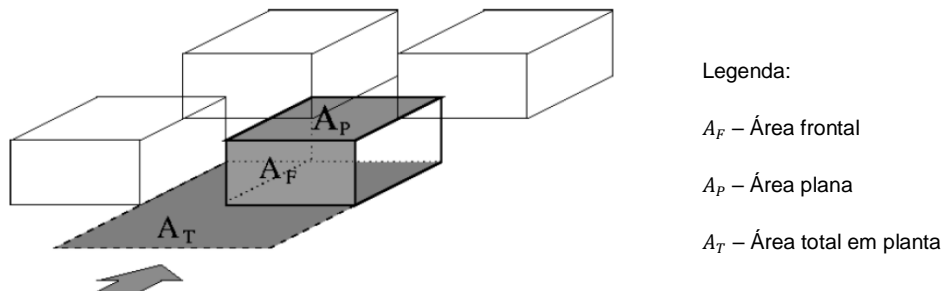


Figura 2.12 - Razão entre a área média das fachadas e a área total em planta (Marques da Silva, 2017).

Concluindo, para se ter a classificação do tipo de escoamento entre os edifícios, recorre-se as Equações 2.10 e 2.11 referentes à razão entre a área média das fachadas e a área total em planta e à razão entre a área média plana e a área total em planta, respectivamente.

$$\lambda_f = \frac{A_F}{A_T} \quad (2.10)$$

$$\lambda_p = \frac{A_P}{A_T} \quad (2.11)$$

A Tabela 2.2 traduz a classificação do tipo de escoamento em função dos quocientes acima descritos nas Equações 2.10 e 2.11.

Tabela 2.2 - Tipo de escoamento numa camada limite urbana (Marques da Silva, 2017).

Classificação dos tipos de escoamento				Representação gráfica dos tipos de escoamento
Isolado	$\lambda_p \leq 0,1$	$\lambda_f \leq 0,13$	$\frac{\Delta x}{h_r} > 15$	
Interferência	$0,1 < \lambda_p < 0,4$	$0,13 < \lambda_f < 0,25$	$4 < \frac{\Delta x}{h_r} < 15$	
Rasante	$\lambda_p > 0,4$	$\lambda_f > 0,25$	$\frac{\Delta x}{h_r} < 4$	

Em que Δx expressa a distância média entre edifícios e h_r traduz a altura média dos elementos de rugosidade.

A lei do tipo logarítmico considera que a velocidade média do vento é dependente de factores como, a velocidade de atrito U_u^* , definida segundo a Equação 2.12.

$$U_u^* = U_{ref}^* \times \left[1 + \frac{\ln\left(\frac{z_{0u}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_u}{z_{0u}}\right)} \right] \quad (2.12)$$

Onde, a velocidade de atrito do local de referência, U_{ref}^* , é dada pela Equação 2.13:

$$U_{ref}^* = \frac{KU_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right)} \quad (2.13)$$

Em z_{0ref} representa a altura equivalente da rugosidade do ponto de referência e depende de cada tipo de terreno. Para se definir a altura equivalente da rugosidade na zona urbana, z_{0u} , recorre-se à Equação 2.14:

$$z_{0u} = \frac{1}{2} \times \bar{h}_r \times \lambda_f \quad (2.14)$$

2.6.5 Perfil da Camada Limite Urbana

Segundo Simiu e Scanlan (1996), a Equação 2.15 traduz a estimativa da velocidade do vento num determinado local, numa zona urbana, à cota z :

$$U(z) = \frac{U_u^*}{k} \times \ln\left(\frac{z-d}{z_{0u}}\right) \quad (2.15)$$

A Equação 2.16 permite determinar a espessura da CLU, δ_u :

$$\delta_u = z_{0u} \times \left[0,65 - 0,03 \times \ln \left(\frac{z_{0u}}{z_0} \right) \right] \times \left(\frac{x}{z_{0u}} \right)^{0,8} \quad (2.16)$$

Em que x é a distância, na horizontal, entre o ponto de referência e o local onde se pretende estimar a velocidade do vento.

Por fim, é necessário determinar o deslocamento, d , em relação ao plano de referência, que pode ser compreendido como a cota do ponto a partir do qual se fazem sentir os efeitos do atrito no perfil do escoamento. Para zonas na subcamada de inércia, onde a relação entre a cota e a rugosidade do terreno não são elevadas, considera-se uma boa aproximação a Equação 2.17:

$$d = 0,7 \times \bar{h}_r \quad (2.17)$$

De acordo com, Marques da Silva (2017) o valor $0,7 \times \bar{h}_r$, é uma boa aproximação pois, em termos físicos, em superfícies cobertas por uma rugosidade densa, apenas uma parte do atrito superficial é transportado verticalmente e o perfil logarítmico inicia-se na cota onde se situa a tensão de atrito média do topo da rugosidade.

Já, no caso de se tratar de uma zona urbana, em que a densidade de edifícios seja significativa, recorre-se à Equação 2.18:

$$d = \bar{h}_r \times \left[1 - \frac{1 - e^{(-\sqrt{15 \times \lambda_f})}}{e^{(-\sqrt{15 \times \lambda_f})}} \right] \quad (2.18)$$

A Figura 2.13 traduz o que foi traduzido nas Equações 2.17 e 2.18.

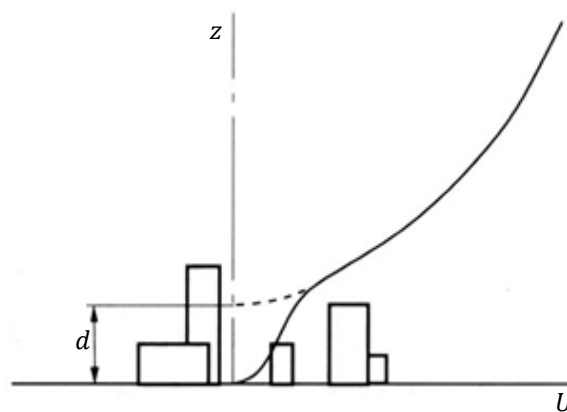


Figura 2.13 – Representação do perfil da camada limite urbana e do deslocamento d (Marques da Silva, 2017).

2.7 Processos de transferência de calor

A transferência de calor pode ser definida genericamente como a energia trocada entre regiões a diferentes temperaturas.

A distribuição de temperatura depende da distribuição de velocidade do fluido (Saelens, 2002).

A radiação solar absorvida pela parte opaca da janela é transmitida quer para o interior do edifício quer para a cavidade de ar existente entre os dois panos, por condução e convecção. A transmissão de calor por radiação de onda longa, a partir das superfícies opacas, é desprezada (Kalyanova, 2008). No âmbito da física de edifícios, é comum distinguir-se radiação de onda curta, designadamente radiação solar, de radiação de onda longa, isto é, radiação infravermelha (Gomes, 2010).

2.7.1 Condução

A condução ocorre entre elementos que estão em contacto físico directo. Na condução, a energia cinética dos átomos e moléculas é transferida por colisões entre átomos e moléculas vizinhas. O calor flui das temperaturas mais altas (maior energia cinética) para as temperaturas mais baixas (menor energia cinética). Como meio de transferência de calor, para a atmosfera, a condução é o menos significativo. Considerando o fluxo de calor numa dada direcção, este fenómeno pode ser descrito segundo a lei de Fourier, apresentada na Equação 2.19 (Gomes, 2010).

$$Q_{cond} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.19)$$

Em que Q_{cond} é o fluxo de calor (W) que atravessa a área A (m^2) perpendicular ao fluxo, $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura na direcção x e λ é um parâmetro de proporcionalidade designado por condutibilidade térmica do material (W/m.K).

2.7.2 Convecção

Este fenómeno consiste na transferência de calor dentro de um fluido através de movimentos do próprio. O calor acumulado na camada mais baixa da atmosfera, através de radiação ou condução é, geralmente, transferido por convecção. A convecção resulta da diferença na densidade da massa de ar. O ar quente é menos denso que o ar frio, isto implica que o ar frio desça proporcionando a subida do ar mais quente. O ar mais frio é então aquecido pela superfície e o processo é repetido. Globalmente, esta transferência de calor pode ser descrita pela lei de Newton, apresentada na Equação 2.20 (Gomes, 2010).

$$Q_{conv} = \int_A q_c(y) dA = \int_A h_c(y) (T_w - T_a) dA \quad (2.20)$$

Sendo $q_c(y)$ a densidade de fluxo de calor local por convecção (W/m^2) – que se admite não variar na largura da superfície (problema bidimensional) –, $h_c(y)$ a condutância térmica superficial local por convecção (W/m^2K), e T_w e T_a (K) a temperatura da superfície exposta do sólido e a temperatura característica do fluido, respectivamente. Q_{conv} é o fluxo de calor (em W) por convecção associado a uma dada área A (m^2) perpendicular ao fluxo.

2.7.3 Radiação

A radiação, em termos de transmissão de calor, consiste no transporte de energia por meio de ondas electromagnéticas. Como as ondas electromagnéticas se podem propagar no vácuo, não é necessário que haja contacto entre os corpos para haver transferência de calor. Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objecto irradia (Gomes, 2010). A radiação electromagnética é a principal fonte de energia, que fornece calor e luz (Poizaris, 2008).

2.8 Desempenho térmico de fachadas de dupla pele

O princípio de funcionamento de uma fachada ventilada é aproveitar o ar existente entre ambos os vidros para reduzir o impacto térmico do desempenho ambiental do edifício (Marques da Silva, 2005).

Em fachadas ventiladas, as temperaturas das superfícies interiores tendem a estar mais próximas da temperatura ambiente interior, do que em fachadas envidraçadas tradicionais. Esta característica é mais evidente durante o Verão, se houver dispositivos de sombreamento no interior do canal de ar. Este efeito permite reduzir o desconforto térmico causado pela transferência de calor através da radiação incidente (Faggembauu, 2006).

Nas fachadas de dupla pele, ventiladas com o ar exterior, a ruptura térmica ocorre no vidro interior e a temperatura da cavidade está relacionada com a temperatura exterior. No Inverno, dá-se o efeito de “tampão” sendo que isso permite reduzir as perdas de transmissão e o ar do canal pode ser usado como ar de ventilação pré-aquecido (Saelens, 2002). A adição de mais uma pele e, conseqüentemente um canal de ar entre os dois panos, permitindo a convecção natural, produz uma redução de perda de calor (o valor U, da fachada, é melhorado), é conseguido um isolamento térmico mais eficiente, possibilitando um melhor comportamento térmico do edifício. (Faggembauu, 2006).

Um comportamento térmico melhorado pode levar a uma redução do uso do sistema de ar condicionado e alcançar boas condições de conforto térmico (Marques da Silva, 2005).

O funcionamento das FDP varia consoante a sua tipologia, concretamente no tipo de ventilação aplicado. Apesar destas diferenças, o seu funcionamento base é praticamente idêntico. Está ilustrado na Figura 2.14 os processos termodinâmicos que envolvem uma fachada de dupla pele, onde a representação dos fluxos é proporcional à sua magnitude.

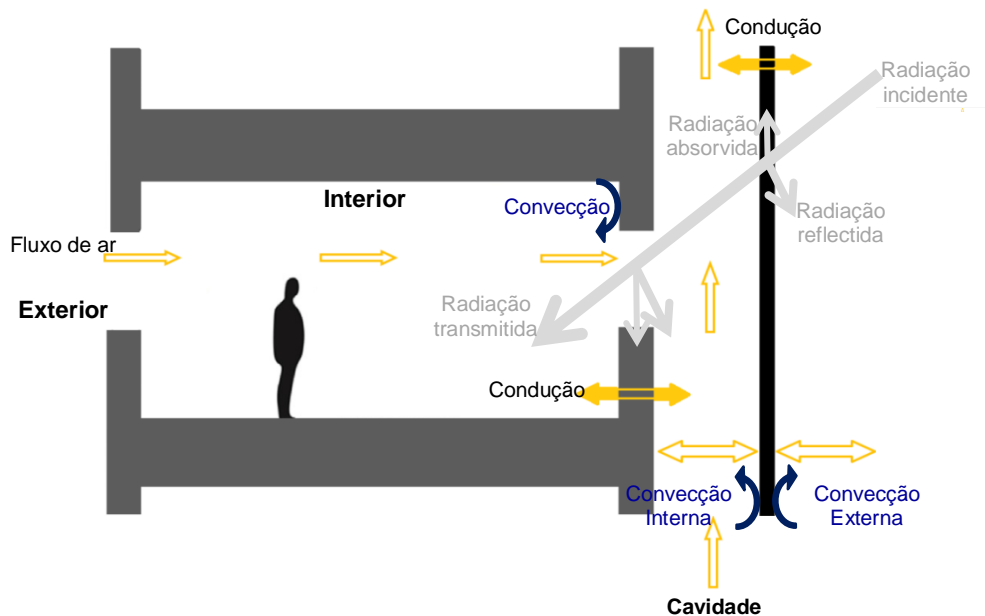


Figura 2.14 - Esquema genérico da transferência de radiação e fluxo de ar numa fachada de dupla pele (adaptado de Barbosa, 2015)

A radiação solar incidente é um dos elementos dinamizadores de todo o funcionamento da fachada, parte desta será absorvida, reflectida e transmitida, em cada um dos componentes da fachada: pano exterior, dispositivo de sombreamento e pano interior (Perino, 2008).

Em fachadas de dupla pele há uma parte da radiação solar que é directamente transmitida para o interior do edifício, de acordo com a transmissividade dos vidros, com uma redução considerável devido à presença do dispositivo de sombreamento, que se encontra entre os panos envidraçados. Outra parte da radiação solar é absorvida pelo vidro interior e pelo ar existente na cavidade (Baldinelli 2008).

Numa FDP que funcione com ventilação natural, a radiação solar conduz ao aumento da temperatura no interior da cavidade, fazendo com que o ar aí presente seja mais quente do que o do exterior. Ocorre, portanto, uma variação da densidade. O ar interior é mais leve que o do exterior e movimenta-se na cavidade, conduzindo à remoção do calor aí presente.

Relativamente a uma fachada de dupla pele que funcione com ventilação mecânica, a circulação do ar na cavidade é independente das condições exteriores, evitando alguns problemas, como por exemplo o sobreaquecimento. Contudo, o sistema de ventilação mecânica é, geralmente, accionado em função da temperatura e, portanto, de forma indirecta, das condições exteriores.

O funcionamento deste tipo de fachada determinará a optimização do sistema na sua generalidade. Isto é, nas estações quentes o sistema poderá funcionar como um dissipador de calor e como isolador durante o Inverno, permitindo menores consumos energéticos.

2.9 Funcionalidade: Vantagens e Desvantagens

Tradicionalmente, os edifícios correntes têm sido construídos de acordo com um sistema que não foi projectado para coexistir com o clima envolvente. No entanto, nos últimos anos, esta situação tem vindo a mudar e os edifícios já são projectados por forma a adaptar-se e beneficiar-se das condições climáticas locais (Kalyanova, 2008).

2.9.1 Acústica

De acordo com a maioria dos autores, a melhoria do isolamento sonoro a sons aéreos exteriores é uma das vantagens mais relevantes da FDP (Poirazis, 2008; Lee et al. 2002). O decréscimo dos níveis de ruído, num edifício de serviços, pode ser conseguido através da redução de transmissão de ruído interno bem como através da transmissão de ruído a partir de fontes exteriores, como é o caso do tráfego (Poizaris, 2004).

Segundo Saelens (2002) o sistema de fachada dupla pele pode tornar-se uma fonte de ruído perturbadora. Obstáculos ou um mau aprovisionamento do seu projecto, em relação à entrada e saída do ar, podem causar um nível de ruído significativo. O caso de uma fixação inadequada do dispositivo de sombreamento ou o facto de a taxa de fluxo de ar ser elevada, podem induzir ruídos.

2.9.2 Ventilação

Uma vantagem é a possibilidade de ventilação natural do edifício tirando partido do canal entre ambos os panos de vidro, permitindo que o ar interno seja renovado. Esta implementação permite a abertura de janelas interiores, mesmo em edifícios altos, devido à redução da pressão do vento conseguida pela pele adicional (Faggembauu, 2006). Se for bem projectado, a ventilação natural pode levar à redução do consumo de energia (Poizaris, 2004).

Possibilidade de ventilação nocturna (Faggembauu, 2006). Durante as noites quentes há possibilidade de que o espaço entre os dois panos de vidro seja facilmente sobreaquecido. Neste caso, poderá aproveitar-se a energia acumulada para arrefecer as salas durante a noite tirando partido da ventilação natural. Desta forma, as temperaturas internas serão menores, principalmente durante o início da manhã, proporcionando uma qualidade de ar melhorada. Simultaneamente, a ventilação natural nocturna pode afectar o armazenamento de calor nos materiais que constituem o edifício (Poizaris, 2004). O conforto térmico no interior do edifício aumenta, devido à ventilação natural.

Há uma possível redução do espaço habitado, pois a profundidade da cavidade de ar poderá corresponder a um intervalo de 0,1 a 2m. Este facto representa, portanto, uma redução da área útil disponível. Contudo, este efeito poderá ter, em contrapartida, o incremento de áreas internas com melhores condições de conforto e, desta forma, a dupla pele permite a utilização das áreas adjacentes à fachada, uma vez que as temperaturas estão mais próximas da temperatura ambiente (Faggembauu, 2006).

2.9.3 Higrotérmica

A FDP pode melhorar, também, a percepção de conforto, pois também a temperatura de superfície do vidro aumenta (Kalyanova, 2008). Uma vez que, durante o período de aquecimento, o ar dentro do espaço entre os dois panos é mais quente, comparativamente à temperatura exterior, a parte interior da fachada pode manter temperaturas mais próximas do que se entende como conforto térmico. Por outro lado, durante o Verão é realmente importante que o sistema esteja bem concebido para que as temperaturas, no espaço entre os panos, não aumente excessivamente. É, então, fundamental que a combinação entre o tipo de fachada e a geometria seja adequada, isto é, o aprovisionamento correcto de aberturas bem como o tipo e posicionamento de dispositivos de sombreamento garantem melhores resultados para cada edifício consoante o clima onde está inserido (Poizaris, 2004).

Caso o sistema de fachada de dupla pele não estiver convenientemente concebido, é possível que a temperatura do ar, no canal entre os dois vidros, aumente consideravelmente até sobreaquecer o espaço interior (Poizaris, 2004). De acordo com o referido, é fundamental que sejam cumpridas a distância mínima entre o pano interno e externo e a dimensão mínima das aberturas de ventilação, por forma a evitar o sobreaquecimento.

2.9.4 Iluminação natural

A camada de vidro adicional poderá limitar a quantidade de luz solar transmitida ao interior do edifício, durante o dia (Kalyanova, 2008).

2.9.5 Risco de Incêndio

De acordo com Poizaris (2004), não existem ainda informações muito concretas que justifiquem se este sistema de FDP é positivo ou não relativamente à protecção contra incêndio.

O controlo da propagação da chama ao longo do edifício depende da tipologia da FDP adoptada (Saelens, 2002).

De acordo com a autora Kalyanova (2008), a camada exterior de vidro pode reduzir a capacidade de ventilação do fumo e o espaço de ar entre os dois panos pode aumentar a propagação do fogo entre pisos ou divisões interiores do edifício. Esta teoria é semelhante à defendida por Saelens (2002) que acredita que o controlo da propagação das chamas ao longo do edifício depende da tipologia da fachada adoptada.

Certas tipologias do sistema de FDP apresentam algumas lacunas na protecção contra incêndio, a compartimentação corta-fogo, isto é, a implementação de zonas independentes separadas por elementos com características de resistência ao fogo com características capazes de atrasar a propagação do mesmo. Uma das tipologias mais problemáticas neste âmbito será a tipologia multi-piso, pois sem compartimentação vertical nem horizontal, apresenta dificuldades acrescidas no que toca a evitar a propagação do incêndio entre pisos. Em consequência dessa particularidade que caracteriza a tipologia multi-piso, também a intervenção dos bombeiros e a evacuação do edifício

poderão ser dificultadas pela presença da FDP. Contudo, esta questão pode ser ultrapassada com a implementação de aberturas na fachada próprias para este fim (Gomes, 2010).

Existe também o risco dos envidraçados ou dos seus sistemas de fixação ruírem, ameaçando não só o bem-estar dos transeuntes bem como o bom funcionamento dos serviços de emergência e bombeiros (Gomes, 2010).

Deve ser dada especial atenção às FDP que se estendem por vários pisos. À medida que os compartimentos de incêndio são atravessados, é agravado o risco de propagação de fogo e fumo. Devem ser adoptadas medidas preventivas tais como: aprovisionar a saída do fumo pelo topo da cavidade, sistemas de aspersão, injeção de gases de extinção de incêndio (como usado no edifício Brussimmo, em Bruxelas (Saelens, 2002).

2.9.6 Energia

Em princípio, as fachadas de dupla pele podem economizar energia quando correctamente aprovisionadas. Muitas vezes, quando o isolamento convencional da parede exterior é pobre, a poupança que pode ser obtida com a adição da segunda pele pode resultar em valores razoáveis (Poizaris, 2008).

Com este tipo de sistema tem-se a possibilidade de posicionar e controlar os dispositivos de sombreamento e facilidade de reduzir o número de horas de trabalho do sistema AVAC.

2.9.7 Estética

A transparência da fachada permite que o exterior se expanda até ao interior do edifício, promovendo uma ligação entre ambos os ambientes. A comunicação entre estes dois ambientes é alcançada de uma forma natural, através de elementos envidraçados e é um factor bastante apreciado, não só pelos projectistas mas também pelos utilizadores dos edifícios. A esta tecnologia está associada um design moderno transmitindo uma ideia de prestígio, devido à presença de materiais sumptuosos, como é o caso do vidro. Contudo, nem sempre a aceitação deste tipo de edifícios é conseguida, pois o conflito de interesses debate-se, também, com a redução da privacidade que pode implicar a rejeição desta solução (Gomes, 2010). As fachadas de dupla pele proporcionam um conceito arquitectónico atractivo, com impactos ambientais reduzidos e um alto grau de iluminação natural.

Esta tecnologia é caracterizada pelo seu dinamismo, conferido pela disposição dos dispositivos de sombreamento, isto porque podem estar ou totalmente descidos ou subidos, conter lâminas abertas ou fechadas e são adaptáveis consoante a estação do ano, hora do dia e tipo de ocupação (Gomes, 2010).

2.9.8 Custos

Segundo Poizaris (2008), os custos de construção são mais elevados comparativamente a uma fachada tradicional. O mesmo se verifica, em comparação com outras soluções que se caracterizam

por ser resultado da aplicação de outras tecnologias (Poizaris, 2004). Por estas tecnologias entenda-se vidros electrocromáticos e fotocromáticos, que adaptam as suas características em função das condições ambientais. Todos estes desenvolvimentos são promissores, mas ainda demorará algum tempo para que sejam soluções económicas a aplicar na construção de edifícios (Dickson, 2004).

No âmbito da protecção de dispositivos de sombreamento, com este tipo de sistema de FDP, verifica-se que, por estarem dentro da cavidade de ar entre os ambos os panos, estão mais preservados das intempéries (Poizaris, 2008). Com isto, estes dispositivos têm uma vida mais duradoura e não é necessário prevenir um gasto económico na remoção e substituição dos mesmos a curto prazo.

Relativamente aos custos operacionais, devido à necessidade de tarefas de manutenção, quer seja por via de limpeza das cavidades, quer seja em juntas, aberturas ou filtros. É inevitável que sejam realizadas essas tarefas de limpeza, pois o fenómeno da condensação na superfície do painel exterior é incontornável. Esta manobra de manutenção reflecte-se em custos adicionais. Para além dos custos de manutenção referidos, a existência de uma fachada de dupla pele, geralmente com vidro de características especiais, resulta em custos de investimento e construção mais elevados.

3. Caso de Estudo

Esta dissertação terá como elemento de estudo o Edifício H – representado na Figura 3.1 -, do empreendimento do Office Park Expo – Parque das Nações.



Figura 3.1 – Fotografias do Edifício H.

O Edifício H situa-se na zona sudeste de Lisboa, entre a Avenida D. João II e a Alameda dos Oceanos. Faz parte de um complexo de serviços composto por 10 edifícios que ocupam uma área de cerca de 30000 m², desenvolvido pela Norfin (Norfin, 2012), tendo sido distinguido com vários prémios imobiliários e de investimento. É um edifício de serviços, que foi arquitectado tendo em linha de conta o seu desempenho energético, com base na legislação em vigor em Portugal (Ministério da Economia e Inovação 4 de Abril de 2006).

Este edifício tem toda a envolvente envidraçada, tendo sido desenvolvida para otimizar os consumos energéticos relativos à climatização.

Neste capítulo será feita uma descrição dos aspectos relevantes do objecto de estudo, com base em documentos elaborados pela empresa que projectou as fachadas do edifício (FACAL, 2006), tais como a sua localização, geometria e características técnicas.

3.1 Descrição e caracterização do caso de estudo

Com o trabalho apresentado neste documento pretendeu-se analisar o funcionamento de uma FDP, mais concretamente o seu comportamento térmico, beneficiando da existência de dados de funcionamento obtidos em campanhas de monitorização realizadas anteriormente.

Foram realizadas, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST) em conjunto, quatro campanhas de monitorização no Edifício H do Office Park Expo, com o objectivo de aprofundar o conhecimento sobre as FDP no clima português. Como referido

anteriormente, a edificação em estudo está localizada em Lisboa, no Parque das Nações, fazendo parte do complexo da Direcção Geral da Administração da Justiça. Foram estudadas várias variáveis, ao longo de diferentes períodos do ano, nos pisos 15 e 16 do edifício.

O edifício em causa apresenta uma planta que forma um duplo rectângulo, com fachadas contínuas, criando duas grandes zonas orientadas a SE e a NO. Esta planta encontra-se ilustrada na Figura 3.2.

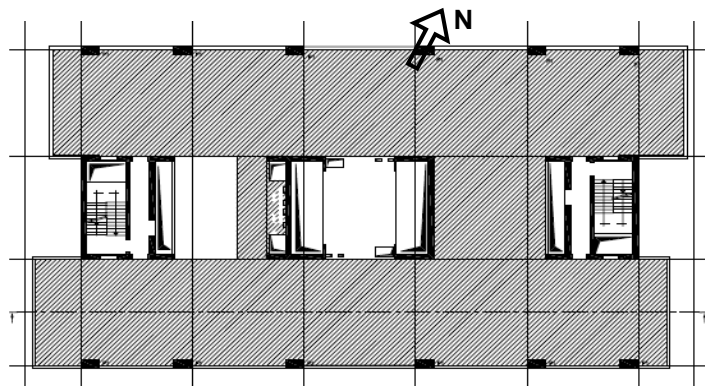


Figura 3.2 – Planta geral do edifício monitorado (FACAL, 2006).

A fachada de dupla pele, Figura 3.3, concebida para este edifício pela FACAL, Engenharia de Fachadas, caracteriza-se, de acordo com os critérios de classificação do Annex 44 da Agência Internacional de Engenharia, por ventilação natural cuja circulação de ar é pelo exterior e a forma de partição é do tipo multi-piso.

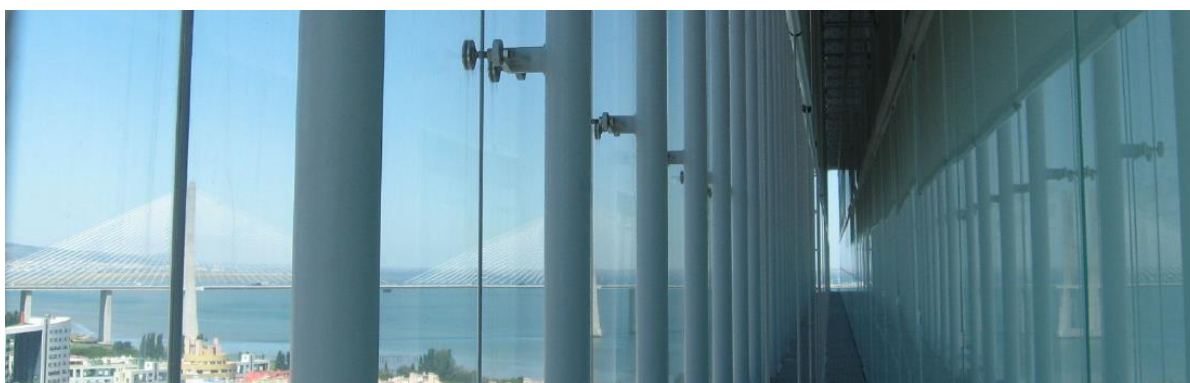


Figura 3.3 – Fotografia representativa dos dois panos e vista do canal (Gomes, 2010).

A fachada foi concebida para que a ventilação decorra em módulos com dois pisos, beneficiando assim de uma altura adequada. As grelhas de admissão e exaustão do ar da ventilação da fachada são constituídas por quatro lâminas inclinadas e dispostas ao longo da fachada, de modo alternado, evitando que o ar exaurido num dado piso seja admitido no piso imediatamente superior, este sistema descrito está ilustrado na Figura 3.4.

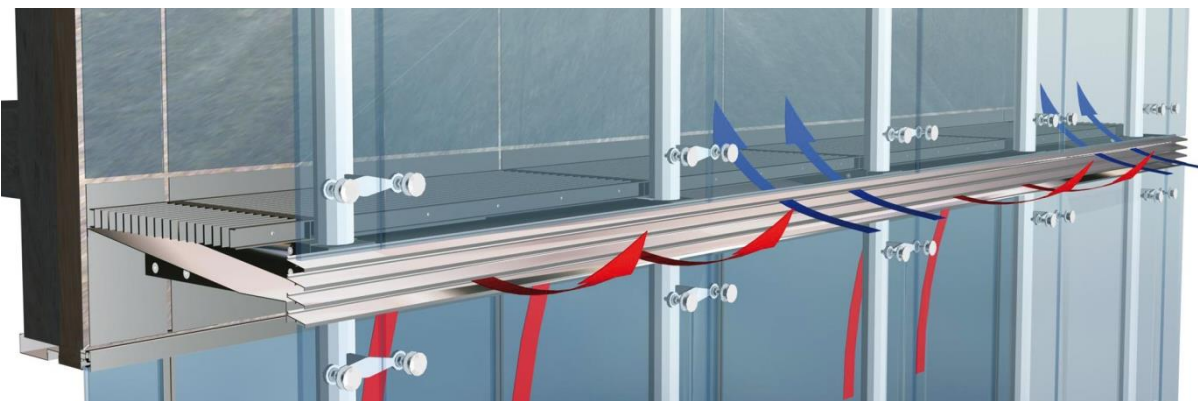


Figura 3.4 – Esquema de admissão/exaustão do ar de ventilação da FDP (FACAL, 2017).

A fachada é constituída – do exterior para o interior – por um vidro exterior, uma caixa-de-ar com o respectivo dispositivo de sombreamento e vidro duplo interior. Este último pano não é totalmente envidraçado, pois existe um murete opaco com isolamento térmico.

