

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do funcionamento de uma fachada de dupla
pele por processos de ventilação natural

Cláudio Rui Madeira Ferreira

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do funcionamento de uma fachada de dupla pele por processos de ventilação natural

Cláudio Rui Madeira Ferreira

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Orientadores:

Professor Fernando Marques da Silva (LNEC)

2013

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Fernando Marques da Silva, pela oportunidade de realizar este trabalho e pela orientação e apoio ao longo deste projecto.

Quero também agradecer ao Professor Guilherme Carrilho da Graça que me deu a conhecer esta área da física dos edifícios, levando assim ao tema deste trabalho e pela ajuda dada na procura de um professor orientador. Agradeço também ao Professor Jorge Maia Alves pela disponibilidade e ajuda ao longo do meu percurso na Faculdade de Ciências.

Por último agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível.

Resumo

O objectivo deste trabalho é a análise do funcionamento de uma fachada de dupla pele, ventilada de forma natural, com recurso a um modelo numérico integral - Ventil. A fachada estudada pertence a um edifício existente em Lisboa, sobre o qual existem dados experimentais, permitindo assim validar os resultados obtidos.

Em primeiro lugar foi elaborado um modelo representativo da fachada a estudar, a que se aplicou o modelo numérico. De seguida foram preparados os dados e parâmetros a utilizar e por último realizaram-se as simulações e a análise dos resultados obtidos.

Os resultados mostram que a irradiância e o vento são os principais responsáveis pelo funcionamento deste tipo de fachada, sendo estabelecido o regime de ventilação a partir da conjugação de ambos. A irradiância por si só promove um caudal ascendente bem definido, enquanto da influência do vento, que se revelou bastante complexa, pode diversificar os padrões do fluxo. O gradiente da temperatura ao longo da fachada também foi abordado, onde se verificou que estava relacionado com o sentido do caudal global e com as circulações internas da fachada.

Por fim, o programa de cálculo utilizado, revelou ser uma ferramenta bastante útil neste tipo de análise, permitindo obter um conjunto completo de resultados, apesar de algumas limitações, que tiveram de ser contornadas através de alguns ajustes e hipóteses consideradas.

Palavras chave

Fachada de dupla pele, ventilação natural, física de edifícios, energia solar, térmica de edifícios

Abstract

The objective of this work is the analysis of the operation of a naturally ventilated double skin façade, using an integral numerical model – Ventil. The studied façade belongs to a building sited in Lisbon, where the existence of experimental data allowed the validation of the obtained results.

The work started by designing a representative model of the façade to be studied, in order to apply the numerical model. In a second step, using meteorological local data, the simulations were runned and its results processed.

The results show that the irradiance and wind are the main responsables for the operation for this type of façade, being the air flow defined by the conjunction of both. The irradiance promotes a well defined upward air flow, while the wind influence, which is quite complex, can create a diversity of air flow patterns. The temperature gradient along the façade was also addressed, verifying its relation with the overall air flow and the internal circulations of the façade.

At last, the numerical model proved to be a valueable resource in this type of analyses, providing a complete group of results, despite some limitations that had to be overcome through some adjustments and assumptions.

Keywords

Double skin façades, natural ventilation, building physics, solar energy, building thermics.

Índice

Agradecimentos.....	3
Resumo.....	4
Palavras chave.....	4
Abstract.....	4
Keywords.....	4
Índice.....	5
Lista de abreviaturas e símbolos.....	9
Lista de Tabelas.....	13
Lista de Figuras.....	14
1 Introdução.....	17
2 Fachada de dupla pele.....	17
2.1 Definição.....	17
2.2 Princípios básicos de funcionamento.....	18
2.3 Tipologias.....	18
2.3.1 Tipo de ventilação.....	19
2.3.2 Configuração da fachada.....	19
2.3.3 Modo de ventilação.....	23
2.4 Motivações para o emprego de FDP.....	23
2.5 Limitações e desvantagens das FDP.....	24
3 História das fachadas de dupla pele.....	24
4 Programa de cálculo: VENTIL.FOR.....	25
4.1 O modelo.....	25
4.1.1 Componente eólica.....	25
4.1.2 Componente térmica.....	26
4.1.3 Hipótese de Boussinesq.....	26

4.1.4	Perdas de carga.....	26
4.1.5	Equação da continuidade.....	27
4.1.6	Equação da quantidade de movimento.....	27
4.1.7	Equação da energia.....	28
4.1.8	Número de Reynolds.....	28
4.2	O programa: uma breve descrição.....	30
4.3	Informação adicional.....	30
5	Caso de estudo: Edifício H – Office Park Expo.....	32
5.1	O porquê da escolha do Edifício H.....	32
5.2	Localização.....	33
5.3	Características gerais.....	33
5.4	A fachada de dupla pele (FDP).....	34
5.4.1	Escolha do vidro.....	35
5.4.2	Dispositivo de sombreamento.....	35
5.5	Caso de estudo: descrição da fachada de dupla pele.....	36
6	O modelo.....	38
6.1	Modelo simplificado.....	38
6.1.1	Dados utilizados.....	39
6.1.2	Resultados obtidos.....	40
7	Dados do vento.....	42
7.1	Camada limite: introdução teórica.....	42
7.2	Camada limite urbana.....	42
7.2.1	Velocidade de atrito.....	43
7.2.2	Lei de potência.....	44
7.2.3	Perfil da Camada Limite Urbana.....	45
7.3	Correcção da velocidade do vento.....	46
7.3.1	Correcção do vento: características locais.....	46
7.3.2	Direcção Noroeste-Sudoeste e Nordeste-Sudeste.....	47

7.3.3	Direcção Sul	48
7.3.4	Direcção Norte	49
7.3.5	Correcção do vento: orientação da fachada em estudo.....	51
8	Coeficientes de pressão cp	52
8.1	Situações particulares	53
9	Correcção da irradiância.....	54
9.1	Valores da irradiância em falta.....	54
9.1.1	Radiação incidente num plano inclinado.....	54
9.1.2	Radiação directa e difusa.....	54
9.1.3	Altura solar	55
9.1.4	Declinação solar	55
9.1.5	Ângulo horário	55
9.1.6	Hora solar aparente.....	55
9.1.7	Equação do tempo	55
9.1.8	Projecção dos raios solares sobre a normal da superfície.....	56
9.1.9	Azimute do Sol.....	57
9.2	Dados incompletos	57
10	Calor armazenado na fachada.....	58
11	Simulação: o modelo	60
11.1	Modelo	60
11.1.1	Simplificações e hipóteses consideradas	61
11.2	Resumo dos dados utilizados	62
12	Resultados	63
12.1	Circulação do ar dentro da fachada	63
12.2	Efeito do vento	64
12.2.1	Parâmetro de potência adimensional PSI (Ψ).....	65
12.3	Efeito da irradiância	66
12.3.2	Céu limpo	67

12.3.3	Céu nublado.....	68
12.4	Temperatura interior da FDP.....	68
12.4.1	Caudal ascendente.....	68
12.4.2	Caudal descendente.....	69
12.4.3	Período nocturno.....	70
12.4.4	Caudal misto 1.....	71
12.4.5	Caudal misto 2.....	71
12.4.6	Influência do caudal.....	72
12.5	O edifício e a orientação das fachadas.....	72
12.5.1	Efeito do vento.....	73
12.5.2	Efeito da irradiância.....	74
12.5.3	Temperatura interior da FDP.....	75
12.5.4	Estações do ano.....	76
12.6	Validação dos resultados.....	78
12.6.1	Fachada SE.....	78
12.6.2	Fachada SO.....	80
12.6.3	Fachada NO.....	81
12.6.4	Atrás do sombreador.....	82
12.7	Comparação de métodos: irradiância e calor armazenado.....	83
13	Discussão dos resultados.....	85
14	Conclusão.....	88
15	Bibliografia.....	89
16	Anexos.....	93
16.1	Anexo 1: Coeficiente α	93
16.2	Anexo 2: Coeficiente cp bibliografia.....	95
16.3	Anexo 3: Coeficiente cp	97
16.4	Anexo 4: Radiação solar – coeficientes em função da visibilidade.....	98
16.5	Anexo 5: modelo sem sombreador.....	99

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

APL	Área em planta do espaço
AST	Hora solar aparente
BBRI	Belgium Building Research Institute
CCU	Camada de Cobertura Urbana
CLA	Camada Limite Atmosférica
DELT	Variação da temperatura
DST	Daylight Saving Time
ECBCS	Energy Conservation in Buildings and Community Systems
ET	Equação do tempo
FDP	Fachada de dupla pele
IAPACO	Índice do Ventil referente à temperatura
ICPCO	Índice do Ventil referente à pressão do espaço
IHCO	Índice do Ventil referente a aberturas intercomunicantes
N	Número de incógnitas
n.d.	Não disponível
NA	Número de aberturas
NESP	Número de espaços internos
PSI	Parâmetro de potência adimensional
REN	Renovações por hora

Constantes

Fr	Número de Froude
k	Constante de Von Kármán
Re	Número de Reynolds

Índices

1 2	Identificação da abertura
ad	Adiabático
i	Espaço interno
imp	Impulsão
J	Índice do nível do espaço
k	Abertura
l	Parede adiabática
ref.	Valor de referência
sky	Céu
solo	Solo
u	Urbana

Símbolos

A	Área	(m^2)
a	Azimute da superfície	(rad.)
a_n	Valor em função da visibilidade atmosférica	
b_n	Valor em função da visibilidade atmosférica	
c_p	Coefficiente de pressão	
C_d	Coefficiente de descarga	
d	Deslocamento	(m)
D	Radiação difusa	(W/m^2)

F	Factor de forma	
g	Aceleração da gravidade	(m/s^2)
G	Radiação global	(W/m^2)
H	Altura média	(m)
h	Coefficiente global de transferência de calor	$(W/m^2.K)$
\bar{h}_r	Altura média da camada cobertura urbana	(m)
h_s	Altura solar	(°)
I	Radiação incidente numa superfície	(W/m^2)
J	Dia juliano	
J'	Coefficiente do dia juliano	
K	Radiação directa	(W/m^2)
L	Distância entre dois pontos	(m)
p	Pressão	(Pa)
\dot{Q}	Calor gerado	(W)
Q	Caudal	(m^3/h)
T	Temperatura	(K)
U	Velocidade do vento	(m/s)
u_*	Velocidade de atrito	(m/s)
x	Distância entre dois pontos	(m)
z	Cota	(m)
z_0	Altura da rugosidade	(m)

Símbolos gregos

Alguns dos símbolos aqui indicados vão ter um duplo significado, devido à utilização da mesma nomenclatura para diferentes temas.

α	Coeficiente de rugosidade	-
β	Inclinação da superfície	(rad.)
γ	Expoente / Azimute da superfície	- / (rad.)
δ	Espessura da camada limite / Declinação solar	(m) / (rad.)
ζ	Coeficiente de perda característico	-
θ	Ângulo de incidência do vento no edifício	(°)
λ	Tipo de escoamento / Latitude	- / (rad.)
μ	Viscosidade dinâmica	(Pa.s)
ρ	Massa volúmica / Albedo do solo	(kg/m^3) / -
φ	Ângulo de incidência do vento na torre anemométrica / Azimute do sol / Coeficiente entre as áreas das aberturas	(°) / (rad.) / -
ψ	Parâmetro adimensional de potência (PSI)	-
ω	Ângulo horário	(rad.)

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação do regime de escoamento, de acordo com o Re. (White 2003).....	29
Tabela 2 – Valores do expoente γ	29
Tabela 3 – Intervalos temporais da campanha.	33
Tabela 4 – Detalhes técnicos do vidro exterior (FACAL n.d.).....	35
Tabela 5 – Detalhes técnicos do vidro interior (FACAL n.d.).	35
Tabela 6 – Detalhes técnicos do conjunto dos vidros (FACAL n.d.).	35
Tabela 7 – Detalhes técnicos do sombreador (Warema 2013).	36
Tabela 8 – Dados dos espaços utilizados na simulação.	39
Tabela 9 – Dados dos elementos da fachada.	39
Tabela 10 – Dados dos factores externos (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985).	39
Tabela 11 – Tabela síntese dos parâmetros dos índices.	40
Tabela 12 – Dados das parede não adiabáticas.	40
Tabela 13 – Resultados obtidos do modelo simplificado.	40
Tabela 14 – Classificação da estabilidade atmosférica em função do gradiente de temperatura.	44
Tabela 15 – Dados considerados na correcção da velocidade do vento	46
Tabela 16 – Dados considerados: vento de Sul	47
Tabela 17- Dados considerados: vento de Norte	47
Tabela 18 - Velocidade do vento para a direcção Noroeste-Sudoeste.	48
Tabela 19 - Velocidade do vento para a direcção Nordeste-Sudeste.	48
Tabela 20 – Velocidade do vento para a direcção Sul.....	49
Tabela 21 - Velocidade do vento para a direcção Norte.....	51
Tabela 22 – Dados considerados para o ajuste do cp	52
Tabela 23 – Coeficientes cp equivalentes.	53
Tabela 24 – Dados do calor armazenado.....	59
Tabela 25 – Horário de funcionamento automático do sombreador.	61
Tabela 26 – Resumo dos dados utilizados.....	62
Tabela 27 – Comparação do caudal obtido pelos dois métodos.....	84
Tabela 28 - Parâmetros em função da visibilidade. (Rodrigues, Piedade, and Braga 2009).....	98

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma FDP. (Sustaining: Tower Blocks 2004)	18
Figura 2 – Fachada do tipo Climate Wall.....	19
Figura 3 – Fachada do tipo tampão.	20
Figura 4 – Box Window.....	20
Figura 5 – Parede de Trombe.	20
Figura 6 – Fachada do tipo chaminé.....	21
Figura 7 – Fachada do tipo corredor.....	21
Figura 8 – Fachada multi-piso.....	22
Figura 9 – Janela Swindow. (Perino 2008)	22
Figura 10 – Esquema dos cinco modos de ventilação.....	23
Figura 11 – Ilustração simplificada do sinal de cp (esquerda: vista de perfil e direita: vista de cima). 26	
Figura 12 – Variação da velocidade Ux ao longo do tempo. (Munson, Young, and Okiishi 2002)	29
Figura 13 – Esquema da colocação dos dispositivos de monitorização na campanha realizada. (FACAL n.d.).....	32
Figura 14 – Localização do edifício, assinalado a amarelo (Google 2012).....	33
Figura 15 – Vista exterior do edifício (FACAL n.d.).....	34
Figura 16 – Esquema da fachada do edifício (FACAL n.d.).....	34
Figura 17 – Tela de sombreamento (FACAL n.d.).....	36
Figura 18 – Vista esquemática da fachada de dupla pele (FACAL 2006).	36
Figura 19 – Ilustração pormenorizada do perfil da fachada (Esquerda – piso inferior; Direita – piso superior).	37
Figura 20 – Esquema do modelo simplificado (Nota: dimensões não proporcionais).	38
Figura 21 – Localização do anemómetro do Cabeço das Rolas (Amarelo: Edifício H; Azul: anemómetro). (Google 2012)	42
Figura 22 – Representação das diferentes camadas atmosféricas.	43
Figura 23 – Vento de Sul.....	48
Figura 24 – Vento de Norte.....	50
Figura 25 – Exemplo da estimativa do cp através da interpolação linear.....	52
Figura 26 – Exemplo da incidência do vento no quadrante $[180^\circ, 270^\circ]$. (Localização da zona em estudo assinalada a amarelo.).....	53
Figura 27 – Projecção dos raios solares sobre a normal da superfície.	56
Figura 28 – Variação da irradiância ao longo do dia, em frente a atrás do sombreador (Inverno 02-02-2010, SE).....	57
Figura 29 - Variação da irradiância ao longo do dia, em frente a atrás do sombreador (Inverno 09-12-2009, SE).....	58

Figura 30 – Esquema do modelo da fachada com sombreador descido (esquerda) e a distribuição dos instrumentos de medida (direita).....	60
Figura 31 - Circulação do ar no interior da fachada: a) ascendente e b) descendente; e circulação mista do ar dentro da fachada: c) misto 1 e d) misto 2.	64
Figura 32 - Variação do caudal na abertura 1 em função do vento (vários dias, 21:00 horas). (A linha a tracejado serve apenas de auxílio à visualização do gráfico, não implicando uma ligação entre os pontos).....	65
Figura 33 – Variação do Ψ função da velocidade do vento e da irradiância (Verão 10-08-2010, céu limpo, fachada SE).	66
Figura 34 - Variação do caudal na abertura 1 ao longo do dia (Verão 10-08-2010, céu limpo).	67
Figura 35 - Variação do caudal na abertura 1 ao longo do dia (Primavera 08-05-2010, céu nublado).	68
Figura 36 – Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Verão, 10-08-2010, céu limpo, 17:00 horas, SO, sombreador descido). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior)	69
Figura 37 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Primavera, 10-08-2010, céu nublado, 16:00 horas, SE, sombreador subido).	69
Figura 38 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Outono, 09-09-2010, 21:00 horas, NO, sombreador subido).....	70
Figura 39 – Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Inverno, 09-12-2009, céu nublado, NO, 16:00 horas). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior).....	71
Figura 40 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior, em função do caudal (Primavera 08-05-2010, céu nublado, NO, 9:30 e 12:0 horas).....	72
Figura 41 – Variação do caudal, ao longo do dia, na abertura 1 em função do Ψ (Primavera 16-05-2010, céu limpo).....	73
Figura 42 – Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo do dia (Verão 10-08-2010, céu limpo).....	74
Figura 43 - Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo do dia (Primavera 16-05-2010, céu nublado).	74
Figura 44 – Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 02-08-2010, céu limpo).....	75
Figura 45 – Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo das estações do ano(Primavera:16-05-2010, Verão:10-08-2010, Outono:07-09-2010 e Inverno:02-02-2010, céu limpo).	76
Figura 46 - Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo das estações do ano(Primavera:08-05-2010, Verão:02-08-2010, Outono:05-09-2009 e Inverno:09-12-2009, céu nublado). (A linha a tracejado indica a falta de resultados)	77

Figura 47 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Primavera, 16-05-2010, céu limpo). (A linha a tracejado serve apenas de auxílio à visualização do gráfico, não implicando uma ligação entre os pontos).....	78
Figura 48 – Exemplo da circulação do ar entre fachadas.	79
Figura 49 – Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 10-08-2010, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis referem-se ao modelo sem sombreador, para os horários em que este se encontrava subido).....	80
Figura 50 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Outono, 07-10-2009, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis referem-se ao modelo sem sombreador, para os horários em que este se encontrava subido).....	81
Figura 51 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Inverno, 09-12-2009, céu nublado).	82
Figura 52 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 10-08-2010, SO, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior).....	83
Figura 53 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Outono, 07-09-2010, NO, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior).....	83

1 Introdução

A crescente preocupação com a utilização sustentável e eficiente da energia, leva a que hoje em dia se assista a uma grande evolução nesta temática, abrangendo várias áreas, desde a investigação, a novos métodos e tecnologias, até à implementação de legislação.

No campo específico dos edifícios, responsáveis por uma grande parte do consumo de energia, levou à adopção de medidas para tornar este sector mais eficiente. Uma destas medidas está relacionada com a forma como são projectados e construídos os edifícios e os sistemas que o compõem, surgindo então o conceito de edifício dinâmico, que pode ser traduzido como a capacidade de um edifício se ajustar às condições que o rodeiam.

As fachadas de dupla pele enquadram-se na definição de edifício dinâmico, surgindo o primeiro conceito teórico deste tipo fachada em 1849 e a primeira construção em 1903. No entanto só a partir dos anos 70 aumentou o interesse por este tipo de sistema, tendo-se assistido ao evoluir de soluções técnicas destinadas a melhorar o aproveitamento das suas potencialidades e permitir projectos mais cuidados e eficazes.

Este tipo de fachada consiste em dois vãos envidraçados separados por uma caixa de ar, existindo diversas configurações construtivas, tendo todas como base de funcionamento o sol, podendo operar de forma natural, onde o vento tem um papel a desempenhar, ou com o apoio de sistemas mecânicos.

Este trabalho pretende analisar comportamento de uma fachada de dupla pele, baseada na ventilação natural, com recurso a um modelo numérico, identificando os parâmetros responsáveis pelo seu funcionamento.

2 Fachada de dupla pele

Uma fachada de dupla pele (FDP) consiste em dois vãos envidraçados, entre os quais existe uma caixa de ar, muito semelhante a um vidro duplo, mas em que o canal é de maior largura e ventilado. Este tipo de estrutura pode ter as mais diversas aplicações, desde puramente estético, chegando a um nível mais avançado, como a incorporação num sistema de climatização de um edifício.

Nos parágrafos que se seguem, será feita uma descrição mais aprofundada da FDP, a sua definição, princípios básicos de funcionamento, tipologias existentes, motivações que levam à sua utilização e algumas das limitações e desvantagens associadas.

2.1 Definição

Existem diversas variantes no que toca à definição de uma FDP, mas todas elas se centram na mesma ideia base. Algumas das definições presentes na literatura são apresentadas de seguida:

- *“Uma fachada dinâmica é uma fachada que abrange um ou vários andares de um edifício com diversas peles envidraçadas. Estas peles podem ser ou não estancadas. Neste tipo de fachada, a caixa de ar entre as duas peles, pode ser ventilada de forma natural ou mecânica. A estratégia de ventilação da caixa de ar pode variar ao longo do tempo. Normalmente são incorporados dispositivos e sistemas, activos ou passivos, de modo a melhorar as condições de climatização interiores. Na maioria das vezes estes sistemas são operados de forma semi-automática, através de sistemas de controlo.”* (Belgian Building Research Institute 2002)

- “Este sistema é composto por um par de vidros, “peles”, separados por uma caixa de ar. O vidro exterior normalmente serve como isolante. O espaço de ar entre as duas camadas de vidro actua como um isolante contra temperaturas extremas, vento e ruído. Normalmente são colocados dispositivos de sombreamento entre as duas peles. Todos os elementos podem ser configurados em diferentes arranjos e combinações de membranas, tanto opacas como diáfnas.” (Harrison 2003)
- “é um sistema que consiste numa tela exterior, uma caixa de ar ventilada e uma tela interior. O dispositivo de sombreamento é colocado na caixa de ar ventilada. As telas exteriores e interiores podem ser de vidro simples ou duplo, a largura da caixa de ar e o tipo de ventilação dependem das condições climatéricas, do desempenho pretendido do sistema e da arquitectura global do edifício, incluindo os sistemas de climatização.” (Kragh 2000)

2.2 Princípios básicos de funcionamento

O funcionamento das FDP varia consoante a sua tipologia, concretamente na forma de ventilação utilizada. Apesar destas diferenças, o seu funcionamento base é praticamente idêntico, estando ilustrado na figura que se segue:

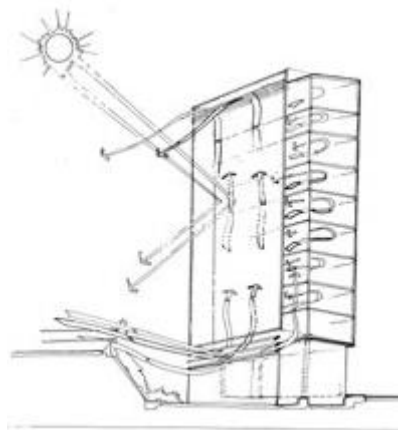


Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma FDP. (Sustaining: Tower Blocks 2004)

Existem duas forças principais por detrás do funcionamento de uma FDP, independentes uma da outra e, consoante a configuração da fachada e alguns factores externos, podem ser aditivas ou subtractivas entre si.

As diferenças de pressão na fachada, que estão na base destas forças, devem-se à acção do vento (eólica) ou à influência da irradiância (térmica). Ambas causam diferenças de pressão entre as várias aberturas, fazendo com que o ar circule dentro da fachada.

2.3 Tipologias

As FDP podem ser agrupadas em três categorias principais, de acordo com as definições derivadas de um estudo desenvolvido por várias entidades (EIE/04/135/S07.38652), com o apoio da Comissão Europeia (Best Facade 2013) e da Agência Internacional da Energia (International Energy Agency 2011). Estas três categorias são:

2.3.1 Tipo de ventilação

Quanto ao tipo de ventilação temos três sub-categorias, a ventilação natural, ou seja as acções do vento e térmica, a ventilação mecânica, proporcionada por ventiladores, e por último uma ventilação híbrida, que conjuga os dois métodos anteriores.

2.3.2 Configuração da fachada

Nesta categoria existem diversas classificações, descrevendo essencialmente o modo como se encontra dividida a FDP. Tomando como base as definições que se encontram no Anexo 44 (Silva et al. 2007) (Perino 2008) (Silva and Zanghirella 2010) do programa da Agência Internacional da Energia, o Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS), as quais foram elaboradas pelo Belgium Building Research Institute (BBRI), são apresentadas de seguida as várias configurações:

- Climate Wall: consiste num vidro duplo exterior, uma caixa de ar e um vidro simples interior, sendo a circulação do ar feita por uma pequena abertura interior, com cerca de 10mm, na base da janela, com a ajuda de um ventilador no topo da janela.

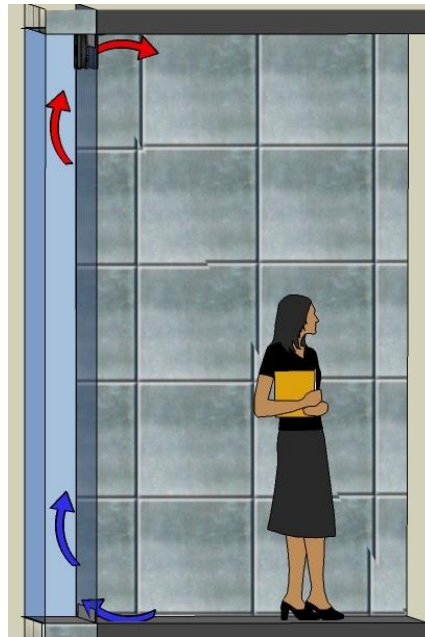


Figura 2 – Fachada do tipo Climate Wall.

- Fachada do tipo tampão (*Buffer*): nesta configuração temos uma caixa de ar, entre o vidro exterior e interior, sem qualquer abertura de comunicação, oferecendo assim um isolamento térmico adicional ao edifício. Apesar de a caixa de ar estar isolada, por vezes é necessário regular a pressão no seu interior através de uma abertura para o exterior.



Figura 3 – Fachada do tipo tampão.

- Confinada (*Box Window*): neste caso cada janela individual do edifício é autónoma, constituindo uma pequena FDP. Também se podem incluir nesta categoria as Paredes de Trombe, que são semelhantes às FDP, diferindo apenas na pele interior, que ao invés de ser um vidro, é composto por um material opaco (cimento, pedra ou um tipo de composto) que absorve e armazena o calor.

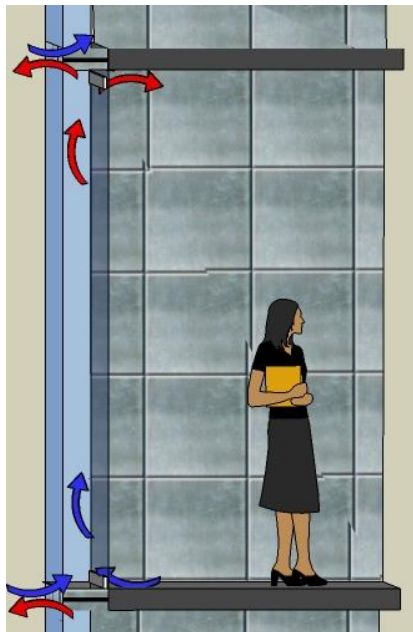


Figura 4 – Box Window.

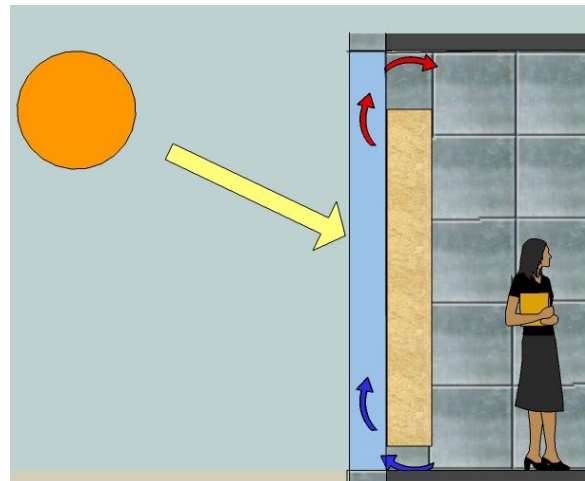


Figura 5 – Parede de Trombe.

- Fachada tipo chaminé (*Shaft box*): a FDP encontra-se dividida horizontalmente, convergindo o ar de exaustão para uma coluna central.

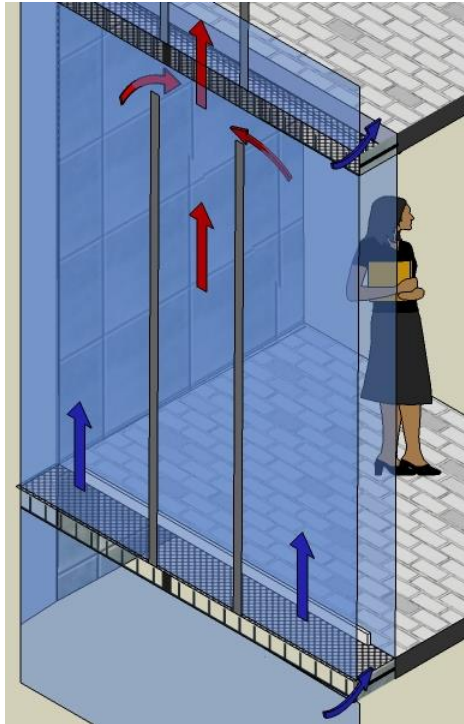


Figura 6 – Fachada do tipo chaminé.

- Fachada tipo corredor (*corridor*): de configuração muito semelhante à fachada do tipo chaminé, sem a coluna e funcionando piso a piso.



Figura 7 – Fachada do tipo corredor.

- Fachada multi-piso (*multistorey*): neste caso não existem divisões da fachada, circulando o ar ao longo de vários pisos ou mesmo em toda a fachada do edifício.