Cada secção da FDP é, portanto, composta por dois pisos, existindo passadiços de acesso ao nível de cada piso (um na base e outro na divisória dos dois pisos), constituídos por um gradil metálico de grande porosidade, que se estendem por todo o comprimento do edifício. Existe também uma coluna metálica que suporta o vidro exterior e que percorre toda a altura da fachada. Nesses dois pisos, existem ainda grelhas de entrada e saída de ar em cada extremidade da fachada. A ilustração da configuração da fachada é apresentada na Figura 3.5:

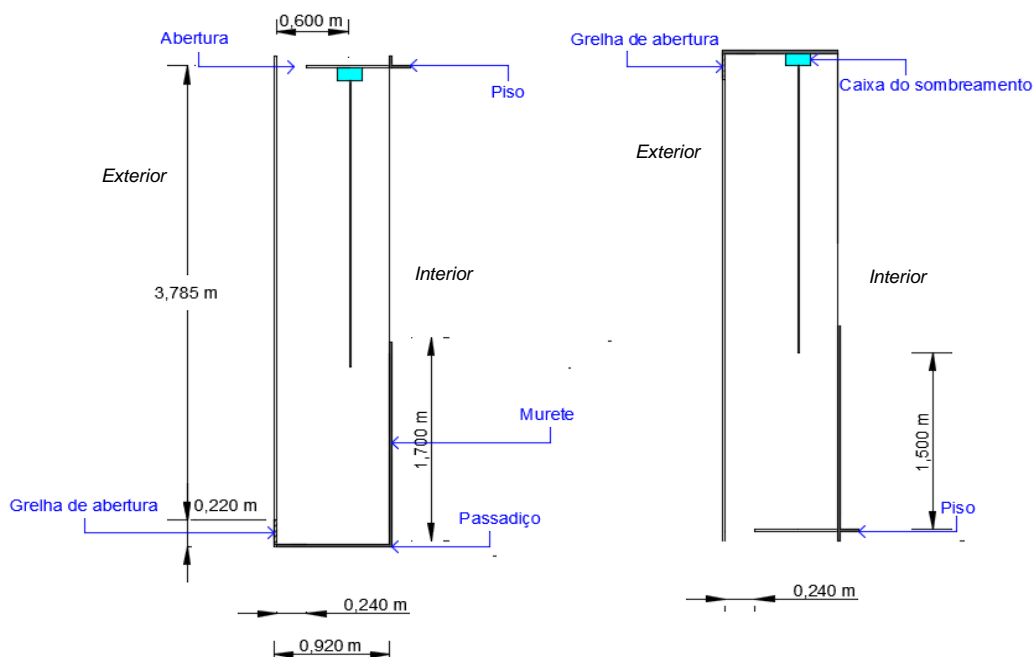


Figura 3.5 - Ilustração do perfil da fachada (à esquerda: piso 15; à direita: piso 16).

O dispositivo de sombreamento colocado entre ambos os panos envidraçados é do tipo cortina *Rollerblind* de cor clara, comandado numa primeira fase, através de sensores colocados na

cobertura, sendo que os sombreamentos da fachada de SO são descidos um pouco antes das 12:00h e os da fachada de NO às 15:00h. Numa segunda fase o comando tornou-se manual, por sectores.

O pano interior da fachada caracteriza-se por ser opaco e estar à cota do pavimento de cada piso, correspondendo a cerca de 1,20 m. É composto por um vidro translúcido, isolamento térmico e alvenaria interior. Trata-se de uma superfície envidraçada de vidro duplo com película de baixa emissividade.

A modelação de um sistema de fachada de dupla pele depende de fenómenos diversos, nomeadamente dos mecanismos de transferência de calor e de massa e da radiação solar. Estes fenómenos ocorrem em simultâneo e encontram-se interligados dinamicamente (Gomes, 2010).

3.2 Dados do Vento

Os dados relativos à velocidade do vento provêm das campanhas de monitorização. Estes dados estão disponíveis para as quatro estações do ano, tendo sido seleccionados quatro dias por estação, com várias medições ao longo do dia.

Os valores da velocidade e direcção do vento foram obtidos a partir do anemómetro situado no Cabeço das Rolas a uma cota de aproximadamente 10 m acima do solo, a cerca de 1400 m a Sul do Edifício H, a localização deste aparelho encontra-se representado na Figura 3.6.

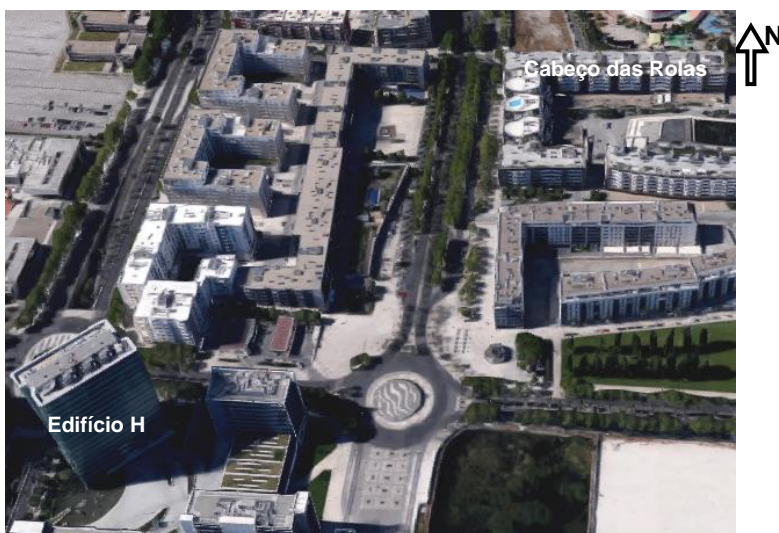


Figura 3.6 – Localização e respectiva orientação do edifício H e do anemómetro do Cabeço das Rolas (adaptado de Google Images)

3.2.1 Correção da velocidade do vento

Devido à distância da torre anemométrica ao edifício e às diferentes rugosidades características da topografia do terreno local, foi necessário realizar uma correção dos dados recolhidos referentes à

velocidade do vento. Nesta correcção recorreu-se às definições da Camada Limite Atmosférica e Urbana e às equações que descrevem o perfil da velocidade do vento, descritas no Capítulo 2.

O vento incidente nas fachadas tem influência nos caudais de ventilação e, conseqüentemente, nas temperaturas registadas na fachada.

Estas velocidades devem ser corrigidas para a cota da fachada em análise (~80 m), tendo em conta a rugosidade imposta pela ocupação do solo, na direcção do vento incidente.

3.2.1.1 Características locais

As zonas que englobam a área que compreende a torre anemométrica e o edifício em estudo, de N – E a S, podem ser classificadas como pertencentes à Zona III, tomando um valor de $z_0 = 0,30$ m. Em relação à zona em que se insere o rio Tejo, admitiu-se que pertence à categoria I e, como tal, $z_0 = 0,005$ m. Estes parâmetros estão conforme tabelados no EC1, ANEXO 1.

Na Tabela 3.1 estão sintetizados os dados considerados comuns a todas as situações, quer seja vento de Norte quer se trate de vento de Sul.

Tabela 3.1 - Dados gerais considerados na correcção da velocidade do vento

Parâmetro		Valor
Cota do ponto onde se pretende estimar a velocidade do vento	z	80,00 m
Cota do ponto onde se obteve os valores da velocidade do vento – torre anemométrica	z	10,00 m
Distância, na horizontal, entre o ponto de referência e o local onde se pretende estimar a velocidade do vento	x	1400,00 m
Tipo de escoamento urbano de interferência	λ_f	0,25
Constante de Von Kármán	K	0,40

a) Direcção Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste

Este estudo debruçou-se sobre dados recolhidos em campanhas já realizadas, acerca de dois pisos do edifício em causa, o 15º e 16º.

Nestes intervalos o escoamento encontra-se completamente desenvolvido sobre a cidade no caso do quadrante Noroeste-Sudoeste (NO-SO) e sobre o rio no caso do quadrante Nordeste-Sudeste (NE-

SE). É, portanto, razoável admitir que o escoamento que atinge o edifício é idêntico ao que chega à estação anemométrica. Assim, utilizam-se os valores recolhidos na torre anemométrica e recorre-se à lei logarítmica, enunciada no Capítulo 2, para estimar a velocidade à cota pretendida, estando os parâmetros relevantes resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de NO a SO e NE a SE

Parâmetro	NO-SO	NE-SE
Cota do local onde foi registado valor de velocidade - torre anemométrica	$\bar{h}_r = 10,00 \text{ m}$	
Altura média da camada de cobertura da CCU	Cidade	Rio
	$\bar{h}_r = 10,00 \text{ m}$	$\bar{h}_r = 00,00 \text{ m}$
Altura do deslocamento	Cidade	Rio
	$d = 0,70 \times 10,00 = 7,00 \text{ m}$	$d = 0,00 \text{ m}$
Altura do deslocamento para a zona da torre anemométrica	$d = 0,70 \times 10,00 = 7,00 \text{ m}$	
Altura equivalente da rugosidade do local de referência- torre anemométrica	$z_{ref} = z - d = 10,00 - 7,00$ $= 3,00 \text{ m}$	$z_{ref} = z - d = 10,00 - 0,00 =$ $10,00 \text{ m}$
Altura equivalente da rugosidade referente	Cidade	Rio
	$z_0 = 0,70 \text{ m}$	$z_0 = 0,005 \text{ m}$
Espessura da camada limite referente à zona da torre anemométrica	$\delta = 0,70 \times \left[0,65 - 0,03 \ln \left(\frac{0,7}{0,30} \right) \right]$ $\times \left(\frac{1400}{0,7} \right)^{0,8}$ $= 191,21 \text{ m}$	$\delta = 0,005 \times \left[0,65 - \right.$ $\left. 0,03 \ln \left(\frac{0,005}{0,30} \right) \right] \times \left(\frac{1400}{0,005} \right)^{0,8} =$ $88,06 \text{ m}$
Velocidade de atrito na zona da torre anemométrica	$U_{ref}^* = \frac{0,40 \times U_{ref}}{\ln \left(\frac{3,00}{0,30} \right)}$	$U_{ref}^* = \frac{0,40 \times U_{ref}}{\ln \left(\frac{10,00}{0,30} \right)}$
Velocidade de atrito na zona do edifício	$U_u^* = U_{ref}^* \times \left[1 + \frac{\ln \left(\frac{0,70}{0,30} \right)}{\ln \left(\frac{191,21}{0,70} \right)} \right]$	$U_u^* = U_{ref}^* \times \left[1 + \frac{\ln \left(\frac{0,005}{0,30} \right)}{\ln \left(\frac{88,06}{0,005} \right)} \right]$
Velocidade do vento à cota $z =$ $80,00 \text{ m}$	$U(z) = \frac{U_u^*}{0,40} \times \ln \left(\frac{80,00 - 7,00}{0,70} \right)$	$U(z)$ $= \frac{U_u^*}{0,40} \times \ln \left(\frac{80,00 - 0,00}{0,005} \right)$

b) Direcção Sul

Na situação em que o vento sopra do quadrante Sul, compreendido entre $[150^\circ; 200^\circ]$, o escoamento desenvolve-se no sentido da torre anemométrica para o edifício H. Os valores de velocidade são corrigidos, para a altura pretendida, através da aplicação da lei logarítmica aos dois locais.

Para além dos dados considerados na Tabela 3.1, foram tidos em conta os valores apresentados na Tabela 3.3 para que se pudesse corrigir os valores da velocidade do vento com direcção Sul.

De salientar que, quando o vento sopra de Sul, ao longo do seu percurso, a altura média dos edifícios é de 30,00 m.

Tabela 3.3 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de Sul

Parâmetro	Valor
Altura média da camada de cobertura da CCU na zona do edifício	$\bar{h}_r = 30,00 \text{ m}$
Altura média da camada de cobertura da CCU na zona da torre anemométrica	$\bar{h}_r = 10,00 \text{ m}$
Altura do deslocamento para a zona da torre anemométrica	$d = 0,70 \times 10,00 = 7,00 \text{ m}$
Altura do deslocamento para a zona do edifício	$d = 30 \times \left[1 - \frac{1 - e^{(-\sqrt{15} \times 0,25)}}{e^{(-\sqrt{15} \times 0,25)}} \right] = 16,70 \text{ m}$
Cota do local onde foi registado valor de velocidade - torre anemométrica	$z_{ref} = z - d = 10,00 - 7,00 = 3,00 \text{ m}$
Altura equivalente da rugosidade do local de referência - torre anemométrica	$z_{0ref} = 0,70 \text{ m}$
Altura equivalente da rugosidade referente à zona urbana - zona do edifício	$z_{0u} = \frac{1}{2} \times 30,00 \times 0,25 = 3,80 \text{ m}$
Espessura da camada limite referente à zona urbana - zona do edifício	$\delta_u = 3,80 \times \left[0,65 - 0,03 \ln \left(\frac{3,80}{0,30} \right) \right] \times \left(\frac{1400}{3,80} \right)^{0,8} = 245,92 \text{ m}$
Velocidade de atrito do local de referência	$U_{ref}^* = \frac{0,40 \times U_{ref}}{\ln \left(\frac{10,00 - 7,00}{0,30} \right)}$
Velocidade de atrito	$U_u^* = U_{ref}^* \times \left[1 + \frac{\ln \left(\frac{3,80}{0,30} \right)}{\ln \left(\frac{245,92}{3,80} \right)} \right]$
Velocidade do vento à cota $z = 80,00 \text{ m}$	$U(z) = \frac{U_u^*}{0,40} \times \ln \left(\frac{80,00 - 16,70}{3,80} \right)$

c) Direcção Norte

No caso de o vento soprar de Norte, quadrante que está compreendido entre $[330^\circ; 45^\circ]$, a torre anemométrica está a sotavento do edifício H, isto é, o percurso do vento é inverso ao da direcção Sul tomando o sentido do edifício para a torre. Posto isto, a velocidade de atrito relativa ao edifício H será calculada de forma inversa ao enunciado no Capítulo 2, Equação 3.12.

Com o vento a soprar de Norte, o escoamento desenvolve-se sobre uma urbanização de menor altura, edifícios com altura média de 10,00 m, antes de atingir o edifício em causa, edifício H. Para corrigir a velocidade do vento com a direcção Norte, assumiram-se os dados expostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados considerados para corrigir a velocidade do vento de Norte

Parâmetro	Valor
Altura do deslocamento para a zona da torre anemométrica	$d = 0,70 \times 10,00 = 7,00 \text{ m}$
Altura média da camada de cobertura da CCU considerada na zona antes de chegar ao edifício H	$h_r = 10,00 \text{ m}$
Altura do deslocamento para o escoamento de aproximação	$d = 0,7 \times 10 = 7,00 \text{ m}$
Cota do local onde foi registado valor de velocidade - torre anemométrica	$z_{ref} = z - d = 10,00 - 7,00 = 3,00 \text{ m}$
Altura equivalente da rugosidade do local de referência - torre anemométrica	$z_{0ref} = 0,70 \text{ m}$
Espessura da camada limite referente à zona da torre anemométrica	$\delta_u = 0,30 \times \left[0,65 - 0,03 \ln \left(\frac{0,30}{0,70} \right) \right] \times \left(\frac{1400}{0,30} \right)^{0,8}$ $= 174,54 \text{ m}$
Velocidade de atrito na zona da torre anemométrica	$U_{ref}^* = \frac{0,40 \times U_{ref}}{\ln \left(\frac{10,00 - 7,00}{0,30} \right)}$
Velocidade de atrito na zona do edifício	$U_u^* = \frac{U_{ref}^*}{\left[1 + \frac{\ln \left(\frac{0,30}{0,70} \right)}{\ln \left(\frac{174,54}{0,30} \right)} \right]}$
Velocidade do vento à cota $z = 80,00 \text{ m}$	$U(z) = \frac{U_u^*}{0,40} \times \ln \left(\frac{80,00 - 7,00}{1,00} \right)$

3.2.2 Cálculo e correcção dos ângulos de incidência do vento

Após a correcção dos valores da velocidade do vento para o local do edifício, é necessário ajustar os ângulos de incidência para a fachada em causa. Deverá ter-se em consideração a orientação do edifício, pois este parâmetro é um dos influenciadores dos coeficientes de pressão. A fim de se recorrer à distribuição espacial dos valores de coeficientes de pressão do vento (Orme, Liddament, e Wilson, 1998) Anexo 2. Para se fazer o cálculo dos ângulos de incidência do vento, em relação a Norte, considerou-se que a normal à fachada SSE do edifício representa a incidência 0° , como está apresentado no Anexo 2.

Desta forma, admitiram-se as Equações 3.1 e 3.2 para corrigir os ângulos de incidência do vento, respectivamente em relação ao quadrante $[0^\circ; 140^\circ]$ e ao $[140^\circ; 360^\circ]$:

$$\varphi' = \theta_{fachada} - \varphi \quad (3.1)$$

Em que: $\varphi \in [0^\circ; 140^\circ]$

$$\varphi' = \theta_{fachada} + (360^\circ - \varphi) \quad (3.2)$$

Sendo que: $\varphi \in [140^\circ; 360^\circ]$

Onde, $\theta_{fachada} = 140^\circ$ é o ângulo entre o Norte e a normal da fachada, φ' o ângulo corrigido e φ o ângulo de incidência do vento na torre anemométrica.

3.2.3 Correção dos coeficientes de pressão

Como referido no ponto 3.2.2, para a obtenção de valores de referência para o parâmetro c_p , recorreu-se à distribuição espacial dos valores de coeficientes de pressão do vento, desenvolvidos por Orme, Liddament, e Wilson (1998), sendo posteriormente ajustados à fachada em estudo. A Tabela 3.5 resume os dados considerados para tornar possível a consulta à referida distribuição dos coeficientes de pressão, c_p .

Tabela 3.5 - Dados do edifício para ajuste dos valores do coeficiente de pressão

Parâmetro	Valor
Altura do edifício	74,50 m
Altura da base do piso 15	58,50 m
Altura da base do piso 16	66,30 m

Os valores de referência encontram-se divididos por incidências do vento, com um intervalo de 45° . No caso de os dados utilizados para a velocidade do vento (valores reais obtidos na torre anemométrica) compreendem o intervalo entre $[0^\circ; 360^\circ]$, pelo que foi necessário estimar coeficientes de pressão para além dos intervalos de 45° , isto é, será feita uma estimativa para os ângulos intermédios.

Após terem sido feitas as considerações já enunciadas, um exemplo das referidas interpolações está graficamente ilustrado na Figura 3.7. Estas interpolações permitem que se obtenha os valores dos coeficientes de pressão para os ângulos intermédios de incidência do vento que não são considerados na distribuição espacial (Orme, Liddament, e Wilson, 1998).

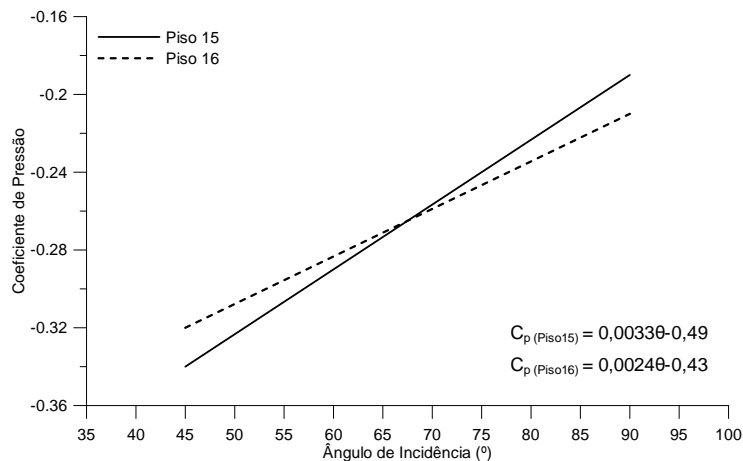


Figura 3.7 – Representação gráfica das interpolações lineares para a estimativa dos coeficientes de pressão - c_p .

Estas interpolações são úteis, mas por vezes os resultados obtidos não são os correctos, isto porque não consideram o fenómeno de separação do escoamento e a possível formação de zonas de recirculação de ar. As interpolações só fazem sentido, para as zonas positivas, quando não há separação de escoamento. É necessário considerar este facto para que se possa admitir correctamente quais os coeficientes de pressão que correspondem à realidade do escoamento do ar.

O vento origina um escoamento de ar à volta do edifício que resulta em zonas da envolvente com pressão estática superior à pressão atmosférica, bem como a outras zonas com pressão estática inferior à atmosférica. As primeiras ocorrem nas zonas expostas directamente à incidência do vento (barlavento), enquanto que as últimas surgem nas zonas da envolvente do lado oposto ao da direcção do vento (sotavento). Também podem ocorrer nas coberturas planas ou de fraca inclinação, onde surgem zonas de recirculação, devido à separação do escoamento (Pinto, 2005). O escoamento que contorna o edifício sofre o efeito de separação, devido aos gradientes de pressão contrários que encontra nas arestas, gerando zonas de recirculação que cobrem as fachadas laterais e a cobertura, e se estendem para jusante formando uma esteira (Marques da Silva, 2013).

Desta forma, foi tido em conta, em qualquer incidência do vento a formação de zonas de separação do escoamento, pois vão influenciar a forma como o ar se comporta ao longo da fachada. De acordo com Simiu, e Scanlan (1996), em edifícios com secção em planta rectangular (caso do elemento em estudo), além de se dar inicialmente o fenómeno de separação nas arestas frontais, ocorre posteriormente uma nova aderência e o recolamento do escoamento à superfície do elemento em causa. A Figura 3.8 ilustra o referido.

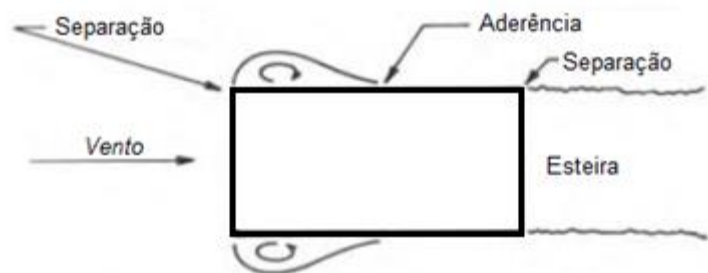


Figura 3.8 – Esquema de separação do escoamento numa secção em planta rectangular (adaptado de Simiu, e Scanlan, 1996)

Consequentemente, considerou-se que o valor de c_p seria constante em determinados intervalos de incidência, pois nestas condições são criadas zonas de recirculação de ar, dependendo da direcção do vento. Assim sendo, numa zona de recirculação de ar, assume-se que o coeficiente c_p é controlado pela separação do escoamento as arestas do edifício. Quando se trata de zonas de separação muito fortes, como o caso de esquinas, o valor de c_p não muda, tendo essa zona de separação uma pressão negativa e uniforme.

Os ângulos indicados são relativos à fachada, onde 0° corresponde à componente normal à superfície, como mostra a Figura 3.9 a).

Foram adoptados valores equivalentes de incidência, considerados para posterior determinação do coeficiente de pressão, tendo em conta a posição e geometria do edifício. Como já foi referido, o valor de c_p equivalente foi assumido considerando que, nessas zonas, o coeficiente de pressão c_p é controlado pela separação do escoamento.

Quando a incidência do vento é de 180° , (no referencial do edifício), não há separação do escoamento na fachada NO e o valor de c_p é positivo nessa fachada, mas em todas as outras o escoamento está separado e o c_p é negativo, como ilustra a Figura 3.9 b). Recorrendo à distribuição de valores de c_p (Orme, Liddament, e Wilson, 1998), a fachada NO corresponde ao tabelado para 0° e as outras fachadas são coincidentes com as restantes posições. Caso a incidência seja de 135° , Figura 3.9 c), a fachada NO, bem como a fachada NE, assume um valor de c_p positivo e nas restantes c_p é negativo, com o escoamento separado. Neste caso, há a particularidade de, na fachada NO, o escoamento recolar, pois trata-se de uma fachada comprida. Sendo que a fachada é comprida, o escoamento quando separa, pode recolar. Junto de onde se dá a incidência os coeficientes são maiores e gradualmente, ao longo da fachada, vão tendendo para zero à medida que vai escoando.

Para aplicar a distribuição de c_p (Orme, Liddament, e Wilson, 1998), admite-se que a incidência de 135° corresponde à de 45° da Tabela. Assumindo vento de SO com direcção de 292° , que incidirá maioritariamente na fachada SE, os coeficientes de pressão aproximar-se-ão mais dos valores assumidos para 270° , do que os que foram estimados para 315° , pois o escoamento é separado nos pontos A e B, como se verifica na Figura 3.9 d).

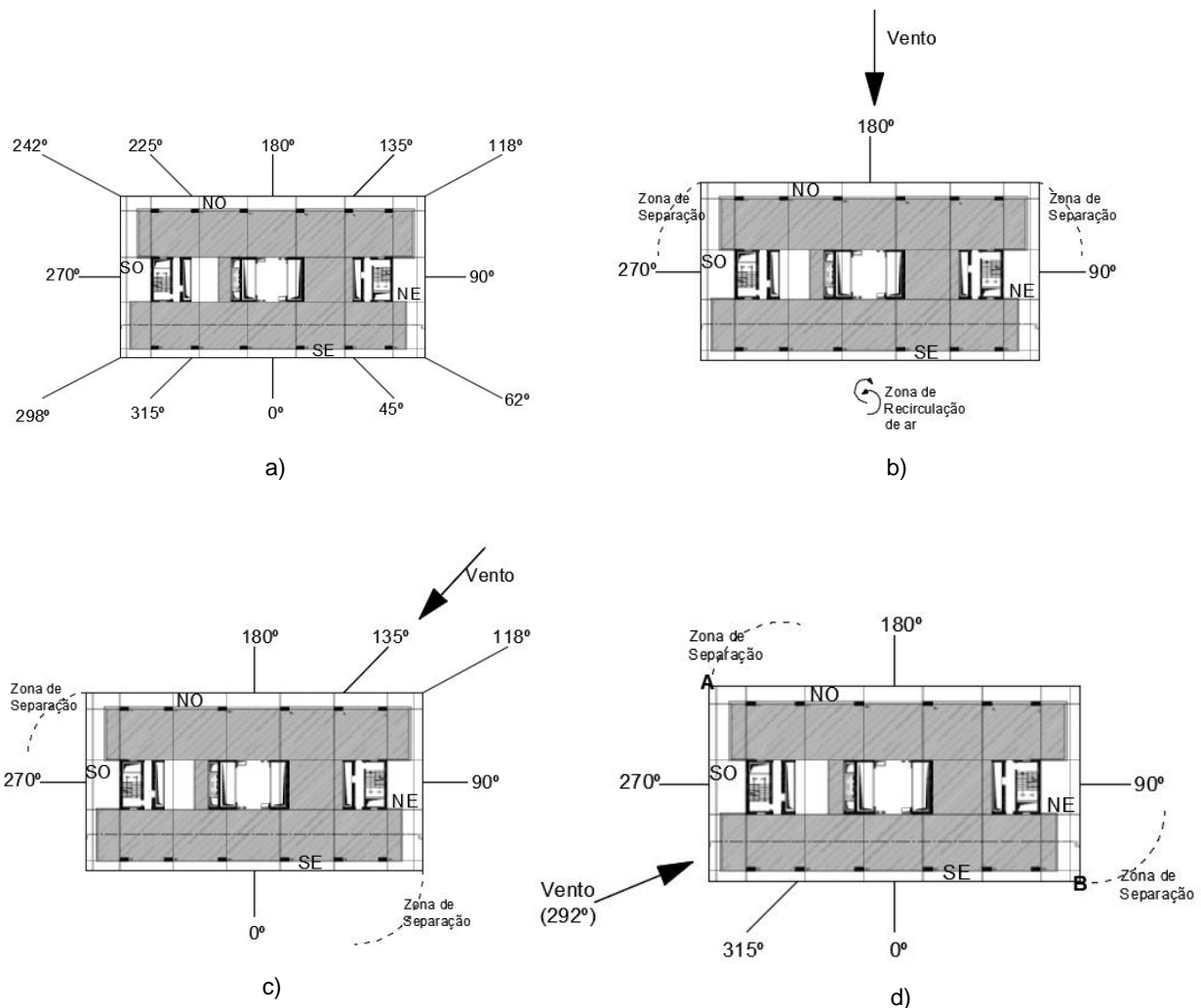


Figura 3.9 – Exemplo de incidências do vento consideradas para a definição dos coeficientes de pressão.

A distribuição dos coeficientes de pressão (Orme, Liddament, e Wilson, 1998) está apresentada no ANEXO 2, de referir também que, os ângulos de 270° e 360° correspondem à distribuição de 90° e 0° respectivamente.

3.3 Dados da temperatura e da radiação solar

Para a avaliação do comportamento térmico da fachada de dupla pele, para além das medições de radiação solar, valores globais em plano horizontal e vertical, foram efectuadas leituras de temperatura, em ambientes interior e exterior, no interior da cavidade ar, nas superfícies dos vidros e no dispositivo de sombreamento.

A radiação solar, em plano horizontal e vertical (normal à fachada), foi medida na fachada, à frente e atrás do dispositivo de sombreamento, com dois piranómetros de termopilha. Este aparelho é constituído por um sensor usado para medir a irradiância solar numa superfície e projectado para medir a densidade de fluxo da radiação solar (W/m^2).

Para a medição da temperatura e da humidade relativa do ambiente exterior e interior foi utilizado um termohigrómetro respectivamente na cobertura e no interior do compartimento adjacente à fachada colocado na proximidade da janela sem estar directamente exposto à radiação solar. É importante salientar que a temperatura ambiente interior era regulada pelo sistema de climatização, para manter uma temperatura de 25°C, no horário de trabalho (dias úteis das 8:00 às 18:00 horas). As temperaturas do ar da cavidade e das superfícies dos panos da FDP foram medidas com termopares Tipo T cujo funcionamento se baseia na junção de dois metais que gera uma tensão eléctrica que é função da temperatura. Os termopares foram colocados na face interior e exterior do pano envidraçado interior, na face interior do pano exterior e interior do dispositivo de sombreamento e, nas cavidades de ar exterior e interior situadas respectivamente à frente e atrás do dispositivo de sombreamento.

Os sensores serão conectados a um sistema de aquisição de dados para registo de todas as grandezas.

3.4 Procedimento experimental

Como referido, o objectivo das campanhas de monitorização consistiu na caracterização do funcionamento térmico da fachada de dupla pele (FDP), onde para o efeito se mediu um conjunto de temperaturas (panos envidraçados, sombreamento, ar do canal, de ambos os lados do sombreamento), radiação em plano horizontal e vertical e velocidade do ar junto das grelhas de saída (uma por cada fachada). Os equipamentos de medida foram instalados nas de fachadas Noroeste, Sudoeste e Sudeste, com recolha semanal de dados, durante os períodos de monitorização. A Figura 3.10 esquematiza a localização dos sensores.