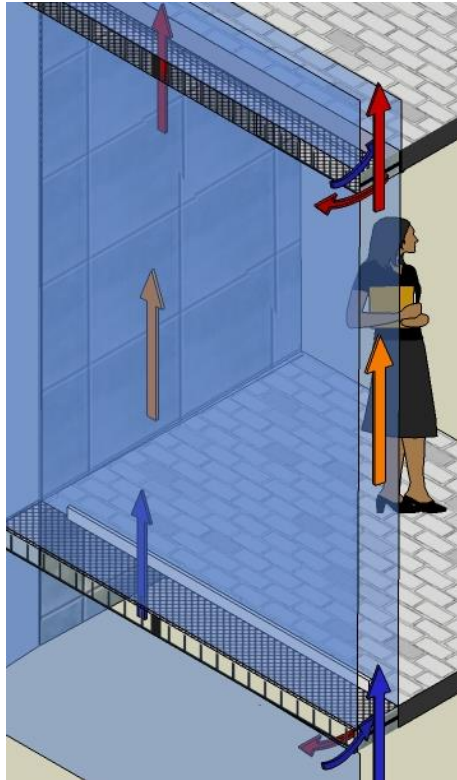


Figura 8 – Fachada multi-piso.

- Swindow: neste tipo de construção são utilizadas pequenas aberturas na fachada, com um tipo especial de janela/abertura, que permite controlar o modo de ventilação.

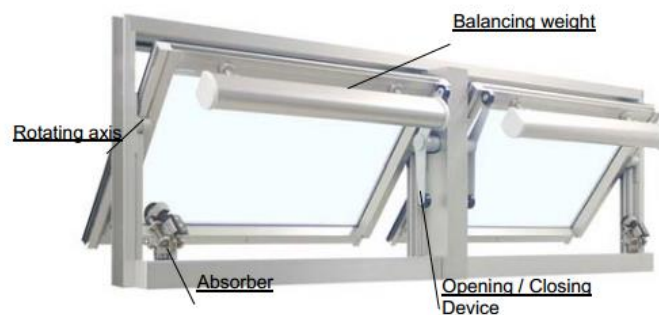


Figura 9 – Janela Swindow. (Perino 2008)

2.3.3 Modo de ventilação

O modo de ventilação refere-se à origem e destino do ar que circula dentro da fachada. Aqui, segundo o Anexo 44 (Perino 2008), já referido anteriormente, existem cinco sub-categorias:

- Sistema de exaustão, onde a FDP permite a remoção do ar interior.
- Sistema de admissão, em que a FDP fornece ar novo para o interior.
- Sistema reversível ou variável, onde se combina os dois modos anteriores, podendo ser regulados pelo utilizador.
- Cortina de ar exterior, onde o ar exterior circula dentro da fachada, sem comunicação para o interior.
- Cortina de ar interior, onde apenas o ar interior do espaço circula na fachada, não existindo comunicação com o exterior.

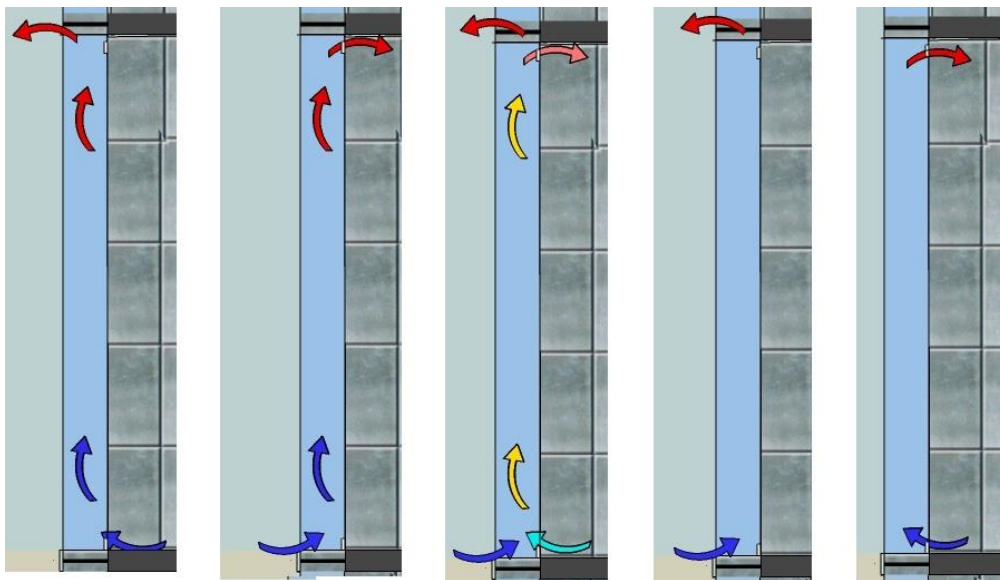


Figura 10 – Esquema dos cinco modos de ventilação.

Note-se que uma FDP pode funcionar com mais do que um destes modos, através do controlo das entradas e saídas do ar no canal.

2.4 Motivações para o emprego de FDP

As FDP têm tido nos últimos anos um crescimento significativo, existindo cada vez mais construções que incorporam este tipo de fachada. Algumas das razões que, além de justificarem este aumento, também caracterizam as FDP enquanto um elemento construtivo importante, são: a estética, que de uma visão arquitectónica, dá ao edifício um aspecto diferente e vanguardista; permitem um melhor aproveitamento da iluminação natural, já que toda a fachada é transparente; aumentam o isolamento acústico, já que são muitas das vezes empregues em edifícios em ambientes citadinos; isolamento térmico, promovendo o conforto dos ocupantes, contribuindo também para uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos, podendo ser integradas no sistema de climatização; permitem proteger os elementos sombreadores dos factores climáticos; apesar da implicação das FDP em caso de incêndio se encontrar em fase de estudo, alguns autores (Ding, Hasemi, and Yamada 2005) afirmam que é possível recorrer às FDP como um mecanismo de protecção contra a propagação do fogo e fumo ao longo do edifício, dependendo da sua configuração e modo de ventilação. (Best Facade 2013) (Poirazis 2006)

2.5 Limitações e desvantagens das FDP

Apesar das FDP terem várias vantagens, tendo sido as mais importantes referidas no tópico acima, possuem também certas limitações e desvantagens. Dentro destas limitações as que importam realçar são: custos de construção acrescidos, comparativamente a fachadas convencionais; propagação do fogo e fumo em caso de incêndio, apesar de existirem alguns estudos (Chow et al. 2004), carece de mais investigação e tem uma grande dependência da tipologia utilizada; redução da área útil do edifício, já que a caixa de ar vai ocupar um espaço extra; aumentam custos de manutenção; um incorrecto desenvolvimento e modelação da estrutura pode levar a que, depois de construída a fachada, algumas das vantagens associadas se transformem em problemas, por exemplo excesso de iluminação, sobreaquecimento dos espaços e propagação do som entre os diversos espaços internos. (Poirazis 2006)

3 História das fachadas de dupla pele

A primeira referência a este tipo de estrutura, de acordo com vários autores, data de 1849. Foi nesta data que Jean-Baptiste Jobard, um inventor, litógrafo e fotógrafo francês, com o cargo de director do Museu da Indústria em Bruxelas, elaborou um esboço de uma FDP ventilada mecânicamente, tendo em vista a climatização de espaços interiores. (Poirazis 2006)

Em 1903 aparece um dos primeiros edifícios com FDP, uma fábrica de brinquedos alemã, a Steiff Factory. Neste caso o objectivo da fachada era a maximização da produção da fábrica, através de uma melhoria das condições de trabalho, mais precisamente um maior aproveitamento da iluminação natural. Nos anos que se seguiram a fábrica foi ampliada, utilizando as FDP nos novos pavilhões. (Solla 2011)

Vários outros projectos foram surgindo ao longo dos anos, um pouco por todo o mundo. Como alguns desses exemplos temos: o banco austríaco Post Office Savings Bank, desenvolvido pelo arquitecto Otto Wagner; na Rússia pelas mãos do arquitecto Moisei Ginzburg, um complexo habitacional em 1928; também na Rússia o edifício Centrosoyus, desenvolvido por Charles-Edouard Jeanneret (Le Corbusier), um dos grandes impulsionadores deste tipo de fachadas. (Poirazis 2006)

Após este período em torno de 1930, as FDP entraram num estado de dormência, sendo praticamente nulos os progressos e construções verificados. A partir dos anos 70, este tipo de estrutura, volta a ganhar um grande impulso, promovido por dois grandes factores, a crescente preocupação com o ambiente e o aspecto estético que proporcionava. Desde então, e até aos dias de hoje, têm sido vários os projectos que recorrem às FDP, dando como exemplo, alguns edifícios recentes, a nível internacional, que incorporam estas fachadas: o hospital Rey Juan Carlos em Madrid (2012), a Leatop Plaza na China (2012) e um projecto vanguardista previsto para 2015, com uma abordagem pouco convencional às fachadas de vidro, um edifício residencial holandês denominado de Gedempte Zuiderdiep. (World Architecture Map 2013)

Em Portugal começa-se a utilizar cada vez mais este tipo de fachadas, como alguns exemplos temos: o Atrium Saldanha (Edimetal 2009), a Torre de Monsanto (Alcir 2013), a Natura Towers (MSF 2009), o edifício da agência da Caixa Geral de Depósitos na Av. da República, em Lisboa e o Office Park Expo (Norfin 2011) que é onde se situa o edifício a estudar neste trabalho.

4 Programa de cálculo: VENTIL.FOR

O objectivo principal deste trabalho é a simulação da ventilação de uma fachada de dupla pele (FDP), recorrendo a um programa de cálculo numérico, neste caso o VENTIL, um programa de cálculo automático (PCA) de ventilação. (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985)

Este programa é baseado num modelo integral para a ventilação natural, que partindo de um conjunto de dados introduzidos pelo utilizador, que caracterizam os espaços em análise e as condições ambientais, permite obter, para cada espaço interior, as taxas de ventilação, as variações de temperatura e da massa volúmica e os coeficientes de pressão interiores.

Nos parágrafos que se seguem será dada uma breve descrição do programa, nomeadamente sobre os princípios em que se baseia, o seu modo de funcionamento e os resultados que é possível obter, tendo sempre em linha de conta que o desenvolvimento deste trabalho assenta apenas na vertente de utilizador desta ferramenta, não sendo por isso apresentada uma descrição pormenorizada do VENTIL.FOR, mas apenas uma visão global que permita a sua utilização.

4.1 O modelo

O modelo deste algoritmo pressupõe o conhecimento das condições climatéricas do exterior, considerando duas forças responsáveis pelo escoamento do ar com origem no: i) gradiente de pressão com origem eólica, e, ii) gradiente de pressão com origem térmica.

4.1.1 Componente eólica

A resultante destas forças do gradiente de pressões, F_i , pode ser expressa por:

$$F_i = p_i A_i = \frac{1}{2} \rho U_0^2 c_{p_i} A_i \quad (1)$$

sendo p_i a pressão local, a parcela $\frac{1}{2} \rho U_0^2$ representa a pressão dinâmica de referência, ρ é a massa volúmica do ar, A_i a área da abertura e U_0 a velocidade média do vento à altura de referência.

Os coeficientes de pressão c_{p_i} , são definidos por:

$$c_{p_i} = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2)$$

onde p_0 é a pressão estática de referência.

O coeficiente c_p é definido através da razão entre a pressão estática local, causada pela incidência do vento, deduzida da pressão estática ambiente, e a pressão dinâmica do escoamento não perturbado.

O valor deste coeficiente depende de diversos factores, como a geometria do edifício, orientação, orografia e obstáculos circundantes. De um modo geral pode-se assumir que, os valores de c_p vão ser positivos na fachada a barlavento, negativos na fachada de sotavento e de sinal variável nas laterais e cobertura do edifício, dependendo do comprimento do edifício no sentido do escoamento.

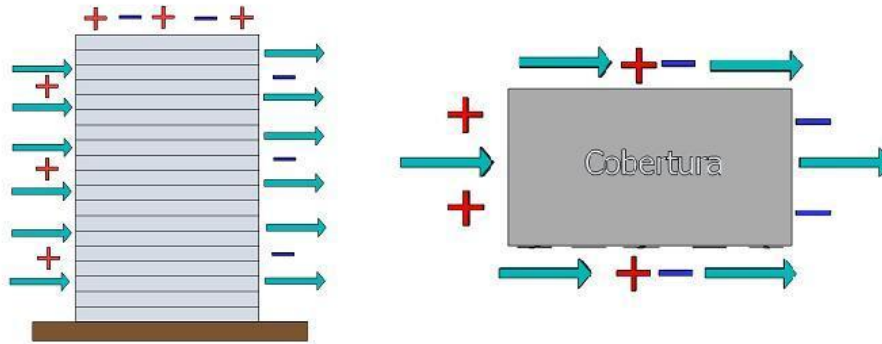


Figura 11 – Ilustração simplificada do sinal de c_p (esquerda: vista de perfil e direita: vista de cima).

Na literatura existem várias metodologias e tabelas, que permitem de uma forma rápida estimar um valor genérico de c_p para um determinado caso. Contudo, a obtenção com maior rigor do valor de c_p implica muitas vezes o recurso a um túnel de vento, onde se simula o comportamento de um edifício específico. Estes ensaios só se justificam quando as condicionantes referidas impõem alterações significativas na distribuição da pressão na envolvente, relativamente às formas simples constantes de regulamentos e normas.

4.1.2 Componente térmica

A segunda força promotora do escoamento resulta da acção térmica, com origem no do diferencial de temperaturas entre o exterior e o interior do espaço considerado. Este diferencial de pressões vai gerar uma força de impulsão, devido à variação na massa volúmica do ar, expressa através:

$$F_{imp} = \Delta p \times A = \Delta \rho \times gV \quad (3)$$

onde V é o volume de fluido deslocado.

4.1.3 Hipótese de Boussinesq

Esta hipótese, proposta pelo físico francês Boussinesq em 1903, permite considerar que, quando a variação de temperatura ao longo do escoamento é reduzida, a variação da massa volúmica é muito próxima da variação da temperatura, $\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta T}{T}$. Esta aproximação é possível aplicar na ventilação natural porque, apesar do ar ser um fluido compressível, a variação causada na sua massa volúmica deriva maioritariamente do diferencial de temperatura, que vai ser reduzido, e não do efeito da pressão. (Kundu and Cohen 2002)

4.1.4 Perdas de carga

A dissipação de energia devido ao escoamento do ar ao longo do seu percurso é contabilizada através das perdas de carga, quer sejam provocadas pelas aberturas em si, quer tenham origem no atrito. Neste último caso, é admitido que existe uma difusão rápida do ar no interior do espaço, devido há diferença na ordem de grandeza entre a velocidade do ar através das aberturas e no espaço interior em causa. A variação na pressão causada por estas perdas é dada por:

$$\Delta p = p_{ext.} - p_{int.} = \zeta \frac{1}{2} \rho U |U| \quad (4)$$

na qual ζ é o coeficiente de perda característico da abertura e U a velocidade do ar na abertura de entrada, que se considera positiva.

4.1.5 Equação da continuidade

Esta equação exprime o conceito de conservação de massa de um fluido onde, num volume de controlo fixo, em que não existe acumulação de fluido no seu interior, o caudal de entrada é igual ao caudal de saída nesse volume.

No caso dos espaços internos:

$$\sum_{k_i} U_{ki} A_{ki} = 0 \quad (5)$$

E para a edificação:

$$\sum_i \sum_{k_i} U_{ki} A_{ki} = 0 \quad (6)$$

onde o índice k representa a abertura e i o espaço interno, U a velocidade média do ar e A a área da abertura.

4.1.6 Equação da quantidade de movimento

Para caracterizar a quantidade de movimento do fluido é utilizada uma simplificação das equações da dinâmica de fluidos, mais precisamente a equação de Bernoulli. Esta equação obtem-se a partir de certas considerações acerca do comportamento do fluido, descritas com mais detalhe no parágrafo que se segue.

4.1.6.1 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli deriva das equações de Euler para o movimento de um fluido. (Munson and Young 2009) Trata-se de uma simplificação obtida com base em pressupostos sobre as propriedades do fluido e do escoamento: os efeitos devido à viscosidade do fluido são desprezáveis; o escoamento é estacionário; o fluido é incompressível e a análise é feita ao longo de uma linha de corrente.

Aplicando esta equação às aberturas de um determinado espaço temos, para uma abertura interna:

$$(\Delta\rho_i H_{ki} - \Delta\rho'_i H'_{ki})g + (\Delta p'_i - \Delta p_i) - \zeta_{ki} \frac{1}{2} \rho_o U_{ki} |U_{ki}| = 0 \quad (7)$$

onde $\Delta\rho_i$ e Δp_i representam as diferenças do ar interior e exterior no que toca à massa volúmica (ρ) e à pressão (p), H_{ki} é a altura média da abertura, tomando como referência a cota da abertura mais baixa no espaço em análise. O índice superior indica as grandezas já definidas no espaço contíguo ao espaço em estudo (i), com o qual existe uma comunicação pela abertura k_i .

Para as aberturas exteriores, a equação vai ser semelhante, apenas diferindo nas grandezas $\Delta\rho_i$, tomando o valor zero e Δp_i que representa a pressão causada pela incidência do vento:

$$(\Delta\rho_i H_{ki})g + \left(\frac{1}{2}\rho_o U_o^2 c_{pki} - \Delta p_i\right) - \zeta_{ki} \frac{1}{2}\rho_o U_{ki}|U_{ki}| = 0 \quad (8)$$

4.1.7 Equação da energia

Para cada espaço em consideração, temos:

$$\dot{Q}_i + \sum_{k_i} \rho_o c_{par} U_{ki} A_{ki} \Delta T_i + \sum_{l_i} h_{li} A_{li} (\Delta T_i - \Delta T_i') = 0 \quad (9)$$

Para a edificação:

$$\sum_i \dot{Q}_i + \sum_i \sum_{k_i} \rho_o c_{par} U_{ki} A_{ki} \Delta T + \sum_i \sum_{l_i} h_{li} A_{li} (\Delta T_i - \Delta T_i') = 0 \quad (10)$$

sendo \dot{Q}_i o calor gerado no espaço, c_{par} o calor específico do ar, ΔT a diferença de temperatura entre o espaço interior i ou o espaço contíguo i' , dependendo do sinal da velocidade do ar referenciado ao espaço i , e o ambiente exterior. A_{li} é a área da parede não adiabática l_i e h_{li} o seu respectivo coeficiente global de transferência de calor.

De forma a fechar o sistema de equações, recorre-se por último à equação de estado para um gás perfeito, $p = \rho R t$, que para cada espaço se reduz a:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_o} + \frac{\Delta T_i}{T_o} = 0 \quad (11)$$

Para resolver o sistema de equações acima descrito, é necessário ter conhecimento das seguintes grandezas: temperatura exterior; velocidade do vento; os coeficientes de pressão nas aberturas, ajustados de acordo com a direcção do vento; e as características geométricas e térmicas do edifício em estudo.

4.1.8 Número de Reynolds

O escoamento de um fluido pode ser classificado de acordo com três categorias, regime laminar, de transição ou turbulento. Estas categorias encontram-se directamente relacionadas com a velocidade e a viscosidade do fluido e uma dimensão característica do escoamento. De modo a ilustrar estes tipos de escoamento a seguinte figura representa a componente x da velocidade, em função do tempo:

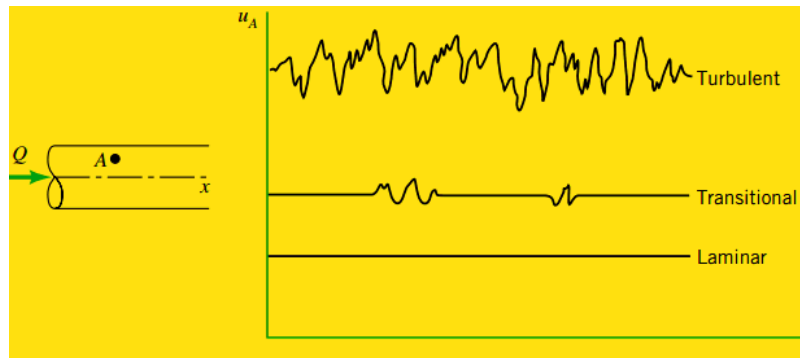


Figura 12 – Variação da velocidade ($U(x)$) ao longo do tempo. (Munson, Young, and Okiishi 2002)

Uma das formas de caracterizar o regime do escoamento, é com recurso ao número de Reynolds (Re), que não é mais que a razão entre os efeitos da viscosidade e da inércia no escoamento :

$$Re = \frac{UL\rho}{\mu} \quad (12)$$

onde U é a velocidade, L uma dimensão característica, ρ a massa volúmica do fluido e μ a viscosidade dinâmica. O valor de Re permite assim classificar o tipo de escoamento de um fluido em três regimes:

Tabela 1 – Classificação do regime de escoamento, de acordo com o Re . (White 2003)

Re	Regime do escoamento
$[0 \text{ a } 10^3[$	Laminar
$[10^3 \text{ a } 10^4[$	Transição
$>10^4$	Turbulento

Com base em Re é possível ultrapassar uma das condicionantes do algoritmo base do Ventil, mais precisamente a relação entre o regime de escoamento e o coeficiente de perdas nas aberturas. Estas perdas variam com o termo da velocidade, que num escoamento laminar é linear e no caso de um escoamento turbulento é quadrático.

Sendo assim as equações da quantidade de movimento (4.1.6), depois de reformuladas, ficam:

$$(\Delta\rho_i H_{ki} - \Delta\rho'_i H'_{ki})g + (\Delta p'_i - \Delta p_i) - \zeta_{ki} \frac{1}{2} \rho_o U_{ki} |U_{ki}|^\gamma = 0 \quad (13)$$

$$(\Delta\rho_i H_{ki})g + \left(\frac{1}{2} \rho_o U_o^2 c_{p_{ki}} - \Delta p_i \right) - \zeta_{ki} \frac{1}{2} \rho_o U_{ki} |U_{ki}|^\gamma = 0 \quad (14)$$

em que é adicionado o expoente γ ao módulo da velocidade, que neste caso pode tomar os seguintes valores:

Tabela 2 – Valores do expoente γ .

Re	Regime	γ
$\leq 10^3$	Laminar	0
$]10^3 \text{ a } 10^5[$	Transição	$f(Re)$
$\geq 10^5$	Turbulento	1

Quando se trata de um regime de escoamento de transição, o γ é definido através de uma função para uma abertura genérica, que representa os valores extremos e garante a continuidade tangencial na sua vizinhança:

$$\gamma = \left[e^{\left(\frac{10^5}{Re^{1,43}} \right)} \right]^{-1} \quad (15)$$

4.2 O programa: uma breve descrição

O algoritmo deste modelo numérico, partindo do sistema de equações já referido, vai caracterizar o espaço em estudo determinando as seguintes grandezas: a velocidade do ar em cada abertura e as variações de pressão, massa volúmica e temperatura em cada espaço. Para chegar a estes resultados, são criadas N incógnitas de acordo com:

$$N = \sum_{I=1}^{NESP} NA(I) + 3 \times NESP \quad (16)$$

em que I é o índice do espaço interno, $NESP$ o número de espaços internos, NA o número de aberturas.

O programa resolve todo este conjunto de equações de forma iterativa, por um processo de triangulações ortogonais, sendo necessário introduzir: i) uma estimativa da solução para dar início ao processo, normalmente 1 ou -1 consoante o ar entre ou saia pela a abertura, ii) a velocidade do vento, a temperatura exterior e a pressão atmosférica, iii) o calor específico do ar, a constante do gases e a aceleração da gravidade.

Por fim obtêm-se os vários parâmetros de saída: $REN(I)$ renovações por hora no espaço I ; $FR(I)$ o número de Froude¹; $PSI(I)$ ²um parâmetro de potência adimensional que relaciona as duas forças que levam ao escoamento do ar na fachada, eólica e térmica; c_p o coeficiente de pressão interior; e $DELTA(I)$ a variação de temperatura do espaço.

4.3 Informação adicional

Quanto à utilização do programa, a interface do utilizador contém uma ligeira alteração, que deriva da introdução do módulo adicional no algoritmo, que consiste na necessidade de introduzir um valor limite para o número de iterações do algoritmo, normalmente acima de 50. Por vezes, quando são simuladas aberturas muito pequenas, o programa tem alguma dificuldade em convergir, pelo que é necessário introduzir o valor máximo de iterações por diversas vezes. A simulação de pequenas aberturas pode também levar a resultados inconclusivos, obtendo a mensagem “*O Jacobiano modificado e singular. Tente outra aproximacao inicial*”, neste caso é necessário verificar se existe algum erro na introdução dos dados e também ajustar alguns parâmetros, como os coeficientes de perda de carga ou a estimativa inicial da solução.

¹ Número de Froude: é a razão entre a força inercial e a força gravitacional, utilizado para caracterizar o escoamento de um fluido quando encontra um obstáculo.

² $PSI(I) = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 U_0^3}{\frac{Q(I)}{APL(I)}}$

Após a introdução de todos os dados através do menu do programa, é criado um ficheiro base, onde são guardadas todas as informações introduzidas. Este ficheiro pode ser editado, evitando a repetição de todo o processo de introdução dos dados.

5 Caso de estudo: Edifício H – Office Park Expo

O edifício estudado neste trabalho é o Edifício H do Office Park Expo, situado no Parque das Nações em Lisboa. Este complexo de escritórios, composto por 10 edifícios que ocupam uma área de $30000m^2$, foi desenvolvido pela Norfin (Norfin 2012), tendo sido distinguido com vários prémios imobiliários e de investimento.

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 2012), tais como a sua localização, geometria e características técnicas.

5.1 O porquê da escolha do Edifício H

Com o trabalho apresentado neste documento pretendeu-se analisar o funcionamento de uma FDP, com recurso a um modelo numérico, beneficiando da existência de dados de funcionamento obtidos em campanhas de monitorização anteriores.

Esta campanha de monitorização realizada, em conjunto, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST), cujo objectivo era ampliar o conhecimento sobre as FDP no clima português, teve como alvo o Edifício H do Office Park Expo. Foram estudadas várias variáveis, ao longo de diferentes períodos do ano, nos pisos 15 e 16 do edifício. As variáveis que foram monitorizadas são as seguintes: a temperatura dos vidros, do sombreador e da caixa de ar; a radiação solar, horizontal e vertical; e a velocidade do ar junto da grelha de exaustão da fachada (apenas num ponto).

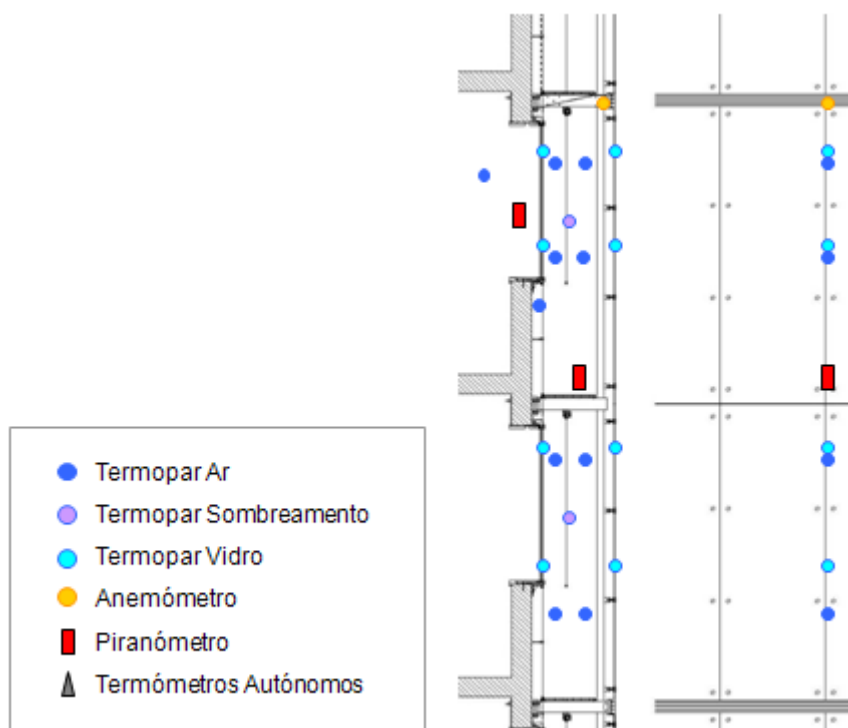


Figura 13 – Esquema da colocação dos dispositivos de monitorização na campanha realizada. (FACAL n.d.)

Os períodos de monitorização, de modo a obter dados das diferentes condições climáticas, foram realizados nas seguintes datas:

Tabela 3 – 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

De todos os dados obtidos foram seleccionados apenas alguns, com base em algumas características relevantes para o estudo. As características pretendidas referem-se às condições meteorológicas, de céu limpo e nublado, e a um dia representativo de cada uma das estações do ano.

5.2 Localização

A edificação estudada está localizada em Lisboa no Parque das Nações, fazendo parte do complexo da Direcção Geral da Administração da Justiça.



Figura 14 – Localização do edifício, assinalado a amarelo (Google 2012).

5.3 Características gerais

O Edifício H 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.



Figura 15 – Vista exterior do edifício (FACAL n.d.).

5.4 A fachada de dupla pele (FDP)

A fachada de dupla pele aplicada neste edifício segue os princípios comuns da qualquer fachada deste tipo, podendo ser enquadrada de acordo com classificação descrita em 2.3 como: fachada de ventilação natural, do tipo corredor, com a altura de dois pisos, e cortina de ar exterior.

Neste caso em particular, a FDP foi baseada em projectos de outros países com climas diferentes do português. Devido ao conceito original ser derivado de outros climas, a empresa responsável pelo projecto, realizou os ajustes necessários para uma melhor adequação ao clima de Portugal.

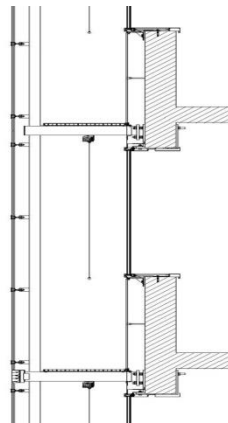


Figura 16 – Esquema da fachada do edifício (FACAL n.d.).

Com se pode ver na Figura 16, a fachada é composta, da esquerda para a direita, por um vidro exterior, uma caixa de ar que inclui um dispositivo de sombreamento e por um vidro interior. Uma nota em relação ao vidro interior, a pele interior da fachada não é totalmente de vidro, sendo a porção inferior composta por um murete opaco com um isolamento térmico.

O projecto passou por várias fases de desenvolvimento, dentro das quais se destacam:

5.4.1 Escolha do vidro

A escolha do vidro assentou em duas ideias essenciais, o conforto térmico e a iluminação do interior do espaço. De modo a controlar os ganhos solares, o vidro escolhido deveria ter um factor solar reduzido e um coeficiente de transmissão térmica também reduzido.

Para a pele exterior o vidro utilizado é do tipo laminado com uma espessura total de 20mm, composto por um vidro temperado de controlo solar na face exterior e um vidro convencional termoendurecido na pele interior.

Os detalhes técnicos do vidro encontram-se na tabela abaixo, que apesar de serem fornecidos pelo fabricante, foram ainda confirmados, a pedido da FACAL, por um laboratório independente (TNO 2012).

Tabela 4 – Detalhes técnicos do vidro exterior (FACAL n.d.).

Parâmetro	Dados do fabricante	Dados de um estudo independente (TNO)
Factor solar	0,49	0,53
Transmissão luminosa	0,60	0,64
Reflexão para o exterior	0,10	0,09
Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2.K$)	5,10	5,11

Para o vidro interior da fachada, as características pretendidas são diferentes das anteriores, procurando obter uma baixa transmissão térmica, reduzindo a passagem do calor do canal de ar para o interior e por outro lado ter um baixo índice de emissividade. Neste caso foi utilizado um vidro duplo com uma película de baixa emissividade, com as seguintes características técnicas:

Tabela 5 – Detalhes técnicos do vidro interior (FACAL n.d.).

Parâmetro	Dados do fabricante	Dados de um estudo independente (TNO)
Factor solar	0,39	0,37
Transmissão luminosa	0,69	0,66
Reflexão para o exterior	0,10	0,10
Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2.K$)	1,30	1,33

Para obter um visão global do desempenho dos vidros, foram apuradas pela empresa responsável, as características técnicas da fachada como um todo:

Tabela 6 – Detalhes técnicos do conjunto dos vidros (FACAL n.d.).

Parâmetro	Sem sombreamento	Com sombreamento total
Factor solar	0,19	0,05
Transmissão luminosa	0,42	-
Reflexão para o exterior	0,15	0,16

5.4.2 Dispositivo de sombreamento

O dispositivo de sombreamento encontra-se colocado no interior da caixa de ar, onde se encontra protegido dos elementos do exterior, servindo para controlar tanto os ganhos térmicos como a luminosidade solar.

Neste projecto a tipologia de sombreador instalado é do tipo rolo de tela, permitindo regular a área sombreada.



Figura 17 – Tela de sombreamento (FACAL n.d.).

Tabela 7 – Detalhes técnicos do sombreador (Warema 2013).

Parâmetro	Referência/Valor
Modelo	3519 Perle
Material	PVC e fibra de vidro
Coefficiente de transmissão térmica ($W/m^2.K$)	1,2
Nível de protecção solar	4 (máximo)

5.5 Caso de estudo: descrição da fachada de dupla pele

Neste capítulo são descritos os aspectos técnicos da fachada de dupla que será a base de todo o estudo presente neste trabalho. Os seguintes esquemas foram retirados da planta do projecto, dando uma visão global da fachada:

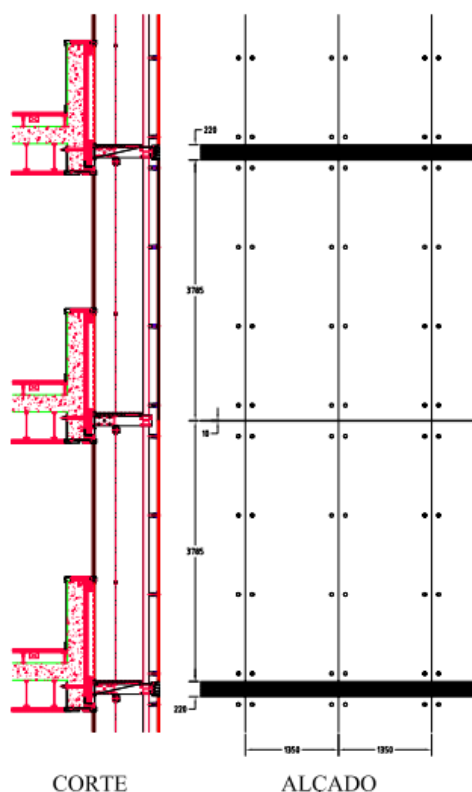


Figura 18 – Vista esquemática da fachada de dupla pele (FACAL 2006).

Apesar da Figura 18 ilustrar a fachada não permite ter uma visão pormenorizada do volume de controlo que será utilizado para desenvolver o modelo numérico. De modo a complementar a informação desta figura, com uma descrição mais pormenorizada dos seus elementos constituintes, foi elaborada uma representação com base nos documentos e esquemas da empresa responsável:

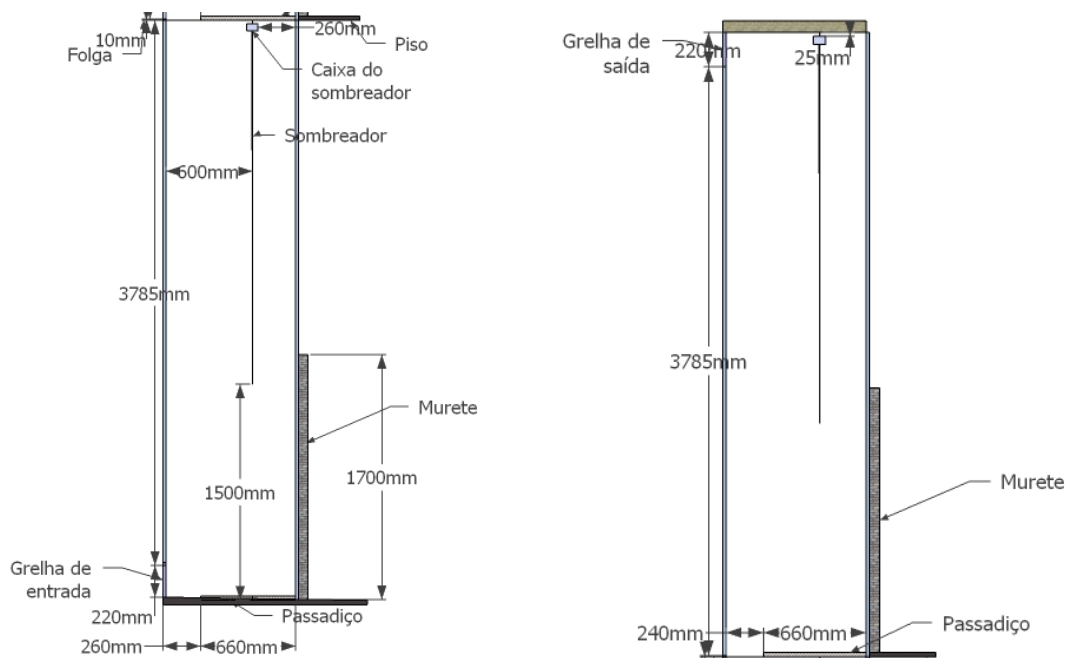


Figura 19 – Ilustração pormenorizada do perfil da fachada (Esquerda – piso inferior; Direita – piso superior).

Cada secção da fachada de dupla pele é composta por dois pisos, existindo passadiços de acesso ao nível de cada piso, 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. O volume de controlo utilizado neste trabalho (Figura 19), é composto por: dois pisos, com as grelhas de entrada e saída de ar em cada extremidade da fachada; dois passadiços de acesso, um na base e outro na divisória dos dois pisos e um dispositivo de sombreamento por piso.

6 O modelo

De modo a utilizar o programa de cálculo, foi necessário conceber um modelo, que traduzisse de forma numérica o volume de controlo que se pretende estudar. Nos parágrafos seguintes é feita uma descrição pormenorizada da abordagem seguida na obtenção de um modelo representativo da fachada.

6.1 Modelo simplificado

Em primeiro lugar começou por se criar um modelo simplificado, com o intuito de uma familiarização com o algoritmo e com o modo de funcionamento do VENTIL.

Esta simplificação está representada na Figura 20, onde se considerou que o volume de controlo seria composto por dois pisos de altura e dois vidros de largura. Alguns dos elementos interiores da fachada também foram simplificados, considerando apenas a influência das caixas do sombreador e do passadiço inferior e intermédio, supondo que não havia sombreamento e que a pequena abertura, entre o vidro exterior e o passadiço intermédio, era um elemento fechado.

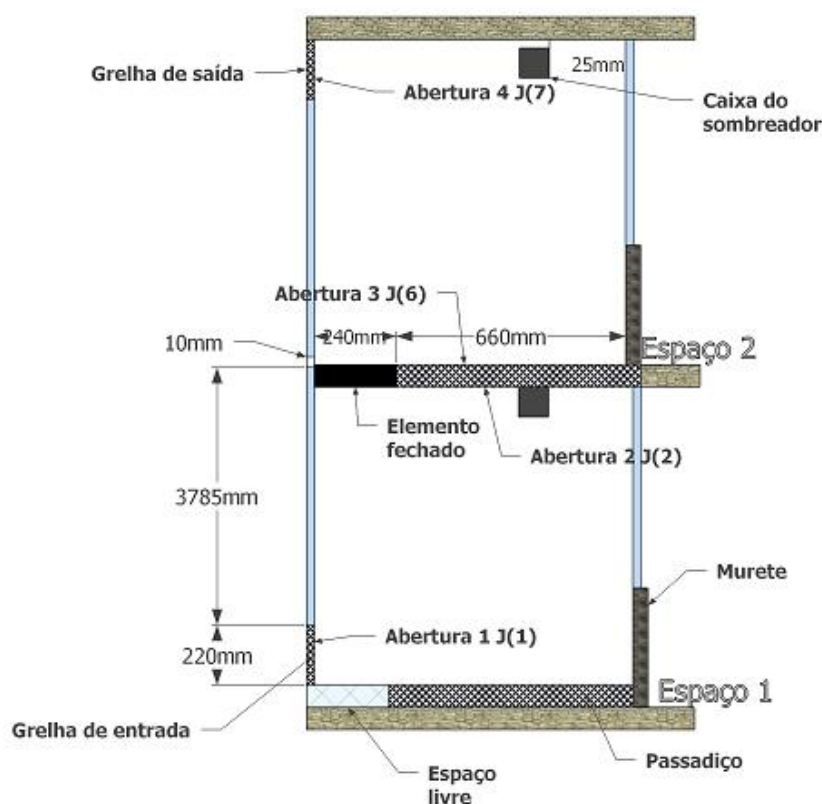


Figura 20 – Esquema do modelo simplificado (Nota: dimensões não proporcionais).

Na Figura 20 estão representados os elementos interiores da caixa de ar considerados neste exemplo, as dimensões relevantes e a identificação dos espaços e aberturas.

6.1.1 Dados utilizados

Os dados utilizados para executar a simulação foram obtidos a partir da Figura 20, sendo complementados com base no exemplo presente no manual de instruções do VENTIL. Quanto aos parâmetros derivados da geometria do volume de controlo, temos:

Tabela 8 – Dados dos espaços utilizados na simulação.

Parâmetro	Espaço inferior (1)	Espaço superior (2)
Número de aberturas	2	2
Paredes não adiabáticas	1	1
Calor gerado (W)	1000	1000
Volume (m^3)	6,13	6,13
Área do piso (m^2)	2,43	2,43
Altura característica (m)	3,91	3,91

Tabela 9 – Dados dos elementos da fachada.

Elemento	Coefficiente de perda de carga, ζ
Grelhas de admissão/exaustão	6
Caixa do sombreador	0,26
Passadiço	0,58
Espaço livre	0,08

Alguns dos valores do coeficientes de perda de carga foram baseados na literatura disponível para sistemas hidráulicos e condutas de ventilação [(Munson, Young, and Okiishi 2002); (CIBSE 2007)], já que se encontrou bastante dificuldade em obter estes valores para as situações existentes neste caso de estudo. Na tabela acima temos exemplos de algumas destas adaptações, como o valor da caixa do sombreador, adaptado de uma válvula fechada a 25%, do passadiço, em que se considerou uma malha com um rácio de área livre de 0,7 e do pequeno espaço livre inferior.

Para os factores climáticos externos, foram utilizados os valores que constam no exemplo do manual de instruções do VENTIL, já que nesta fase não era necessário recorrer a dados reais. Esses valores são:

Tabela 10 – Dados dos factores externos (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985).

Parâmetro	Valor
Velocidade do vento (m/s)	3
Temperatura exterior (K)	288
Pressão atmosférica (Pa)	101600
Constante dos gases perfeitos, R ($J/kg.K$)	287
Aceleração da gravidade, g (m/s^2)	9,8
Calor específico do ar ($J/kg.K$)	1009

Após conhecer todos os dados necessários, é possível executar o modelo de simulação numérico. Desta forma, foram organizados numa tabela os índices das aberturas com os respectivos parâmetros, de modo a facilitar a sua visualização e interpretação, obtendo-se:

Tabela 11 – Tabela síntese dos parâmetros dos índices.

Espaço	Índice J	Primeira estimativa da solução	c_p	ICPCO	ζ	Área da abertura	$H_{característica}$	IHCO
1	J(1)	1	0,8	0	6,08	0,594	0	0
	J(2)	-1	100	8	0,84	1,782	3,88	6
	J(3)	0	0	0	0	0	0	0
	J(4)	0	0	0	0	0	0	0
	J(5)	0	0	0	0	0	0	0
2	J(6)	1	100	3	0,84	1,782	0	2
	J(7)	-1	0,6	0	6,26	0,594	3,88	0
	J(8)	0	0	0	0	0	0	0
	J(9)	0	0	0	0	0	0	0
	J(10)	0	0	0	0	0	0	0

Na tabela acima surgem dois parâmetros que ainda não tinham sido descritos, o ICPCO e o IHCO, ambos referentes a códigos internos do VENTIL. O ICPCO está relacionado com a pressão, cujo valor vai ser o índice J da camada intermédia superior do espaço contíguo, sempre que, através de uma abertura, exista escoamento entre os dois espaços. No caso do IHCO, este indica o índice J da abertura comunicante do espaço contíguo.

Uma nota em relação aos valores dos coeficientes de perda de carga, ζ , neste exemplo optou-se por conjugar os coeficientes das diversas aberturas e objectos, evitando assim a criação de um modelo, representativo da fachada, mais elaborado. A conjugação destes coeficientes foi feita da seguinte forma: na abertura 1 (J(1)) foram combinados o efeitos da grelha de entrada e da interferência do espaço livre junto do passadiço; na abertura 2 e 3 (J(2) e J(6)) tanto o passadiço, como a caixa do sombreador foram tidos em conta; por fim, na abertura 4 (J(7)) o efeito da grelha e da caixa do sombreador, foram somados.

Antes de dar início ao processo de cálculo, é necessário fornecer a informação acerca das paredes não-adiabáticas, que neste caso vão ser apenas os dois vidros exteriores.

Tabela 12 – Dados das parede não adiabáticas.

Espaço	Área da parede (m^2)	Parâmetros	
		IAPACO	$U \left(W/m^2.K \right)$
1	10,22	0	5,1
2		0	

Nesta tabela surge o parâmetro IAPACO que, à semelhança do ICPCO, é o índice J da camada intermédia inferior do espaço contíguo, com o qual existe trocas de calor. Caso se trate de uma parede exterior, como é o caso, toma o valor zero.

6.1.2 Resultados obtidos

Após executar o programa de cálculo, partindo do que foi descrito no tópico anterior, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 13 – Resultados obtidos do modelo simplificado.

Espaço	Índice J	Parâmetro						
		Velocidade do ar (m/s)	Caudal (m^3/s)	Δp (Pa)	$\frac{\Delta \rho}{\rho}$ (kg/m^3)	Coefficiente de pressão	ΔT (K)	Renovações por hora
1	J(1)	0,531	1134,4	3,35	-0,0096	0,60	2,26	185,1
	J(2)	-0,175	-1134,4					
2	J(6)	0,175	1134,4	3,70	-0,0181	0,67	4,25	
	J(7)	-0,531	-1134,4					

Apesar do modelo simulado nesta fase ser muito simples, obtendo-se alguns resultados óbvios, os valores presentes na Tabela 13, permitem ter uma visão das potencialidades do VENTIL quando aplicado a sistemas mais complexos, tornando-se numa ferramenta muito útil para o estudo de uma fachada de dupla pele.

Analisando com maior detalhe os resultados acima indicados, verifica-se que caudal de ar se desloca da base da fachada, entrando o ar pela grelha inferior (J(1)) e saindo pelo topo (J(7)). A velocidade do ar vai ser superior nas grelhas de entrada/saída, já que possuem uma área menor em relação à abertura central (J(2) e J(6)).

O efeito do calor dentro da fachada, neste caso proveniente da radiação solar incidente, vai fazer com que exista um ΔT , em relação ao exterior. Este aumento de temperatura é superior no espaço 2, já que o ar vai aquecendo ao longo do seu percurso e também devido efeito de impulsão, causados pela diminuição da massa volúmica do ar, evidente no valor de $\Delta\rho$.

O coeficiente de pressão no interior de cada espaço e a diferença de pressão em relação ao exterior, Δp , estão relacionados através da equação (2).

7 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 do vento foram obtidos a partir do anemómetro situado no Cabeço das Rolas, no Parque das Nações, a cerca de 1400m do Edifício H, Figura 21.



Figura 21 – Localização do anemómetro do Cabeço das Rolas (Amarelo: Edifício H; Azul: anemómetro). (Google 2012)

Devido à distância de torre anemométrica ao edifício e às diferentes rugosidades envolvendo o local, foi necessário realizar uma correcção dos dados disponíveis. Nesta correcção recorreu-se às definições da Camada Limite Atmosférica (CLA) e Urbana (CLU) e às equações que descrevem o perfil da velocidade do vento. A abordagem seguida nesta correcção será descrita em detalhe nos parágrafos seguintes.

7.1 Camada limite: introdução teórica

A camada limite (CL) pode ser definida como a zona do escoamento situada entre uma superfície e a cota onde a presença dessa superfície deixa de influenciar o escoamento do fluido. O atrito entre superfície e o fluido propaga-se, de forma decrescente, ao longo da CL, dando origem a um perfil, vertical e crescente, de velocidades. O topo da CL corresponde à cota em que a velocidade do fluido não varia em altura. Na interface entre o fluido em movimento e a superfície, a velocidade do escoamento é igual à da superfície, denominada de condição de não escorregamento.

7.2 Camada limite urbana

Apesar do local estudado ser uma zona urbana, para melhor compreender a influência do solo no vento, começemos por definir a Camada Limite Atmosférica (CLA): “A Camada Limite Atmosférica é a parte da troposfera que é directamente influenciada pela presença da superfície da Terra e que responde aos elementos orográficos e de rugosidade da superfície com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos.” (Silva 2012)

A CLA caracteriza-se pela sua turbulência e processos de mistura constantes, causados pelo seu contacto com superfície terrestre e pelos fluxos de calor ao longo do dia. A espessura desta camada varia desde ~100m podendo chegar aos 2000m (Oke 1987), principalmente entre o período diurno e nocturno, devido às oscilações da temperatura do solo que vão promover circulações verticais do ar.

Transpondo estes conceitos para a zona urbana, pode considerar-se, ainda, a formação de uma Camada Limite Urbana (CLU), semelhante à CLA, representando a camada atmosférica junto dos edifícios, onde o escoamento atmosférico é influenciado pela presença das construções.

Esta camada (CLU) engloba três sub-camadas, a Camada Inercial ou de Mistura, a Camada de Rugosidade e a Camada de Cobertura Urbana. Junto ao solo encontra-se a Camada de Cobertura Urbana, com uma espessura da ordem de grandeza da altura dos edifícios, onde se incluem as circulações do ar entre as construções, com um campo próprio de velocidades e com a existência de interferência entre escoamentos adjacentes. Acima dos edifícios encontra-se a Camada de Rugosidade, onde a turbulência é elevada e os padrões de circulação irregulares, fortemente dependentes da orografia e construções. Por fim, no nível acima, temos a Camada Inercial, representando cerca de 10% da CLA, que é uma zona onde os efeitos de inércia predominam e se regista um gradiente da velocidade do vento elevado, onde a turbulência é causada pelos edifícios e por efeitos de convecção.

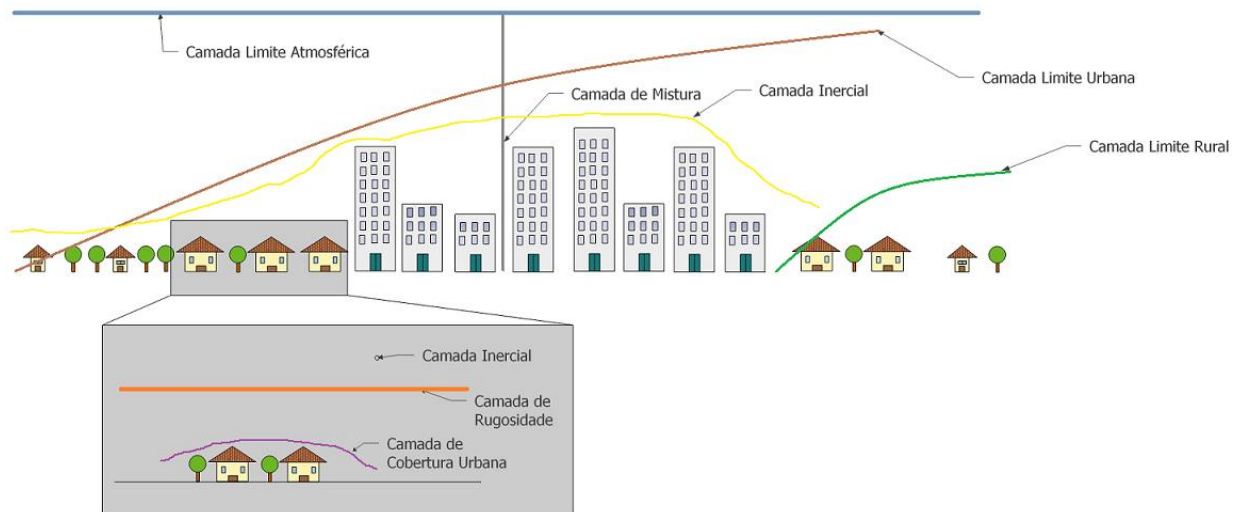


Figura 22 – Representação das diferentes camadas atmosféricas.

7.2.1 Velocidade de atrito

Um conceito importante é a de velocidade de atrito, representando a tensão entre o escoamento e a fronteira, expressa com dimensões de uma velocidade, dada por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (17)$$

onde τ é a tensão de corte na superfície e ρ a massa volúmica do ar.

7.2.2 Lei de potência

A lei de potência é uma das formas de descrever o perfil médio de velocidades de uma camada turbulenta, a partir de um valor de referência para a velocidade do vento,

$$U(z) = U_{ref.} \times \left(\frac{z}{z_{ref.}} \right)^\alpha \quad (18)$$

onde $U_{ref.}$ é a velocidade do vento num ponto de referência, z a cota do ponto onde se pretende estimar a velocidade do vento, $z_{ref.}$ a cota do local de medição do valor de referência e α é um coeficiente, obtido de forma empírica, que depende de vários factores (rugosidade do local, cota, hora do dia, velocidade do vento, temperatura, entre outros), existindo diversas aproximações para a sua determinação.

Esta lei pressupõe que se verifiquem determinadas condições físicas: o terreno, sobre o qual se desloca o escoamento, é relativamente homogénio; a estabilidade atmosférica é neutra, ou seja, existe um arrefecimento adiabático do ar ascendente, verificando-se um equilíbrio térmico entre o ar e a sua envolvente. (Kundu and Cohen 2002)

7.2.2.1 Estabilidade atmosférica: informação adicional

A estabilidade da atmosfera pode ser descrita com base nos movimentos verticais do ar, encontrando-se dividida em três categorias principais:

- Instável
- Neutra
- Estável

O ar ao subir/descer na atmosfera vai sofrer o efeito de expansão/compressão devido à variação da pressão em altura, fazendo variar a sua temperatura. A classificação da estabilidade de uma massa de ar está relacionada com essa variação na temperatura, comparativamente ao de um processo adiabático seco, $\left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{ad.} = 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Km}$ (Miranda 2001).

Tabela 14 – Classificação da estabilidade atmosférica em função do gradiente de temperatura.

Estabilidade	Variação da temperatura da massa de ar em relação a $\left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{ad.}$
Instável	$\frac{\Delta T}{\Delta z} > \left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{ad.}$
Neutro	$\frac{\Delta T}{\Delta z} \approx \left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{ad.}$
Estável	$\frac{\Delta T}{\Delta z} < \left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{ad.}$

Interpretando a informação da Tabela 14 vamos ter: no caso da atmosfera instável o gradiente de temperatura da massa de ar vai ser superior ao do processo adiabático, significando que o ar vai subir, se estiver mais quente o ar circundante, ou descer se estiver mais frio. No caso de ser estável, vai

ocorrer o oposto, o ar sobe/desce mas como se encontra com uma temperatura inferior/superior ao da vizinhança, vai tender a voltar ao ponto de partida. Quando a atmosfera se encontra num estado neutro, ambos os perfis de temperatura são idênticos, não existindo a tendência para movimentos verticais.

7.2.3 Perfil da Camada Limite Urbana

O edifício em estudo situa-se numa zona urbana, pelo que foi necessário, sempre que as características do vento o justificassem, recorrer à descrição logarítmica da CLA adaptada à Camada Limite Urbana (CLU).

A expressão que permite estimar a velocidade do vento num determinado local numa zona urbana é:

$$U_u = \frac{u_{*u}}{k} \times \ln\left(\frac{z-d}{z_{0u}}\right) \quad (19)$$

onde k é a constante de Von Kármán ($k=0,4$) e z a cota do ponto a determinar a velocidade do vento. As restantes variáveis são obtidas através de funções, que serão descritas de forma individual nos parágrafos seguintes.

No caso da velocidade de atrito numa zona urbana, u_{*u} , temos:

$$u_{*u} = u_{*0} \times \left[1 + \frac{\ln\left(\frac{z_{0u}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_u}{z_{0u}}\right)} \right] \quad (20)$$

Onde a velocidade de atrito no local de referência, u_{*0} , é dada por:

$$u_{*0} = \frac{kU_{ref.}}{\ln\left(\frac{z_{ref.}}{z_{0ref.}}\right)} \quad (21)$$

representando $U_{ref.}$ a velocidade referência do vento, $z_{ref.}$ a cota onde foi registada essa velocidade e $z_{0ref.}$ a altura da rugosidade do local referência.

O parâmetro z_{0u} representa a altura equivalente da rugosidade na zona urbana, é obtido através:

$$z_{0u} = \frac{1}{2} \times \overline{h_r} \times \lambda_f \quad (22)$$

onde $\overline{h_r}$ é a altura média da CCU e λ_f é a razão entre a área média das fachadas e área total em planta, através do qual se pode classificar o tipo de escoamento entre os edifícios, em função da incidência do vento e das características da malha urbana.

A espessura da CLU, δ_u , pode ser estimada da seguinte forma:

$$\delta_u = z_{0u} \times \left[0,65 - 0,03 \times \ln \left(\frac{z_{0u}}{z_0} \right) \right] \times \left(\frac{x}{z_{0u}} \right)^{0,8} \quad (23)$$

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

Por fim temos o deslocamento d , em relação ao plano de referência, que pode ser definido como a cota equivalente a partir da qual se fazem sentir os efeitos de atrito no perfil no escoamento.

Para zonas na sub-camada de inércia onde a relação entre a cota e a rugosidade do terreno não são elevadas, considera-se como uma boa aproximação a seguinte equação:

$$d = 0,7 \times \bar{h}_r \quad (24)$$

No caso de se tratar duma zona urbana, em que a presença dos edifícios tem importância, temos:

$$d = \bar{h}_r \times \left[1 - \frac{1 - e \left(-\sqrt{15 \times \lambda_f} \right)}{\sqrt{15 \times \lambda_f}} \right] \quad (25)$$

7.3 Correção da velocidade do vento

Dada a distância e localização da torre anemométrica em relação ao edifício em estudo, foi necessário corrigir os valores da velocidade do vento, tendo sido aplicados parâmetros de correção distintos para cada gama de direcções do vento, devido à diferente distribuição da rugosidade urbana em redor do edifício.

Nos parágrafos seguintes são descritas as metodologias utilizadas, que apesar de derivarem todas das expressões da CLU, têm ligeiras diferenças, de acordo com a orientação do vento.

7.3.1 Correção do vento: características locais

Na seguintes tabelas são apresentados os valores dos parâmetros utilizados na correção da velocidade do vento:

Tabela 15 – Dados considerados na correção da velocidade do vento

Dados gerais	
Parâmetro	Valor
Altura da fachada (m)	7,80
Pisos estudados	15 e 16
z_0 – Torre anemométrica (m)	0,30
z_0 – Edifício H (m)	1
Altura da Torre anemométrica (m)	10
Tipo de escoamento urbano, λ : interferência	0,25

Como já tinha sido referido, este trabalho recorre a dados obtidos em campanhas já realizadas, daí só serem estudados os pisos 15 e 16 do edifício. A zona da torre anemométrica pode ser classificada como um local pouco edificado com $z_0=0,3$. Já no caso do Edifício H, este situa-se num local com uma apreciável densidade de construção, sendo classificado como zona urbana, $z_0=1$ (Gipe 2004). Quanto ao tipo de escoamento na zona urbana, considerou-se que era de interferência, devido à proximidade entre os vários edifícios em redor, $\lambda=0,25$. (Oke 1987) (Silva 2012)

Tabela 16 – Dados considerados: vento de Sul

Vento de Sul, [151°,180°,199°]	
Parâmetro	Valor
Altura média da zona urbana, \bar{h}_u (m)	30

Quando o vento sopra de Sul, ao longo do seu percurso, vamos ter uma altura média dos edifícios de 30m.