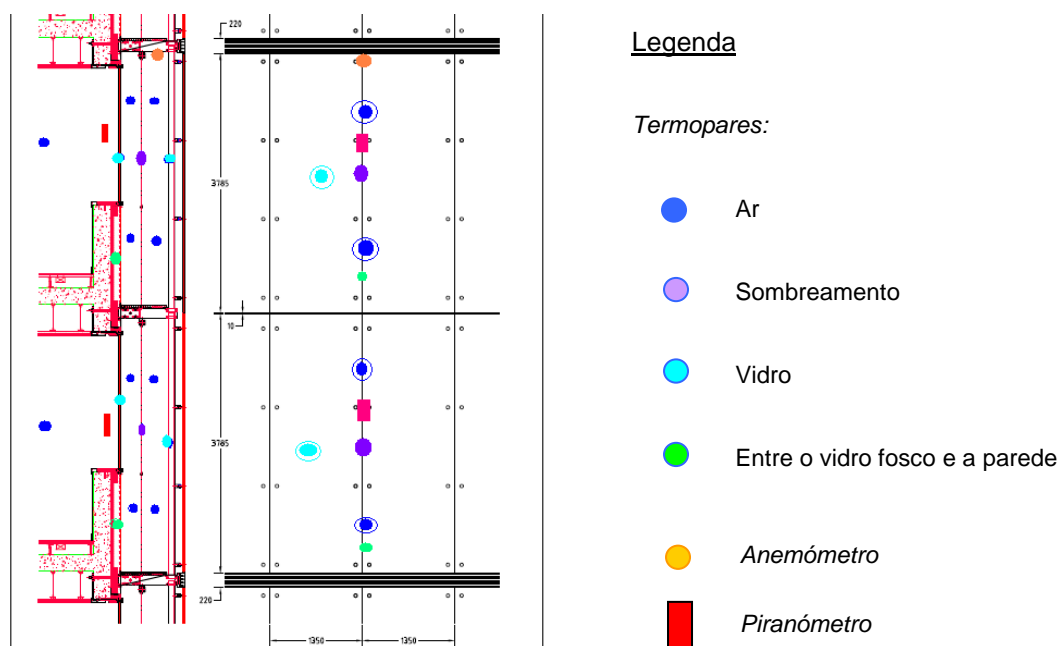


Figura 3.10 – Esquema da colocação dos dispositivos de monitorização na campanha realizada (FACAL, n.d.).

A zona de instalação destes equipamentos encontra-se representada, na planta do edifício, com rectângulos de contorno vermelho, na Figura 3.11.

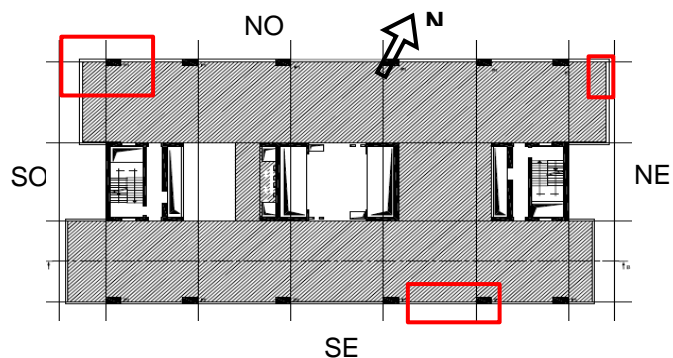







Figura 3.11 – Representação do posicionamento dos sensores (FACAL, 2006).

A instalação dos equipamentos foi efectuada na data de início das campanhas de medição e, semanalmente fez-se a recolha de dados. A descrição dos equipamentos utilizados está resumida na Tabela 3.6:

Tabela 3.6 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados na recolha de dados.

	Equipamento	Modelo	Precisão	Variável	Nome	Localização
Termopar		Tipo T com 0,2 mm de espessura	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ para 100°C e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para 400°C	Temperatura	T_{ap} $T_{ae}; T_s;$ T_{ai} $T_{vi}; T_{ve}$	Cavidade; Dispositivo de sombreamento; Vidros interior e exterior; Entre o vidro e a parede.
Piranómetro		Kipp & Zonen CM5, de classe 1	$\pm 5\%$	Radiação solar	RadVExt; RadH	Cobertura
Termohigrómetro		Rotronic BM-90	$\pm 3\%$ a 25°C	Temperatura interior e exterior	$T_{int}; T_{ext}$	Espaço interior/exterior
Loggers		DataTaker 515	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ para 100°C e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para 400°C	Registo de vários sinais oriundos dos vários equipamentos	-	Fachada
		Delta-T	$\pm 5\%$ aos 20°C			Cobertura

4. Análise e discussão de resultados

4.1 Caracterização das campanhas de monitorização

Como referido, foram realizadas quatro campanhas de monitorização. Os períodos de monitorização adoptados, de modo a obter os dados das diferentes condições climáticas, dividiram-se nas datas apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Intervalos temporais da campanha.

Campanha	Início	Fim
1	27 de Agosto de 2009	7 de Outubro de 2009
2	2 de Dezembro de 2009	10 de Fevereiro de 2010
3	26 de Abril de 2010	8 de Junho de 2010
4	9 de Julho de 2010	31 de Agosto de 2010

Importa salientar que a primeira campanha decorreu apenas para as fachadas de Noroeste e Sudoeste.

No Anexo A3 estão caracterizadas todas as semanas das campanhas de monitorização realizadas.

A Tabela 4.2 apresenta o horário de funcionamento do dispositivo de sombreamento, regulado, para manter a temperatura interior a 25°C, de segunda a sexta-feira, entre as 8:00 e as 18:00 horas.

Tabela 4.2 - Horário do funcionamento automático do dispositivo de sombreamento.

Período (dias úteis)	Orientação da fachada		
	NW	SE	SW
08:00 – 12:00 horas	Descido	Descido	Subido
12:00 – 15:00 horas	Descido	Subido	Descido
15:00 – 18:00 horas	Subido	Subido	Descido

4.2 Análise particular de dias de interesse

De modo a ser possível detalhar a análise ao comportamento da fachada seleccionaram-se quatro dias de cada uma das campanhas correspondentes a céu limpo e nublado, em dia útil e fim-de-semana, que se consideram como representativos dessas condições. O critério seguido foi o de recorrer a máximos de radiação incidente, para os dias de céu limpo e, inversamente, para os dias nublados, cobrindo assim condições exteriores que maximizassem as trocas de energia na fachada. Neste sentido, as escolhas recaíram nos dias descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dias particulares de interesse sujeitos a análise

Campanha	Período	Condição Céu	Data
1	Dia útil	Limpo	07/09/2009
		Nublado	10/09/2009
	Fim-de-semana	Limpo	30/08/2009
		Nublado	13/09/2009
2	Dia útil	Limpo	02/02/2010
		Nublado	09/12/2009
	Fim-de-semana	Limpo	09/01/2010
		Nublado	24/01/2010
3	Dia útil	Limpo	17/05/2010
		Nublado	07/05/2010
	Fim-de-semana	Limpo	16/05/2010
		Nublado	08/05/2010
4	Dia útil	Limpo	09/08/2010
		Nublado	13/07/2010
	Fim-de-semana	Limpo	08/08/2010
		Nublado	01/08/2010

Para a avaliação do desempenho da fachada recorre-se à representação das seguintes variáveis:

- Temperatura interior (T_{int});
- Temperatura exterior (T_{ext});
- Temperatura do vidro exterior (T_{ve});
- Temperatura do sombreamento (T_s);
- Temperatura do vidro interior (T_{vi});
- Temperatura do ar dentro do canal, atrás do sombreamento (T_{ai});
- Temperatura do ar no canal, entre o sombreamento e o pano exterior (T_{ae});
- Diferença entre a temperatura do ar no canal e a temperatura interior (T_g);
- Radiação solar exterior, incidente no plano das fachadas (RadV);
- Radiação incidente no plano horizontal (RadH);
- Perfis de temperatura horizontal e vertical (horas de maior radiação incidente, temperatura exterior e no canal, e sem radiação);

4.2.1 Análise da temperatura interior e exterior

Analisando a Figura 4.1, correspondendo ao perfil da temperatura registada no espaço interior, em dias úteis de céu limpo, verifica-se que a temperatura interior se manteve constante em todas as

campanhas, havendo apenas variação a partir das 7:00 e das 20:00 horas. Exceptua-se a campanha 4 em que se registou um acréscimo de cerca de 2°C nos períodos de desativação do sistema de climatização. Este comportamento mostra-se independente da orientação da fachada.

i) Dias úteis com céu limpo

Com base na mesma Figura 4.1, observou-se que, no caso da Campanha 1 e 4, correspondendo ao mês de Setembro e Agosto, respectivamente, a temperatura interior diminui pelas 7:00 horas, devido à entrada em funcionamento da climatização. A subida gradual da temperatura na campanha 1 (enquanto que na campanha 4 se manteve constante ao longo do dia) pode prender-se com a alteração na regulação do dispositivo de sombreamento que passou a permitir a actuação manual. A partir das 20:00 horas nota-se um acréscimo dos valores de temperatura interior, o que indicia que os dispositivos de sombreamento foram subidos. Provém, também, calor de dentro da fachada originado pela radiação solar, associado à desactivação da climatização.

A Figura 4.2 ilustra a diferença entre a temperatura ambiente exterior e interior nos dias úteis de céu limpo, evidenciando as diferenças sazonais, através da diferente amplitude dos perfis, associada a cada estação do ano.

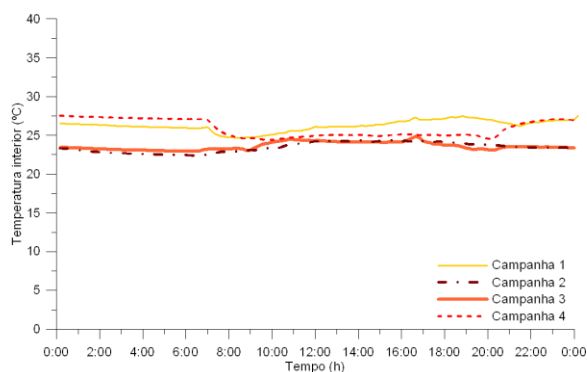


Figura 4.1 – Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo.

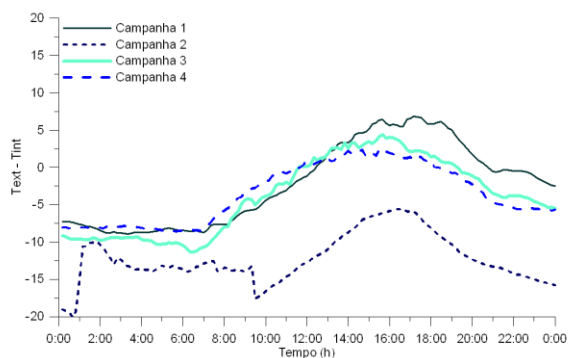


Figura 4.2 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias úteis com céu limpo.

i) Dias úteis com céu nublado

Como era esperado, o comportamento das temperaturas interiores, em dias úteis de céu nublado, Figura 4.3, é semelhante ao que foi verificado nos dias úteis de céu limpo, isto porque o sistema de climatização está em funcionamento. Em relação à diferença entre os valores de temperatura exterior e interior, Figura 4.4, foram registados valores mais baixos do que em dias úteis de céu limpo.

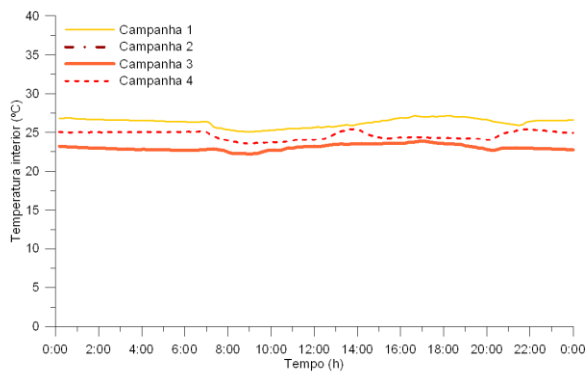


Figura 4.3 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado.

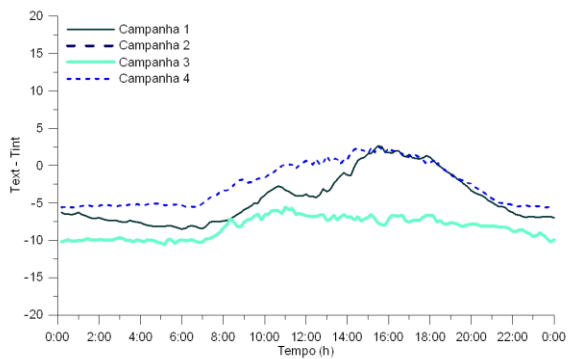


Figura 4.4 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias úteis com céu nublado.

iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo

Em relação aos dias de fim-de-semana interessa analisar a temperatura interior, isto porque o sistema de climatização não é activado nestes dias. O perfil de temperatura interior correspondente a céu limpo, Figura 4.5, não regista aumentos significativos em nenhum dos dias, independentemente da orientação da fachada. Mesmo o aumento de temperatura visível ao fim da tarde na zona servida pelas fachadas de NW e SW, na campanha 1, fim do Verão, é ligeiro. Acresce ainda o facto de apenas o dia que representa a campanha 3 ser um sábado, sendo espectável que, a temperatura só possa aumentar após 48 horas sem climatização.

Note-se que as temperaturas exteriores registadas, nestes dias, são mais baixas, do que as dos dias úteis de céu limpo, com a excepção da campanha 1, que apresenta a maior diferença entre a temperatura exterior e interior, como é visível no gráfico da Figura 4.6.

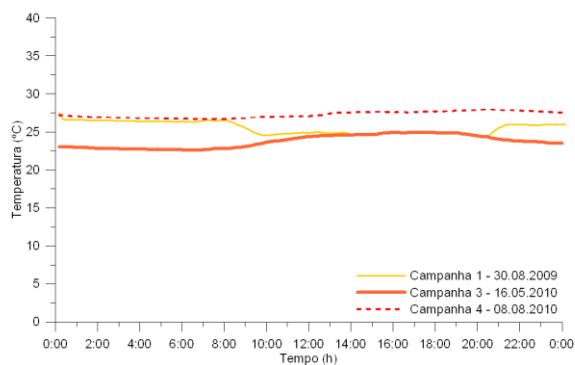


Figura 4.5 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana com céu limpo.

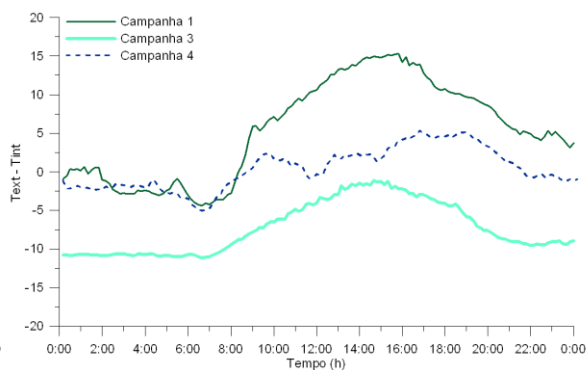


Figura 4.6 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias de fim-de-semana com céu limpo.

iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado

Relativamente à temperatura interior, em dias de fim-de-semana com céu nublado, Figura 4.7, registaram-se valores muito semelhantes em todas as fachadas. É de notar que, durante o dia, os valores de temperatura interior em comparação com os de temperatura exterior apresentam-se mais elevados, Figura 4.8, devido ao aquecimento da fachada provocado pela radiação solar. Durante a noite, os valores de ambas as temperaturas aproximam-se, devido à inexistência de carga térmica, ou seja, qualquer fluxo de ar é proveniente do efeito do vento ou da ventilação natural de ar.

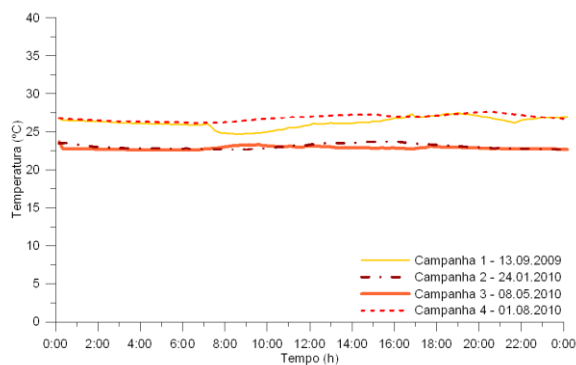


Figura 4.7 - Temperatura interior verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana com céu nublado.

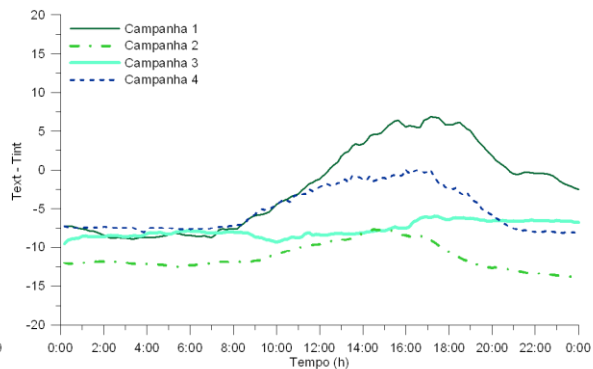


Figura 4.8 - Diferença de temperatura entre o exterior e o espaço interior em dias de fim-de-semana com céu nublado.

Em dias de céu nublado, ao fim-de-semana, sem o sistema de ar condicionado a funcionar, o compartimento do edifício com fachada orientada a Norte terá os valores de temperatura interior mais baixos quer no Inverno, quer no Verão.

4.2.2 Análise da radiação solar

i) Dias úteis com céu limpo

Em dias de céu limpo importa analisar, particularmente, os níveis de radiação solar. Nestes dias, chama-se a atenção para os fluxos de radiação incidentes na fachada de SW, Figura 4.9, com valores naturalmente bastante mais elevados na campanha 2, correspondente ao Inverno, devido à baixa altura do Sol, e para os fluxos matinais provenientes da reflexão nos edifícios vizinhos. Verifica-se o contrário para a radiação incidente numa superfície horizontal na fachada SW onde, devido à maior altura solar, é na Primavera e no Verão que aquela intensidade é maior, Figura 4.10.

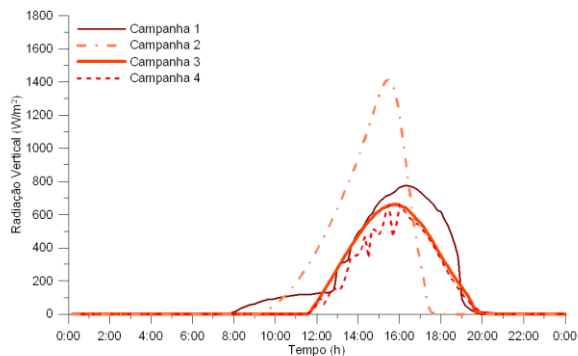


Figura 4.9 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo na fachada SW.

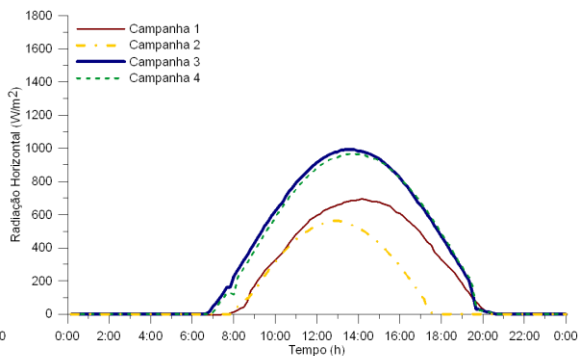


Figura 4.10 - Radiação no plano horizontal verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo na fachada SW.

Ainda acerca da Figura 4.9, a campanha 4 apresenta um perfil com algumas irregularidades, no intervalo entre as 12:00 e as 16:00 horas, devendo-se à passagem de nuvens nesse período de tempo.

Na Figura 4.10, apesar de, para avaliar o comportamento da radiação no plano horizontal, se ter seleccionado o dia da campanha 1 no início do mês de Setembro e, para a campanha 4, no início do mês de Agosto, a diferença de valores é evidente.

Os níveis de radiação incidente no plano vertical, na fachada NW, são residuais e, praticamente nulos, no Inverno como se pode verificar na Figura 4.11.

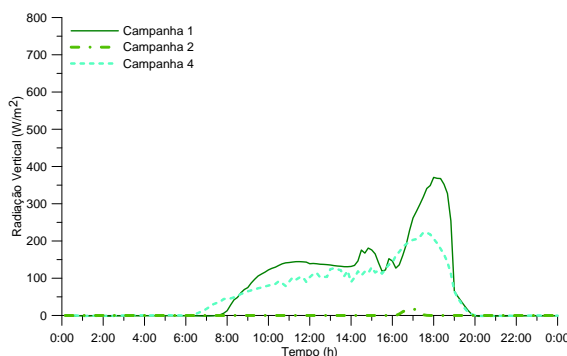


Figura 4.11 – Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, na fachada NW, em dias de céu limpo.

Analisando a diferença de temperatura entre o ar do canal da fachada e o espaço interior, nas fachadas SW e NW, Figuras 4.12 e 4.13 respectivamente, verifica-se que, a campanha 4 (Verão), em ambas as fachadas, apresenta um diferencial sempre positivo, isto é, o ar do canal está mais quente do que o ambiente interior, o que é expectável devido à forte radiação incidente associada à elevada temperatura exterior. Esta diferença é variável ao longo do dia, com máximos coincidentes com o

calor acumulado na fachada, devido à inércia térmica dos materiais constituintes, provocado pela incidência da radiação em plano vertical, sendo que a temperatura interior é regulada pelo sistema de climatização. A menor diferença registou-se no intervalo entre as 0:00 e as 8:00 horas.

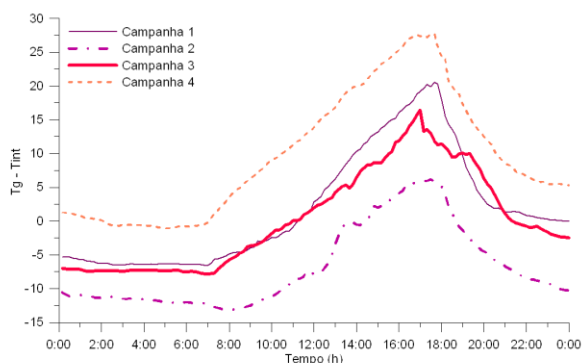


Figura 4.12 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo, na fachada SW.

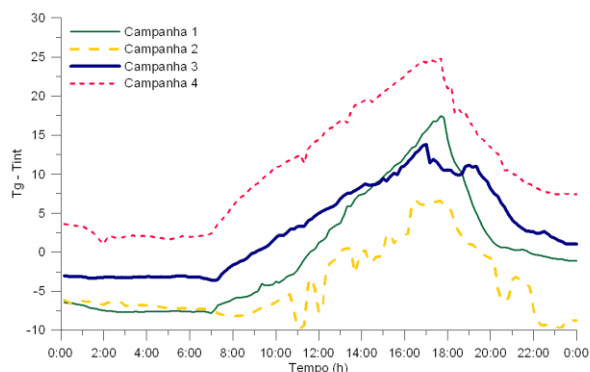


Figura 4.13 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu limpo, na fachada NW.

ii) Dias úteis com céu nublado

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam a radiação no plano vertical, em dias de céu nublado, nas fachadas SW e SE, respectivamente. Em todas as fachadas, notar-se-á intensidades naturalmente mais baixas, comparativamente a dias de céu limpo e também variabilidade, ao longo do dia, correspondendo ao fenómeno de nebulosidade. A campanha 3, realizada em Maio, é a que atinge valores de radiação mais elevados na fachada SE, Figura 4.15. Na fachada SW, a campanha 2 (Inverno), é a que se destaca com valores mais elevados de radiação vertical, porque no Inverno a altura do Sol é menor e a superfície vertical orientada a Sul recebe radiação solar por mais tempo do que qualquer outra orientação, Figura 4.14.

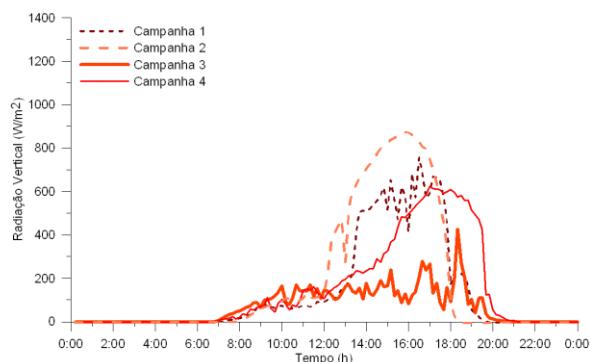


Figura 4.14 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado na fachada SW.

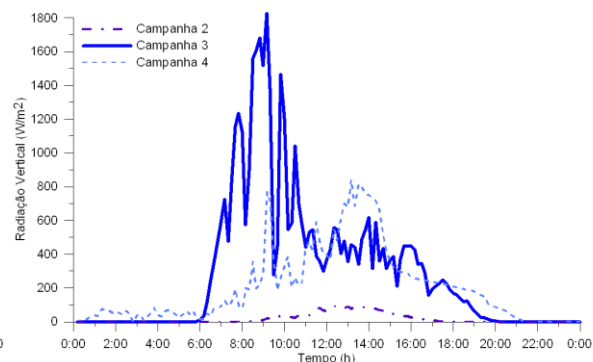


Figura 4.15 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado na fachada SE.

O facto de, na Figura 4.15, se detectar maiores valores de radiação em plano vertical na fachada SE, comparativamente à fachada orientada a SW, está associado à presença de um edifício vizinho a Sul do Edifício H cujo revestimento de fachada é também envidraçado, como está representado na Figura 4.16. Esta situação faz com que haja um aumento de radiação incidente na fachada SE, por via da reflexão na fachada envidraçada do edifício vizinho, durante a parte da manhã. Durante o período da tarde, esse edifício vizinho fará sombreamento ao edifício em estudo.

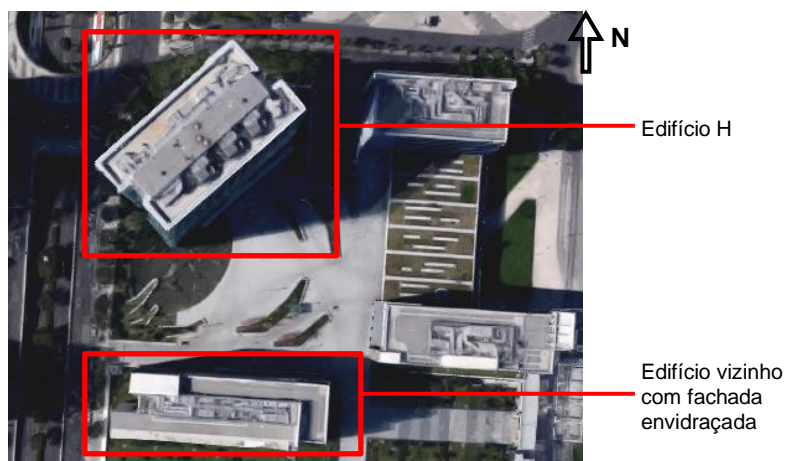


Figura 4.16 - Localização do edifício H e do edifício vizinho cuja fachada é envidraçada (adaptado de Google Images)

Tal como em dias de céu limpo, na fachada NW, no Inverno (campanha 2), também se verifica que os valores de radiação muito baixos, Figura 4.17.

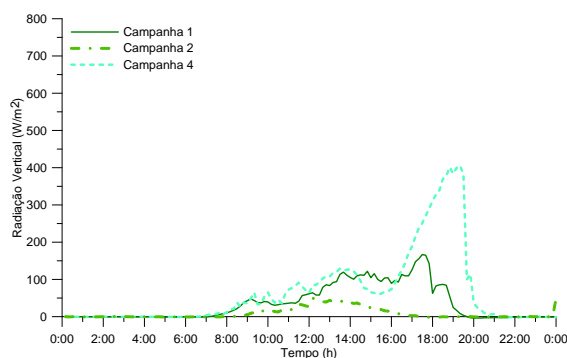


Figura 4.17 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, na fachada NW, em dias de céu nublado.

Relativamente aos valores da diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior, apresentam um comportamento semelhante nas fachadas SW e NW, Figuras 4.18 e 4.19, respectivamente. Nas campanhas 1 e 4 registaram-se diferenças positivas, no período de horas úteis das 10:00 às 20:00 horas sensivelmente, significando que o ar da cavidade esteve mais quente do que o espaço interior nesse intervalo de tempo.

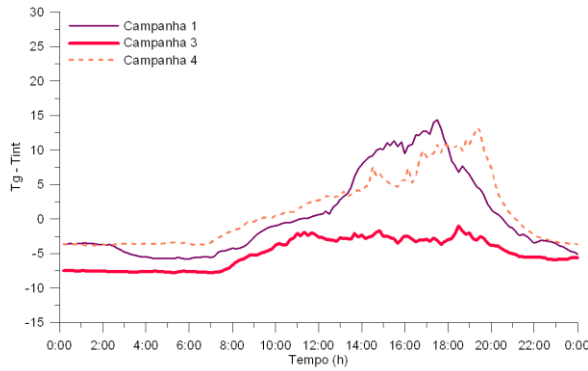


Figura 4.18 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada SW.

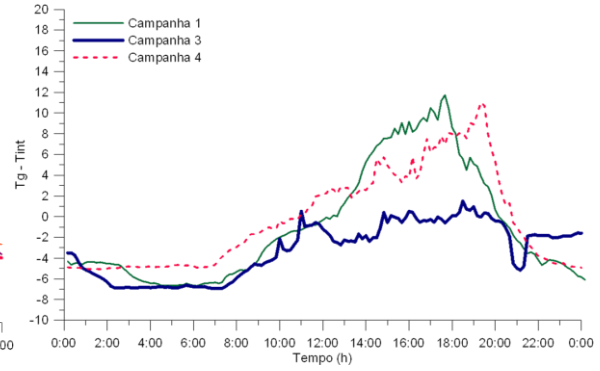


Figura 4.19 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada NW.

Analisando a fachada SE, Figura 4.20, também se verificam diferenças de temperatura positivas para o mesmo intervalo, horas úteis de trabalho, nas campanhas 3 e 4, Primavera e Verão, respectivamente. Sendo que, na Primavera, se registou o diferencial positivo entre as 8:00 e as 16:00 horas, contrariamente ao que acontece nas outras fachadas, devido a uma incidência solar mais prolongada.

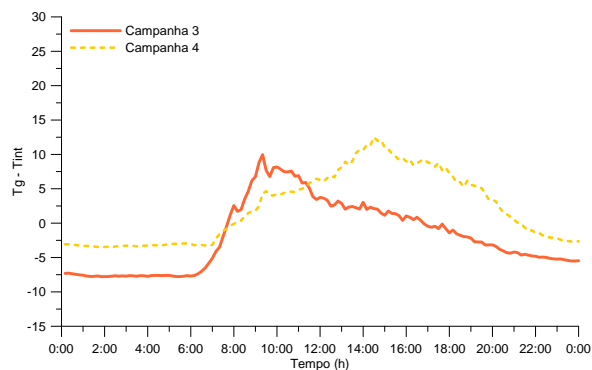


Figura 4.20 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e espaço interior em cada uma das campanhas, nos dias úteis de céu nublado, na fachada SE.

4.2.3 Relação entre radiação solar e diferença de temperatura média do ar no canal e a temperatura do espaço interior, por cada fachada e estação do ano

Cada uma das fachadas do edifício vai ter um perfil característico para a diferença entre a temperatura média do ar no canal e a temperatura do interior, em cada estação do ano. Apesar de existirem variações a nível individual, é possível identificar uma tendência geral para cada orientação. A Figura 4.21 a) exemplifica essa tendência para dias de céu limpo e a Figura 4.21 b) para dias de céu nublado.

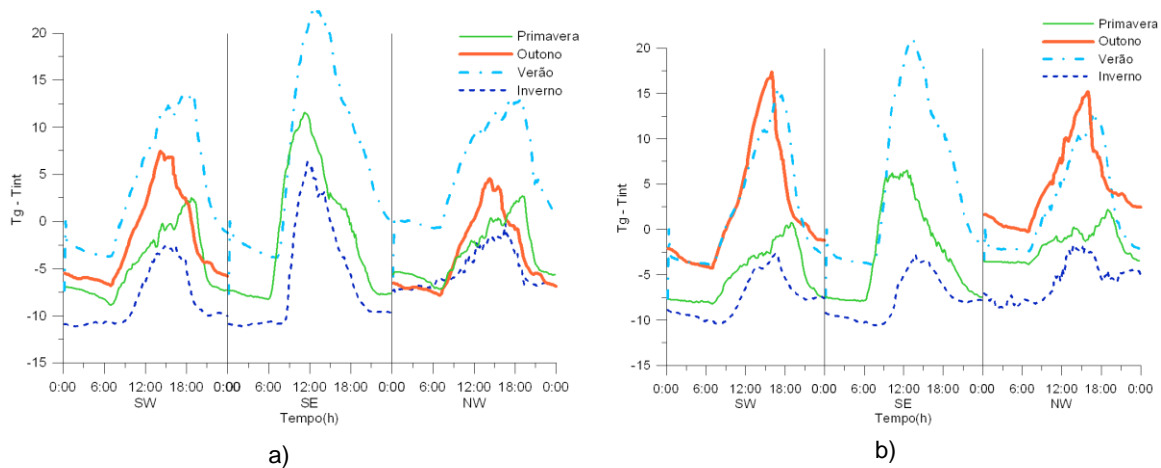


Figura 4.21 - Variação em dias úteis da diferença entre a temperatura do ar no canal e a temperatura interior em cada fachada e em cada estação do ano: a) em dias de céu limpo; b) em dias de céu nublado.

Relativamente a dias úteis de céu nublado, na fachada SW, no Outono, Figura 4.21 b), é evidente um diferencial positivo com uma amplitude considerável, este facto está relacionado com a radiação solar incidente, apresentada na Figura 4.22 b).

No Inverno verifica-se uma tendência no comportamento semelhante em todas as fachadas, diferindo apenas em intensidade, independentemente do estado do céu. Em dias de céu limpo o diferencial de temperaturas, entre o ar na cavidade e o espaço interior, é maior do que em dias de céu nublado. E, no Verão, na fachada SE, atinge-se valores bastante elevados de temperatura e é a situação mais crítica de todas as estações do ano, pois é a que revela maiores valores de temperatura média no ar no canal, como se pode ver de forma mais evidente na Figura 4.21 a).

Analisando as Figuras 4.21 e 4.22, na fachada orientada a Este, a exposição solar será maioritariamente durante a manhã revelando, no Inverno, valores de temperatura exterior geralmente mais baixas. Nesta fachada, as maiores diferenças dão-se durante a manhã, já que o Sol nasce a Este, existindo assim maior incidência da radiação, e diminui ao longo do dia. No Inverno, o Sol nasce mais a Sudeste do que a Este como nas restantes estações do ano e, por isso, é menos evidente a maior temperatura do ar do canal em relação ao espaço interior. Em relação à fachada SW os maiores valores de diferença entre a temperatura média do ar no canal e o espaço interior registam-se durante a tarde, pois a exposição solar é mais intensa nesse período do dia.

De um modo geral, ao longo do dia, os perfis da diferença de temperatura média do ar no canal e o interior acompanham, com um desfasamento temporal devido à inércia térmica necessária ao aquecimento, o comportamento registado relativo à variação da radiação incidente, representado na Figura 4.22.

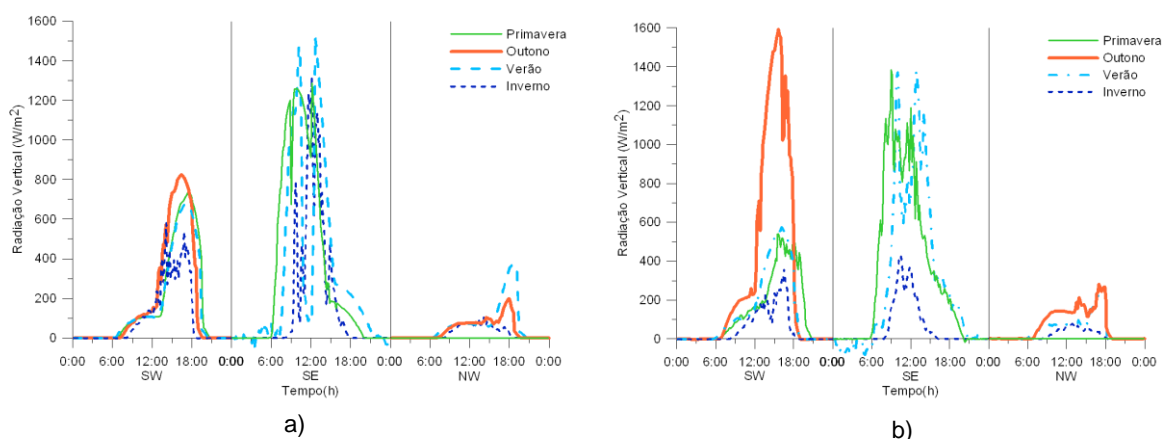


Figura 4.22 - Variação em dias úteis da radiação, em cada fachada e em cada estação do ano: a) em dias de céu limpo; b) em dias de céu nublado.

Observando a Figura 4.22 a) correspondente a dias úteis de céu limpo e a Figura 4.22 b) referente a dias úteis com céu encoberto, conclui-se que o comportamento da radiação vertical revela uma tendência, em cada fachada, para cada estação do ano. Independentemente se há Sol ou não, a radiação vertical atinge os máximos valores na fachada SW durante o outono, no período da tarde. E, tal como no Outono, no Inverno, os valores de radiação mais elevados foram registados na fachada SW.

O facto de, em dias nublados no Outono, na fachada SW, se verificar os maiores valores de radiação vertical, Figura 4.22 b), pode indiciar que os dias seleccionados não foram predominantemente nublados, mas sim com passagem de nuvens.

Relativamente à fachada SE o parâmetro da radiação solar exterior, incidente no plano da fachada, apresenta geralmente valores consideravelmente mais elevados, em comparação com as outras fachadas. Isto deve-se ao facto de que uma orientação a Sul tem uma exposição solar durante todo o ano, ao contrário da orientação a Norte. Nesta fachada, em dias de céu limpo, há uma tendência bastante evidente em que todas as estações do ano atingem, aproximadamente, a mesma amplitude de valores e no mesmo período do dia.

4.2.5 Análise dos perfis horizontais de temperatura

Os perfis horizontais de temperatura estão representados para o piso 16 a uma altura aproximada de 1,60 m do pavimento, a fim de permitir uma rápida avaliação da evolução das temperaturas entre o exterior e o interior. Os valores adoptados para traçar estes perfis correspondem à hora em que se registou maior temperatura exterior (Text) e maior radiação vertical, em cada fachada (RadV).

Encontra-se representada, no subcapítulo A3.5, do Anexo A3, a Tabela A3.1, que apresenta o horário em que se registaram os referidos valores.

i) Dias úteis com céu limpo

Nas fachadas SW e SE, Figuras 4.23 e 4.24 respectivamente, a temperatura mais elevada é geralmente a do vidro exterior seguindo-se, regra geral a do pano interior do lado do canal. Logo, em maior parte dos casos, a temperatura do ar é mais baixa de entre os elementos constituintes da fachada. As exceções verificaram-se na campanha 3, fachada SE, Figura 4.24, em que no momento em que se registou o maior valor de temperatura exterior se verificou que o vidro exterior atingiu uma temperatura ligeiramente mais alta do que o pano do lado exterior do canal e que o dispositivo de sombreamento era o elemento mais quente de todo o sistema.

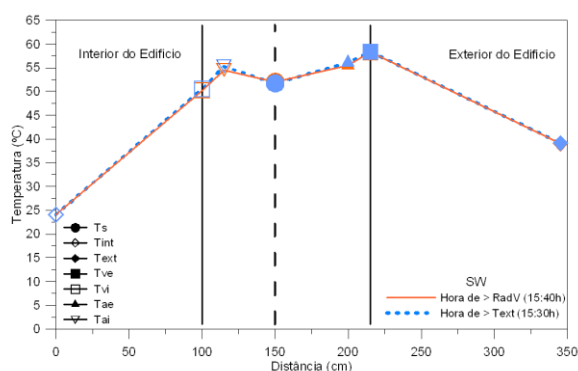


Figura 4.23 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (SW).

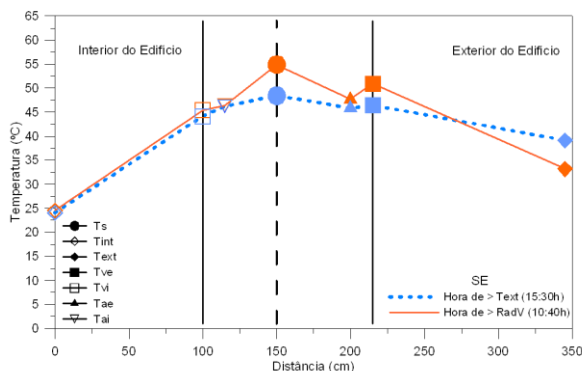


Figura 4.24 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (SE).

A outra exceção foi observada na campanha 4 (Verão), fachada SE, Figura 4.26, em que o dispositivo de sombreamento atingiu a maior temperatura de todos os elementos constituintes, na hora em que se registou o valor mais elevado de radiação no plano vertical. Relativamente à campanha 4, na fachada SW, Figura 4.25, verifica-se um comportamento semelhante ao da campanha 3 (Primavera).

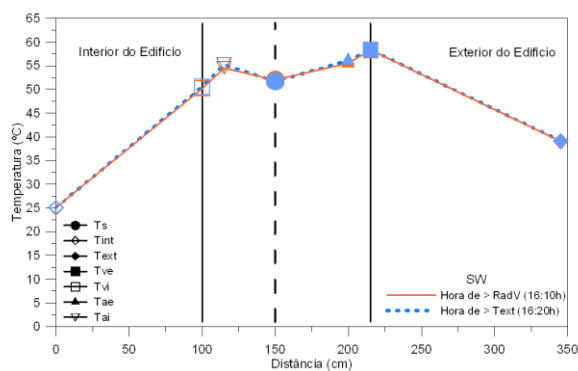


Figura 4.25 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (SW).

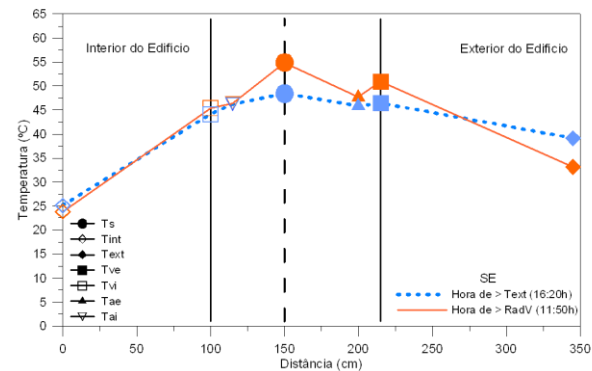


Figura 4.26 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (SE).

Note-se que, na fachada SE, Figuras 4.24 e 4.26, desde que haja radiação solar incidente, a temperatura do dispositivo de sombreamento é sempre mais elevada do que o ar do canal, ou seja, maior do que a temperatura do ar no canal exterior e interior ao dispositivo de sombreamento, Tae e

Tai, respectivamente. Na fachada NW, este comportamento é muito menos evidente e, apenas se verificará no período do dia em que há maior incidência solar, como mostra o perfil horizontal referente à hora em que se atingiu o valor máximo de radiação solar, Figuras 4.27 e 4.28. Fora este período, o gradiente de temperatura é praticamente nulo, verificando-se que todos os elementos constituintes da fachada têm temperaturas muito semelhantes.

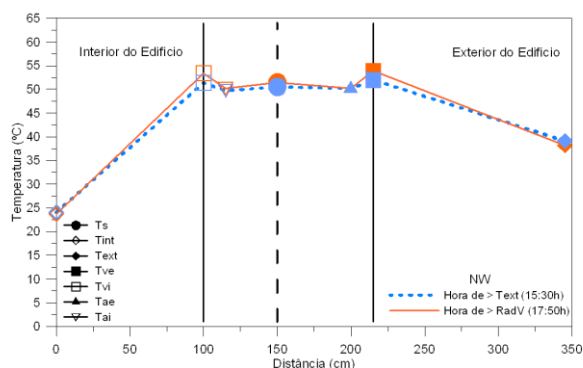


Figura 4.27 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 3 (NW).

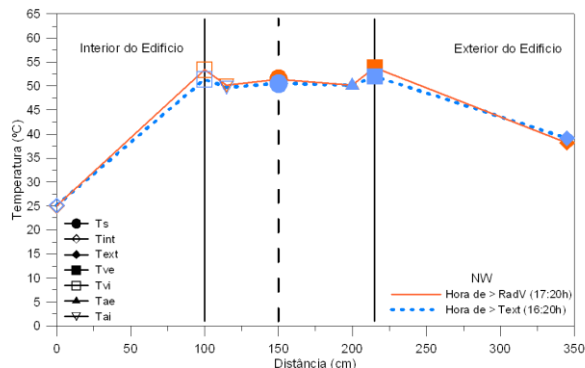


Figura 4.28 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu limpo, campanha 4 (NW).

ii) Dias úteis com céu nublado

Observando os perfis horizontais, as temperaturas, em dias de céu nublado, dos vários elementos da fachada são consideravelmente mais baixas do que as que foram registadas nos dias de céu limpo. E, devido à nebulosidade, as temperaturas do dispositivo de sombreamento mantêm-se próximas das temperaturas dos panos envidraçados, Figuras 4.29 e 4.31. Exceptua-se a campanha 4, Verão, na fachada SW, na hora em que se atingiu o valor máximo de radiação solar, em que se destaca a temperatura mais alta do vidro exterior, Figura 4.30.

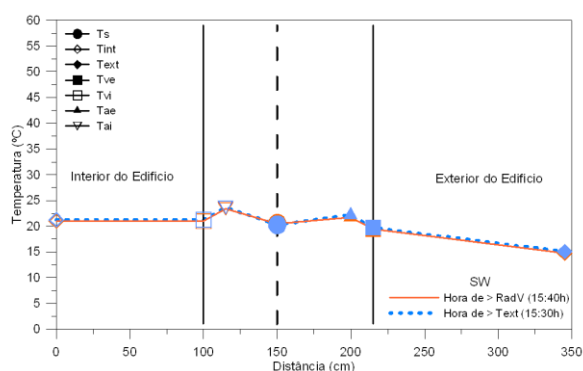


Figura 4.29 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 2 (SW).

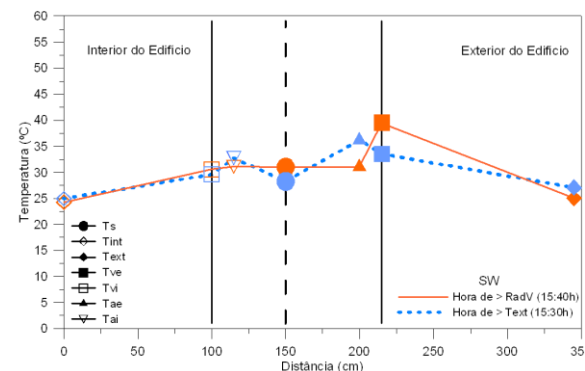


Figura 4.30 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 4 (SW).

O facto de, no Inverno (campanha 2), na fachada SW, Figura 4.29, se verificar que a temperatura entre o pano interior e o dispositivo de sombreamento ser ligeiramente superior à temperatura

registada no elemento envidraçado exterior pode dever-se à maior proximidade do dispositivo de sombreamento ao pano interior. O calor absorvido pelo dispositivo de sombreamento e a proximidade, entre este elemento e o vidro interior, pode dificultar a correcta ventilação no interior do canal e a consequente eliminação do calor absorvido pelo dispositivo de sombreamento.

No Inverno (campanha 2), na fachada NW, Figura 4.31, o dispositivo de sombreamento atinge valores de temperatura ligeiramente mais elevados do que qualquer outro elemento, contrariamente ao que se passa nas outras campanhas, nas outras fachadas. Neste caso, regista-se também que a temperatura do vidro interior é ligeiramente superior à do vidro exterior.

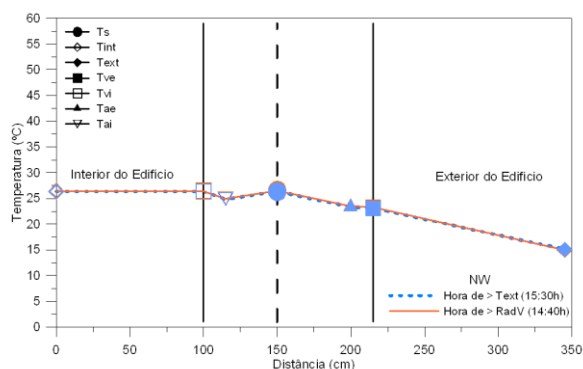


Figura 4.31 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 2 (NW).

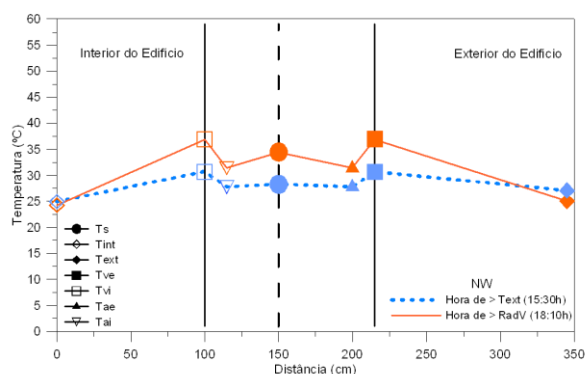


Figura 4.32 - Perfil horizontal de temperatura, dias úteis com céu nublado, campanha 4 (NW).

iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo

No que diz respeito a dias de fim-de-semana com céu limpo, os perfis horizontais de temperatura demonstram que o vidro interior apresenta, geralmente a temperatura mais baixa. Contrariamente à campanha 1 (fim da época de Verão), Figura 4.33, na campanha 4, verifica-se que, na fachada SW, Figura 4.34, a temperatura do ar na cavidade atinge maiores valores do que qualquer outro elemento constituinte da fachada, tal comportamento é idêntico ao que acontece em dias úteis de céu limpo, na fachada SW, nas campanhas 3 e 4, Primavera e Verão, respectivamente.

Na Figura 4.34, dia de Verão com céu limpo e, durante o fim-de-semana, isto é sem o sistema AVAC em funcionamento, verificou-se que a temperatura ambiente interior foi de 27,5°C, ou seja cerca de 2,5°C superiores a 25°C, temperatura que foi adoptada como temperatura de set point, nos dias úteis. Pode-se concluir que a FDP teve um comportamento razoável pois, apesar da temperatura na cavidade ter atingido valores elevados, cerca de 42°C, a temperatura ambiente interior não aumentou de forma significativa.

A campanha 1 atinge valores de temperatura mais altos, do que a campanha 4, devido à radiação solar incidente em plano vertical ter sido mais intensa na primeira campanha, como mostra a Figura 4.35.

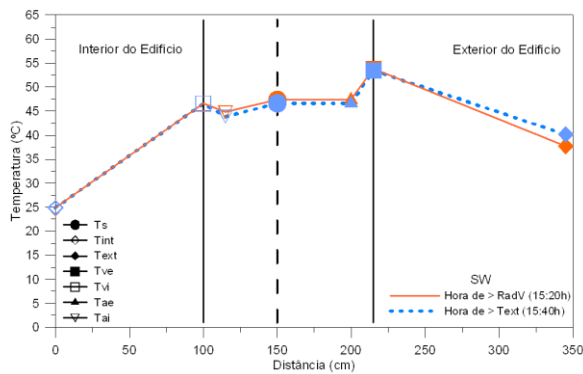


Figura 4.33 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu limpo, campanha 1 (SW).

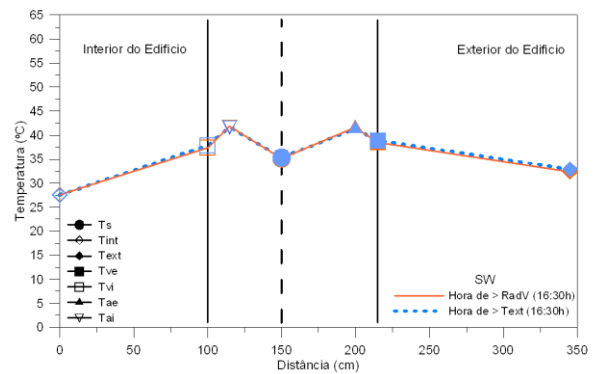


Figura 4.34 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu limpo, campanha 4 (SW).

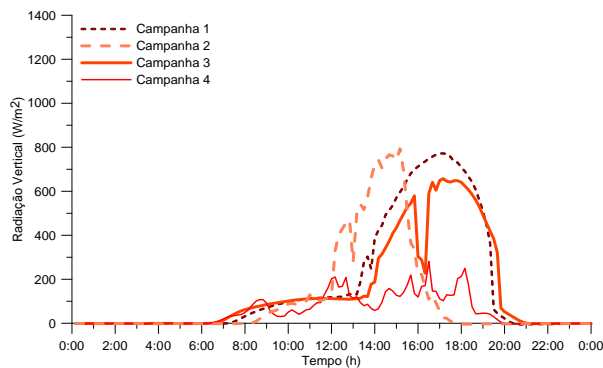


Figura 4.35 - Radiação no plano vertical verificada em cada uma das campanhas, nos dias de fim-de-semana de céu limpo na fachada SW.

iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado

O comportamento dos perfis horizontais de temperatura em dias de fim-de-semana com céu nublado é, geralmente, idêntico ao dos dias úteis análogos. As possíveis variações devem-se apenas à dependência da variabilidade nebulosidade.

Em comparação com a campanha 2, Inverno, Figura 4.36, a campanha 3, correspondente à Primavera, Figura 4.37, apresenta um perfil de temperaturas muito uniforme indiciando uma nebulosidade mais forte e permanente.

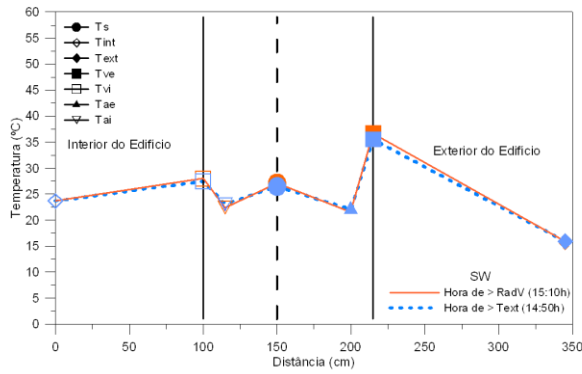


Figura 4.36 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu nublado, campanha 2 (SW).

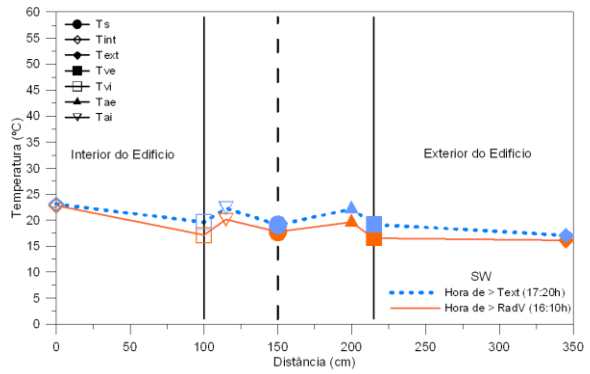


Figura 4.37 - Perfil horizontal de temperatura, fim-de-semana com céu nublado, campanha 3 (SW).

4.2.6 Análise dos perfis verticais de temperatura

Os perfis verticais de temperatura permitem avaliar a estratificação da temperatura do ar. A estratificação térmica do ar é um fenómeno pelo qual a temperatura do ar não se mantém uniforme nem homogénea, observando-se a sobreposição de diferentes camadas de temperaturas desde o pavimento até ao topo dos pisos.

i) Dias úteis com céu limpo

As Figuras 4.38 e 4.40 demonstram a ausência de estratificação durante a noite, na fachada NW. No caso da fachada SW, Figuras 4.39 e 4.41, esse fenómeno é menos visível.

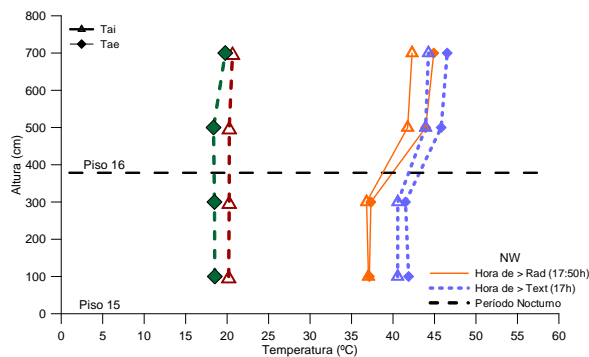


Figura 4.38 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 1 (NW).

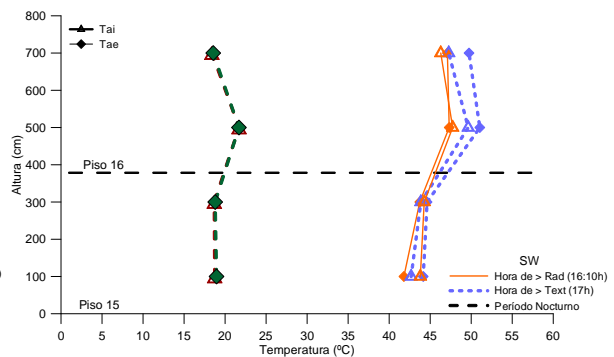


Figura 4.39 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 1 (SW).

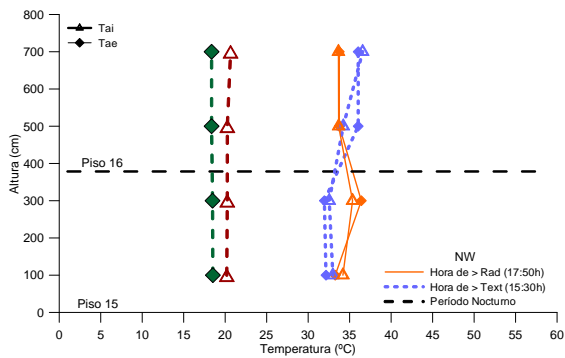


Figura 4.40 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (NW).

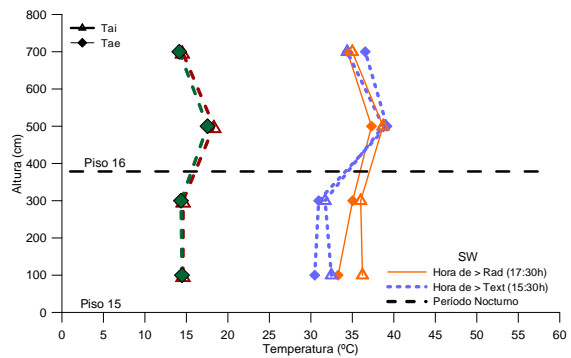


Figura 4.41 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (SW).

Na Figura 4.40, verifica-se uma inversão de perfil vertical de temperaturas, registando-se valores mais baixos junto da exaustão, isto é, junto da grelha superior, este fenómeno deve-se à acção do vento, estudo esse que será elaborado no parágrafo 4.2.2 iv).

O comportamento esperado é que, durante o dia, as temperaturas dos níveis superiores sejam mais elevadas, devido à ascensão do ar aquecido, do que as dos níveis inferiores. A variação da temperatura é mais ou menos acentuada em função da exposição solar. Exemplo disso é a fachada SE que apresenta gradientes de temperatura mais elevados, devido à maior incidência de radiação, Figura 4.42. Nesta fachada, verifica-se que a estratificação térmica não é muito acentuada.

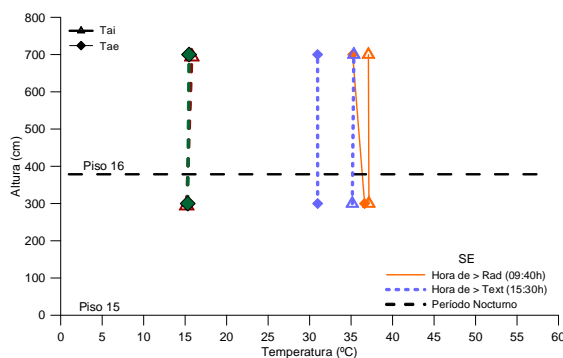


Figura 4.42 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu limpo, campanha 3 (SE).

ii) Dias úteis com céu nublado

Em dias úteis com céu nublado, é notória a ausência de estratificação na fachada NW, Figuras 4.43 e 4.45, tal como acontecia em dias úteis com Sol com a particularidade de se estender durante o dia e não apenas durante o período nocturno.

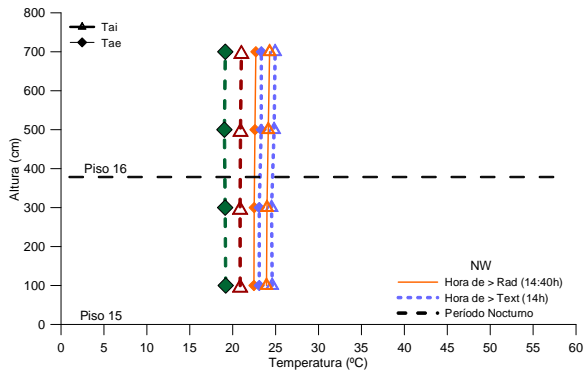


Figura 4.43 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (NW).