Tabela 17- Dados considerados: vento de Norte

Vento de Norte, [330°,0°,44°]	
Parâmetro	Valor
Altura média da zona urbana, \bar{h}_u (m)	10

No caso do vento de Norte, a altura média dos edifícios é de 10m.

7.3.2 Direcção Noroeste-Sudoeste e Nordeste-Sudeste

Para as incidências do vento contido nos intervalos Noroeste-Sudoeste e Nordeste-Sudeste, recorreu-se à Lei de Potência.

Considerou-se que escoamento vindo destes quadrantes se encontra totalmente desenvolvido sobre a cidade (NO-SO) ou sobre o rio (NE-SE), ou seja, que o perfil da velocidade não se altera, utilizando-se directamente os valores da torre anemométrica.

Para aplicar a Lei de Potência é necessário conhecer o valor do coeficiente α , que vai tomar valores diferentes para estes dois quadrantes.

Quando o vento sopra de Nordeste-Sudeste, o seu percurso é em grande parte sobre o rio, atravessando apenas uma pequena porção em terra pouco edificada (Figura 21). Para este quadrante o valor de α escolhido foi de 0,20. (RSA - "Regulamento de Segurança de Estruturas de Edifícios e Pontes")

No caso do quadrante Noroeste-Sudeste, o percurso do vento é sobre uma zona urbana, com uma rugosidade do terreno superior ao caso anterior, neste caso o α vai ser de 0,28. (RSA - "Regulamento de Segurança de Estruturas de Edifícios e Pontes")

Numa primeira abordagem a obtenção destes valores foi feita através de estimativas, com base em equações e metodologias propostas na bibliografia (Anexo 1: Coeficiente α , (Sedefian 1979), (Manwell, McGown, and Rogers 2002), (Spera 2009) (Spera and Richards 1979)), no entanto, após algumas tentativas, chegou-se à conclusão que seria preferível recorrer a valores tabelados. Foi seguida esta última opção, já que os valores estimados, através dos modelos mais acessíveis, não reflectiam a tipologia do terreno e por outro lado, a utilização de metodologias mais complexas requeria dados adicionais, além de não se enquadrarem no âmbito deste trabalho.

Os valores da velocidade do vento corrigido, para estas duas incidências, foram:

Tabela 18 - Velocidade do vento para a direcção Noroeste-Sudoeste.

Data	Hora	Velocidade do vento (torre anemométrica) (m/s)	Velocidade corrigida (15º piso Edifício H) (m/s)
08-05-2010	9:30	5,7	10,0
	16:00	7,0	12,3
	21:00	4,7	8,3
09-12-2009	21:00	1,9	3,3

Tabela 19 - Velocidade do vento para a direcção Nordeste-Sudoeste.

Data	Hora	Velocidade do vento (torre anemométrica) (m/s)	Velocidade corrigida (15º piso Edifício H) (m/s)
16-05-2010	10:00	3,5	5,2
	14:30	2,9	4,3
10-08-2010	10:00	1,5	2,6
	14:30	3,8	6,6
05-10-2009	12:00	1,7	3,2

7.3.3 Direcção Sul

No caso do vento do quadrante de Sul, compreendido no intervalo $[150^\circ, 200^\circ]$, o escoamento desenvolve-se seguindo um percurso ilustrado na Figura 23:

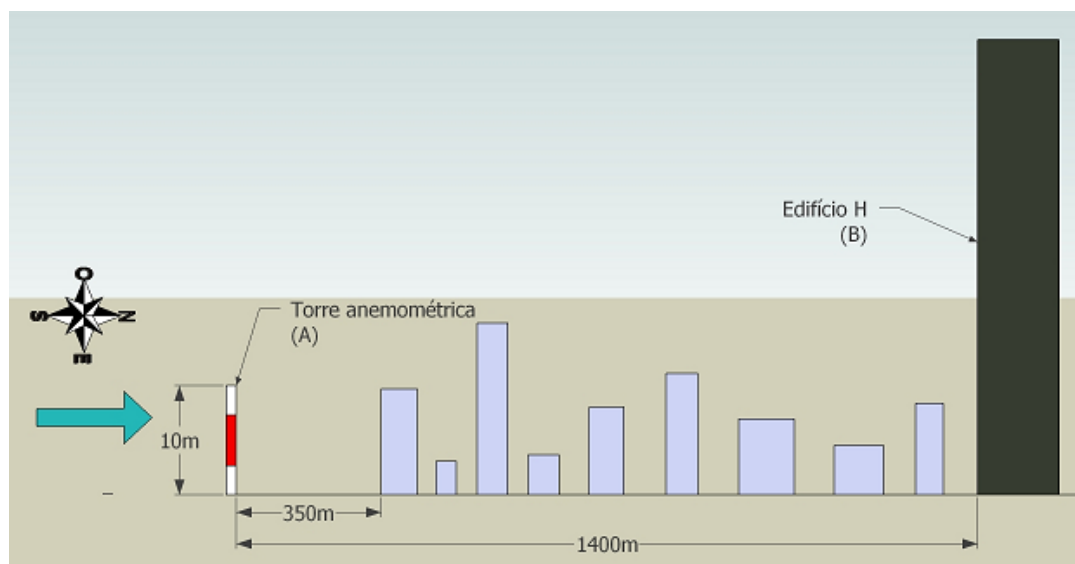


Figura 23 – Vento de Sul.

onde se seguiu a metodologia apresentada no parágrafo (7.2.3), estimando-se a velocidade do vento para o edifício em estudo através da expressão (19).

Apresenta-se em seguida um exemplo dos cálculos para esta incidência do vento, recorrendo ao valores apresentados no ponto 7.3.1:

1) determinação da altura do deslocamento para ambos os locais,

$$d_A = 0,7 \times 10 = 7m \quad d_B = 30 \times \left[1 - \frac{1 - e^{-\sqrt{15 \times 0,25}}}{\sqrt{15 \times 0,25}} \right] = 16,7m$$

2) determinação da altura da rugosidade para o local do edifício (B),

$$z_{0u_B} = \frac{1}{2} \times 30 \times 0,25 = 3,8m$$

e da espessura da camada limite

$$\delta_B = 3,8 \times \left[0,64 - 0,03 \times \ln\left(\frac{3,8}{0,3}\right) \right] \times \left(\frac{1400}{3,8}\right)^{0,8} = 245,9m$$

3) determinação da velocidade de atrito para cada um dos locais

$$u_{*A} = \frac{0,4 \times 3,8}{\ln\left(\frac{10-7}{0,3}\right)} = 0,66 m/s \quad u_{*B} = 0,66 \times \left[1 + \frac{\ln\left(\frac{3,8}{0,3}\right)}{\ln\left(\frac{245,9}{3,8}\right)} \right] = 1,1 m/s$$

4) e, por fim, a determinação da velocidade do vento corrigida para a cota pretendida,

$$U(75m)_B = \frac{1,1}{0,4} \times \ln\left(\frac{75 - 16,7}{3,8}\right) = 7,3 m/s$$

Seguindo o mesmo processo para todas as incidências de Sul, obtém-se o seguinte conjunto de dados:

Tabela 20 – Velocidade do vento para a direcção Sul.

Data	Hora	Velocidade do vento (torre anemométrica) (m/s)	Velocidade corrigida (15º piso Edifício H) (m/s)
08-05-2010	12:00	7,4	14,1
10-08-2010	17:00	3,8	7,3
07-09-2010	17:00	0,6	1,5
05-10-2009	16:00	2,9	5,5

7.3.4 Direcção Norte

Para o vento de Norte, intervalo [330°,45°], a torre anemométrica está a sotavento do edifício, Figura 24. Este facto implicou que a correcção dos valores fosse realizada a partir da relação entre as velocidades de atrito nos pontos A e B à cota do anemómetro, $u_{*B} = \frac{1}{u_{*A}}$, para ser, então, corrigida a velocidade do vento para a cota pretendida.

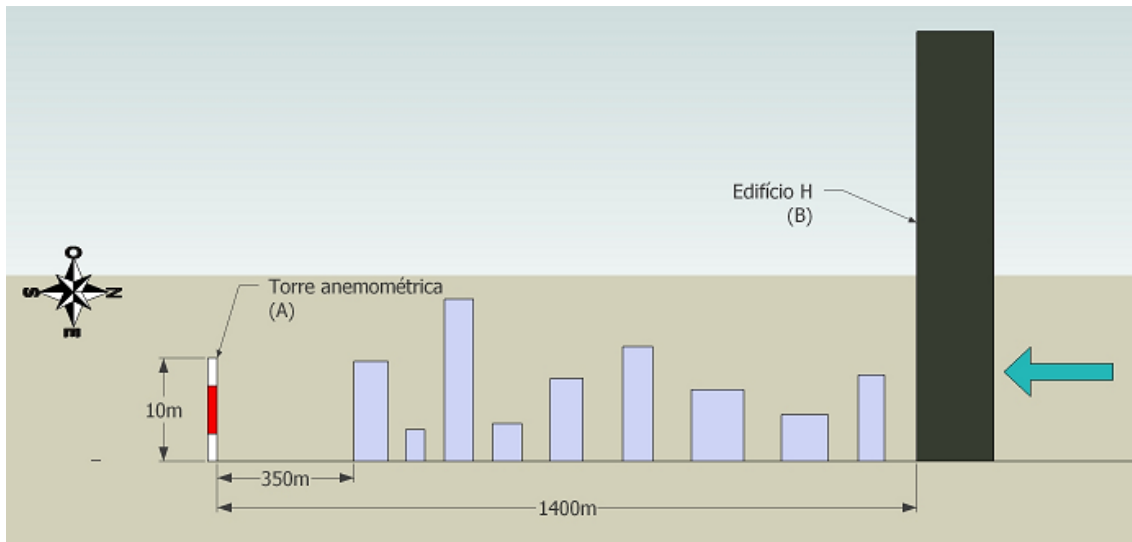


Figura 24 – Vento de Norte.

Esta relação obtém-se a partir da aplicação da lei logarítmica aos dois locais:

1) determinação da altura de deslocamento apenas para a zona do edifício, diferente da anterior porque o escoamento se desenvolve, antes de chegar a B, sobre uma urbanização de menor altura,

$$d_B = 0,7 \times 10 = 7m$$

já que no caso da torre anemométrica existe um área em redor sem edifícios, cerca de 350m, por isso $d_A=0m$.

2) estimativa da espessura da camada limite (equação 23) na zona da torre,

$$\delta_A = 0,3 \times \left[0,64 - 0,03 \times \ln\left(\frac{0,3}{1}\right) \right] \times \left(\frac{1400}{0,3}\right)^{0,8} = 177,3m$$

3) determinação das velocidades de atrito no local do edifício, conhecendo a velocidade de atrito na torre anemométrica,

$$u_{*A} = \frac{0,4 \times 6,6}{\ln\left(\frac{10-0}{0,3}\right)} = 0,75 \text{ m/s} \qquad u_{*B} = \frac{0,75}{\left[1 + \frac{\ln\left(\frac{0,3}{1}\right)}{\ln\left(\frac{177,3}{0,3}\right)} \right]} = 0,93 \text{ m/s}$$

4) e, por fim, a determinação da velocidade do vento corrigida para a cota pretendida,

$$U(75m)_B = \frac{0,93}{0,4} \times \ln\left(\frac{75-7}{1}\right) = 9,8 \text{ m/s}$$

O conjunto de resultados obtidos para esta incidência do vento foi a seguinte:

Tabela 21 - Velocidade do vento para a direcção Norte.

Data	Hora	Velocidade do vento (torre anemométrica) (m/s)	Velocidade corrigida (15º piso Edifício H) (m/s)
16-05-2010	17:00	6,6	9,8
	21:00	6,9	10,2
02-08-2010	9:20	5,5	8,2
	12:00	8,4	12,5
	16:00	8,4	12,5
	21:00	7,2	10,7
10-08-2010	21:00	4,3	6,4
07-09-2010	10:00	2,9	4,3
	14:30	0,8	1,2
	21:00	2,9	4,3
05-10-2009	9:30	0,9	1,3
	21:00	1,3	1,9
09-12-2009	9:30	3,4	5,0
	12:00	2,1	3,1
	16:00	2,8	4,2
02-02-2010	10:00	5,1	7,7
	14:30	5,2	7,6
	17:00	3,3	4,9
	21:00	4,0	5,9

7.3.5 Correção do vento: orientação da fachada em estudo

Após a correção dos valores da velocidade do vento para o local do edifício, foi necessário ajustar os ângulos de incidência para a fachada em estudo, de acordo com a orientação do edifício, já que este aspecto é importante para a determinação dos coeficientes de pressão c_p .

O Edifício H encontra-se orientado a SSE, o equivalente a 140° em relação ao Norte. Com base neste valor foram utilizadas as seguintes expressões para corrigir os ângulos de incidência do vento:

$$\varphi' = \theta_{fachada} - \varphi, \varphi \in [0^\circ; 140^\circ] \quad (26)$$

$$\varphi' = \theta_{fachada} + (360^\circ - \varphi), \varphi \in]140^\circ; 360^\circ] \quad (26)$$

(27)

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.

8 Coeficientes de pressão c_p

O coeficiente c_p é um parâmetro adimensional que representa a pressão local sobre uma superfície. Este coeficiente depende de vários factores, como a geometria do edifício, orientação do vento, da orografia e dos obstáculos vizinhos.

Para a obtenção de valores de referência para c_p recorreu-se à literatura (Orme, Liddament, and Wilson 1998), sendo posteriormente ajustados à fachada em estudo. (Anexo 2: Coeficiente c_p bibliografia)

Para o ajuste do coeficiente foram considerados os seguintes dados:

Tabela 22 – Dados considerados para o ajuste do c_p .³

Parâmetro	Valor
Localização da porção da fachada em estudo	<i>Primeiro 1/3 em relação ao canto NE.</i>
Altura do edifício (m)	74,5
Altura da base do piso 15 (m)	58,5
Altura do topo do piso 16 (m)	66,3

O valores de referência presentes na literatura para c_p encontram-se divididos por incidências do vento, com um passo de 45°. No caso dos dados utilizados para a velocidade do vento, estes abrangem todo o intervalo de [0°;360°], pelo que foi necessário estimar os coeficientes para os ângulos intermédios. Esta estimativa foi realizada de duas formas, a primeira através de uma interpolação linear com base nos valores tabelados (Anexo 3: Coeficiente c_p), para as incidências de [270°;(0°);180°]:

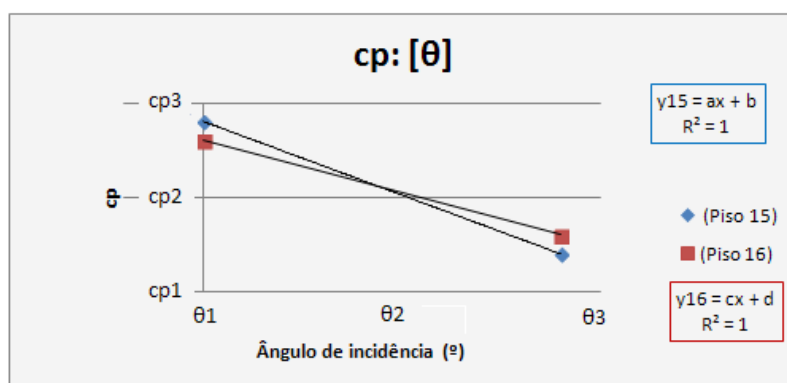


Figura 25 – Exemplo da estimativa do c_p através da interpolação linear.

No caso do quadrante [180°,270°] considerou-se que, para um determinado intervalo de incidência, o valor de c_p era constante (Tabela 23), uma vez que, para estas direcções, a fachada em estudo está na esteira do edifício, criando uma zona de recirculação.

³ Ilustração e informações detalhadas no Anexo 3: Coeficiente c_p .

Tabela 23 – Coeficientes c_p equivalentes.

Intervalo de incidência φ'	Incidência considerada para o c_p
]180°;200°]	180°
]200°;260°]	225°
]260°;270°]	270°

Optou-se por seguir esta abordagem para este intervalo porque, para estas direcções a fachada em estudo está na esteira do edifício, criando uma zona de recirculação, onde se pode considerar que o coeficiente c_p é controlado pela separação do escoamento nas arestas do edifício, como se encontra representado na Figura 26:

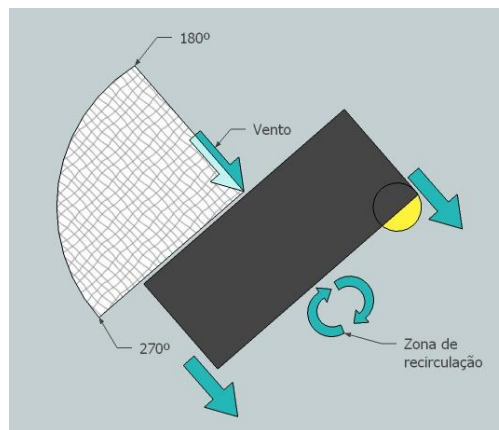


Figura 26 – Exemplo da incidência do vento no quadrante [180°,270°].(Localização da zona em estudo assinalada a amarelo.)

8.1 Situações particulares

Seguindo a classificação presente na literatura (Orme, Liddament, and Wilson 1998), para a maioria dos ângulos de incidência do vento, é possível obter um valor distinto do c_p para cada piso, 15° e 16°. No entanto existem determinadas incidências em que o valor deste coeficiente, para ambos os pisos, é igual, o que cria um problema na introdução dos dados no modelo de simulação VENTIL.

Este problema surge porque, o VENTIL apenas dispõe de uma única variável para a velocidade do vento, sendo esta diferenciada para cada uma das aberturas através do coeficiente c_p , que no caso de serem idênticos, sugere que não existe variação da velocidade do vento em altura, não correspondendo à realidade. De modo a ultrapassar esta limitação foi necessário chegar a uma expressão que permitisse diferenciar o efeito do vento em cada uma das aberturas, através de um valor de c_p equivalente :

$$c_{p_{\text{piso } 16}} = c_{p_{\text{piso } 15}} \times \frac{U_{\text{piso } 16}}{U_{\text{piso } 15}} \quad (28)$$

onde o coeficiente de pressão à cota do piso 16, é obtido com base no do piso 15, tomado como referência, multiplicado pela razão entre as duas velocidades do vento.

9 Correção da irradiância

Alguns dos dados da irradiância, provenientes da campanha experimental, ou estavam em falta ou existiam apenas medições parciais, pelo que foi necessário recorrer a uma estimativa dos valores. A metodologia utilizada para determinar esses valores vem descrita em detalhe nos parágrafos que se seguem.

9.1 Valores da irradiância em falta

Para o caso em que não existia qualquer registo de dados da campanha experimental, foi necessário utilizar uma metodologia que permitisse obter um valor aproximado da irradiância na fachada do edifício, valor esse que varia consoante o dia do ano, a hora, a localização e orientação do edifício. O método utilizado vem descrito de seguida.⁴

9.1.1 Radiação incidente num plano inclinado

A radiação incidente num plano com uma determinada inclinação, pode ser obtida através da seguinte relação:

$$I_{superfície} = K_{\downarrow} \times \cos(\theta) + F_{sky} \times D + F_{solo} \times \rho_{solo} \times G \quad (29)$$

onde K_{\downarrow} é a radiação directa, $\cos(\theta)$ representa a projecção dos raios solares sobre a normal da superfície, os coeficientes F_{sky} e F_{solo} são os factores de forma do céu e do solo, D é a radiação difusa, ρ_{solo} o albedo do solo e G a radiação global.

9.1.2 Radiação directa e difusa

A radiação directa, K_{\downarrow} e difusa, D é calculada da seguinte forma:

$$K_{\downarrow} = k \sum_{n=1}^8 a_n \times \text{sen}[(2n - 1) \times h_s] \quad (30)$$

$$D = \sum_{n=1}^9 b_n \times \text{sen}[(2n - 1) \times h_s] \quad (31)$$

Em que k , a_n e b_n são valores em função da visibilidade (Anexo 4: Radiação solar – coeficientes em função da visibilidade) e h_s é a altura solar.

⁴ Nota: nas equações aqui apresentadas são utilizados os ângulos em radianos, existindo na bibliografia expressões equivalentes para ângulos em graus.

9.1.3 Altura solar

A altura solar, que é definida como o ângulo que um raio directo do sol faz com a horizontal num ponto da superfície terrestre, é obtida pela equação:

$$\text{sen}(h_s) = \text{sen}(\delta) \times \text{sen}(\lambda) + \cos(\delta) \times \cos(\lambda) \times \cos(\omega) \quad (32)$$

representado δ a declinação solar, λ a latitude do local e ω o ângulo horário.

9.1.4 Declinação solar

A declinação solar, que é o ângulo formado entre o plano do movimento aparente do sol e o plano equatorial, é dado por:

$$\delta = 0,13 \times \pi \times \text{sen} \left[2\pi \times \left(\frac{284 + J}{365} \right) \right] \quad (33)$$

em que J é o dia Juliano.

9.1.5 Ângulo horário

O ângulo horário traduz a hora solar em radianos (graus), sendo zero ao meio-dia solar (Sul), negativo para Este e positivo para Oeste.

$$\omega = \frac{\pi}{12} \times (AST - 12) \quad (34)$$

AST é a hora solar aparente.

9.1.6 Hora solar aparente

A hora solar aparente é o tempo em relação ao meridiano de um determinado local, sendo as 12:00 horas quando o Sol está sobre meridiano do observador.

$$AST = \text{hora local} + \frac{\text{meridiano local} - \text{longitude}}{15} + ET - DST \quad (35)$$

onde ET é a equação do tempo e DST (Daylight Saving Time) contabiliza o ajuste para a hora de Verão.

9.1.7 Equação do tempo

A equação do tempo muitas vezes deriva de uma relação empírica, onde se pretende ter em conta a excêntricidade da órbita da Terra, bem como a inclinação do seu eixo Norte-Sul.

$$ET = \frac{9,87 \times \text{sen}(4\pi \times J') - 7,53 \times \text{cos}(2\pi \times J') - 1,5 \times \text{sen}(2\pi \times J')}{60} \quad (36)$$

O valor do coeficiente J' é em função do dia Juliano (J):

$$J' = \frac{J - 81}{364} \quad (37)$$

9.1.8 Projecção dos raios solares sobre a normal da superfície

O ângulo entre o Sol e a normal da superfície, θ , é obtido através:

$$\cos(\theta) = \cos(h_s) \times \cos(\gamma) \times \text{sen}(\beta) + \text{sen}(h_s) \times \cos(\beta) \quad (38)$$

onde β é a inclinação da superfície e γ , o azimute da superfície em relação ao Sol, vem:

$$\gamma = |\varphi - a| \quad (39)$$

em que φ é o azimute do Sol e a o azimute da superfície.

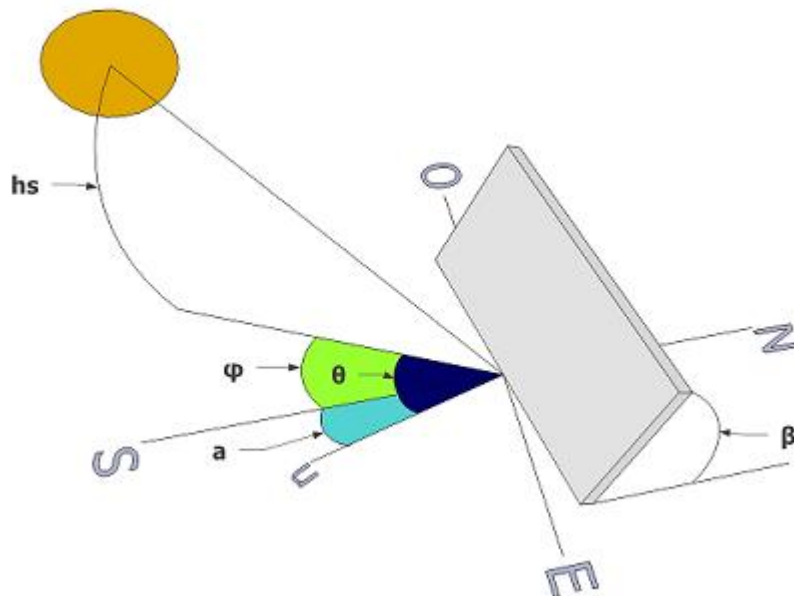


Figura 27 – Projecção dos raios solares sobre a normal da superfície.

9.1.9 Azimute do Sol

O azimute do Sol, ou seja, o ângulo entre o ponto cardinal de referência estipulado e a posição do Sol, é dado por:

$$\cos(\varphi) = \frac{\text{sen}(h_s) \times \text{sen}(\lambda) - \text{sen}(\delta)}{\cos(h_s) \times \cos(\lambda)} \quad (40)$$

9.2 Dados incompletos

Nos dados utilizados neste trabalho existiam falhas nalguns registos, nomeadamente da radiação interna da fachada, que seria proveniente do piranómetro localizado por detrás do sombreador. Esta falha foi ultrapassada aplicando o padrão de sombreamento das fachadas com um registo completo de dados, às fachadas com os dados em falta, tendo sempre em consideração a sua orientação e o intervalo horário de maior incidência solar.

Optou-se por esta abordagem porque, observando os dados foi possível identificar um padrão distinto da operação dos sombreadores, directamente relacionado com o nível de radiação incidente, consolidado pelo facto que, até uma determinada data, o funcionamento dos sombreadores era feito de forma automática e mesmo após passarem a ser controlados manualmente por cada uma das pessoas do edifício, o padrão de funcionamento manteve-se, a excepção de ocasiões esporádicas.

Nas Figura 28 e Figura 29 estão os dois tipos de perfis de sombreamento identificados, um para dias de céu limpo e outro para dias de céu nublado. Apesar das figuras ilustrarem dois casos específicos, os padrões representados aplicam-se ao restante dos dados, independentemente da estação do ano.

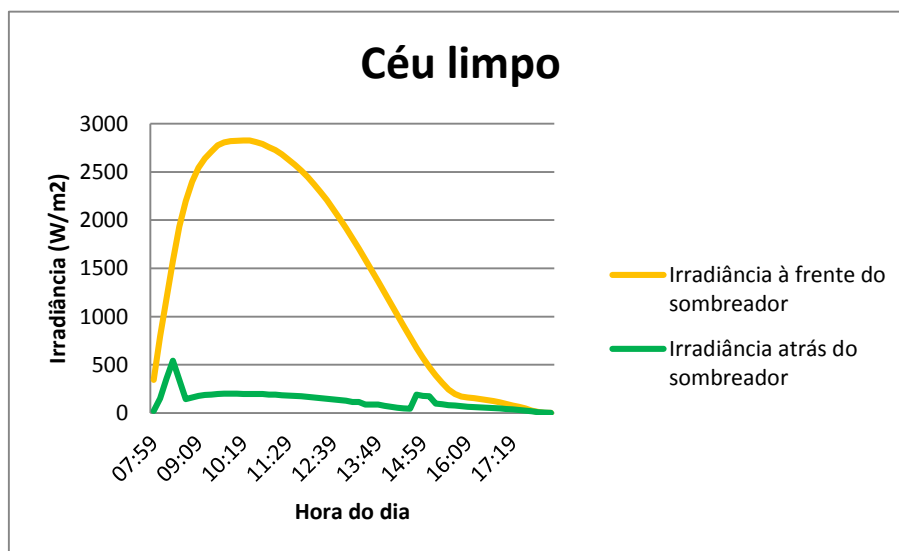


Figura 28 – Variação da irradiância ao longo do dia, em frente a atrás do sombreador (Inverno 02-02-2010, SE).

Para um dia de céu limpo vamos ter um perfil atrás do sombreador constante, significando que o sombreador se encontra descido ao longo do dia, bloqueando a maior parte da irradiância incidente. No início da manhã e final da tarde destaca-se uma aproximação entre os dois perfis, já que neste período a irradiância na fachada é reduzida e o sombreador é levantado.

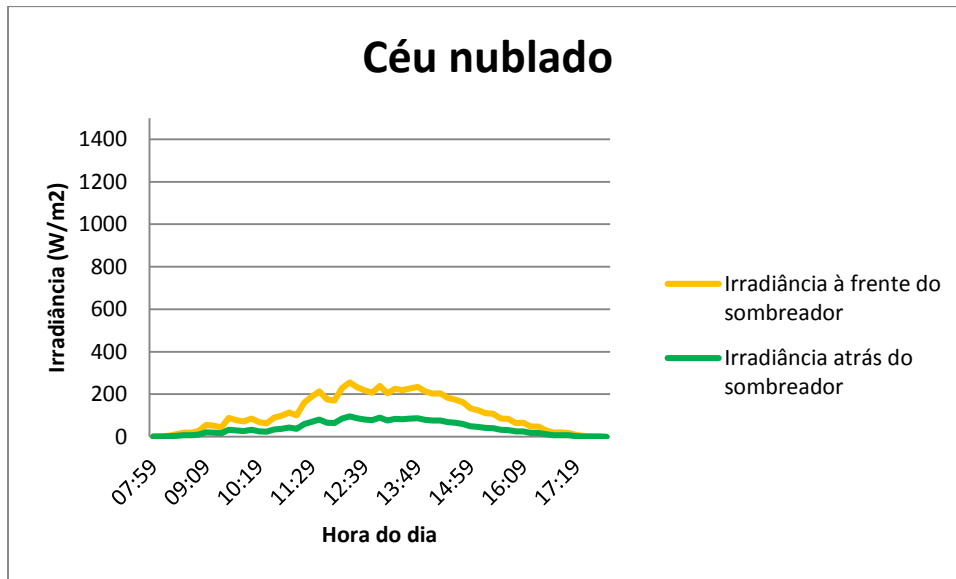


Figura 29 - Variação da irradiância ao longo do dia, em frente a atrás do sombreador (Inverno 09-12-2009, SE).

Num dia de céu nublado verifica-se que os dois perfis são semelhantes, existindo apenas uma pequena diferença na amplitude.

10 Calor armazenado na fachada

A partir das medições realizadas na campanha experimental verificou-se que, para o período da noite, a diferença de temperatura entre o interior da fachada e o exterior era diferente de zero, indicando uma influência da inércia térmica das componentes da fachada. De forma a contabilizar esta situação no modelo, foi estimado um calor armazenado, representado no Ventil através de uma fonte de calor interna na fachada.

A expressão que permite estimar o calor armazenado, é obtida relacionando duas equações equivalentes para o caudal, em que as aberturas se situam a cotas diferentes (Silva 2003), dadas por:

$$Q = \varphi \times C_d \times A_1 \times \sqrt{\Delta T \times H_{12}} \quad (41)$$

$$Q = 0,037 \times (\dot{Q} \times H_{12})^{1/3} \times (C_d \times A_1)^{2/3} \quad (42)$$

onde φ é um coeficiente dependente da relação de áreas das aberturas, C_d é o coeficiente de descarga da abertura, A_1 a área da abertura 1, ΔT a diferença de temperatura, H_{12} a altura média entre aberturas e \dot{Q} o calor gerado.

Igualando as duas equações e resolvendo em ordem a \dot{Q} , temos:

$$\dot{Q} = \left[\frac{\varphi}{133,2} \times (C_d \times A_1)^{1/3} \times \sqrt{\Delta T} \times (H_{12})^{1/6} \right]^3 \quad (43)$$

Para estimar o calor dentro da fachada tomou-se um ΔT médio, obtendo assim o calor global de toda a fachada, que foi posteriormente dividido para cada espaço, em função da sua dimensão. Os dados utilizados nesta estimativa encontram-se na seguinte tabela:

Tabela 24 – Dados do calor armazenado.

Parâmetro	Valor
ϕ	671
C_d	0,6
H_{12}	7,8m
A_1 (grelha inferior/superior da fachada)	0,59 m ²

11 Simulação: o modelo

11.1 Modelo

O modelo utilizado para as simulações tem como base o modelo simplificado, representado Figura 20, tentando agora organizar os elementos relevantes da fachada de forma a corresponderem aos processos físicos presentes. Na Figura 30 apresenta-se o esquema utilizado para o estudo da fachada:

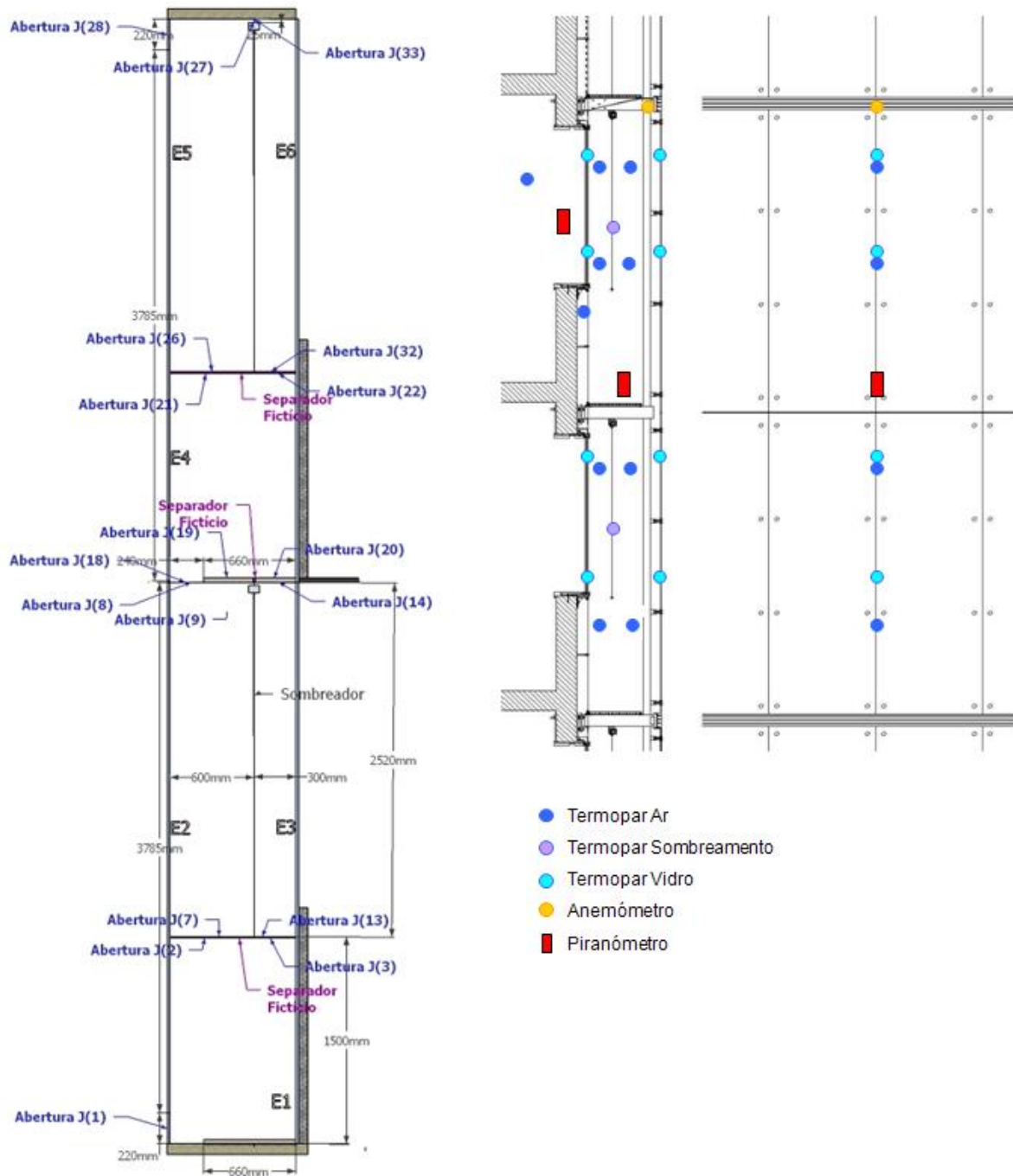


Figura 30 – Esquema do modelo da fachada com sombreador descido (esquerda) e a distribuição dos instrumentos de medida (direita).

Importa esclarecer a configuração representada na Figura 30, pois além da indicação dos seis espaços (E#) e das diversas aberturas (J(#)), foi necessário introduzir elementos adicionais no modelo da fachada, de modo a representar a física em jogo.

Os separadores fictícios, inferior e superior, permitem estruturar o modelo em várias zonas, criando aberturas fictícias, com uma perda de carga residual, e área igual à da passagem. Esta divisão, além de coincidir com a organização do dados recolhidos, permite a análise de duas zonas com características distintas: os espaços E1 e E4, situados abaixo dos sombreadores.

Apesar de cada partição ter, originalmente, uma altura igual, durante a construção do esquema da fachada optou-se por uma divisão assimétrica em altura, fazendo coincidir o topo dos espaços E1 e E4 com o limite inferior do sombreador, facilitando a modelação sem introduzir uma alteração significativa na geometria interna.

Na fachada real existe um pequeno espaçamento entre a caixa do sombreador e o piso adjacente, de onde está suspenso. No entanto este espaço apenas se inclui no modelo no espaço E6, na abertura J(27) / J(33), evitando assim o aparecimento de um espaço com uma única abertura - J(22) / J(32), o que não permitiria a circulação do ar. Em relação ao sombreador inferior, foi ignorado este espaçamento, já que se torna desprezável face à proximidade com a grelha do passadiço.

11.1.1 Simplificações e hipóteses consideradas

Além das abordagens já descritas, foram consideradas outras hipóteses que permitiram simplificar a modelação, sem comprometer os resultados obtidos.

As caixas dos sombreadores, apesar das suas reduzidas dimensões, introduzem sempre perdas de carga na circulação do ar, tendo-se considerado a sua influência concentrada nas aberturas J(27) e J(33). No caso das aberturas J(9), J(19), J(14) e J(20), apenas se teve em conta o efeito do passadiço, já que se verificou que a presença da caixa do sombreador era desprezável, face à diferença de dimensões.

Os coeficientes de perda de carga utilizados são os representados na

Tabela 9, com a adição de uma perda de carga residual de 0,1 para o separador fictício.

A fachada dispõe, ao longo do seu comprimento, de colunas de suporte dos vidros exteriores, que são visíveis na Figura 17. Estas colunas não foram consideradas, devido à sua reduzida dimensão e ao espaçamento entre elas.

O pequeno murete e o vidro (duplo) interior foram considerados adiabáticos, não existindo assim trocas de calor entre a fachada e o interior do edifício.

Para o comportamento dos sombreadores optou-se por seguir o padrão de sombreamento automático do edifício, para as campanhas de Outono e Inverno (Tabela 25). Nos outros períodos, apesar do posicionamento do sombreador ser efectuado manualmente pelos ocupantes, verificou-se que o padrão de utilização se manteve muito semelhante ao do funcionamento automático, assumindo assim o mesmo padrão das outras duas campanhas.

Tabela 25 – Horário de funcionamento automático do sombrador.

Fachada	Período horário	Situação do sombreador
SE	7:00 – 15:00	Descido
	15:00 – 20:00	Subido
SO	7:00 – 15:00	Subido
	15:00 – 20:00	Descido
NO	7:00 – 15:00	Subido
	15:00-20:00	Descido

Para os casos em que o sombreador estava levantado, foi utilizado um modelo para o Ventil ligeiramente diferente do representado na Figura 30, tendo excluído o sombreador, ficando apenas as suas caixas. (Anexo 5: modelo sem sombreador)

11.2 Resumo dos dados utilizados

Na seguinte tabela encontra-se o um resumo dos dados utilizados nas simulações:

Tabela 26 – Resumo dos dados utilizados.

Estação do ano	Céu	Horas	Irradiância na fachada (W/m^2)			Temperatura exterior (°C)	Direção do vento, em relação ao Norte (°)	Velocidade do vento (torre anemométrica) (m/s)
			SE	SO	NO			
Primavera	Limpo	10:00	1713,8	103,5	134,9	18,7	68	3,5
		14:30	303,5	373,3	191,9	22,9	131	2,9
		17:00	237,3	657,4	470,1	23,8	343	6,6
		21:00	0	0	0	18,9	339	6,9
	Nublado	9:30	138,6	28,9	28,9	17,8	217	5,7
		12:00	75,8	45,8	42,8	17,6	187	7,4
		16:00	115,6	78,5	78,5	18,3	215	7,0
		21:00	0	0	0	19,1	229	4,7
Verão	Limpo	10:00	1515,2	118,8	75,1	29,5	126	1,5
		14:30	648,5	437,0	83,6	36,8	142	3,8
		17:00	302,5	552,2	231,1	39,0	190	3,8
		21:00	0	0	0	33,9	7	4,3
	Nublado	9:30	1663,9	102,4	69,1	22,6	20	5,5
		12:00	789,7	105,0	67,5	25,5	0	8,4
		16:00	258,5	659,7	179,1	27,0	358	8,4
		21:00	0	0	0	22,8	7	7,2
Outono	Limpo	10:00	637,5	637,5	67,1	21,0	346	2,9
		14:30	374,2	374,2	88,7	30,9	25	0,8
		17:00	109,9	109,9	148,3	33,8	187	0,6
		21:00	0	0	0	25,8	344	2,9
	Nublado	9:30	65,6	72,8	72,8	21,1	333	0,9
		12:00	58,6	83,8	83,8	24,4	129	1,7
		16:00	7,7	43,8	43,8	21,3	192	2,9
		21:00	0	0	0	20,0	338	1,3
Inverno	Limpo	10:00	2819,5	85,7	62,3	7,1	16	5,2
		14:30	899,9	740,7	76,8	13,3	16,9	5,1
		17:00	111,4	795,8	68,2	15,9	30,4	3,3
		21:00	0	0	0	12,9	31,6	4,0
	Nublado	9:30	43,1	8,8	8,8	13,4	37	3,4
		12:00	169,7	27,1	27,1	14,9	19	2,1
		16:00	64,9	11,1	11,1	14,4	36	2,8
		21:00	0	0	0	14,2	329	1,9

12 Resultados

Nos parágrafos seguintes é feita a análise detalhada de cada um dos aspectos relevantes para o adequado funcionamento de uma FDP: o caudal de ventilação e a distribuição de temperatura. Estes parâmetros foram relacionados com os factores externos que condicionam o desempenho, isto é, a irradiância que incide na fachada e o vento, nas suas componentes da velocidade e direcção.

São também descritos alguns casos particulares da circulação interna da FDP, que numa primeira análise não seriam evidentes, resultantes de combinações específicas dos factores que a condicionam.

Apesar dos resultados serem em função de uma conjugação de diversos factores, tentou-se, de modo a evidenciar o efeito de cada um, seleccionar dos vários valores obtidos, aqueles em que um determinado parâmetro se destacava de todos os outros, contudo será sempre perceptível a influência das outras grandezas.

Numa segunda fase, é feita a validação dos resultados obtidos, através da comparação do gradiente de temperatura dentro da fachada com os registos da campanha experimental.

Nas figuras apresentadas tomou-se como referência a abertura inferior da fachada (J(1) da Figura 30), considerando-se o caudal positivo quando a abertura é de admissão, e negativo quando é de exaustão.

12.1 Circulação do ar dentro da fachada

Para a circulação do ar dentro da FDP podem identificar-se quatro situações diferentes, caracterizando-se duas delas pelo sentido único do caudal de ar, ascendente ou descendente, sendo as restantes casos mistos. Descrevem-se de seguida cada uma destas situações, sendo também feita a análise dos factores que conduzem a estes resultados.

12.1.1.1 Caudal de sentido único

Nestes casos o caudal apresenta sentido ascendente ou descendente, fazendo-se a admissão pela grelha inferior e a exaustão pela grelha no topo da fachada, ou em sentido inverso, respectivamente.

O primeiro caso é o mais frequente e corresponde à existência de uma forte componente térmica.

A circulação descendente do ar ocorre quando se verifica a seguinte combinação de factores: ausência ou reduzido calor armazenado na FDP em conjugação com um valor de c_p maior na abertura superior que na abertura inferior, associado à existência do vento.

12.1.1.2 Caudal misto

Além dos dois tipos de circulação acima descritos, verificou-se ainda a ocorrência de outros dois, correspondentes a uma circulação mista onde os fluxos podem ser simultaneamente, ascendentes e descendentes, funcionando o sombreamento como separador.

O caudal misto 1 caracteriza-se por um caudal descendente entre o sombreador e o pano envidraçado exterior, e ascendente entre o sombreamento e o pano interior, com duas zonas de recirculação na base de cada sombreador. Os resultados obtidos com este tipo de circulação do ar têm parâmetros semelhantes, dos quais se destacam:

- i) ocorrem na fachada NO;
- ii) uma velocidade do vento baixa, cerca de 3 m/s , de Norte;
- iii) um nível de irradiância muito baixo, cerca de 5 W/m^2 ;
- iv) e um gradiente negativo de c_p , crescente na vertical.

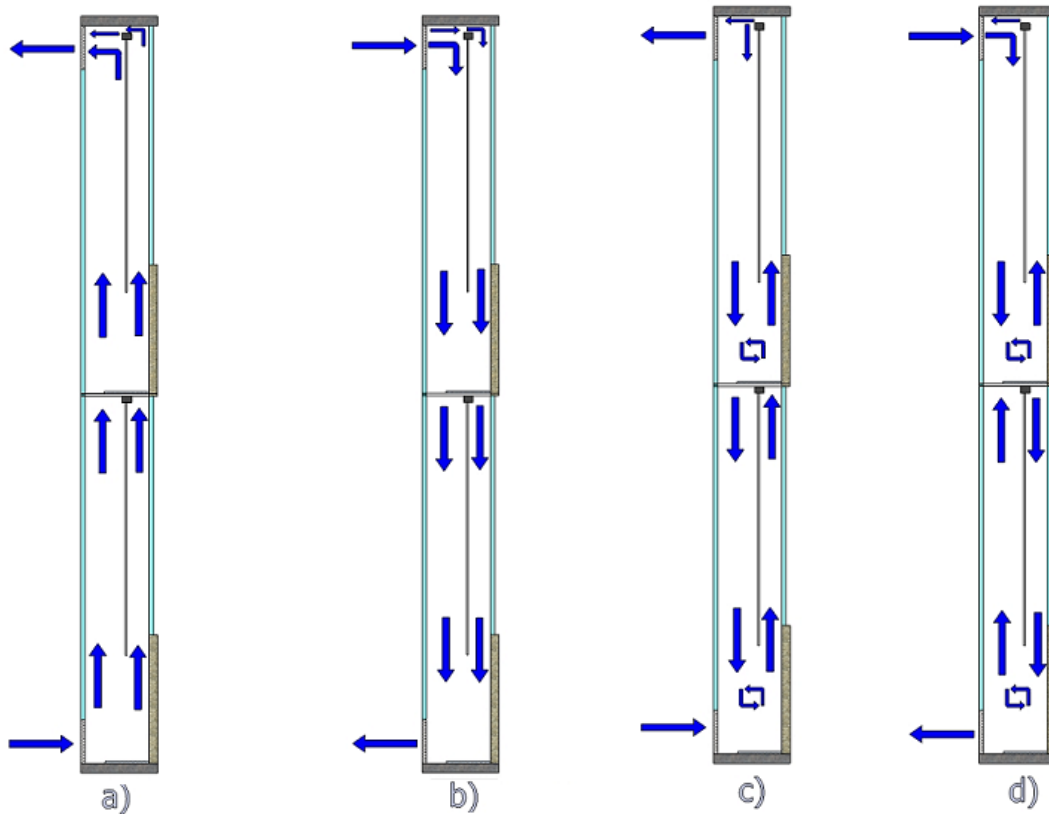


Figura 31 - Circulação do ar no interior da fachada: a) ascendente e b) descendente; e circulação mista do ar dentro da fachada: c) misto 1 e d) misto 2.

Quanto ao caudal misto 2, em relação ao caso anterior, apresenta um sentido de circulação inverso na metade inferior da fachada e nas grelhas para o exterior. Este tipo de caudal foi obtido quando se verificavam os seguintes parâmetros:

- i) ocorrem na fachada SO;
- ii) uma velocidade do vento elevada, 8 m/s , de Norte;
- iii) um nível de irradiação elevada, cerca de 650 W/m^2 ;
- iv) e um gradiente negativo de c_p , crescente na vertical.

12.2 Efeito do vento

O vento é um dos motores da ventilação natural das FDP, não só em termos da sua velocidade mas também do seu ângulo de incidência, representado pelo coeficiente de pressão c_p , também função da forma do edifício e da sua localização na envolvente

A acção do vento é sempre resultado do produto destas duas componentes, podendo ser expressa através de uma diferença de pressão entre aberturas, avaliada por:

$$\Delta p = \Delta c_p \times U_{\text{base}}^2 \times \frac{\rho}{2} \quad (44)$$

onde no contexto desta análise a massa volúmica do ar, ρ , pode ser considerada constante, com o valor de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

O diferencial de pressão, Δp , contribui para a circulação do ar na fachada, sendo que quando é positivo, $p_{\text{sup}} < p_{\text{inf}}$, o caudal, exclusivamente eólico, é ascendente e descendente quando é negativo.

Por outro lado o seu valor, em módulo, permite conhecer o impacto combinado da velocidade do vento e da pressão nas aberturas da fachada, sendo que quanto mais elevado seja, maior o caudal.

Optou-se por analisar o período horário da noite, garantindo assim que os valores em causa se devem quase exclusivamente ao vento. Na figura seguinte é comparada a variação da velocidade do vento e o efeito causado pela alteração da sua incidência, através de Δp .

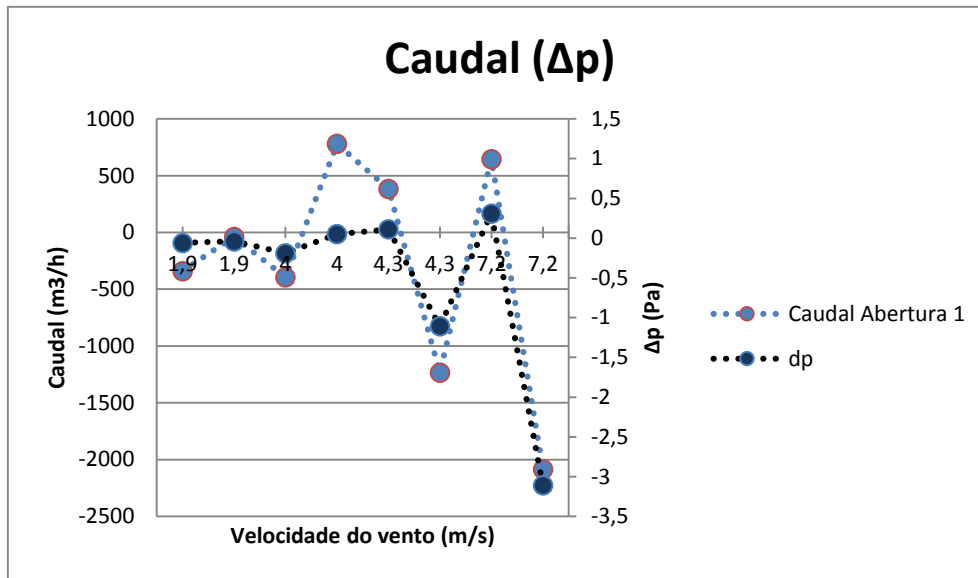


Figura 32 - Variação do caudal na abertura 1 em função do vento (vários dias, 21:00 horas). (A linha a tracejado serve apenas de auxílio à visualização do gráfico, não implicando um ligação entre os pontos)

Da análise da figura é possível verificar que quanto maior for Δp entre as aberturas da fachada, maior o caudal. A velocidade também contribui para a circulação do ar, acentuando o efeito causado pelo gradiente de pressão na fachada.

A figura também mostra que não é simples atribuir a variação no caudal da fachada, a apenas uma das componentes do vento, por causa da conjugação entre a velocidade e c_p , que, para além de ser difícil fazer uma abordagem independente dos dois parâmetros, acabaria por fornecer uma visão incompleta do efeito do vento.

12.2.1 Parâmetro de potência adimensional PSI (Ψ)

O parâmetro Ψ faz parte do conjunto dos resultados fornecidos pelo Ventil, sendo definido por:

$$\Psi(I) = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 U_0^3}{\frac{Q(I)}{APL(I)}} \quad (45)$$

onde $Q(I)$ é a fonte de calor no espaço, neste caso a irradiância, e $APL(I)$ representa a área em planta do espaço.

Apesar de ser um valor adimensional permite, numa forma qualitativa, analisar a influência do vento e da irradiância no caudal, fornecendo, numa observação inicial, informação sobre qual dos dois parâmetros desempenha o papel mais relevante na circulação do ar. Rescrevendo a expressão de Ψ de forma a salientar as variáveis que nos interessam para esta abordagem, temos:

$$\Psi = a \times \frac{U_0^3}{Q} \quad (46)$$

onde $a = \frac{1}{2} \rho_0 \times APL(I)$, representando agora um factor de escala. Quanto ao valor de Ψ , valores superiores à unidade correspondem a uma maior influência por parte do vento e valores abaixo de um, representam uma maior contribuição da irradiância para a circulação do ar. De referir que na ausência de irradiância ou calor o Ventil considera o Ψ como nulo. Como exemplo da utilidade desta forma de interpretação do Ψ , vamos ter:

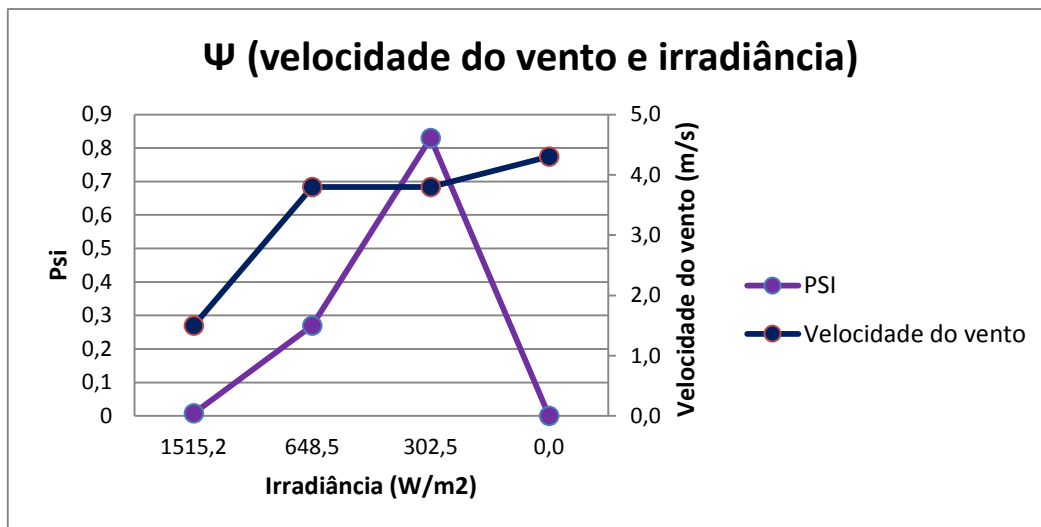


Figura 33 – Variação do Ψ função da velocidade do vento e da irradiância (Verão 10-08-2010, céu limpo, fachada SE).

Pela figura é possível ver o aumento do valor de Ψ com a diminuição da irradiância, começando o vento a ser mais relevante na circulação do ar. Às 21:00 o seu valor é zero, que é o resultado por defeito do Ventil na ausência de irradiância, apesar do caudal se dever exclusivamente ao efeito do vento.

12.3 Efeito da irradiância

A irradiância é outro dos responsáveis pela ventilação das FDP, existindo uma relação directa entre o caudal e a irradiância incidente na fachada. Para valores elevados de irradiância, como em dias de céu limpo, o seu efeito acaba por se sobrepôr aos restantes parâmetros, mas nos outros casos, como em dias de céu nublado ou quando existe uma maior contribuição do vento, apesar de ficar em segundo plano, tem sempre uma contribuição para a circulação do ar na fachada.

12.3.1.1 Diferença de pressão térmica

À semelhança do vento, a irradiância também vai criar um gradiente de pressão ao longo da fachada, resultado da variação da massa volúmica do ar. Esta diferença de pressão pode ser definida pela seguinte equação, que deriva da expressão (3):

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times H \quad (47)$$

onde é a $\Delta \rho$ a diferença da massa volúmica do ar entre a base e o topo da fachada, g aceleração da gravidade, $9,8 \text{ m/s}^2$ e H a altura da fachada. Este Δp permite conhecer a contribuição da componente térmica na circulação do ar, tomando valores positivos quando a temperatura interior da fachada é superior ao do exterior, promovendo um caudal ascendente, e valores negativos quando se verifica o contrário, favorecendo um caudal descendente.

12.3.2 Céu limpo

Em dias de céu limpo, onde a irradiância atinge o seu valor máximo, é evidente a sua contribuição para o caudal na fachada, sendo este parâmetro responsável pelo caudal, sobrepondo-se à acção do vento.

Na Figura 34 encontra-se representada a variação do caudal na abertura 1 (abertura inferior para o exterior) onde, de modo a evidenciar o efeito isolado da irradiância na fachada, compararam-se os resultados, em simultâneo, das fachadas com maior e menor e radiação incidente, SE e NO respectivamente. São também indicados os valores de Δp eólico e térmico, que permitem avaliar a contribuição do vento e da irradiância.

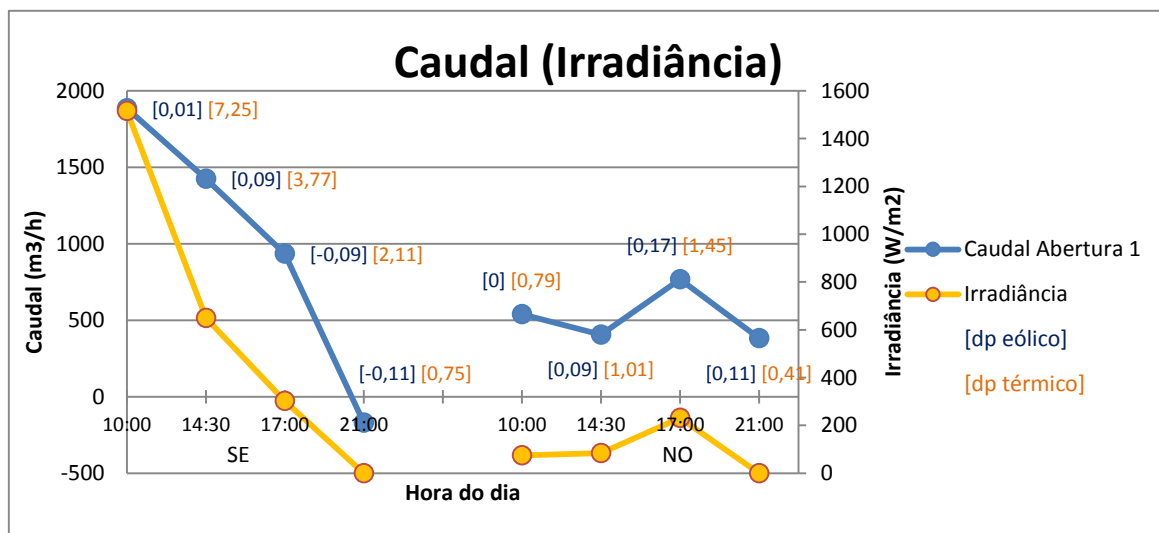


Figura 34 - Variação do caudal na abertura 1 ao longo do dia (Verão 10-08-2010, céu limpo).

É possível observar uma dependência entre o caudal e a irradiância na fachada, sendo o perfil de ambos muito semelhante, com Δp térmico sempre superior ao eólico. Na fachada SE o perfil é decrescente, registando-se um pico às 10:00 horas, que coincide com a incidência directa do sol, resultando num Δp térmico elevado, que vai diminuindo ao longo do dia. A fachada NO tem valores de caudal inferiores à de SE, já que os valores diários de irradiância são menores. A partir das 17:00 horas destaca-se um aumento do caudal na fachada virada a NO, resultado do aumento da contribuição do vento conjugado com a incidência directa do sol na fachada. Na ausência de radiação, a partir das 21:00 horas, importa apenas salientar, que apesar de já não existir irradiância o Δp térmico é superior a zero, indicando o efeito da inércia térmica dos componentes da fachada.

12.3.3 Céu nublado

Em dias de céu nublado, o efeito sentido no caudal devido à irradiância, já não é tão expressivo. A sua contribuição para a circulação do ar na fachada perde importância, podendo ser ultrapassada pela contribuição do gradiente de pressão do vento. Na Figura 35 representam-se os perfis de radiação e caudal circulado de um dia nublado de Primavera, que foi selecionado por ter valores de irradiância baixos em comparação com o caso da Figura 34.