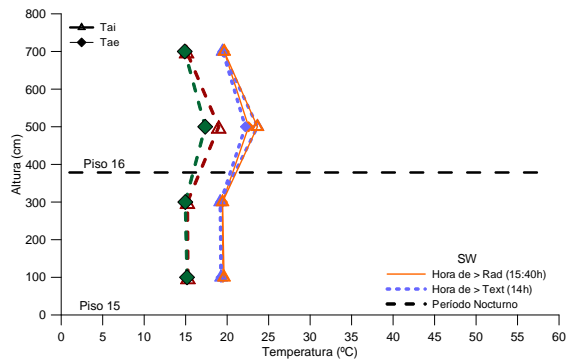


Figura 4.44 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (SW).

Volta a verificar-se que, na fachada SW, isso não é tão patente, Figuras 4.44 e 4.46. Observando-se a campanha 4, Figura 4.46, há uma redução de temperatura, do espaço entre o dispositivo e o vidro exterior, bastante acentuada durante a noite

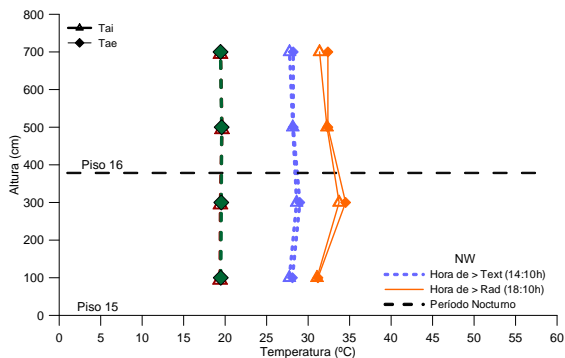


Figura 4.45 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (NW).

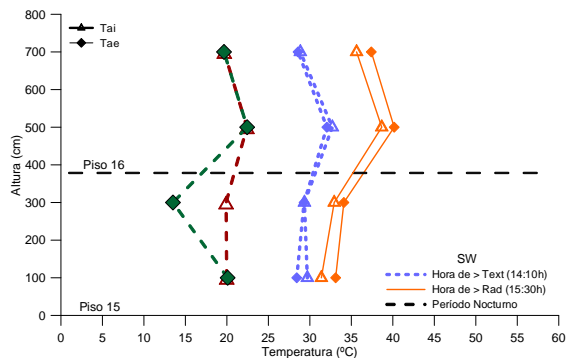


Figura 4.46 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (SW).

Em relação à fachada SE, contrariamente ao que se observou nos dias úteis com céu limpo, as temperaturas não são mais elevadas do que nas restantes fachadas, Figuras 4.47 e 4.48. Na campanha 1, referente ao mês de Setembro, nota-se que as temperaturas registadas durante o dia foram muito semelhantes às temperaturas assinaladas no período noturno.

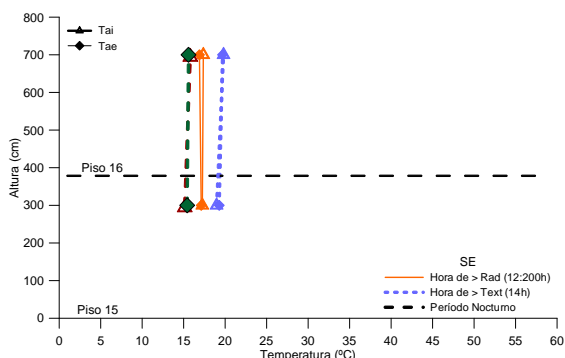


Figura 4.47 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 1 (SE).

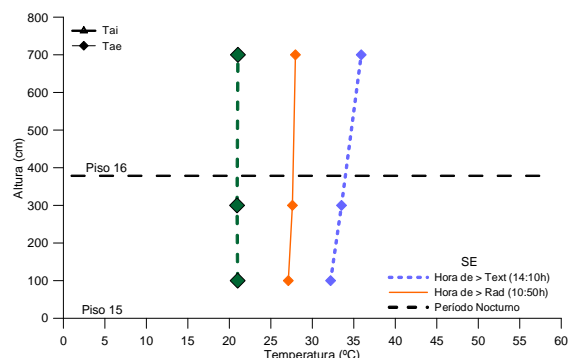


Figura 4.48 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 4 (SE).

Note-se que, relativamente ao Verão (campanha 4), na fachada SE, Figura 4.48, não foram representados os valores de temperatura entre o pano exterior e o dispositivo de sombreamento porque, provavelmente, o dispositivo de sombreamento estaria subido neste intervalo de tempo, tratando-se de um dia de céu nublado há, conseqüentemente, menor incidência de luz solar.

iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo

Tal como em dias úteis de céu limpo, em dias de fim-de-semana com Sol, volta a ser evidente a estratificação térmica durante a noite, na fachada NW, com a diferença de que também foi perceptível o mesmo fenómeno durante o dia, Figura 4.49. A fachada SW, Figura 4.50, em dias de fim-de-semana, revela um comportamento muito semelhante ao avaliado em dias úteis.

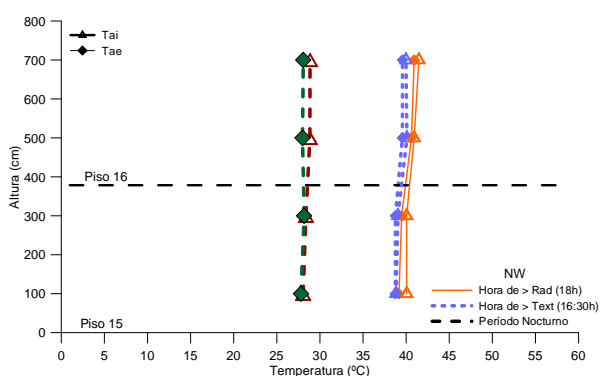


Figura 4.49 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 3 (NW).

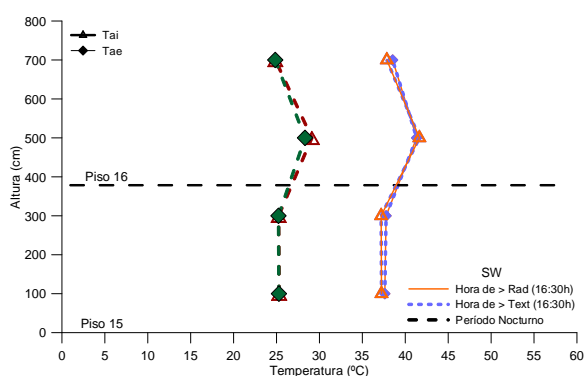


Figura 4.50 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 3 (SW).

iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado

Em dias de fim-de-semana com céu nublado, o comportamento dos perfis verticais de temperatura, em dias de céu nublado, é idêntico ao registado em dias de úteis com céu nublado, nas fachadas SE e NW, Figuras 4.51 e 4.53, respectivamente. Note-se que, na campanha 3 (campanha realizada em Maio), Figura 4.53, se verifica o que foi observado na campanha 1, final da época de Verão, em dias úteis com céu nublado. Isto é, as temperaturas durante o dia foram muito semelhantes às registadas durante a noite. O mesmo acontece no Inverno (campanha 2), Figura 4.51, mas de forma menos acentuada.

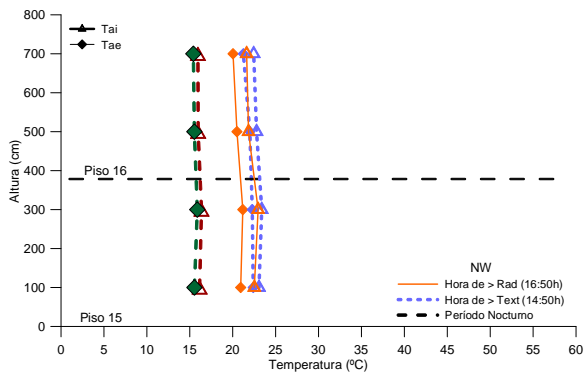


Figura 4.51 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 2 (NW).

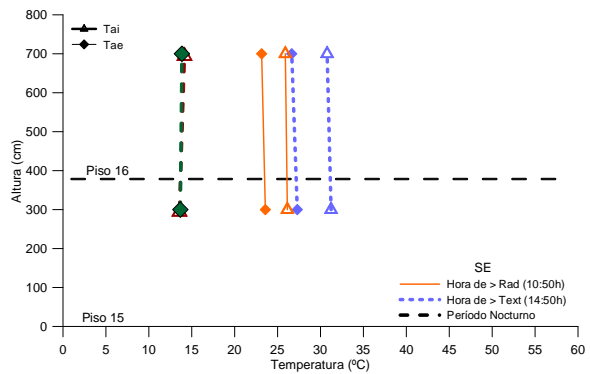


Figura 4.52 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 2 (SE).

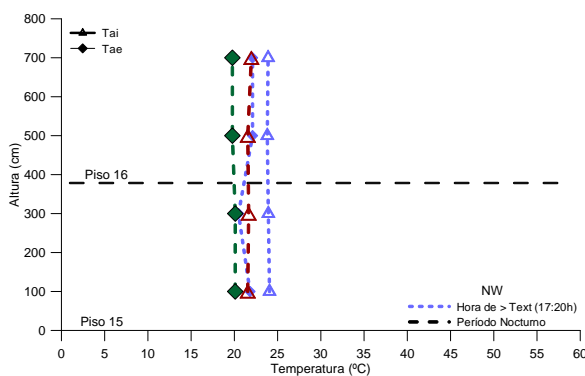


Figura 4.53 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (NW).

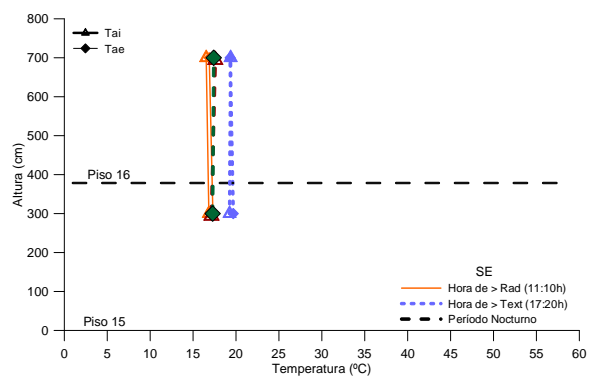


Figura 4.54 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (SE).

De referir que, no gráfico da Figura 4.53, não é representado o perfil vertical referente à hora de maior valor de radiação vertical, pois não foram obtidos quaisquer registos sobre este parâmetro, nesta campanha.

Relativamente à fachada SW, foi observado inversões no perfil, o que será explicado no parágrafo 4.2.2 iv).

4.2.2 Análise da acção do vento

O vento incidente nas fachadas influencia os caudais de ventilação e, por conseguinte, os valores de temperatura registados. A direcção do vento condiciona os coeficientes de pressão que dependem da geometria do próprio edifício. A acção do vento pode ser calculada através da diferença de pressões entre as aberturas inferior e superior.

i) Dias úteis com céu limpo

Constatou-se que a velocidade do vento, Figuras 4.55 e 4.56, atingiu valores consideráveis para meio urbano, geralmente mais altos do que 5 ms^{-1} , o que, associado a cada direcção, interage com o

edifício influenciando o desempenho das grelhas de ventilação da fachada. Nestes dias, as incidências pertencem, maioritariamente, a um intervalo entre 330° e 45°, o que representa o regime típico da costa Oeste portuguesa.

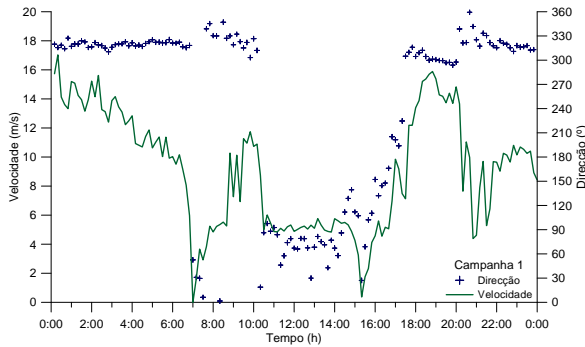


Figura 4.55 – Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 1.

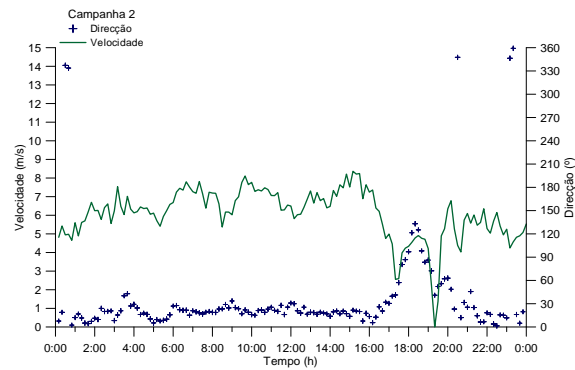


Figura 4.56 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 2.

Durante a noite, o diferencial positivo registado durante o Verão (campanha 4), na fachada SE, Figura 4.57, prende-se com o facto de o vento incidir de NW-NE, Figura 4.58. Analisando o comportamento do vento, associado ao estudo realizado sobre os coeficientes de pressão, concluiu-se que a fachada NE, os coeficientes de pressão são positivos até às 17:00 horas e é possível que o fluxo de ar tenha circulado pela fachada SE até à fachada virada a SW. A fachada SW revela menores coeficientes de pressão, pelo que maior parte do ar sairá por esta fachada, isto porque o caudal de ar segue sempre a direcção do menor coeficiente de pressão e, quanto maior é a quantidade de ar em circulação, menor é a diferença de temperatura entre o ar do canal e o espaço interior.

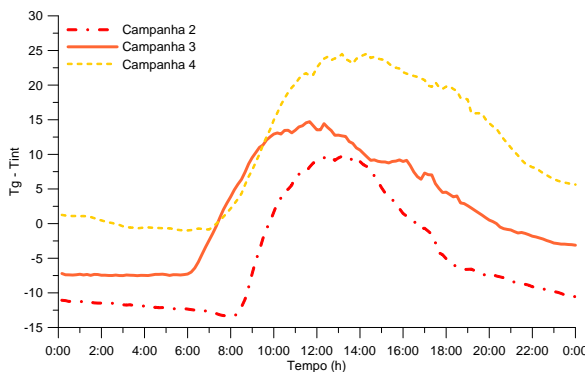


Figura 4.57 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias úteis com céu limpo, fachada SE.

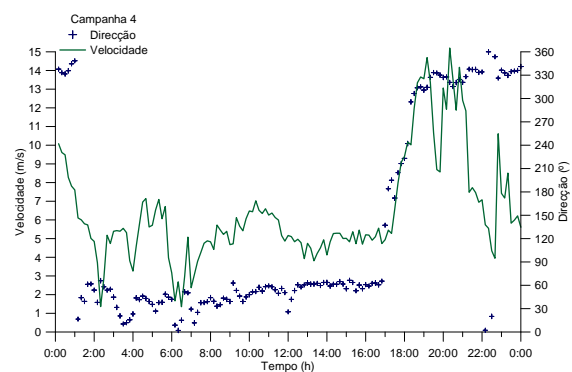


Figura 4.58 - Velocidade e direcção do vento em dias de úteis de céu limpo, campanha 4.

ii) Dias úteis com céu nublado

Em dias de céu nublado, o efeito da radiação solar é menos significativo do que em dias com Sol, sendo a contribuição da variação de pressão do vento mais notória na circulação do ar na fachada.

No Inverno, campanha 2, é notória a ausência de estratificação quer de dia quer de noite, na fachada NW, Figura 4.59. Tal facto pode dever-se à acção do vento que manteve, de forma constante, incidência de N e valores de velocidade aproximadamente entre os 0 ms^{-1} e 6 ms^{-1} , Figura 4.60.

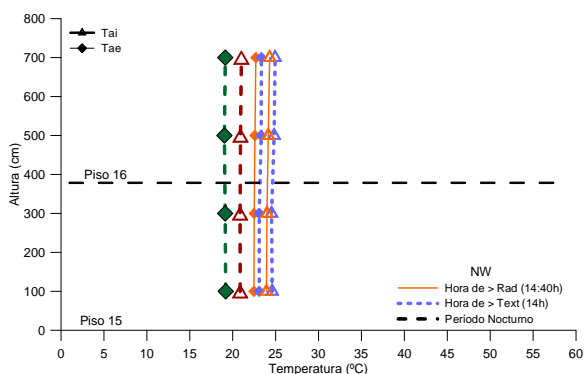


Figura 4.59 - Perfil vertical de temperatura, dias úteis de céu nublado, campanha 2 (NW).

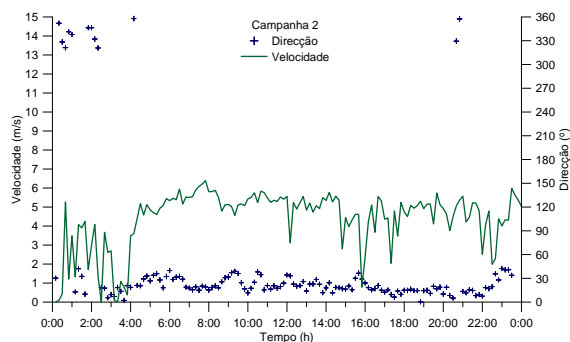


Figura 4.60 - Velocidade e direcção do vento em dias úteis de céu nublado, campanha 2.

iii) Dias de fim-de-semana com céu limpo

Verificou-se, na campanha 2, perfis verticais uniformes entre as 10:00 e as 13:30 horas, Figura 4.61. Nesse período de tempo, foi evidente que a incidência do vento de ESE, Figura 4.62.

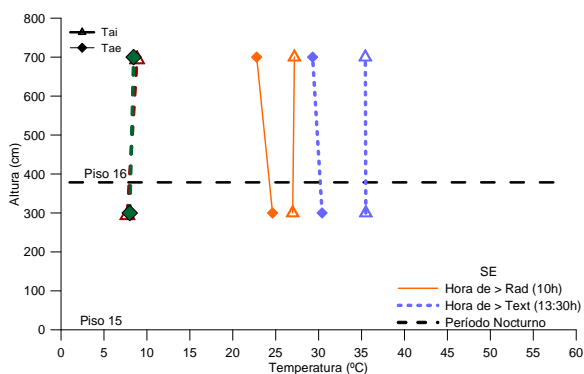


Figura 4.61 - Perfil vertical de temperatura, dias fim-de-semana de céu limpo, campanha 2 (SE).

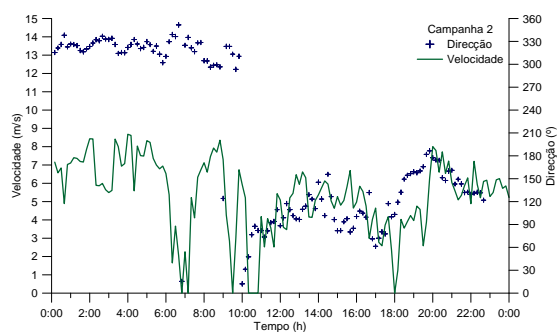


Figura 4.62 - Velocidade e direcção do vento em dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 2.

Observando a Figura 4.64, a velocidade do vento atingiu valores próximos do zero, durante a noite, consequentemente, diferenciais de pressão praticamente nulos. Ainda assim, a diferença temperatura entre o ar do canal e o espaço interior, nesse período de tempo, é positiva, na campanha 1 (final do Verão) Figura 4.63. Isto deve-se ao fenómeno de libertação de calor na fachada devido à inércia térmica.

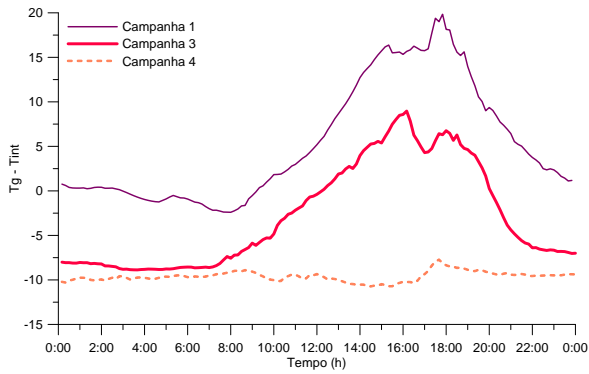


Figura 4.63 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu limpo, fachada SW.

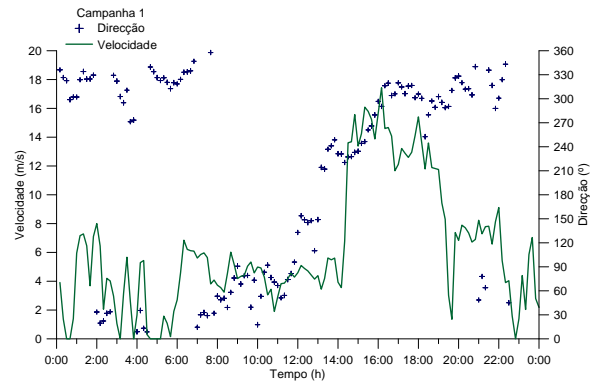


Figura 4.64 - Velocidade e direcção do vento em dias de fim-de-semana de céu limpo, campanha 1.

iv) Dias de fim-de-semana com céu nublado

Durante o dia, entre as 8:00 e as 18:00 horas sensivelmente, na fachada SE, a campanha 3 apresenta valores positivos relativamente à diferença de temperatura entre o ar do canal e o espaço interior, isto é, o ar do canal mais quente do que o espaço interior, Figura 4.67. Nas fachadas SW e NW, Figuras 4.65 e 4.66, isso não se verifica. Este facto poderá indiciar ausência de ventilação eficiente. Analisando o comportamento do vento, verificou-se que, neste dia, no intervalo de tempo em que se verificou o referido diferencial positivo, o vento incidia com direcções entre os 180 e 240°, Figura 4.68. A fachada SE revelou coeficientes de pressão negativos, pelo que é por aqui que o ar saiu para o exterior. Na fachada SW, obtiveram-se menores valores de coeficiente de pressão, desta forma, o fluxo de ar terá tendência a deslocar-se para esta fachada.

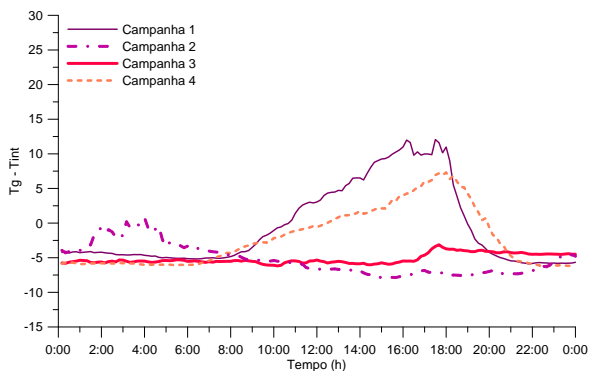


Figura 4.65 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu nublado, fachada SW.

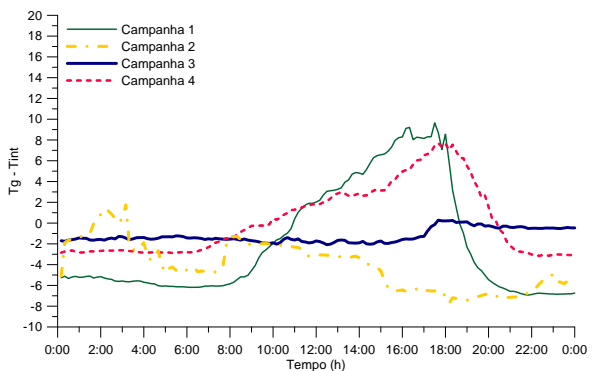


Figura 4.66 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu nublado, fachada NW.

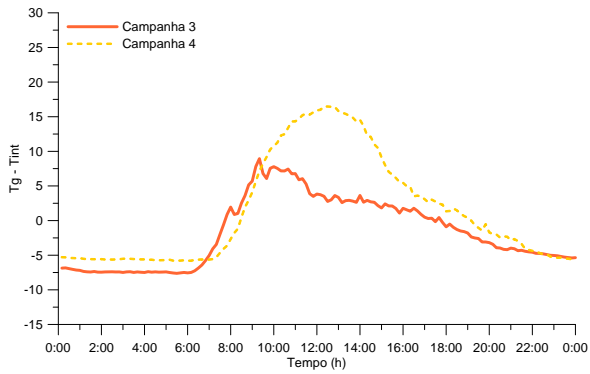


Figura 4.67 - Diferença de temperatura entre o ar do canal e o interior do edifício em dias de fim-de-semana com céu nublado, fachada SE.

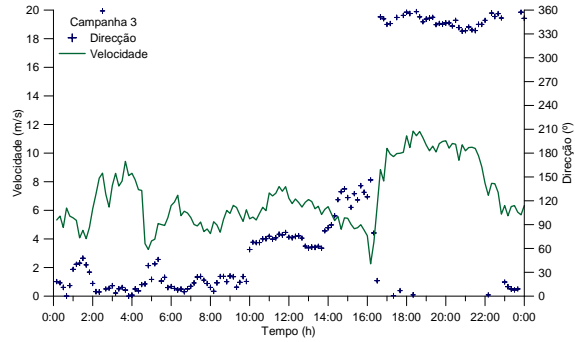


Figura 4.68 - Velocidade e direção do vento em dias de úteis de fim-de-semana limpo, campanha 3.

Note-se que, na fachada SE, durante a noite, se atingiu valores de velocidade mais baixos, Figura 4.67, e isso traduz-se em menores caudais de ventilação.

Verifica-se, na Figura 4.69, uma inversão no perfil vertical de temperatura. A temperatura aumenta até ao nível 3 e depois baixa no nível 4. Este facto deve-se ao registo de menores valores de temperatura junto às grelhas de exaustão. Isto é, através da contribuição quer da radiação, quer do vento, o ar do canal aquece, a temperatura vai aumentando, e o fluxo de ar é ascendente sendo que, no topo, pode haver uma recirculação de ar. O ar, que entra pela abertura superior, arrefece o que já existe na parte de cima do canal, isto é, o efeito térmico faz com que o ar se mantenha no topo do canal e, como não é atingido um diferencial de pressão suficiente, o fluxo de ar não desce. A pressão ali criada é suficiente para bloquear a recirculação no topo, portanto a temperatura diminui nesse espaço.

A Figura 4.70 representa a velocidade e direção do vento cuja incidência foi, predominantemente, entre 200 e 238°, indicando que o ar entra pela lateral do edifício, fachada SW, e saiu pela fachada SE, a qual apresentou valores negativos de coeficiente de pressão.

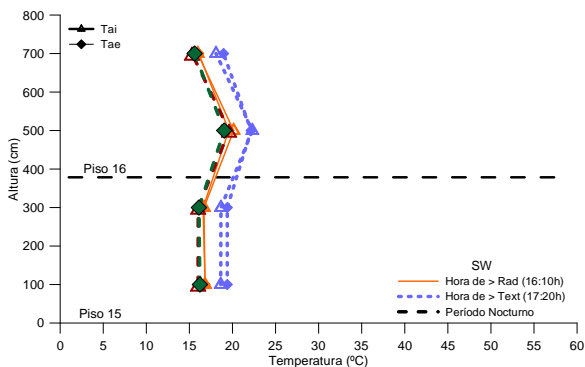


Figura 4.69 - Perfil vertical de temperatura, dias de fim-de-semana de céu nublado, campanha 3 (SW).

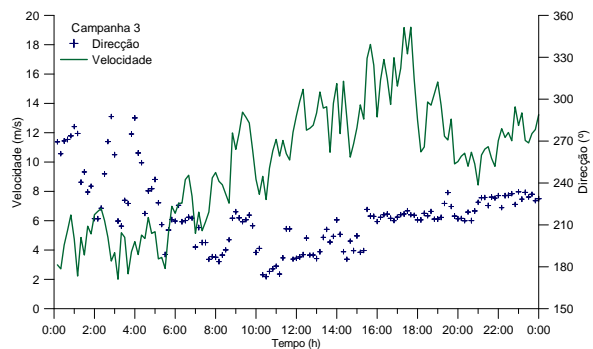


Figura 4.70 - Velocidade e direção do vento em dias de úteis de fim-de-semana nublado, campanha 3.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

As fachadas de dupla pele são elementos construtivos que podem adoptar variadas tipologias – diferentes combinações de tipo de ventilação, geometria e fluxo de ar na cavidade -, e que têm ganho grande popularidade nos últimos anos, por todo o mundo, principalmente por se tratar de uma tecnologia com um aspecto arquitectónico moderno alcançado pela transparência e leveza, e pela imagem de progresso e de prestígio que lhe estão associadas. Apesar de estar presente em diferentes países e climas, com a confirmação de alguns casos de sucesso de poupança energética em edifícios com diferentes utilizações e condições climáticas, a aplicação deste sistema de FDP não tem sido tão frequente como esperado, pois revela um elevado investimento inicial comparativamente a outras soluções existentes no mercado da construção.

Tem existido nos últimos anos grande interesse em investigar mais sobre o comportamento das fachadas de dupla pele. No entanto, continua a ser necessário aprofundar este estudo sobre o comportamento térmico deste tipo de elementos, quer em termos experimentais, quer através de simulações numéricas e avaliar a relação custo e benefício deste tipo de solução a curto e a longo prazo. O comportamento das FDP em condições reais de funcionamento merece especial importância por permitir fornecer informação importante sobre a forma como as FDP se comportam em edifícios pós-ocupação e como os ocupantes interagem com elas. Este conhecimento deverá atender, de forma particular, em casos mais críticos como são as fachadas naturalmente ventiladas em climas onde a estação quente é a mais condicionante, capaz de comprometer o conforto dos ocupantes dos edifícios em causa.

Neste contexto, definiu-se como principal objectivo da presente dissertação, o estudo do comportamento térmico do sistema de fachada de dupla pele do Edifício H do Office Park Expo, situado no Parque das Nações em Lisboa. Este estudo tem um carácter experimental e foi realizado em condições reais de funcionamento. A realização de campanhas de monitorização, nas duas principais quatro estações do ano, Verão e Inverno, proporcionou uma melhor percepção do desempenho deste tipo de fachadas e confirmou a importância da selecção da tipologia e do nível de ventilação no seu comportamento.

Após a análise dos resultados obtidos no presente estudo, torna-se possível apresentar as seguintes conclusões gerais acerca do estudo realizado:

A variação da temperatura é bastante condicionada pela exposição solar. A fachada orientada a SE é a que tem incidência directa da radiação solar durante a maior parte do dia sendo que no Verão é mais notório uma intensidade mais forte, isto porque, é a altura do ano em que há mais dias de céu limpo. E é, em dias de céu limpo, que a radiação solar no plano vertical é maior. E, na fachada orientada a SW, a radiação solar teve um maior contributo no período da tarde, tendo apresentado maiores temperaturas do que a SE, o que se justifica pelo facto de associar o efeito da radiação solar à componente da temperatura exterior que é, por norma, mais alta durante a tarde. A fachada virada

a NW é a que recebe menor quantidade de radiação solar directa, o que justifica os valores mais reduzidos de temperaturas registados face às outras fachadas.