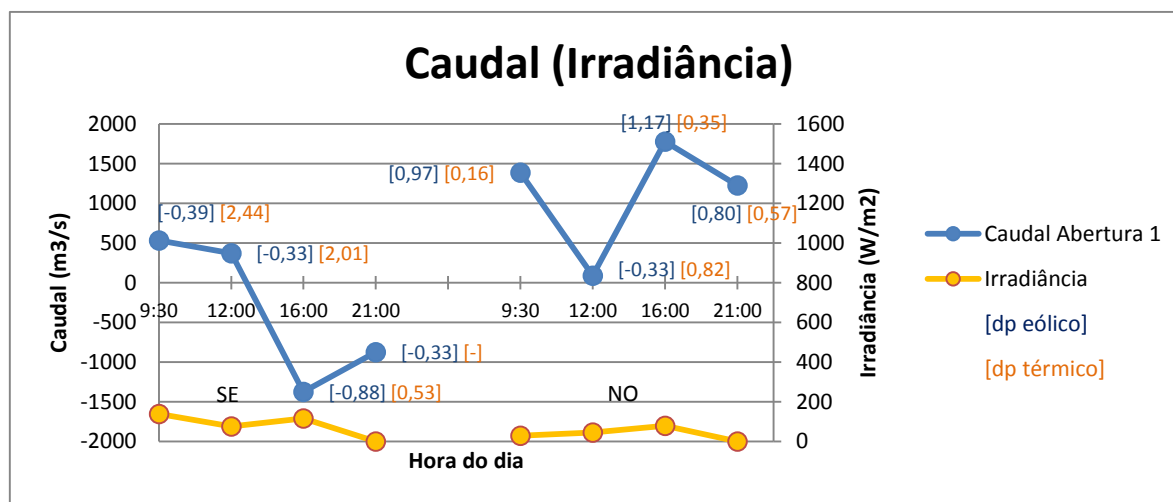


Figura 35 - Variação do caudal na abertura 1 ao longo do dia (Primavera 08-05-2010, céu nublado).

Neste caso a contribuição do vento torna-se mais evidente, já que a variação no caudal não acompanha o perfil da irradiância, como se verificava na Figura 34. Na fachada SE no período entre as 9:30 e as 12:00 horas, o caudal é estabelecido pela componente térmica, já que o Δp térmico é superior ao eólico. A partir das 16:00 horas, o caudal da fachada vai inverter o sentido, mostrando uma sobreposição do Δp eólico em relação à irradiância. Para a fachada NO, na maior parte do dia, ambos os gradientes de pressão, térmico e eólico, complementam-se, promovendo um caudal ascendente. Às 12:00, apesar da irradiância permanecer igual, o caudal toma valores muito perto de zero, acompanhando a alteração do vento, com $\Delta p < 0$, opondo-se assim à acção da irradiância.

12.4 Temperatura interior da FDP

Outro resultado fornecido pelo Ventil é a variação da temperatura, em relação ao exterior, em cada uma das divisões da fachada (Figura 30). Nos parágrafos seguintes são descritos vários casos, em que a variação de uma condição se vai reflectir na temperatura dentro da fachada. Novamente se seguiu a abordagem em que se tenta evidenciar o efeito de cada um dos parâmetros em questão, minimizando a influência dos restantes factores, através da selecção dos resultados que melhor se adequavam à análise pretendida.

Em alguns casos, em que foi necessário utilizar os dados dos registos, não se encontra representado o ponto referente ao espaço E4, devido a problemas detectados no termopar durante a campanha experimental.

12.4.1 Caudal ascendente

Num caudal ascendente verifica-se um aumento da temperatura em altura ao longo da fachada, devendo-se ao facto do calor gerado se ir acumulando, o que acentua a variação da massa volúmica do ar ao longo do percurso. Para ilustrar esta situação, seleccionou-se uma hora num dia de Verão, com um valor de irradiância de 550 W/m^2 , representando a variação da temperatura, ΔT , à frente e atrás do sombreador :

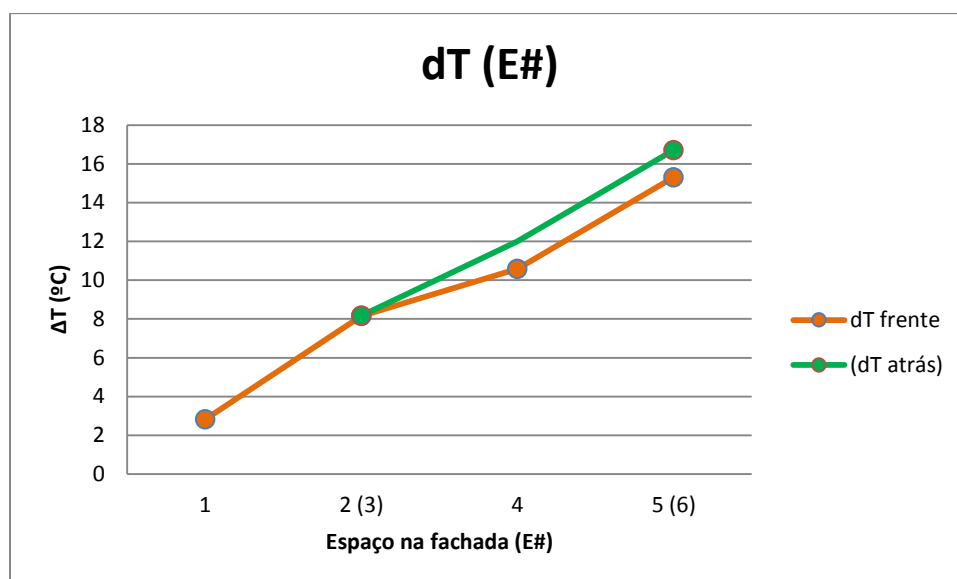


Figura 36 – Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Verão, 10-08-2010, céu limpo, 17:00 horas, SO, sombreador descido). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior)

Como se pode observar, a diferença de temperatura vai aumentando à medida que se sobe na fachada, contribuindo para este aumento o caudal ascendente do ar, através do efeito de implusão. O perfil referente às secções atrás do sombreador, acompanha o da parte anterior da fachada, destacando-se apenas um ligeiro aumento do ΔT no espaço E6, podendo ser resultado das pequenas dimensões da abertura sobre a caixa do sombreador, que limita a passagem do ar.

12.4.2 Caudal descendente

No caso caudal descendente verificou-se um gradiente de temperatura crescente, do topo para a base da fachada, em que aquecimento do ar acompanha o sentido do caudal. Na Figura 37 encontra-se representado um dia de céu nublado com um valor de irradiância de 120 W/m^2 . De referir que todos os resultados obtidos em que o caudal tinha sentido descendente, o sombreador encontrava-se subido, daí não ser representado o perfil atrás do sombreador.

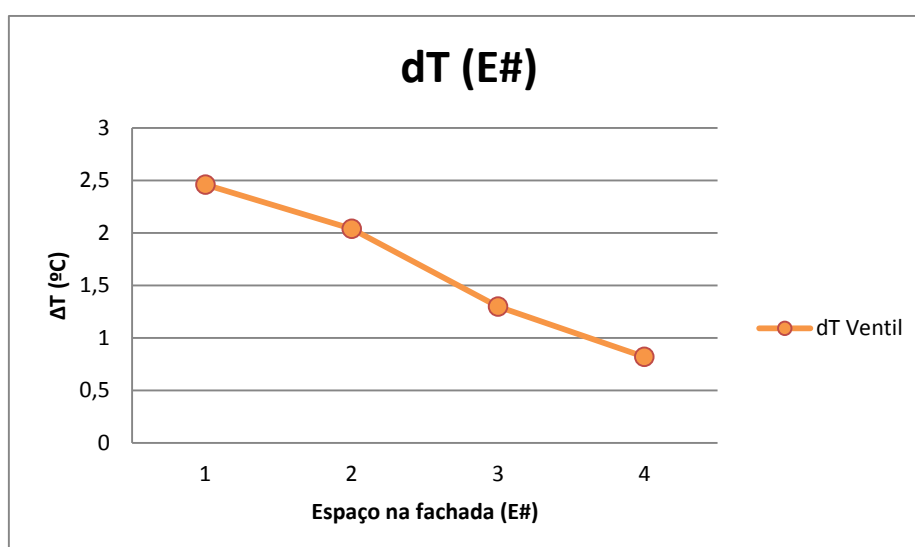


Figura 37 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Primavera, 10-08-2010, céu nublado, 16:00 horas, SE, sombreador subido).

Pela Figura 37 observa-se que a temperatura do ar dentro da fachada vai aumentar do topo para a base, de acordo com o sentido do caudal. Comparativamente ao caso do caudal ascendente, o ΔT vai ser bastante menor, já que a irradiância é reduzida.

12.4.3 Período nocturno

No período da noite seria expectável que a temperatura dentro da fachada fosse igual à do ar exterior, no entanto não foi este o caso que se verificou, devendo-se esta diferença de temperatura à inércia térmica dos elementos que compõem a fachada, que se torna mais evidente na ausência de irradiância. De modo a contabilizar a influência da inércia térmica, foi estimado o calor armazenado na fachada, recorrendo às espessões apresentadas em 10. A figura seguinte mostra os resultados para um dia de Outono às 21:00 horas.

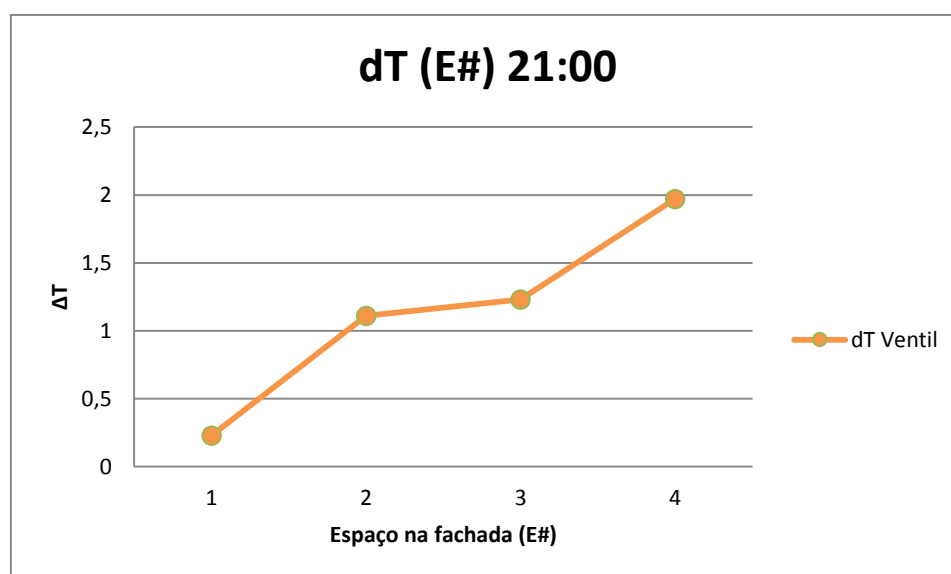


Figura 38 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Outono, 09-09-2010 , 21:00 horas, NO, sombreador subido).

Na Figura 38 observa-se que a temperatura da fachada vai ser superior à do exterior, devido à libertação do calor acumulado durante o dia por parte das componentes da fachada. Este ΔT , apesar de ter um peso bastante reduzido comparativamente ao efeito do vento, não deixa de contribuir para a circulação do ar dentro da fachada, através do efeito de impulsão, promovendo um caudal ascendente ou contrariando um caudal descendente.

Para as restantes estações do ano o perfil de ΔT verificado foi semelhante ao do Inverno, diferindo apenas na amplitude, que está relacionada com a temperatura ambiente registada durante a noite e com o nível de calor acumulado pelo edifício.

12.4.4 Caudal misto 1

Este tipo de caudal foi identificado em dias com níveis de irradiância bastante reduzidos, resultando assim um ΔT baixo. O caudal reduzido e as circulações internas na fachada contribuíram para que o perfil obtido fosse praticamente constante ao longo dos vários espaços. Na seguinte figura encontra-se a representado um destes casos, referente a um dia de Inverno, com o céu nublado, em que a irradiância não ultrapassa os $30\text{W}/\text{m}^2$:

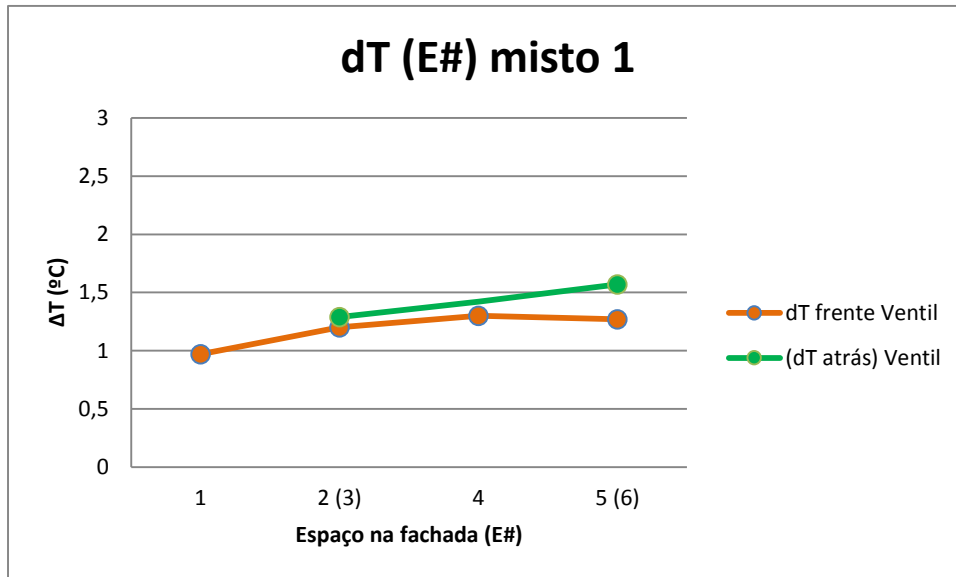


Figura 39 – Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior (Inverno, 09-12-2009, céu nublado, NO, 16:00 horas). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior)

Observando a Figura 39, temos um perfil quase constante ao longo dos vários espaços, resultante das circulações internas, que promovem uma mistura do ar dentro da fachada. Atrás do sombreador o gradiente de temperatura vai ser ligeiramente superior, função do menor caudal que circula nessa secção, implicando um maior tempo de residência do ar. O valor de ΔT vai ser reduzido, cerca de $1,5^{\circ}\text{C}$, devido à baixa irradiância incidente na fachada.

12.4.5 Caudal misto 2

Este tipo de circulação interna da FDP foi identificada como possível, sob determinadas condições, em teste de simulação mas carece de confirmação.

12.4.6 Influência do caudal

O caudal em circulação na fachada vai ter impacto na diferença de temperatura. Para salientar a influência do caudal na diferença de temperatura, foram seleccionados dois grupos de resultados do mesmo dia, com características semelhantes, mas com um caudal diferente.

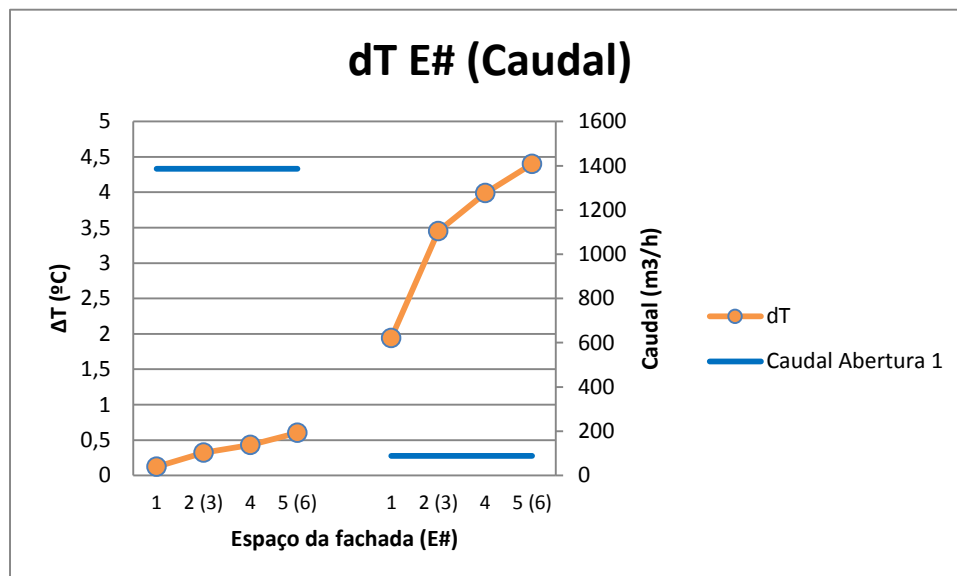


Figura 40 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior, em função do caudal (Primavera 08-05-2010, céu nublado, NO, 9:30 e 12:0 horas).

Observando a figura é evidente a relação entre o caudal e a temperatura dentro da fachada, onde se verifica que um aumento do caudal leva à diminuição de ΔT , devido a uma menor permanência do ar no interior da fachada, reduzindo assim os efeitos da sua exposição à irradiância incidente.

12.5 O edifício e a orientação das fachadas

A orientação da fachada é um aspecto importante para o funcionamento de uma FDP, pois para o mesmo conjunto de parâmetros, o padrão de circulação do ar é diferente para cada uma das fachadas.

A variação do volume e sentido do caudal, bem como o gradiente de temperatura dentro da fachada, estão de acordo com o que já foi exposto nos parágrafos anteriores, onde a irradiância e o vento desempenham um papel determinante no perfil de circulação do ar. Nos parágrafos que se seguem encontram-se alguns casos onde se demonstra a diversidade de resultados obtidos para cada fachada analisada.

Mantendo a mesma abordagem que se tem vindo a seguir, também aqui foram seleccionados os conjuntos de dados que melhor se adequavam à análise em questão.

12.5.1 Efeito do vento

Apesar de ser difícil isolar o efeito do vento tendo a contribuição da irradiância, na seguinte figura encontra-se representado o caudal, para cada orientação da fachada, ao longo de um dia em que a irradiância não ultrapassa os $190W/m^2$. Recorreu-se ao coeficiente Ψ de modo a ilustrar a contribuição do vento ao longo do dia.

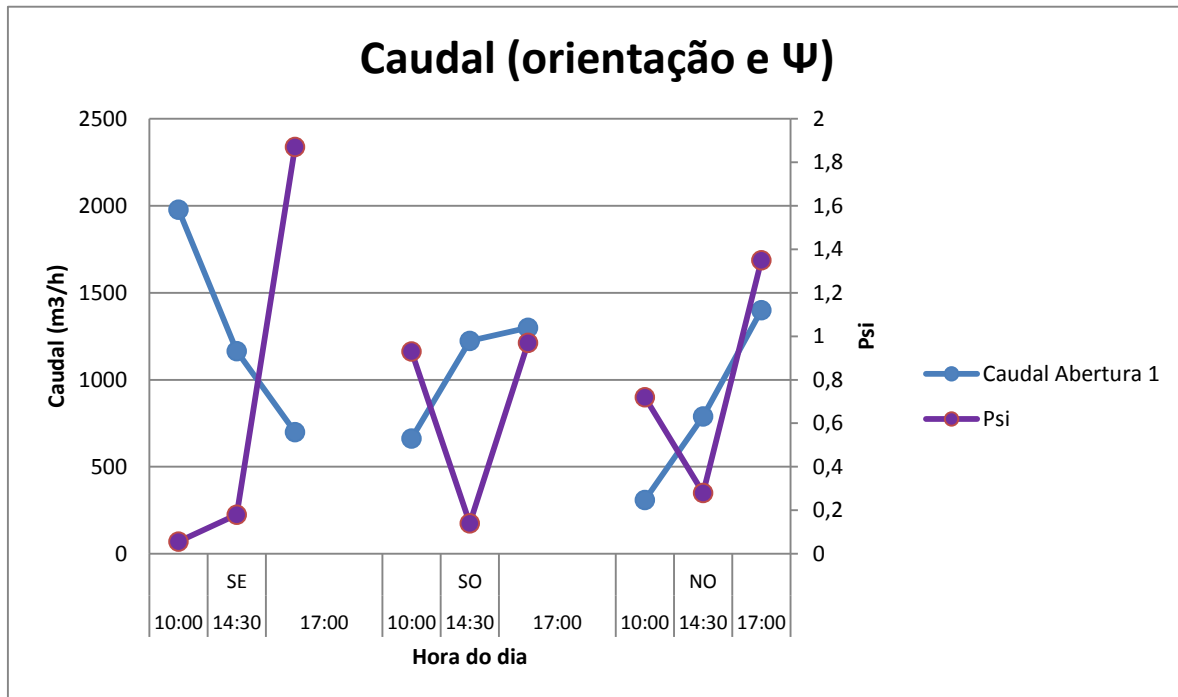


Figura 41 – Variação do caudal, ao longo do dia, na abertura 1 em função do Ψ (Primavera 16-05-2010, céu limpo).

Analisando os perfis ao longo do dia, observa-se a variação, ao longo do dia em cada uma das fachadas, da relação entre o vento e a irradiância. Na fachada SE até às 14:30 a componente da irradiância vai ser dominante no estabelecimento do caudal, onde Ψ toma valores perto de zero. No resto do dia, à medida que a posição do sol em relação à fachada varia, a contribuição da componente eólica aumenta, atingindo o pico às 17:00 horas, onde o vento passa a ser o principal promotor do caudal. No caso da fachada virada a SO, o valor de Ψ é próximo de 1 às 9:30 e 16:00, que é quando se registam valores de irradiância menores. Às 14:30, quando o sol incide directamente sobre a fachada, Ψ é cerca de 0,2 indicando uma forte contribuição do Δp térmico no caudal. Quanto à fachada NO, o perfil de Ψ é semelhante ao do caso anterior, mas neste caso a sua variação deriva da oscilação na contribuição do vento, não estando directamente associada à posição do sol, já que esta fachada regista valores reduzidos de irradiância ao longo de todo o dia.

12.5.2 Efeito da irradiância

A resposta do caudal em função da irradiância já foi descrita anteriormente, no entanto a figura que se segue transmite uma visão mais alargada do edifício, permitindo a comparação entre as várias fachadas.

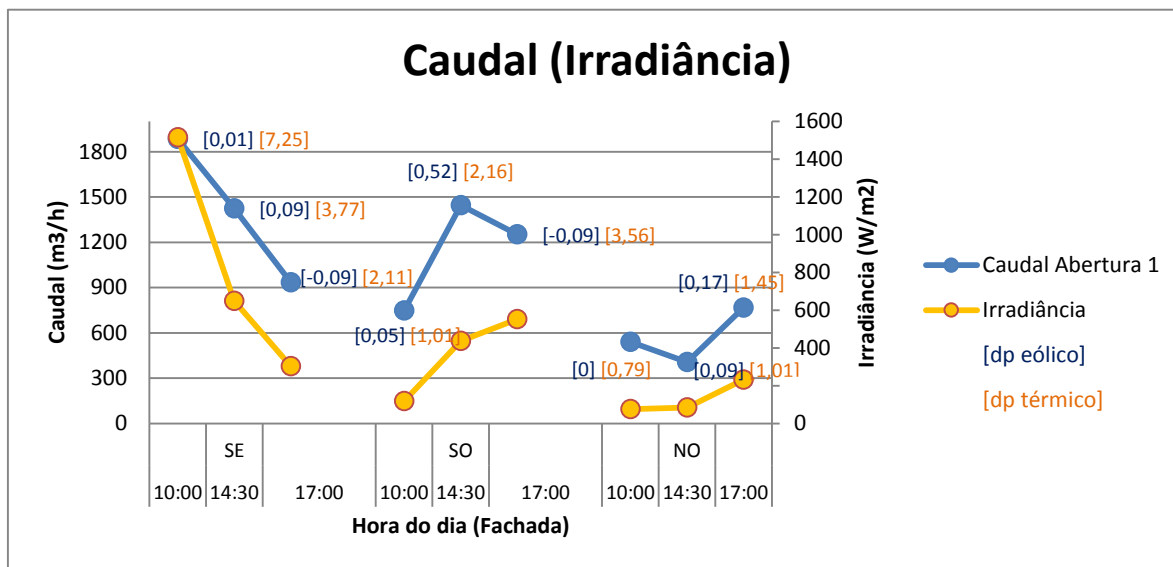


Figura 42 – Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo do dia (Verão 10-08-2010, céu limpo).

Através da figura é perceptível a evolução ao longo do dia do caudal para cada uma das fachadas, diminuindo na orientação a SE e aumentando nas restantes. Este perfil do caudal está directamente relacionado com a irradiância e de acordo com a evolução da posição do sol ao longo do dia, que se desloca de Este para Oeste. O caudal depende não só do calor recebido dentro da fachada, mas também de outros parâmetros, como a velocidade e direcção do vento, que neste caso é bastante reduzida, já que a maioria do Δp eólico toma valores perto zero, sendo sempre inferior ao Δp térmico.

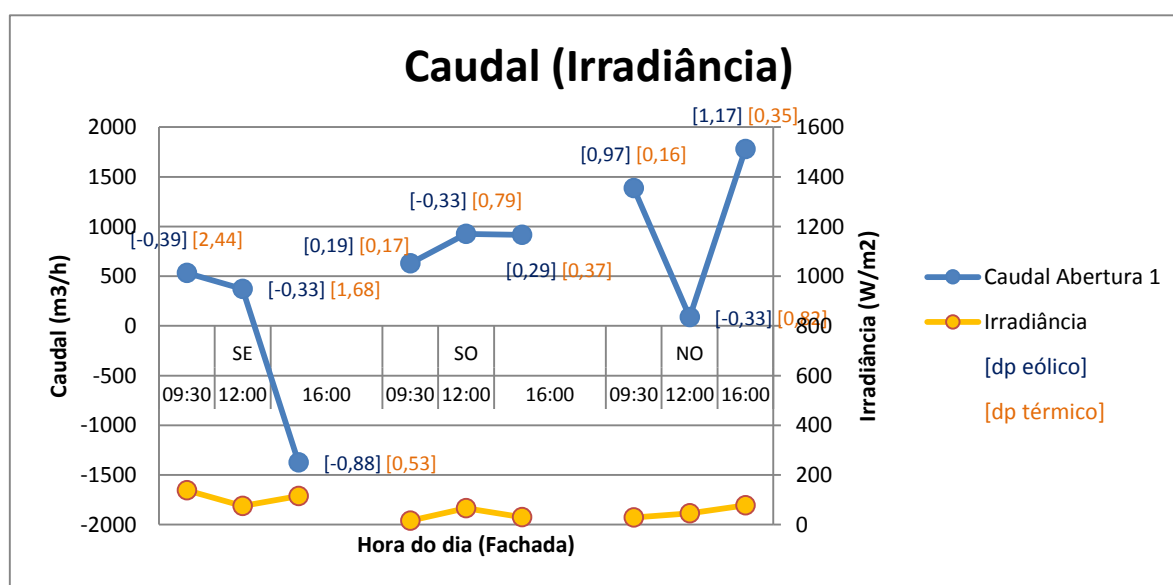


Figura 43 - Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo do dia (Primavera 16-05-2010, céu nublado).

Para um dia de céu nublado, Figura 43, o perfil do caudal vai ser diferente do caso anterior, resultado da conjugação da componente térmica e eólica. Apesar da irradiância não ultrapassar os 140 W/m^2 , o Δp térmico vai ser superior e de sinal contrário ao Δp eólico em alguns casos, como na fachada SE até às 12:00, contrariando a acção do vento. Na fachada SO no período das 9:30 e das 12:00 horas, os dois gradientes de pressão são semelhantes e com o mesmo sentido, contribuindo para um caudal ascendente. Para a fachada NO, às 9:30 e 16:00 horas, é o vento o responsável pela circulação do ar na fachada, enquanto às 12:00 a oposição entre os dois gradientes de pressão leva a um caudal bastante reduzido.

12.5.3 Temperatura interior da FDP

Cada uma das fachadas do edifício vai ter um perfil característico para a diferença de temperatura em relação ao exterior. Apesar de existirem variações a nível individual, conforme o exposto em 12.4, é possível identificar um padrão global para cada orientação. Um exemplo bem definido para esse padrão está na figura que se segue:

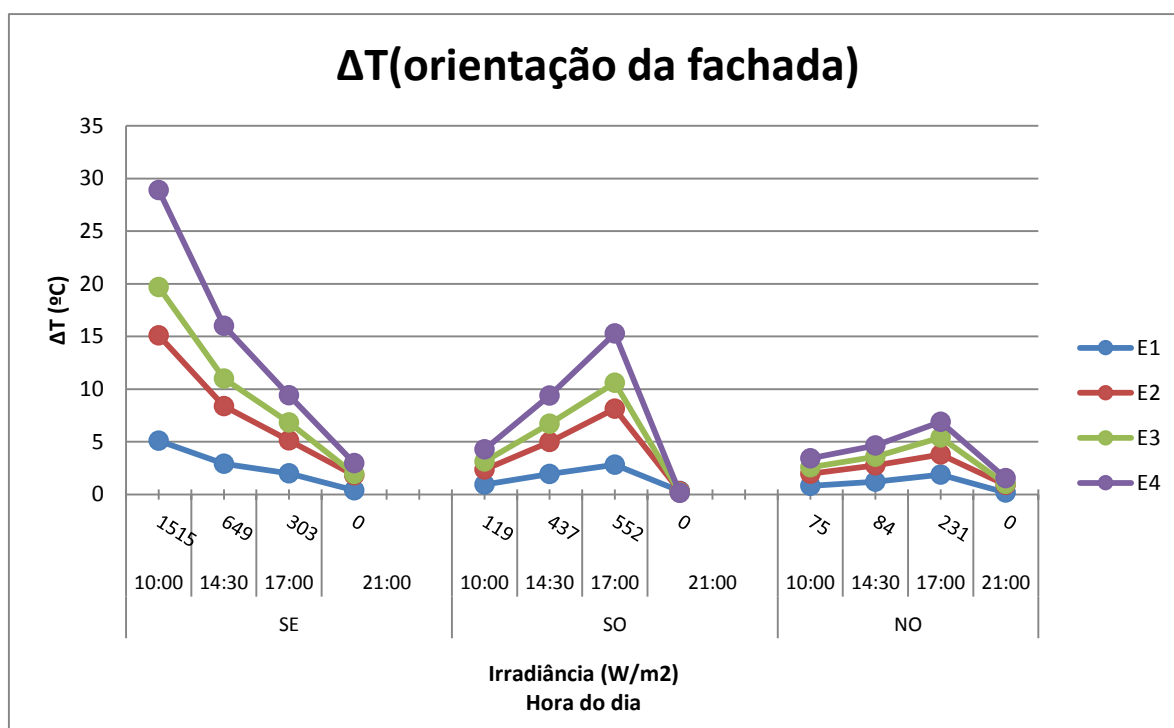


Figura 44 – Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 02-08-2010, céu limpo).