Durante o dia, os perfis de temperatura horizontais e verticais foram maioritariamente influenciados pela radiação solar incidente, atingindo-se geralmente valores de temperatura mais elevados no pano envidraçado do lado exterior. Por vezes é notório, no perfil vertical de temperaturas, uma diminuição dos valores de temperatura junto às grelhas superiores, de exaustão quando seria expectável que a temperatura do ar aumente em altura, da cota do pavimento para o topo. No entanto, é importante avaliar o edifício como um todo e perceber qual é o sentido que o fluxo de ar assume. Para tal, analisou-se os valores dos coeficientes de pressão em cada fachada, dependente também da direcção que o vento toma e concluiu-se que o comportamento do fluxo de ar tem um contributo significativo no que diz respeito à variação da temperatura do ar no canal

Conclui-se que a aplicação de dispositivos de sombreamento entre os panos envidraçados proporciona menores valores de temperatura no canal mais interior, comparativamente ao canal mais exterior. Percebe-se que o dispositivo de sombreamento no interior da cavidade, entre os panos envidraçados, contribui significativamente para o desempenho térmico da fachada de dupla pele e, por isso, é importante uma escolha cuidada quer do material, quer da posição do mesmo. Também, o facto de o vidro interior se caracterizar por ter baixo coeficiente de transmissão térmica, implica uma redução à passagem de calor da caixa-de-ar para o interior do edifício.

As fachadas envidraçadas orientadas a Sul terão maior incidência de radiação solar. Mesmo com a redução dos ganhos solares através da aplicação de uma fachada de dupla pele, as fachadas com esta orientação continuam a requerer uma maior quantidade de energia para arrefecimento do espaço interior, durante todo o dia. Contrariamente ao que se passa com as fachadas orientadas a Sul, as fachadas orientadas a Norte assinalam uma menor incidência de radiação solar e isso permitirá uma poupança no consumo anual de energia para arrefecimento do ambiente interior.

Tendencialmente, as maiores diferenças de temperatura entre o ar no canal e o ambiente interior foram atingidas durante o Verão, em dias de céu limpo, na fachada SE, por terem sido registados nesta estação, e fachada, os valores mais elevados de radiação solar em plano vertical.

Refira-se ainda que foi bastante útil a aquisição de dados, em dias de fim-de-semana, porque nestes dias o sistema de climatização não foi activado e isso permitiu reunir condições necessárias à avaliação do desempenho da fachada, sem a influência do sistema de ar condicionado. Verificou-se que, em casos em que de fim-de-semana o céu se encontrava encoberto, o compartimento do edifício com fachada orientada a Norte atingiu os menores valores de temperatura interior quer no Inverno, quer no Verão.

Na campanha 2, referente ao Inverno, registaram-se valores de temperatura no interior da fachada superiores à temperatura do ar exterior, tanto ao longo do dia como durante a noite, bem como durante as restantes estações do ano. O gradiente de temperatura está directamente relacionado com a radiação solar incidente, ou, para o período nocturno, com a inércia térmica dos componentes

da fachada. A inércia térmica dos materiais constituintes da FDP permite que, mesmo durante a noite, os valores de temperatura interior da fachada se mantenham superiores aos registados no exterior.

Verificou-se que, durante a noite, os valores de temperatura registados na fachada têm um comportamento semelhante aos valores de temperatura do ar exterior e, durante o dia, os valores de temperatura mostraram-se bastante correlacionados com a radiação solar incidente na fachada.

Concluiu-se que a diferença entre a temperatura exterior e interior foi máxima durante a estação de Inverno, por terem sido registados nessa estação do ano, os valores mais elevados de radiação solar em plano vertical.

Para além da radiação incidente, em sistemas de fachada de dupla pele com ventilação natural, o vento também tem influência no desempenho deste sistema de fachadas. A acção do vento define a circulação do ar e é um parâmetro complexo que resulta da combinação da pressão local nas aberturas da fachada, função do coeficiente de pressão (C_p) e da velocidade. Este parâmetro, C_p , é dependente da orientação fachada em questão e do ângulo de incidência do vento. O diferencial de pressões gerado indica o sentido do caudal de ventilação. De referir que, quando a ventilação natural não é eficiente as temperaturas no interior do canal podem atingir valores bastante elevados, tendo-se registado no presente estudo temperaturas máximas superiores a 55°C . Estas elevadas temperaturas podem impedir o aproveitamento da ventilação dos espaços e condicionar o conforto térmico da FDP, pelo que é bastante importante a garantia de uma eficiente ventilação do espaço de ar da fachada de dupla pele. No entanto, é importante referir que os dias tipo analisados corresponderam às situações mais críticas nas estações do ano mais extremas de Portugal pelo que, em termos médios, o valor de temperatura no espaço de ar será consideravelmente inferior. Para além disso, mesmo em dias de céu limpo na estação de Verão durante o fim-de-semana, e logo sem o accionamento do sistema de climatização, apesar de se atingirem temperaturas no espaço de ar da fachada de dupla pele de 42°C verificaram-se temperaturas ambiente interior de $27,5^{\circ}\text{C}$, ou seja cerca de $2,5^{\circ}\text{C}$ superiores a 25°C que corresponde à temperatura de referência de conforto regulamentar na estação de Verão (REH, 2013) e que foi também adoptada como temperatura de set point nos dias úteis. Pelo que se pode concluir que a fachada de dupla pele teve um comportamento razoável, porque apesar da temperatura no espaço de ar ter atingido em alguns dias valores bastante elevados as repercussões ao nível da temperatura ambiente interior em regime livre foram relativamente pouco pronunciadas, que estará certamente relacionado com o facto do pano interior da fachada não ser totalmente envidraçado e ter uma área opaca com uma resistência térmica mais elevada.

Durante a noite, quando já não existe variação de pressões por efeito térmico, por a temperatura do ar do canal ser próxima da temperatura exterior, o caudal de ventilação continua a existir, devendo-se à influência que o vento exerce, originando uma diferença de pressões entre as grelhas inferiores e superiores. As grelhas de admissão e exaustão de ar da fachada podem ser automatizadas de forma a possibilitar que o edifício responda da melhor forma possível às solicitações variáveis do ambiente exterior. Assim, é fundamental garantir uma adequada ventilação do canal para que se possa impedir

o calor excessivo. Conclui-se que, quando os caudais de ar são pouco significativos, por ventilação natural na fachada, existe uma tendência para valores de temperatura consideravelmente mais elevados.

Finalizando, o sistema de fachadas de dupla pele são elementos construtivos muito promissores no que diz respeito a melhorar o comportamento térmico dos edifícios com fachadas envidraçadas permitindo uma poupança de energia despendida em equipamentos de climatização. Contudo, a elevada complexidade, rigor e exigência relativamente a uma tipologia projectada sem qualquer erro, que possa comprometer todo o bom desempenho do sistema, e o investimento inicial podem afastar a maior integração desta solução no mercado da construção. O desenvolvimento de uma FDP deve ter em conta o tipo de utilização do edifício, para que se disponha de dados acerca dos ganhos internos e estudar convenientemente as trocas de calor e a zona onde se insere. Assim, conseguirá ter-se um sistema adequado às condições climáticas e reduzir o consumo de energia por meio de equipamentos de climatização do edifício.

5.2 Limitações e propostas de desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros do presente trabalho sugere-se averiguar o comportamento térmico do edifício seleccionado como caso de estudo a várias cotas, como o topo e a base, e assim conhecer melhor a influência da envolvente do edifício a diferentes níveis.

Seria conveniente fazer um estudo pormenorizado das características do vidro no desempenho da FDP. Para complementar o estudo sobre o tipo de vidro, seria pertinente investigar qual o material mais adequado a aplicar no dispositivo de sombreamento de acordo com o clima onde o edifício se insere e a orientação das fachadas. Estes parâmetros podem afectar em menor ou maior escala o funcionamento deste sistema de fachada. Para melhor complementar este estudo, poder-se-ia analisar valores de perdas e de ganhos de calor pela envolvente. Também seria interessante investigar, em que proporção, os materiais constituintes da fachada influenciam o seu comportamento térmico.

Seria também interessante elaborar um estudo sobre a influência que pode ter o sombreamento de outros edifícios ou elementos do próprio edifício, como é o exemplo de palas, no edifício com sistema de fachada de dupla pele.

É bastante evidente que o facto de não existir qualquer regulamentação sobre o desempenho de FDP limita a sua aplicação e, especialmente, o correcto aprovisionamento deste sistema de fachada. Como a elaboração do projecto se relaciona directamente com as condições climáticas do local, onde se insere o edifício, é essencial que, com base nos resultados obtidos no presente estudo, seja elaborado um repositório de princípios, normas de projecto para uma correcta aplicação de fachadas de dupla pele. Seria conveniente alargar esse repositório não só ao Sul bem como ao Norte da Europa, em países mais frios.

Para além da adopção de uma regulamentação para este tipo de sistema de fachadas, há também a necessidade de conduzir estudos de simulação energética, calibrados com os resultados obtidos experimentalmente. Desta forma, poder-se-ia adquirir de forma mais rápida parâmetros base de cálculos para adoptar em edifícios com diferentes configurações. Seria relevante elaborar um estudo sobre os valores de consumo de energia, na adopção deste sistema de fachada, em países com diferentes climas. Por último, sugere-se ainda por forma a complementar esse estudo, uma análise de custo-benefício da implementação de FDP em comparação com fachadas envidraçadas tradicionais.

Referências Bibliográficas

- Ahuja, R., Dalui, S. K., & Gupta, V. K. (2006). Unpleasant Pedestrian Wind Conditions Around Buildings, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7, No. 2, 147-154.
- Anđelković, A. S., Urosevic, G.B, Kljajic, M. & Ignjatović, M. G. (2014). Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin façade, *Energy and Buildings* 86, 766–781
- Baldinelli, G. (2009). Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system, *Building and Environment*, 44(6), 1107–1118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.005>
- Barbosa, S., Ip, K., & Southall, R. (2015). Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double façade under tropical climate conditions: The influence skin fac of key design parameters, *Energy & Buildings*, 109, 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.029>
- Barnaś, J. (2014). Double-Skin Façades – The Shaping of Modern Elevations – Technology and Materials, *Technical Transactions*, 7-A
- Blanco, J. M., Arriaga, P., Rojí, E., & Cuadrado, J. (2014). Investigating the thermal behavior of double-skin perforated sheet façades: Part A: Model characterization and validation procedure, *Building and Environment*, 82, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.007>
- Butera, F.M. (2005). Glass architecture: is it sustainable?, *International Conference: Passive and Low Energy Cooling 161 for the Built Environment*, Santorini, Grécia.
- Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2014). Calculation of overall thermal transfer value (OTTV) for commercial buildings constructed with naturally ventilated double skin façade in subtropical Hong Kong, *Energy & Buildings*, 69, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.049>
- Crespo, A.M.L. (n.d.) History of the Double Skin Façades, Universidade de Harvard, Cambridge, Estados Unidos da América
- Dickson, A. (2004). Modelling Double-Skin Facades, *Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Sistemas de Energia e Meio Ambiente*, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Strathclyde, Glasgow, Reino Unido.
- FACAL (2006). Fachada Norfin, *Planta da fachada*.
- FACAL (n.d.) Campanhas de monitorização da fachada dupla, Office Park Expo, Edifício H, *Projecto de investigação e desenvolvimento*, n.d.
- FACAL (2017), <http://www.facal.eu/pt/home/home/>, consultado em Setembro de 2017.

Faggembauu, D. (2006). Heat transfer and fluid-dynamics in double and single skin facades, *Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Industrial*, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha.

Goethe Institut (2017), <https://www.goethe.de/en/kul/arc/20430390.html>, consultado em Abril de 2017.

Gomes, M. G. (2010). Comportamento térmico de fachadas de dupla pele: Modelação numérica e análise experimental, *Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Google. (2017). Concursos de Projecto.Org, *Portal e Revista Electronica, Concursos de Arquitectura e Urbanismo*, <https://concursosdeprojeto.org/>, consultado em Setembro de 2017.

Google. (2017). Google Maps. <http://maps.google.pt/>, consultado em Abril de 2017.

Google. (2017). Google Images. <https://images.google.com/>, consultado em Setembro de 2017.

Gratia, E. & Herde, A. (2007). Greenhouse effect in double-skin façade, *Energy and Building*, 39, 2, 199-211. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001836>

Herde, D., & Gratia, E. (2006). Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?, *Energy & Buildings*, 39, 605–619. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.002>

Huckemann, V. (2009). Acoustic comfort in office buildings with double skin glass façades, *Bauphysik*, 305–312 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bapi.200910040/full>

Ji, Y., M. Cook, V. Hanby, D. Infield, D. Loveday & L. Mei. (2007). Cfd modelling of double-skin façades with venetian blinds, *Proceedings: Building Simulation 2007*, Reino Unido. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p753_final.pdf

Kalyanova, O. (2008). *Modelling and Experimental Investigations Double-Skin Facade – Modelling and Experimental Investigations of Thermal Performance*, Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade de Aalborg, Dinamarca.

Lee, E., Selkowitz, S., Bazjanac, V., Inkarojrit, V., & Kohler, C. (2002). High-Performance Commercial Building Façades. Building Technologies Program, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Universidade da Califórnia, Estados Unidos da América <http://escholarship.org/uc/item/7d30b3rd>

Lopes, M. (2008), Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da acção do vento sobre edifícios, *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Marques da Silva, F., & Gosselin, J. (2005). Integrating Environmentally Responsive Elements ind Buildings Subtask A: Responsive Building Elements Advanced Integrated Façades, *IEA – ECBCS – ANNEX 44*,

- Marques da Silva, F., & M. G. Gomes (2008). Gap inner pressures in multi-storey double skin facades, *Energy & Buildings*, 40, 1553–1559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.014>
- Marques da Silva, F., (2013). *Ventilação Natural: Acção do Vento*, Jornadas de Engenharia de Climatização, LNEC, Lisboa.
- Marques da Silva, F., (2017). *Aerodinâmica: Camada Limite Atmosférica*, Documento de apoio às aulas teóricas da Disciplina de, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Mendes, M.M., Pedro, J.O. (2017). *Quantificação de acções em edifícios de acordo com o Eurocódigo 1*, Documento de apoio às aulas teóricas da disciplina de Dimensionamento de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa
- Musa, B. T. (2016). Evaluating the Use of Double Skin Facade Systems for Sustainable Development, *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)*, 2 (2), 151–159.
- Norfin. (2012). *Office Park Expo*, Norfin Retrieved 2013. <http://www.norfin.es/pt/investimento-fundos/fundos-representativos/Office-Park-Expo/28/>
- Norma Portuguesa NP EN 1991-1-1, (2009) Eurocódigo 1. Ações em estruturas. Parte 1-1: Acções gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, *Termo de Homologação nº 517/2009-12-29, CT 115, IPQ*.
http://www.leca.pt/sites/default/files/euroc%C3%B3digo_1/Eurocodigo%201-Parte%201-1.pdf
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd edition, 264-274. Routledge, Taylor and Francis Group.
- Orme, M., Artin L., & Andrew W. (1998). *AIVC Technical Note 34*, Technical Note, Air Infiltration and Ventilation centre.
- Perino, M. (2008). State-of-the-art Review, *Responsive Building Elements Review*, 2A, Aalborg University, Dinamarca.
- Pinto, M., Marques da Silva, F., Freitas, V. P. (2005). Modelos Primitivos Para Ventilação Natural, *Construção Magazine - Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil*, 14, 33-38
- Poirazis, H. (2004). Double Skin Façades for Office Buildings, *Literature Review*, Universidade de Lund, Suécia.
- Poirazis, H. (2008). Single and Double Skin Glazed Office Buildings: Analyses of Energy Use and Indoor Climate, *Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil*, Universidade de Lund, Suécia.
- REH (2013). Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, Decreto-Lei nº 159/2013, de 20 de Agosto.

Rodrigues, A. M., Gomes, M. G., & Piedade, A. C. (2001). Wind Environment Around Building Complexes, *m*, 2–5. http://meteo.geo.uni.lodz.pl/icuc5/text/P_7_8.pdf

Rodrigues, A. M. (2014). *Ventilação: Ventilação natural*, Documento de apoio às aulas teóricas da disciplina de Física das Construções, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Sacht, H.M., Bragança, L., Almeida, M.G., & Caram, R. (2012). Sistemas de Fachadas inovadoras e conforto térmico: estudo em Portugal, *Revista Tecnológica*, 21, 13-25 <http://hdl.handle.net/1822/22259>

Saelens, D. (2002). *Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades*, Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica.

Saelens, D., Roels, S., & Hens, H. (2006). Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, *Building and Environment*, 43, 638–650. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.024>

Shen, C., & Li, X. (2016). Thermal performance of double skin façade with built-in pipes utilizing evaporative cooling water in cooling season. *Solar Energy*, 137, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.055>

Simiu, E., Scanlan, R. H., (1996). *Wind Effectes on Structures: Fundamentals and Applications to Design*, 3ed ed. New York: John Wiley & Sons, INC.

Silva, M.C.O.M. (2016), *Ventilação Natural de Edifícios*, Documento de apoio às aulas teóricas da disciplina de Conforto Ambiental em Edifícios, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Urbán, D., Roozen, N.B., Zatko, P., Rychtarikov, M., Tomasovic, P. & Glorieux, C. (2016). Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades, *Building and Environment*, 110, 148-160.

ANEXOS

A1.Determinação das categorias de terreno para a determinação da acção do vento

Tabela A1.1 - Categorias de terreno para a determinação da acção do vento.

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15

Figura A1.5.1– Zonas em paredes verticais

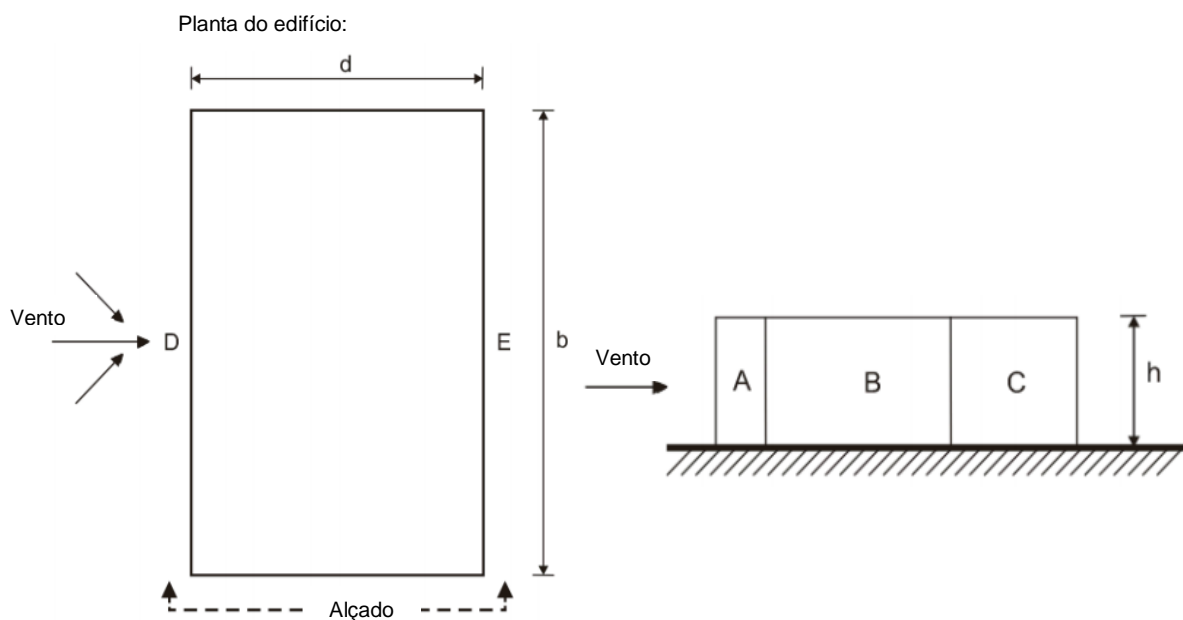


Tabela A1.2 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

A3. Caracterização das campanhas de monitorização

A3.1 Campanha 1

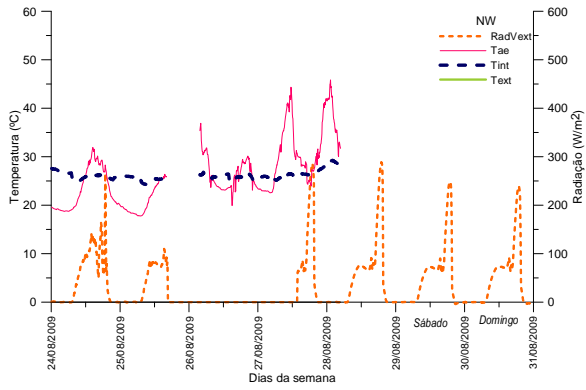


Figura A3.5.2- Semana 1 de 24.08.2009-30.08.2009,

Fachada NO.

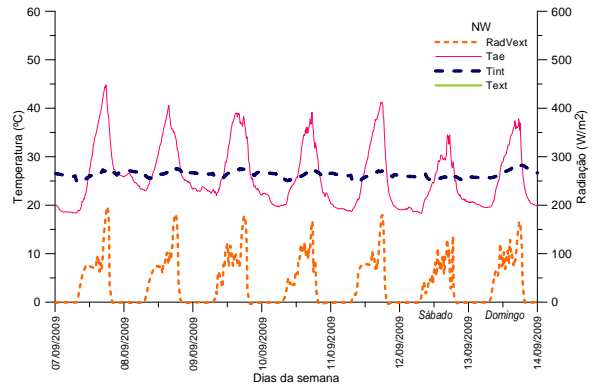


Figura A3.5.3 - Semana 2 de 07.09.2009 a 13.09.2009,

Fachada NO.

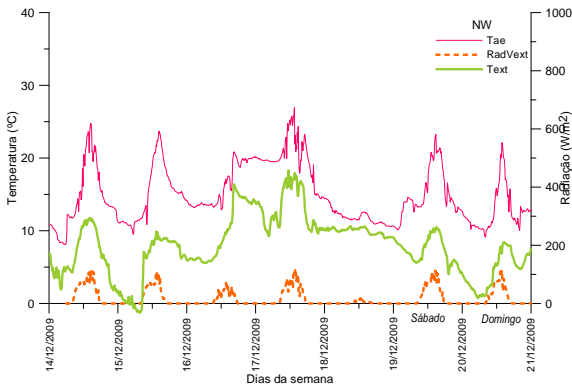


Figura A3.5.4 - Semana 3 de 14.09.2009 a 20.09.2009,

Fachada NO.

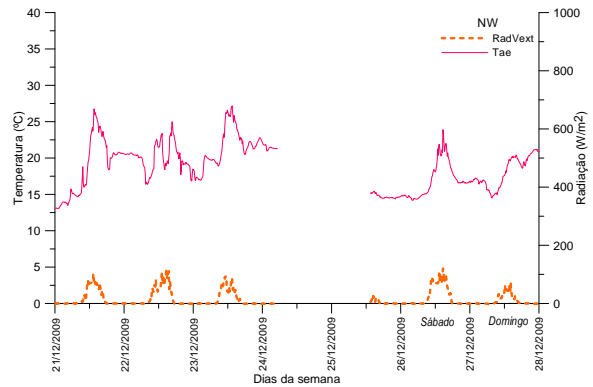


Figura A3.5.5 - Semana 4 de 21.09.2009 a 27.09.2009,

Fachada NO.

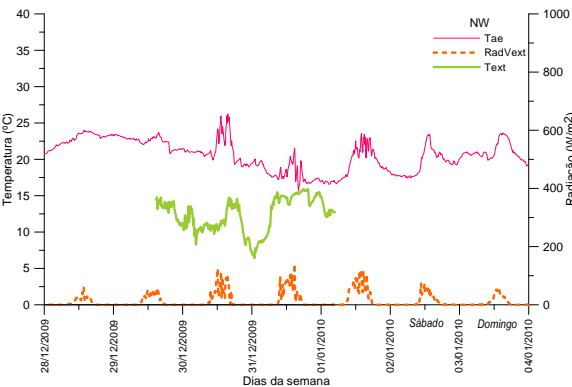


Figura A3.5.6 - Semana 5 de 28.09.2009 a 03.10.2009,

Fachada NO.

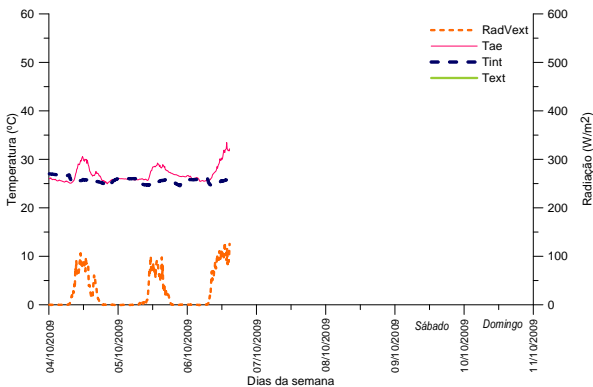


Figura A3.5.7 - Semana 6 de 04.10.2009 a 11.10.2009,

Fachada NO.

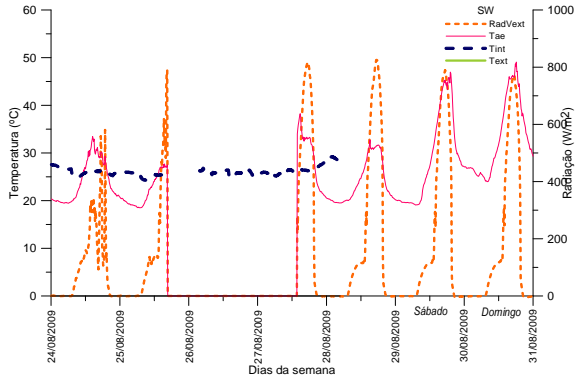


Figura A3.5.8 - Semana 1 de 24.08.2009-30.08.2009, Fachada SO.

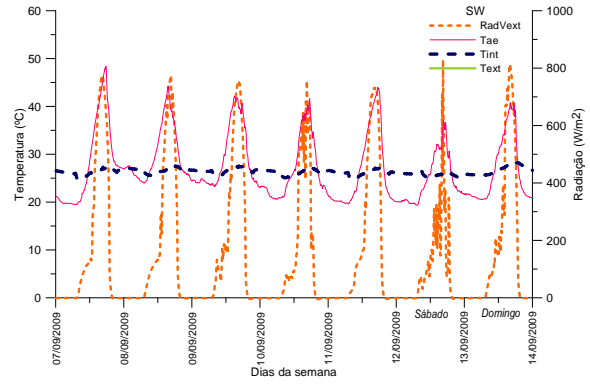


Figura A3.5.9 - Semana 2 de 07.09.2009 a 13.09.2009, Fachada SO.

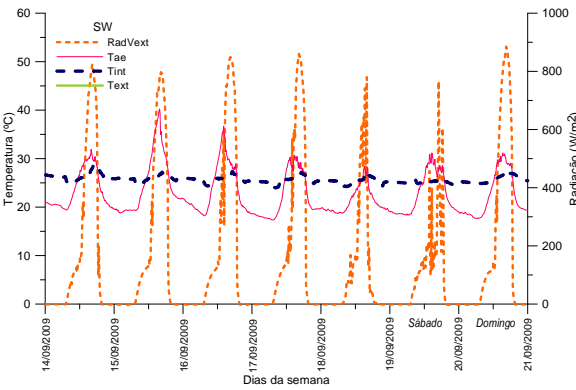


Figura A3.5.10 - Semana 3 de 14.09.2009 a 20.09.2009, Fachada SO.

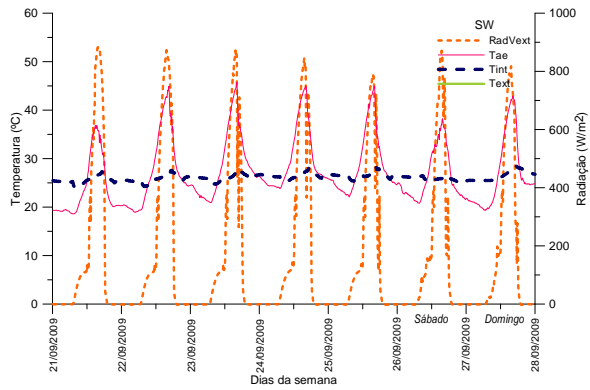


Figura A3.5.11 - Semana 4 de 21.09.2009 a 27.09.2009, Fachada SO.

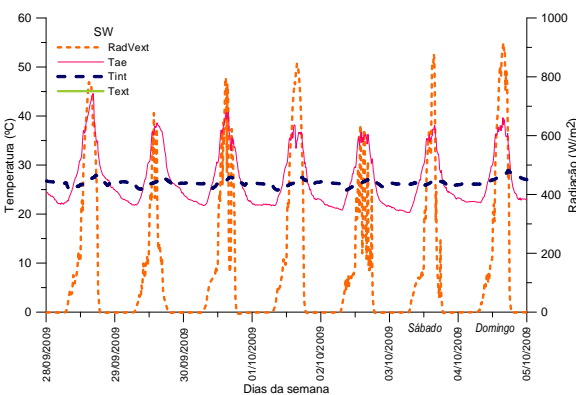


Figura A3.5.12 - Semana 5 de 28.09.2009 a 03.10.2009, Fachada SO.

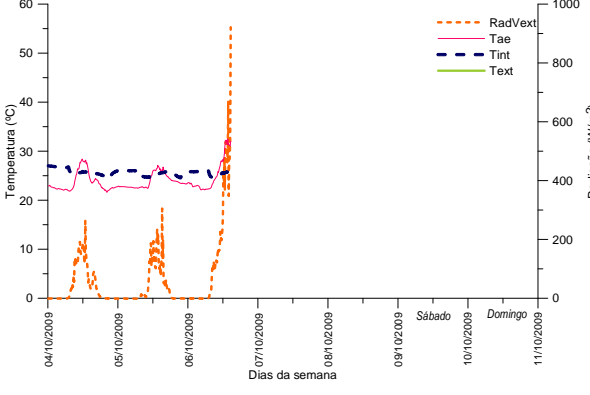


Figura A3.5.13 - Semana 6 de 04.10.2009 a 11.10.2009, Fachada SO.

A3.2 Campanha 2

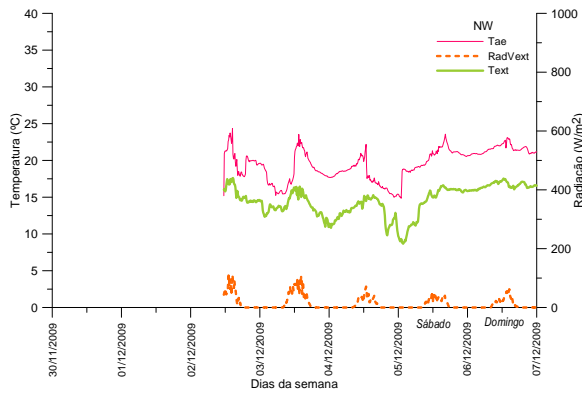


Figura A3.5.14 - Semana 1 de 30.11.2009 a 06.12.2009, Fachada NO.

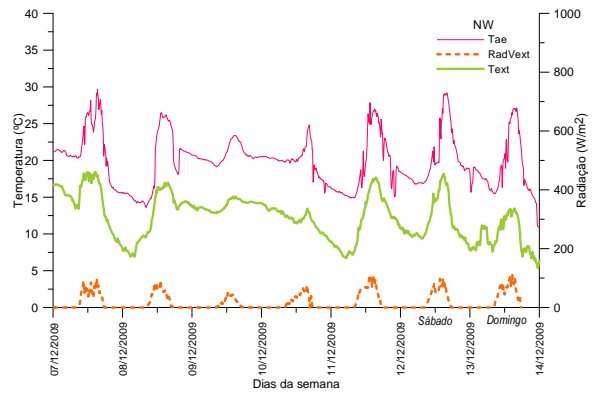


Figura A3.5.15 - Semana 2 de 07.12.2009 a 13.12.2009, Fachada NO.

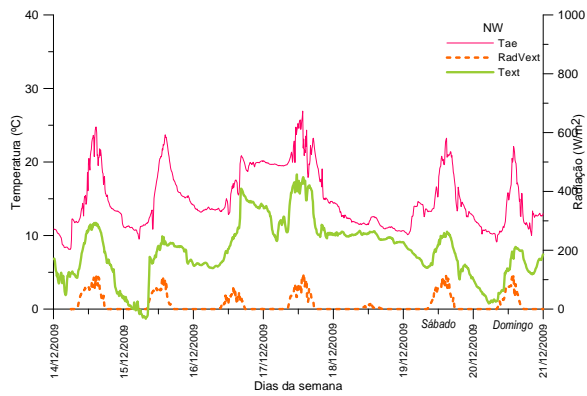


Figura A3.5.16 - Semana 3 de 14.12.2009 a 20.12.2009, Fachada NO.

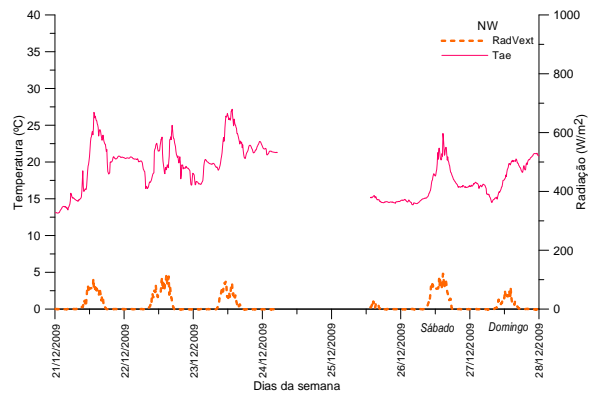


Figura A3.5.17 - Semana 4 de 21.12.2009 a 27.12.2009, Fachada NO.

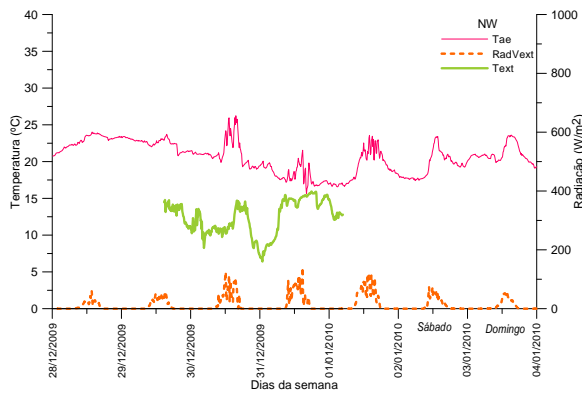


Figura A3.5.18 - Semana 5 de 28.12.2009 a 03.01.2010, Fachada NO.

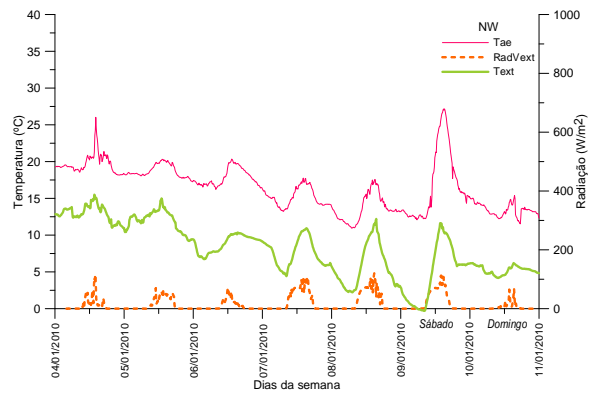


Figura A3.5.19 - Semana 6 de 04.01.2010 a 10.01.2010, Fachada NO.

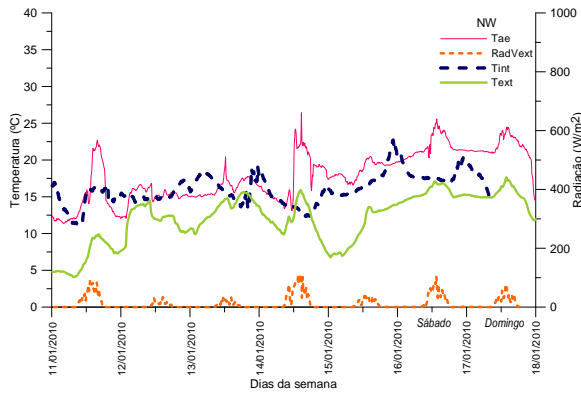


Figura A3.5.20 - Semana 7 de 11.01.2010 a 17.01.2010, Fachada NO.

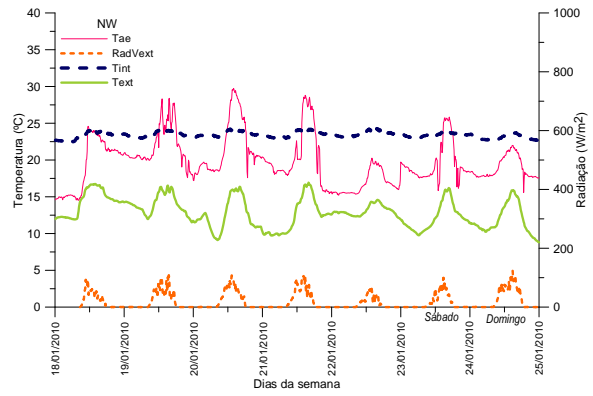


Figura A3.5.21 - Semana 8 de 18.01.2010 a 24.01.2010, Fachada NO.

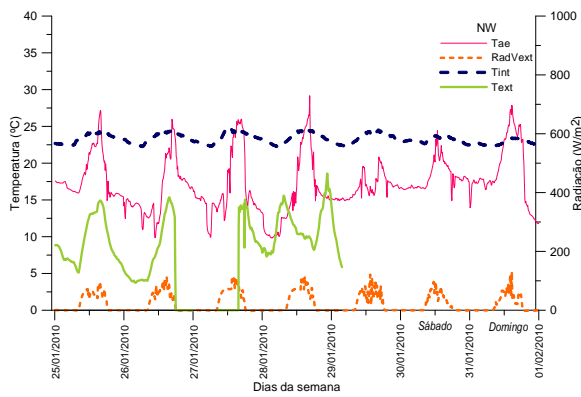


Figura A3.5.22 - Semana 9 de 25.01.2010 a 31.01.2010, Fachada NO.

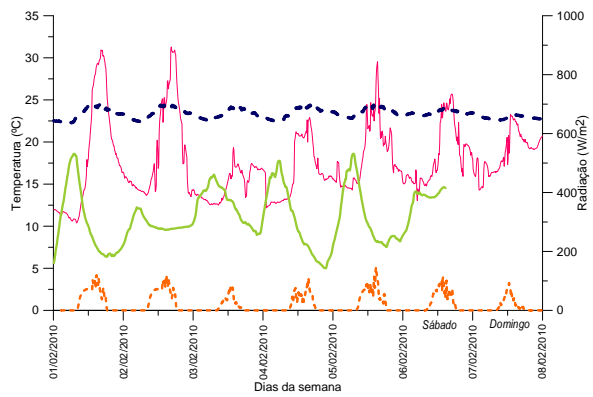


Figura A3.5.23 - Semana 10 de 01.02.2010 a 07.02.2010, Fachada NO.

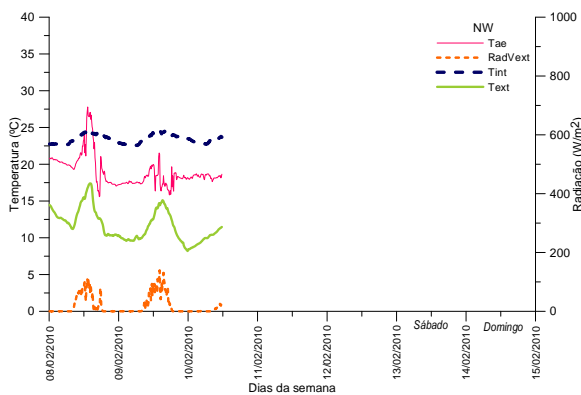


Figura A3.5.24 - Semana 11 de 08.02.2010 a 14.02.2010, Fachada NO.

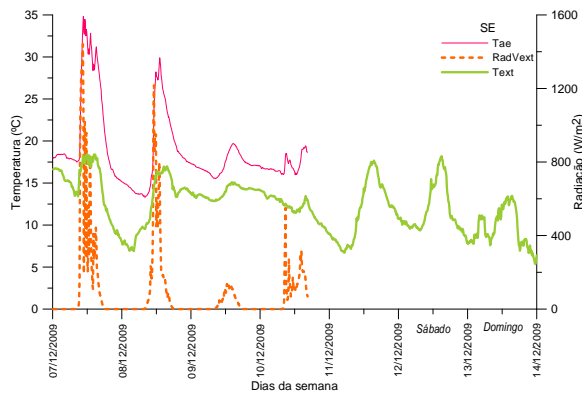


Figura A3.5.25 - Semana 1 de 07.12.2009 a 13.12.2009, Fachada SE.

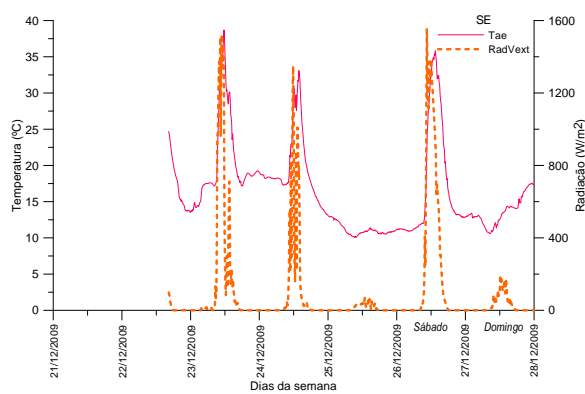


Figura A3.5.26 - Semana 2 de 21.12.2009 a 27.12.2009, Fachada SE.

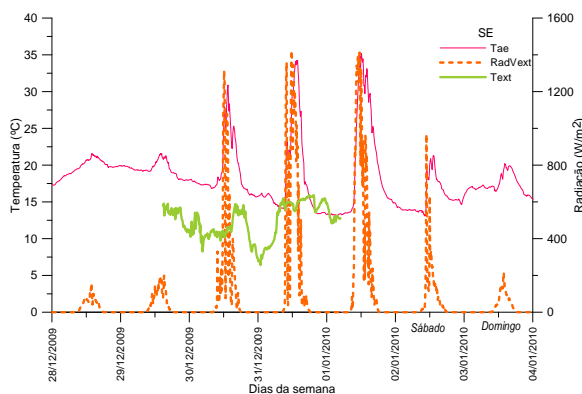


Figura A3.5.27 - Semana 4 de 28.12.2009 a 03.01.2010, Fachada SE.

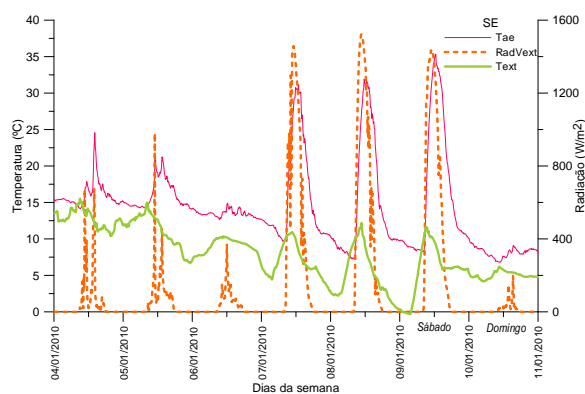


Figura A3.5.28 - Semana 5 de 04.01.2010 a 10.01.2010, Fachada SE.

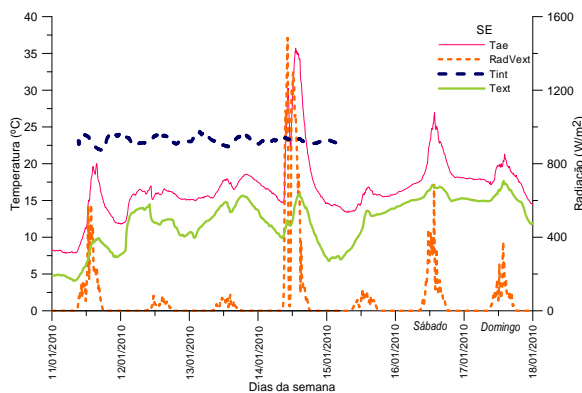


Figura A3.5.29 - Semana 6 de 11.01.2010 a 17.01.2010, Fachada SE.

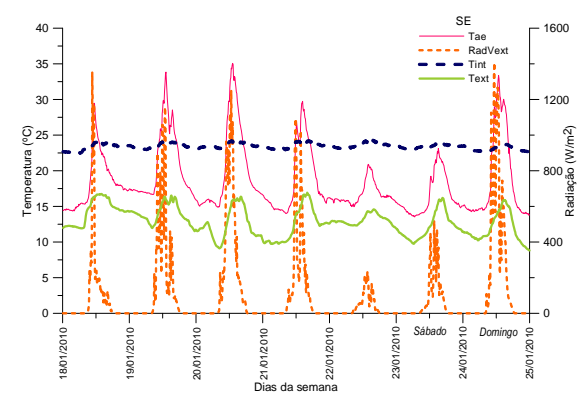


Figura A3.5.30 - Semana 7 de 18.01.2010 a 24.01.2010, Fachada SE.

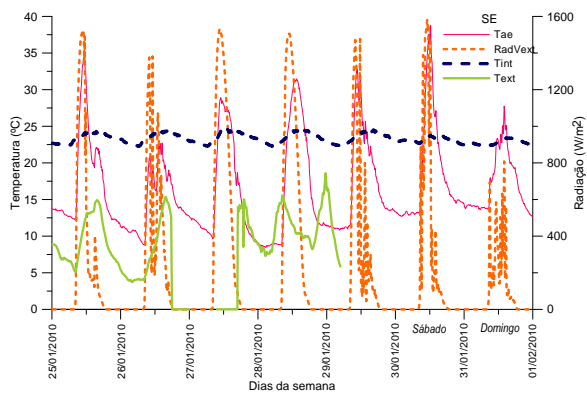


Figura A3.5.31 - Semana 8 de 25.01.2010 a 31.01.2010, Fachada SE.

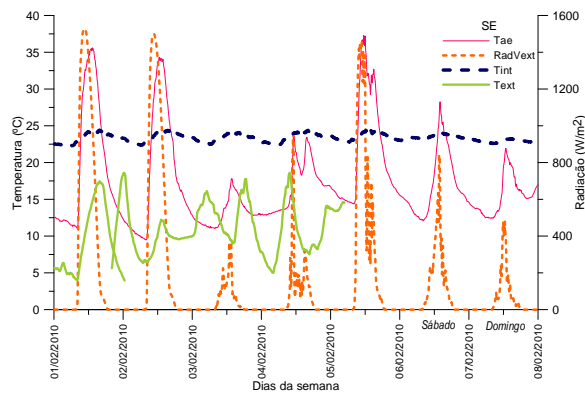


Figura A3.5.32 - Semana 9 de 01.02.2010 a 07.02.2010, Fachada SE.

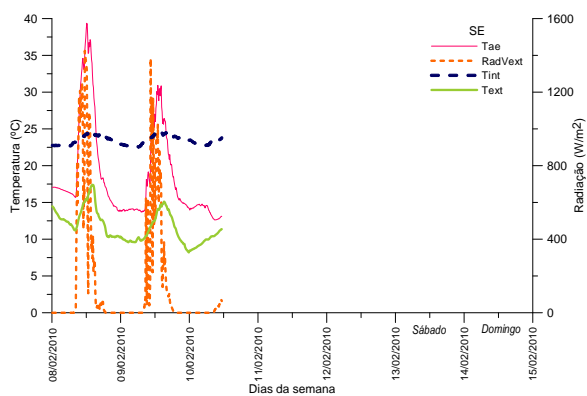


Figura A3.5.33 - Semana 10 de 08.02.2010 a 14.02.2010, Fachada SE.

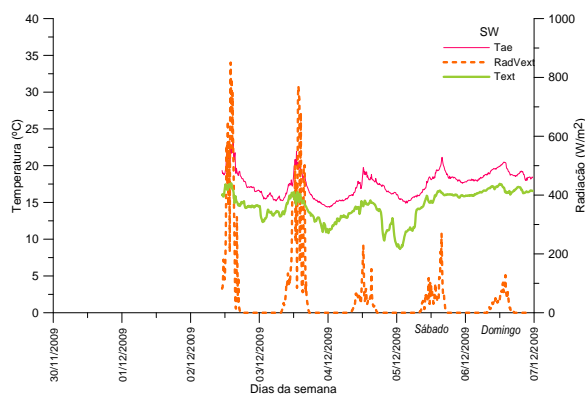


Figura A3.5.34 - Semana 11 de 30.11.2009 a 06.12.2009, Fachada SO.

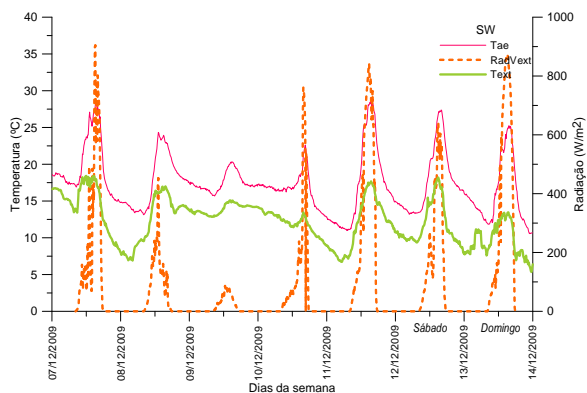


Figura A3.5.35 - Semana 1 de 07.12.2009 a 13.12.2009, Fachada SO.

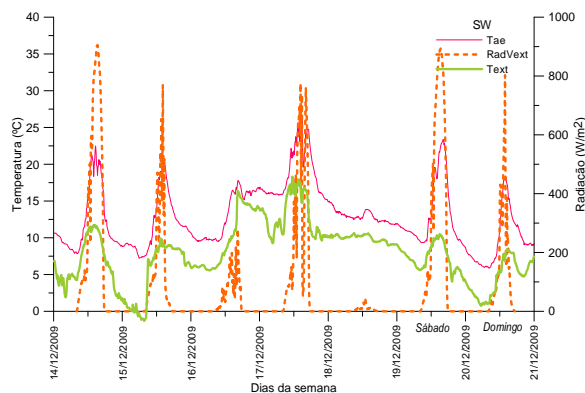


Figura A3.5.36 - Semana 2 de 14.12.2009 a 20.12.2009, Fachada SO.

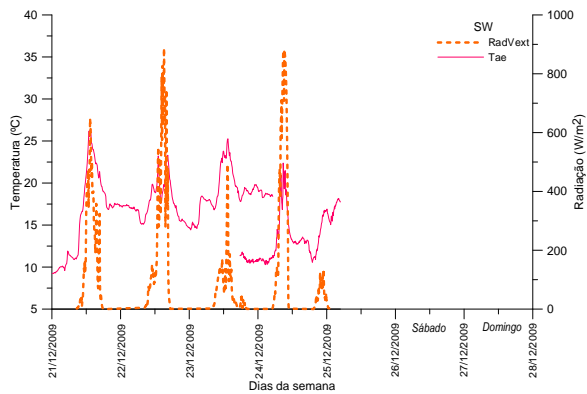


Figura A3.5.37 - Semana 3 de 21.12.2009 a 27.12.2009, Fachada SO.

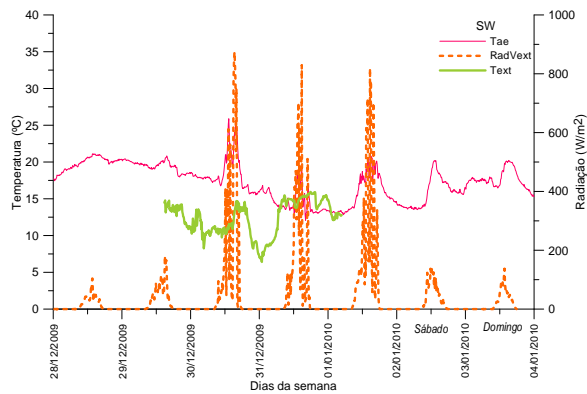


Figura A3.5.38 - Semana 4 de 28.12.2009 a 03.01.2010, Fachada SO.

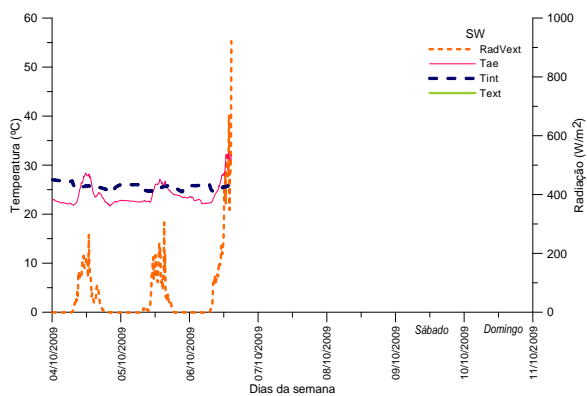


Figura A3.5.39 - Semana 5 de 04.01.2010 a 10.01.2010, Fachada SO.

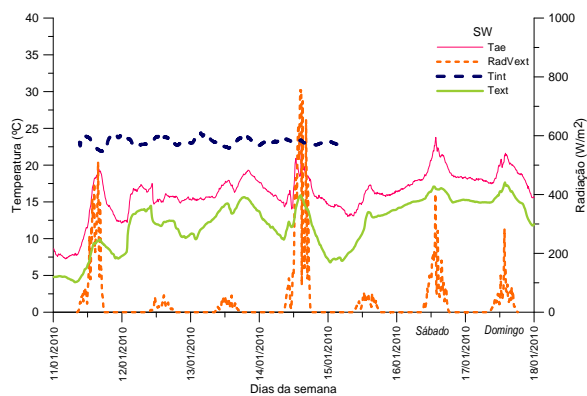


Figura A3.5.40 - Semana 6 de 11.01.2010 a 17.01.2010, Fachada SO.

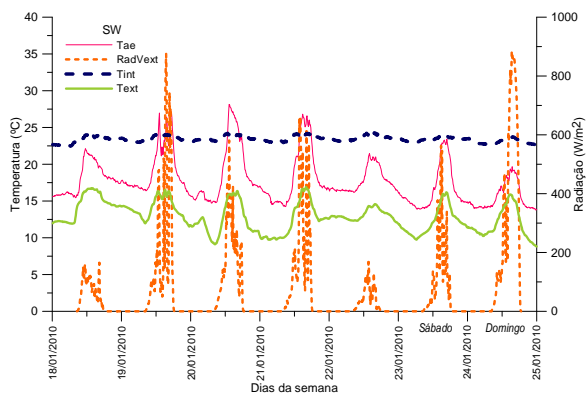


Figura A3.5.41 - Semana 7 de 18.01.2010 a 24.01.2010, Fachada SO.

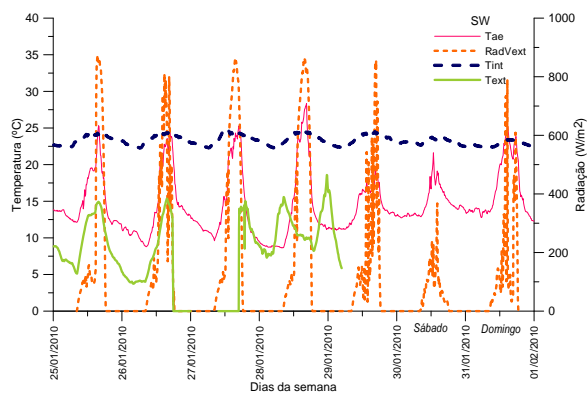


Figura A3.5.42 - Semana 8 de 25.01.2010 a 31.01.2010, Fachada SO.

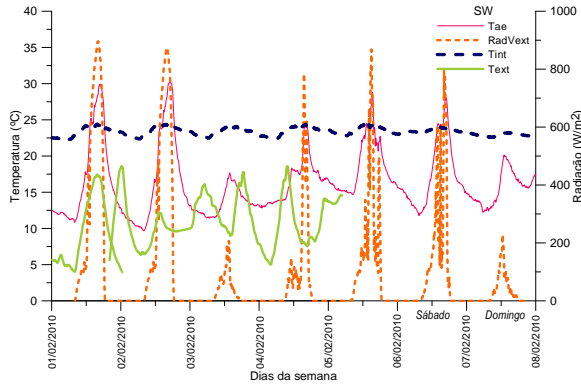


Figura A3.5.43 - Semana 9 de 01.02.2010 a 07.02.2010, Fachada SO.

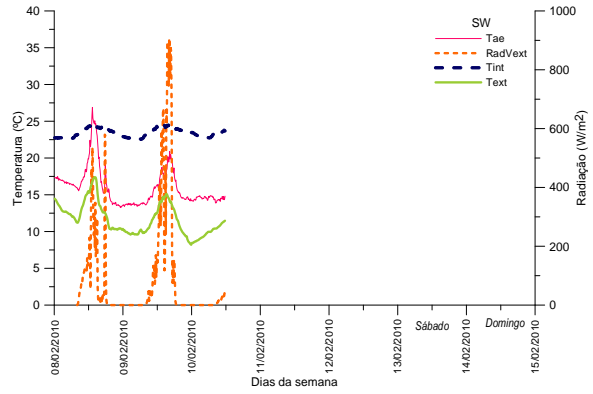


Figura A3.5.44 - Semana 10 de 08.02.2010 a 14.02.2010, Fachada SO.

A.3.3 Campanha 3

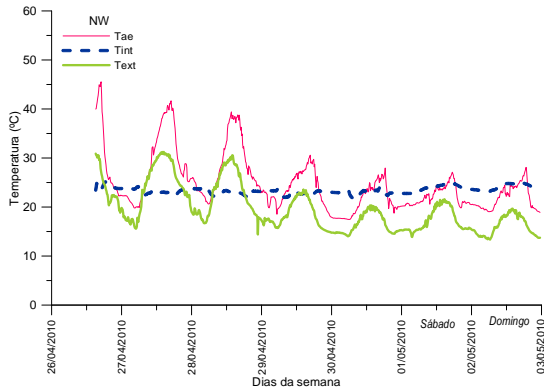


Figura A3.5.45 - Semana 1 de 26.04.2010 a 02.05.2010, Fachada NO.

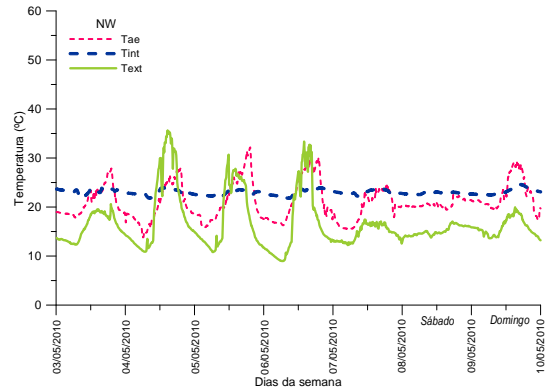


Figura A3.5.46 - Semana 2 de 03.05.2010 a 09.05.2010, Fachada NO.

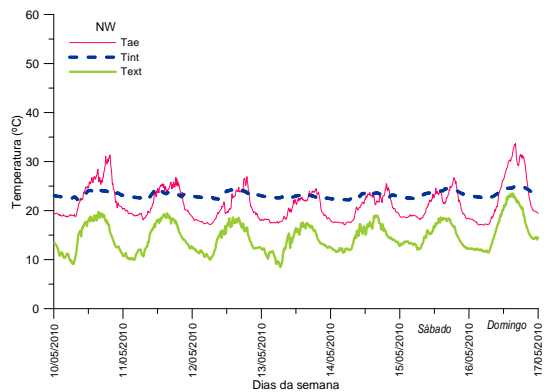


Figura A3.5.47 - Semana 3 de 10.05.2010 a 16.05.2010, Fachada NO.

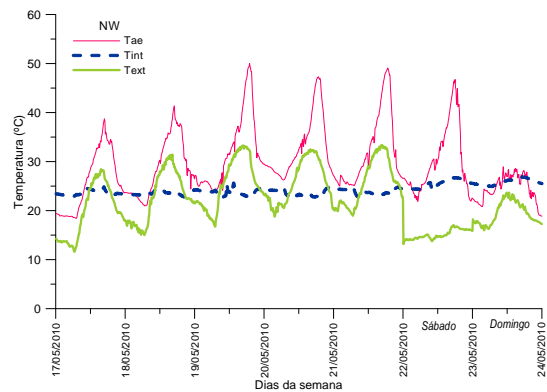


Figura A3.5.48 - Semana 4 de 17.05.2010 a 23.05.2010, Fachada NO.

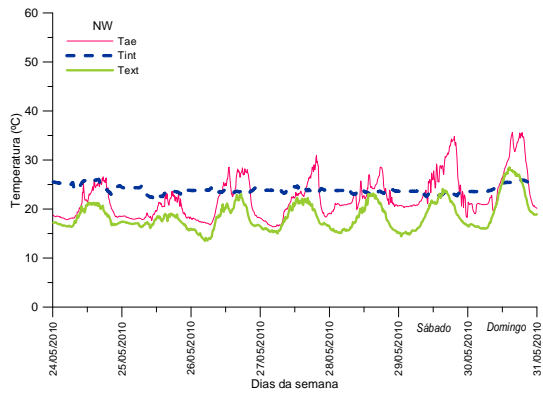


Figura A3.5.49 - Semana 5 de 24.05.2010 a 30.05.2010, Fachada NO.

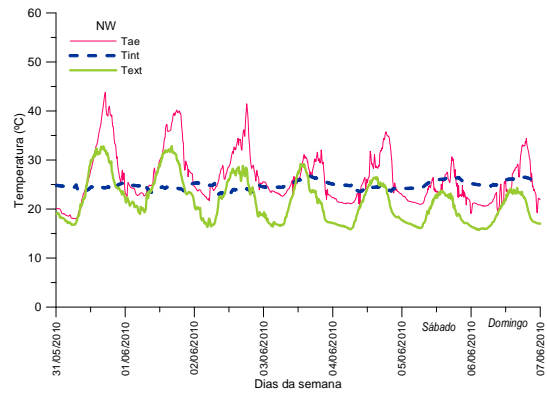


Figura A3.5.50 - Semana 6 de 31.05.2010 a 06.06.2010, Fachada NO.