O perfil da temperatura ao longo do dia acompanha a variação da irradiância incidente na fachada, à semelhança do caudal na Figura 42. De uma forma global para todas as orientações a temperatura aumenta na vertical, de E1 para E4, e atinge o valor mínimo no período da noite.

Numa análise individual temos na fachada virada a SE um ΔT elevado ao início da manhã, já que o sol nasce a Este existindo assim maior incidência da irradiância, e diminui ao longo do dia. Na orientação SO é ao meio da tarde que a diferença de temperatura atinge o máximo, novamente ligada à posição do sol. No caso da fachada NO, o gradiente de temperatura tem poucas oscilações ao longo do dia, dado que este lado do edifício acaba sempre por ter os menores valores de irradiância.

12.5.4 Estações do ano

Os parâmetros que definem a circulação do ar na fachada vão variar ao longo do ano, de acordo com cada estação, no entanto, o conjunto de dados e resultados disponíveis não permitiram estabelecer uma relação evidente entre o padrão do caudal e a estação do ano. Na Figura 45 encontram-se os perfis sazonais de cada fachada:

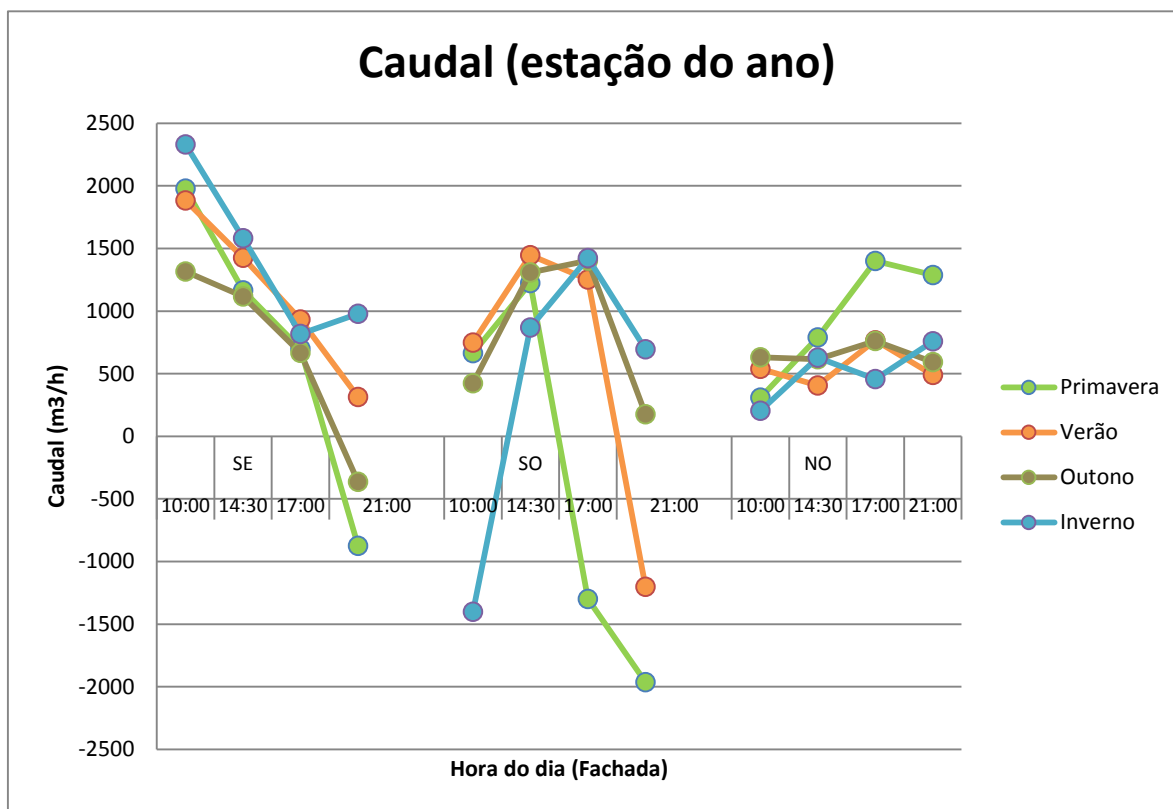


Figura 45 – Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo das estações do ano (Primavera:16-05-2010, Verão:10-08-2010, Outono:07-09-2010 e Inverno:02-02-2010, céu limpo).

Observando a figura verifica-se que os perfis do caudal para cada fachada se mantêm relativamente constantes ao longo do ano, no entanto destacam-se alguns aspectos importantes, como as diferenças entre caudais para a fachada SE às 10:00 horas ou o pico do caudal na fachada NO às 17:00 horas na Primavera, que se devem às características, do vento e irradiância, do dia em questão e não tanto à estação do ano. Esta aleatoriedade das características individuais do caudal podem ser observadas comparando os resultados da Figura 45 com a seguinte figura:

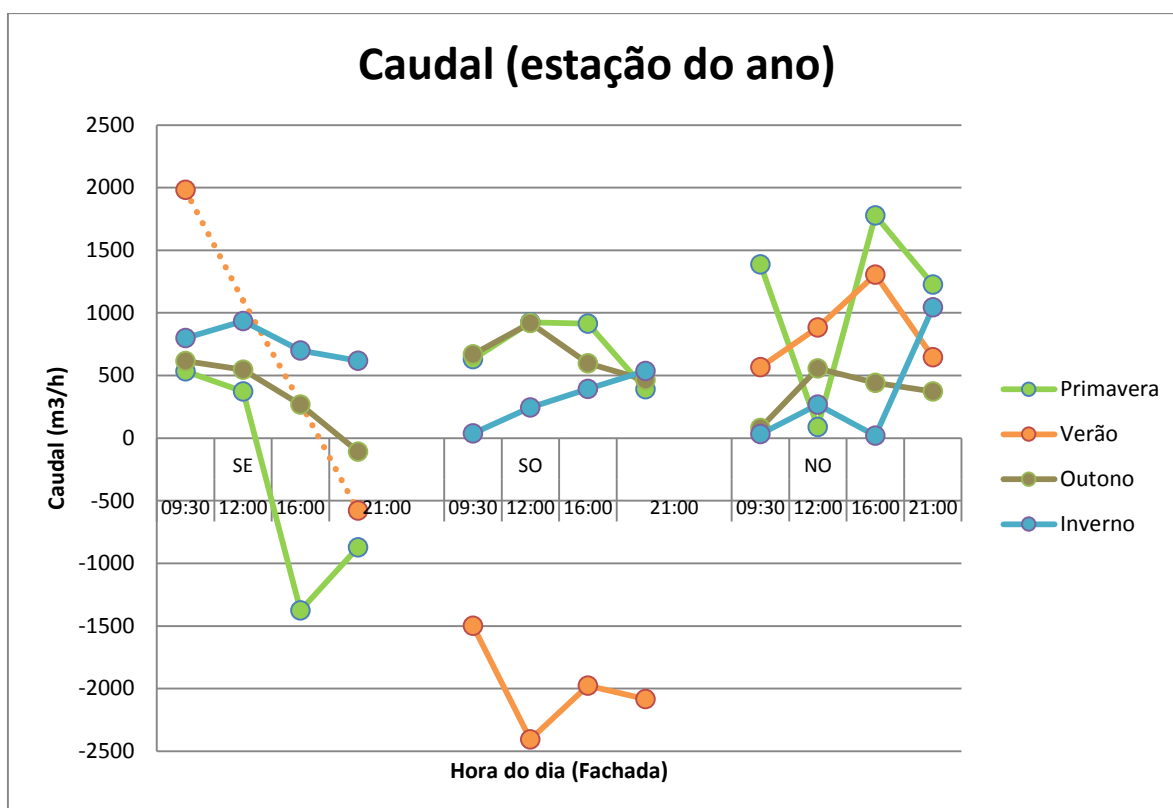


Figura 46 - Variação do caudal na abertura 1, em cada fachada, ao longo das estações do ano (Primavera:08-05-2010, Verão:02-08-2010, Outono:05-09-2009 e Inverno:09-12-2009, céu nublado). (A linha a tracejado indica a falta de resultados)

Os perfis da Figura 46 vão ser bastante diferentes do caso anterior, que apesar de serem referentes à mesma estação do ano, têm um padrão diferente, devido à diferença das condições climáticas registadas.

O reduzido número de dias analisados, resultante do conjunto de dados disponíveis, acaba por não permitir uma visão alargada das variações sazonais, conjugado com o facto de que a circulação do ar vai depender das características do vento e da irradiância, que variam numa escala de tempo de horas, tornando difícil estabelecer um padrão sazonal para o caudal.

12.6 Validação dos resultados

A validação dos resultados foi feita através da comparação dos gradientes de temperaturas dentro da fachada, ΔT , entre os resultados obtidos pelo Ventil e os dados provenientes da campanha experimental. Através desta comparação verificou-se que os dois conjuntos de dados eram concordantes e apresentam perfis semelhantes, apesar de existirem diferenças de amplitude. Estas diferenças devem-se às hipóteses consideradas durante a simulação da fachada, como a atribuição do calor exclusivamente à irradiação, não contabilizando o calor armazenado ao longo do dia, e à estrutura do modelo, onde existe um maior isolamento entre os vários espaços.

Nos parágrafos seguintes é feita uma comparação entre os valores de ΔT obtidos pelo Ventil e os registados na campanha. Os resultados apresentados encontram-se divididos por fachada do edifício e representam um exemplo para cada situação, no entanto partilham das mesmas características do restante conjunto dos resultados da simulação. De referir ainda que em algumas situações (maioritariamente na fachada SE), por falta de registos ou falhas durante as medições, não se encontram representados alguns pontos.

12.6.1 Fachada SE

Para esta fachada existiam falhas nos registos dos valores da temperatura, sendo por isso apenas apresentados alguns espaços da fachada.

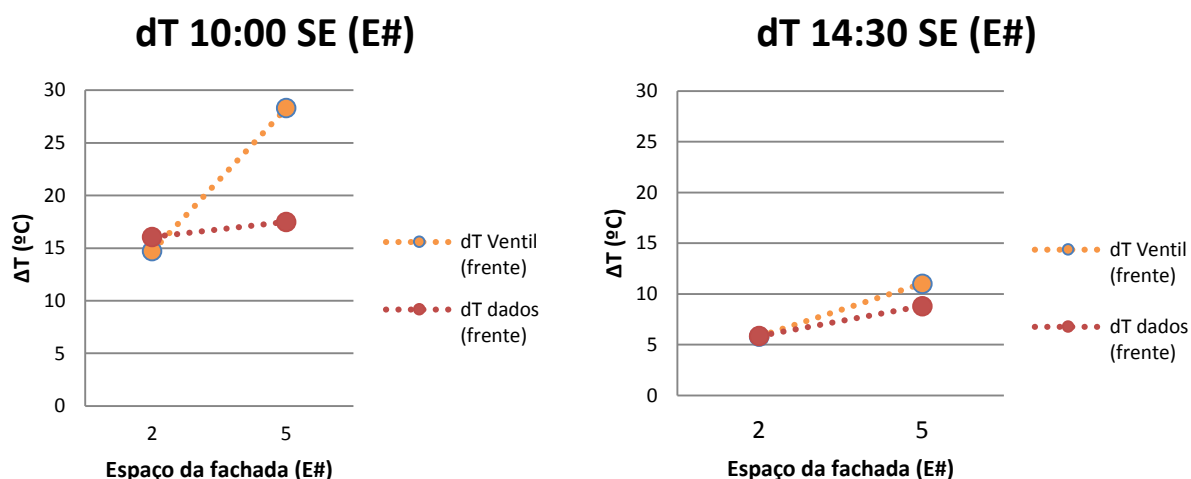


Figura 47 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Primavera, 16-05-2010, céu limpo). (A linha a tracejado serve apenas de auxílio à visualização do gráfico, não implicando um ligação entre os pontos)

Nesta fachada às 10:00 horas observa-se uma grande diferença para o espaço E5, entre ΔT dos resultados e da campanha. Esta diferença pode ser explicada pela existência de um caudal entre fachadas que, devido ao ângulo de incidência do vento, vai dar origem a coeficientes de c_p de sinal oposto entre as fachadas adjacentes, exemplificado na seguinte figura:

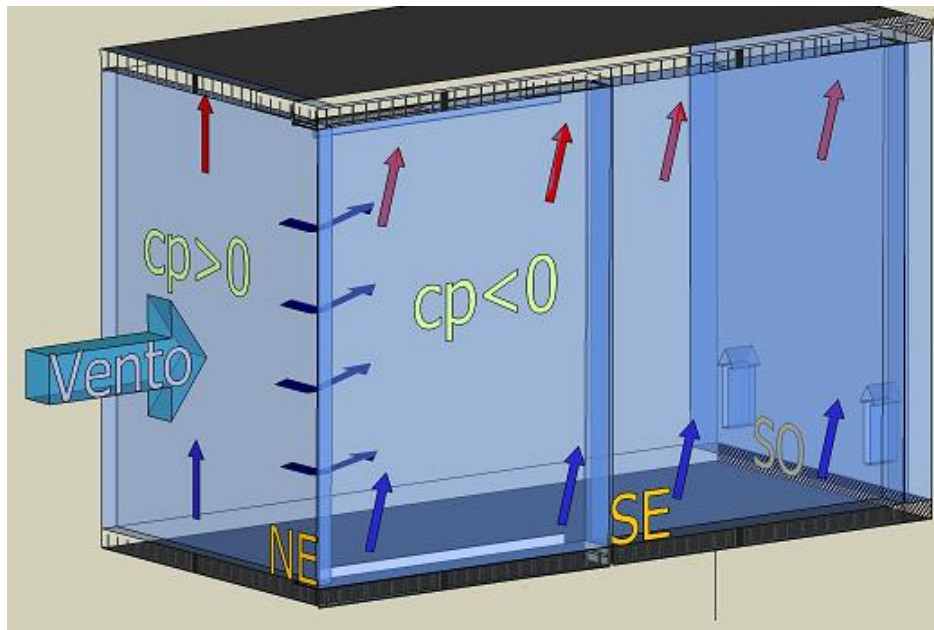


Figura 48 – Exemplo da circulação do ar entre fachadas.

A fachada Nordeste regista valores muito baixos de irradiância, o que leva a uma menor temperatura do ar da FDP, em relação às restantes orientações do edifício. Para a situação das 10:00 horas da Figura 47 o vento vai incidir nesta fachada, criando um Δc_p decrescente de NE para SO, o que leva a que algum do ar, mais frio, da fachada NE circule para a fachada SE, resultando assim em ΔT medidos inferiores aos obtidos nas simulações.

Para as 14:30, esta situação já não acontece, sendo os perfis bastante próximos.

12.6.2 Fachada SO

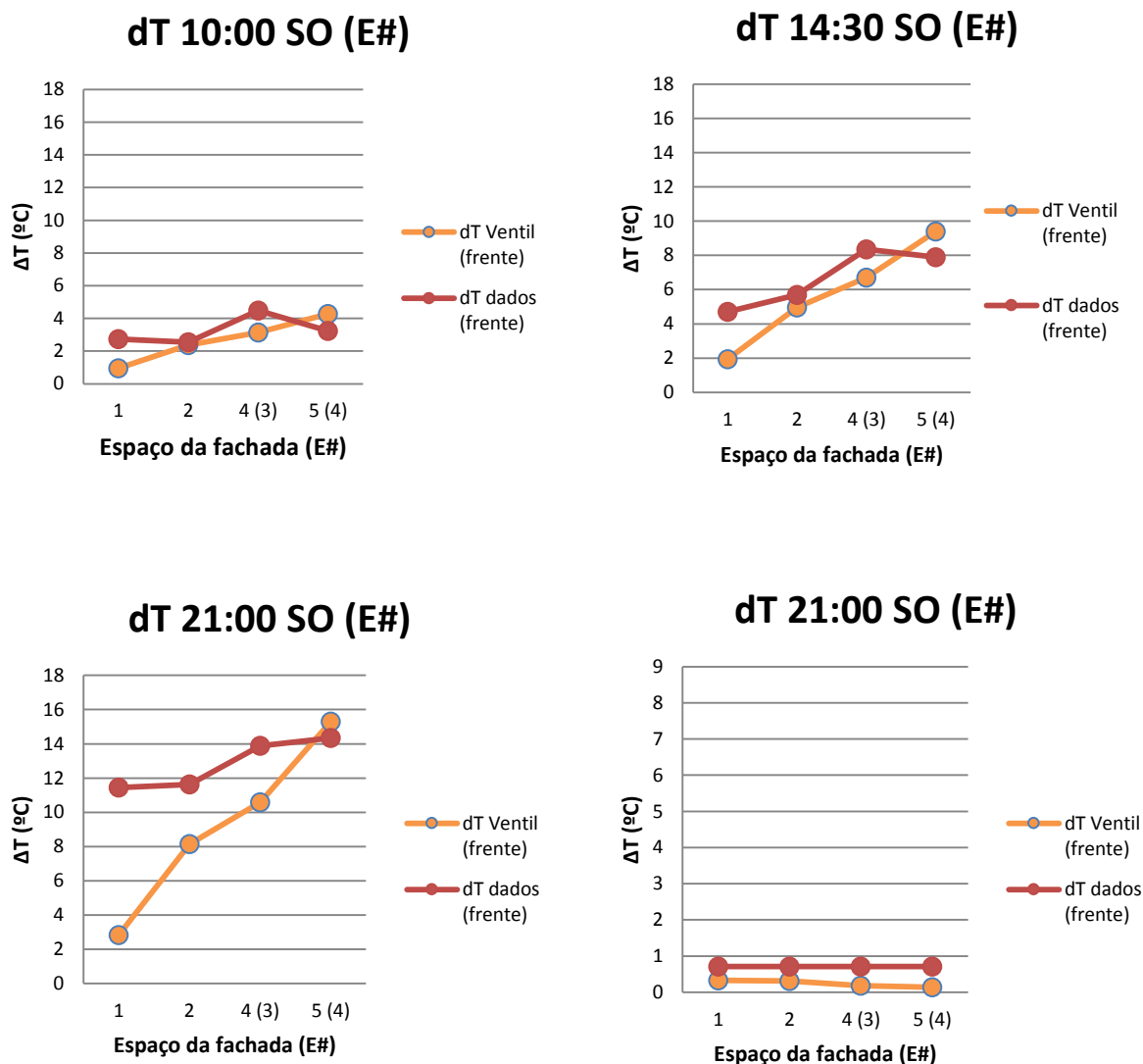


Figura 49 – Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 10-08-2010, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis referem-se ao modelo sem sombreador, para os horários em que este se encontrava subido)

Pela Figura 49 observa-se, no período entre as 10:00 e 14:30, que ambos os perfis são semelhantes, sendo a diferença ΔT máxima entre eles de 2°C, o que é bastante reduzido, devendo-se ao calor contido na fachada que não foi contabilizado, para estas horas, nas simulações. Às 17:00 horas valor simulado de ΔT encontra-se abaixo dos dados da campanha, destacando-se a diferença no espaço E1. Estes resultados com um ΔT inferior devem-se à não contabilização do calor armazenado na fachada, que se vai acumulando ao longo do dia, e que ao final da tarde atinge valores consideráveis.

Para o período da noite, os dois perfis são quase idênticos, situando-se o ΔT abaixo de 1°C, mostrando uma boa aproximação do modelo.

12.6.3 Fachada NO

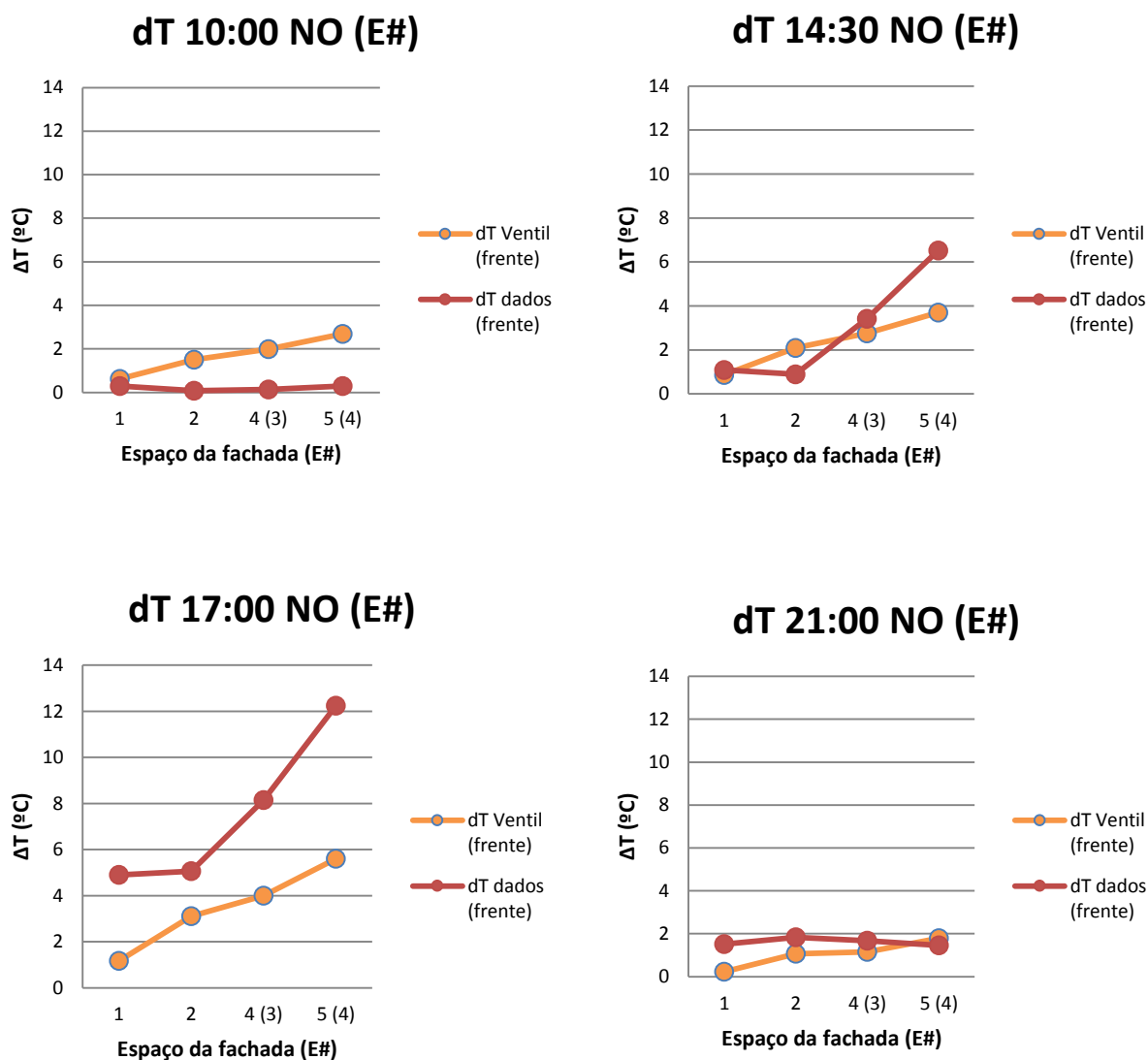


Figura 50 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Outono, 07-10-2009, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis referem-se ao modelo sem sombreador, para os horários em que este se encontrava subido)

A Figura 50 mostra que, excepto o das 17:00 horas, todos os outros perfis de temperatura são bastante semelhantes, mostrando uma boa aproximação entre os resultados obtidos e os registos da campanha. Para o caso das 17:00 horas, a diferença observada deve-se ao ilustrado na Figura 48, onde existe o transporte de ar quente da fachada adjacente SE para a fachada NO, influenciando o ΔT medido.

12.6.4 Atrás do sombreador

Para a fachada virada a SE não foi possível estabelecer uma relação entre os resultados e os dados da campanha, havendo diferenças tanto na amplitude como no perfil. Para as restantes orientações não aconteceu o mesmo, sendo apresentados na seguinte figura os valores atrás do sombreador, nas horas em que este se encontrava descido.

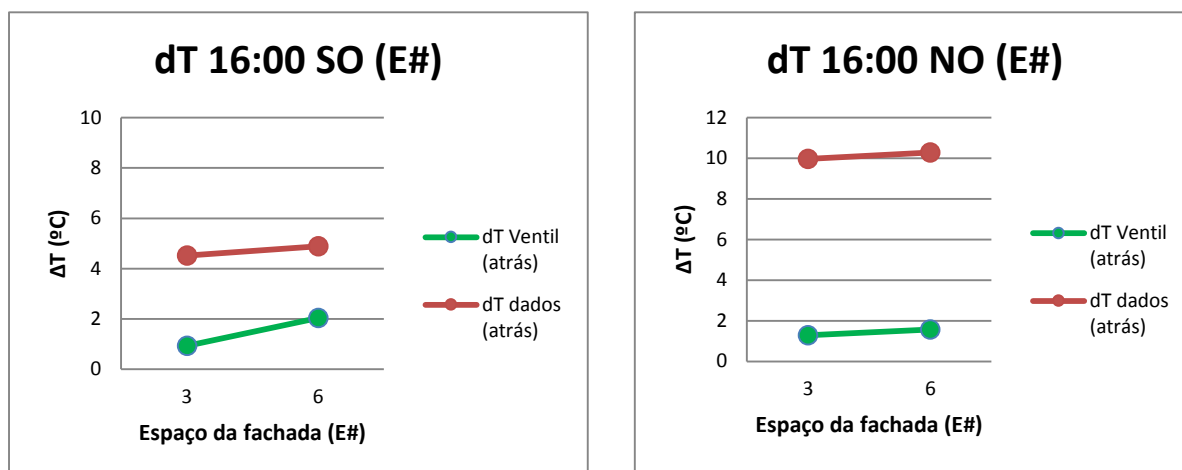


Figura 51 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Inverno, 09-12-2009, céu nublado).

Para estas orientações da fachada, foi possível observar um padrão comum ao longo dos vários dias analisados. Na fachada SO existe, numa grande parte dos resultados, um diferença na amplitude do ΔT , com os valores dos dados superiores, o que se deve ao calor armazenado na fachada ao longo do dia. Na fachada virada a NO a situação vai ser parecida, encontrando-se o perfil dos dados acima do perfil do Ventil, pelas mesmas razões da fachada SO.

12.7 Comparação de métodos: irradiância e calor armazenado

O programa Ventil contabiliza o calor na fachada através de uma variável que representa o calor gerado no espaço. Apesar de neste trabalho o calor considerado ter sido, quase exclusivamente, com base na irradiância, poderia ter sido adoptada outra metodologia, estimando o calor através do ΔT entre a fachada e o exterior, recorrendo à expressão (43). Esta última abordagem não foi seguida para o período do dia, porque os valores de irradiância disponíveis permitiam um maior rigor na estimativa do calor, ao contrário do ΔT , que serviria para calcular uma média, além de que em alguns casos, foram detectadas incorrecções nos dados. No entanto, de modo a exemplificar a equivalência entre estas duas abordagens, foram realizadas algumas comparações dos resultados obtidos, que se encontram nas seguintes figuras:

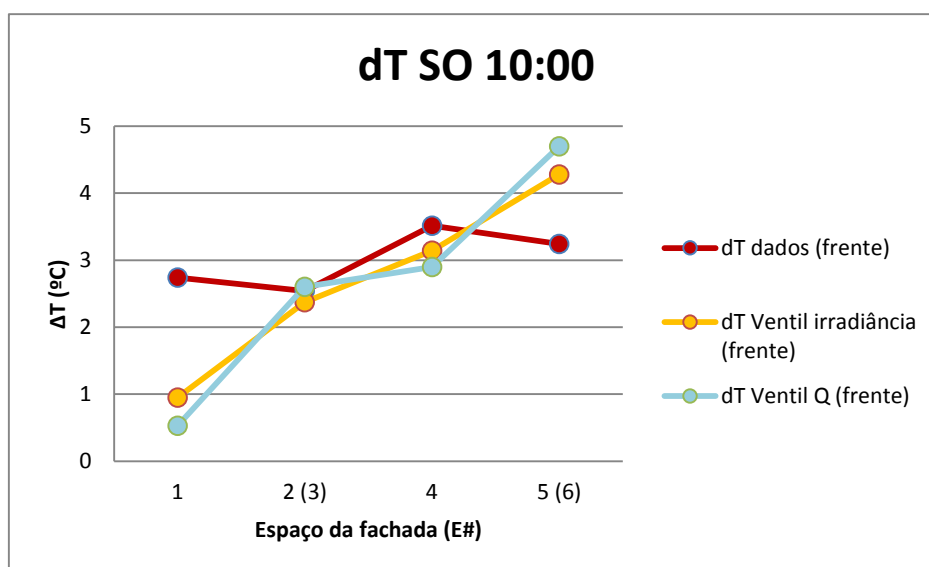


Figura 52 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Verão, 10-08-2010, SO, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior)

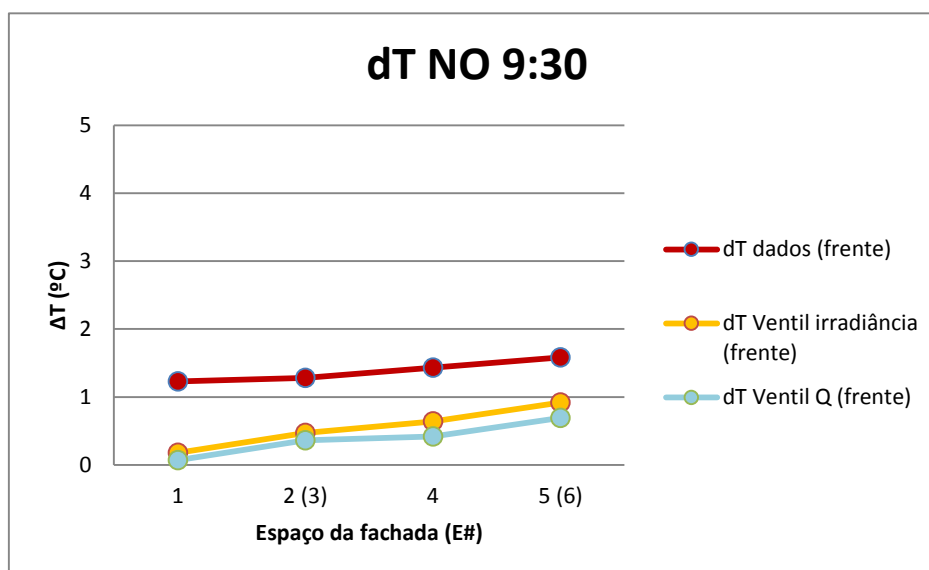


Figura 53 - Variação diária da temperatura em relação à temperatura exterior, em cada espaço da fachada (Outono, 07-09-2010, NO, céu limpo). (Os espaços entre parêntesis correspondem à secção sombreador-vidro interior)

Através da Figura 52 e Figura 53 é possível verificar que o ΔT obtido pelos dois métodos é bastante semelhante, o que significa que existe a possibilidade de seguir qualquer uma das abordagens para determinar o calor na fachada. Estas duas figuras referem-se a situações em que os resultados eram semelhantes, no entanto, no conjunto dos resultados obtidos para esta comparação, observaram-se situações onde existiam diferenças significativas entre os dois métodos, resultantes das aproximações e hipóteses consideradas, como a utilização de uma diferença de temperatura média da fachada ou uma divisão do calor armazenado em função do volume de cada espaço.

Além da diferença de temperatura, também o caudal obtido foi semelhante, como se pode ver pela seguinte tabela:

Tabela 27 – Comparação do caudal obtido pelos dois métodos.

Dia	Caudal (m^3/s)	
	Método da irradiância	Método do calor armazenado \dot{Q}
10-08-2010 (Figura 52)	748,3	759,2
07-09-2010 (Figura 53)	80,9	50,1

Da mesma forma que os gradientes de temperatura, o caudal obtido com os dois métodos também são parecidos, verificando-se uma pequena diferença para o segundo caso, que não é significativa dada a ordem de grandeza do caudal.

13 Discussão dos resultados

Os dois parâmetros responsáveis pela ventilação de uma fachada de dupla (FDP) pele são a irradiância e o vento. Apesar de cada um, de forma individual, ter a capacidade de estabelecer um caudal, é da conjugação de ambos que resulta a circulação do ar.

Os resultados mostram que a irradiância, através do efeito de impulsão, criado pelo gradiente de temperatura do ar dentro da fachada relativamente ao exterior, vai promover um caudal ascendente, tanto em dias de céu limpo (Figura 34) como de céu nublado. A sua influência é mais notória em dias de céu limpo, onde a evolução do caudal acompanha a variação da irradiância ao longo do dia. Em dias de céu nublado, a sua influência, apesar de estar presente, vai diminuir, fazendo sobressair a contribuição do vento (Figura 35), que se identifica pelas divergências entre o perfil do caudal e da irradiância.

A acção do vento resulta da conjugação de duas componentes, a pressão local nas aberturas da fachada, representada pelo coeficiente c_p , em função do ângulo de incidência e a velocidade. O diferencial de pressões, Δp , gerado estabelece o sentido do caudal (Figura 32).

O gradiente de pressão entre as aberturas da fachada é sempre, e naturalmente, o motor que estabelece o caudal, quer tenha origem térmica ou eólica. A contribuição relativa de cada uma destas fontes para a circulação do ar na fachada pode ser analisada através de um parâmetro adimensional Ψ (Figura 33), em que valores superiores à unidade indicam uma influência predominante do vento, enquanto valores inferiores a um representam uma maior contribuição da irradiância.

A combinação das características do vento com a irradiância vai se reflectir não só no caudal, mas também nos vários regimes de circulação do ar (12.1). No conjunto dos resultados foram identificados quatro situações diferentes da circulação do ar, sendo as duas mais comuns o caudal ascendente e descendente (Figura 31).

O caudal ascendente resulta de três possíveis situações: a contribuição da irradiância e o vento complementam-se; o efeito de impulsão sobrepõem-se ao vento; ou o valor de c_p no topo é inferior ao da base da fachada. Quando o caudal é descendente, principalmente nos períodos da noite quando não existe irradiância, o c_p da base da fachada é menor que o do topo.

Identificaram-se dois tipos menos comuns de circulação do ar aqui denominados de regimes mistos, em que a circulação interna na fachada apresenta sentidos não uniformes de fluxo. No regime misto 1 o caudal descende na frente da fachada, devido à acção do vento, e sobe atrás do sombreador, resultante do calor armazenado, proveniente da irradiância na fachada. Quanto ao regime misto 2, revelou ser o mais complexo, com dois padrões distintos de circulação do ar, um na metade inferior e outro na metade superior da fachada. Este tipo de circulação poderá estar relacionado com a acção contraditória entre o vento e a irradiância, onde o gradiente do c_p impõe um caudal descendente, enquanto a estratificação do ar causa um caudal ascendente.

Para o caudal ascendente (Figura 36) verificou-se um aumento da temperatura na vertical, causado pela irradiância na fachada e a estratificação do ar. No caso do caudal descendente (Figura 37), o perfil vai ser decrescente, o que significa que o ar aquece do topo para a base da fachada, seguindo o sentido do caudal. Durante a noite a diferença de temperatura entre o canal da FDP e o exterior, ΔT , é diferente de zero, ao contrário do esperado, indicando a influência do calor armazenado dentro da fachada. Este calor foi estimado a partir de um ΔT médio dentro da fachada, permitindo assim a sua contabilização no modelo e a obtenção de um gradiente de temperatura. Apesar deste gradiente nocturno de temperatura por si só ter pouca contribuição para o caudal, comparativamente ao vento, mostra que a FDP pode funcionar como uma zona de permuta de calor, podendo esta particularidade ser explorada para efeitos de climatização do edifício. Como exemplos da conjugação das FDP com um sistema de climatização, recorrendo a um sistema de aberturas variável, temos: no Inverno, ao ser regulado para funcionar como um sistema de admissão, permite aquecer o interior do edifício, ou no Verão, através do modo de exaustão, pode complementar o arrefecimento do edifício, promovendo a circulação do ar de um local mais frio (espaços no centro do edifício, poço das escadas,...) para os locais de ocupação.

Em relação ao caudal misto 1, verifica-se um ΔT reduzido, resultado da baixa irradiância na fachada, e um perfil de temperatura quase uniforme, indicando uma mistura do ar entre os vários espaços, causada pelas circulações internas na fachada.

As análises individuais indicavam que uma das componentes que influenciava a temperatura dentro da fachada era o caudal, por isso foi ilustrado na Figura 40 um exemplo dessa situação, onde se observa que quanto maior o caudal menor o gradiente de temperatura. Esta relação aplica-se a todos os tipos de caudal, quer sejam globais da fachada ou às circulações internas, e está relacionada com o tempo de exposição do ar à irradiância na fachada.

O efeito do vento torna-se difícil de avaliar, pois para uma determinada direcção de incidência, os coeficientes de pressão criados em cada uma das fachadas vão ser diferentes, resultando em padrões de circulação e caudais distintos. Na Figura 41 é possível observar que, apesar da variabilidade da influência do vento em cada fachada, a sua contribuição vai estar dependente do Δp térmico, quer tenha origem na irradiância ou na inércia térmicas das componentes da fachada, acompanhando o deslocamento do sol ao longo do dia.

A contribuição da irradiância (Figura 42 e Figura 43) está de acordo com as análises individuais já realizadas, onde se verificou que estabelece um caudal ascendente e em algumas situações contrária e se sobrepõe ao efeito do vento. Comparando as três fachadas foi possível observar a variação do caudal com a posição do sol em relação à fachada, favorecendo a orientação SE da parte da manhã, a SO ao meio do dia e a NO já no final da tarde. A temperatura dentro da fachada (Figura 44) também está relacionada com a irradiância incidente e, da mesma forma que o caudal, segue o deslocamento do sol em relação à fachada.

Numa análise sazonal do caudal (Figura 45), verificou-se que os perfis eram semelhantes ao longo das várias estações, para cada orientação da fachada, existindo, no entanto, alguns pontos em que as diferenças eram significativas. Estas diferenças (Figura 46) estão relacionadas com as características dos parâmetros que definem o funcionamento da fachada, que além de serem diferentes de dia para dia, variam numa escala horária, sendo por isso difícil definir um perfil representativo de cada estação do ano.

Outro aspecto importante no funcionamento de uma FDP é a envolvente do edifício e as suas características. Este aspecto, apesar de não ter sido abordado de forma individual, esteve sempre presente ao longo deste trabalho, como por exemplo na correcção dos dados do vento (7.2) onde se teve de considerar o relevo da cidade em redor e nos valores da irradiância da campanha experimental, que indirectamente traduzem a contribuição da paisagem envolvente, como o sombreamento ou mesmo a reflexão da radiação dos outros edifícios. Este ponto deve ser tido em conta na elaboração de modelos ou simulações teóricas, pois pode justificar um desfasamento entre os resultados obtidos e os que seriam esperados.

O programa de cálculo utilizado, Ventil, revelou ser uma ferramenta bastante útil, proporcionando um conjunto de resultados que permitiram fazer uma análise abrangente dos aspectos relevantes de uma FDP. No entanto revelou algumas limitações durante as simulações. Em alguns casos, quando a velocidade do vento era elevada, superior a 8 m/s , e o c_p no topo da fachada inferior ao da base, combinado com valores de irradiância na ordem dos 700 W/m^2 , existiram dificuldades em fazer convergir o modelo, mesmo ajustando os valores da estimativa inicial de modo a traduzirem um caudal descendente. Durante fase da elaboração do modelo, também se verificou que a presença de aberturas de pequena dimensão e bastante próximas, causava dificuldades na execução do modelo, obtendo por vezes resultados incorrectos, levando assim a algumas das simplificações consideradas no modelo da fachada.

A validação dos resultados foi realizada através da comparação do gradiente de temperatura obtido pelo modelo com os dados da campanha. Em grande parte do conjunto de resultados, verificou-se uma boa aproximação do modelo (Figura 49 e Figura 50) ao caso real. Para as divisões atrás do sombreador (Figura 51), apesar de existirem diferenças na amplitude do ΔT , devido às hipóteses consideradas, o perfil obtido revelou ser coerente com o da campanha experimental.

Para alguns resultados, principalmente para a fachada virada a SE (Figura 47), verificaram-se diferenças significativas entre os dois perfis de temperatura, indicando um desfasamento entre os resultados e o funcionamento real da FDP. A existência de algumas falhas no registo dos dados limitaram a análise a esta fachada, deixando incompleta a sua validação.

Parte do desfasamento entre os dois conjuntos de valores deve-se às simplificações utilizadas no modelo de simulação, como a não contabilização do fluxo de calor entre a fachada e o interior do edifício (que é reduzido) e de não ter sido considerada a existência calor armazenado dentro da fachada durante o dia (nos materiais constituintes dos vários elementos), assumindo que apenas a irradiância contribuía para o gradiente de temperatura. A diferença de comprimento entre as fachadas reais (aproximadamente 50 m a SE e NO e 8 m a SO) e o módulo simulado (2,7 m), bem como as comunicações entre fachadas (Figura 48) (não modeladas) contribui necessariamente para as diferenças encontradas.

O método para estimar o calor armazenado na fachada, utilizado neste trabalho apenas para o período nocturno, mostrou ser uma alternativa à contabilização da irradiância como fonte de calor (Figura 52 e Figura 53), sendo os resultados obtidos por estas duas abordagens bastante semelhantes. Para as simulações realizadas foi dada prioridade aos registos da irradiância, pois eram mais rigorosos e não tinham falhas, comparativamente aos valores de ΔT da campanha, no entanto estas duas formas de considerar o calor dentro da fachada, podem ser exploradas de modo a complementar o modelo, permitindo uma melhor aproximação dos resultados ao caso real.

14 Conclusão

Com este trabalho pretendeu-se analisar o funcionamento de uma fachada de dupla pele do tipo corredor e modo cortina exterior, ventilada naturalmente, com o apoio de um modelo numérico integral. Apesar de ser sabido que o funcionamento, incluindo a ventilação, de uma FDP assenta na irradiância e no vento, com este trabalho foi possível observar as complexas relações entre estes dois parâmetros.

A irradiância, indutora da impulsão interior, vai ter um efeito bastante claro na fachada, promovendo sempre um caudal ascendente. O caudal vai acompanhar as oscilações da irradiância ao longo do dia, sendo mais evidente quando o efeito do vento é claramente minoritário. Outro aspecto importante reside na inércia térmica dos materiais constituintes da FDP, permitindo que, mesmo durante a noite, a temperatura dentro da fachada permaneça superior à do exterior, com caudais naturalmente fracos.

Quanto ao vento, ao contrário da irradiância, a sua relação com o caudal em circulação na fachada vai ser mais complexa, podendo criar diversos padrões de circulação. A acção do vento resulta da conjugação de duas componentes, a pressão local nas aberturas da fachada, representada pelo coeficiente c_p , função da posição e do ângulo de incidência, e da velocidade. O diferencial de pressões, Δp , gerado estabelece o sentido do caudal.

A temperatura no interior da fachada vai ser sempre superior à do exterior, tanto ao longo do dia como durante a noite, durante as várias estações do ano. O gradiente de temperatura com o exterior está directamente relacionado com a irradiância incidente, ou, para o período na noite, com a inércia térmica dos componentes da fachada.

Numa perspectiva mais global verificou-se que, para o mesmo período horário, se obtêm diferentes padrões de ventilação, consoante a orientação da fachada. Estas variações estão naturalmente relacionadas com o seu posicionamento na envolvente, sujeitas a diferentes acções do vento, e à evolução do deslocamento do sol durante o dia.

O programa de simulação Ventil demonstrou ser uma ferramenta bastante útil para o tipo de análise efectuada, providenciando um conjunto de resultados que permitiram estudar os vários parâmetros do funcionamento da FDP. O modelo também revelou algumas limitações e pormenores que deveriam ser revistos, destacando-se: a interface do utilizador, que apesar de não limitar as suas potencialidades, tornaria mais fácil a sua utilização e uma revisão do modelo numérico, de modo a melhorar a convergência das equações em alguns casos.

Para trabalhos futuros existem alguns aspectos que podem ser explorados, como o melhoramento do modelo representativo da fachada, elaborando um modelo de toda a extensão da fachada, analisando a influência da dimensão da fachada na circulação do ar. Seria também interessante a análise do caudal nos cantos do edifício, onde existe comunicação entre fachadas com orientações diferentes. Por último, um estudo da fachada a várias cotas, como o topo do edifício e junto da base, poderia ser relevante para estudar a influência que envolvente do edifício teria nestes níveis.

15 Bibliografia

- Aelenei, Laura. 2011. "SOLAR XXI - Um Marco Tecnológico em Direcção à "Energia Zer0".” Presentation, LNEG.
- Alcir. 2013. "Conceito e Infra-Estruturas.” Torre de Monsanto. Retrieved 2013 (<http://www.torredemonsanto.com/>).
- Barbosa, Ricardo. 2007. "Paredes de Tombe.” Planeta CAD. Retrieved 2013 (http://www.planetacad.com/PresentationLayer/Artigo_01.aspx?id=59&canal_ordem=0402).
- Belgian Building Research Institute. 2002. *Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades*. 1st ed.
- Best Facade. 2013. "Best Facade.” Retrieved January 2013 (<http://www.bestfacade.com/index.html>).
- Chow, W.K., W.Y. Hung, G.W. Zou, H. Dong, and Y. Gao. 2004. "Preliminary Experimental Study of Double-Skinned Façade.” Journal Article, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University; Harbin Engineering University.
- CIBSE 2007. "CIBSE Guides.” Norwich.
- D. Cóstola, B. B. J. L. M. H. 2009. "Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs.” Building Physics and Systems, Eindhoven University of Technology.
- D.-L. 285/83, 31 d. M. D. R. n. 1.-I. S. e. D.-L. 3. ”. 2. d. S. D. R. n. 2.-I. S., ed. n.d. *RSA - "Regulamento de Segurança de Estruturas de Edifícios e Pontes"*. INCM.
- Ding, Wenting, Yuji Hasemi, and Tokiyoshi Yamada. 2005. "Smoke Control using a Double-skin Facade.” Symposium Report, Department of Architecture, Waseda University, Mitaka.
- Edimetal. 2009. "ATRIUM SALDANHA.” Edimetal. Retrieved 2013 (http://www.edimetal.pt/FT_Atrium_Saldanha.htm).
- FACAL 2006. "Fachada_Norfim.” in *Planta da fachada*.
- FACAL. 2012. "FACAL.” Retrieved December 2012 (<http://www.facal.pt/?page=1&lang=pt>).
- FACAL n.d. "Fachada Dupla Pele para Clima do Sul da Europa.” Congresso de Construção Metálica e Mista.
- Gipe, Paul 2004. P. 41 in *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*. Chelsea Green Publishing Company.
- Google. 2012. "Google Maps.” (<http://maps.google.pt/>).

- Harrison, K., & M.-B. T. 2003. "The Tectonics of the Environmental Skin." University of Waterloo, School of Architecture.
- International Energy Agency. 2011. "Annex 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings." International Energy Agency.
- Kragh, M. 2000. "Building Envelopes and Environmental Systems." Presentation, Modern Façades of Office Buildings Delft Technical.
- Kundu, Pijush K. and Ira M. Cohen 2002. "Fluid Mechanics." Pp. 117-119 in *Fluid Mechanics*. 2nd ed. Academic Press.
- Kundu, Pijush K. and Ira M. Cohen 2002. "Fluid Mechanics." Pp. 18-19 in *Fluid Mechanics*. 2nd ed. Academic Press.
- Manwell, J. F., J. G. McGown, and A. L. Rogers 2002. P. 45 in *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd.
- Ministério da Economia e Inovação. 4 de Abril de 2006. "Decreto-Lei nº 79/2006 Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios."
- Miranda, Pedro M. A. d. 2001. *Meteorologia e Ambiente*. 2nd ed.
- MSF. 2009. "Sustentabilidade." Natura Towers. Retrieved 2013 (<http://naturatowers.msf-turim.pt/>).
- Munson, Bruce R. and Donal F. Young 2009. Pp. 318-326 in *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 4th ed. Iowa: John Wiley & Sons, Inc.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi. 2002. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 4th ed. John Wiley & Sons.
- Norfin. 2011. "Office Park Expo." Norfin. Retrieved 2013 (<http://www.norfin.es/pt/investimento-e-fundos/fundos-representativos/Office-Park-Expo/28/>).
- Norfin. 2012. "Norfin." Norfin. Retrieved December 2012 (<http://www.norfin.pt/pt/>).
- Oke, T. R. 1987. "Boundary Layer Climates." Pp. 266-267 2nd ed. Methuen & Co. Ltd.
- Orme, Malcom, Artin Liddament, and Andrew Wilson. 1998. "AIVC Technical Note 34." Technical Note, Air Infiltration and Ventilation centre.
- Perino, Marco. 2008. "State-of-the-art Review, Vol.2A. Responsive Building Elements." Review, Aalborg University.
- Poirazis, Harris. 2006. "Double Skin Façades: A Literature Review." SHC, Lund.
- Rodrigues, António M., António C. Piedade, and Ana M. Braga 2009. "Térmica de Edifícios." Pp. 86-87 1st ed. Amadora.

RSA. - "Regulamento de Segurança de Estruturas de Edifícios e Pontes". *D.-L. 285/83, 31 de Maio, D. R. n.º 125 - I Série, e D.-L. 357/85. 2 de Setembro, D. R. n.º 201 - I Série, INCM.*

Saelens, Dirk. 2002. "Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades." PhD Thesis, Burgerlijke Bouwkunde, Katholieke Universiteit Leuven - Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Leuven.

Saraiva, J. A. G., J. D. Delgado, and A. R. J. Borges. Novembro de 1985. "Um Programa de Cálculo Automático (PCA) de Ventilação Natural: VENTIL.FOR." Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Universidade de Lisboa, Lisboa.

Sedefian, Leon. 1979. "On the Vertical Extrapolation of Mean Wind Power Density." Journal, Environmental Conservation, New York State - Division of Air Resources, Albany.

Silva, Fernando M. d. 2003. "Ventilação Natural de Edifícios. Turbulência Atmosférica." PhD Thesis, IST, UTL, Lisboa.

Silva, Fernando M. d. 2012. "Aerodinâmica: Camada Limite Atmosférica." Documento de apoio à aula, Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa, Lisboa.

Silva, F. M. d., M. G. Gomes, A. Pinto, and I. P. e. A. M. Rodrigues. 2007. "Monitorização de edifícios com diferentes tipologias de fachada de dupla pele." Conference presentation, Congresso de Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional.

Silva, Fernando M. d. and F. Zanghirella. 2010. "Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. Expert Guide – Part 2: RBE, Chap. 4 – Advanced Integrated Facades." Annex 44, IEA.

Solla, Ignacio F. 2011. "The Steiff factory and the birth of curtain walling." *Façades Confidential*. Retrieved January 2013 (<http://facadesconfidential.blogspot.pt/2011/11/steiff-factory-and-birth-of-curtain.html>).

Spera, David A. 2009. "Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering." Pp. 492-493 2nd ed. ASME Press.

Spera, D. A. and T. R. Richards. 1979. "Modified Power Law Equations for Vertical Wind Profiles." U.S. Department of Energy, NASA, Ohio.

Sustaining: Tower Blocks. 2004. "Sustaining: Tower Blocks." Retrieved January 2013 (<http://www.theislingtonestate.com/SOA-present.htm>).

TNO. 2012. "TNO Innovation for Life." Retrieved December 2012 (<http://www.tno.nl/index.cfm?Taal=2>).

Warema. 2013. "Warema." Retrieved 2013 (<http://www.rollra.de/bilder/seitenmarkise380/BR417703102007.pdf>).

White, Frank M. 2003. P. 328 in *Fluid Mechannics*. 5th ed. McGraw-Hill.

World Architecture Map. 2013. "Double-skin Façade." World Architecture Map. Retrieved January 2013 (<http://www.worldarchitecturemap.org/tags/name/double-skin-facade>).

16 Anexos

16.1 Anexo 1: Coeficiente α

No cálculo do coeficiente α da Lei de Potência, foram considerados os seguintes dados:

Parâmetro	Valor
Data e hora dos dados utilizados	30-08-2009 às 17:40 horas
Velocidade do vento aos 10m (m/s)	5,9
Interferência média, λ	0,25
Distância do deslocamento, d (m)	7
Rugosidade (anemómetro e edifício), z_0 (m)	0,3
Distância x , ponto de referência-local a estudar (m) ⁵	600

Começou-se por calcular a velocidade de atrito no local da torre anemométrica (índice A),

$$u_{*A} = \frac{kU_A}{\ln\left(\frac{h_A - d_A}{z_{0A}}\right)}$$

bem como a espessura da camada limite no local do edifício (índice B),

$$\delta_B = z_{0B} \times \left[0,65 - 0,03 \times \ln\left(\frac{z_{0B}}{z_{0A}}\right)\right] \times \left(\frac{x}{z_{0B}}\right)^{0,8}$$

Com estes resultados foi possível obter a velocidade de atrito no local do edifício:

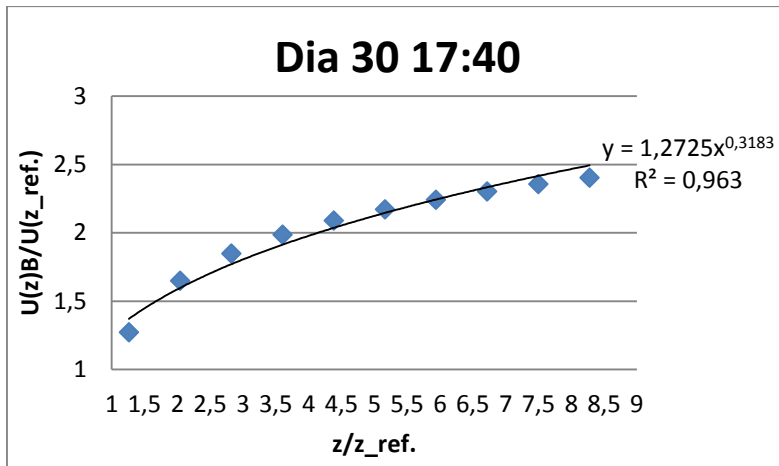
$$u_{*B} = u_{*A} \times \left[1 + \frac{\ln\left(\frac{z_{0B}}{z_{0A}}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_B}{z_{0B}}\right)}\right]$$

De seguida determinou-se a velocidade do vento a diversas cotas, entre os 12,8m (valor mais próximo do $z_{ref.}$) e os 82,9m (cota do piso 16 do edifício), com um espaçamento equivalente ao pé direito de cada piso do edifício, 7,8m:

$$U_B = \frac{u_{*B}}{k} \times \ln\left(\frac{z - d_B}{z_{0u_B}}\right)$$

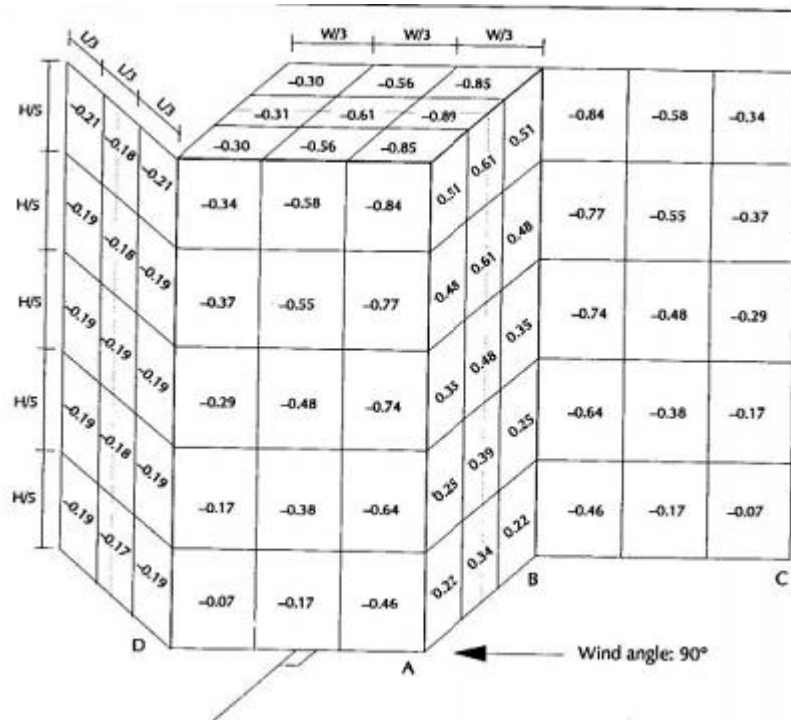
Por fim, calculou-se a razão entre a velocidade do vento estimada e o valor registado no local e também entre cada uma das cotas utilizada nos cálculos e a cota de referência, os 10m da torre anemométrica. Com este conjunto de valores traçou-se um gráfico, ao qual se aplicou uma recta de ajuste:

⁵ Valor correspondente à distância tanto da torre anemométrica, como do edifício, até à margem do rio.



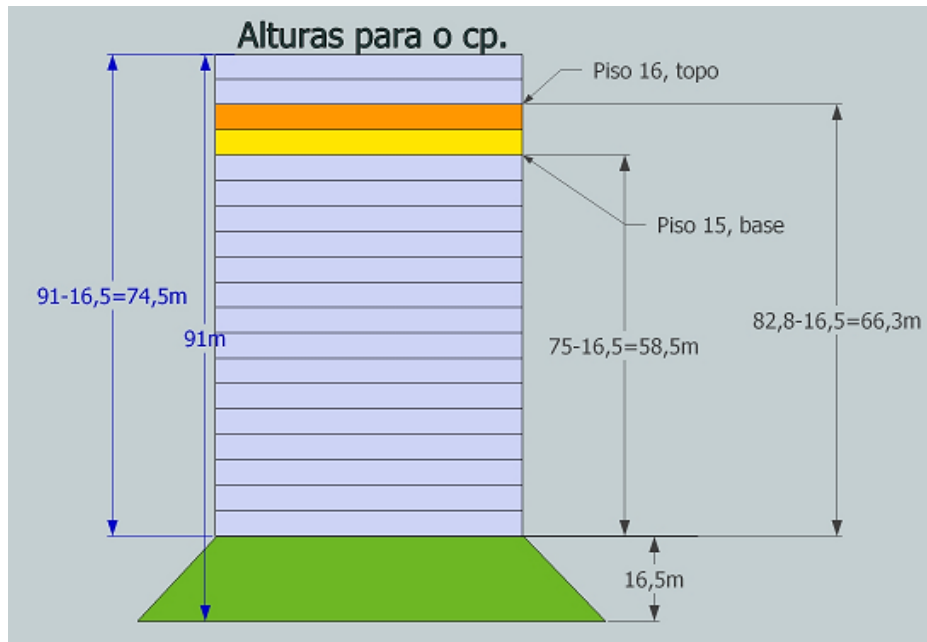
A equação desta recta de ajuste corresponde à Lei de Potência, em que o valor do expoente é o coeficiente α pretendido:

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



16.3 Anexo 3: Coeficiente c_p

Na figura que se segue encontram-se representadas as diversas alturas consideradas no cálculo do c_p . Como apenas é relevante a altura do edifício e de cada piso, não foi tido em conta a elevação sobre a qual assenta o edifício, que corresponde aos 16,5m subtraídos a cada um dos valores.



16.4 Anexo 4: Radiação solar – coeficientes em função da visibilidade

O valor de K para climas temperados é de 0,95.

Tabela 28 - Parâmetros em função da visibilidade. (Rodrigues, Piedade, and Braga 2009)

n	an	bn
1	1074,16	121,649
2	198,006	14,7575
3	70,1766	7,72576
4	30,3902	3,47353
5	13,3842	2,22222
6	5,59234	0,525392
7	2,93048	0,521649
8	0,606472	0,131341
9	0	0,768727

16.5 Anexo 5: modelo sem sombreador