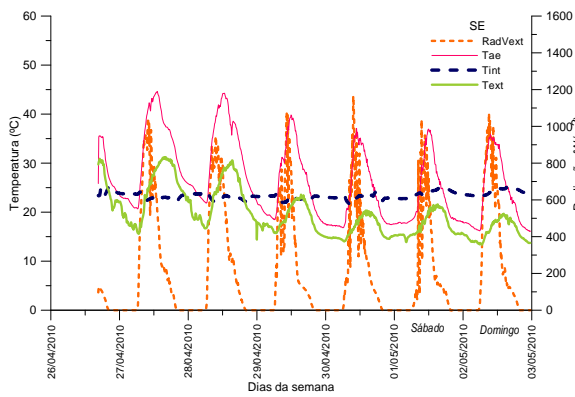


Figura A3.5.51 - Semana 1 de 26.04.2010 a 02.05.2010, Fachada SE.

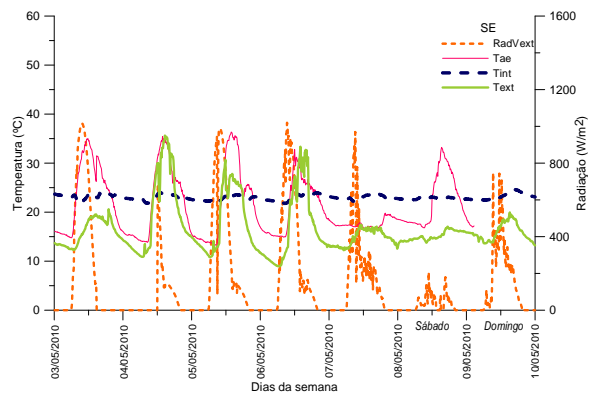


Figura A3.5.52 - Semana 2 de 03.05.2010 a 09.05.2010, Fachada SE.

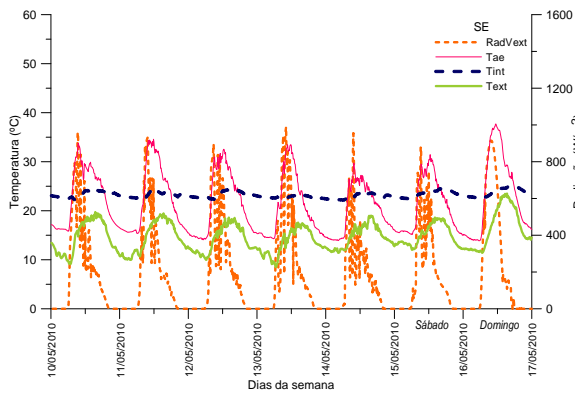


Figura A3.5.53 - Semana 3 de 10.05.2010 a 16.05.2010, Fachada SE.

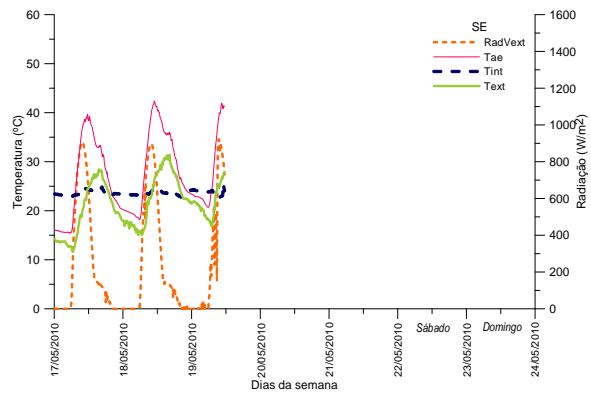


Figura A3.5.54 - Semana 4 de 17.05.2010 a 23.05.2010, Fachada SE.

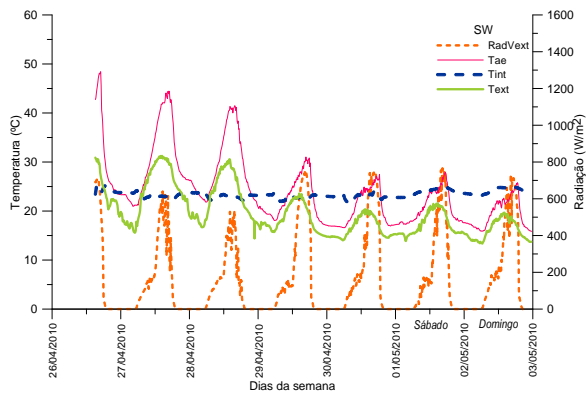


Figura A3.5.55 - Semana 1 de 26.04.2010 a 02.05.2010, Fachada SO.

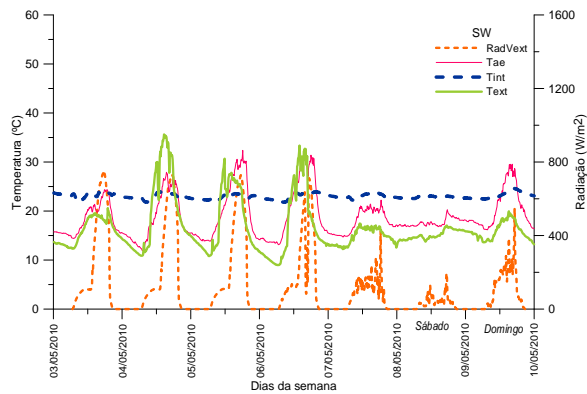


Figura A3.5.56 - Semana 2 de 03.05.2010 a 09.05.2010, Fachada SO.

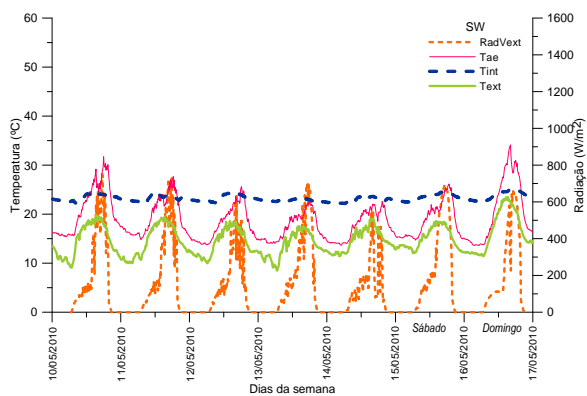


Figura A3.5.57 - Semana 3 de 10.05.2010 a 16.05.2010, Fachada SO.

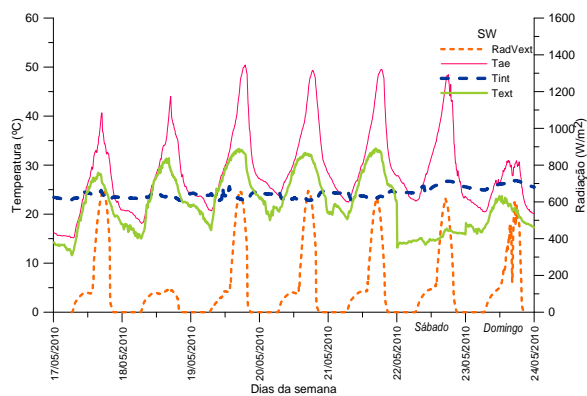


Figura A3.5.58 - Semana 4 de 17.05.2010 a 23.05.2010, Fachada SO.

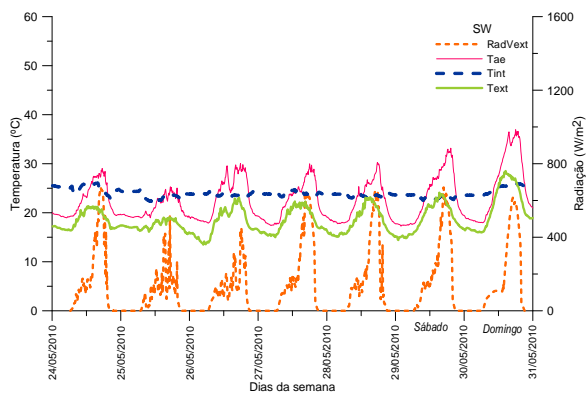


Figura A3.5.59 - Semana 5 de 24.05.2010 a 30.05.2010, Fachada SO.

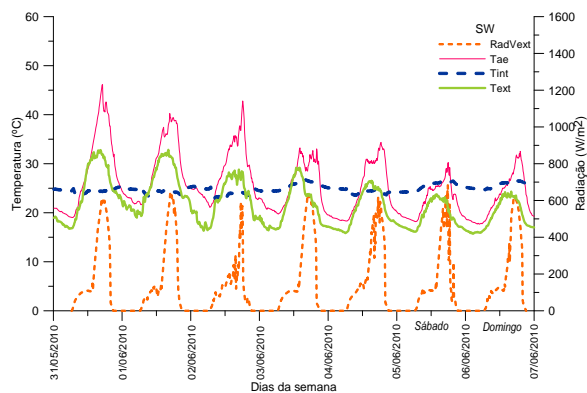


Figura A3.5.60 - Semana 6 de 31.05.2010 a 06.06.2010, Fachada SO.

A3.4 Campanha 4

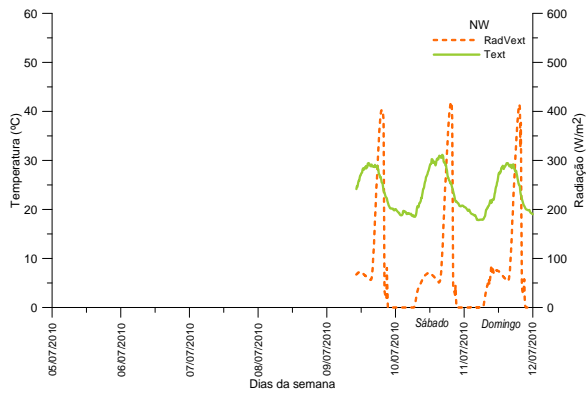


Figura A3.5.61 - Semana 1 de 05.07.2010 a 11.07.2010, Fachada NO.

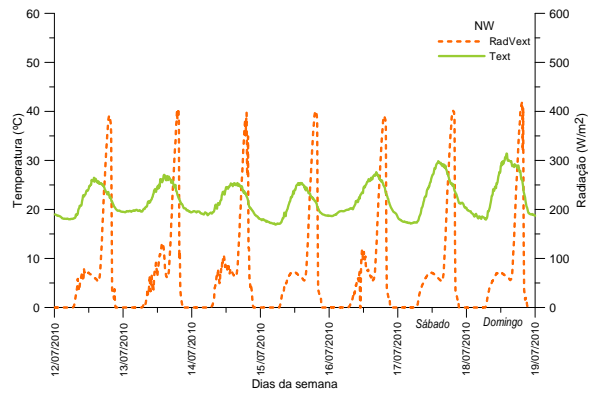


Figura A3.5.62 - Semana 2 de 12.07.2010 a 18.07.2010, Fachada NO.

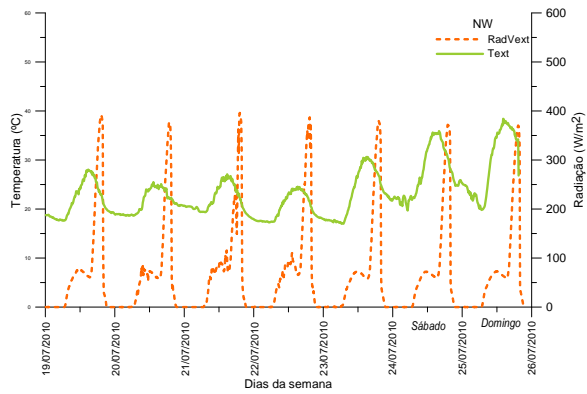


Figura A3.5.63 - Semana 3 de 19.07.2010 a 25.07.2010, Fachada NO.

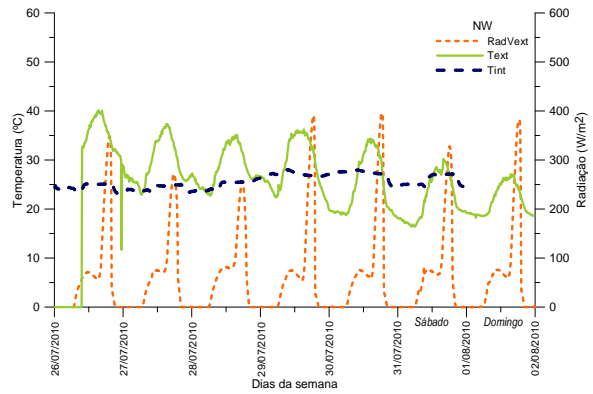


Figura A3.5.64 - Semana 4 de 26.07.2010 a 01.08.2010, Fachada NO.

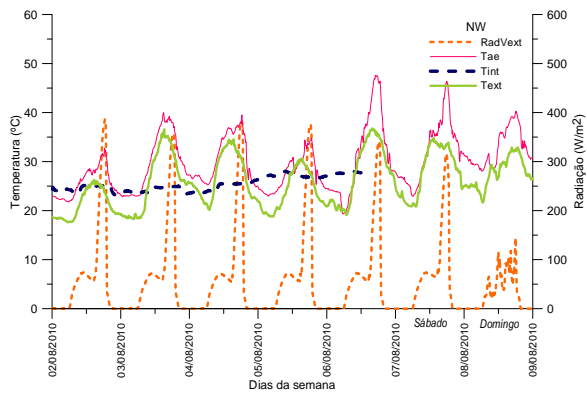


Figura A3.5.65 - Semana 5 de 02.08.2010 a 08.08.2010, Fachada NO.

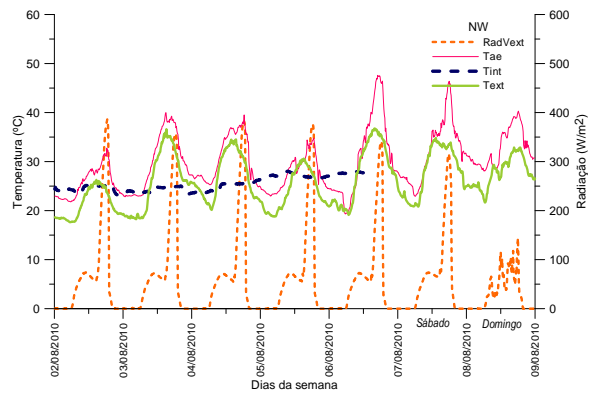


Figura A3.5.66 - Semana 6 de 09.08.2010 a 15.08.2010, Fachada NO.

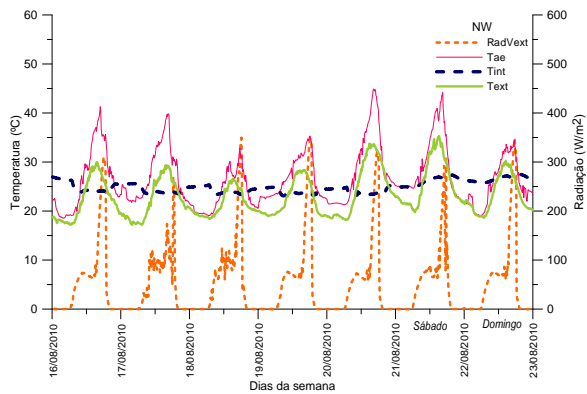


Figura A3.5.67 - Semana 7 de 16.08.2010 a 22.08.2010, Fachada NO.

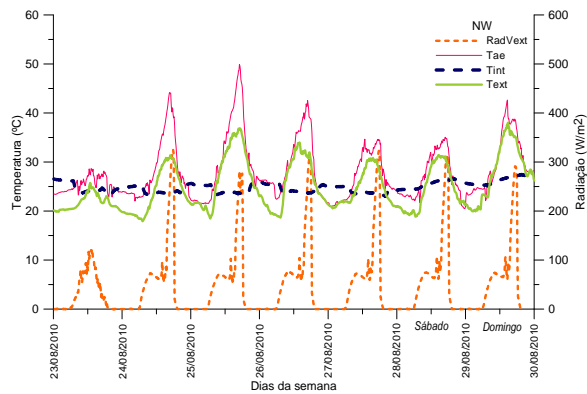


Figura A3.5.68 - Semana 8 de 23.08.2010 a 31.08.2010, Fachada NO.

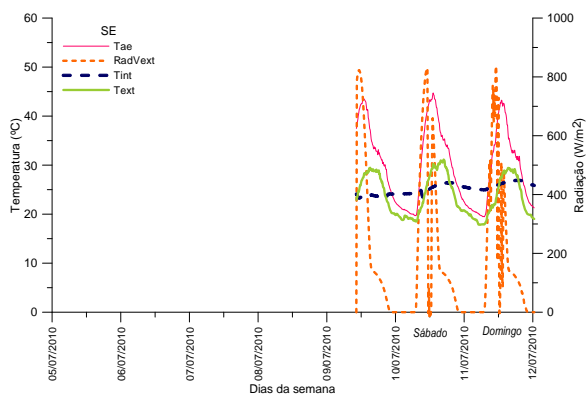


Figura A3.5.69 - Semana 1 de 05.07.2010 a 11.07.2010, Fachada SE.

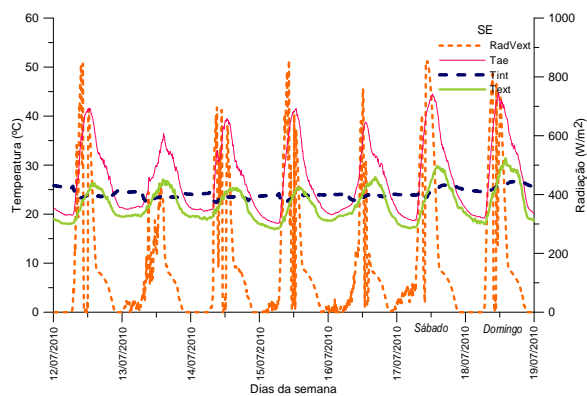


Figura A3.5.70 - Semana 2 de 12.07.2010 a 18.07.2010, Fachada SE.

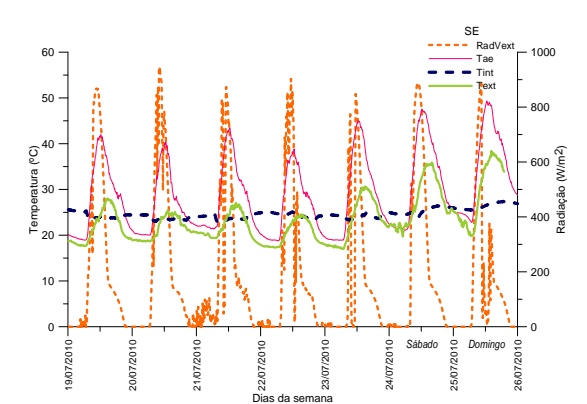


Figura A3.5.71 - Semana 3 de 19.07.2010 a 25.07.2010, Fachada SE.

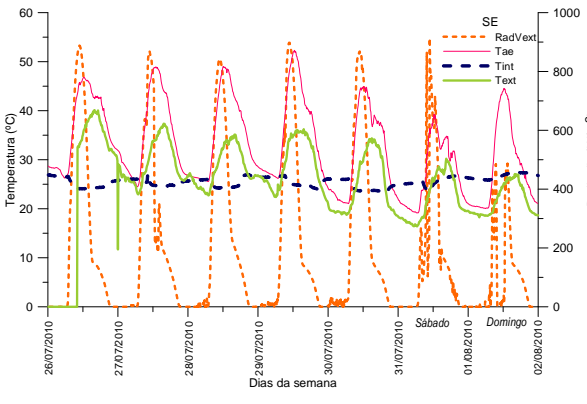


Figura A3.5.72 - Semana 4 de 26.07.2010 a 01.08.2010, Fachada SE.

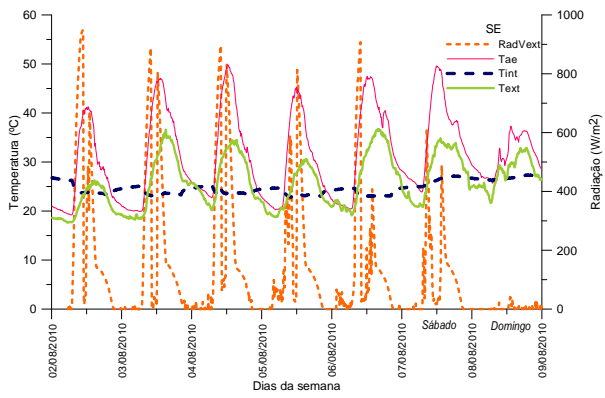


Figura A3.5.73 - Semana 5 de 02.08.2008 a 08.08.2010, Fachada SE.

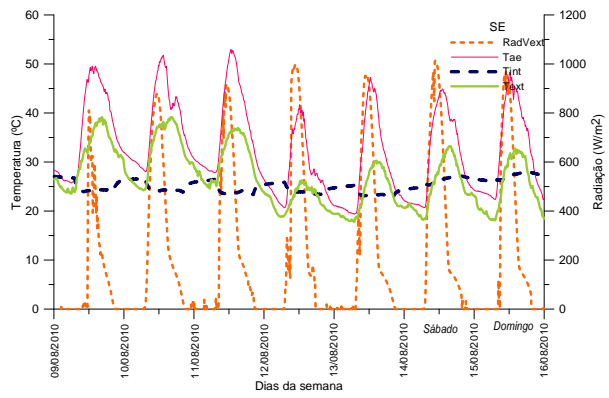


Figura A3.5.74 - Semana 6 de 09.08.2008 a 15.08.2010, Fachada SE.

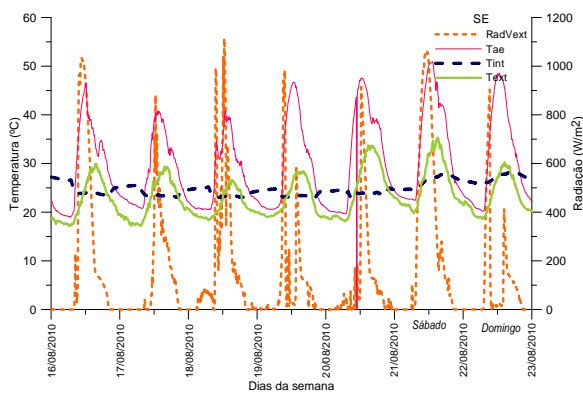


Figura A3.5.75 - Semana 7 de 16.08.2008 a 22.08.2010, Fachada SE.

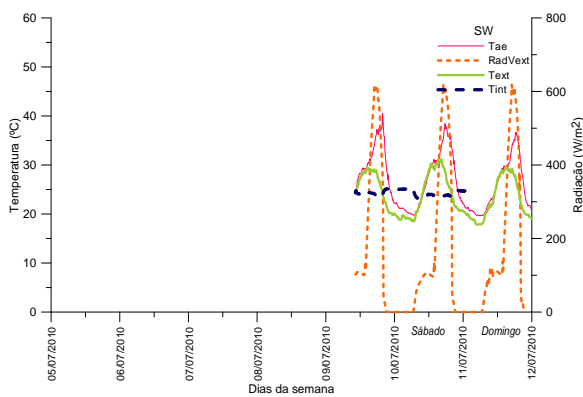


Figura A3.5.76 - Semana 1 de 05.07.2010 a 11.07.2010, Fachada SO.

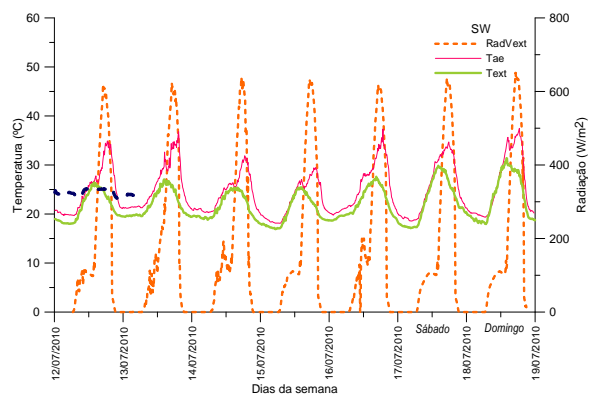


Figura A3.5.77 - Semana 2 de 12.07.2010 a 18.07.2010, Fachada SO.

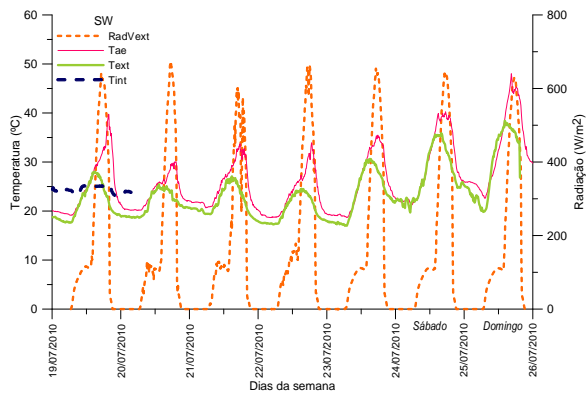


Figura A3.5.78 - Semana 3 de 19.07.2010 a 25.07.2010, Fachada SO.

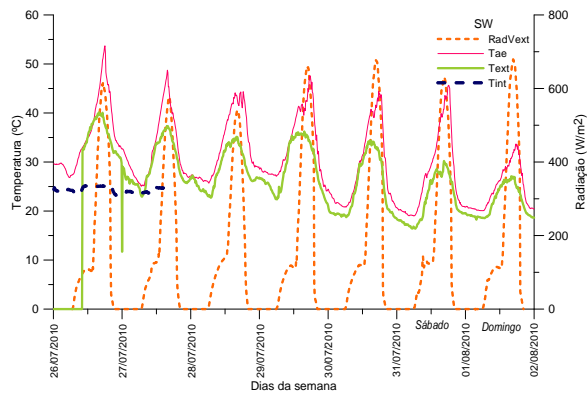


Figura A3.5.79 - Semana 4 de 26.07.2010 a 01.08.2010, Fachada SO.

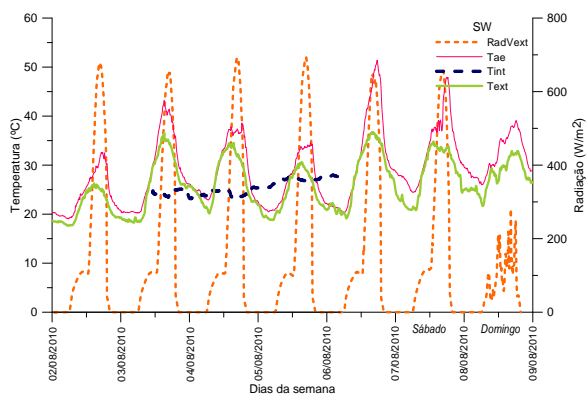


Figura A3.5.80 - Semana 5 de 02.08.2010 a 08.08.2010, Fachada SO.

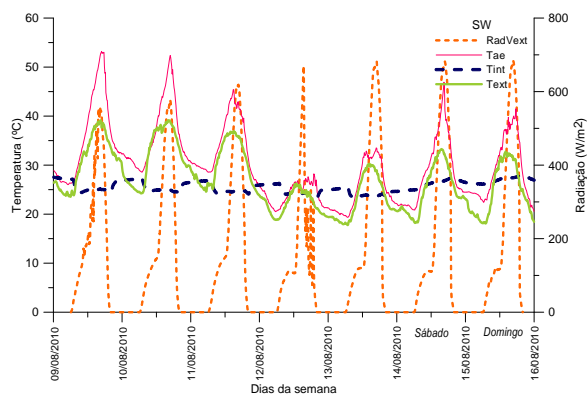


Figura A3.5.81 - Semana 6 de 09.08.2010 a 15.08.2010, Fachada SO.

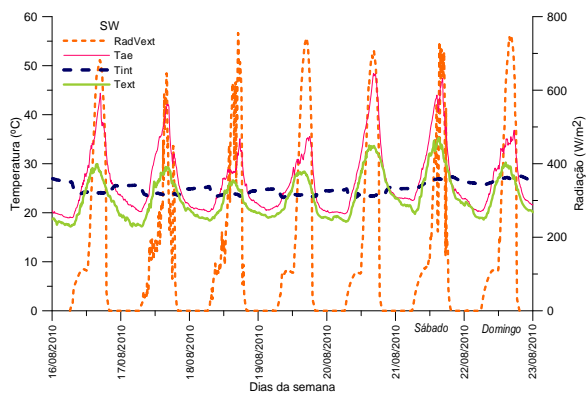


Figura A3.5.82- Semana 7 de 16.08.2010 a 22.08.2010, Fachada SO.

A3.5 Horário em que se registaram os valores de maior temperatura exterior (Text) e maior radiação vertical, em cada fachada (RadV)

Tabela A5.3- Horário em que se registaram os valores mais altos quer de radiação vertical quer de temperatura exterior.

Campanha	Data	Céu	Orientação da fachada					
			NO		SO		SE	
			Text	RadV	Text	RadV	Text	RadV
1	07/09/2009	Limpo	17:00 h	17:50 h	17:00 h	16:10 h	n.d	n.d
	10/09/2009	Nublado	15:30 h	17:20 h	15:30 h	16:20 h	n.d	n.d
	30/08/2009	Limpo	15:40 h	15:20 h	15:40 h	15:20 h	15:40 h	10:40 h
	13/09/2009	Nublado	17:10 h	17:40 h	17:10 h	15:50 h	n.d	n.d
2	02/02/2010	Limpo	16:10 h	14:40 h	16:10 h	15:40 h	16:10 h	10:40 h
	09/12/2009	Nublado	14:00 h	14:40 h	14:00 h	15:40 h	14:00 h	12:20 h
	09/01/2010	Limpo	13:30 h	16:20 h	13:30 h	15:00 h	13:30 h	10:00 h
	24/01/2010	Nublado	14:50 h	16:50 h	14:50 h	15:10 h	14:50 h	10:50 h
3	17/05/2010	Limpo	15:30 h	n.d	15:30 h	17:30 h	17:30 h	09:40 h
	07/05/2010	Nublado	10:50 h	n.d	10:50 h	18:00 h	10:50 h	09:00 h
	16/05/2010	Limpo	15:10 h	n.d	15:10 h	15:10 h	15:10 h	10:40 h
	08/05/2010	Nublado	17:20 h	n.d	17:20 h	16:10 h	17:20 h	11:10 h
4	09/08/2010	Limpo	16:20 h	17:20 h	16:20 h	16:10 h	16:20 h	11:50 h
	13/07/2010	Nublado	14:10 h	18:10 h	14:10 h	15:30 h	14:10 h	10:50 h
	08/08/2010	Limpo	16:30 h	16:30 h	18:00 h	16:30 h	16:20 h	13:10 h
	01/08/2010	Nublado	15:50 h	18:20 h	15:50 h	16:30 h	15:50 h	13:30 h